

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA SUSTENTABILIDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS
RENOVÁVEIS

Andrés Gabriel Arguedas Chaverri

**ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA NEBLINA NO LITORAL
NORTE DO PARQUE ESTADUAL SERRA DO MAR**

SOROCABA-SP

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA SUSTENTABILIDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS
RENOVÁVEIS

Andrés Gabriel Arguedas Chaverri

**ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA NEBLINA NO LITORAL
NORTE DO PARQUE ESTADUAL SERRA DO MAR**

Qualificação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis para obtenção do título de Mestre em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

Orientação: Profa. Dra. Kelly Cristina Tonello
Coorientador: Prof. Dr. Rogerio Hartung Toppa

Financiamento: CAPES

Sorocaba-SP

2025

Chaverri, Andrés Gabriel Arguedas

Análise de distribuição espaço-temporal da neblina no Litoral Norte do Parque Estadual Serra do Mar / Andrés Gabriel Arguedas Chaverri -- 2025.
93f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): Kelly Cristina Tonello
Banca Examinadora: Manoel Ferreira Cardoso, Rogério Deitali Bruno, Jakub Ceglarek, Luiz Carlos de Faria
Bibliografia

1. Detecção de neblina. 2. Mudanças climáticas. 3. Mata Atlântica. I. Chaverri, Andrés Gabriel Arguedas. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade
Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Andrés Gabriel Arguedas Chaverri, realizada em 12/03/2025.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Kelly Cristina Tonello (UFSCar)

Prof. Dr. Manoel Ferreira Cardoso (INPE)

Prof. Dr. Rogério Deitali Bruno (IFSP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que, desde o início desta jornada, estiveram ao meu lado, apoiando-me de perto e de longe. Minha gratidão se estende a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desta fase de intenso aprendizado. Em especial:

Ao Prof. Dr. Rogério Hartung Toppa, por ser um guia nesse percurso, incentivando-me a desenvolver um trabalho de qualidade e acreditando na minha capacidade como pesquisador. À minha orientadora, Profa. Dra. Kelly Cristina Tonello, por me oferecer o espaço e as ferramentas necessárias para a realização da pesquisa, além do apoio e motivação ao longo dessa caminhada.

Aos membros da banca, Profs. Drs. Manoel Ferreira Cardoso, Rogério Deitali Bruno, Jakub Ceglarek e Luiz Carlos de Faria, por suas contribuições valiosas, compartilhando experiência e conhecimento para aprimorar este trabalho.

A Maria Cecília, por estar sempre presente, pela paciência e por ser a melhor companheira ao longo desta jornada. E, claro, por tornar minha experiência no Brasil ainda mais bonita.

A mi familia, que estuvieron apoyándome desde casa y que, sin importar las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida, siempre creen en mí y me ayudan a ser mejor persona.

Também agradeço à Organização de Estados Americanos (OEA), ao Grupo de Cooperação Internacional de Universidades Brasileiras (GCUB) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por tornarem possível a realização dos meus estudos de mestrado no Brasil.

"Cada olhar sobre a paisagem é uma
nova descoberta, pois a natureza nunca
se repete"

John Muir

RESUMO

CHAVERRI, Andrés G Arguedas. Análise de distribuição espaço-temporal da neblina no Litoral Norte do Parque Estadual Serra do Mar. 2025. 93 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis) – Centro de Ciências e Tecnologias para Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba.

A detecção da neblina tem sido amplamente estudada durante décadas, tanto por sua importância em processos ecológicos, quanto aos diferentes impactos sobre as atividades humanas. Embora existam grandes avanços nas metodologias de detecção com imagens de satélite, ainda existem vazios na compreensão dos padrões de formação de neblina em várias regiões do mundo. Este estudo tem por objetivo analisar as dinâmicas espaço-temporais da neblina no Litoral Norte do Parque Estadual Serra do Mar (PESM-LN), São Paulo. O trabalho foi dividido em três capítulos. No primeiro capítulo, foi realizada uma revisão da literatura sobre estudos de detecção de neblina e nuvens baixas com imagens de satélite. O capítulo 2 focou na mudança da frequência da neblina ao longo do tempo, desenvolvendo um algoritmo com dados do satélite MODIS na plataforma Google Earth Engine. O capítulo 3 caracterizou o processo de formação da neblina e sua distribuição no PESM-LN, analisando as variáveis topográficas e climáticas que influenciam esse fenômeno. Os resultados da revisão de literatura evidenciaram uma tendência de publicações mais recentes a estudar métodos de previsão de neblina marítima e padrões espaço-temporais em ecossistemas vulneráveis à mudança climática. A análise da frequência da neblina na área de estudo revelou um aumento na estação de inverno, e os possíveis fatores que contribuem para essa tendência foram discutidos, assim como seu impacto nos processos hidrológicos locais. No terceiro capítulo, constatou-se que a neblina na área de estudo é predominantemente orográfica, impulsionada pela interação entre a topografia irregular, a temperatura e os ventos. O aumento está potencialmente relacionado às mudanças climáticas e ao papel das florestas nativas em manter a umidade e favorecer a formação de neblina. O vento, heterogeneidade do terreno e a temperatura da superfície do solo nas áreas florestais na área de estudo promovem um ambiente favorável para a formação de neblina, principalmente de tipo orográfico.

Palavras-chave: detecção de neblina; mudanças climáticas; MODIS; Landsat; floresta nebulosa, Google Earth Engine.

ABSTRACT

CHAVERRI, Andrés G Arguedas. Spatiotemporal Analysis of Fog Distribution in the Northern Coast of the Serra do Mar State Park. 2025. 93 p. Dissertation (Master's in Planning and Use of Renewable Resources) – Center for Science and Technology for Sustainability, Federal University of São Carlos, Sorocaba.

Fog detection has been widely studied for decades, both for its ecological significance and its various impacts on human activities. While substantial advances have been made in satellite-based detection methodologies, knowledge gaps persist in understanding fog formation patterns in different regions worldwide. This study aims to analyze the spatiotemporal dynamics of fog in the Northern Coast of the Serra do Mar State Park (PESM), São Paulo. The research is structured into three chapters. The first chapter presents a literature review on fog and low-stratus (FLS) detection using satellite imagery. The second chapter investigates changes in fog frequency over time by developing an algorithm based on MODIS satellite data within the Google Earth Engine (GEE) platform. The third chapter characterizes the fog formation process and its spatial distribution within the study area, analyzing the topographic and climatic variables influencing this phenomenon. The literature review highlighted a recent trend in publications focusing on fog forecasting methods over marine environments and spatiotemporal patterns in ecosystems vulnerable to climate change. The fog frequency analysis revealed an increase during winter, with potential contributing factors discussed, along with their impact on local hydrological processes. In the third chapter, results indicated that fog in the study area is predominantly orographic, driven by the interaction between irregular topography, temperature, and wind patterns. This increase is potentially linked to climate change and the role of native forests in maintaining humidity and enhancing fog formation. Wind patterns, terrain heterogeneity, and land surface temperature (LST) in forested areas create a favorable environment for fog development, particularly of the orographic type.

Keywords: fog detection; climate change; MODIS; Landsat; cloud forest; Google Earth Engine.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	11
Objetivos	14
Referências	15
Capítulo 1	18
1 Introdução	19
2 Métodos	20
2.1 Levantamento Bibliográfico.....	20
3 Resultados e Discussão	22
3.1 Análise das publicações	22
3.2 Análise de co-ocorrência de termos	24
3.3 Dados de satélite na detecção de neblina	27
3.4 Metodologias para detecção de neblina	28
4 Conclusões	31
5 Referências	31
Capítulo 2	40
1 Introdução	41
2 Métodos	42
2.1 Área de estudo	42
2.2 Detecção de neblina com imagens de satélite	44
2.3 Processamento das imagens de satélite	45
2.4 Análise e validação dos dados de sensoriamento.....	46
3 Resultados	47
4 Discussão	49
4.1. Por que existe um aumento de neblina ao longo do tempo?.....	50
4.2 Consequências do aumento de neblina no PESM.....	52
5 Conclusões	53
6 Referências	54
Capítulo 3	59
1 Introdução	60
2 Métodos	61
2.1 Área de estudo	61
2.2 Detecção de neblina	62
2.3 Variáveis climatológicas e topográficas	64
2.3 Análise dos dados.....	65
3 Resultados	65
4 Discussão	70
4.1 Densidade média da neblina.....	70
4.2 Variabilidade temporal da neblina	71
5 Conclusões	72

6 Referências	73
CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
APENDICE – A	80
Material suplementar 1	80
Material suplementar 2.....	84
Material suplementar 3	92

INTRODUÇÃO GERAL

A neblina tem sido estudada pelos diversos impactos que exerce sobre as atividades humanas, bem como por sua importância ambiental (Singh; Gautam, 2022). Estes impactos dependem de como a neblina interage com a superfície e dos seus efeitos na economia, sociedade e meio ambiente. No entanto, a compreensão desses efeitos está diretamente relacionada à capacidade de monitoramento desse fenômeno, que enfrenta desafios devido à limitação das observações feitas pelo ser humano.

As medições terrestres cobrem áreas restritas e períodos curtos, uma vez que as estações para detecção desse fenômeno são escassas e os modelos numéricos de previsão exigem conjuntos densos de dados para garantir alta precisão (Mahdavi *et al.*, 2021). Diante disso, o monitoramento por satélite é amplamente utilizado, pois oferece maior cobertura espacial, menor custo e alta resolução temporal (Zhang; Yi, 2013).

O sensoriamento remoto tem sido amplamente utilizado para compreender os mecanismos de formação e distribuição espaço-temporal da neblina (Andersen *et al.*, 2020; Singh; Gautam, 2022). Esse conhecimento permite a identificação dos potenciais aglomerados de floresta de neblina (Pohl *et al.*, 2021; Schulz *et al.*, 2017) e o desenvolvimento de métodos de detecção e modelagem de eventos de neblina no mar e dentro de grandes centros urbanos (Fu *et al.*, 2010; Saraf *et al.*, 2011; Zhang; Yi, 2013).

A relevância desses estudos se reflete nos impactos da neblina em diferentes setores. No ambiente marítimo, por exemplo, a neblina é considerada um fator crítico para operações de petróleo, gás e transporte terrestre, marítimo e aéreo, uma vez que reduz severamente a visibilidade próxima à superfície do mar (Amani *et al.*, 2020; Bari; Bergot; El Khelifi, 2015; Wu *et al.*, 2015; Yi *et al.*, 2019). Em áreas urbanas, especialmente nas regiões com altos índices de poluição, a neblina pode atuar como um meio de transporte para contaminantes, agravando a degradação da qualidade do ar e aumentando a concentração de aerossóis próximos à superfície (Gautam; Singh, 2018; Yuan *et al.*, 2016).

Apesar dos impactos nas atividades humanas, a importância da neblina nos ciclos de água nos ecossistemas também tem sido amplamente documentada (Cereceda *et al.*, 2008; Lehnert; Thies; Bendix, 2020). Na costa oeste da África Austral a neblina tem sido monitorada durante os últimos anos devido ao seu papel essencial no ciclo hidrológico de ecossistemas áridos da região (Haensler *et al.*, 2011).

A captação de água da neblina é fundamental para a sobrevivência de diversas espécies no Deserto da Namíbia, onde as chuvas são escassas ao longo do ano (Andersen *et al.*, 2020).

De forma semelhante, em regiões áridas e semiáridas do Chile, a água da neblina pode complementar, ou até mesmo substituir, a precipitação como fonte hídrica para a vegetação (Lehnert *et al.*, 2018).

Na costa da Califórnia, Estados Unidos, ocorrência de nuvens de baixo estrato e neblina terrestre no verão reduz a carga térmica e a demanda evaporativa (Baguskas; Clemesha; Loik, 2018). Essa diminuição da demanda evaporativa é crucial para os cultivos agrícolas que dependem de temperaturas mais baixas para a produção de frutos. Assim, uma redução na frequência de neblina invernal pode intensificar a tendência de menor acumulação de frio, impactando negativamente a produção frutífera (Baldocchi; Waller, 2014).

A presença ou ausência de neblina e nuvens de baixas influencia os fluxos de calor superficial, afetando diversos processos ecológicos e climáticos (Pohl *et al.*, 2021). Em florestas de neblina da América do Sul e Taiwan, uma parcela significativa da precipitação bruta provém da interceptação da água do nevoeiro pelas copas das árvores (Obregon *et al.*, 2014). Esse processo reduz a taxa de transpiração e mantém uma alta umidade relativa, criando condições microclimáticas únicas nessas florestas (Schulz *et al.*, 2016).

As florestas de neblina são caracterizadas pelo aporte hídrico proveniente da imersão em nuvens, o que gera um ambiente de alta umidade, radiação solar reduzida e condições ideais para uma rica biodiversidade vegetal e animal (Pohl *et al.*, 2023). No entanto, essas florestas estão sob crescente ameaça devido à fragmentação do habitat e às mudanças climáticas (Obregon *et al.*, 2014). Diante desse cenário, compreender e preservar o papel da neblina torna-se essencial para a conservação desses ecossistemas altamente especializados.

Estima-se que cerca de 60% da área original das florestas de neblina no Brasil tenha sido perdida, sendo a Serra do Mar um dos poucos remanescentes desta tipologia no sudeste brasileiro (Pompeu *et al.*, 2018). O Parque Estadual Serra do Mar (PESM) destaca-se não apenas como um dos principais pontos de conservação do bioma Mata Atlântica, mas também por desempenhar um papel fundamental na manutenção da qualidade e quantidade de água consumida pelas populações no entorno (Instituto Florestal do Estado de São Paulo, 2008).

Nesse cenário, compreender a interação da neblina com a floresta presente PESM torna-se essencial, uma vez que esse fenômeno constitui um componente importante do ciclo hidrológico dessas florestas. Diante dessa necessidade, essa dissertação busca responder às seguintes questões:

1. O que conhecemos a respeito dos processos de formação de neblina no PESM?
2. Como tem variado a frequência de ocorrência da neblina no PESM ao longo do tempo?

3. Quais são os padrões de distribuição espacial da neblina no PESM?

Para tanto, o trabalho foi estruturado em três capítulos:

Capítulo 1: Uma revisão global da detecção de neblina por imagens de satélite: tendências, técnicas e lacunas; Capítulo 2 Mudanças na Ocorrência de Neblina e Nuvens Baixas no Litoral Norte do PESM: Análise Histórica e Implicações Climáticas; e Capítulo 3: Análise do processo de formação de neblina nos núcleos Cunha, Picinguaba e Santa Virgínia do PESM, São Paulo.

No Capítulo 1, foram investigadas as tendências dos estudos sobre neblina, abrangendo metodologias, tipos de satélites e sensores, bem como aspectos relacionados à resolução espacial e temporal. Além disso, foram analisados os processos de formação da neblina e as motivações que impulsionam tais pesquisas, procurando as metodologias que melhor se ajustassem o nosso objetivo de pesquisa. O Capítulo 2 concentrou-se na variação da frequência da neblina ao longo do tempo, entre os anos 2000 e 2023, revelando uma tendência de aumento e identificando os principais fatores que contribuem para essa mudança, assim como os impactos observados nos padrões de ocorrência. Por fim, o Capítulo 3, caracterizou o processo de formação da neblina e sua distribuição dentro dos limites da área de estudo, ao mesmo tempo em que examinou as variáveis topográficas e climáticas que afetam esse fenômeno, ampliando a compreensão de sua dinâmica.

Por fim, ao investigar a dinâmica da neblina e suas implicações ecológicas e climáticas em uma área de conservação (Parque Estadual Serra do Mar), o estudo contribui para a segurança hídrica (ODS 6), para o entendimento dos efeitos das mudanças do clima e o desenvolvimento de ações de mitigação e adaptação (ODS 13) e para a proteção de ecossistemas terrestres sensíveis (ODS 15), como segue:

- **ODS 6 – Água Potável e Saneamento:** A neblina desempenha papel importante na recarga hídrica e na manutenção de umidade em florestas tropicais de montanha. Em muitas regiões, a interceptação da neblina contribui para o abastecimento de água, seja por meio de infiltração no solo ou pela captura direta da umidade pelas copas das árvores. Logo, investigar padrões e tendências de neblina ajuda a entender melhor a disponibilidade hídrica e a planejar estratégias de conservação de recursos hídricos.
- **ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima:** A pesquisa relaciona o aumento da frequência de neblina aos possíveis efeitos do aquecimento global e

das modificações na circulação atmosférica. Monitorar e compreender esses processos é essencial para prever impactos no clima regional e desenvolver políticas públicas de mitigação e adaptação. Assim, o trabalho contribui diretamente para a tomada de decisões embasadas em ciência no contexto de mudanças climáticas.

- **ODS 15 – Vida Terrestre:** A Serra do Mar abriga ecossistemas de elevada biodiversidade, como as florestas de neblina. Esses ambientes fornecem serviços ecossistêmicos fundamentais, incluindo regulação climática local e conservação da biodiversidade. A análise do papel da neblina no funcionamento hidrológico e ecológico auxilia na proteção desses ecossistemas, alinhando-se ao manejo sustentável e à conservação dos habitats terrestres.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo analisar as dinâmicas espaço-temporais da neblina no Litoral Norte do Parque Estadual Serra do Mar (PESM), São Paulo.

Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

1. Sintetizar o conhecimento existente sobre metodologias de detecção de neblina com imagens de satélite, identificando lacunas que possam fomentar o desenvolvimento de novas pesquisas.
2. Investigar as mudanças na frequência da neblina entre os anos 2000 e 2023 no Litoral Norte do PESM, São Paulo, utilizando imagens do satélite MODIS do catálogo de Google Earth Engine (GEE).
3. Caracterizar o processo de formação da neblina e a sua distribuição espacial nos núcleos Cunha, Picinguaba e Santa Virgínia do PESM, utilizando imagens de alta resolução espacial obtidas pelo satélite Landsat, disponibilizadas dentro de catálogo GEE.

REFERÊNCIAS

- AMANI, Meisam et al. Automatic nighttime sea fog detection using GOES-16 imagery. *Atmospheric Research, Wood Environment & Infrastructure Solutions*, v. 238, p. 104712, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078670702&doi=10.1016%2Fj.atmosres.2019.104712&partnerID=40&md5=53dd6ad6a4a1f671ba910021800d5ba9>.
- ANDERSEN, Hendrik et al. Synoptic-scale controls of fog and low-cloud variability in the Namib Desert. *Atmospheric Chemistry and Physics*, p. 3415–3438, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85082573609&doi=10.5194%2Facp-20-3415-2020&partnerID=40&md5=e5d760f962081d91e7a84451e7396155>.
- BAGUSKAS, Sara A; CLEMESHA, Rachel E.S.; LOIK, Michael E. Coastal low cloudiness and fog enhance crop water use efficiency in a California agricultural system. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 252, p. 109–120, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041470658&doi=10.1016%2Fj.agrformet.2018.01.015&partnerID=40&md5=36bae413fdffa29a4d31882224def39c>.
- BALDOCCHI, Dennis; WALLER, Eric. Winter fog is decreasing in the fruit growing region of the Central Valley of California. *Geophysical Research Letters, Department of Environmental Science, Policy and Management, University of California, Berkeley, CA, United States*, v. 41, n. 9, p. 3251–3256, 2014. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84900377804&doi=10.1002%2F2014GL060018&partnerID=40&md5=9d83244889abff2131c1076e61a17e1>.
- BARI, Driss; BERGOT, Thierry; EL KHLIFI, Mohamed. Numerical study of a coastal fog event over Casablanca, Morocco. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 141, n. 690, p. 1894–1905, 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84939421902&doi=10.1002%2Fqj.2494&partnerID=40&md5=fb4415c761f3ea09c4e31c3d4455755c>.
- CERECEDA, P et al. The spatial and temporal variability of fog and its relation to fog oases in the Atacama Desert, Chile. *Atmospheric Research*, v. 87, n. 3, p. 312–323, 2008. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-39149130701&doi=10.1016%2Fj.atmosres.2007.11.012&partnerID=40&md5=6fc4b1c0eccb533310e11d94f3799ba1>.
- FU, Gang et al. An observational and modeling study of a sea fog event over the Yellow Sea on 1 August 2003. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 107, n. 3–4, p. 149–159, 2010. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77955056338&doi=10.1007%2Fs00703-010-0073-0&partnerID=40&md5=4ed3b4221db696107a1abf1825522161>.
- GAUTAM, Ritesh; SINGH, Manoj K. Urban Heat Island Over Delhi Punches Holes in Widespread Fog in the Indo-Gangetic Plains. *Geophysical Research Letters*, v. 45, n. 2, p. 1114–1121, 2018. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017GL076794>.
- HAENSLER, Andreas et al. Will the southern african west coast fog be affected by future climate change?: Results of an initial fog projection using a regional climate model. *Erdkunde*, v. 65, n. 3, p. 261–275, 2011.

INSTITUTO FLORESTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Plano de Manejo do Parque Estadual da Serra do Mar: Capítulo 1 - Introdução. In: PLANO DE MANEJO DO PARQUE ESTADUAL DA SERRA DO MAR, 2008. p. 3–18.

LEHNERT, Lukas W et al. A Case Study on Fog/Low Stratus Occurrence at Las Lomitas, Atacama Desert (Chile) as a Water Source for Biological Soil Crusts. *Aerosol and Air Quality Research*, v. 18, n. 1, p. 254–26, 2018. Disponível em: <https://aaqr.org/articles/aaqr-17-01-fog-0021>.

LEHNERT, Lukas W.; THIES, Boris; BENDIX, Jörg. A new high spatial resolution low stratus/fog retrieval for the Atacama Desert. *Remote Sensing of Environment*, v. 236, n. November 2019, p. 111445, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111445>.

MAHDAVI, Sahel et al. 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*, v. 14, p. 1363–1373, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098775707&doi=10.1109%2FJSTARS.2020.3036815&partnerID=40&md5=6ca776115281519c87f50c3a1cf1112b>.

OBREGON, Andre et al. The potential distribution of tropical lowland cloud forest as revealed by a novel MODIS-based fog/low stratus night-time detection scheme. *Remote Sensing of Environment*, v. 155, p. 312–324, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.005>.

POHL, Marius J et al. A new fog and low stratus retrieval for tropical South America reveals widespread fog in lowland forests. *Remote Sensing of Environment*, v. 264, p. 112620, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111763930&doi=10.1016%2Fj.rse.2021.112620&partnerID=40&md5=5e22722f23c0e4dc9b4e1e4591f1abfb>.

POHL, Marius J. et al. Valleys are a potential refuge for the Amazon lowland forest in the face of increased risk of drought. *Communications Earth & Environment*, v. 4, n. 1, p. 198, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43247-023-00867-6>.

POMPEU, Patrícia Vieira et al. Assessing Atlantic cloud forest extent and protection status in southeastern Brazil. *Journal for Nature Conservation*, v. 43, p. 146–155, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1617138117304119>.

SARAF, Arun K. et al. Winter fog over the Indo-Gangetic Plains: Mapping and modelling using remote sensing and GIS. *Natural Hazards*, v. 58, n. 1, p. 199–220, 2011.

SCHULZ, Hans Martin et al. Detection of ground fog in mountainous areas from MODIS (Collection 051) daytime data using a statistical approach. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 9, n. 3, p. 1135–1152, 2016. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84961827228&doi=10.5194%2Famt-9-1135-2016&partnerID=40&md5=a3c540c48c8a5e68b1567a4f287bd3ad>.

SCHULZ, Hans Martin et al. Mapping the montane cloud forest of Taiwan using 12 year MODIS-derived ground fog frequency data. *PLOS ONE*, v. 12, n. 2, p. e0172663, 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85014232858&doi=10.1371%2Fjournal.pone.0172663&partnerID=40&md5=037562122610231cd0e0a3374552f78e>.

SINGH, Manoj K; GAUTAM, Ritesh. Developing a long-term high-resolution winter fog climatology over south Asia using satellite observations from 2002 to 2020. *Remote Sensing of Environment*, v. 279, p. 113128, 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85132725245&doi=10.1016%2Fj.rse.2022.113128&partnerID=40&md5=39930076c94d3096e9ca1590a6ff4a72>.

WU, D et al. A method of detecting sea fogs using CALIOP data and its application to improve MODIS-based sea fog detection. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266100, China, v. 153, p. 88–94, 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84921831163&doi=10.1016%2Fj.jqsrt.2014.09.021&partnerID=40&md5=590c940965ddeefc4bf6b76d553188cf>.

YI, Li et al. Arctic Fog Detection Using Infrared Spectral Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 36, n. 8, p. 1643–1656, 2019. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/36/8/jtech-d-18-0100.1.xml>.

YUAN, Yibo et al. Daytime sea fog retrieval based on GOCI data: a case study over the Yellow Sea. *Optics Express*, v. 24, n. 2, p. 787, 2016. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84962086583&doi=10.1364%2FOE.24.000787&partnerID=40&md5=25dec604ad24d5a34b3e5264a395a831>.

ZHANG, Suping; YI, Li. A Comprehensive Dynamic Threshold Algorithm for Daytime Sea Fog Retrieval over the Chinese Adjacent Seas. *Pure and Applied Geophysics*, Physical Oceanography Laboratory, Ocean-Atmosphere Interaction and Climate Laboratory, Ocean University of China, Qingdao, China, v. 170, n. 11, p. 1931–1944, 2013. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84886242674&doi=10.1007%2Fs00024-013-0641-6&partnerID=40&md5=e3065ed66805ff0282cf2e380054d290>.

CAPÍTULO 1

UMA REVISÃO GLOBAL DA DETECÇÃO DE NEBLINA POR IMAGENS DE SATÉLITE: TENDÊNCIAS, TÉCNICAS E LACUNAS

Resumo

O amplo alcance espacial e temporal dos dados de satélite desempenha um papel importante na detecção e monitoramento de eventos de neblina. Apesar da importância das dinâmicas espaço-temporais na ecologia e previsão para as atividades humanas, ainda existem lacunas no conhecimento destas. O objetivo deste trabalho foi estudar as tendências existentes em relação às metodologias aplicadas na detecção de neblina com imagens de satélite. Para isso, foi feito um levantamento bibliográfico nas bases de dados Scopus e Web of Science por meio da definição de palavras-chave. Foi analisada a co-ocorrência de termos com base em dados de texto dos resumos das publicações com o software VosViewer versão 1.6.19. Incluíram-se 38 artigos nesta revisão, sendo a China, a Alemanha e a Índia os países que mais publicaram. 52,63% dos artigos utilizaram dados de satélites geoestacionários e 47,34% trabalharam com observações de satélites polares. Os estudos mais recentes encontrados utilizaram metodologias baseadas em redes neurais convolucionais para investigar a ocorrência de neblina no mar. A maioria das pesquisas concentra-se na previsão da neblina em ambientes marítimos, com uma quantidade menor de estudos voltados à dinâmica da neblina em ecossistemas naturais. Essa tendência revela a escassez de pesquisas sobre a detecção da neblina em ecossistemas terrestres, destacando a necessidade de uma maior exploração nesse campo.

Palavras-chave: co-ocorrência de termos; PRISMA; detecção de neblina; VosViewer; floresta de neblina

1 INTRODUÇÃO

A neblina pode ser definida como uma coleção de gotículas de água suspensas próximas à superfície terrestre, resultando em redução da visibilidade horizontal para menos de 1 km (Fu *et al.*, 2010). Em razão de sua interação direta com a superfície, esse fenômeno atmosférico desperta interesse em diversos campos de estudo.

No entanto, abordar a frequência de neblina exclusivamente com dados de observações de campo, tais como aqueles provenientes de estações meteorológicas, apresenta limitações para compreender o comportamento espacial desse fenômeno (Amani *et al.*, 2020; Baguskas; Clemesha; Loik, 2018). Essas informações são normalmente obtidas em pontos específicos, dificultando a análise em grandes escalas.

O sensoriamento remoto surge como uma ferramenta de destaque no monitoramento contínuo de processos atmosféricos e terrestres (Saraf *et al.*, 2011). Por meio de ampla cobertura de observação, sensibilidade espectral e alta resolução temporal, os dados de satélites tornam-se fundamentais para detecção e acompanhamento de neblina (Wang *et al.*, 2010; Zhang; Yi, 2013).

A aplicação de imagens de satélite para detectar neblina remonta à década de 1970 (Yuan *et al.*, 2016). Desde então, diversos sensores, tanto em satélite de órbita polar quanto em plataformas geostacionárias têm sido empregados para esse fim (Wu *et al.*, 2015). Essas técnicas fornecem abordagens eficientes de detecção em vista de sua ampla cobertura espacial, diversidade de canais espectrais e alta resolução temporal (Amani *et al.*, 2020).

Apesar de sua importância ecológica e do interesse em previsões associadas a atividades humanas, ainda há lacunas na compreensão das dinâmicas espaço-temporais da neblina, o que limita o entendimento do seu ciclo de vida e seu mapeamento (Andersen *et al.*, 2020; Bari; Bergot; El Khlifi, 2015; Lehnert *et al.*, 2018; Obregon *et al.*, 2014).

Conhecer as tendências de pesquisas realizadas em diferentes partes do mundo pode subsidiar a tomada de decisão em setores governamentais, industriais, de transporte e agrícolas (Baguskas; Clemesha; Loik, 2018). Tal conhecimento é particularmente relevante para regiões que buscam correlacionar observações de campo com dados de satélite.

Embora tenham ocorrido avanços importantes na detecção de neblina, sobretudo na Europa e na América do Norte, persistem lacunas de informação para mapear esse fenômeno em outras partes do mundo (Amani *et al.*, 2020), como a disponibilidade de imagens em outras partes do mundo, metodologias custosas e falta de informação base. Adaptar metodologias de

sucesso em detecção remota para essas regiões parece ser uma estratégia promissora. Para isso, é fundamental conhecer as tendências de estudos de neblina desenvolvidos em contextos diversos.

A análise bibliométrica apresenta-se como um método capaz de elucidar de forma efetiva as tendências de pesquisa, os padrões atuais e as principais áreas temáticas sobre um tema específico (Zulhaimi; Pereira; Muhamad, 2023). Logo, sua aplicação para descrever, avaliar e prever o status quo das investigações científicas (Wang *et al.*, 2022) contribuirá para a consecução dos objetivos deste capítulo. Tal enfoque permite não apenas analisar estudos acerca da neblina de modo mais sistemático e abrangente, mas também identificar os métodos e técnicas utilizados.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi sintetizar o conhecimento existente sobre as aplicações metodológicas de detecção de neblina com imagens de satélite, visando identificar de lacunas que estimulem o desenvolvimento de novas pesquisas.

2 MÉTODOS

2.1 Levantamento Bibliográfico

O procedimento para o levantamento bibliográfico consistiu na seleção de palavras-chave relacionadas à frequência de neblina, com foco em publicações que utilizassem dados de sensoriamento remoto. Neste estudo, adotou-se o fluxograma PRISMA, que oferece um conjunto de itens embasados em evidências para a elaboração de revisões sistemáticas padronizadas (Page *et al.*, 2021).

A busca foi realizada nas bases de dados Scopus e Web of Science, uma vez que elas se destacam pela abrangência de metadados e indicadores de impacto (Pranckutė, 2021).

Foram pesquisadas as expressões “*fog frequency*”, “*remote sensing*” em como variações relacionadas, a fim de analisar os artigos que associassem a frequência dos eventos de neblina detectados com sensoriamento remoto. Não houve recorte temporal e a pesquisa limitou-se a artigos científicos em língua inglesa, excluindo artigos de revisão, livros, capítulos de livros e artigos em outros idiomas (Quadro 1).

Quadro 1- Parâmetros de consulta utilizados nas bases de dados Scopus e Web of Science.

Base de Dados	Palavras-chaves
Scopus:	TITLE-ABS-KEY ("fog water" OR "fog interception" OR "fog characteristic" OR "fog intensity" OR "fog event" OR "fog occurrence" OR "fog formation" OR "fog frequency") AND TITLE-ABS-KEY ("remote sensing" OR "satellite imagery" OR "remote-sensing" OR "hyperspectral" OR "GIS" OR "image enhancement" OR "remote sensing images") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar"))
Web of Science:	(TS=("fog water" OR "fog interception" OR "fog characteristic" OR "fog intensity" OR "fog event" OR "fog occurrence" OR "fog formation" OR "fog frequency")) AND ((TS=("remote sensing" OR "satellite imagery" OR "remote-sensing" OR "hyperspectral" OR "GIS" OR "image enhancement" OR "remote sensing images")) AND (DT=("ARTICLE"))

Fonte: Autor, 2024

Para organizar os resultados, utilizou-se a interface Rayyan (disponível no site <https://www.rayyan.ai/>), que permitiu a exclusão de artigos duplicados e a contagem de registros incluídos e excluídos de cada base de dados de uma forma ágil na etapa de identificação. Em seguida, procedeu-se à triagem inicial dos artigos por meio da leitura de títulos e resumos, de acordo com os critérios de inclusão e exclusão listados a seguir.

- Critério de inclusão: estudos que empregassem imagens de satélite para investigar a dinâmica espaço-temporal da neblina. - Critérios de exclusão: a) metodologias que não utilizassem dados de satélite e b) Investigação de processos distintos da detecção, formação ou identificação de eventos de neblina.

Uma vez selecionados os artigos a serem incluídos nesta revisão, empregou-se o software VosViewer (versão 1.6.19) para gerar um mapa de co-ocorrência de termos com base nas informações textuais extraídas do título e resumo de cada publicação. No mapa de rede, quanto maior a frequência de ocorrência de um termo, maior será o seu rótulo e o círculo que o representa, além disso, a proximidade entre as palavras indica o grau de relacionamento entre elas (van Eck; Waltman, 2023).

Por fim, foi analisada a distribuição dos artigos ao longo dos anos de publicação, bem como o país de filiação do autor principal e o ano médio de publicação dos documentos em que cada palavra-chave aparece, permitindo conhecer as tendências temporais geográficas dos estudos sobre o tema.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise das publicações

Foram inicialmente recuperadas 154 referências, sendo 101 da base de dados Scopus e 53 da Web of Science. Desse total, 48 artigos foram eliminados por duplicidade, 68 por não atenderem aos critérios de exclusão e 4 foram descartados por indisponibilidade de texto completo, seja por estarem em chinês ou por não ser possível obtê-los (Figura 1).

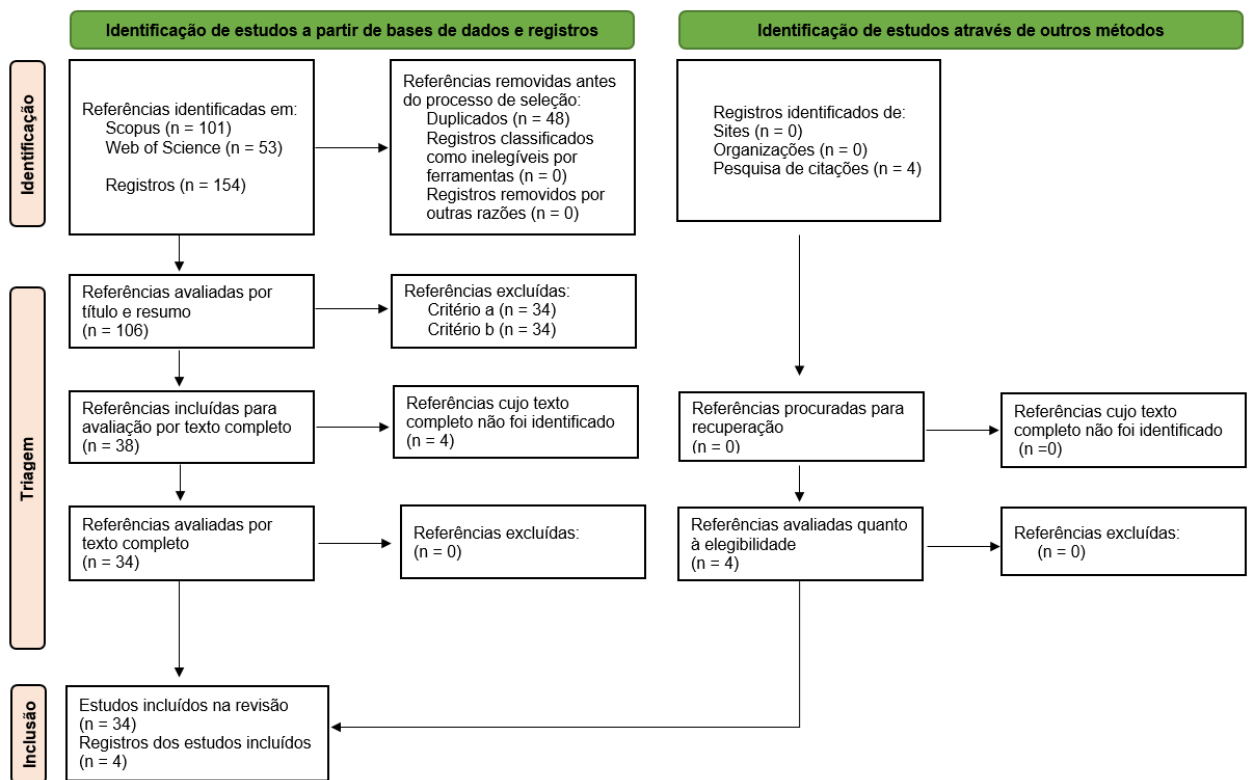


Figura 1 - Fluxograma da seleção de artigos da revisão. Fonte: adaptado e traduzido de Page et al., 2021

Ao final do processo de identificação, 34 artigos foram incluídos na revisão. Adicionaram-se ainda 4 registros obtidos a partir da verificação das listas de referências dos artigos já selecionados – denominada “pesquisa de citações”. Esses 4 artigos figuraram com

frequência (apareceram em mais de quatro artigos diferentes) durante as leituras, o que motivou a inclusão.

Os países com maior número de publicações foram China, Alemanha, Índia e Canadá, com 12, 8, 5, 4 artigos respectivamente (Figura 2). Observou-se que os estudos chineses e canadenses se concentram sobretudo em eventos de neblina em áreas oceânicas como o Mar Amarelo e Bohai na China (Fu *et al.*, 2012, 2010; Guo; Xu; Xu, 2021; Lu *et al.*, 2023; Ran *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2015; Yan *et al.*, 2023; Yuan *et al.*, 2016; Zhang; Yi, 2013; Zhou; Chen; Li, 2022) e o Oceano Atlântico na costa de Nova Escócia e Terra Nova e Labrador no Canadá (Amani *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2020; Gultepe *et al.*, 2021; Mahdavi *et al.*, 2021).

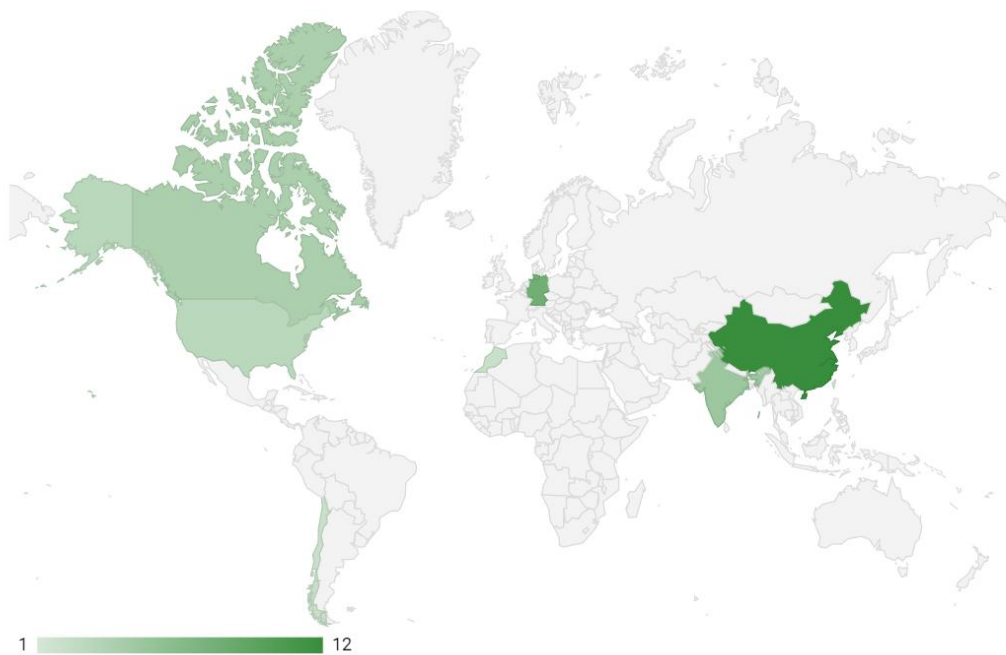


Figura 2 - Distribuição do número de publicações segundo o país do autor principal de cada artigo.

Fonte: Autor, 2024

Na Índia os estudos concentraram-se na detecção de neblina continental na Planície Indo-Gangética, que inclui regiões do Paquistão, Bangladesh e a região Norte da Índia (Ahmed; Dey; Mohan, 2015; Banerjee; Padmakumari, 2020; Gautam; Singh, 2018; Saraf *et al.*, 2011; Singh; Gautam, 2022).

Em países com menor número de publicações, a pesquisa envolveu o efeito do nevoeiro na vegetação do deserto de Atacama no Chile (Cereceda *et al.*, 2008; Lehnert *et al.*, 2018), atividades portuárias em Casablanca, Marrocos (Bari; Bergot, 2018; Bari; Bergot; El Khlifi, 2015) e na produção agrícola da Califórnia, Estados Unidos (Baguskas; Clemesha; Loik, 2018; Baldocchi; Waller, 2014).

No caso de autores alemães, as áreas de estudo situavam-se majoritariamente fora da Alemanha, investigando padrões de distribuição espaço-temporais de ecossistemas de relevância ecológica, tais como zonas áridas na costa oeste da África Austral (Andersen *et al.*, 2020; Haensler *et al.*, 2011), florestas de neblina e florestas tropicais de baixa altitude na América do Sul e em Taiwan (Obregon *et al.*, 2014; Pohl *et al.*, 2023, 2021; Schulz *et al.*, 2016, 2017).

Em relação à distribuição das publicações por ano, observou-se uma tendência de aumento no número de publicações, embora sem crescimento muito acentuado (Figura 3). Esse incremento parece ser impulsionado pelos impactos das mudanças climáticas nos processos de formação de neblina, como o aumento da neblina no Ártico em função do derretimento do gelo marinho (Yi *et al.*, 2019). Outros fatores relevantes incluem a evolução espacial do ciclo de vida da neblina em áreas urbanas (Bari; Bergot; El Khlifi, 2015; Gautam; Singh, 2018; Wang *et al.*, 2010) e a importância de compreender as variações nos fluxos de calor superficial nos ecossistemas vegetais (Baldocchi; Waller, 2014; Lehnert *et al.*, 2018; Pohl *et al.*, 2021).

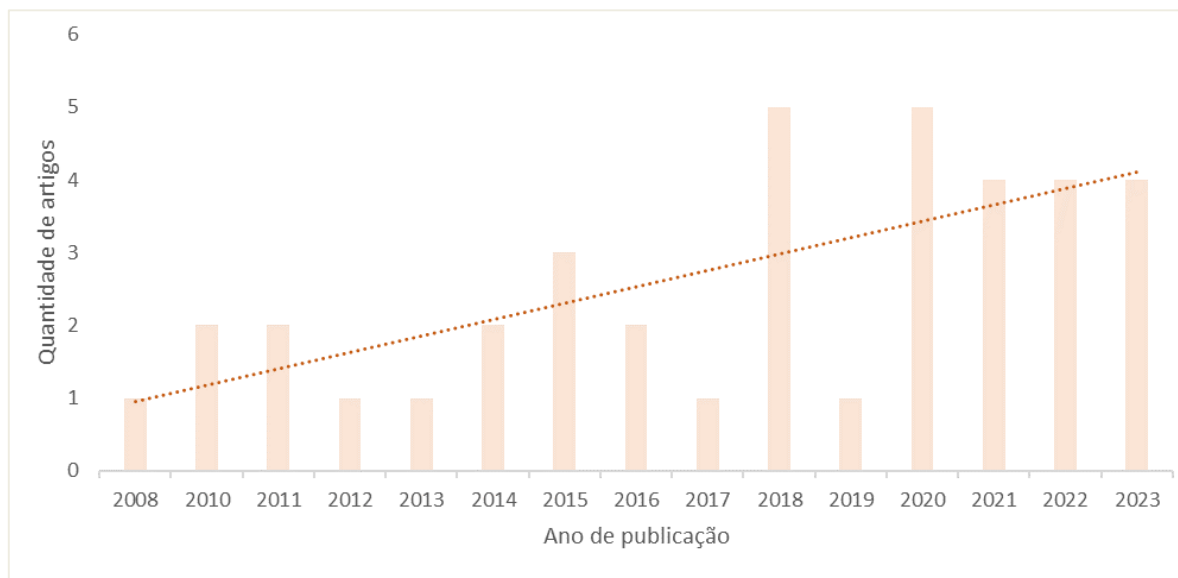


Figura 3 - Distribuição de artigos por ano de publicação. Fonte: Autor, 2024

3.2 Análise de co-ocorrência de termos

A partir dos dados de título e resumos, construiu-se um mapa de visualização de rede contendo sete conjuntos temáticos (Figura 4). Os termos de maior cocorrência como “*fog*”, “*satellite*”, “*data*”, “*satellite imagery*”, “*fog event*” e “*remote sensing*” localizam-se no centro do mapa, evidenciando seu caráter central na revisão.

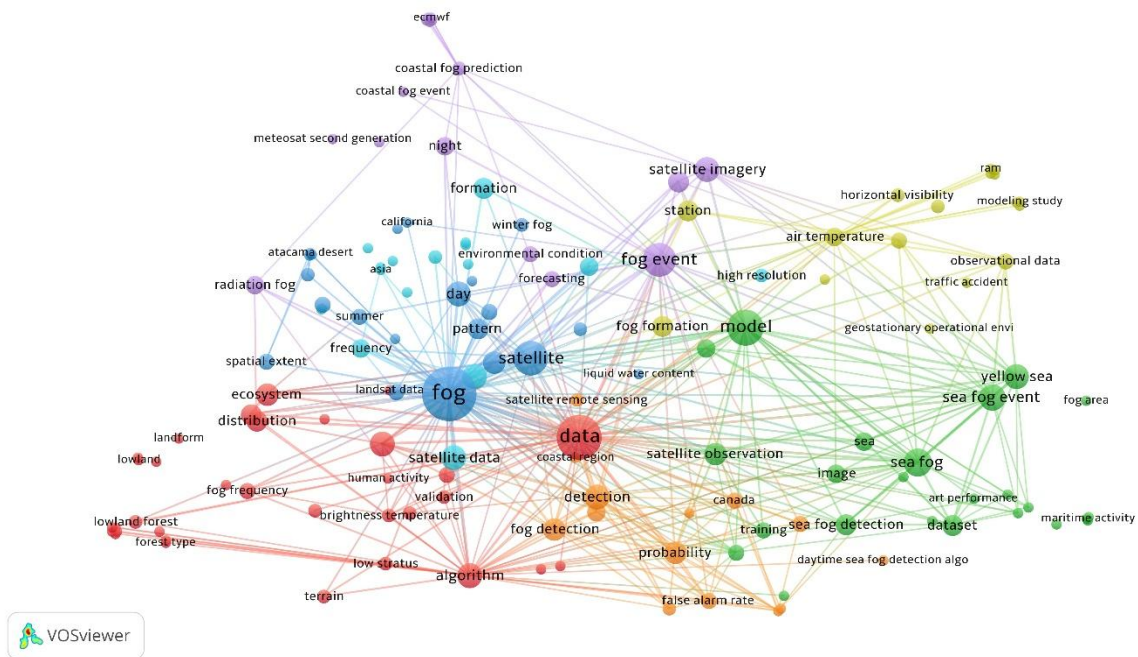


Figura 4- Mapa de visualização de rede com base em dados de texto. Fonte: Autor, 2024

Apesar de alguns termos surgirem com menor frequência, eles ainda foram relevantes para caracterizar temas secundários em seus respectivos grupos.

No conjunto amarelo, por exemplo, “*sea surface temperature*”, “*air temperature*”, “*modeling study*” remetem a pesquisas que utilizam imagens visíveis de satélite e variáveis climáticas para modelar a formação de nevoeiro por resfriamento advectivo, quando o ar quente e úmido é resfriado até o ponto de orvalho por uma superfície marítima fria (Fu *et al.*, 2012, 2010; Guo; Xu; Xu, 2021). No entanto, Zhang e Yi (2013) e Yi *et al.* (2019), avançam nessa abordagem, considerando a diferença entre a temperatura no topo da neblina/nuvens de baixo estrato e a temperatura da superfície do mar como indício de inversão térmica, condição favorável à ocorrência de neblina.

No conjunto verde, destacam-se “*satellite observation*”, “*sea fog*”, “*yellow sea*” associados aos estudos de neblina marítima. Embora haja relação com os termos do conjunto amarelo, a detecção neste grupo baseia-se no método de limite, que estabelece limiares de temperatura aplicados as bandas do infravermelho médio e térmico para distinguir a neblina de outros tipos de nuvens (Amani *et al.*, 2020; Gulpepe *et al.*, 2021; Kim; Ryu; Hong, 2023). A neblina, composta por gotículas menores, apresenta menor emissividade em 3,7 μm do que em 10,8 μm . Já em nuvens situadas em altitudes mais elevadas, as gotículas maiores possuem emissividades semelhantes em ambos os canais, resultando em um contraste reduzido na temperatura de brilho (Singh; Gautam, 2022).

O termo “*model*” do conjunto verde conecta-se aos “*satellite imagery*”, “*forecasting*”, “*environmental condition*” do conjunto roxo, pois muitos estudos empregam modelos numéricos climáticos, como o “*Weather Research and Forecasting Model-WRF*” (Chen *et al.*, 2020) ou o “*Mesoscale Nonhydrostatic Model-Meso NH*” (Bari; Bergot, 2018; Bari; Bergot; El Khlifi, 2015), em combinação com dados de reanálise, medições de estações meteorológicas e imagens de satélite para prever eventos de neblina em cidades costeiras. O termo “*radiation fog*”, embora inserido no conjunto roxo, aparece também próximo aos conjuntos azul e vermelho, que abordam principalmente a neblina continental.

A neblina de radiação ocorre quando locais como alto teor de umidade, ventos fracos e resfriamento radiativo do solo são propícias à condensação próxima à superfície (Gautam; Singh, 2018). Neste contexto, o conjunto vermelho concentra termos como “*ecosystem*”, “*distribution*”, “*fog frequency*”, “*algorithm*” reunindo artigos que investigam a distribuição e a frequência de ocorrência de neblina em áreas continentais (Obregon *et al.*, 2014; Schulz *et al.*, 2016, 2017). Geralmente, incorporam-se dados de relevo e variáveis climatológicas aos algoritmos de detecção, visando compreender a dinâmica da neblina em função de topografia, sazonalidade e características locais (Baldocchi; Waller, 2014; Ball; Tzanopoulos, 2020; Schulz *et al.*, 2016).

No conjunto laranja, termos como “*fog detection*”, “*probability*” e “*false alarm rate*” indicam o uso de abordagens mais complexas, baseadas em algoritmos de redes neurais artificiais. Estas metodologias incorporam dados de reanálise climática, radares, observações terrestre, estações meteorológicas e informações de satélite (Kim; Ryu; Hong, 2023; Lu *et al.*, 2023; Yan *et al.*, 2023; Zhou; Chen; Li, 2022) para treinar redes neurais e aprimorar a detecção/predição de neblina. Embora tais estudos sejam majoritariamente voltados à neblina marítima, existe sobreposição com o conjunto vermelho, onde surgem termo como “*algorithm*” e “*human activity*”.

Observou-se que os artigos recentes privilegiaram metodologias de aprendizagem de máquina (“*machine learning*” e “*deep learning*”) em eventos de neblina, especialmente no meio marítimo (Figura 5). Ainda assim, há também publicações recentes voltadas a ecossistemas vulneráveis. Por exemplo, Li *et al.* (2022) estudaram o impacto das mudanças climáticas na dinâmica espaço-temporal das florestas de neblina, enquanto Pohl *et al.* (2023) analisaram como a neblina pode favorecer a resiliência de florestas na Amazônia ao oferecer refúgio a organismos durante os períodos de seca.

temporal de 30 minutos, crucial para mapear mudanças rápidas no balanço energético e hídrico das plantas. De modo similar, o satélite COMS, equipado com o sensor MI (Meteorological Imager), possui resolução temporal de 15 minutos e ampla faixa de canais espectrais (do visível ao infravermelho), sendo muito empregado para a detecção de nevoeiro marítimo (Kim; Ryu; Hong, 2023).

Ao contrário, as séries temporais em estudos com dados tomados de satélite de órbita polar foram mais longas, com duração de cinco até mais de 15 anos (Baldocchi; Waller, 2014; Ball; Tzanopoulos, 2020; Gautam; Singh, 2018; Lu *et al.*, 2023; Pohl *et al.*, 2023, 2021; Saraf *et al.*, 2011; Schulz *et al.*, 2017; Singh; Gautam, 2022; Yi *et al.*, 2019).

Os satélites em órbita polar cobrem muitas áreas ao redor do mundo, com uma melhor resolução espacial devido a altitude de operação mais baixa que os satélites geoestacionários. Observou-se que o sensor “*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*” foi o mais recorrente nos artigos desta revisão que utilizaram dados de satélites de este tipo de órbita. Algumas pesquisas apontaram que os dados MODIS forneciam novas oportunidades para o monitoramento da dinâmica do nevoeiro (Bendix *et al.*, 2006), impelindo o uso destas imagens em estudos de neblina (Wu *et al.*, 2015).

Da mesma forma, imagens do MODIS foram selecionadas em outros estudos por causa da resolução espacial de 1 km até 250 m, em função da distribuição da floresta de neblina em Taiwan que é altamente dependente da altitude e, em áreas montanhosas, uma resolução grosseira implica uma grande extensão altitudinal coberta por cada pixel (Schulz *et al.*, 2016, 2017).

3.4 Metodologias para detecção de neblina

Dentre as técnicas empregadas, destacam-se o método de limite (threshold), as redes neurais, a análise de textura e a análise de clusters. O método de limite, em especial, é largamente aplicado na detecção de nevoeiro marítimo por meio da diferença de temperatura de brilho (BTD, do inglês *brightness temperature difference*) (Wu *et al.*, 2015).

A versatilidade do método de limite observa-se na ampla variedade de aplicações, independentemente do tipo de cobertura (continental ou marítima), do sensor ou da extensão temporal. A Figura 6 ilustra a integração do termo “brightness temperature” com diferentes conjuntos temáticos, reforçando a aplicabilidade dessa abordagem.

Para a análise do nevoeiro na Planície Indo-Gangética, foram usados dados do sensor INSAT-3D do “*Indian National Satellite System*” para distinguir nevoeiro de nuvens e neve, com duas técnicas de método de limite. Para recuperações de neblina noturna, a BTM entre os comprimentos de onda TIR1 (10,8 μm) e MIR (3,9 μm) foi utilizada. Para recuperações de neblina diurna, os autores usaram dados de comprimentos de onda visíveis e TIR1 para eliminar os pixels de nuvens de médio e alto nível (Banerjee; Padmakumari, 2020).

Para a detecção de neblina diurna no Ártico, foram utilizadas medições do canal MODIS 31 (10,7 μm) e a temperatura da superfície fornecida nos produtos de dados MODIS padrão (Yi *et al.*, 2019). Partindo dessas informações, é possível detectar um evento de neblina ou nuvem baixa se a diferença de temperatura entre o topo da nuvem e a superfície for maior que o limite estabelecido para uma região determinada.

O teste de limite com dados do espectro visível e infravermelho próximo foi outra técnica do método de limite. Estudos no Mar Amarelo na China usaram a combinação de banda 3 (479 nm), banda 6 (1.652 nm) e banda 7 (2.155 nm) do MODIS, para distinguir entre tipos de nuvens, pois a água líquida absorve mais o vermelho e o infravermelho de onda curtas (Fu *et al.*, 2010). Outros estudos optaram pelos dados dos Canais 1 (620–670 nm), 2 (841–876 nm), 18 (931–941 nm) e 19 (915–965 nm) do mesmo sensor para diferenciar entre neblina, nuvens altas e a superfície do mar refletida no vapor de água (Wu *et al.*, 2015).

Mesmo que o método de limite seja amplamente utilizado por ser estável e simples, alguns autores acreditam que combinações simples de limiares não são capazes de lidar com a monitorização de neblina marítimo em cenários complexos (Lu *et al.*, 2023). Assim, outros estudos utilizaram múltiplas combinações de limiares com maior trabalho estatístico e combinação com outro tipo de dados e técnicas.

Ao norte da China trabalharam-se três metodologias diferentes com os dados do sensor “*Advanced Himawari Imager (AHI)*” a bordo do satélite Himawari-8, considerando que a neblina tem características de consistência espacial e temporal nos 30 min adjacentes (Ran *et al.*, 2022). As metodologias de diferença de textura e espectral, BTM e interpretação visual, foram empregadas para recuperar a neblina diurna, noturna e crepuscular, respectivamente.

Verificou-se que em todos os artigos incluídos nesta revisão, as metodologias validaram a detecção de neblina com dados de reanálise como o ERA-5, dados de satélites ativos tipo LIDAR, estações meteorológicas e observações terrestres. Foi possível perceber que o intuito das pesquisas analisadas foi definir as combinações de técnicas de detecção de neblina segundo os processos e áreas estudadas.

4 CONCLUSÕES

Os resultados desta revisão evidenciam a diversidade de metodologias aplicadas à detecção de neblina por meio de imagens de satélite, bem como as diferentes abordagens adotadas para atender às especificidades de cada área de estudo. Ao sintetizar as aplicações metodológicas, foi possível observar que grande parte das pesquisas se concentraram na previsão de neblina em ambientes marítimos e urbanos, onde o impacto nos setores de transporte justifica o interesse científico. Nesse contexto, percebe-se a versatilidade de métodos de limite (principalmente a diferença de temperatura de brilho) e, mais recentemente, o crescente uso de algoritmos de aprendizagem de máquina, capazes de integrar dados multiespectrais, observações em solo e reanálises climáticas.

Contudo, a análise crítica dos estudos revela lacunas que podem impulsionar futuras investigações. Uma delas é a carência de trabalhos voltados a ecossistemas vulneráveis — a exemplo de desertos, florestas de neblina em regiões tropicais e sistemas agrícolas sensíveis —, nos quais a dinâmica espaço-temporal da neblina desempenha papel ecológico crucial. Outro ponto de destaque é a necessidade de séries temporais mais extensas para compreender as influências das mudanças climáticas na formação e na frequência de eventos de neblina, sobretudo em regiões montanhosas ou de relevo acentuado.

Ademais, embora não exista uma única estratégia universal, a combinação de diferentes técnicas — desde métodos de limite simples até algoritmos avançados de deep learning — mostra-se promissora, pois cada abordagem supre demandas específicas de resolução temporal e espacial. Esses achados reforçam o potencial de pesquisas futuras em áreas ainda pouco exploradas e ressaltam a importância de integrar bases de dados diversas, visando aprimorar a detecção e o monitoramento da neblina em distintas escalas. Dessa forma, ao identificar as principais lacunas metodológicas e descrever tendências consolidadas no uso de imagens de satélite, cumpre-se o objetivo inicial de sintetizar o conhecimento existente e propor caminhos que estimulem novas investigações no campo da eco-hidrologia e de outras áreas correlatas.

5 REFERÊNCIAS

AHMED, Rizwan; DEY, Sagnik; MOHAN, Manju. A study to improve night time fog detection in the Indo-Gangetic Basin using satellite data and to investigate the connection to aerosols. *Meteorological Applications*, ["Centre for Atmospheric Sciences, Indian Institute of Technology Delhi, Hauz Khas, India", "Satellite Meteorology Division, India Meteorological Department, New Delhi, India"], v. 22,

n. 4, p. 689–693, 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84947494932&doi=10.1002%2Fmet.1468&partnerID=40&md5=894c3d242e8ca6b9836b4c6b2475138e>.

AMANI, Meisam et al. Automatic nighttime sea fog detection using GOES-16 imagery. *Atmospheric Research, Wood Environment & Infrastructure Solutions*, St. John's, A1B 1H3, NL, Canada, v. 238, p. 104712, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078670702&doi=10.1016%2Fj.atmosres.2019.104712&partnerID=40&md5=53dd6ad6a4a1f671ba910021800d5ba9>.

ANDERSEN, Hendrik et al. Synoptic-scale controls of fog and low-cloud variability in the Namib Desert. *Atmospheric Chemistry and Physics*, ["Institute of Meteorology and Climate Research, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany", "Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany", "IPSL LISA, CNRS, Université Paris, v. 20, n. 6, p. 3415–3438, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85082573609&doi=10.5194%2Facp-20-3415-2020&partnerID=40&md5=e5d760f962081d91e7a84451e7396155>.

BAGUSKAS, Sara A; CLEMESHA, Rachel E.S.; LOIK, Michael E. Coastal low cloudiness and fog enhance crop water use efficiency in a California agricultural system. *Agricultural and Forest Meteorology*, ["Department of Environmental Studies, University of California-Santa Cruz, Santa Cruz, CA, United States", "Scripps Institution of Oceanography, University of California, La Jolla, San Diego, CA, United States"], v. 252, p. 109–120, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041470658&doi=10.1016%2Fj.agrformet.2018.01.015&partnerID=40&md5=36bae413fdffa29a4d31882224def39c>.

BALDOCCHI, Dennis; WALLER, Eric. Winter fog is decreasing in the fruit growing region of the Central Valley of California. *Geophysical Research Letters*, Department of Environmental Science, Policy and Management, University of California, Berkeley, CA, United States, v. 41, n. 9, p. 3251–3256, 2014. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84900377804&doi=10.1002%2F2014GL060018&partnerID=40&md5=9d83244889abff2131c1076e61a17e1>.

BALL, Lawrence; TZANOPOULOS, Joseph. Interplay between topography, fog and vegetation in the central South Arabian mountains revealed using a novel Landsat fog detection technique. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 498–513, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rse2.151>.

BANERJEE, Shravani; PADMAKUMARI, B. Spatiotemporal variability and evolution of day and night winter fog over the Indo Gangetic Basin using INSAT-3D and comparison with surface visibility and aerosol optical depth. *Science of The Total Environment*, ["Department of Geoinformatics, Central University of Jharkhand, Ranchi, 834205, India", "Indian Institute of Tropical Meteorology, Ministry of Earth Sciences, Pune, 411008, India"], v. 745, p. 140962, 2020. Disponible em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85088666620&doi=10.1016%2Fj.scitotenv.2020.140962&partnerID=40&md5=62fbd35db02cd1e86a3c8413d6ac5ad>.

BARI, Driss; BERGOT, Thierry. Influence of Environmental Conditions on Forecasting of an Advection-Radiation Fog: A Case Study from the Casablanca Region, Morocco. *Aerosol and Air Quality Research*, ["Direction de la Météorologie Nationale, Casa-Oasis, Casablanca, 8106, Morocco", "Centre National de Recherches Météorologiques, UMR3589, Toulouse, 31057, France"], v. 18, n. 1, p. 62–78, 2018. Disponible em: <https://aaqr.org/articles/aaqr-16-11-fog-0520>.

BARI, Driss; BERGOT, Thierry; EL KHLIFI, Mohamed. Numerical study of a coastal fog event over Casablanca, Morocco. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, ["Direction de la Météorologie Nationale, Casablanca, Morocco", "Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse, France", "Université Hassan II de Casablanca/Faculte des Sciences et Techniques de Mohammedia, Morocco"], v. 141, n. 690, p. 1894–1905, 2015. Disponible em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84939421902&doi=10.1002%2Fqj.2494&partnerID=40&md5=fb4415c761f3ea09c4e31c3d4455755c>.

BENDIX, Jörg et al. A feasibility study of daytime fog and low stratus detection with TERRA/ AQUA-MODIS over land. *Meteorological Applications*, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 111–125, 2006.

CERECEDA, P et al. The spatial and temporal variability of fog and its relation to fog oases in the Atacama Desert, Chile. *Atmospheric Research*, ["Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Avda. Vicuña Mackenna 4860, Chile", "Universidad Bolivariana, Iquique, Chile"], v. 87, n. 3, p. 312–323, 2008. Disponible em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-39149130701&doi=10.1016%2Fj.atmosres.2007.11.012&partnerID=40&md5=6fc4b1c0eccb533310e11d94f3799ba1>.

CHEN, Changshuo et al. Boundary Layer Parameterizations to Simulate Fog Over Atlantic Canada Waters. *Earth and Space Science*, ["Physical Oceanography Laboratory/CIMST, Ocean University of China, Qingdao, China", "Department of Physics and Atmospheric Science, Dalhousie University, Halifax, NS, Canada", "Fisheries and Oceans Canada, Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, N", v. 7, n. 3, 2020. Disponible em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

85082328107&doi=10.1029%2F2019EA000703&partnerID=40&md5=19a2a075405dfe957ea5e0653d2659da.

FU, Gang et al. An observational and modeling study of a sea fog event over the Yellow Sea on 1 August 2003. *Meteorology and Atmospheric Physics*, [s. l.], v. 107, n. 3–4, p. 149–159, 2010. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77955056338&doi=10.1007%2Fs00703-010-0073-0&partnerID=40&md5=4ed3b4221db696107a1abf1825522161>.

FU, Dan et al. Comparison study between observation and simulation for sea fog over the Yellow Sea in May 2009. *Journal of Ocean University of China*, ["Ocean Univ China, Dept Marine Meteorol, Qingdao 266100, Peoples R China", "Qinzhou Weather Bur, Guangxi 535000, Peoples R China", "Qingdao Weather Bur, Qingdao 266003, Peoples R China"], v. 11, n. 3, p. 290–300, 2012. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11802-012-1879-9>.

GAUTAM, Ritesh; SINGH, Manoj K. Urban Heat Island Over Delhi Punches Holes in Widespread Fog in the Indo-Gangetic Plains. *Geophysical Research Letters*, ["Indian Inst Technol, Ctr Studies Resources Engn, Bombay, Maharashtra, India", "Indian Inst Technol, Interdisciplinary Program Climate Studies, Bombay, Maharashtra, India", "Environm Def Fund, Washington, DC 20009 USA", "Univ Petr & Energy Studies, Sch E, v. 45, n. 2, p. 1114–1121, 2018. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017GL076794>.

GULTEPE, I et al. Coastal-Fog Microphysics Using In-Situ Observations and GOES-R Retrievals. *Boundary-Layer Meteorology*, ["Environment and Climate Change Canada, MRD, Toronto, M3H5T4, ON, Canada", "Engineering and Applied Science Department, UOIT, Oshawa, ON, Canada", "Department of Mechanical Engineering, University of Utah, Salt Lake City, 84112, UT, United States", "Atmo, v. 181, n. 2–3, p. 203–226, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85106680894&doi=10.1007%2Fs10546-021-00622-4&partnerID=40&md5=2954a8cbd4741f564bda02a494dc78f9>.

GUO, Jibing; XU, Jie; XU, Xiangming. An observational and modeling study of a sea fog event over the yellow and east China seas on 17 March 2014. *Tropical Cyclone Research and Review*, ["Fengxian District Meteorological Office, Shanghai, China", "Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai, China"], v. 10, n. 3, p. 182–190, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85150261583&doi=10.1016%2Fj.tccr.2021.09.001&partnerID=40&md5=47b8d85120dd0877dffe632d9e64a1>.

HAENSLER, Andreas et al. Will the southern african west coast fog be affected by future climate change?: Results of an initial fog projection using a regional climate model. *Erdkunde*, [s. l.], v. 65, n. 3, p. 261–275, 2011.

KIM, Yerin; RYU, Han-Sol; HONG, Sungwook. Data-to-data translation-based nowcasting of specific sea fog using geostationary weather satellite observation. *Atmospheric Research*, ["Department of Environment, Energy, and Geoinformatics, Sejong University, 209 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, 05006, South Korea", "DeepThoTh Co., Ltd., 209 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, 05006, South Korea"], v. 290, p. 106792, 2023. Disponível em: [https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85157996484&doi=10.1016%2Fj.atmosres.2023.106792&partnerID=40&md5=eefc016eb43985401efde1564bf67fba)

[85157996484&doi=10.1016%2Fj.atmosres.2023.106792&partnerID=40&md5=eefc016eb43985401efde1564bf67fba](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85157996484&doi=10.1016%2Fj.atmosres.2023.106792&partnerID=40&md5=eefc016eb43985401efde1564bf67fba).

LEHNERT, Lukas W et al. A Case Study on Fog/Low Stratus Occurrence at Las Lomitas, Atacama Desert (Chile) as a Water Source for Biological Soil Crusts. *Aerosol and Air Quality Research*, ["Philipps Univ Marburg, Fac Geog, D-35037 Marburg, Germany", "Ruhr Univ Bochum, Dept Geog, D-44780 Bochum, Germany", "Pontificia Univ Catolica Chile, Inst Geog, Santiago, Chile", "Univ Rostock, Fac Agr & Environm Sci, Soil Sci, D-18051 Rostock, Germany"], v. 18, n. 1, p. 254–26, 2018. Disponível em: <https://aaqr.org/articles/aaqr-17-01-fog-0021>.

LI, Hsin Ju et al. Assessment of spatiotemporal dynamics of diurnal fog occurrence in subtropical montane cloud forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, [s. l.], v. 317, n. February, p. 108899, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108899>.

LU, He et al. Daytime Sea Fog Identification Based on Multi-Satellite Information and the ECA-TransUnet Model. *Remote Sensing*, ["Remote Sensing Information and Digital Earth Center, College of Computer Science and Technology, Qingdao University, Qingdao, 266071, China", "Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, v. 15, n. 16, p. 3949, 2023. Disponível em: [https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85168793742&doi=10.3390%2Frs15163949&partnerID=40&md5=3b3cb09b833edcfd5fa2e3a2a3dd41e5)

[85168793742&doi=10.3390%2Frs15163949&partnerID=40&md5=3b3cb09b833edcfd5fa2e3a2a3dd41e5](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85168793742&doi=10.3390%2Frs15163949&partnerID=40&md5=3b3cb09b833edcfd5fa2e3a2a3dd41e5).

MAHDAVI, Sahel et al. 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*, ["Wood Environment and Infrastructure Solutions, Ottawa, ON, Canada", "Wood Environment and Infrastructure Solutions, St. John's, NL, Canada"], v. 14, p. 1363–1373, 2021. Disponível em: [https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098775707&doi=10.1109%2FJSTARS.2020.3036815&partnerID=40&md5=6ca776115281519c87f50c3a1cf1112b)

[85098775707&doi=10.1109%2FJSTARS.2020.3036815&partnerID=40&md5=6ca776115281519c87f50c3a1cf1112b](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098775707&doi=10.1109%2FJSTARS.2020.3036815&partnerID=40&md5=6ca776115281519c87f50c3a1cf1112b).

OBREGON, Andre et al. The potential distribution of tropical lowland cloud forest as revealed by a novel MODIS-based fog/low stratus night-time detection scheme. *Remote Sensing of Environment*, [s. l.], v. 155, p. 312–324, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.005>.

PAGE, Matthew J. et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *The BMJ*, [s. l.], v. 372, 2021.

POHL, Marius J et al. A new fog and low stratus retrieval for tropical South America reveals widespread fog in lowland forests. *Remote Sensing of Environment*, ["University of Marburg, Faculty of Geography, Laboratory for Climatology and Remote Sensing, Deutschhausstraße 12, Marburg, 35032, Germany", "University of Munich, Department of Geography, Luisenstr. 37, Munich, 80333, Germany", "University of Marburg, F, v. 264, p. 112620, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111763930&doi=10.1016%2Fj.rse.2021.112620&partnerID=40&md5=5e22722f23c0e4dc9b4e1e4591f1abff>].

POHL, Marius J. et al. Valleys are a potential refuge for the Amazon lowland forest in the face of increased risk of drought. *Communications Earth & Environment*, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 198, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43247-023-00867-6>.

PRANCKUTĖ, Raminta. Web of Science (WoS) and Scopus: the titans of bibliographic information in today's academic world. *Publications*, [s. l.], v. 9, n. 1, 2021.

RAN, Yinze et al. Satellite Fog Detection at Dawn and Dusk Based on the Deep Learning Algorithm under Terrain-Restriction. *Remote Sensing*, ["School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, 410083, China", "National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing, 100081, China"], v. 14, n. 17, p. 4328, 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85137918853&doi=10.3390%2Frs14174328&partnerID=40&md5=29144058d77c26d8ae12bbf12f680859>.

SARAF, Arun K. et al. Winter fog over the Indo-Gangetic Plains: Mapping and modelling using remote sensing and GIS. *Natural Hazards*, ["Indian Inst Technol, Dept Earth Sci, Roorkee 247667, Uttar Pradesh, India", "Indian Inst Technol, Dept Earthquake Engn, Roorkee 247667, Uttar Pradesh, India", "Natl Inst Hydrol, Roorkee 247667, Uttar Pradesh, India"], v. 58, n. 1, p. 199–220, 2011.

SCHULZ, Hans Martin et al. Detection of ground fog in mountainous areas from MODIS (Collection 051) daytime data using a statistical approach. *Atmospheric Measurement Techniques*, ["Laboratory for Climatology and Remote Sensing, Faculty of Geography, Philipps University, Marburg, Germany", "Department of Natural Resources and Environmental Studies, National Dong Hwa University, Hualien, Taiwan"], v. 9, n. 3, p. 1135–1152, 2016. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84961827228&doi=10.5194%2Famt-9-1135-2016&partnerID=40&md5=a3c540c48c8a5e68b1567a4f287bd3ad>.

SCHULZ, Hans Martin et al. Mapping the montane cloud forest of Taiwan using 12 year MODIS-derived ground fog frequency data. PLOS ONE, ["Laboratory for Climatology and Remote Sensing, Philipps-Universitat Marburg, Marburg, Germany", "School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University, Taipei, Taiwan", "Department of Natural Resources and Environmental Studies, Natio, v. 12, n. 2, p. e0172663, 2017. Disponible em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85014232858&doi=10.1371%2Fjournal.pone.0172663&partnerID=40&md5=037562122610231cd0e0a3374552f78e>].

SINGH, Manoj K; GAUTAM, Ritesh. Developing a long-term high-resolution winter fog climatology over south Asia using satellite observations from 2002 to 2020. Remote Sensing of Environment, ["School of Engineering, University of Petroleum and Energy Studies, Dehradun, 248007, India", "Environmental Defense Fund, Washington, 20009, DC, United States"], v. 279, p. 113128, 2022. Disponible em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85132725245&doi=10.1016%2Fj.rse.2022.113128&partnerID=40&md5=39930076c94d3096e9ca1590a6ff4a72>.

VAN ECK, Nees Jan; WALTMAN, Ludo. VOSviewer Manual version 1-6-19. [S. l.: s. n.], 2023. Disponible em: http://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.1.pdf.

WANG, J L et al. An analysis of the fog distribution in Beijing for the 2001-2005 period using NOAA and FY data. ATMOSPHERIC RESEARCH, ["China Meteorol Adm, Inst Urban Meteorol, Beijing 100089, Peoples R China", "Natl Satellite Meteorol Ctr, Beijing 10008, Peoples R China", "Beijing Meteorol Informat Ctr, Beijing 100089, Peoples R China"], v. 96, n. 4, p. 575–589, 2010.

WANG, Qiang et al. Characteristics and Trends of Ocean Remote Sensing Research from 1990 to 2020: A Bibliometric Network Analysis and Its Implications. Journal of Marine Science and Engineering, [s. l.], v. 10, n. 3, 2022.

WU, D et al. A method of detecting sea fogs using CALIOP data and its application to improve MODIS-based sea fog detection. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266100, China, v. 153, p. 88–94, 2015. Disponible em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84921831163&doi=10.1016%2Fj.jqsrt.2014.09.021&partnerID=40&md5=590c940965ddeefc4bf6b76d553188cf>.

YAN, Haotian et al. SeaMAE: Masked Pre-Training with Meteorological Satellite Imagery for Sea Fog Detection. Remote Sensing, ["Artificial Intelligence School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, 100876, China", "National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing, 100081, China"], v. 15, n. 16, p. 4102, 2023. Disponible em:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85168779869&doi=10.3390%2Frs15164102&partnerID=40&md5=a7dc671ba7917617c2d7a302af707bfe>.

YI, Li et al. Arctic Fog Detection Using Infrared Spectral Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, ["Ocean Univ China, Collaborat Innovat Ctr Marine Sci & Technol, Phys Oceanog Lab, Qingdao, Shandong, Peoples R China", "Ocean Univ China, Ocean Atmosphere Interact & Climate Lab, Qingdao, Shandong, Peoples R China", "Univ Calif Riverside, Dept Environm S, v. 36, n. 8, p. 1643–1656, 2019. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/36/8/jtech-d-18-0100.1.xml>].

YUAN, Yibo et al. Daytime sea fog retrieval based on GOCI data: a case study over the Yellow Sea. *Optics Express*, ["School of Marine Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, 210044, China", "Jiangsu Research Center for Ocean Survey Technology, NUIST, Nanjing, 210044, China", "School of Atmospheric Science, Nanjing University of Info, v. 24, n. 2, p. 787, 2016. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84962086583&doi=10.1364%2FOE.24.000787&partnerID=40&md5=25dec604ad24d5a34b3e5264a395a831>].

ZHANG, Suping; YI, Li. A Comprehensive Dynamic Threshold Algorithm for Daytime Sea Fog Retrieval over the Chinese Adjacent Seas. *Pure and Applied Geophysics, Physical Oceanography Laboratory, Ocean-Atmosphere Interaction and Climate Laboratory, Ocean University of China, Qingdao, China, v. 170, n. 11, p. 1931–1944, 2013. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84886242674&doi=10.1007%2Fs00024-013-0641-6&partnerID=40&md5=e3065ed66805ff0282cf2e380054d290>].*

ZHOU, Yuan; CHEN, Keran; LI, Xiaofeng. Dual-Branch Neural Network for Sea Fog Detection in Geostationary Ocean Color Imager. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, ["Tianjin University, School of Electrical and Information Engineering, Tianjin, 300072, China", "Institute of Oceanology, Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Qingdao, 266071, China"], v. 60, p. 1–17, 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85135759739&doi=10.1109%2FTGRS.2022.3196177&partnerID=40&md5=ffdd8362beb4c807ed02fdf41d185bd4>].

ZULHAIMI, Nurul Ain; PEREIRA, Joy Jacqueline; MUHAMAD, Nurfashareena. Global Research Landscape of Climate Change, Vulnerability, and Islands. *Sustainability (Switzerland)*, [s. l.], v. 15, n. 17, 2023.

CAPITULO 2

MUDANÇAS NA OCORRÊNCIA DE NEBLINA E NUVENS BAIXAS NO LITORAL NORTE DO PESM: ANÁLISE HISTÓRICA E IMPLICAÇÕES CLIMÁTICAS

Resumo

Na Serra do Mar encontra-se uma das duas florestas de neblina remanescentes do sudeste do Brasil. A neblina é muito importante nos processos ecológicos deste tipo de floresta, tornando o conhecimento dos padrões espaço-temporais crucial para a compreensão do funcionamento do ecossistema. Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar as mudanças na frequência da neblina nos últimos 24 anos no Litoral Norte do PESM, São Paulo. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo no Google Earth Engine (GEE) para detecção de neblina e nuvens baixas (NNB) com imagens do Terra MODIS. Foi calculada a distribuição espacial e a média anual de dias com NNB durante junho a agosto, entre os anos 2000 e 2023. Esses dados foram analisados mensalmente e por estação de inverno, para conhecer a tendência temporal por meio de uma análise de correlação de Pearson. A análise revelou um aumento significativo na frequência de NNB durante o inverno ao longo dos últimos 24 anos. O mapeamento espacial mostrou que a maior ocorrência de NNB está associada às encostas a barlavento mais inclinadas, onde a topografia e a vegetação florestal favorecem a formação de neblina orográfica. A validação do algoritmo de detecção de NNB indicou desempenho intermediário, com melhor acurácia para o mês de agosto. Entretanto, os resultados sugerem a necessidade de maior refinamento do modelo, especialmente para o mês de julho, período no qual a detecção foi menos eficaz. Estudos futuros devem integrar dados meteorológicos regionais e técnicas avançadas de sensoriamento remoto para aprimorar a compreensão dos padrões de NNB, e avaliar os impactos das mudanças no uso da terra na dinâmica da neblina.

Palavras-chave: MODIS; tendência temporal; refletância; Google Earth Engine; detecção de neblina; floresta de neblina

1 INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica abriga uma extensa e fragmentada porção de florestas remanescentes no sudeste do Brasil. Entre essas formações, destacam-se as florestas de neblina, particularmente presentes em duas cadeias montanhosas costeiras: a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira (Pompeu *et al.*, 2018).

A diferença mais marcante em relação às demais florestas tropicais é a ocorrência frequente de nuvens em contato direto com o solo (Obregon *et al.*, 2014). As interações entre a superfície terrestre e as nuvens são múltiplas e variam conforme o tipo de nuvem e a região geográfica (Pauli; Cermak; Teuling, 2022). Em regiões de montanhas, por exemplo, a formação de neblina está associada a nuvens advectivas tocando o solo, em contraste com a neblina de radiação típica das planícies, a qual ocorre sobretudo durante a noite por processos de radiação (Obregon *et al.*, 2014). Independente dos mecanismos de formação, a imersão frequente de neblina cria condições únicas de habitat para diversas espécies (Li *et al.*, 2022; Schulz *et al.*, 2017).

Em ecossistemas costeiros, a neblina e as nuvens baixas exercem intensos impactos ecológicos, pois aumentam a umidade relativa do ar e reduzem o estresse hídrico por evapotranspiração (Torregrosa; Combs; Peters, 2016). Dada a importância desses processos, faz-se necessário monitorar a ocorrência de neblina, o que representa um desafio devido às séries temporais geralmente curtas e às observações pontuais obtidas em estações climáticas (Lehnert; Thies; Bendix, 2020). Essas falências representam um problema no entendimento da dinâmica da neblina ao longo do tempo.

Para compreender a dinâmica da neblina, cresce a busca por bases de dados mais extensas que capturem sua intensidade e variabilidade espacial e temporal (Banerjee; Padmakumari, 2020). O sensoriamento remoto destaca-se como uma solução promissora, graças à sua ampla cobertura espacial, múltiplos canais espectrais e alta resolução temporal (Amani *et al.*, 2020).

De fato, dados de satélite baseados em medições de refletância têm demonstrado potencial para o estudo da climatologia da neblina (Baldocchi; Waller, 2014). Ainda assim, análises de longo prazo sobre sua evolução espaço-temporal permanecem relativamente escassas (Haensler *et al.*, 2011; Pauli; Cermak; Teuling, 2022).

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo investigar as alterações na frequência de neblina ao longo dos últimos 24 anos no Litoral Norte do Parque Estadual Serra

do Mar (PESM), em São Paulo, contribuindo para ampliar o conhecimento sobre processos ecológicos em ecossistemas costeiros de grande relevância ambiental.

2 MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área estudada nesta pesquisa abrange os setores do PESH situados dentro da bacia hidrográfica Litoral Norte – São Paulo. Adicionalmente, a delimitação foi ampliada até a zona costeira para incluir a faixa inicial de terreno fora da Unidade de Conservação (UC), mas ainda pertencente à bacia (Figura 7). Essa abordagem permitiu uma análise mais abrangente dos processos de formação de neblina terrestre, considerando a influência de diferentes tipos de cobertura do solo além da vegetação nativa do PESH.

O PESH é a maior UC da Mata Atlântica do Brasil (23°13'8.4"S e 24°5'42.0"S, 44°43'12.0"O e 46°33'50.4"O), com uma área de 315.390 hectares (Silva *et al.*, 2017). O clima pode ser classificado como Cwa, clima subtropical com inverno seco e frio e verões úmidos e quentes (Köppen, 1948). A variação altitudinal é considerável, apresentando altitudes desde o nível do mar, com temperaturas médias anuais variando entre 18°C e 22°C, até os 2000 metros nos pontos mais altos, com temperaturas médias entre 12°C e 18°C (Marchiori *et al.*, 2016).

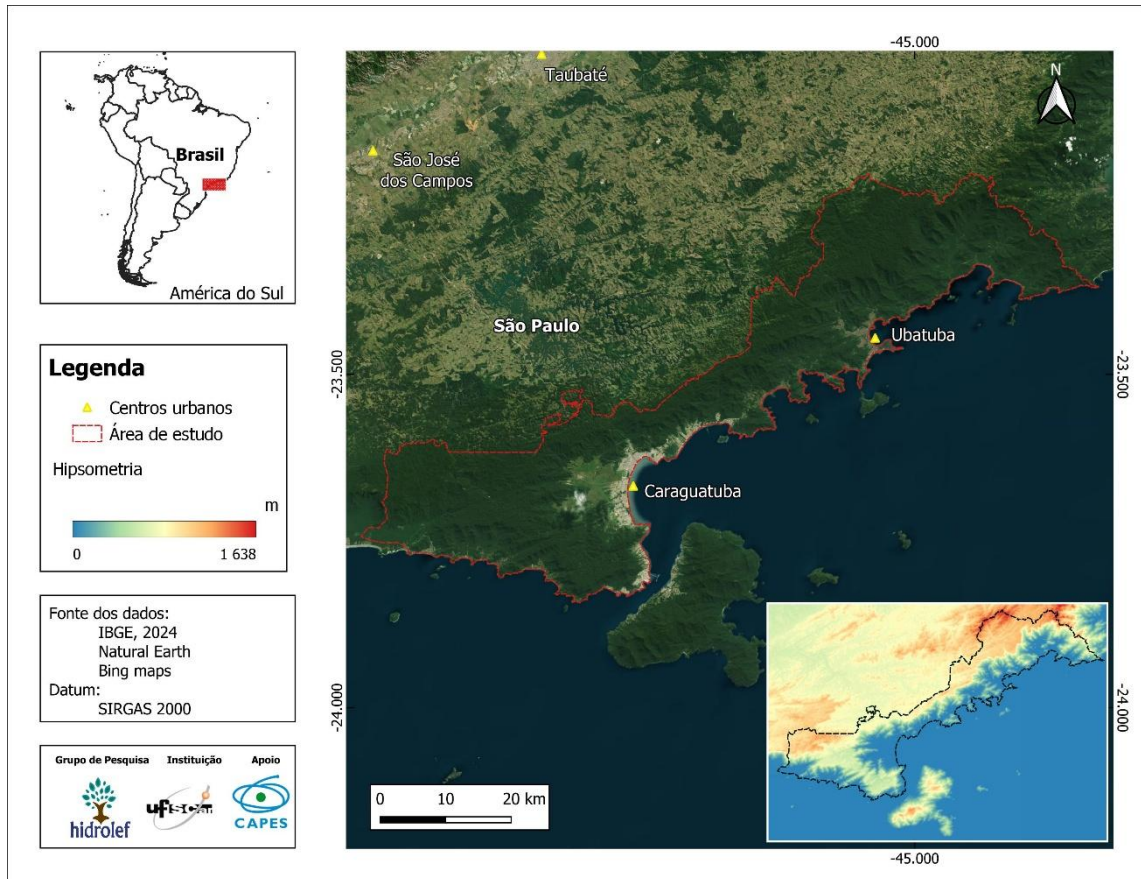


Figura 7- Delimitação da área de estudo no Litoral Norte de São Paulo, Brasil.

A média anual de precipitação no PESM varia de 2.000 a 4.000 mm, sendo que a maior parte da chuva ocorre entre os meses de novembro e março, durante a estação chuvosa (Instituto Florestal do Estado de São Paulo, 2008). Nos meses mais secos, como julho e agosto, a precipitação média mensal é relativamente baixa, mas nunca inferior a 60 mm (Joly *et al.*, 2012).

O ar úmido do mar é transportado em direção ao continente pelos ventos da brisa marítima que atua na região. Ao encontrar a escarpa da Serra do Mar, esse ar é forçado a subir adiabaticamente, sendo condensando em pequenas gotículas que se mantêm suspensas na atmosfera formando a neblina (Arcova *et al.*, 2016).

Essa interação entre o transporte de massas de ar úmido do mar e o relevo irregular do PESM, cria condições ideais para a ocorrência frequente de neblina orográfica na área de estudo. Durante o inverno, essas condições são intensificadas, resultando em uma densa neblina que cobre a região quase diariamente (Joly *et al.*, 2012).

A pesquisa se realizou somente nos meses de inverno, procurando diminuir a probabilidade de detecção de outros tipos de nuvens além da neblina e nuvens baixas (NNB).

Esta abordagem foi baseada no estudo realizado por Arcova *et al.* (2016) sobre a dinâmica espacial da neblina no Núcleo Cunha do PESH, no qual os autores encontraram que durante o inverno os valores de temperatura e precipitação são os mais baixos do ano.

2.2 Detecção de neblina com imagens de satélite

A discriminação da NNB de outras superfícies com imagens de satélite, baseia-se principalmente na diferença de temperatura de brilho (BT) entre as bandas do infravermelho médio (3,7 μm) e do infravermelho térmico (11,0 μm) (Bachmann; Bendix, 1992). Essa técnica é fundamentada no fato de que a taxa de radiação emitida pela NNB é significativamente menor no canal de 3,7 μm em comparação ao canal de 11,0 μm , enquanto essa discrepância não é tão marcante para superfícies terrestres (Hunt, 1973). Além disso, essa abordagem auxilia na exclusão de nuvens de médio e alto estrato, que apresentam temperaturas relativamente mais frias nas imagens infravermelhas (Anthis; Cracknell, 1999).

Outros pesquisadores também têm usado canais do espectro visível para identificar essas diferenças. Estudos pioneiros na década de 1970 já empregavam imagens do satélite SMS-1 no espectro visível para estudar os processos de dissipação da neblina (Wang *et al.*, 2010). A intensidade da luz solar refletida na superfície de uma nuvem, determinada pelo albedo, é maior em nuvens de alto estrato, fazendo com que elas apareçam mais brilhantes nas imagens de satélite (Eyre; Brownscombe; Allam, 1984; Fu *et al.*, 2010).

Apesar da eficácia dessas metodologias, ainda existem limitações na distinção entre nuvens de estrato baixo e neblina com base exclusivamente em dados de satélite (Bendix *et al.*, 2005). Como as propriedades físicas da neblina são muito semelhantes às das nuvens baixas, as imagens de satélite com frequência enfrentam dificuldades em diferenciá-las de forma clara (Wang *et al.*, 2010).

As imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) representam uma ótima opção para o estudo da dinâmica da neblina, devido as 36 bandas e ampla resolução espectral. As imagens MODIS possuem resolução espacial de 250, 500 e 1000 metros, com uma resolução temporal diária e cobertura ininterrompida desde o ano 1999, no caso do satélite Terra, e desde o ano de 2002 para o satélite Aqua.

O dados tomados pelo sensor MODIS são processados em cinco níveis (0 a 4) que irão variar em função do grau de processamento realizado (Anderson *et al.*, 2003). Os produtos MODIS do nível 2, MOD09 *Surface Reflectance*, fornecem uma estimativa da refletância

espectral da superfície das bandas 1 a 7, corrigida para gases atmosféricos e aerossóis (Vermote; Wolfe, 2015).

Em adição às estimativas da refletância, estes produtos vêm acompanhados pelas informações de cada pixel garantindo a integridade de seus dados através do controle da qualidade (QA), resumido como a aplicação dos procedimentos de produção e pós-produção (Anderson *et al.*, 2003).

Um conjunto de dados adicional importante é o controle de qualidade do estado (State QA) de 1 km. O State QA contém informações sobre características de cada pixel que não dependem da banda ou da resolução. Estes dados refletem as qualidades do próprio pixel, não a qualidade de qualquer dado de refletância da superfície, como por exemplo se o pixel foi sinalizado contendo nuvem, alto aerossol, baixo aerossol, neve ou fogo, etc. (J. C. Roger; J. P. Ray, 2020).

Assim, toda informação sobre as nuvens dentro dos produtos da série MOD09 (*Surface reflectance*) deve ser derivada das bandas State QA, já que as informações rotuladas como informações de nuvem em bandas QA não devem ser consideradas tão confiáveis quanto as informações de nuvem de State QA (J. C. Roger; J. P. Ray, 2020).

2.3 Processamento das imagens de satélite

O algoritmo para detecção de NNB foi elaborado seguindo a metodologia desenvolvida por Werner et al. (2022). Foram escolhidas as imagens Terra MODIS do produto MOD09GA Refletância de Superfície Diária, versão 6.1, acessadas por meio do catálogo de dados da plataforma Google Earth Engine (GEE).

Os sinalizadores da banda “state_1km”, com resolução espacial de 1000 metros, foram utilizados para gerar uma máscara identificando os pixels com presença de NNB. A máscara de nuvens foi criada a partir do sinalizador “*Internal cloud algorithm flag*”, selecionando os pixels classificados como “*Cloud*”. O teste reflexivo desse algoritmo inclui dados de ondas curtas e infravermelho médio das bandas 20 (3,75 μm), 21 (3,96 μm), 7 (2,13 μm) e 6 (1,64 μm) (Wilson; Jetz, 2016). Para minimizar erros de classificação, foram aplicados os sinalizadores “*Cloud shadow*” (bandas NIR 0,86 μm e azul 0,47 μm), e “*Cirrus detected*” (banda 26 infravermelho curto 1,38 μm), excluindo pixels associados a essas condições específicas (Figura 8).

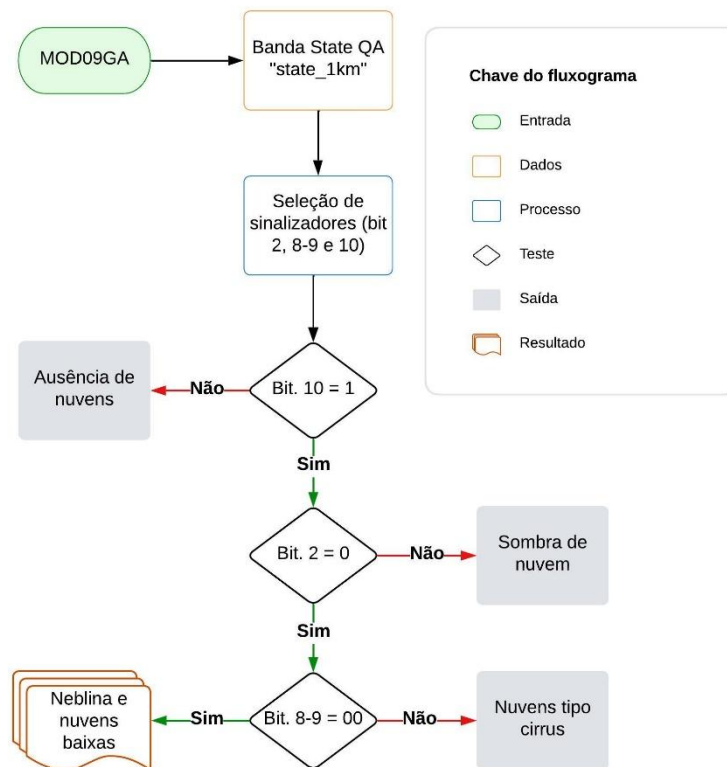


Figura 8- Fluxograma do processo de criação da máscara para seleção de pixels com presença de neblina e nuvens baixas.

A máscara criada permitiu mapear a distribuição espacial de dias com presença de NNB por ano, em cada pixel, no período de junho a agosto, de 2000 a 2023. O código utilizado para o mapeamento foi desenvolvido na plataforma GEE e está disponibilizado no apêndice deste trabalho (material suplementar 2).

2.4 Análise e validação dos dados de sensoriamento

Para identificar tendências na frequência de NNB ao longo do tempo, a média anual de dias com presença de neblina na área de estudo foi calculada e comparada. Esses dados foram analisados mensalmente e por estação de inverno, utilizando o software Jamovi 2.3.21. A tendência temporal foi avaliada por meio de uma análise de correlação de Pearson.

A validação dos dados de satélite foi realizada com base em observações de campo fornecidas pelo Laboratório de Hidrologia Florestal Engenheiro Agrônomo Walter Emmerich (LHFEAWE), localizado no núcleo Cunha – PESM. As medições de campo ocorreram às 11:00 horas durante o inverno de 2023, entre 01 de junho e 31 de agosto. A presença ou ausência de neblina foi registrada com base na visibilidade horizontal observada no momento da medição.

A validação dos dados foi realizada utilizando uma matriz de confusão, conforme o método descrito por Obregon et al. (2014) para estudos de neblina com imagens de satélite. Na Figura 9, é detalhado o cálculo da Probabilidade de Detecção (POD), que representa a proporção de eventos de NNB corretamente classificados em relação ao número total de eventos de neblina observados em campo. Também é apresentada a Taxa de Alarmes Falsos (FAR), definida como a proporção de classificações incorretas de NNB (quando não ocorreram) em relação ao número total de eventos sem neblina registrados. Esses indicadores fornecem uma avaliação quantitativa robusta da precisão e confiabilidade do algoritmo de detecção.

		Observações LHFEAWE	
		Presença de neblina	Ausência de neblina
POD = $a / (a+c)$ FAR = $b / (b+d)$			
Algoritmo detecção	Presença de NNB	a) <u>correto positivo</u>	b) alarme falso
	Ausência de NNB	c) não detectado	d) <u>correto negativo</u>

Figura 9- Definição das variáveis Probabilidade de Detecção (POD) e Taxa de Alarmes Falsos (FAR), usadas para a validação da detecção de Neblina e Nuvens baixas (NNB) pelo método matriz de confusão. Observações de campo fornecidas pelo Laboratório de Hidrologia Florestal Engenheiro Agrônomo Walter Emmerich (LHFEAWE), localizado no núcleo Cunha – PESM. Fonte: adaptado e traduzido de Obregon et al., 2014.

3 RESULTADOS

A análise de correlação de Pearson entre as variáveis ‘ano’ e ‘média de dias com NNB’ revelou uma correlação positiva significativa durante os invernos ao longo do período estudado ($R=0,4440, p<0,05$). O menor valor médio de dias com NNB foi registrado em 2001, com 27,04 dias, enquanto o maior foi em 2009, com 49,16 dias. A diferença entre esses anos corresponde a um aumento de 24,04%.

De forma semelhante, a análise mensal mostrou uma tendência de aumento na frequência de NNB nos meses de junho ($R=0,4777, p<0,05$) e agosto ($R=0,5323, p<0,05$). No entanto, o mês de julho apresentou uma tendência oposta, sem significância estatística ($R=-0,1946, p>0,05$) (Figura 10).

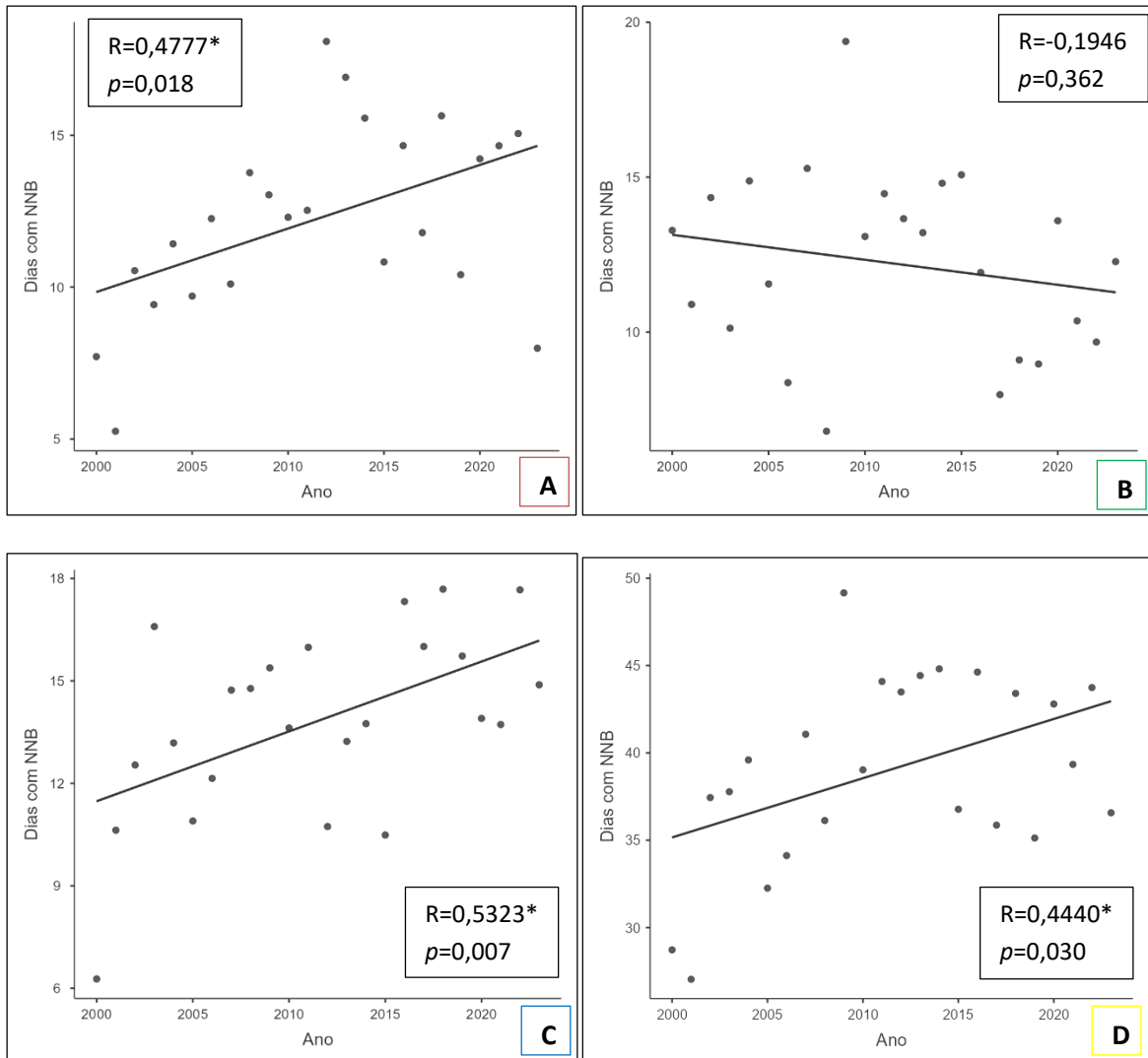


Figura 10- Média anual de dias com presença de NNB nos meses de A) junho, B) julho e C) agosto e d) estação de inverno. $*p < 0,05$.

Para validar o algoritmo de detecção, foram utilizadas 65 observações de campo realizadas durante o inverno de 2023, sendo distribuídas em 20, 22 e 23 registros para os meses de junho, julho e agosto, respectivamente.

A validação do produto de NNB para o período de inverno apresentou valores de POD = 0,60 e FAR = 0,25. Na análise mensal, agosto apresentou o melhor desempenho, com POD = 0,63 e FAR = 0,20, enquanto junho registrou os menores índices de precisão (POD = 0,50, FAR = 0,28) e julho não apresentou capacidade de detecção (POD = 0,00, FAR = 0,27).

Os resultados indicam uma correlação mais forte entre as variáveis analisadas no final do inverno, sugerindo que o algoritmo apresenta maior precisão na detecção de NNB nesse

período. A ausência de correlação significativa em julho pode estar associada a limitações do algoritmo nesse mês específico. Para aprimorar a validação dos dados, recomenda-se ampliar o número de observações de campo utilizadas.

O mapeamento da distribuição de NNB revelou que os setores com maior frequência estão localizados em áreas com encostas a barlavento mais inclinadas. A Figura 11 apresenta a distribuição espacial da NNB do mês de agosto, abrangendo a série temporal de 24 anos dentro da área de estudo.

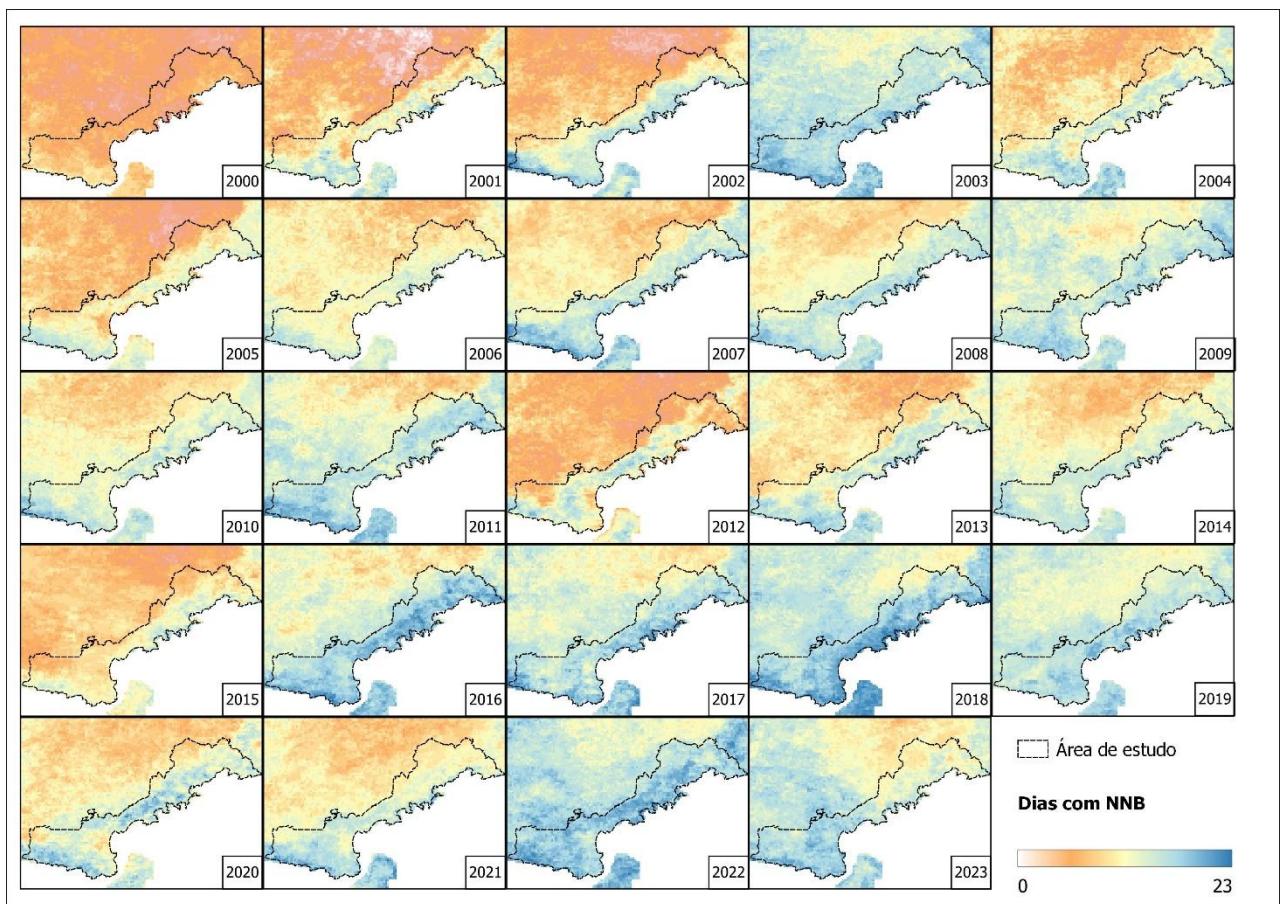


Figura 11- Distribuição espacial da neblina e nuvens baixas (NNB) calculada com um algoritmo de detecção com imagens MODIS, entre os anos 2000 e 2023 no Litoral Norte do Parque Estadual Serra do Mar.

4 DISCUSSÃO

O algoritmo espacial desenvolvido com imagens do sensor MODIS apresentou uma eficácia intermediária na detecção de NNB. Esse desempenho foi avaliado com base nos valores de POD, situando-se entre resultados de alta confiabilidade, como os valores de POD entre 0,78 e 0,80 obtidos em estudos que utilizaram algoritmos mais complexos (Obregon *et al.*, 2014;

Pohl *et al.*, 2021), e valores de menor desempenho, como o POD = 0,44, registrado em períodos com baixa frequência de NNB (Egli; Thies; Bendix, 2018).

Os valores de FAR obtidos na análise mensal de agosto também permaneceram dentro da faixa esperada, quando comparados a outros algoritmos de detecção de neblina aplicados em Taiwan, particularmente em florestas de neblina situadas abaixo de 1500 metros de altitude (Schulz *et al.*, 2017). Esses resultados reforçam a adequação do algoritmo para a detecção de NNB em áreas de relevo semelhante, onde fatores topográficos e microclimáticos desempenham um papel determinante na formação da neblina.

Os Relatórios de Aeródromo Meteorológico (METARs), frequentemente empregados em estudos para validar esquemas de detecção de neblina, poderiam servir como uma fonte alternativa de dados de campo, uma vez que fornecem informações detalhadas sobre a visibilidade horizontal em aeroportos e bases aéreas (Schulz *et al.*, 2016). No entanto, essa abordagem não se mostrou viável para este estudo, pois não há aeroportos dentro da área analisada que disponibilizem dados METAR. Além disso, aeroportos sul-americanos tendem a estar localizados em regiões com baixa frequência de NNB, o que compromete a representatividade dos dados para a validação do algoritmo (Pohl *et al.*, 2021).

4.1. Por que existe um aumento de neblina ao longo do tempo?

As florestas nativas do PESM cobrem a maior parte da área de estudo, enquanto as áreas urbanas estão concentradas em pequenos pontos no litoral, principalmente nas cidades de São Sebastião, Caraguatatuba e Ubatuba. Essa predominância da cobertura florestal influencia significativamente os fluxos de calor e umidade na região.

Durante os meses mais secos do ano, a vegetação nativa mantém a transpiração, resultando em fluxos de calor latente significativamente mais elevados sobre as florestas, especialmente no período da tarde (Ray *et al.*, 2003). Esse aumento no fluxo de calor latente impulsiona a evapotranspiração (ET), fornecendo um suprimento abundante de vapor de água que favorece a formação de nuvens e sustenta a reciclagem de umidade (Xu *et al.*, 2022).

A intensificação da ET está associada ao aumento das temperaturas globais, que afetam os fluxos de calor e a umidade relativa tanto nas florestas (Bosman; van Heerwaarden; Teuling, 2019) quanto na quantidade de vapor de água transportado do oceano para o continente (Pounds; Fogden; Campbell, 1999).

Embora esses mecanismos sejam geralmente discutidos no contexto da cobertura de nuvens em geral, eles também são aplicáveis ao estudo de NNB na área de estudo. A ET, junto

com a magnitude e direção do vento, desempenha um papel essencial na formação da neblina (Pauli *et al.*, 2020).

O aumento dos fluxos de ET nas florestas, combinado com o transporte de vapor de água do oceano, influencia diretamente a frequência de ocorrência de neblina. Esse excesso de umidade é forçado a subir ao encontrar o relevo acidentado do PESM, favorecendo a formação da neblina por processos orográficos já documentados na região (Arcova *et al.*, 2016).

Outra característica das florestas que influencia formação de nuvens, são as emissões de Compostos Orgânicos Voláteis Biogênicos (BVOCs – em inglês). Os BVOCs são moléculas produzidas pelas árvores durante o crescimento, que se oxidam na atmosfera em aerossóis orgânicos, transformando-se em núcleos de condensação de nuvens (Duveiller *et al.*, 2021).

Na floresta de Landes, na França, estudos demonstraram que a interação entre as emissões de BVOCs e a elevada ET sobre a área florestal pode aumentar a concentração de gotículas em nuvens de baixo nível, intensificando a cobertura de NNB (Pauli; Cermak; Teuling, 2022).

Além das florestas do PESM, as cidades litorâneas dentro da área de estudo podem estar contribuindo para o incremento na frequência de NNB observada. O balanço energético urbano revela um fluxo de calor sensível mais prolongado e positivo durante a tarde e à noite, semelhante ao registrado na superfície dos dosséis florestais (Theeuwes *et al.*, 2019).

Embora altas temperaturas acelerem a dissipação da neblina nas áreas urbanas, um efeito intensificado pelas ilhas de calor (Gautam; Singh, 2018), o desenvolvimento de neblina em níveis superiores pode ser potencializado pela convergência de vapor induzida por correntes ascendentes (Yan *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a umidade acumulada nas áreas urbanas do litoral norte paulista, devido à proximidade com o mar, pode ser transportada para a atmosfera por meio de processos convectivos. Esse vapor, impulsionado pela brisa marinha, é direcionado para as encostas do PESM, onde a frequência de NNB é mais elevada.

Esse fenômeno explica por que, ao longo dos 24 anos analisados na série temporal, os maiores valores de NNB estão associados às áreas de relevo mais acidentado e cobertura florestal preservada dentro dos limites da UC, em contraste com as regiões fora da área de estudo.

Padrões semelhantes foram observados em outras áreas onde as encostas íngremes e cobertura florestal favorece a formação e persistência da NNB. Esse comportamento foi registrado ao longo da costa dos Apalaches (Gambill; Mecikalski, 2011), no Parque Nacional Pan de Azúcar, no Chile, onde as escarpas da cordilheira costeira apresentam alta frequência de

neblina (Lehnert; Thies; Bendix, 2020), e na floresta de Landes, na França, onde as áreas com vegetação densa exibiram maior ocorrência de NNB em comparação com outras coberturas do solo (Pauli; Cermak; Teuling, 2022).

4.2 Consequências do aumento de neblina no PESM

O aumento da NNB observado no PESM ao longo do tempo não pode ser interpretado unicamente como um incremento na disponibilidade hídrica para a floresta. Em vez disso, essa tendência pode estar associada a respostas das florestas nativas ao aquecimento global e a eventos climáticos extremos.

É amplamente reconhecido que as mudanças climáticas impactam significativamente os ecossistemas florestais, induzindo um aumento na ET como mecanismo de reciclagem da umidade e favorece a formação de nuvens convectivas de baixa altitude (Salati et al., 1979; Teuling et al., 2017). No contexto do PESM, a intensificação da ET, particularmente nos estratos mais baixos da floresta, pode estar gerando um aumento da neblina por processos orográficos, beneficiando os estratos superiores. No entanto, parte dessa umidade pode estar sendo convertida em nuvens de baixo estrato sem interação direta com a floresta, reduzindo sua contribuição para o balanço hídrico local.

Além disso, o aumento das temperaturas globais tem sido associado à elevação da base das nuvens, deslocando o nível de condensação para altitudes superiores (Foster, 2011). Esse fenômeno reduz a frequência da neblina em contato direto com a vegetação, afetando a captura de umidade pelas copas das árvores (Foster, 2001). Um estudo global conduzido em 93 ilhas identificou uma tendência de elevação do limite inferior das florestas de neblina, impulsionada pelo aumento do nível de condensação, um processo que tende a se intensificar com as mudanças climáticas (Pouteau *et al.*, 2018).

Nesse contexto, o aumento da ET e a elevação do nível de condensação podem estar deslocando a umidade que anteriormente permanecia retida no topo da serra para áreas além dos limites do PESM, promovendo a reciclagem hídrica em florestas situadas em altitudes mais elevadas. No entanto, o desmatamento e a fragmentação das florestas podem interromper esse ciclo, comprometendo a resiliência da região às mudanças climáticas e reduzindo sua capacidade de retenção hídrica (Ban-Weiss *et al.*, 2011).

A perda de cobertura florestal e a consequente redução da cobertura de nuvens associada podem impactar não apenas a adaptação da floresta às novas condições climáticas, mas também a hidrologia regional e até mesmo padrões climáticos em áreas distantes (Xu *et al.*, 2022). O

desmatamento da Amazônia, por exemplo, já demonstrou impactos no regime hídrico de outras regiões do Brasil. A conversão de florestas em outras formas de uso do solo, associada ao aumento das concentrações atmosféricas de CO₂, tem causado uma redução na ET e na energia potencial convectiva disponível, enfraquecendo o sistema de reciclagem de umidade e afetando diretamente o regime de chuvas em regiões como São Paulo (Ruy Lemes *et al.*, 2023).

Embora a alteração da cobertura do solo fora dos limites do PESM não tenha sido o foco deste estudo, torna-se essencial aprofundar pesquisas sobre o impacto das mudanças no uso da terra no transporte de umidade do parque para outras florestas de maior altitude, como as da Serra da Mantiqueira. Estudos indicam que a cobertura do solo influencia diretamente a formação de nuvens em áreas florestadas (Ray *et al.*, 2003), trazendo benefícios locais e regionais, como a regulação térmica e o aumento da precipitação em áreas vizinhas sem vegetação nativa (Xu *et al.*, 2022).

Dessa forma, a restauração de áreas degradadas pode ser uma estratégia importante para aprimorar a conectividade ecológica da Mata Atlântica e otimizar o ciclo de reciclagem da umidade. Modelagens demonstram que grandes esforços de reflorestamento podem aumentar a nebulosidade de baixa altitude, elevando o albedo planetário e contribuindo para o resfriamento do sistema terrestre (Ban-Weiss *et al.*, 2011). Esse efeito está alinhado aos benefícios do sequestro de carbono proporcionados pelas florestas (Duveiller *et al.*, 2021), um fator crítico diante do aumento progressivo das temperaturas globais.

5 CONCLUSÕES

Os resultados indicaram uma tendência positiva no aumento da frequência de NNB ao longo do período analisado, com destaque para o mês com maior correlação, onde foi registrado um coeficiente de $R = 0,5323$. Para aprimorar a detecção e compreensão dos padrões de NNB, estudos futuros devem integrar dados adicionais, como observações meteorológicas regionais e técnicas avançadas de sensoriamento remoto.

O mapeamento da distribuição espacial revelou uma maior incidência de NNB em setores com encostas a barlavento mais acentuadas, onde se concentram as florestas do PESM. Nessas áreas, a vegetação nativa desempenha um papel fundamental na intensificação dos processos convectivos, favorecendo a formação de NNB. A interação entre o balanço energético das áreas florestais e urbanas, aliada a fatores como ET e BVOC, contribui para o aumento da frequência de NNB, reforçando a importância das florestas do PESM como reguladores climáticos locais e regionais.

O aumento da nebulosidade pode ser uma resposta da floresta às mudanças climáticas, com a intensificação da ET e a elevação do nível de condensação deslocando a umidade para altitudes mais elevadas. No entanto, o desmatamento e a fragmentação das florestas podem comprometer a reciclagem da umidade e impactar o regime de chuvas em áreas adjacentes. Dessa forma, é essencial que pesquisas futuras investiguem os efeitos das mudanças no uso do solo na dinâmica da neblina, expandindo a análise para além dos limites do PESH e explorando sua conectividade com outras florestas de neblina da Mata Atlântica, como as da Serra da Mantiqueira.

6 REFERÊNCIAS

ANDERSON, Liana Oighenstein et al. Sensor MODIS: uma abordagem geral. In: INPE, INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. [S. l.: s. n.], 2003. p. 58.

ANTHIS, A. I.; CRACKNELL, A. P. Use of satellite images for fog detection (AVHRR) and forecast of fog dissipation (METEOSAT) over lowland Thessalia, Hellas. *International Journal of Remote Sensing*, [s. l.], v. 20, n. 6, p. 1107–1124, 1999. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/014311699212876>.

ARCOVA, Francisco Carlos Soriano et al. OCORRÊNCIA DE NEVOEIROS EM UMA MICROBACIA EXPERIMENTAL NA SERRA DO MAR, CUNHA, SP. *Revista Brasileira de Climatologia*, [s. l.], v. 18, 2016. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/44956>.

BACHMANN, M.; BENDIX, J. An improved algorithm for NOAA-AVHRR image referencing. *International Journal of Remote Sensing*, [s. l.], v. 13, n. 16, p. 3205–3215, 1992. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431169208904111>.

BALDOCCHI, Dennis; WALLER, Eric. Winter fog is decreasing in the fruit growing region of the Central Valley of California. *Geophysical Research Letters*, Department of Environmental Science, Policy and Management, University of California, Berkeley, CA, United States, v. 41, n. 9, p. 3251–3256, 2014. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84900377804&doi=10.1002%2F2014GL060018&partnerID=40&md5=9d83244889abff2131c1076e61a17e1>.

BAN-WEISS, George A. et al. Climate forcing and response to idealized changes in surface latent and sensible heat. *Environmental Research Letters*, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 034032, 2011. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/6/3/034032>.

BENDIX, Jörg et al. Ground Fog Detection from Space Based on MODIS Daytime Data—A Feasibility Study. *Weather and Forecasting*, [s. l.], v. 20, n. 6, p. 989–1005, 2005. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/WAF886.1>.

BOSMAN, Peter J. M.; VAN HEERWAARDEN, Chiel C.; TEULING, Adriaan J. Sensible heating as a potential mechanism for enhanced cloud formation over temperate forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, [s. l.], v. 145, n. 719, p. 450–468, 2019. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.3441>.

DUVEILLER, Gregory et al. Revealing the widespread potential of forests to increase low level cloud cover. *Nature Communications*, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 4337, 2021. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34267204>.

EGLI, Sebastian; THIES, Boris; BENDIX, Jörg. A Hybrid Approach for Fog Retrieval Based on a Combination of Satellite and Ground Truth Data. *Remote Sensing*, Philipps Univ Marburg, Fac Geog, D-35032 Marburg, Germany, v. 10, n. 4, p. 628, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/4/628>.

EYRE, J R; BROWNSCOMBE, J L; ALLAM, R J. Detection of fog at night using Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) imagery. *Meteorological Magazine*, [s. l.], v. 113, p. 266–271, 1984. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:133107211>.

FOSTER, P. Changes in mist immersion. In: BRUIJNZEEL, L A; SCATENA, F N; HAMILTON, L S. Editors (org.). *Tropical Montane Cloud Forests*. [S. l.]: Cambridge University Press, 2011. (International Hydrology Series). p. 57–66. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/CBO9780511778384A015/type/book_part.

FOSTER, Pru. The potential impacts of global climate change on tropical montane cloud forests. *Earth-Science Reviews*, [s. l.], v. 55, n. 1–2, p. 73–106, 2001.

FU, Gang et al. An observational and modeling study of a sea fog event over the Yellow Sea on 1 August 2003. *Meteorology and Atmospheric Physics*, [s. l.], v. 107, n. 3–4, p. 149–159, 2010. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77955056338&doi=10.1007%2Fs00703-010-0073-0&partnerID=40&md5=4ed3b4221db696107a1abf1825522161>.

GAMBILL, Laci D.; MECIKALSKI, John R. A Satellite-Based Summer Convective Cloud Frequency Analysis over the Southeastern United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, [s. l.], v. 50, n. 8, p. 1756–1769, 2011. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/50/8/2010jamec2559.1.xml>.

GAUTAM, Ritesh; SINGH, Manoj K. Urban Heat Island Over Delhi Punches Holes in Widespread Fog in the Indo-Gangetic Plains. *Geophysical Research Letters*, ["Indian Inst Technol, Ctr Studies Resources Engn, Bombay, Maharashtra, India", "Indian Inst Technol, Interdisciplinary Program Climate Studies, Bombay, Maharashtra, India", "Environm Def Fund, Washington, DC 20009 USA", "Univ Petr & Energy Studies, Sch E, v. 45, n. 2, p. 1114–1121, 2018. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017GL076794>.

HAENSLER, Andreas et al. Will the southern african west coast fog be affected by future climate change?: Results of an initial fog projection using a regional climate model. *Erdkunde*, [s. l.], v. 65, n. 3, p. 261–275, 2011.

HUNT, G E. Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infra-red thermal window wavelengths. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, [s. l.], v. 99, n. 420, p. 346–369, 1973. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.49709942013>.

INSTITUTO FLORESTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Plano de Manejo do Parque Estadual da Serra do Mar: Capítulo 1 - Introdução. In: PLANO DE MANEJO DO PARQUE ESTADUAL DA SERRA DO MAR. [S. l.: s. n.], 2008. p. 3–18.

J. C. ROGER, J. P. RAY, and E. F. Vermote. MODIS Collection 6.1 (C61) LSR Product User Guide. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/documents/621/MOD13_User_Guide_V61.pdf.

JOLY, Carlos Alfredo et al. Florística e fitossociologia em parcelas permanentes da Mata Atlântica do sudeste do Brasil ao longo de um gradiente altitudinal. *Biota Neotropica*, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 125–145, 2012. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1676-06032012000100012&lng=pt&tlng=pt.

LEHNERT, Lukas W.; THIES, Boris; BENDIX, Jörg. A new high spatial resolution low stratus/fog retrieval for the Atacama Desert. *Remote Sensing of Environment*, [s. l.], v. 236, n. November 2019, p. 111445, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111445>.

LI, Hsin Ju et al. Assessment of spatiotemporal dynamics of diurnal fog occurrence in subtropical montane cloud forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, [s. l.], v. 317, n. February, p. 108899, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108899>.

MARCHIORI, Nidia Mara et al. Composição da comunidade arbórea e biomassa aérea em uma floresta atlântica secundária, parque estadual da serra do mar, São Paulo, Brazil. *Cerne*, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 501–514, 2016.

OBREGON, Andre et al. The potential distribution of tropical lowland cloud forest as revealed by a novel MODIS-based fog/low stratus night-time detection scheme. *Remote Sensing of Environment*, [s. l.], v. 155, p. 312–324, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.005>.

PAULI, Eva et al. Determinants of fog and low stratus occurrence in continental central Europe – a quantitative satellite-based evaluation. *Journal of Hydrology*, [s. l.], v. 591, n. August, p. 125451, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125451>.

PAULI, Eva; CERMAK, Jan; TEULING, Adriaan J. Enhanced Nighttime Fog and Low Stratus Occurrence Over the Landes Forest, France. *Geophysical Research Letters*, [s. l.], v. 49, n. 5, p. 1–9, 2022. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021GL097058>.

POHL, Marius J et al. A new fog and low stratus retrieval for tropical South America reveals widespread fog in lowland forests. *Remote Sensing of Environment*, ["University of Marburg, Faculty of Geography, Laboratory for Climatology and Remote Sensing, Deutschhausstraße 12, Marburg, 35032, Germany", "University of Munich, Department of Geography, Luisenstr. 37, Munich, 80333, Germany"], "University of Marburg, F, v. 264, p. 112620, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111763930&doi=10.1016%2Fj.rse.2021.112620&partnerID=40&md5=5e22722f23c0e4dc9b4e1e4591f1abfbf>.

POMPEU, Patrícia Vieira et al. Assessing Atlantic cloud forest extent and protection status in southeastern Brazil. *Journal for Nature Conservation*, [s. l.], v. 43, p. 146–155, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1617138117304119>.

POUNDS, J. Alan; FOGDEN, Michael P.L.; CAMPBELL, John H. Biological response to climate change on a tropical mountain. *Nature*, [s. l.], v. 398, n. 6728, p. 611–615, 1999.

POUTEAU, Robin et al. Will climate change shift the lower ecotone of tropical montane cloud forests upwards on islands?. *Journal of Biogeography*, [s. l.], v. 45, n. 6, p. 1326–1333, 2018.

RAY, Deepak K. et al. Effects of land use in Southwest Australia: 1. Observations of cumulus cloudiness and energy fluxes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, [s. l.], v. 108, n. D14, p. 1–20, 2003. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002JD002654>.

RUV LEMES, Murilo et al. Impacts on South America moisture transport under Amazon deforestation and 2 °C global warming. *Science of The Total Environment*, [s. l.], v. 905, n. September, p. 167407, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167407>.

SALATI, Eneas et al. Recycling of water in the Amazon Basin: An isotopic study. *Water Resources Research*, [s. l.], v. 15, n. 5, p. 1250–1258, 1979. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR015i005p01250>.

SCHULZ, Hans Martin et al. Mapping the montane cloud forest of Taiwan using 12 year MODIS-derived ground fog frequency data. *PLOS ONE*, ["Laboratory for Climatology and Remote Sensing, Philipps-Universität Marburg, Marburg, Germany", "School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University, Taipei, Taiwan", "Department of Natural Resources and Environmental Studies, Natio, v. 12, n. 2, p. e0172663, 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85014232858&doi=10.1371%2Fjournal.pone.0172663&partnerID=40&md5=037562122610231cd0e0a3374552f78e>.

SILVA, Fernando Rodrigues da et al. Expanding the knowledge about the occurrence of anurans in the highest amphibian. [s. l.], v. 17, n. 2, p. 1–13, 2017.

TEULING, Adriaan J. et al. Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests. *Nature Communications*, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 14065, 2017. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ncomms14065>.

THEEUWES, Natalie E. et al. Persistent cloud cover over mega-cities linked to surface heat release. *npj Climate and Atmospheric Science*, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 15, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41612-019-0072-x>.

TORREGROSA, Alicia; COMBS, Cindy; PETERS, Jeff. GOES-derived fog and low cloud indices for coastal north and central California ecological analyses. *Earth and Space Science*, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 46–67, 2016. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015EA000119>.

WANG, J L et al. An analysis of the fog distribution in Beijing for the 2001–2005 period using NOAA and FY data. *ATMOSPHERIC RESEARCH*, ["China Meteorol Adm, Inst Urban Meteorol, Beijing 100089, Peoples R China", "Natl Satellite Meteorol Ctr, Beijing 10008, Peoples R China", "Beijing Meteorol Informat Ctr, Beijing 100089, Peoples R China"], v. 96, n. 4, p. 575–589, 2010.

WERNER, Zackary et al. MODIS sensors can monitor spatiotemporal trends in fog and low cloud cover at 1 km spatial resolution along the U.S. Pacific Coast. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, [s. l.], v. 28, 2022.

WILSON, Adam M.; JETZ, Walter. Remotely Sensed High-Resolution Global Cloud Dynamics for Predicting Ecosystem and Biodiversity Distributions. *PLOS Biology*, [s. l.], v. 14, n. 3, p. e1002415, 2016. Disponível em: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pbio.1002415>.

XU, Ru et al. Contrasting impacts of forests on cloud cover based on satellite observations. *Nature Communications*, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 670, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-28161-7>.

YAN, Shuqi et al. To what extents do urbanization and air pollution affect fog?. *Atmospheric Chemistry and Physics*, [s. l.], v. 20, n. 9, p. 5559–5572, 2020. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/20/5559/2020/>.

CAPITULO 3

ANÁLISE DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE NEBLINA NOS NÚCLEOS CUNHA, PICINGUABA E SANTA VIRGÍNIA DO PESM, SÃO PAULO

Resumo

Os satélites em órbita polar têm demonstrado sua eficácia em estudos sobre dinâmica espacial de neblina em diferentes ecossistemas naturais em escala global. Porém, o estudo de padrões locais de neblina demanda uma melhor resolução espacial para diversas aplicações ecológicas. O objetivo desta pesquisa foi caracterizar o processo de formação da neblina e a sua distribuição espacial nos núcleos Cunha, Picinguaba e Santa Virgínia do Parque Estadual Serra do Mar, no estado de São Paulo, utilizando imagens de alta resolução espacial obtidas pelo satélite Landsat. Foi calculada a variabilidade e densidade da neblina nos meses de junho até dezembro, entre os anos 1984 e 2023. Também foram calculadas a Temperatura da Superfície do Solo (TSS), componentes do vento e variáveis topográficas para analisar sua influência nos processos de formação de neblina. O algoritmo de detecção identificou 60 cenas com presença de neblina, com maior densidade registrada nas escarpas do núcleo Picinguaba. Os resultados indicam que o vento desempenha um papel fundamental na formação da neblina orográfica, sendo um fator relevante no transporte de umidade entre os núcleos do PESM. No núcleo Picinguaba, a densidade de neblina foi maior, enquanto os núcleos Cunha e Santa Virgínia apresentaram densidades baixas, mas com alta variabilidade temporal, associada a eventos frequentes de neblina de média densidade. Estudos futuros devem focar no monitoramento da distribuição da neblina além dos limites do PESM e em seu impacto regional no ciclo hidrológico, considerando as mudanças no uso da terra e seus efeitos.

Palavras-chave: Landsat, detecção de neblina, neblina orográfica, Google Earth Engine, floresta de neblina; mudanças climáticas

1 INTRODUÇÃO

A cobertura de nuvens e a precipitação são fatores ambientais importantes que podem ter uma variabilidade espacial significativa, e são particularmente difíceis de interpolar (Wilson; Jetz, 2016). As imagens de satélite são uma fonte de medições abundantes e intercalibradas da atmosfera e da superfície da Terra (Sousa *et al.*, 2019) que podem ajudar na medição dessa variabilidade espacial.

Embora os mecanismos de formação de nuvens sobre florestas sejam relativamente bem compreendidos, isso é menos aprofundado no caso da intensidade e direção das interações da neblina com a superfície (Pauli; Cermak; Teuling, 2022). Entender os mecanismos de formação pode expandir a nossa compreensão da neblina na escala da paisagem (Baguskas; Clemesha; Loik, 2018), o que permitiria levar esse conhecimento a diversas aplicações ecológicas.

A detecção de neblina usando observações de satélite geostacionários tem sido usada devido às suas vantagens na resolução temporal de curto prazo, ampla área de observação e muitos canais espectrais (Kim; Ryu; Hong, 2023). Porém, a resolução espacial dos sensores geostacionários é demasiada grosseira para fornecer estimativas espaciais confiáveis acima de terrenos escarpados próximos às costas (Lehnert; Thies; Bendix, 2020). Nessas circunstâncias, a utilização de dados de sensores de órbita polar parece ser uma melhor opção devido à resolução espacial mais fina, que caracteriza esse tipo de sensores.

Os dados de sensores polares mostraram-se capazes de mapear a conexão espacial entre a alta frequência de neblina e a ocorrência de florestas de neblina (Schulz *et al.*, 2016, 2017). Este tipo de dado foi útil para identificar áreas de resguardo para espécies vulneráveis durante as secas na Amazônia (Pohl *et al.*, 2023).

Embora os dados tomados por sensores polares como AVHRR ou MODIS tenham múltiplas aplicações no estudo da ecologia, a resolução espacial de 1 km fornecida não é suficiente para capturar padrões locais de neblina e nuvens baixas (Lehnert *et al.*, 2018).

Para investigar a dinâmica local da neblina, são necessários dados de satélite que combinem uma série temporal ampla com uma maior resolução espacial. Nesse contexto, Ball; Tzanopoulos (2020) propuseram uma técnica de detecção de neblina utilizando imagens do satélite Landsat, com resolução espacial de 30 m. Essa técnica mostrou-se eficaz para estudar a relação entre a neblina e as características topográficas e climáticas nas montanhas centrais do sul da Arábia.

Com o avanço dessas técnicas e os resultados promissores obtidos por meio de resoluções espaciais mais detalhadas, torna-se viável o estudo dos padrões de distribuição da

neblina em escala local. O objetivo deste estudo foi caracterizar o processo de formação da neblina e a sua distribuição espacial nos núcleos Cunha, Picinguaba e Santa Virgínia do PESM, utilizando imagens de alta resolução espacial obtidas pelo satélite Landsat.

2 MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Os núcleos Cunha, Picinguaba e Santa Virgínia do PESM foram selecionados como área de estudo deste capítulo (Figura 12). A área localizada no Litoral Norte do estado de São Paulo possui uma vegetação dominante classificada como Floresta Ombrófila Densa e é fortemente influenciada pela precipitação, temperatura e frequência de neblina (Marchiori *et al.*, 2016).

Ao contrário das regiões com chuvas escassas, cuja vegetação é esparsa e de pequeno porte, as florestas nativas presentes no Litoral Norte são desenvolvidas, funcionando como verdadeiras coletoras de água de neblina que, na ausência das mesmas, seria perdida para a atmosfera (Arcova *et al.*, 2012).

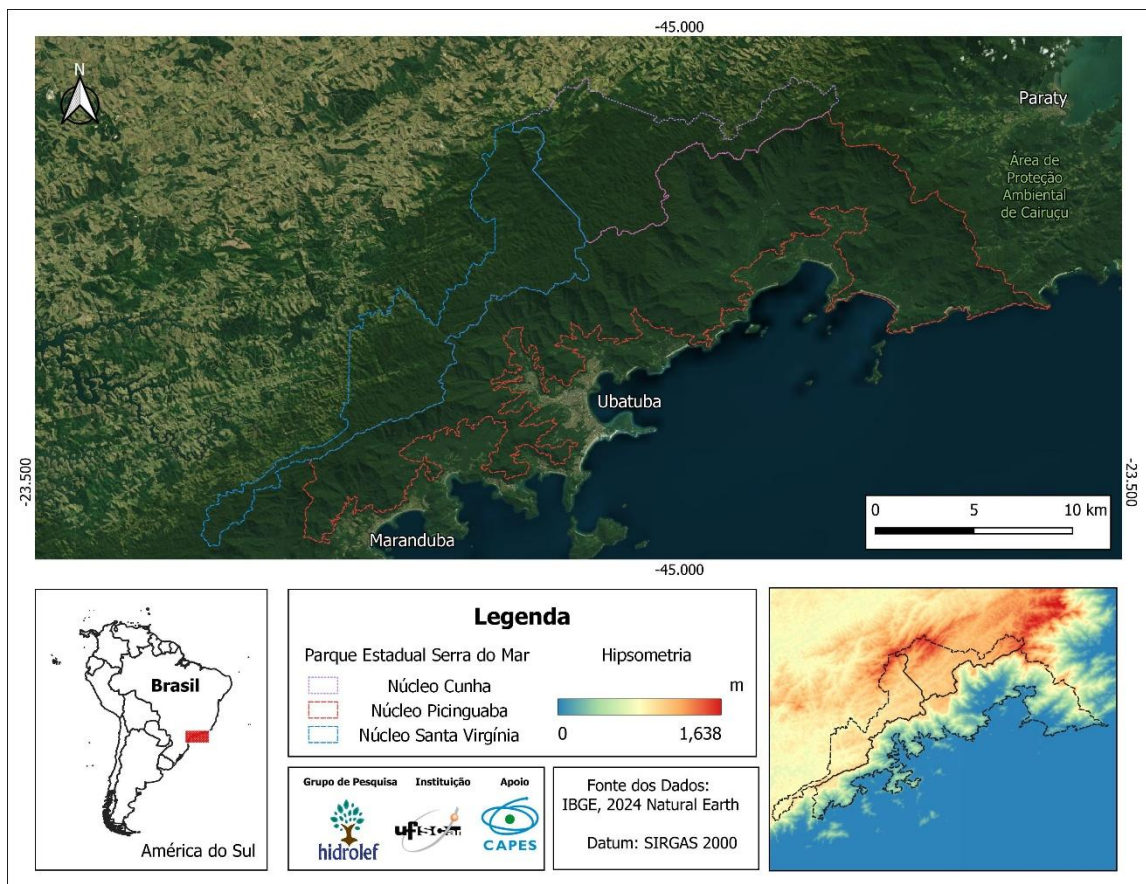


Figura 12- Delimitação dos limites administrativos e hipsometria dos núcleos Cunha, Picinguaba e Santa Virgínia, no Litoral Norte do Parque Estadual Serra do Mar.

A região apresenta elevada umidade relativa do ar ao longo do ano devido à proximidade com o Oceano Atlântico. Os maiores índices de umidade média são registrados nos meses de janeiro, fevereiro e março, variando entre 80% e 85%, enquanto os menores valores médios ocorrem em julho, agosto e setembro, ficando abaixo de 80% (Armani, 2004).

O clima regional é classificado como tropical úmido, sem estação seca bem definida. As precipitações médias anuais são de 2200 mm, 1200 mm e 1998 mm nos núcleos Picinguaba, Santa Virgínia e Cunha, respectivamente, com altitudes variando entre 0 e 1670 metros acima do nível do mar (m) (Oliveira, 2007; Veneziani; Galvani; Ranzini, 2013). Os meses mais secos são de junho a agosto, com mínimas de até 30 mm (Oliveira, 2007).

As temperaturas mais altas ocorrem em janeiro, fevereiro e março. A partir de abril, há uma queda gradual até julho, quando são registrados os menores valores e, a partir de agosto, as temperaturas começam a subir, atingindo os valores máximos novamente em dezembro (Armani, 2004).

Diferentemente do domínio das planícies encontrado na Baixada Santista e no Litoral Sul (Koga-Vicente, 2010), o Litoral Norte é marcado pelo relevo da Serra do Mar, caracterizado pela formação de uma encosta íngreme de elevação súbita, que atua como intensificador orográfico (Roseghini, 2007).

As condições microclimáticas da região resultam na presença constante de nuvens em altitudes que variam de 400 a 1200 m (Rodríguez, 2002). Essas nuvens são compostas por gotículas que são facilmente transportadas pelos ventos em direção às montanhas costeiras.

As encostas da Serra do Mar desempenham um papel fundamental ao reter a umidade transportada pela brisa marítima, resultando no aumento de precipitações do tipo orográficas (Marchiori *et al.*, 2016). Além disso, o PESM abriga as nascentes de diversos rios que deságuam no Oceano Atlântico, fornecendo água para as populações litorâneas (Oliveira, 2007).

Na região litorânea do sudeste e em áreas interiores do estado de São Paulo, observa-se uma forte influência da brisa marítima, que prevalece na maior parte do dia (Veneziani; Galvani; Ranzini, 2013). Esse fenômeno é perceptível em setores do PESM como o núcleo Cunha, onde os eventos de neblina orográfica são comuns (Arcova *et al.*, 2012).

2.2 Detecção de neblina

Neste estudo, adotou-se a metodologia de Ball; Tzanopoulos (2020) para detecção de neblina com imagens de alta resolução espacial. Foram utilizadas todas as imagens disponíveis

na coleção de refletância ‘topo da atmosfera’ dos satélites Landsat 5 TM, 7 ETM+ e 8 OLI, de junho a dezembro, entre os anos 1984 e 2023. Selecionaram-se as estações de inverno e primavera por serem os períodos com menor quantidade de chuvas e maior presença de neblina, respectivamente (Arcova *et al.*, 2016)

As coleções de dados foram processadas no Google Earth Engine (GEE) para calcular a densidade média e a variabilidade temporal da neblina. A densidade foi definida como a média dos valores de refletância do nevoeiro em cada célula, enquanto a variabilidade foi determinada pelo desvio padrão. Essas variáveis são adimensionais, pois representam a fração do pixel coberta pela neblina. A banda NIR foi usada nesta análise, pois detecta a maior faixa de valores de refletância em áreas de neblina (Ball; Tzanopoulos, 2020), com comprimento de banda de 0,76-0,90 μm , 0,77-0,90 μm e 0,85-0,88 μm para os sensores TM, ETM+ e OLI respectivamente.

O código desenvolvido e disponibilizado pelos autores da metodologia utilizada foi adaptado para nossa área de estudo. Embora o litoral paulista não seja afetado pelas monções, é possível observar condições similares com a área de estudo original. Arcova *et al.* (2016) descreveram a topografia no núcleo Cunha com predominância de espigões com cimos ondulados e traçados sinuosos, onde são frequentes os episódios de neblina orográfica influenciados pelos ventos oceânicos.

Esta metodologia é eficaz na detecção de neblina densa porque contrasta muito bem com a superfície da terra, o que não acontece com eventos irregulares ou de baixa densidade de neblina (Ball; Tzanopoulos, 2020). Com o conjunto de dados no estudo dos autores Wilson; Jetz (2016), foi possível perceber que a maior frequência de nuvens localizaram-se nas zonas mais escarpadas do PESM. O encontrado pelos autores está de acordo com o observado em campo, quando a neblina cobre por completo a floresta e forma um manto denso de neblina no topo da serra (Figura 13).

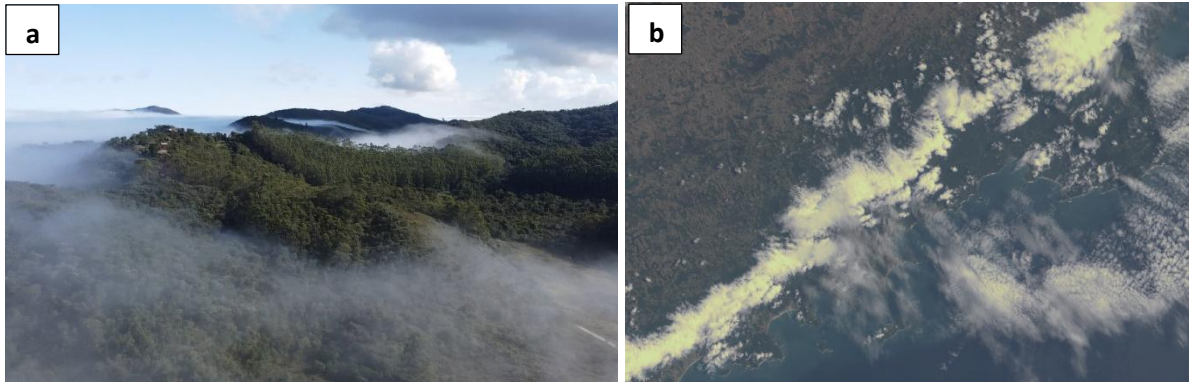


Figura 13. Ocorrência de eventos de neblina em a) topo da serra no núcleo Cunha, 28-05-2024, PESM e b) imagem satélite Landsat 5, 07-11-1999. Fonte: Rafael Bignotto, Instituto de Pesquisas Ambientais e imagens Landsat do catálogo Google Earth Engine, respectivamente.

2.3 Variáveis climatológicas e topográficas

Variáveis como temperatura, rugosidade do terreno, orientação de vertentes e componentes do vento foram calculadas para analisar sua interação com a neblina presente no PESM.

Temperatura da Superfície do Solo (TSS) foi estimada utilizando dados do canal de infravermelho térmico do sensor Landsat 8 OLI/TIRS. A análise foi realizada na plataforma GEE, aplicando o método de Canal Único (SC, em inglês), conforme descrito por Roy e Bari (2022) para as coleções do Landsat 8.

Os dados de velocidade e direção do vento foram obtidos na base mensal de reanálise ERA5-Land mensal, disponível no catálogo do GEE. Desenvolvido pelo Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (ECMWF), esse conjunto de dados combina modelos climatológicos com observações globais, cobrindo o período de 1950 até o presente (Muñoz, 2019). A análise da predominância da velocidade e direção do vento foi realizada para as estações de inverno e primavera, permitindo compreender melhor os processos de formação de neblina em cada núcleo da área de estudo.

Foi utilizado o Índice de Rugosidade de Terreno (TRI) para quantificar a heterogeneidade do relevo, calculando-se a soma das variações altimétricas entre uma célula da grade e suas oito células vizinhas (Riley; DeGloria; Elliot, 1999). Para determinar a orientação das vertentes, foi aplicada a metodologia descrita por Marmentini; Cassol (2012).

Os cálculos do TRI e da orientação das vertentes foram realizados utilizando dados do modelo digital de elevação da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com uma resolução

de 30 metros, disponibilizado pelo Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. A análise e o processamento desses dados foram executados por meio das ferramentas do QDAL no software QGIS 3.28.11.

2.3 Análise dos dados

As estatísticas zonais foram utilizadas para analisar os produtos do algoritmo de densidade média e variabilidade temporal da neblina no software QGIS 3.28.11. Os valores obtidos foram comparados entre os núcleos da área de estudo para identificar padrões espaciais na ocorrência de NNB.

A correlação de Pearson foi aplicada para avaliar a relação espacial entre a densidade de neblina e a TSS. O cálculo foi realizado no RStudio utilizando o pacote 'terra', que permite a análise de correlação entre dados raster.

Para examinar a influência da velocidade do vento, foi realizado um teste-t para verificar a significância estatística das diferenças entre os valores obtidos nas duas estações analisadas. Esse teste foi conduzido no software Jamovi 2.3.21, utilizando a média mensal dos meses de cada estação, no período entre 1984 e 2023.

Todos os testes estatísticos foram aplicados considerando os pressupostos necessários para sua adequada utilização, garantindo a robustez dos resultados obtidos.

3 RESULTADOS

O algoritmo de detecção identificou um total de 60 cenas com presença de neblina, sendo 24 capturadas pelo sensor Landsat TM, 22 pelo Landsat ETM+ e 14 pelo Landsat OLI. Detalhes sobre o satélite, sensor, número e data de cada cena adquirida estão disponíveis no Material Suplementar 3.

A análise estatística zonal revelou que os menores valores de densidade média de neblina foram registrados nos núcleos Cunha ($0,0465 \pm 0,024$) e Santa Virgínia ($0,0571 \pm 0,051$), enquanto os maiores valores ocorreram no núcleo Picinguaba ($0,2909 \pm 0,103$), concentrados principalmente nas escarpas (Figura 14).

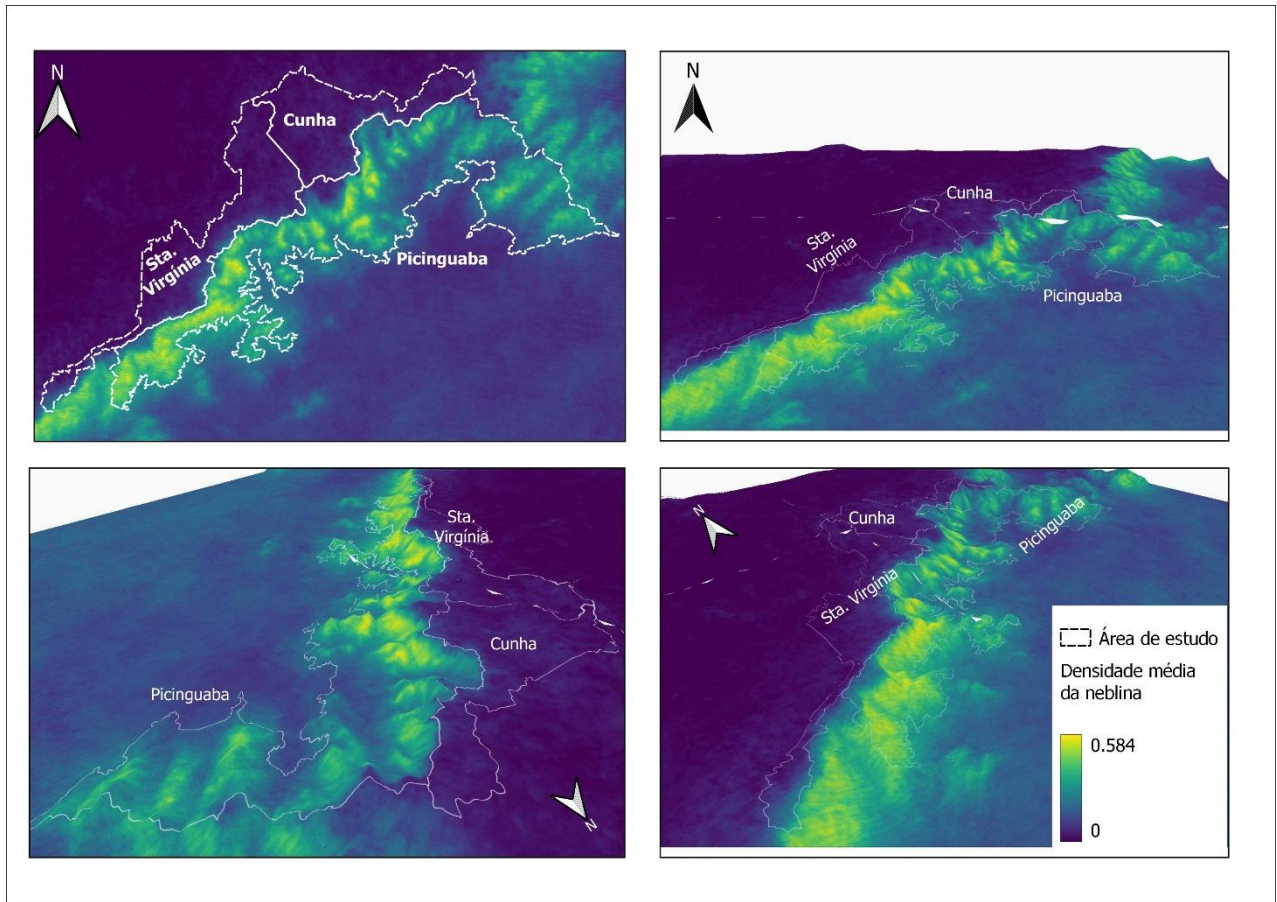


Figura 14- Densidade média da neblina em três dimensões entre os anos 1984 e 2023, nos núcleos Cunha, Santa Virgínia e Picinguaba do Parque Estadual da Serra do Mar, estado de São Paulo; calculados com imagens dos satélites Landsat 5, 7 e 8 na plataforma Google Earth Engine (GEE).

A interação entre a rugosidade dos dosséis florestais no núcleo Picinguaba e fatores como topografia, insolação e a orientação das vertentes cria microclimas específicos. Nessas áreas, a combinação de temperaturas elevadas e taxas intensificadas de evapotranspiração (ET) favorece um ambiente úmido e otimiza o processo de formação de neblina orográfica.

A análise de correlação de Pearson entre a densidade média de neblina e a TSS apresentou um coeficiente de $R = 0,6461$, indicando uma correlação moderada a forte. Esses resultados sugerem que, dentro das florestas do PESM, temperaturas mais elevadas estão associadas a uma maior densidade de neblina (Figura 15A e 15B).

Nas áreas urbanas costeiras de Ubatuba e Paraty, onde predominam temperaturas mais elevadas devido às ilhas de calor, os menores valores de densidade e variabilidade da neblina foram registrados. Esse fenômeno ocorre porque o aquecimento intenso da superfície acelera a dissipação da neblina, dificultando a formação de eventos densos (Gautam; Singh, 2018).

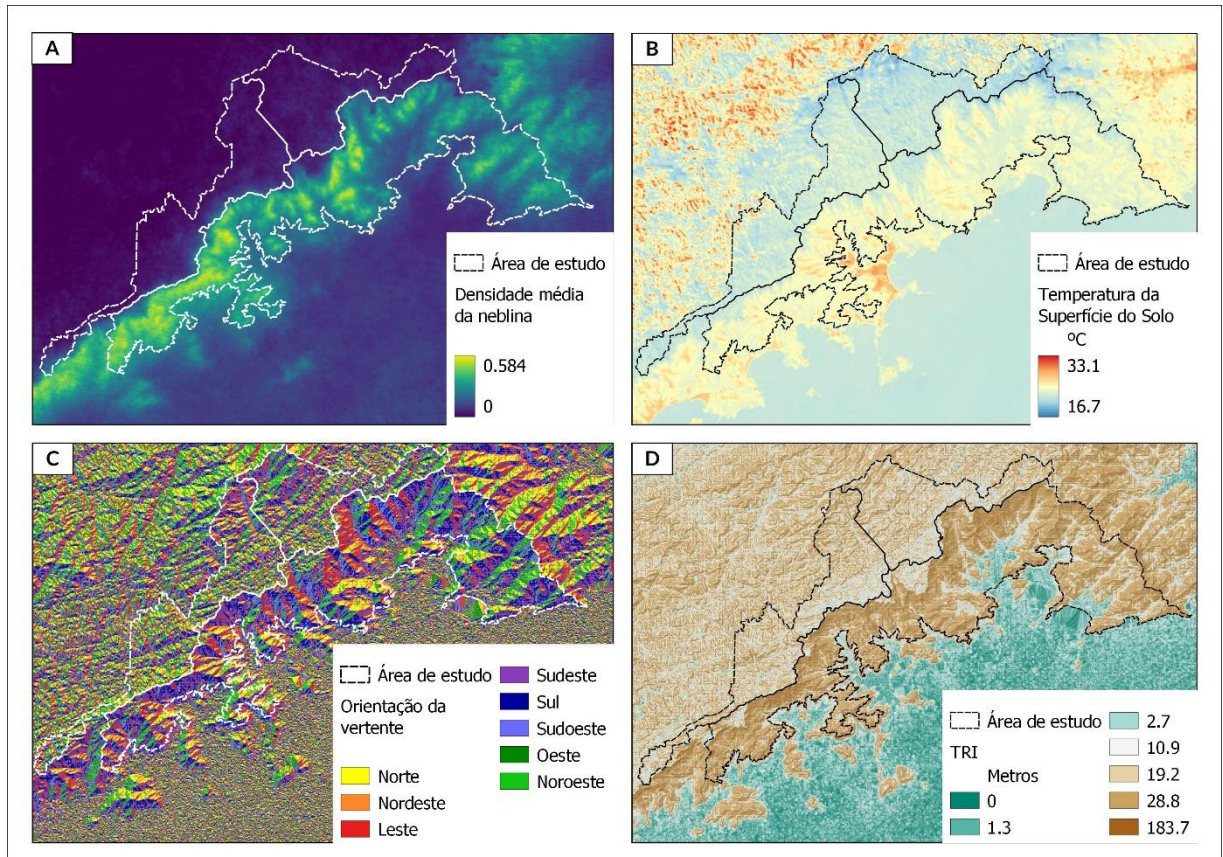


Figura 15- Distribuição dos valores de A) densidade média da neblina, B) temperatura da superfície do solo, C) orientação da vertente e D) índice rugosidade do terreno (TRI), encontrados nos núcleos Cunha, Santa Virgínia e Picinguaba do PESM.

A análise do TRI demonstrou que o núcleo Picinguaba possui a maior rugosidade ($32,34 \pm 17,99$ m), enquanto os núcleos Cunha ($20,28 \pm 9,84$ m) e Santa Virgínia ($20,43 \pm 10,28$ m) apresentaram valores mais baixos (Figura 15D). A maior variância registrada no núcleo Picinguaba ($323,90$ m), em comparação com Cunha ($96,81$ m) e Santa Virgínia ($105,85$ m), sugere um relevo mais irregular e com variações extremas de elevação.

A distribuição das vertentes indicou uma predominância de áreas voltadas para o sul nos três núcleos, sem uma forte tendência para uma orientação específica (Quadro 2).

Quadro 2- Área ocupada pelas vertentes segundo sua orientação nos núcleos Picinguaba, Cunha e Santa Virgínia do Parque Estadual Serra do Mar.

Núcleo	Área núcleo (há)	Orientação vertente	Área vertente (ha)	Orientação (%)
Picinguaba	47372,1	Sul	10 660,6	22,5
		Sudoeste	5 840,3	12,3
		Sudeste	9 202,8	19,4
		Leste	6 230,8	13,2
		Norte	3 993,3	8,4
		Noroeste	3498,3	7,4
		Oeste	4 584,1	9,7
		Nordeste	3 361,9	7,1
Cunha	13109,4	Sul	2 197,0	16,8
		Sudoeste	1 420,0	10,8
		Sudeste	2 238,8	17,1
		Leste	1 437,8	11,0
		Norte	1 291,8	9,9
		Noroeste	1 769,7	13,5
		Oeste	1 737,1	13,3
		Nordeste	1 017,3	7,8
Santa Virgínia	17597,0	Sul	2 389,3	13,6
		Sudoeste	1 831,0	10,4
		Sudeste	2 248,9	12,8
		Leste	1 935,0	11,0
		Norte	2 715,2	15,4
		Noroeste	2 439,7	13,9
		Oeste	2 112,1	12,0
		Nordeste	1 925,9	10,9

A análise descritiva da variabilidade temporal da neblina revelou que o núcleo Picinguaba apresentou os maiores valores médios ($0,2699 \pm 0,029$), seguido pelos núcleos Cunha ($0,1342 \pm 0,033$) e Santa Virgínia ($0,1330 \pm 0,051$) (Figura 16a). Além disso, observou-se que a variabilidade da neblina no mar ($0,1892 \pm 0,022$) foi maior do que em áreas continentais fora do PESM ($0,0281 \pm 0,034$). Esse padrão pode estar associado ao fato de que, das 60 cenas Landsat com presença de neblina, apenas 13 foram registradas durante o inverno. Assim, a variabilidade temporal parece ser amplamente influenciada pela neblina observada na primavera, quando massas de ar se deslocam predominantemente do mar para o continente (Figura 16b).

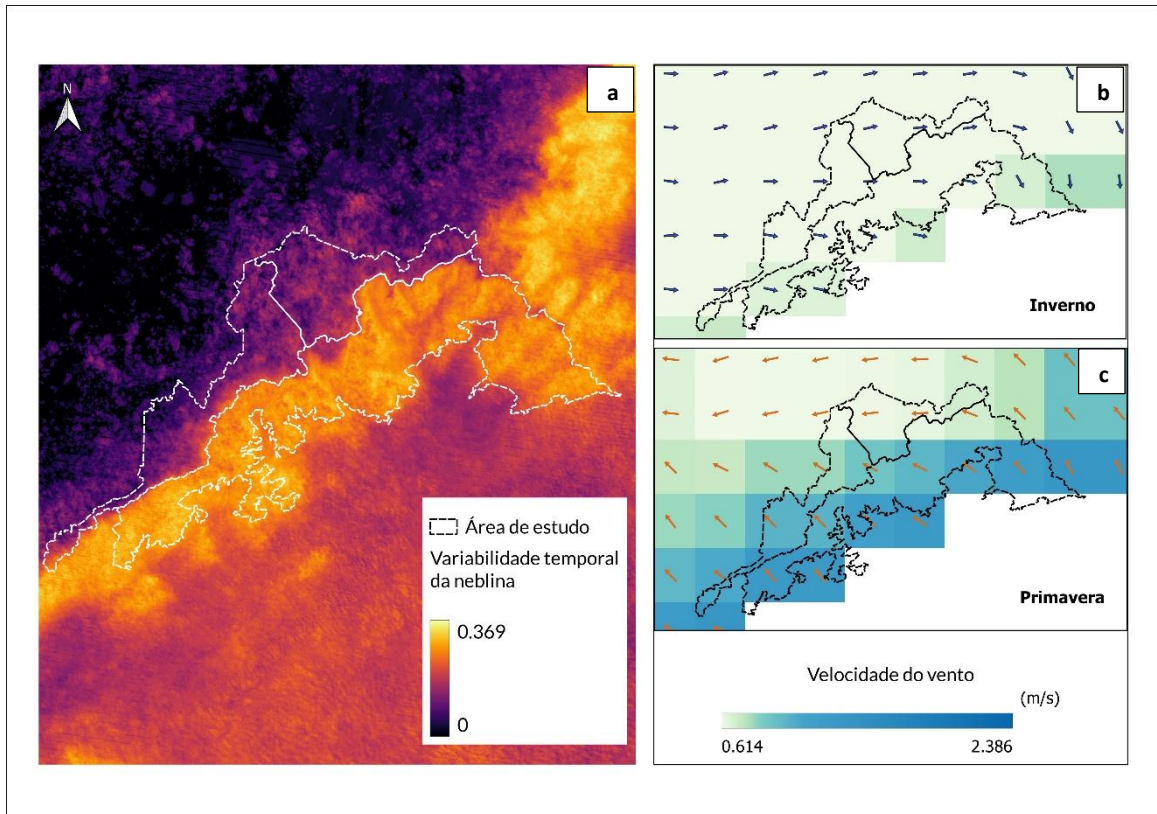


Figura 16- a) Variabilidade temporal da neblina e componentes de velocidade e direção do vento em c) inverno e b) primavera, presentes nos núcleos Cunha, Santa Virgínia e Picinguaba do PESHM calculados com imagens dos satélites Landsat 5, 7 e 8 e dados de reanálise ERA5-Land na plataforma Google Earth Engine (GEE).

Durante o inverno, as temperaturas mais baixas, aliadas aos ventos predominantemente direcionados ao oceano, resultam em velocidades significativamente menores ($p < 0,001$) em comparação com a primavera (Figura 17).

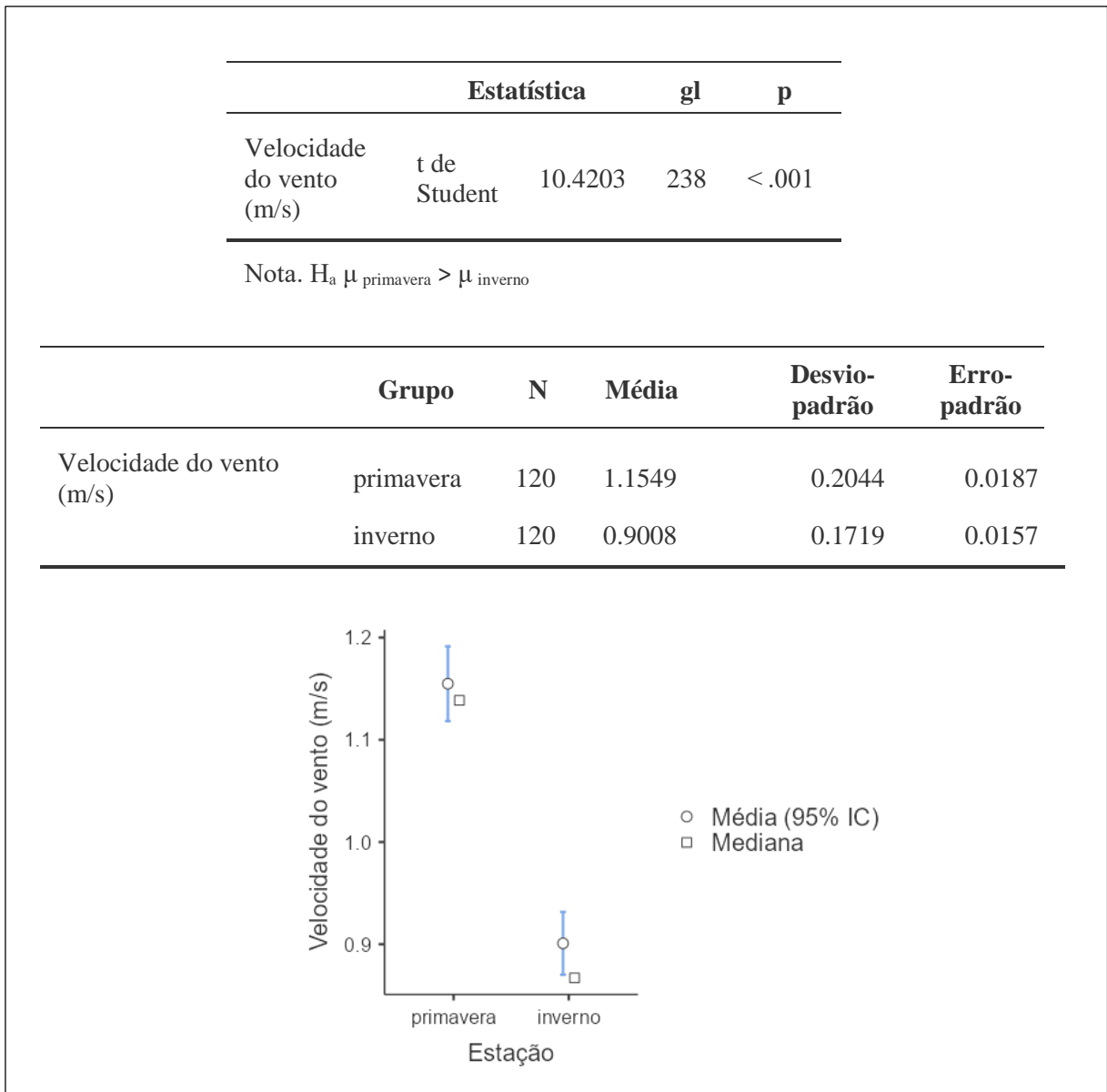


Figura 17. Valores estadísticos de um Teste t para as variáveis independentes inverno e primavera, sobre o efeito da velocidade do vento em cada estação nos núcleos Picinguaba, Cunha e Santa Virgínia no Parque Estadual Serra do Mar. Aceita-se hipótese nula (H_a), velocidade média dos ventos em primavera é maior do que em inverno.

4 DISCUSSÃO

4.1 Densidade média da neblina

Os resultados mostraram que as maiores densidades médias de neblina estão associadas a áreas de relevo mais acidentado, o que está em conformidade com estudos em outras áreas

que indicam uma maior densidade de neblina em encostas montanhosas, onde a elevação e a umidade favorecem a formação de neblina orográfica (Lehnert *et al.*, 2018), especialmente durante o dia (Keim-Vera *et al.*, 2024). A correlação positiva entre densidade de neblina e temperatura da superfície sugere que o aumento da TSS pode estar influenciando a formação de neblina no PESM.

Nas florestas, a rugosidade dos dosséis facilita a troca eficiente de calor e umidade entre a superfície e a atmosfera, aumentando o fluxo de calor latente (Teuling *et al.*, 2017). Esse processo favorece uma maior ET, fornecendo um suprimento abundante de vapor de água (Xu *et al.*, 2022), que, ao ser forçado a subir pelo relevo da Serra do Mar, intensifica a formação de neblina orográfica.

A maior rugosidade superficial das florestas, em comparação com áreas desmatadas, aprimora a troca de calor e umidade entre a superfície terrestre e a atmosfera (Duveiller *et al.*, 2021; Khanna; Medvigy, 2014). Essa interação modera a temperatura da superfície, aumentando a energia líquida disponível e direcionando o excesso de energia para a ET, o que favorece o desenvolvimento de nuvens de baixo nível (Teuling *et al.*, 2017).

Além do efeito da vegetação, a irregularidade do relevo, especialmente no núcleo Picinguaba, também influencia a distribuição da neblina. Esse núcleo apresenta uma maior extensão de vertentes expostas à radiação solar, principalmente próximo ao topo da serra, resultando em um aumento da TSS. Em áreas de relevo heterogêneo, a variação na temperatura da superfície é influenciada pela radiação solar, que aquece a superfície e regula o transporte de calor entre o solo e a atmosfera (Dias dos Santos; Lopes de Moraes; Galvani, 2016).

Nas regiões subtropicais austrais, vertentes voltadas para o leste recebem maior insolação no período da manhã, enquanto aquelas orientadas para o norte são intensamente aquecidas ao meio-dia (Marmantini; Cassol, 2012). A combinação dessas áreas de maior insolação com a rugosidade dos dosséis florestais do PESM e o relevo irregular pode elevar significativamente a TSS. Nesse contexto, a relação entre TSS e ET permite identificar padrões distintos na formação de neblina, especialmente quando fatores topográficos são levados em consideração (Wei *et al.*, 2023).

4.2 Variabilidade temporal da neblina

Estudos anteriores têm demonstrado como a direção e velocidade do vento desempenham um papel crucial na modulação da ocorrência de neblina e nuvens baixas em uma escala regional (Pauli *et al.*, 2024; Pauli; Cermak; Teuling, 2022).

Os ventos mais intensos registrados na primavera ajudam a explicar a maior variabilidade da neblina no núcleo Picinguaba e a diferença observada entre o mar e o continente fora da área de estudo. Esse fenômeno ocorre porque existe uma forte correlação positiva entre a velocidade do vento e a frequência de neblina orográfica (Keim-Vera et al., 2024). Ventos mais rápidos transportam massas de ar úmido ao longo das encostas, promovendo a condensação e a formação de neblina no relevo do PESM. Situações semelhantes foram observadas em florestas de neblina na França, onde ventos mais lentos, combinados com processos de resfriamento do ar, favoreceram a maior ocorrência de neblina e nuvens baixas, especialmente nos períodos mais secos (Pauli; Cermak; Teuling, 2022).

Durante a primavera, os ventos predominantes do noroeste transportam umidade do oceano para o continente, intensificando o processo orográfico de formação de neblina nas escarpas do núcleo Picinguaba. Esse bloqueio do fluxo de ar reduz a velocidade do vento nos núcleos Cunha e Santa Virgínia, permitindo a formação de neblina de forma mais uniforme e prolongada. Esse padrão é semelhante ao registrado na costa da Austrália, onde o relevo bloqueia fluxos de ar úmido do Oceano Índico, favorecendo a formação de neblina em regiões de menor velocidade do vento, como o aeroporto de Perth (Roux et al., 2024).

As condições topográficas específicas do núcleo Picinguaba também desempenham um papel importante na formação e persistência da neblina nos núcleos Cunha e Santa Virgínia. Embora as densidades médias mais altas tenham sido registradas no núcleo mais próximo à costa, observou-se que a variabilidade temporal da neblina nos núcleos Cunha e Santa Virgínia apresentou valores elevados em comparação com outras áreas fora do PESM.

A alta variabilidade ligada à baixa densidade nos núcleos Cunha e Santa Virgínia pode ser interpretada como uma frequência elevada de eventos de neblina de média densidade. Esses eventos parecem estar relacionados ao aumento da convergência do fluxo de umidade característico do sudeste brasileiro, impulsionado pela brisa marítima e intensificado pela topografia (Berbery; Collini, 2000).

5 CONCLUSÕES

Os resultados indicaram que a formação de neblina no PESM é fortemente influenciada pela interação entre a topografia, o microclima local e as dinâmicas atmosféricas regionais. O algoritmo de detecção identificou 60 cenas com presença de neblina, com maior densidade nas escarpas do núcleo Picinguaba.

Fatores como a velocidade e direção dos ventos, a temperatura da superfície do solo (TSS) e heterogeneidade do relevo desempenham um papel importante no processo de formação de neblina e na regulação do microclima no PESM.

Os padrões observados variam entre os núcleos do PESM. No núcleo Picinguaba, a densidade de neblina foi maior, enquanto os núcleos Cunha e Santa Virgínia apresentaram densidades baixas, mas com alta variabilidade temporal, associada a eventos frequentes de neblina de média densidade.

A influência dos ventos também teve influência nos padrões de neblina. Durante o inverno, os ventos são mais fracos, permitindo que as temperaturas mais baixas favoreçam a formação de neblina em áreas florestais. Já na primavera, a direção predominante e maiores velocidades dos ventos deslocam massas de ar úmido para o continente, intensificando a formação de neblina orográfica nas escarpas do núcleo Picinguaba e influenciando a distribuição nos demais núcleos.

Dessa forma, este estudo reforça a importância da interação entre relevo, vegetação e circulação atmosférica na dinâmica da neblina no PESM. Os resultados indicam que a área de conservação desempenha um papel essencial na formação e permanência de neblina dentro dos núcleos estudados. São necessários futuros estudos do monitoramento da distribuição da neblina fora do PESM para compreender sua conexão com outras florestas de neblina, como a Serra da Mantiqueira, além de permitir a avaliação dos impactos das mudanças no uso do solo sobre os processos hidrológicos e climáticos da região.

6 REFERÊNCIAS

ARCOVA, Francisco Carlos Soriano et al. Captação de água de nevoeiros por coletores cilíndricos instalados na Serra do Mar, Cunha-SP. *Revista Geonorte*, [s. l.], p. 1218–1229, 2012.

ARCOVA, Francisco Carlos Soriano et al. OCORRÊNCIA DE NEVOEIROS EM UMA MICROBACIA EXPERIMENTAL NA SERRA DO MAR, CUNHA, SP. *Revista Brasileira de Climatologia*, [s. l.], v. 18, 2016. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/44956>.

ARMANI, Gustavo. Interações entre a atmosfera e a superfície terrestre: variações da temperatura e umidade na bacia B do Núcleo Cunha (IF) - SP. *GEOUSP : Revista da Pós-Graduação em Geografia*, [s. l.], 2004.

- BAGUSKAS, Sara A; CLEMESHA, Rachel E.S.; LOIK, Michael E. Coastal low cloudiness and fog enhance crop water use efficiency in a California agricultural system. *Agricultural and Forest Meteorology*, ["Department of Environmental Studies, University of California-Santa Cruz, Santa Cruz, CA, United States", "Scripps Institution of Oceanography, University of California, La Jolla, San Diego, CA, United States"], v. 252, p. 109–120, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041470658&doi=10.1016%2Fj.agrformet.2018.01.015&partnerID=40&md5=36bae413fdffa29a4d31882224def39c>.
- BALL, Lawrence; TZANOPOULOS, Joseph. Interplay between topography, fog and vegetation in the central South Arabian mountains revealed using a novel Landsat fog detection technique. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 498–513, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rse2.151>.
- BERBERY, Ernesto H.; COLLINI, Estela A. Springtime Precipitation and Water Vapor Flux over Southeastern South America. *Monthly Weather Review*, [s. l.], v. 128, n. 5, p. 1328–1346, 2000. Disponível em: [http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493\(2000\)128%3C1328:SPAWVF%3E2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493(2000)128%3C1328:SPAWVF%3E2.0.CO;2).
- DIAS DOS SANTOS, Denise; LOPES DE MORAES, Sara; GALVANI, Emerson. VARIACÃO DA TEMPERATURA DO AR MÉDIA, MÍNIMA E MÁXIMA NO PERFIL TOPOCLIMÁTICO DA TRILHA CAMINHOS DO MAR (SP). *REVISTA EQUADOR*, [s. l.], v. 5, n. 5, p. 01–19, 2016. Disponível em: <https://revistas.ufpi.br/index.php/equador/article/view/4878>.
- DUVEILLER, Gregory et al. Revealing the widespread potential of forests to increase low level cloud cover. *Nature Communications*, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 4337, 2021. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34267204>.
- GAUTAM, Ritesh; SINGH, Manoj K. Urban Heat Island Over Delhi Punches Holes in Widespread Fog in the Indo-Gangetic Plains. *Geophysical Research Letters*, ["Indian Inst Technol, Ctr Studies Resources Engr, Bombay, Maharashtra, India", "Indian Inst Technol, Interdisciplinary Program Climate Studies, Bombay, Maharashtra, India", "Environm Def Fund, Washington, DC 20009 USA", "Univ Petr & Energy Studies, Sch E, v. 45, n. 2, p. 1114–1121, 2018. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017GL076794>.
- KEIM-VERA, K. et al. Fog types frequency and their collectable water potential in the Atacama Desert. *Atmospheric Research*, [s. l.], v. 312, n. October, p. 107747, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107747>.
- KHANNA, Jaya; MEDVIGY, David. Strong control of surface roughness variations on the simulated

dry season regional atmospheric response to contemporary deforestation in Rondônia, Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, [s. l.], v. 119, n. 23, p. 13,067-13,078, 2014. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014JD022278>.

KIM, Yerin; RYU, Han-Sol; HONG, Sungwook. Data-to-data translation-based nowcasting of specific sea fog using geostationary weather satellite observation. *Atmospheric Research*, ["Department of Environment, Energy, and Geoinformatics, Sejong University, 209 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, 05006, South Korea", "DeepThoTh Co., Ltd., 209 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, 05006, South Korea"], v. 290, p. 106792, 2023. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85157996484&doi=10.1016%2Fj.atmosres.2023.106792&partnerID=40&md5=eefc016eb43985401efde1564bf67fba>.

KOGA-VICENTE, Andrea. Incertezas na espacialização da precipitação, impactos associados e previsão de risco no litoral paulista. 2010. 172 f. - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=501660>.

LEHNERT, Lukas W et al. A Case Study on Fog/Low Stratus Occurrence at Las Lomitas, Atacama Desert (Chile) as a Water Source for Biological Soil Crusts. *Aerosol and Air Quality Research*, ["Philipps Univ Marburg, Fac Geog, D-35037 Marburg, Germany", "Ruhr Univ Bochum, Dept Geog, D-44780 Bochum, Germany", "Pontificia Univ Catolica Chile, Inst Geog, Santiago, Chile", "Univ Rostock, Fac Agr & Environm Sci, Soil Sci, D-18051 Rostock, Germany"], v. 18, n. 1, p. 254–26, 2018. Disponível em: <https://aaqr.org/articles/aaqr-17-01-fog-0021>.

LEHNERT, Lukas W.; THIES, Boris; BENDIX, Jörg. A new high spatial resolution low stratus/fog retrieval for the Atacama Desert. *Remote Sensing of Environment*, [s. l.], v. 236, n. November 2019, p. 111445, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111445>.

MARCHIORI, Nidia Mara et al. Composição da comunidade arbórea e biomassa aérea em uma floresta atlântica secundária, parque estadual da serra do mar, São Paulo, Brazil. *Cerne*, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 501–514, 2016.

MARMENTINI, Franciele Francisca; CASSOL, Roberto. CARTOGRAFIA TEMÁTICA: uma contribuição na análise geográfica do município de Barão de Cotegipe/RS. *Ateliê Geográfico*, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 33–54, 2012. Disponível em: <http://www.revistas.ufg.br/index.php/ateliê/article/view/13979>.

OLIVEIRA, Luis Ricardo Ramalho de. Deposição atmosférica de elementos-chave, através de chuva, em floresta ombrófila densa no parque estadual da serra do mar. 2007. - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64135/tde-18122007-160605/>.

PAULI, Eva et al. An analysis of fog and low stratus life-cycle regimes over central Europe. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, [s. l.], v. 150, n. 761, p. 2382–2396, 2024. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.4714>.

PAULI, Eva; CERMAK, Jan; TEULING, Adriaan J. Enhanced Nighttime Fog and Low Stratus Occurrence Over the Landes Forest, France. *Geophysical Research Letters*, [s. l.], v. 49, n. 5, p. 1–9, 2022. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021GL097058>.

POHL, Marius J. et al. Valleys are a potential refuge for the Amazon lowland forest in the face of increased risk of drought. *Communications Earth & Environment*, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 198, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43247-023-00867-6>.

RILEY, Shawn J; DEGLORIA, Stephen D; ELLIOT, Robert. A Terrain Ruggedness Index that Quantifies Topographic Heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*, [s. l.], v. 5, n. 1–4, p. 23–27, 1999.

RODRÍGUEZ, NM. CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA DE UMA MICROBACIA EXPERIMENTAL VISANDO IDENTIFICAR INDICADORES DE MONITORAMENTO AMBIENTAL. 2002. 85 f. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2002.

ROSEGHINI, Wilson Flavio Feltrim. OCORRÊNCIA DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS E SUA REPERCUSSÃO SÓCIO-AMBIENTAL NO LITORAL NORTE PAULISTA . Pós-Graduação em Geografia Faculdade de Ciência e Tecnologia SUA REPERCUSSÃO SÓCIO-AMBIENTAL NO LITORAL NORTE PAULISTA . 2007. 135 f. - Universidade Estadual Paulista (UNESP), [s. l.], 2007. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/89786>.

ROUX, Belinda et al. The role of topography on the local circulation and formation of fog at Perth Airport. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, [s. l.], v. 74, n. 2, p. 1–22, 2024. Disponível em: <https://www.publish.csiro.au/ES/ES23025>.

ROY, Bishal; BARI, Ehsanul. Examining the relationship between land surface temperature and landscape features using spectral indices with Google Earth Engine. *Heliyon*, [s. l.], v. 8, n. 9, p. e10668, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10668>.

SCHULZ, Hans Martin et al. Detection of ground fog in mountainous areas from MODIS (Collection 051) daytime data using a statistical approach. *Atmospheric Measurement Techniques*, ["Laboratory for Climatology and Remote Sensing, Faculty of Geography, Philipps University, Marburg, Germany", "Department of Natural Resources and Environmental Studies, National Dong Hwa University, Hualien, Taiwan"], v. 9, n. 3, p. 1135–1152, 2016. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84961827228&doi=10.5194%2Famt-9-1135-2016&partnerID=40&md5=a3c540c48c8a5e68b1567a4f287bd3ad>.

- SCHULZ, Hans Martin et al. Mapping the montane cloud forest of Taiwan using 12 year MODIS-derived ground fog frequency data. PLOS ONE, ["Laboratory for Climatology and Remote Sensing, Philipps-Universitat Marburg, Marburg, Germany", "School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University, Taipei, Taiwan", "Department of Natural Resources and Environmental Studies, Natio, v. 12, n. 2, p. e0172663, 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85014232858&doi=10.1371%2Fjournal.pone.0172663&partnerID=40&md5=037562122610231cd0e0a3374552f78e>.
- SOUSA, Daniel et al. Coupled spatiotemporal characterization of monsoon cloud cover and vegetation phenology. Remote Sensing, [s. l.], v. 11, n. 10, p. 1–22, 2019.
- TEULING, Adriaan J. et al. Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests. Nature Communications, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 14065, 2017. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ncomms14065>.
- VENEZIANI, Yuri; GALVANI, Emerson; RANZINI, Maurício. CARACTERÍSTICAS DE VENTILAÇÃO DO NÚCLEO CUNHA, PARQUE ESTADUAL DA SERRA DO MAR, SP. Revista Brasileira de Climatologia, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 155–171, 2013. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/pesm/nucleos/cunha/sobre/>.
- WEI, Jiaying et al. Mapping super high resolution evapotranspiration in oasis-desert areas using UAV multi-sensor data. Agricultural Water Management, [s. l.], v. 287, n. August, p. 108466, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108466>.
- WILSON, Adam M.; JETZ, Walter. Remotely Sensed High-Resolution Global Cloud Dynamics for Predicting Ecosystem and Biodiversity Distributions. PLOS Biology, [s. l.], v. 14, n. 3, p. e1002415, 2016. Disponível em: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pbio.1002415>.
- XU, Ru et al. Contrasting impacts of forests on cloud cover based on satellite observations. Nature Communications, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 670, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-28161-7>.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou a dinâmica espaço-temporal da NNB no Litoral Norte do Parque Estadual Serra do Mar (LN-PESM), São Paulo, utilizando imagens de satélite para investigar suas variações e os fatores ambientais que influenciam sua formação. Os resultados revelaram um aumento significativo na frequência de NNB ao longo dos últimos 24 anos, especialmente durante o inverno, com destaque para os meses de junho e agosto. Esse crescimento pode estar relacionado às mudanças climáticas globais e ao papel das florestas nativas na manutenção da umidade e na promoção da formação de neblina.

O algoritmo de detecção desenvolvido apresentou eficácia intermediária, com melhor desempenho em agosto, mas menor precisão em julho. Essa variação reforça a necessidade de aprimoramento do modelo, bem como da ampliação das observações de campo para validação mais robusta. Além disso, os resultados da caracterização e distribuição indicaram que a interação entre cobertura florestal, topografia e variáveis meteorológicas, como vento e TSS, é determinante na densidade e na variabilidade temporal da neblina. Durante o inverno, ventos mais fracos e temperaturas mais baixas favorecem sua permanência, enquanto na primavera, ventos mais intensos transportam umidade do oceano para o continente, impulsionando a formação orográfica da neblina.

A relação entre a neblina e os serviços ecossistêmicos merece atenção especial. A neblina desempenha um papel essencial na regulação do microclima e na manutenção da umidade na Mata Atlântica, fornecendo água para epífitas e influenciando a dinâmica ecológica da floresta. Alterações na frequência e na distribuição da neblina podem desencadear efeitos em cascata, afetando a biodiversidade e a resiliência do ecossistema. Além disso, florestas de neblina são indicadores sensíveis de perturbações climáticas regionais, e seu monitoramento pode fornecer insights valiosos sobre as mudanças ambientais em curso.

As descobertas deste trabalho de dissertação também podem ter implicações para conservação e políticas ambientais. O PESHM representa um dos maiores remanescentes contínuos de Mata Atlântica, e mudanças nos padrões de neblina podem impactar sua capacidade de armazenamento e redistribuição de água. A fragmentação florestal além dos limites do parque pode comprometer os processos de reciclagem de umidade, reduzindo a resiliência do bioma frente às mudanças climáticas. Dessa forma, é fundamental que estratégias de conservação considerem a dinâmica da neblina, promovendo a conectividade ecológica entre o PESHM e outras áreas de floresta de neblina, como a Serra da Mantiqueira.

Para pesquisas futuras, recomenda-se o monitoramento de longo prazo dos padrões de neblina, utilizando metodologias mais robustas, dados de satélite de maior resolução e modelagem climática para prever impactos em diferentes cenários de aquecimento global. Estudos sobre o impacto do uso do solo na reciclagem de umidade também são essenciais, especialmente em regiões onde a urbanização e o desmatamento podem alterar os fluxos atmosféricos e hídricos. Finalmente, entender o comportamento da neblina pode fornecer informações valiosas sobre o clima futuro, uma vez que variações na sua ocorrência podem sinalizar mudanças na circulação atmosférica, na umidade disponível e nos padrões de precipitação em larga escala.

APENDICE – A

Material suplementar 1

Quadro 1 - Sensores utilizados nos estudos incluídos na revisão de literatura.

Título	Autores	Ano	Sensor
The spatial and temporal variability of fog and its relation to fog oases in the Atacama Desert, Chile	Cereceda, P; Larrain, H; Osses, P; Farías, M; Egaña, I	2008	GOES I-M
An observational and modeling study of a sea fog event over the Yellow Sea on 1 August 2003	Fu, Gang; Li, Pengyuan; Crompton, Joseph G; Guo, Jingtian; Gao, Shanhong; Zhang, Suping	2010	GOES I-M, MODIS
An analysis of the fog distribution in Beijing for the 2001-2005 period using NOAA and FY data	Wang, J L; Li, S M; Liu, X L; Wu, X J	2010	FY
Winter fog over the Indo-Gangetic Plains: mapping and modelling using remote sensing and GIS	Saraf, Arun K.; Bora, Ajoy K.; Das, Josodhir; Rawat, Vineeta; Sharma, Kanika; Jain, Sanjay K.	2011	AVHRR, VISSR
Will the southern african west coast fog be affected by future climate change?: Results of an initial fog projection using a regional climate model	Haensler, Andreas; Cermak, Jan; Hagemann, Stefan; Jacob, Daniela	2011	SEVIRI
Comparison study between observation and simulation for sea fog over the Yellow Sea in May 2009	Fu, Dan; Wang, Shuai; Chen, Delin; Pang, Huaji; Li, Pengyuan	2012	Himawari
A Comprehensive Dynamic Threshold Algorithm for Daytime Sea Fog Retrieval over the Chinese Adjacent Seas	Zhang, Suping; Yi, Li	2013	MODIS
Winter fog is decreasing in the fruit growing region of the Central Valley of California	Baldocchi, Dennis; Waller, Eric	2014	MODIS, AVHRR
The potential distribution of tropical lowland cloud forest as revealed by a novel MODIS-based fog/low stratus night-time detection scheme	Obregon, Andre; Gehrig-Downie, Christine; Gradstein, S. Robbert; Bendix, Jörg	2014	MODIS

A study to improve night time fog detection in the Indo-Gangetic Basin using satellite data and to investigate the connection to aerosols	Ahmed, Rizwan; Dey, Sagnik; Mohan, Manju	2015	MODIS, AVHRR
Numerical study of a coastal fog event over Casablanca, Morocco	Bari, Driss; Bergot, Thierry; El Khlifi, Mohamed	2015	SEVIRI
A method of detecting sea fogs using CALIOP data and its application to improve MODIS-based sea fog detection	Wu, D; Lu, B; Zhang, T; Yan, F	2015	MODIS
Daytime sea fog retrieval based on GOCI data: a case study over the Yellow Sea	Yuan, Yibo; Qiu, Zhongfeng; Sun, Deyong; Wang, Shengqiang; Yue, Xiaoyuan	2016	GOCI
Detection of ground fog in mountainous areas from MODIS (Collection 051) daytime data using a statistical approach	Schulz, Hans Martin; Thies, Boris; Chang, Shih-Chieh; Bendix, Jörg	2016	MODIS
Mapping the montane cloud forest of Taiwan using 12 year MODIS-derived ground fog frequency data	Schulz, Hans Martin; Li, Ching-Feng; Thies, Boris; Chang, Shih-Chieh; Bendix, Jörg	2017	MODIS
A Hybrid Approach for Fog Retrieval Based on a Combination of Satellite and Ground Truth Data	Egli, Sebastian; Thies, Boris; Bendix, Jörg	2018	SEVIRI
Coastal low cloudiness and fog enhance crop water use efficiency in a California agricultural system	Baguskas, Sara A; Clemesha, Rachel E.S.; Loik, Michael E	2018	GOES-15
Influence of Environmental Conditions on Forecasting of an Advection-Radiation Fog: A Case Study from the Casablanca Region, Morocco	Bari, Driss; Bergot, Thierry	2018	SEVIRI
Urban Heat Island Over Delhi Punches Holes in Widespread Fog in the Indo-Gangetic Plains	Gautam, Ritesh; Singh, Manoj K	2018	MODIS
A Case Study on Fog/Low Stratus Occurrence at Las Lomitas, Atacama Desert (Chile) as a Water Source for Biological Soil Crusts	Lehnert, Lukas W; Thies, Boris; Trachte, Katja; Achilles, Sebastian; Osses, Pablo; Baumann, Karen; Schmidt, Jakob; Samolov, Elena; Jung, Patrick; Leinweber, Peter; Karsten, Ulf; Büdel, Burkhard; Bendix, Jörg	2018	MODIS, Lansat

Arctic Fog Detection Using Infrared Spectral Measurements	Yi, Li; Li, King-Fai; Chen, Xianyao; Tung, Ka-Kit	2019	MODIS
Automatic nighttime sea fog detection using GOES-16 imagery	Amani, Meisam; Mahdavi, Sahel; Bullock, Terry; Beale, Steven	2020	GOES-16
Spatiotemporal variability and evolution of day and night winter fog over the Indo Gangetic Basin using INSAT-3D and comparison with surface visibility and aerosol optical depth	Banerjee, Shravani; Padmakumari, B	2020	INSAT-3D
Boundary Layer Parameterizations to Simulate Fog Over Atlantic Canada Waters	Chen, Changshuo; Zhang, Minghong; Perrie, William; Chang, Rachel; Chen, Xianyao; Duplessis, Patrick; Wheeler, Michael	2020	MODIS
Synoptic-scale controls of fog and low-cloud variability in the Namib Desert	Andersen, Hendrik; Cermak, Jan; Fuchs, Julia; Knippertz, Peter; Gaetani, Marco; Quinting, Julian; Sippel, Sebastian; Vogt, Roland	2020	SEVIRI
Interplay between topography, fog and vegetation in the central South Arabian mountains revealed using a novel Landsat fog detection technique	Ball, Lawrence; Tzanopoulos, Joseph	2020	Landsat
A new fog and low stratus retrieval for tropical South America reveals widespread fog in lowland forests	Pohl, M J; Lehnert, L; Bader, M Y; Gradstein, S R; Viehweger, J; Bendix, J	2021	MODIS
A Probability-Based Daytime Algorithm for Sea Fog Detection Using GOES-16 Imagery	Mahdavi, Sahel; Amani, Meisam; Bullock, Terry; Beale, Steven	2021	GOES-16
An observational and modeling study of a sea fog event over the yellow and east China seas on 17 March 2014	Guo, Jibing; Xu, Jie; Xu, Xiangming	2021	MODIS
Coastal-Fog Microphysics Using In-Situ Observations and GOES-R Retrievals	Gultepe, I; Pardyjak, E; Hoch, S W; Fernando, H J S; Dorman, C; Flagg, D D; Krishnamurthy, R; Wang, Q; Gaberšek, S; Creegan, E; Scantland, N; Desjardins, S; Heidinger, A; Pavolonis, M; Heymsfield, A J	2021	GOES-16 Advanced Baseline Imager (ABI)

Developing a long-term high-resolution winter fog climatology over south Asia using satellite observations from 2002 to 2020	Singh, M K; Gautam, R	2022	MODIS
Satellite Fog Detection at Dawn and Dusk Based on the Deep Learning Algorithm under Terrain-Restriction	Ran, Yinze; Ma, Huiyun; Liu, Zengwei; Wu, Xiaojing; Li, Yanan; Feng, Huihui	2022	Advanced Himawari Imager (AHI)
Dual-Branch Neural Network for Sea Fog Detection in Geostationary Ocean Color Imager	Zhou, Yuan; Chen, Keran; Li, Xiaofeng	2022	GOCI
Assessment of spatiotemporal dynamics of diurnal fog occurrence in subtropical montane cloud forests	Li, Hsin Ju; Lo, Min Hui; Juang, Jehn Yih; Wang, Jonathan; Huang, Cho ying	2022	Himawari-8
Data-to-data translation-based nowcasting of specific sea fog using geostationary weather satellite observation	Kim, Yerin; Ryu, Han-Sol; Hong, Sungwook	2023	Meteorological Imager (MI)
Daytime Sea Fog Identification Based on Multi-Satellite Information and the ECA-TransUnet Model	Lu, He; Ma, Yi; Zhang, Shichao; Yu, Xiang; Zhang, Jiahua	2023	MODIS
SeaMAE: Masked Pre-Training with Meteorological Satellite Imagery for Sea Fog Detection	Yan, Haotian; Su, Sundingkai; Wu, Ming; Xu, Mengqiu; Zuo, Yihao; Zhang, Chuang; Huang, Bin	2023	Himawari-8
Valleys are a potential refuge for the Amazon lowland forest in the face of increased risk of drought	Pohl, Marius J.;Lehnert, Lukas W.; Thies, Boris; Seeger, Konstantin; Berdugo, Mónica B.; Gradstein, S. Robbert; Bader, Maaike Y.; Bendix, Jörg	2023	MODIS

Material suplementar 2

Códigos em linguagem JavaScript para detecção de NNB com imagens MODIS.

2.1 CSV – Cálculo de média de dias com NNB

// Função utilitária para extrair valores de bitmask

```
function bitwiseExtract(value, fromBit, toBit) {
  if (toBit === undefined) toBit = fromBit;
  var maskSize = ee.Number(1).add(toBit).subtract(fromBit);
  var mask = ee.Number(1).leftShift(maskSize).subtract(1);
  return value.rightShift(fromBit).bitwiseAnd(mask);
}
```

// Função para aplicar a máscara de neblina a uma imagem

```
function maskClouds(image) {
  var qa = image.select('state_1km');
  var cloudState = bitwiseExtract(qa, 10);
  var cirrusState = bitwiseExtract(qa, 8, 9);
  var cloudShadow = bitwiseExtract(qa, 2);
```

// Cria a máscara para estado da nuvem (1: Cloudy), sem cirros (0) e sem sombra de nuvens (0)

```
  var mask = cloudState.eq(1) // Cloud
    .and(cirrusState.eq(0)) // No cirrus
    .and(cloudShadow.eq(0)); // No cloud shadow

  return image.updateMask(mask).set('system:time_start',
    image.get('system:time_start'));
}
```

```

// Carrega a coleção de imagens MOD09GA e aplica a máscara de neblina
var modis = ee.ImageCollection('MODIS/061/MOD09GA')
  .filterDate('2000-01-01', '2023-12-31') // Filtra para os anos de interesse
  .map(maskClouds)
  .select('state_1km');

// Função para contar o número de dias com neblina para um mes específico (inverno)
function countFoggyDaysPerYear(year, month) {
  var startDate, endDate;

  if (month === 'junho') {
    startDate = ee.Date.fromYMD(year, 6, 1); // Início
    endDate = ee.Date.fromYMD(year, 6, 30); // Fim
  } else if (month === 'julho') {
    startDate = ee.Date.fromYMD(year, 7, 1); // Início
    endDate = ee.Date.fromYMD(year, 7, 31); // Fim
  } else if (month === 'agosto') {
    startDate = ee.Date.fromYMD(year, 8, 1); // Início
    endDate = ee.Date.fromYMD(year, 8, 31); // Fim
  }

  var monthCollection = modis.filterDate(startDate, endDate);

// Cria uma imagem binária onde 1 representa um dia com neblina
var foggyDays = monthCollection.map(function(image) {
  return image.gt(0).selfMask().rename('foggy_days');
});

```

```

// Soma o número de dias com neblina para cada pixel no período

    var monthlyFoggyDays = foggyDays.reduce(ee.Reducer.sum()).rename(month +
'_foggy_days');

    return monthlyFoggyDays.clip(litoralNorte).set('year', year);
}

// Lista de anos para calcular a quantidade de dias com neblina por estação

var years = ee.List.sequence(2000, 2023);

// Função para calcular e adicionar camadas para cada mês

function calculateAndAddLayers(month) {
    var monthlyFoggyDaysCollection = ee.ImageCollection.fromImages(
        years.map(function(year) {
            return countFoggyDaysPerYear(year, month);
        })
    );

// Adiciona camadas individuais para cada ano e mês

    years.getInfo().forEach(function(year) {

        var monthlyFoggyDays = monthlyFoggyDaysCollection.filter(ee.Filter.eq('year',
year)).first();

        Map.addLayer(monthlyFoggyDays, {min: 0, max: 31, palette: ['white', 'green',
'red']}, month + ' Foggy Days ' + year);

    });

    return monthlyFoggyDaysCollection;
}

```

```

    }

// Calcula e adiciona camadas para cada mês

    var juneFoggyDays = calculateAndAddLayers('junho', litoralNorte, 'Litoral Norte');
    var julyFoggyDays = calculateAndAddLayers('julho', litoralNorte, 'Litoral Norte');
    var augustFoggyDays = calculateAndAddLayers('agosto', litoralNorte, 'Litoral Norte');

// Centraliza o mapa na região Litoral Norte do PESM

    Map.centerObject(litoralNorte, 10);

// Calcula a média dos dias com neblina na área do PESM por mês

    function calculateMeanFoggyDaysPerMonth(month, collection) {
        var meanFoggyDaysPerYear = years.map(function(year) {
            var monthlyFoggyDays = collection.filter(ee.Filter.eq('year', year)).first();
            var meanFoggyDays = monthlyFoggyDays.reduceRegion({
                reducer: ee.Reducer.mean(),
                geometry: litoralNorte,
                scale: 1000,
                maxPixels: 1e9
            }).get(month + '_foggy_days');
            return ee.Feature(null, {year: year, mean_foggy_days: meanFoggyDays});
        });
    }

// Coleção de características para armazenar a média anual dos dias com neblina

    var meanFoggyDaysPerYearCollection =
    ee.FeatureCollection(meanFoggyDaysPerYear);

```

```
// Imprime a coleção de características no console para verificação
```

```
    print('Mean Foggy Days for ' + month + ':', meanFoggyDaysPerYearCollection);
```

```
// Exporta a coleção de características como uma tabela para análise posterior
```

```
    Export.table.toDrive({
        collection: meanFoggyDaysPerYearCollection,
        description: 'Mean_Foggy_Days_Per_Year_' + month + '_',
        fileFormat: 'CSV'
    });
}
```

```
// Calcula e exporta a média dos dias com neblina para inverno e primavera, separadamente para cada subárea
```

```
calculateMeanFoggyDaysPerMonth('junho', juneFoggyDays, litoralNorte, 'Litoral Norte');
```

```
calculateMeanFoggyDaysPerMonth('julho', julyFoggyDays, litoralNorte, 'Litoral Norte');
```

```
calculateMeanFoggyDaysPerMonth('agosto', augustFoggyDays, litoralNorte, 'Litoral Norte');
```

2.2 Imagens – Distribuição espacial da NNB

```
// Função utilitária para extrair valores de bitmask
```

```
function bitwiseExtract(value, fromBit, toBit) {
    if (toBit === undefined) toBit = fromBit;
    var maskSize = ee.Number(1).add(toBit).subtract(fromBit);
    var mask = ee.Number(1).leftShift(maskSize).subtract(1);
    return value.rightShift(fromBit).bitwiseAnd(mask);
}
```

```
// Função para aplicar a máscara de neblina a uma imagem
```

```
function maskClouds(image) {
```

```
  var qa = image.select('state_1km');
```

```
  var cloudState = bitwiseExtract(qa, 10);
```

```
  var cirrusState = bitwiseExtract(qa, 8, 9);
```

```
  var cloudShadow = bitwiseExtract(qa, 2);
```

```
  // Cria a máscara para estado da nuvem (1: Cloudy), sem cirros (0) e sem sombra de nuvens (0)
```

```
  var mask = cloudState.eq(1) // Cloud
```

```
    .and(cirrusState.eq(0)) // No cirrus
```

```
    .and(cloudShadow.eq(0)); // No cloud shadow
```

```
  return image.updateMask(mask).set('system:time_start', image.get('system:time_start'));
```

```
}
```

```
// Carrega a coleção de imagens MOD09GA e aplica a máscara de neblina
```

```
var modis = ee.ImageCollection('MODIS/061/MOD09GA')
```

```
  .filterDate('2000-01-01', '2023-12-31') // Filtra para os anos de interesse
```

```
  .map(maskClouds)
```

```
  .select('state_1km');
```

```
// Função para contar o número de dias com neblina para um mês específico
```

```
function countFoggyDaysPerMonth(year, month, subarea) {
```

```
  var startDate = ee.Date.fromYMD(year, month, 1);
```

```
  var endDate = startDate.advance(1, 'month').advance(-1, 'day');
```

```

var monthCollection = modis.filterDate(startDate, endDate);

// Cria uma imagem binária onde 1 representa um dia com neblina
var foggyDays = monthCollection.map(function(image) {
  return image.gt(0).selfMask().rename('foggy_days');
});

// Soma o número de dias com neblina para cada pixel no mês
var monthlyFoggyDays = foggyDays.reduce(ee.Reducer.sum()).rename('foggy_days_' +
year + '_' + month);

// Converte a imagem para Float antes de retornar
return monthlyFoggyDays.toFloat().clip(subarea).set('year', year).set('month', month);
}

// Lista de anos para calcular a quantidade de dias com neblina por estação
var years = ee.List.sequence(2000, 2023);

// Lista dos meses de inverno (junho, julho, agosto)
var winterMonths = ee.List([6, 7, 8]);

// Função para exportar os dias com neblina para o Google Drive
function exportMonthlyFoggyDays(year, month, subarea) {
  var monthlyFoggyDays = countFoggyDaysPerMonth(year, month, subarea);

  Export.image.toDrive({

```

```

image: monthlyFoggyDays,
description: 'Foggy_Days_' + year + '_' + month + '_Litoral_Norte',
folder: 'FoggyDays', // Nome da pasta no Google Drive
fileNamePrefix: 'Foggy_Days_' + year + '_' + month + '_Litoral_Norte',
region: subarea,
scale: 1000, // Escala de 1000 metros, consistente com a resolução da banda state_1km
maxPixels: 1e9,
crs: 'EPSG:4326' // Sistema de coordenadas geográficas
});
}

// Exporta os resultados para cada ano e mês de inverno
years.getInfo().forEach(function(year) {
  winterMonths.getInfo().forEach(function(month) {
    exportMonthlyFoggyDays(year, month, litoralNorte);
  });
});

// Centraliza o mapa na região do Litoral Norte
Map.centerObject(litoralNorte, 10);

// Adiciona uma camada para visualização
winterMonths.getInfo().forEach(function(month) {
  var monthlyFoggyDays = countFoggyDaysPerMonth(2023, month, litoralNorte);
  Map.addLayer(monthlyFoggyDays, { min: 0, max: 31, palette: ['white', 'green', 'red']},
  'Foggy Days ' + month + ' 2023');
});

```

Material suplementar 3

Quadro 2 – Cenas do satélite Landsat identificadas pelo algoritmo de detecção para o cálculo da densidade média e variabilidade temporal da neblina nos núcleos Picinguaba, Cunha e Santa Virgínia do Parque Estadual Serra do Mar.

<i>SPACECRAFT ID</i>	<i>SENSOR ID</i>	<i>LANDSAT SCENE ID</i>	<i>DATE ACQUIRED</i>	<i>CLOUD COVER LAND</i>
LANDSAT_5	TM	LT52180761984190CUB00	08/07/1984	17.0
LANDSAT_5	TM	LT52180761986307CUB00	03/11/1986	22.0
LANDSAT_5	TM	LT52180761988313CUB00	08/11/1988	20.0
LANDSAT_5	TM	LT52180761991321CUB00	17/11/1991	28.0
LANDSAT_5	TM	LT52180761993326CUB00	22/11/1993	33.0
LANDSAT_5	TM	LT52180761994329CUB00	25/11/1994	34.0
LANDSAT_5	TM	LT52180761999311COA00	07/11/1999	51.0
LANDSAT_5	TM	LT52180761999327COA00	23/11/1999	7.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762000210AGS00	28/07/2000	30.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762000266CUB00	22/09/2000	12.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762000274AGS00	30/09/2000	23.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762000314CUB00	09/11/2000	26.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762000338CUB00	03/12/2000	39.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762001220COA01	08/08/2001	8.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762001252CUB00	09/09/2001	1.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762001300CUB01	27/10/2001	16.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762002279AGS00	06/10/2002	21.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762003354COA00	20/12/2003	28.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762004365EDC00	30/12/2004	17.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762005175EDC00	24/06/2005	11.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762005319EDC00	15/11/2005	14.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762006298COA00	25/10/2006	16.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762007221COA00	09/08/2007	16.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762007229EDC00	17/08/2007	9.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762007277EDC00	04/10/2007	18.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762007293EDC00	20/10/2007	28.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762008240COA00	27/08/2008	24.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762008256COA00	12/09/2008	6.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762008296COA00	22/10/2008	22.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762008336COA00	01/12/2008	15.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762009306CUB00	02/11/2009	18.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762009322COA00	18/11/2009	29.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762010293COA00	20/10/2010	12.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762011256EDC00	13/09/2011	7.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762011264COA01	21/09/2011	10.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762011272EDC00	29/09/2011	15.0
LANDSAT_5	TM	LT52180762011280CUB01	07/10/2011	15.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762012195EDC00	13/07/2012	19.0

LANDSAT_7	ETM	LE72180762012227EDC00	14/08/2012	23.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762012259CUB00	15/09/2012	28.0
LANDSAT_8	OLI_TIR S	LC82180762013237LGN01	25/08/2013	9.58
LANDSAT_8	OLI_TIR S	LC82180762013365LGN01	31/12/2013	53.67
LANDSAT_8	OLI_TIR S	LC82180762014256LGN01	13/09/2014	9.69
LANDSAT_7	ETM	LE72180762014296CUB00	23/10/2014	35.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762014360CUB00	26/12/2014	14.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762015235CUB00	23/08/2015	5.0
LANDSAT_7	ETM	LE72180762015315ASN00	11/11/2015	23.0
LANDSAT_8	OLI_TIR S	LC82180762016182LGN01	30/06/2016	38.29
LANDSAT_7	ETM	LE72180762016286CUB00	12/10/2016	30.0
LANDSAT_8	OLI_TIR S	LC82180762017264LGN00	21/09/2017	5.36
LANDSAT_8	OLI_TIR S	LC82180762017328LGN00	24/11/2017	38.06
LANDSAT_8	OLI_TIR S	LC82180762017344LGN00	10/12/2017	10.37
LANDSAT_8	OLI_TIR S	LC82180762018251LGN00	08/09/2018	28.54
LANDSAT_8	OLI_TIR S	LC82180762018363LGN00	29/12/2018	19.0
LANDSAT_8	OLI_TIR S	LC82180762019238LGN00	26/08/2019	27.77
LANDSAT_8	OLI_TIR S	LC82180762019334LGN00	30/11/2019	42.99
LANDSAT_8	OLI_TIR S	LC82180762020257LGN00	13/09/2020	10.47
LANDSAT_8	OLI_TIR S	LC82180762020353LGN00	18/12/2020	29.62
LANDSAT_7	ETM	LE72180762021331ASN00	27/11/2021	24.0
LANDSAT_8	OLI_TIR S	LC82180762021355LGN00	21/12/2021	23.71