

# DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO AGROMETEOROLÓGICO PARA ESTIMATIVA DE SUSCETIBILIDADE À FERRUGEM DO CAFEIRO

Luiz Felipe Rodrigues do Carmo<sup>1</sup>; Hugo Ely dos Anjos Ramos<sup>2</sup>; Thábata Teixeira Brito de Medeiros<sup>3</sup>; Ivaniel Fôro Maia<sup>4</sup>; Ronaldo Maia de Jesus Palmeira<sup>5</sup>; Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira<sup>6</sup>

**Resumo** – A ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) é uma das principais doenças que afetam a cultura do café, podendo comprometer seriamente a produção. Sua ocorrência está relacionada tanto ao manejo inadequado quanto a condições climáticas específicas. Entre os fatores ambientais, o vento desempenha papel essencial, pois auxilia na dispersão dos esporos do fungo e favorece sua germinação nas folhas. A doença também depende de condições ideais de temperatura, umidade e duração do molhamento foliar para se estabelecer. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi desenvolver um modelo que avalie as condições meteorológicas, as quais favorecem a doença da ferrugem do café. Para tanto, houve a utilização das previsões do modelo numérico *Global Forecast System* (GFS). A partir dessa modelagem, foram gerados índices indiciando as condições agrometeorológicas favoráveis à ferrugem em todo o estado, com base em parâmetros meteorológicos. Os resultados acenam que o índice pode ser uma ferramenta eficaz no monitoramento agrícola, auxiliando produtores, instituições e órgãos técnicos, como o Incaper, no controle e prevenção da doença. A utilização desse índice contribui para o desenvolvimento de estratégias mitigadoras dos impactos da ferrugem a curto, médio e longo prazos. Como perspectivas futuras, destaca-se a necessidade de integrar esses produtos em projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), expandindo sua aplicação para o monitoramento de outras doenças e culturas, bem como na produção animal, fortalecendo o sistema de alerta agroclimático capixaba.

**Palavras-chaves:** ferrugem do cafeeiro; agrometeorologia; Incaper.

<sup>1</sup>D.Sc. Meteorologia, Gerente de Agrometeorologia da AtmosMarine, luiz@atmosmarine.com

<sup>2</sup>Meteorologista, Pesquisador do Incaper

<sup>3</sup>Meteorologista, Pesquisadora do Incaper

<sup>4</sup>Meteorologista, Pesquisador do Incaper

<sup>5</sup>Meteorologista, Diretor da AtmosMarine

<sup>6</sup>Meteorologista, Professora da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

## DEVELOPMENT OF AN AGROMETEOROLOGICAL MODEL FOR ESTIMATING SUSCEPTIBILITY TO COFFEE LEAF RUST

**Abstract** – Coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) is one of the main diseases that affect coffee crops and can severely compromise production. Its occurrence is associated with both inadequate management practices and specific climatic conditions. Among the environmental factors, wind plays a crucial role, as it aids the dispersion of fungal spores and favors their germination on coffee leaves. The disease also depends on favorable conditions of temperature, humidity, and leaf wetness duration for its establishment. In this context, the objective of this study was to develop a model to evaluate the meteorological conditions that favor the occurrence of coffee leaf rust. To achieve this, forecasts from the Global Forecast System (GFS) numerical model were used. Based on this modeling, indices were generated to identify agrometeorological conditions favorable to rust across the entire state, using meteorological parameters. The results indicate that the index can serve as an effective tool for agricultural monitoring, supporting farmers, institutions, and technical agencies, such as Incaper, in the monitoring, control and prevention of the disease. The use of this index contributes to the development of strategies to mitigate the impacts of coffee rust in the short, medium, and long term. For future perspectives, it is important to integrate these products into Research and Development (R&D) projects, expanding their application to the monitoring of other diseases and crops, as well as to the livestock production, thus strengthening the agroclimatic early warning system in Espírito Santo.

**Keywords:** coffee leaf rust; agrometeorology; Incaper.

## DESARROLLO DE UN MODELO AGROMETEOROLÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA ROYA DEL CAFÉ

**Resumen** – La roya del café (*Hemileia vastatrix*) es una de las principales enfermedades que afectan al cultivo del café que puede comprometer seriamente la producción. Su aparición está relacionada tanto con un manejo inadecuado, así como con condiciones climáticas específicas. Entre los factores ambientales, el viento juega un papel esencial, ya que ayuda a dispersar las esporas de los hongos y favorece su germinación en las hojas. La enfermedad también depende de las condiciones ideales de la temperatura, la humedad y la duración de la humedad de las hojas para establecerse. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo que evalúe las condiciones meteorológicas que favorecen la enfermedad de la roya del café. Para ello, se utilizaron las previsiones del modelo numérico *Global Forecast System* (GFS). A partir de este modelo, se generaron índices que indicaban las condiciones agrometeorológicas favorables para la roya del café en todo el estado, basándose en parámetros meteorológicos. Los resultados indican que el índice puede ser una herramienta eficaz en el monitoreo agrícola, ayudando a los productores, las instituciones y los organismos técnicos, como Incaper, en el control y la prevención de la enfermedad. El uso de este índice contribuye al desarrollo de estrategias para mitigar los impactos de la roya del café a corto, medio y largo plazo. Como perspectivas de futuro se destaca la necesidad de integrar estos productos en proyectos de Investigación y Desarrollo (I+D), ampliando su aplicación al monitoreo de otras enfermedades y cultivos, así como en la producción animal, fortaleciendo el sistema de alerta agroclimática de Espírito Santo.

**Palabras clave:** roya del café; agrometeorología; Incaper.

## INTRODUÇÃO

O cultivo de café é um dos principais motores que impulsionam a agricultura mundial e nacional. Hoje, o estado de Minas Gerais se destaca como o principal produtor do café arábica, enquanto o Espírito Santo se sobressai como o principal produtor do *Coffea canephora* (conilon). Segundo o trabalho de Carvalho *et al.* (2018), ao menos 25 milhões de famílias tem alguma associação com a produção e comercialização de café no mundo.

A ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) é uma das principais doenças que afetam a cafeicultura brasileira, sendo responsável por significativas perdas de produtividade, que podem chegar a até 50% em determinadas regiões produtoras. A ocorrência e a severidade da doença estão diretamente relacionadas à interação de três fatores fundamentais: o ambiente (condições climáticas), o hospedeiro (a planta do cafeeiro) e o patógeno (o fungo causador da ferrugem), conforme destacado por Moraes (1983) e Castro (2022).

No aspecto climático, segundo Pereira *et al.* (2008), as temperaturas ideais para a doença estão na faixa entre 20 °C e 25 °C e umidade relativa em níveis mais altos, adequados à germinação dos esporos. Esse fator é favorecido, principalmente, durante o período chuvoso. De modo mais claro, dias consecutivos de chuva e valores elevados de duração do período de molhamento foliar, também podem impactar na ocorrência da doença.

No Brasil, na região Sudeste como um todo (incluindo o estado do Espírito Santo) os níveis de inoculação pelo fungo costumam aumentar, sobretudo, entre novembro e abril, período em que ocorrem maiores temperaturas e chuvas constantes. Diante disso, são observadas, como decorrência, maiores infecções nos meses seguintes, de junho a agosto, logo após o período chuvoso e de inoculação, que é quando a doença evolui, silenciosamente, até que os sintomas se intensificam e se tornam visíveis (Castro, 2022).

Ainda nessa vertente, Castro (2022) evidenciou que a combinação de aspectos agrometeorológicos, abarcando medidas e aprendizado de máquina, tem se mostrado eficaz no monitoramento de fitopatógenos. Em seu estudo, o autor desenvolveu uma metodologia de detecção da ferrugem utilizando “Random Forest” (Breiman, 2001) e índices espectrais obtidos via Sentinel-2. Em seu trabalho, ele tornou evidente que o modelo conseguiu distinguir bem a doença na região estudada.

Os estudos de Motisi *et al.* (2021) abrangeram também a detecção da doença. Porquanto, ele propôs uma metodologia de identificação da ferrugem do cafeeiro em mudas de café arábica da cultivar Novo Mundo, utilizando aprendizado de máquina e imagens multiespectrais capturadas por drones. Os autores detectaram que as plantas infectadas mostraram maior absorção na banda vermelha (RED) e maior resposta na banda do infravermelho próximo (NIR). Esses trabalhos reforçam a sinergia entre modelagem numérica, aprendizado de máquina e validações em campo, ajudando a identificar os padrões da doença antes da manifestação visível, dando a possibilidade de o produtor aplicar um manejo mais eficiente.

Além dessas análises utilizando-se dos dados no passado e presente, outra importante abordagem fez alusão à utilização de modelos numéricos de previsão do tempo isoladamente e/ou combinado com técnicas de aprendizado de máquina. Isso é importante porque pode ajudar na previsão desse patógeno para os próximos dias, semanas ou meses.

Ainda nessa linha, alguns trabalhos vêm mostrando a relevância da utilização de redes neurais artificiais (RNAs) para melhoria das previsões ambientais. Na temática associada, Campos *et al.* (2019) propuseram técnicas utilizando RNAs para previsões de ondas, apresentando ganhos significativos na correlação e redução dos erros sistemáticos. Em seguida, esses pesquisadores expandiram essa metodologia para uma escala global, aplicando uma arquitetura de RNA, treinada com dados de altímetro, para corrigir os resíduos entre a média dos ensembles e as observações, melhorando previsões de até 10 dias com baixo custo computacional. Uma pesquisa mais recente de Campos *et al.* (2022) aprofundou a previsão híbrida (modelagem numérica + inteligência artificial) de vento, obtendo expressiva redução no viés e no erro quadrático médio. Tais trabalhos mostram a importância da aplicação da modelagem e de IA em estudos no contexto ambiental e, mais especificamente, na área meteorológica, levando em consideração diferentes escalas espaciais e temporais.

Uma aplicação mais direta e operacional dessa pesquisa foi desenvolvida no Sistema de Monitoramento e Alertas Agroclimáticos do Rio Grande do Sul (Simagro/RS), contexto em que é aplicada a previsão híbrida da Sophia (Sistema Operacional de Previsão Híbrida com Inteligência Artificial da AtmosMarine) para horizontes de tempo diferentes; desenvolvendo-se, a partir dessas previsões, produtos agrometeorológicos

e agroclimáticos, os quais auxiliam os produtores do Rio Grande do Sul no planejamento de manejo diário e mensal em suas propriedades. Tais resultados estão operacionais no site [www.simagro.rs.gov.br](http://www.simagro.rs.gov.br).

Uma parte desse trabalho desenvolvido pelo Simagro foi apresentado no estudo de Carmo *et al.* (2024). Na pesquisa, os autores mostraram o desenvolvimento de modelo de previsão voltado à avaliação dos padrões agrometeorológicos e do míldio na produção de uvas do município de Caxias, no Rio Grande do Sul. Por conseguinte, o trabalho apresentou aplicações de parametrizações específicas para o cálculo de índices agrometeorológicos baseados em parâmetros agroclimáticos como: Duração do Período de Molhamento foliar (DPM) utilizando as metodologias de Árvores de Classificação e Regressão (CART), Diferença de Ponto de Orvalho (DPO) e Número de Horas com Umidade Relativa Alta (NHUR); Umidade Relativa do ar (UR); Precipitação (PREC); Temperatura do ar (Tar); e aspectos de cultivo das videiras. Os resultados mostraram que o índice desenvolvido foi capaz de demonstrar, com antecedência, o risco de infecção ocorrida.

Em resumo, a soma dessas estratégias de modelagem agrometeorológica, monitoramento remoto e visão computacional revela um panorama completo, importante para ser utilizado nos estudos agrometeorológicos das culturas. Por conseguinte, a principal motivação desse estudo versa na necessidade de aplicar essas ferramentas no monitoramento operacional da cafeicultura capixaba, e a possibilidade de fornecer, diariamente, panoramas robustos de tecnologias voltadas ao controle integrado para a cafeicultura, a partir de um elevado conjunto de informações disponibilizadas aos produtores agrícolas.

O presente estudo tem como objetivo principal realizar testes de previsão meteorológica para o Espírito Santo e desenvolver um modelo capaz de avaliar as condições climáticas que favorecem a doença da ferrugem do café; contribuindo para o manejo e que ofereça possibilidades consonantes a uma definição de estratégias futuras, que possam ser aplicadas no território capixaba, integrando, no futuro, essas informações em sistemas de alerta regionais, como o do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper).

## DESENVOLVIMENTO

Em relação à área de estudo, esta abrange o estado do Espírito Santo, localizado na região Sudeste do Brasil. Para a realização dos testes do modelo de previsão das condições meteorológicas favoráveis para ferrugem do cafeeiro, foi utilizado o modelo *Global Forecast System* (GFS) com resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , com ciclos de 6 em 6 horas (00/06/12/18 UTC). A partir dos resultados das previsões, foram determinadas: temperatura média, máxima e mínima do ar diária, temperatura do ponto de orvalho, precipitação acumulada diária e magnitude média diária do vento.

Para avaliar as condições agrometeorológicas para ferrugem, foi elaborado o índice de avaliação das Condições Agrometeorológicas Favoráveis à Ferrugem (CAFF) através das rodadas do modelo GFS. O CAFF combina os seguintes parâmetros: temperatura do ar média diária, precipitação acumulada diária, magnitude do vento e a duração do molhamento foliar (DPM). Sendo que este último será calculado utilizando três metodologias diferentes: (i) diferença entre temperatura do ar e ponto de orvalho (DPO), (ii) número de horas com  $UR \geq 90\%$  (NHUR) e (iii) uma árvore de classificação e regressão (CART) treinada para ocorrência de molhamento. Posteriormente, esses parâmetros serão normalizados para que seus valores sempre variem de 0 a 1, sendo 0 o menor risco e 1 o maior risco.

Para ficar mais clara a diferença entre cada uma das estimativas de DPM, serão explicadas cada uma das metodologias (de forma geral). A DPO é um modelo empírico proposto por Gillespie *et al.* (1993) que representa as formas de água líquida na superfície das folhas das plantas derivadas da formação de orvalho, da precipitação, irrigação ou nevoeiro. A DPO, portanto, representa o número de horas em que a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho, permaneceram entre os limiares de  $2^\circ\text{C}$  (para a deposição do orvalho) e  $3,8^\circ\text{C}$  (para sua secagem).

Além da DPO, também pode ser calculado o NHUR, um modelo empírico que utiliza a umidade relativa do ar. Ele é determinado a partir do número de horas com a umidade relativa do ar acima de  $90\%$  (NHUR >  $90\%$ ). Já o CART é um modelo empírico alternativo para o cálculo de DPM. Ele utiliza a técnica de árvore de classificação e regressão (CART). Neste, utiliza-se o DPO, intensidade do vento a 10 metros e Umidade Relativa do ar para a estimativa.

Os limiares de cada um dos parâmetros utilizados são estabelecidos de acordo com os trabalhos de Pereira *et al.* (2008) e Carmo *et al.* (2024). Cada um dos limiares estabelecidos tem papéis fundamentais e distintos para doença. O vento, por exemplo, é para dispersão de esporos, já a precipitação e DPM é para verificar o prolongamento e quantidade de umidade nas folhas e assim sucessivamente.

Por conseguinte, nas Equações 1, 2 e 3, são apresentados exemplos das equações finais utilizadas na elaboração do índice de avaliação das Condições Agrometeorológicas Favoráveis à Ferrugem (CAFF).

$$CAFF_{DPO} = Tar_{NORM} + PREC_{NORM} + V_{NORM} + DPO_{NORM} \quad (1)$$

$$CAFF_{CART} = Tar_{NORM} + PREC_{NORM} + V_{NORM} + CART_{NORM} \quad (2)$$

$$CAFF_{NHUR} = Tar_{NORM} + PREC_{NORM} + V_{NORM} + CART_{NHUR} \quad (3)$$

Essa abordagem permitiu verificar se a substituição da metodologia de DPM poderia interferir significativamente no padrão espacial e temporal da previsão de risco da ferrugem, sendo um passo importante na definição de qual métrica é mais eficiente para diferentes condições ambientais e operacionais no território capixaba.

Cabe destacar que o estudo não tem como objetivo abordar a totalidade dos fatores que culminam na ocorrência efetiva da ferrugem do cafeeiro. Aspectos como o manejo fitossanitário, a suscetibilidade varietal, a densidade populacional do fungo no ambiente e a presença de esporos viáveis, embora fundamentais para a caracterização completa da doença em campo, não foram considerados na presente análise. O enfoque do trabalho está restrito à avaliação da associação entre condições agrometeorológicas e a potencial favorabilidade ambiental à doença, a partir de variáveis prognósticas. Dessa forma, os produtos gerados não devem ser interpretados como mapas de ocorrência ou incidência da ferrugem, mas sim como ferramentas que auxiliam na antecipação de cenários agroclimáticos propícios ao estabelecimento do patógeno, contribuindo com o manejo preventivo e o planejamento estratégico em nível regional.

Dentro dos resultados que serão apresentados a seguir, primeiro serão mostradas as figuras dos parâmetros meteorológicos do modelo GFS Temperatura do ar e Precipitação e depois serão mostrados os cálculos de DPO, CART e NHUR a partir

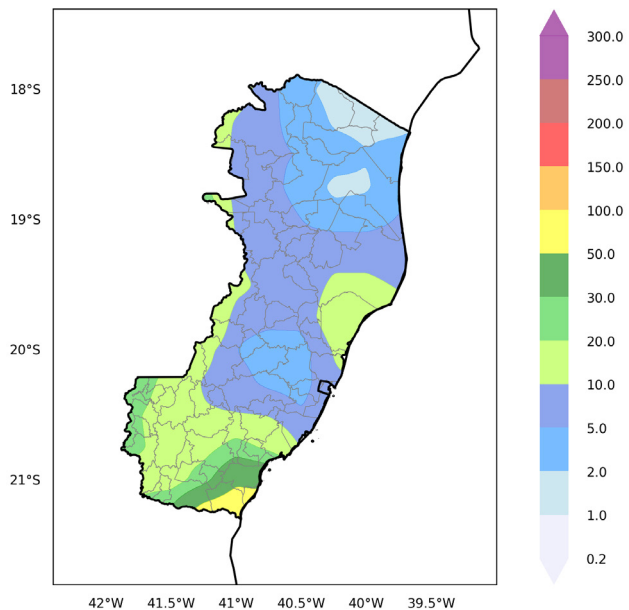
das previsões do GFS. Por fim, serão apresentadas três figuras de condições agrometeorológicas favoráveis à ferrugem calculadas a partir desses parâmetros.

Por conseguinte, nas Figuras 1 e 2 são apresentados exemplos da previsão do dia 21/10/2024 do modelo GFS iniciado no dia 16/10/2024. Na Figura 1 é mostrada a precipitação acumulada diária e na Figura 2, a temperatura do ar. Relembrando o trabalho de Pereira *et al.* (2008) para analisar os resultados, percebe-se que na maior parte das porções noroeste, central e sudeste, os valores de Tar ficaram entre 20 °C e 25 °C (em média). Já na porção nordeste, a temperatura ficou um pouco acima de 25 °C e na porção sudeste, um pouco abaixo de 20 °C. Em relação à precipitação, nota-se que, em praticamente todo o estado, houve previsão de chuva, com maiores valores previstos na porção sul do estado.

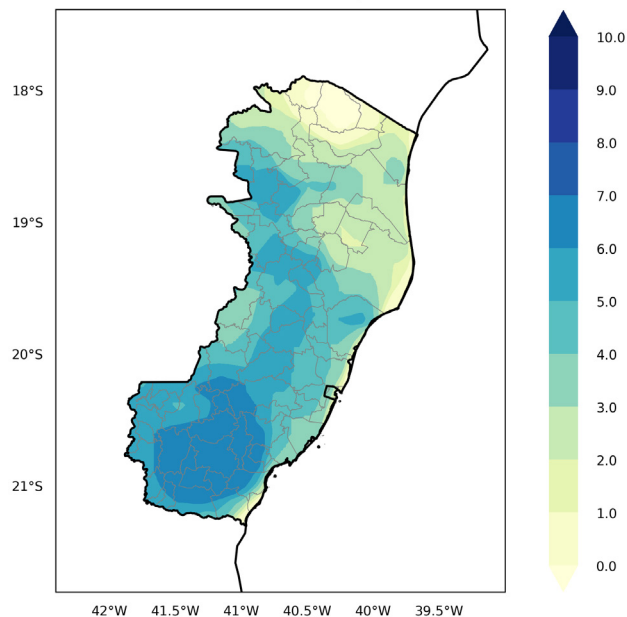
Com os resultados de precipitação, temperatura e das outras variáveis previstas, foram desenvolvidas as previsões de DPO, CART e NHUR. Assim, nas Figuras 3, 4 e 5 são apresentadas as previsões do período de molhamento foliar calculado por CART (Figura 3), DPO (Figura 4) e NHUR (Figura 5). Nota-se que, os três modelos mostraram maiores valores de DPM (8 horas no dia) na porção sul do estado, com o modelo de CART apresentando maiores valores previstos em média na porção sul, seguido do DPO e depois o modelo NHUR. Apesar do modelo de CART ter apresentado valores maiores, nota-se que, qualitativamente, as diferenças entre os três modelos não foram expressivas para o estado como um todo. Esse resultado é considerado positivo, tendo em vista que, quanto menor a diferença entre as estimativas, a expectativa é de se ter, também, uma menor diferença entre as previsões agrometeorológicas associadas à ferrugem.

Por fim, nas Figuras 6, 7 e 8 encontram-se as avaliações das condições agrometeorológicas para a ferrugem realizadas a partir das previsões do GFS e da DPM. Na Figura 6, é a condição calculada a partir de CART, já na Figura 7, a condição calculada a partir de DPO e, na Figura 8, a condição calculada a partir de NHUR. Conforme evidenciado pelas figuras, existiu pouca diferença no resultado do índice desenvolvido. Ou seja, mesmo com a mudança no método, não houve alterações significativas no índice. Sendo assim, nesse estudo de caso, os três métodos de DPM produziram padrões espaciais semelhantes, com maiores valores no sul do estado. A temperatura emergiu como principal fator limitante no período estudado.

**Precipitação Acumulada em 24h (mm)**  
Iniciado em 16/10/2024 00 UTC - Previsão para 21/10/2024 (GFS)



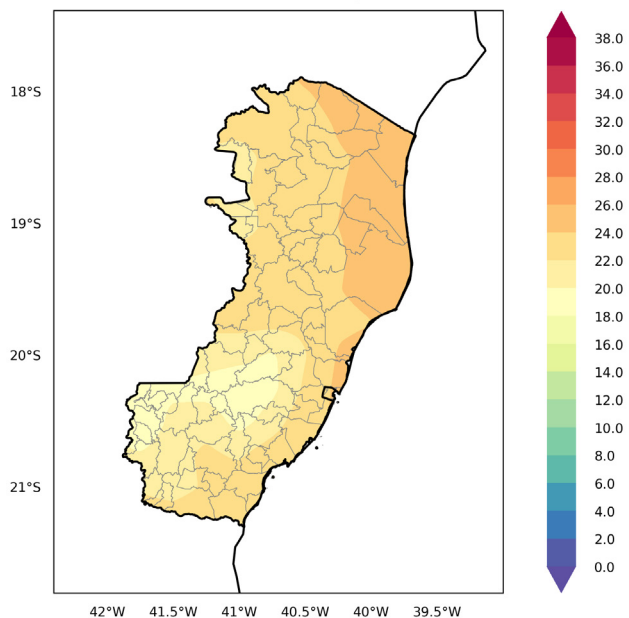
**Duração do Período de Molhamento Foliar (CART) (h)**  
Iniciado em 16/10/2024 00 UTC - Previsão para 21/10/2024 (GFS)



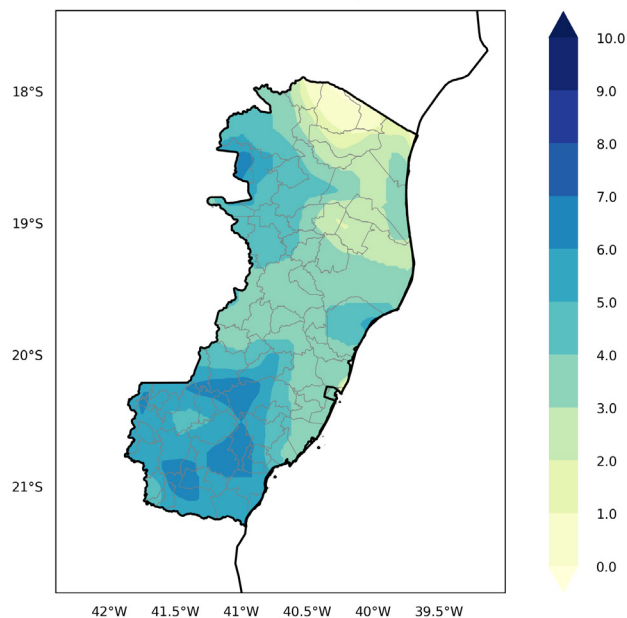
**Figura 1** – Previsão de precipitação acumulada diária para estado do Espírito Santo no dia 21/10/2024, iniciado no dia 16/10/2024 (lead time D+5).

**Figura 3** – Previsão de Duração do Período de Molhamento Foliar (CART) diária para o Espírito Santo no dia 21/10/2024, iniciado no dia 16/10/2024 (lead time D+5).

**Temperatura média diária (°C)**  
Iniciado em 16/10/2024 00 UTC - Previsão para 21/10/2024 (GFS)



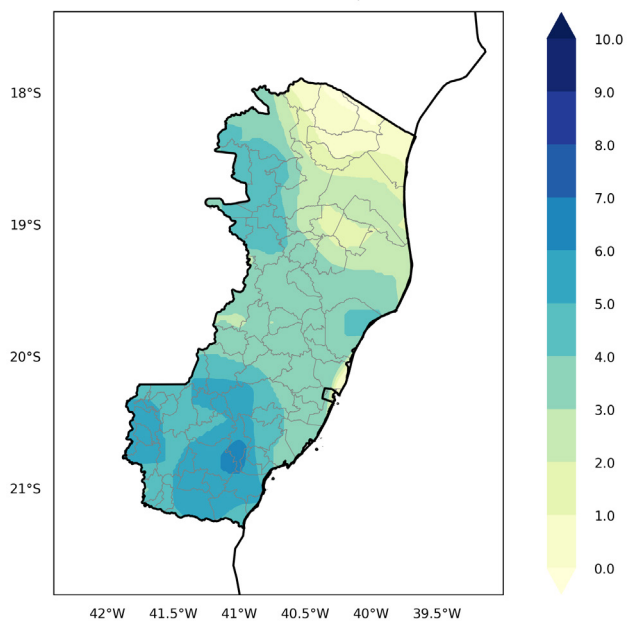
**Duração do Período de Molhamento Foliar (DPO) (h)**  
Iniciado em 16/10/2024 00 UTC - Previsão para 21/10/2024 (GFS)



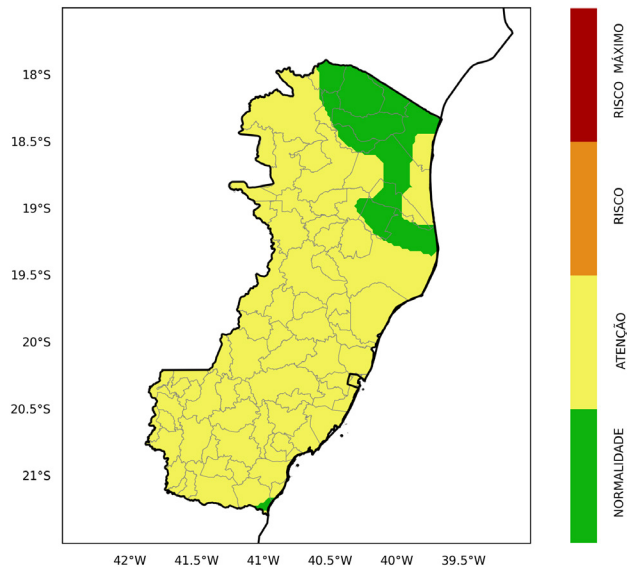
**Figura 2** – Previsão de temperatura, com média diária para o Espírito Santo no dia 21/10/2024, iniciado no dia 16/10/2024 (lead time D+5).

**Figura 4** – Previsão de Duração do Período de Molhamento Foliar (DPO) diária para o Espírito Santo considerando o dia 21/10/2024, iniciado no dia 16/10/2024 (lead time D+5).

**Duração do Período de Molhamento Foliar (NHUR) (h)**  
Iniciado em 16/10/2024 00 UTC - Previsão para 21/10/2024 (GFS)



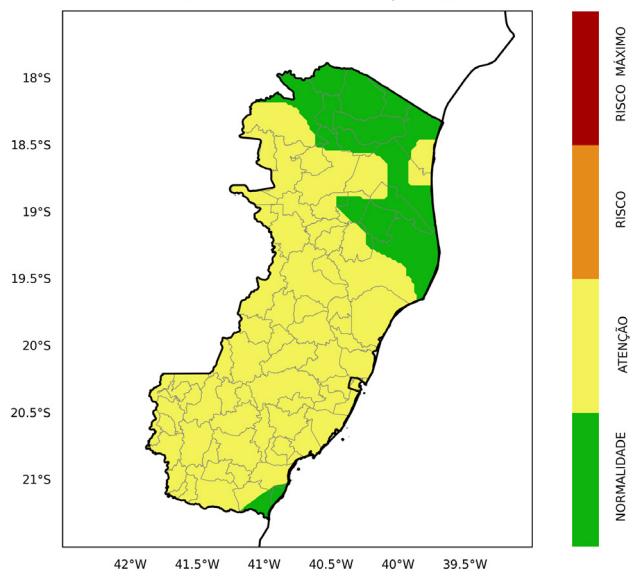
**Risco de ocorrência de ferrugem no café (AGRO+DPO)**  
Iniciado em 16/10/2024 00 UTC - Previsão para 21/10/2024



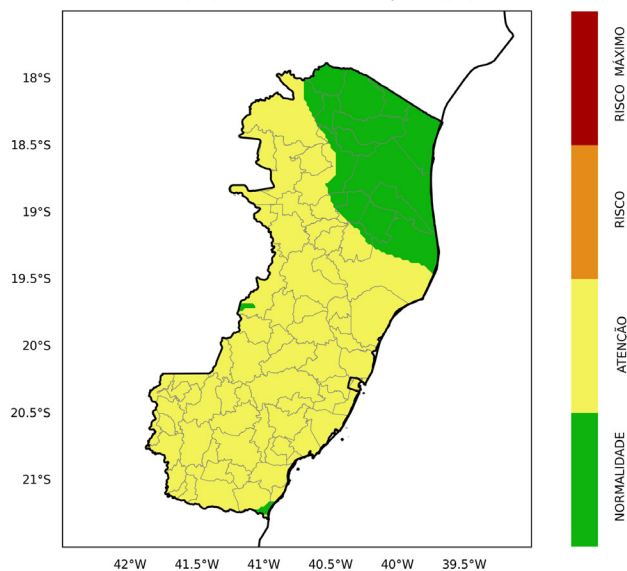
**Figura 5** – Previsão de Duração do Período de Molhamento Foliar (NHUR) diária para o Espírito Santo no dia 21/10/2024, iniciado no dia 16/10/2024 (lead time D+5).

**Figura 7** – Previsão de condições agrometeorológicas para a ferrugem diária, no Espírito Santo, para o dia 21/10/2024, iniciado no dia 16/10/2024 (lead time D+5) utilizando o método DPO.

**Risco de ocorrência de ferrugem (AGRO+CART)**  
Iniciado em 16/10/2024 00 UTC - Previsão para 21/10/2024



**Risco de ocorrência de ferrugem (AGRO+NHUR)**  
Iniciado em 16/10/2024 00 UTC - Previsão para 21/10/2024



**Figura 6** – Previsão de condições agrometeorológicas na ferrugem diária no Espírito Santo para o dia 21/10/2024, iniciado no dia 16/10/2024 (lead time D+5) utilizando o método CART.

**Figura 8** – Previsão de condições agrometeorológicas na ferrugem diária, no Espírito Santo, para o dia 21/10/2024, iniciado no dia 16/10/2024 (lead time D+5) utilizando o método NHUR.

## CONCLUSÃO

Este trabalho foi constituído com o objetivo de desenvolver um Modelo Agrometeorológico para estimar as condições ambientais favoráveis à ferrugem do cafeeiro no estado do Espírito Santo, utilizando-se de previsões meteorológicas do modelo GFS. Dessa forma, ao desenvolver o índice de Condições Agrometeorológicas Favoráveis à Ferrugem (CAFF) esse objetivo foi atendido e, portanto, em passos futuros, a Incaper poderá ter a possibilidade de aprofundar ainda mais esses conhecimentos e desenvolver planos de ações para melhorar o monitoramento capixaba.

Com base nos dados processados, os resultados obtidos demonstraram que os três métodos apresentaram comportamento semelhante na maioria das regiões do estado, com diferenças pontuais, especialmente no Sul capixaba para DPM. De modo geral, no índice normalizado das condições agrometeorológicas, o objetivo de verificar a influência da metodologia de cálculo da DPM foi atingido, indicando que todos os métodos são operacionalmente viáveis para uso em sistemas de monitoramento, com destaque para a robustez do modelo mesmo frente a alterações na metodologia do índice. Também foi possível observar que, para o caso estudado, a temperatura se mostrou o principal fator limitante, o que reitera a importância de seu uso em conjunto com outros parâmetros.

No entanto, alguns aspectos permanecem como desafios para futuras investigações. Ainda é necessário validar os índices desenvolvidos com dados observacionais de campo, incluindo relatos fitossanitários reais, para verificar a efetividade prática dos modelos. Além disso, não foram considerados fatores como a presença real de inóculo, suscetibilidade varietal ou práticas de manejo, que também influenciam decisivamente e concorrem para a ocorrência da ferrugem. Tais fatores deverão ser integrados em fases futuras, permitindo uma abordagem mais abrangente e precisa.

Em suma, o estudo mostra a importância da abordagem operacional para o monitoramento agroclimático da ferrugem do cafeeiro. Os resultados representam um avanço metodológico para o uso de modelos preditivos no apoio à tomada de decisão agrícola, podendo ser utilizados por instituições como o Incaper, cooperativas e produtores, especialmente no contexto de sistemas de alerta precoce. O modelo desenvolvido pode ser ampliado para outras culturas

e doenças, representando uma base sólida para o desenvolvimento de ferramentas tecnológicas voltadas à agricultura climática inteligente.

Como passos futuros, serão realizadas avaliações para diferentes períodos (sazonais) específicos para as fases de inoculação e expressão dos sintomas e verificar como isso afeta calibração e verificação do índice sob cada um dos cenários.

## CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

O primeiro autor (Luiz Felipe Rodrigues do Carmo) foi o responsável por escrever o artigo, determinar o índice voltado à ferrugem e os cálculos de DPM; os demais autores foram responsáveis por baixar o modelo GFS, fazer os mapas de temperatura e precipitação e revisar os aspectos do artigo.

## CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

## REFERÊNCIAS

- BREIMAN, L. Random forests. *In: Machine Learning*, v. 45, n. 1, p. 5–32, 2001.
- CAMPOS, R. M.; KRASNOPOLSKY, V.; ALVES, J. H. G. M.; PENNY, S. G. Nonlinear wave ensemble averaging in the Gulf of Mexico using neural networks. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 36, n. 1, p. 113–129, 2019.
- CAMPOS, R. M. et al. Improving NCEP's global-scale wave ensemble averages using neural networks. *Ocean Modelling*, v. 149, p. 101617, 2020.
- CAMPOS, R. M. et al. Mid-to-long range wind forecast in Brazil using numerical modeling and neural networks. *Wind*, v. 2, n. 2, p. 221–245, 2022.
- CARMO, L. F. R. do; PALMEIRA, R. M. J.; GONÇALVES, F. A. V.; DIAS, G. C.; MOLLMANN JR., R. Desenvolvimento de modelo de prevenção de míldio para o município de Caxias do Sul utilizando o modelo numérico WRF. *In: CONFERÊNCIA PAN-AMERICANA DE METEOROLOGIA – CPAM*, São Paulo. *Anais [...]*. São Paulo, 2024.
- CARVALHO, A. C.; CARVALHO, D. F.; FILGUEIRAS, G. C.; ARAÚJO, A. C. S.; CARVALHO, A. V. de. Panorama e importância econômica do café no mercado internacional de commodities agrícolas: uma análise espectral. *Revista Agroecossistemas*, Belém, v. 9, n. 2, p. 223–249, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/agroecossistemas/article/view/5003>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- CASTRO, G. D. M. **Modelo Para Monitoramento Remoto Da Ferrugem Do Cafeeiro Utilizando Machine Learning**. Relatório Final – apresentado à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental, 2022. Disponível em: <https://locus.ufv.br/server/api/core/bitstreams/62beb310-4b38-45ed-953f-53502a4413f5/content>. Acesso em: 29 jun. 2025.

GILLESPIE, T. J.; SRIVASTAVA, B.; PITBLADO, R. E. Using operational weather data to schedule fungicide sprays on tomatoes in southern Ontario, Canada. **Journal of Applied Meteorology**, v. 32, p. 567–573, 1993.

MORAES, S. A. **A ferrugem do cafeeiro**: importância, condições predisponentes, evolução e situação no Brasil. Campinas: Instituto Agronômico, 1983.

MOTISI, A.; GUIMARÃES, C. M.; PEREIRA, G. E.; CARVALHO, G. R.; CASTRO, M. S.; SILVA, J. S.; CORRÊA, T. R. B.; CASTRO, H. A.; OLIVEIRA, G. H. H. Early detection of coffee leaf rust caused by *Hemileia vastatrix* using multispectral images. **Agronomy, Basel**, v. 12, n. 12, p. 2911, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/12/2911>. Acesso em: 30 jun. 2025.

PEREIRA, A. R.; CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M.P. **Agrometeorologia de cafezais no Brasil**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008.