



MAGNUS RIFFEL KERBER

**ZONEAMENTO DA OCORRÊNCIA DO DISTÚRBO
FISIOLÓGICO DO EUCALIPTO EM TERRITÓRIO
BRASILEIRO**

LAVRAS-MG

2024

MAGNUS RIFFEL KERBER

**ZONEAMENTO DA OCORRÊNCIA DO DISTÚRBO FISIOLÓGICO DO
EUCALIPTO EM TERRITÓRIO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação do Mestrado Profissional em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Evandro Novaes
Orientador

**LAVRAS-MG
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Kerber, Magnus Riffel.

Zoneamento da Ocorrência do Distúrbio Fisiológico em
Território Brasileiro / Magnus Riffel Kerber. - 2024.

38 p.

Orientador(a): Evandro Novaes.

Coorientador(a): Rodrigo Neves Graça.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de
Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Eucalipto. 2. Distúrbio Fisiológico. 3. Zoneamento. I.
Novaes, Evandro. II. Neves Graça, Rodrigo. III. Título.

MAGNUS RIFFEL KERBER

**ZONEAMENTO DA OCORRÊNCIA DO DISTÚRBO FISIOLÓGICO DO
EUCALIPTO EM TERRITÓRIO BRASILEIRO**

**ZONING OF THE OCCURRENCE OF PHYSIOLOGICAL DISTURBANCE
OF EUCALYPTUS IN BRAZILIAN TERRITORY**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação do Mestrado Profissional em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 31 de Janeiro de 2024
Dr. Clayton Alcarde Alvares – Suzano S.A
Dr. Edival Ângelo Valverde Zauza – Suzano S.A
Dr. Vinicius Quintão Carneiro – UFLA

Prof. Dr. Evandro Novaes
Orientador

LAVRAS – MG

2024

RESUMO

O eucalipto é uma espécie florestal de elevada importância econômica no Brasil, sendo sua biomassa lenhosa utilizada em uma variedade de indústrias, proporcionando emprego e renda. Entretanto, desde meados da década de 2000, o setor florestal enfrenta um desafio emergente: o distúrbio fisiológico do eucalipto (DFE), cujas causas ainda são desconhecidas. Estudos sugerem que este distúrbio pode estar relacionado a fatores abióticos, particularmente condições climáticas locais, incluindo eventos extremos e alterações no clima. Quando combinado com diferentes genótipos, isto pode levar a mudanças significativas na fisiologia da planta e interferir em seu desenvolvimento normal. Neste estudo, foram empregados métodos estatísticos acoplados a novas ferramentas de aprendizado de máquina para investigar a relação entre variáveis climáticas e o DFE. Isso permitiu identificar cinco variáveis fortemente associadas ao distúrbio que, quando utilizadas como variáveis explicativas em um modelo de regressão logística, geraram 99.8% de acurácia preditiva da probabilidade de incidência do distúrbio em diferentes regiões do Brasil. Utilizando os dados históricos de ocorrência do DFE em diferentes regiões e previsões climáticas até 2080, foi possível prever que a incidência de distúrbio fisiológico diminuirá ao longo dos anos. A capacidade de prever regiões onde o distúrbio pode ou não ocorrer é uma informação valiosa para as empresas do setor florestal, permitindo uma alocação mais racional de genótipos tolerantes e suscetíveis ao DFE em plantios futuros de eucalipto no Brasil.

Palavras-chave: Clima; Mapeamento; Distúrbio Fisiológico; Eucalyptus; Machine Learning.

ABSTRACT

Eucalyptus is a forest species of high economic importance in Brazil, with its woody biomass being used in a variety of industries, providing employment and income. However, since the mid-2000s, the forestry sector has faced an emerging challenge: eucalyptus physiological disturbance (DFE), whose causes are still unknown. Studies suggest that this disturbance may be related to abiotic factors, particularly local climatic conditions, including extreme events and climate changes. When combined with different genotypes, this can lead to significant changes in plant physiology and interfere with its normal development. In this study, statistical methods coupled with new machine learning tools were employed to investigate the relationship between climatic variables and DFE. This allowed the identification of five variables strongly associated with the disturbance, which, when used as explanatory variables in a logistic regression model, generated 99.8% predictive accuracy of the probability of disturbance incidence in different regions of Brazil. Using historical data on DFE occurrence in different regions and climate predictions up to 2080, it was possible to predict that the incidence of physiological disturbance will decrease over the years. The ability to predict regions where the disturbance may or may not occur is valuable information for companies in the forestry sector, allowing for a more rational allocation of tolerant and susceptible genotypes to DFE in future eucalyptus plantations in Brazil.

Keywords: Climate; Mapping; Physiological Disturbance; Eucalyptus; Machine Learning.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Mapa dos 2300 sítios com florestas de eucalipto classificados quanto à ocorrência (1: vermelho) ou ausência (0: azul) do Distúrbio Fisiológico do Eucalipto (DFE) em território brasileiro.24
- Figura 2. Matriz de confusão do modelo completo (A), do modelo reduzido (C), e curvas ROC de ambos os modelos sobrepostas.....25
- Figura 3. Mapa de predição da incidência do distúrbio fisiológico do Eucalipto (DFE) em território brasileiro. A- cenário atual (2021-2040); B – cenário futuro próximo (2041-2060); C- cenário futuro (2061-2080). Os cenários climáticos foram projetados, utilizando o modelo climático "CNRM-CM6-1" associado ao cenário socioeconômico SSP58.5.26
- Figura 4. Área estimada (%) com cada uma das classes de probabilidade de incidência do Distúrbio Fisiológico do Eucalipto (DFE) em território brasileiro, projetadas para o cenário climático atual (2021-2040) e futuros (2041-2060 e 2061 -2080), utilizando o modelo preditivo climático "CNRM-CM6-1" associado ao cenário socioeconômico SSP58.5.27
- Figura 5. Previsão da mudança na precipitação anual média conforme diferentes cenários de aquecimento global.30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Covariáveis bioclimáticas e geográficas do bando de dados Word Clim.....	20
Tabela 2. Informações sobre os pontos de ocorrência e ausência do distúrbio fisiológico do Eucalipto (DFE) utilizados para calibração do modelo preditivo da sua incidência no território brasileiro.	23

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	O plantio do eucalipto no Brasil	11
2.2	Estresses abióticos em Eucalyptus ssp.	13
2.3	O Distúrbio Fisiológico do Eucalipto	14
2.4.	Zoneamento climático	15
2.4.1	Variáveis edafoclimáticas e mudanças climáticas	16
2.5.	Modelagem de nicho ecológico e a predição espacial	17
3.	OBJETIVOS	18
4.	MATERIAL E MÉTODOS	18
4.1.	Histórico de áreas com ocorrência do distúrbio fisiológico do Eucalipto (DFE) no Brasil	18
4.2	Extração de dados geoclimáticos históricos e predição espacial	18
4.3	Modelagem para predição espacial do Distúrbio Fisiológico do Eucalipto (DFE)	21
5.	RESULTADOS	23
6.	DISCUSSÃO	27
6.1	Relação entre as variáveis observadas e o Distúrbio Fisiológico do Eucalipto	27
6.2	Relação entre as variáveis observadas e o Distúrbio Fisiológico do Eucalipto	28
6.3	Impacto dos Cenários Climáticos no Distúrbio Fisiológico do Eucalipto	28
6.3.1	Impacto na Redução da Probabilidade do desenvolvimento do DFE	29
7.	CONCLUSÃO	31
	INDICADORES DE IMPACTO	33
	REFERÊNCIAS	34

1. INTRODUÇÃO

O eucalipto é uma das principais essências florestais plantadas no mundo, sendo o Brasil um dos seus maiores produtores (FONSECA et al., 2010; IBÁ, 2022). A região sul da Bahia era uma das mais produtivas até meados dos anos 2000, quando a produtividade começou a cair significativamente, afetando tanto o volume de madeira produzida, quanto a qualidade dessa biomassa. O impacto negativo na produtividade foi observado de forma simultânea na região norte do Espírito Santo e na região da Bahia, esse fenômeno foi nomeado como Distúrbio Fisiológico do Eucalipto (DFE). O agente causal desse fenômeno é até hoje desconhecido, no entanto, estudos aprofundados da etiologia indicam que um distúrbio desconhecido afetou fortemente a economia de grandes empresas florestais na região. Uma doença de causa desconhecida começou a ser identificada na região, naquela época, e após repetidas observações em campo e posteriores estudos denominou-se o fenômeno como Distúrbio Fisiológico do Eucalipto (DFE). Técnicos florestais da antiga Fibria Celulose S.A. (hoje Suzano S.A.) identificaram, pela primeira vez, sintomas e sinais dessa nova doença em regiões localizadas ao norte do Espírito Santo Estado e extremo sul da Bahia, Brasil (RODRIGUES et al., 2020). O DFE é uma doença de etiologia abiótica desconhecida, que causa a perda da dominância apical, redução do crescimento e deformação na forma do fuste. Os sintomas das árvores afetadas pelo distúrbio são: bifurcação da copa, seca de folhas, formação de brotações no tronco, intenso desfolhamento, rachaduras e tortuosidades ao longo do tronco, morte das porções apicais dos galhos e seca de ponteiro (morte do meristema apical), além do aumento de brotações laterais.

Cabe ressaltar que existe variabilidade genética quanto a resistência/suscetibilidade ao distúrbio. Ou seja, existem genótipos que são tolerantes à doença e conseguem se desenvolver normalmente em áreas de ocorrência do DFE. Com isso, o melhoramento genético tem sido a melhor resposta contra essa doença. Recentemente, um estudo utilizou biomarcadores para entender o fenômeno a partir da comparação de genótipos tolerantes x suscetíveis (ALMEIDA et al., 2022). Esse estudo identificou que a densidade de casca não difere significativamente entre clones resistentes e susceptíveis ao DFE. A densidade da madeira e o teor de extrativos também não apresentaram tendências em relação a susceptibilidade ou tolerância dos clones. Em geral, clones tolerantes apresentaram maior crescimento, biomassa/aérea, porcentagem de cerne e relação siringil/guaiacil e menor teor de casca. Essas características são indicadas como potenciais biomarcadores da tolerância ao DFE (ALMEIDA et al., 2022). Além desse, há

também estudos quanto ao mecanismo molecular envolvido na doença, e como a planta responde frente ao desafio através da diferenciação da expressão gênica (RODRIGUES, 2020 e ESTEVES, 2023).

Apesar das diversas investigações para entendimento dos fatores ligados ao desencadeamento do DFE, pouco se sabe sobre como as alterações microclimáticas afetam a incidência da doença. Para alguns clones, a empresa Suzano S.A. possui um mapeamento de ocorrência ou não do distúrbio nas regiões de plantio. Nesse sentido, é possível utilizar-se de diferentes variáveis climáticas para modelar a ocorrência ou não do DFE nessas regiões. Se o modelo for bem ajustado, é possível realizar previsões e o mapeamento das regiões com maior e menor incidência do problema.

Entender como essas diferenças climáticas causam as alterações fenotípicas nas árvores é de fundamental importância, pois permitirá à empresa racionalizar a alocação de clones resistentes e suscetíveis em suas áreas de plantio. Além disso, a compreensão dos gatilhos do DFE é um passo importante para o desenvolvimento de biomarcadores e/ou biotecnologias para tornar as árvores resistentes ao problema. Portanto, esse trabalho se justifica pela busca por entender os ‘gatilhos climáticos’ que causam essa doença nos eucaliptos, e pela criação de um modelo baseado em aprendizado de máquina para prever quais são as áreas com maiores chances de incidência do DFE ao longo do Brasil.

Assim, os objetivos desse trabalho são: (i) identificar se há variáveis climáticas suficientemente associadas ao DFE para serem utilizadas em um modelo preditivo da incidência dessa doença; (ii) uma vez detectadas quais as variáveis associadas aos DFE, modelar especialmente a probabilidade de incidência do distúrbio fisiológico utilizando as normas climáticas históricas e futuras, considerando as alterações climáticas globais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O plantio do eucalipto no Brasil

O gênero *Eucalyptus* é nativo da Oceania, com a maioria das espécies de origem Australiana. O eucalipto agrega em torno de 900 espécies, além de muitas variedades e híbridos com interesse comercial (BOLAND et al., 2006; RITTER, 2014). O eucalipto apresenta adaptação a diferentes condições climáticas, baixa exigência nutricional,

facilidade para se regenerar e alta capacidade de ciclagem de nutrientes no perfil do solo (VALVERDE et al. 2015). As variedades de eucalipto juntas destacam-se como algumas das mais importantes árvores na produção mundial de madeira plantada, sendo os seus maiores produtores o Brasil, China, Moçambique e EUA (FONSECA et al., 2010; IBÁ, 2022). Além da madeira, diferentes produtos e subprodutos são extraídos de suas folhas, cascas, flores, frutos e galhos. O seu cultivo é destinado para os mais diversos fins, incluindo: óleos essenciais para indústrias farmacêuticas; produtos de limpeza e alimentos; setores de papel e celulose; setor de energia (lenha industrial e carvão vegetal); produção de produtos sólidos da madeira (serraria, aglomerados, madeira maciça e madeira industrializada); mel e ornamentação (IBÁ, 2022). No Brasil, o cultivo de eucalipto se expande a cada ano, atingindo diversas regiões do país, desempenhando papel importante na sociedade brasileira. Em 2022, a área total com árvores plantadas totalizou 9,93 milhões de hectares, com um crescimento de 1,9% em relação ao dado revisado de 2020 (9,75 milhões de hectares). Entre as espécies, 75,8% da área é composta pelo cultivo de eucalipto, com 7,53 milhões de hectares (IBÁ, 2022). A maior parte dos plantios com eucalipto se localiza nas regiões Sul e Sudeste (Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul), onde também estão localizadas as principais unidades industriais dos segmentos de celulose, papel e painéis de madeira industrializada. Apesar das dificuldades observadas no mercado de trabalho em todo o país, especialmente após a chegada da pandemia, a cadeia produtiva de árvores plantadas entre 2020 e 2021 contribuiu favoravelmente para a geração de emprego. O setor fechou o ano com 553 mil postos de trabalho diretos e 1,59 milhão indiretos. Considerando ainda os empregos induzidos, houve crescimento do pessoal ocupado de 2,88 milhões em 2020 para 2,97 milhões em 2021 (IBÁ, 2022)

As condições climáticas propícias no Brasil e também a tecnologia desenvolvida por empresas e instituições de pesquisa do país, permitiram grandes avanços e conquistas ao setor. Juntamente com os esforços bem-sucedidos do melhoramento genético convencional, houve também o desenvolvimento em larga escala de ferramentas biotecnológicas e moleculares para as espécies do gênero *Eucalyptus* com o objetivo de encontrar indivíduos cada vez mais produtivos, adaptados e com qualidade da madeira (GRATTAPAGLIA e KIRST, 2008; GOLLE et al., 2009; DASGUPTA, 2011; PAIVA et al., 2011). Atualmente, com a expansão dos plantios de eucalipto para as diversas regiões brasileiras e com as alterações extremas das condições climáticas, é preciso adaptar as práticas silviculturais e o material genético a esta nova realidade (ALVARES e MAFIA, 2023). Neste contexto é fundamental

que haja seleção e recomendação atenta dos materiais genéticos nos plantios comerciais. Nesse sentido, destaca-se a seleção de clones adaptados a diversos ambientes e resistentes aos estresses de natureza biótica e abiótica existentes nos locais alvo dos plantios.

2.2 Estresses abióticos em *Eucalyptus ssp.*

As plantas estão frequentemente expostas a inúmeras condições ambientais que muitas vezes podem ser desfavoráveis ou estressantes para o seu desenvolvimento. Tais condições desfavoráveis incluem os estresses bióticos (como infecção por patógenos e ataques de herbívoros) e os estresses abióticos (como seca, calor, frio e deficiência de nutrientes). Esses estresses podem ser potencializados pelas mudanças climáticas (TESHOME; ZHARARE; NAIDOO, 2020). Neste sentido, o termo “estresse” é definido como toda perturbação que surge a partir do excesso ou déficit de fatores físicos e químicos no meio, exercendo influência negativa sobre o funcionamento do metabolismo vegetal (TAIZ e ZEIGER, 2013).

Os fatores abióticos de estresse são considerados entre os principais contribuintes para a redução da produtividade agrícola, restringindo os rendimentos médios esperados das culturas em mais de 50% (PANDEY; RAMEGOWDA; SENTHIL-KUMAR, 2015). As flutuações hídricas, temperaturas extremas, exposição excessiva à radiação ultravioleta (UV), reduções nas taxas de oxigênio, bem como a exposição a concentrações tóxicas de determinados nutrientes são consideradas alguns dos principais estresses abióticos que afetam negativamente o crescimento de plantas, impedindo que elas alcancem seu potencial genético (NAGEL et al., 2017). Estes estresses promovem alterações tanto a nível morfológico e fisiológico quanto bioquímico e molecular.

Entender qual é o estresse abiótico responsável por uma doença é de fundamental importância para entender a mesma. Nesse sentido, quando estamos diante de uma doença de causa desconhecida, como o distúrbio fisiológico do eucalipto, faz-se necessária a utilização de ferramentas que contribuam para correlacionar as condições edáficas e climáticas com a incidência da doença (RODRIGUES et al., 2022). As ferramentas de predição ajudam a correlacionar os estresses com a doença observada, auxiliando no entendimento desse mecanismo.

2.3 O Distúrbio Fisiológico do Eucalipto

Empresas de papel e celulose têm enfrentado dificuldades com a adaptação de alguns clones em certos ambientes nos últimos anos. Uma dessas dificuldades decorre do Distúrbio Fisiológico do Eucalipto (DFE), que causa queda na produtividade dos plantios de eucalipto e impactos econômicos no setor. Essa doença ocorre em diferentes regiões do país e afeta, principalmente, plantios localizados nas regiões litorâneas dos estados da Bahia e Espírito Santo (SILVA et al., 2010; RODRIGUES, 2013). Os primeiros relatos desse fenômeno ocorreram primeiramente no Espírito Santo e extremo sul da Bahia, em meados dos anos 2000. Os sintomas das árvores afetadas pelo distúrbio são: bifurcação da copa, seca de folhas, formação de brotações no tronco, intenso desfolhamento, rachaduras e tortuosidades ao longo do tronco, morte das porções apicais dos galhos e seca de ponteiro (morte do meristema apical). Estes sintomas foram identificados como uma desordem no crescimento e no metabolismo que compromete o desenvolvimento das árvores, gerando inclusive a morte de genótipos muito suscetíveis (SILVA et al., 2010, RODRIGUES et.al, 2013).

As verdadeiras causas que levam ao surgimento do DFE ainda são desconhecidas. O que se tem observado empiricamente é que esta desordem fisiológica está intimamente ligada a fatores abióticos, mais especificamente às condições locais de clima que possui altas temperaturas, pluviosidade e umidade relativa do ar. Tais fatores climáticos, quando combinados com o material genético utilizado, acarretam modificações fisiológicas expressivas, comprometendo o desenvolvimento normal da planta (MAFIA et al., 2013; CÂMARA et al., 2018). Neste sentido, o plantio de genótipos suscetíveis ao distúrbio representa um risco devido a mudanças climáticas, como frequente alternância entre excesso e falta de chuvas (inundações e secas prolongadas) seguido de variações bruscas de temperatura.

Uma hipótese para explicar o DFE é que mudanças bruscas na temperatura e precipitação, aliados ao tipo de solo local (SILVA et al., 2010), podem dificultar a translocação de sais minerais e nutrientes do solo para a planta, interferindo nos processos fisiológicos como por exemplo as trocas gasosas da planta com o meio (TAIZ e ZEIGER, 2013). Estes aspectos atuam como importantes agentes no surgimento e manifestação contínua dos sintomas, provocando anomalias no crescimento e consequente perda das características fenotípicas normais da planta através de alterações no metabolismo celular e na expressão gênica. Reduções no crescimento são frequentemente os primeiros indicadores da incidência de um distúrbio. Árvores de eucalipto afetadas por distúrbios fisiológicos apresentam um crescimento diminuído e uma deterioração nas características da madeira.

Estresses climáticos influenciam negativamente o crescimento das plantas, o que ocorre pelo fechamento estomático em condições de limitação hídrica, promovendo um menor crescimento das árvores, que pode também estar associado aos sintomas do DFE observados (ALMEIDA et al., 2022). A interação entre o fator genético com as condições do meio pode levar a alterações na expressão de genes da planta, o que provoca anomalias metabólicas que se manifestam na forma de distúrbios fisiológicos (TAIZ e ZEIGER, 2013). Tendo em vista tais fatores, atualmente um dos grandes desafios do melhoramento genético é desenvolver genótipos com características de interesse e adaptados às condições climáticas do ambiente. No caso do *Eucalyptus* plantados na região sul da Bahia, a resistência ao distúrbio fisiológico também é um fator muito importante. Dessa forma, entender como as variáveis climáticas estão relacionadas com o desenvolvimento dessa doença abiótica pode resultar em modelos preditivos da incidência do DFE. Com base nesses modelos, é possível a produção de mapas com o zoneamento das áreas de ocorrência da doença.

2.4. Zoneamento climático

As condições climáticas regionais são um fator essencial para a recomendação de genótipos para cultivo (FLORES et al., 2016). O conhecimento da variabilidade climática de uma região é, portanto, importante, pois o clima afeta diretamente o desenvolvimento da cultura (DE SÁ JÚNIOR et al., 2012). As adversidades climáticas afetam negativamente a produção agrícola. A interação de genótipos com ambientes (GxA) faz com a variabilidade climática afete os genótipos (p.ex. clones de eucalipto) de forma diferente, complicando bastante a seleção e a recomendação de cultivares. Por isso técnicas de zoneamento são importantes para identificar, com maior segurança, os locais e as datas mais adequados para o plantio (APARECIDO et al., 2018). O zoneamento consiste na identificação de regiões com aptidão agrícola e com risco climático. O zoneamento agroclimático é a combinação de informações meteorológicas com requisitos da cultura para identificar regiões adequadas, inadequadas ou marginalmente adequadas para uma cultura (WREGGE et al., 2015).

Os sistemas de informações geográficas (SIGs) podem ser usados para obter informações sobre a distribuição espacial dos climas adequados para cultivos em preparação para zoneamento agroclimático (PENA et al., 2016). O zoneamento agroclimático tem sido aplicado para várias culturas, por ex. *Chenopodium quinoa* na Bolívia (GEERTS et al., 2006), *Macadamia integrifolia* no Brasil (SCHNEIDER et al., 2012), *Ricinus communis* na Argentina (FALASCA; ULBERICH; ULBERICH, 2012) e Eucalipto no Brasil (FLORES et al., 2016). Também há a aplicação dos conceitos e modelagem para ocorrência de doença em plantas,

como vemos em Godefroid et.al (2019) que modelou a aptidão de *Xylella fastidiosa* para habitar o continente europeu e Chumanová et.al (2019) que construiu um modelo de incidência de uma importante doença fúngica para o território da República Tcheca. O fato de que ainda não existe um zoneamento climático específico para a incidência do distúrbio fisiológico do eucalipto pode ter implicações significativas na decisão futura de plantio. A falta de informações precisas e abrangentes sobre a incidência deste distúrbio em diferentes condições climáticas pode levar a decisões de plantio inadequadas, com potencial impacto negativo na saúde e produção das árvores. Portanto, é necessária uma avaliação detalhada da variabilidade climática e sua relação com o distúrbio fisiológico do eucalipto para garantir a efetividade das decisões de plantio futuras.

2.4.1 Variáveis edafoclimáticas e mudanças climáticas

As mudanças climáticas é um tema de constante debate dentro do setor florestal. Como as árvores necessitam de um longo período (6-7 anos) para atingir o ponto de corte, as mudanças climáticas podem resultar em intempéries que prejudicam o desenvolvimento da cultura (APARECIDO et al., 2018). Antecipar o impacto das mudanças climáticas nos ecossistemas florestais envolve muitas incertezas, desde a extensão futura das próprias mudanças climáticas até a variabilidade espacial e temporal dos impactos previstos. Neste contexto de incertezas futuras aliado ao fato de que “nenhuma solução única serve para todos os desafios futuros” (MILLAR; STEPHENSON; STEPHENS, 2007), a maioria dos quadros de adaptação para gestão de ecossistemas no contexto das mudanças climáticas defende a implementação de um portfólio de opções (DUDNEY et al., 2018; MILLAR; STEPHENSON; STEPHENS, 2007). Uma das estratégias para distribuir o risco de má adaptação e mortalidade em uma paisagem, é o plantio de uma diversidade de materiais genéticos que poderão responder de maneira diferente às condições futuras. Um notável portfólio de adaptações é o de Millar et al. (2007) que propuseram três opções de adaptação no nível do povoamento: (1) criar resistência ao reduzir os efeitos adversos das mudanças climáticas, (2) promover a resiliência, ou seja, a capacidade dos ecossistemas de se recuperarem de perturbações e (3) permitir que as florestas respondam à mudança, facilitando respostas adaptativas. Essas três opções representam um gradiente na quantidade de mudança ecológica que é aceita pelos gerentes e agora serão incorporadas a muitos quadros de adaptação (NAGEL et al., 2017).

É importante estar atento à interação que ocorre entre as florestas e as mudanças climáticas. Nesse sentido, identificar “gatilhos climáticos” que desencadeiam o distúrbio

fisiológico pode ser de grande valia. Gatilho pode ser entendido como a mudança no clima que desencadeia o distúrbio nos clones suscetíveis de eucalipto. Para isso, depende-se do entendimento da relação de diferentes condições edafoclimáticas com a progressão e ocorrência de sintomas em áreas afetadas.

2.5. Modelagem de nicho ecológico e a predição espacial

A modelagem de nicho ecológico (ENM) e a previsão espacial são técnicas analíticas amplamente utilizadas na indústria florestal que fornecem informações importantes sobre as distribuições das espécies e os fatores ambientais que as impulsionam (CARVALHO; RANGEL; VALE, 2017). Quando aplicados ao estudo do distúrbio fisiológico do eucalipto, esses métodos podem ajudar a identificar os gatilhos climáticos que podem contribuir para a incidência e disseminação da doença.

ENM usa dados de presença-ausência de uma espécie e variáveis ambientais para criar uma representação multivariada do nicho da espécie, ou de seu habitat preferido. O modelo de nicho pode então ser usado para prever a distribuição potencial da espécie em diferentes condições ambientais e para identificar as variáveis ambientais mais críticas para sua sobrevivência. Essas informações podem ser usadas para determinar os fatores climáticos que podem aumentar o risco de morte do eucalipto, como períodos prolongados de seca ou mudanças nos regimes de temperatura e chuvas (SILLERO, 2011).

A predição espacial, por outro lado, gera modelos que preveem a distribuição de um fenômeno com base em dados amostrados. Os modelos podem ser usados para prever a distribuição do distúrbio fisiológico do eucalipto em locais não amostrados, fornecendo informações valiosas sobre os padrões espaciais da doença e sua relação com variáveis ambientais, incluindo gatilhos climáticos (DOS REIS et al., 2018). Em suma, o uso conjunto de ENM com predição espacial no estudo do DFE pode fornecer informações cruciais sobre os gatilhos climáticos que podem aumentar o risco da doença e apoiar a tomada de decisão no manejo florestal. Ao integrar esses métodos com a ecologia de perturbação, podemos obter uma compreensão mais profunda das interações entre possíveis gatilhos e o distúrbio fisiológico do eucalipto.

3. OBJETIVOS

(i) Descobrir variáveis edafoclimáticas associadas à incidência do distúrbio fisiológico do eucalipto;

(ii) Modelar espacialmente a probabilidade de incidência do distúrbio fisiológico utilizando as normas climáticas históricas e futuras, considerando as alterações climáticas globais.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Histórico de áreas com ocorrência do distúrbio fisiológico do Eucalipto (DFE) no Brasil

Nesse estudo foram utilizados dados de incidência ou não do Distúrbio Fisiológico do Eucalipto (DFE) provenientes do levantamento de plantações comerciais de Eucalipto em regiões conhecidas da empresa Suzano S.A. (informações ainda não divulgadas). Nas áreas com plantios amostrados, foram coletadas coordenadas geográficas que representam polígonos delimitados pela extensão. Foi feita uma exclusão de coordenadas que se sobrepusessem em um raio de 500 metros. Esse processo resultou na obtenção de 2300 coordenadas geográficas, abrangendo os estados do Amazonas, Pará, Maranhão, Tocantins, Piauí, Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Rio Grande do Sul (Figura 1). Com base em observações da doença em campo, cada coordenada foi classificada de forma binária como “0”, quando não há histórico do DFE, e “1” em áreas onde há registros de DFE.

4.2 Extração de dados geoclimáticos históricos e predição espacial

Os dados disponíveis no banco de dados WorldClim compreendem normais climatológicas definidas por observações entre anos de 1970 e 2000. Visando um balanço entre detalhamento e desempenho computacional, foi utilizada a resolução espacial de 2,5 minutos (~ 5 km²). A obtenção dos dados climáticos e de elevação (altitude) foi realizada para cada ponto, considerando o pixel em que este está situado. Utilizando o WorldClim, todos os 407.871 pixels do Brasil foram caracterizados a partir da extração de 19 variáveis bioclimáticas

utilizando o pacote *geodata* disponível na linguagem R (HIJMANS; GHOSH; MANDEL, 2022). Essas variáveis bioclimáticas são estimadas com base na temperatura, precipitação ou combinação das duas em um determinado período ou no ano todo (Tabela 3). Essas biovariáveis normalmente são ótimas preditoras do crescimento e de estresses abióticos em vegetais, e vêm sendo utilizadas por diferentes estudos nos últimos anos (LUDWIG et.al, 2023; KUNSTLER et.al, 2015; WANG et al. 2022).

Com o objetivo de avaliar a incidência futura de DFE devido às mudanças climáticas, foi empregado o banco de dados CMIP Phase 6 (CMIP6), gerido pelo “World Climate Research Program”. Este banco fornece informações sobre as projeções de variações nas condições climáticas (EYRING et al., 2016). Foram extraídos dados para os seguintes períodos: 2021-2040, 2041-2060 e 2061-2080. Para as projeções futuras, foi utilizado o modelo climático preditivo "CNRM-CM6-1" associado ao cenário socioeconômico SSP58.5, que foi considerado pessimista quanto ao aumento das emissões de gases de efeito estufa. As projeções foram realizadas com base nas 19 variáveis climáticas extraídas das condições climáticas normais históricas do WorldClim (MEINSHAUSEN et al., 2020; VOLDOIRE et al., 2019).

Tabela 1. Covariáveis bioclimáticas e geográficas do bando de dados Word Clim

Variável	Descrição	Unidade de Medida
BIO01	Temperatura média anual	°C
BIO02	Amplitude térmica diária	°C
BIO03	Isotermalidade (BIO2/BIO7) x100	%
BIO04	Sazonalidade da temperatura (desvio Padrão ×100)	%
BIO05	Temperatura máxima do mês mais quente	°C
BIO06	Temperatura mínima do mês mais frio	°C
BIO07	Amplitude térmica anual (BIO5-BIO6)	°C
BIO08	Temperatura média do trimestre mais úmido	°C
BIO09	Temperatura média do trimestre mais seco	°C
BIO10	Temperatura média do trimestre mais quente	°C
BIO11	Temperatura média do trimestre mais frio	°C
BIO12	Precipitação pluviométrica anual	mm
BIO13	Precipitação pluviométrica do mês mais úmido	mm
BIO14	Precipitação pluviométrica do mês mais seco	mm
BIO15	Sazonalidade da precipitação pluviométrica (CV)	%
BIO16	Precipitação pluviométrica do trimestre mais úmido	mm
BIO17	Precipitação pluviométrica do trimestre mais seco	mm
BIO18	Precipitação pluviométrica do trimestre mais quente	mm
BIO19	Precipitação pluviométrica do trimestre mais frio	mm
GEO01	Elevação	m

Fonte: do Autor.

4.3 Modelagem para predição espacial do Distúrbio Fisiológico do Eucalipto (DFE)

A ocorrência ou ausência dos sintomas de DFE nas florestas amostradas foi modelada utilizando variáveis bioclimáticas e a altitude como variáveis preditoras (independentes). A informação sobre a ocorrência ou ausência da doença foi utilizada de forma binária (ocorrência = 1 e ausência = 0) como variável resposta ou dependente (Tabela 1). Os dados de ocorrência foram subdivididos em dois grupos, sendo um conjunto destinado à calibração do modelo e outro destinado à validação, ambos com 50% dos registros totais. A finalidade foi explicar a distribuição de ocorrência do DFE em relação às condições climáticas normais e à altitude, por meio de uma análise de regressão logística (classificador de máxima entropia) modelada da seguinte forma:

$$\text{logit}(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_n X_n + \varepsilon$$

Onde p é a probabilidade de ocorrência do DFE e $\beta_0 + \beta_1 + \dots + \beta_n$ são os coeficientes estimados para cada uma das variáveis bioclimáticas e altitude: $X_1 + X_2 + \dots + X_n$.

Com o objetivo de identificar um modelo que tenha apresentado um ajuste satisfatório e um número mínimo de parâmetros, o processo de calibração e validação foi realizado em duas etapas. Na primeira etapa, todas as 20 variáveis (Tabela 3) foram utilizadas e a importância de cada uma foi avaliada com base na significância dos valores finais dos coeficientes de regressão, determinados pelo teste t de Student. Na segunda etapa, somente as 5 variáveis que apresentaram maior importância foram consideradas no modelo preditivo final. A qualidade de ajuste dos modelos completo e reduzido foi avaliada pela área abaixo da curva ROC (receiver operating characteristic curve) (PEARCE e FERRIER, 2000) e a precisão da previsão da ocorrência ou ausência em cada localização geográfica foi estimada pela relação entre o número de classificações incorretas e o número total de classificações a partir de uma matriz de confusão (CRUZ e CARNEIRO, 2003). Com base nessa matriz a acurácia das predições foi estimada com a equação:

$$Ac = 1 - \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^l m_j \right)$$

Onde Ac representa a acurácia medida pela proporção de pontos corretamente classificados; m_j é o número de observações classificadas incorretamente quanto a presença ou ausência, onde $j = 1, 2, \dots, l$ localização geográfica.

Com o objetivo de determinar a distribuição espacial da incidência de DFE, o modelo de regressão logística ajustado foi aplicado aos 407.871 pontos geográficos (pixels no mapa) do território brasileiro. A partir dessa aplicação, foi gerado um arquivo de extensão “raster” que representou as probabilidades de ocorrência do DFE para cada pixel. Por fim, foram construídos mapas que ilustraram a distribuição da doença no presente e no futuro, considerando as projeções climáticas obtidas a partir do modelo CNRM-CM6-1. Para classificação da probabilidade de incidência do DFE em ‘muito baixa’, ‘baixa’, ‘moderada’ e ‘alta’ foram utilizados os seguintes limiares: abaixo de 20%, entre 20% e 40%, entre 40% e 60% e acima de 60%, respectivamente.

5. RESULTADOS

Para calibrar um modelo preditivo da probabilidade de incidência do DFE, foram utilizados 2300 locais em algumas das principais regiões com plantios de *Eucalyptus* no território brasileiro (Figura 1). Esses locais foram classificados quanto ao histórico de ocorrência da doença. O modelo calibrado com todas as 20 variáveis geográficas e climáticas gerou uma acurácia preditiva de 98.4% (Figura 2). A fim de reduzir a complexidade do modelo, foram escolhidas as cinco variáveis de maior importância, sendo elas: GEO01, BIO01, BIO06, BIO10, BIO19. O modelo reduzido obteve uma acurácia de 99.6% (Figura 2).

Tabela 2. Informações sobre os pontos de ocorrência e ausência do distúrbio fisiológico do Eucalipto (DFE) utilizados para calibração do modelo preditivo da sua incidência no território brasileiro.

Conjunto de dados	Número de observações		
	Ocorrência	Ausência	Total
Total	1427	873	2300
Treino	733	452	1185
Teste	694	421	1115

Fonte: do Autor.

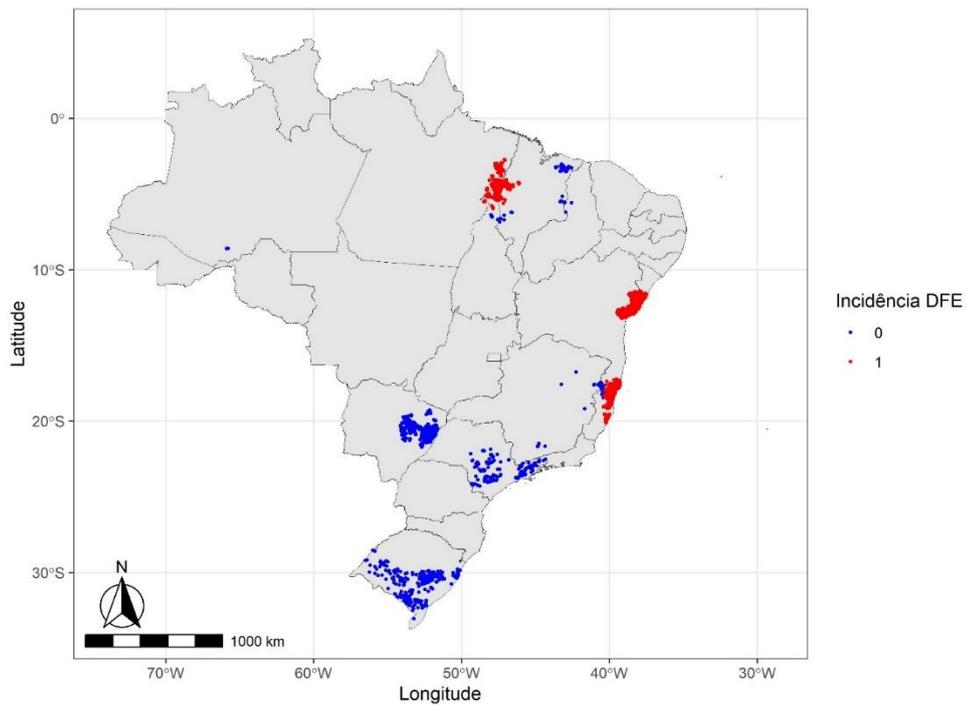
Utilizou-se o modelo reduzido para realizar predições em cenários climatológicos para os anos futuros, dividindo os períodos para o cenário atual (2021-2040) (Figura 3A), cenário futuro próximo (2041-2060) (Figura 3B) e um cenário futuro (2061-2080) (Figura 3C). A análise temporal revelou uma redução gradual da incidência do DFE em todo o Brasil ao longo do tempo. De 2021 a 2040, uma extensa área no nordeste, estendendo-se até o Maranhão e grande parte do Pará, juntamente com o Amazonas, Acre e parte do noroeste de Mato Grosso, apresentam uma alta probabilidade de incidência do distúrbio. No restante do país, não há registros da doença nesse período.

Entre 2041 e 2060, há uma redução na área afetada. O DFE é observado em uma faixa menor no Nordeste, incluindo Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará. Além disso, são identificados focos específicos no norte da divisa entre Maranhão e Pará, extremo norte do Amapá e uma área no noroeste do Amazonas, estendendo-se um pouco para o interior do estado.

Após 2061, não há mais sinais do distúrbio em todo o território brasileiro. Isso sugere uma significativa redução ou até mesmo a ausência total do DFE nessas regiões.

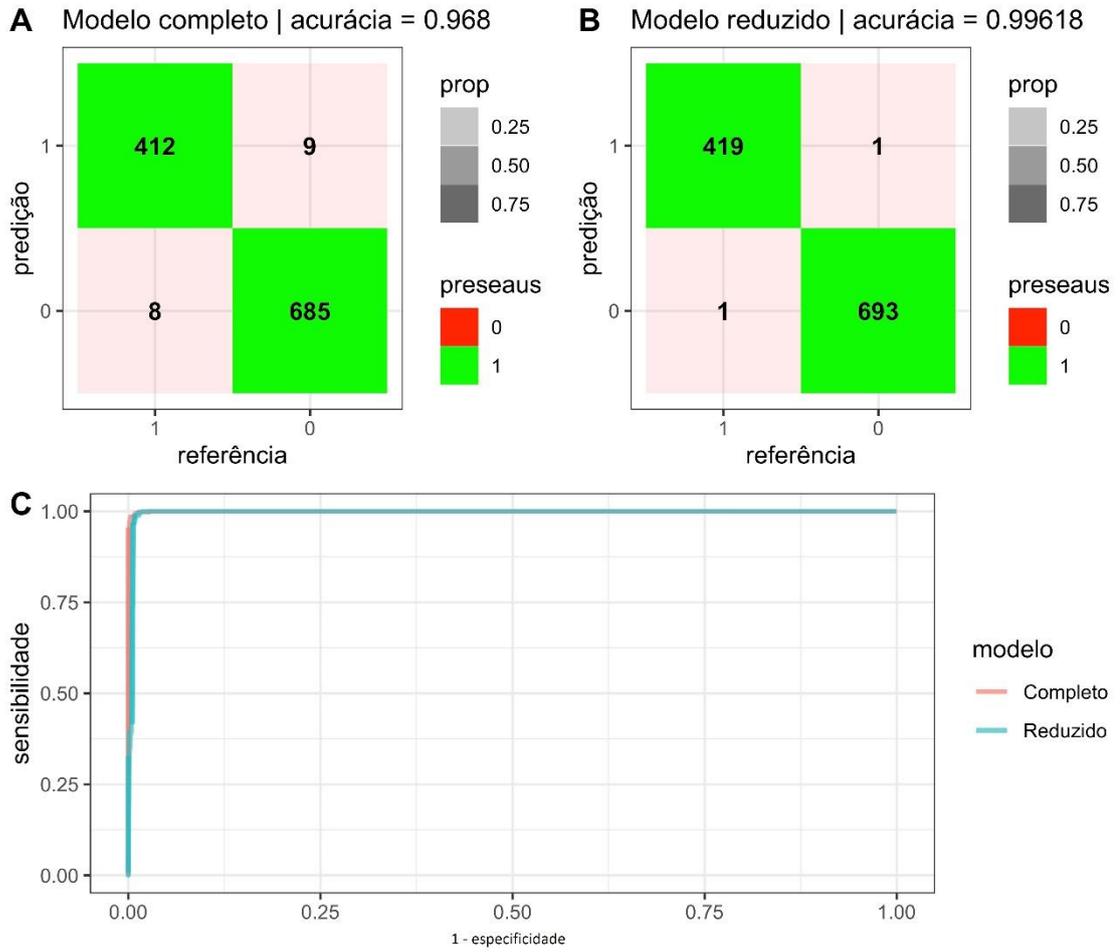
Foi realizada uma classificação de incidência do DFE no território brasileiro em ‘muito baixa’, ‘baixa’, ‘moderada’ e ‘alta’ utilizando os seguintes limiares: abaixo de 20%, entre 20% e 40%, entre 40% e 60% e acima de 60%, respectivamente (Figura 4).

Figura 1. Mapa dos 2300 sítios com florestas de eucalipto classificados quanto à ocorrência (1: vermelho) ou ausência (0: azul) do Distúrbio Fisiológico do Eucalipto (DFE) em território brasileiro.



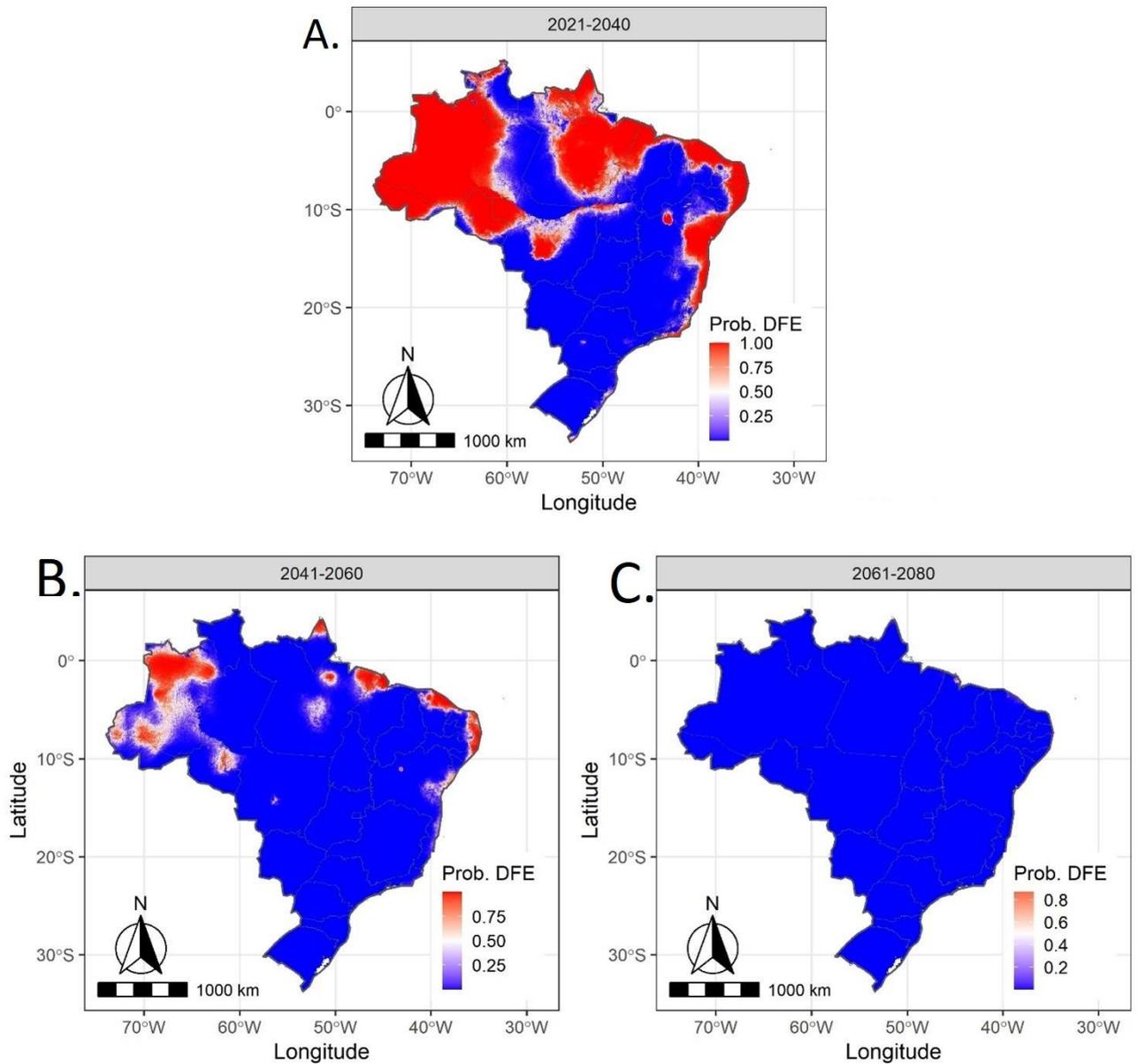
Fonte: do Autor.

Figura 2. Matriz de confusão do modelo completo (A), do modelo reduzido (C), e curvas ROC de ambos os modelos sobrepostas.



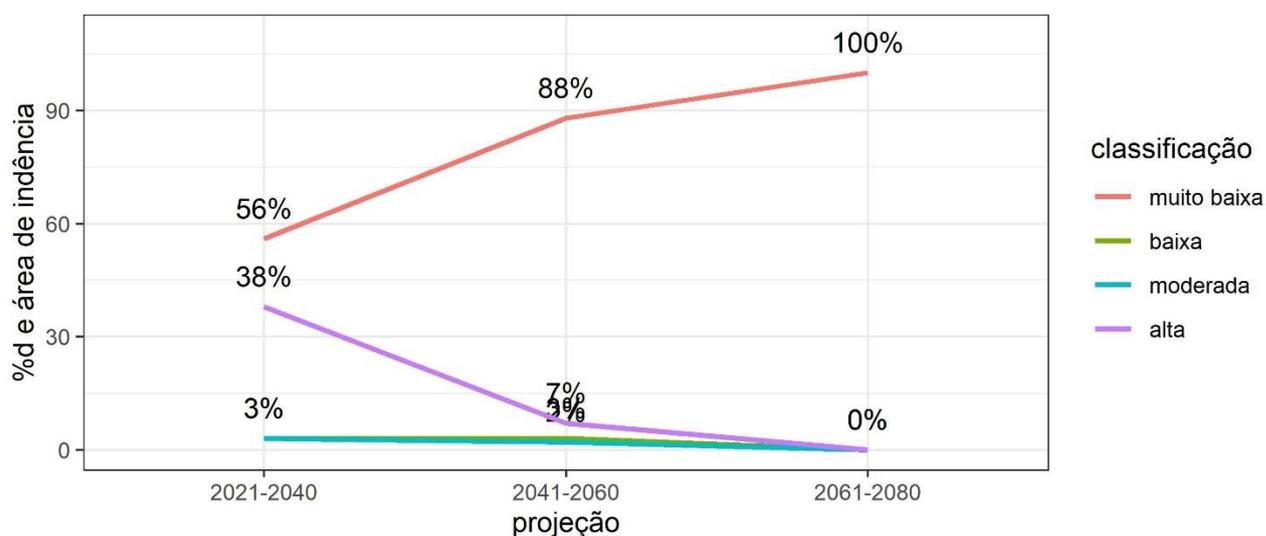
Fonte: do Autor

Figura 3. Mapa de predição da incidência do distúrbio fisiológico do Eucalipto (DFE) em território brasileiro. A- cenário atual (2021-2040); B – cenário futuro próximo (2041-2060); C- cenário futuro (2061-2080). Os cenários climáticos foram projetados, utilizando o modelo climático "CNRM-CM6-1" associado ao cenário socioeconômico SSP58.5.



Fonte: do Autor

Figura 4. Área estimada (%) com cada uma das classes de probabilidade de incidência do Distúrbio Fisiológico do Eucalipto (DFE) em território brasileiro, projetadas para o cenário climático atual (2021-2040) e futuros (2041-2060 e 2061-2080), utilizando o modelo preditivo climático "CNRM-CM6-1" associado ao cenário socioeconômico SSP58.5.



Fonte: do Autor

6. DISCUSSÃO

6.1 Relação entre as variáveis observadas e o Distúrbio Fisiológico do Eucalipto

Os resultados do modelo ajustado nesse trabalho para a predição do Distúrbio Fisiológico do Eucalipto (DFE) são altamente promissores. A Área sob a Curva ROC (AUC) alcançou um valor de 0.99 (SMITH et al., 2018), o que indica uma capacidade excepcional em discriminar entre casos positivos e negativos de DFE. A acurácia média de 0.998 evidencia uma consistência notável nas previsões, enquanto a sensibilidade de 0.997 e a especificidade de 0.998 ressaltam a habilidade do modelo em identificar corretamente tanto as áreas com incidência como aquelas sem histórico do DFE, respectivamente (Tabela 2). Esses resultados estão em linha com pesquisas anteriores que exploraram modelos preditivos em distúrbios fisiológicos em árvores (BROWN et al., 2019).

O modelo de regressão logística ajustado nesse estudo possui aplicação prática imediata, pois possibilita identificar quais regiões possuem alta probabilidade de ocorrência do DFE, o que é essencial para estratégias de manejo florestal sustentável (COLLINS et al., 2014). Essa precisão na predição pode viabilizar intervenções proativas, como a recomendação de clones

resistentes em áreas com alta probabilidade de DFE, para mitigar os impactos adversos da doença nas plantações de eucalipto. Com isso, será possível promover uma gestão mais eficaz e racional das florestas de eucalipto.

6.2 Relação entre as variáveis observadas e o Distúrbio Fisiológico do Eucalipto

As variáveis climáticas selecionadas (GEO01, BIO01, BIO06, BIO10, BIO19) desempenham papéis fundamentais na fisiologia das espécies vegetais, incluindo os eucaliptos. Estudos anteriores sugerem associações entre essas variáveis e distúrbios fisiológicos em árvores (SMITH et al., 2019), incluindo o DFE.

GEO01 representa a altitude, que pode influenciar a probabilidade de ocorrência do DFE, uma vez que a altitude influencia as variações de temperatura e umidade, fatores críticos para o desenvolvimento saudável das árvores (SMITH et al., 2019). Além disso, a BIO01 (temperatura média anual) e a BIO06 (temperatura mínima do trimestre mais frio) têm sido associadas à suscetibilidade das plantas a distúrbios fisiológicos, como oscilações extremas de temperatura afetando processos metabólicos (KÜHN et al., 2018).

A BIO10 (temperatura média do verão) e a BIO19 (precipitação no trimestre mais frio) também desempenham papéis cruciais na fisiologia das espécies vegetais. Flutuações extremas nessas variáveis podem influenciar a saúde e a resistência das árvores a distúrbios, incluindo o DFE (JONES et al., 2017; ROCHA et al., 2020).

6.3 Impacto dos Cenários Climáticos no Distúrbio Fisiológico do Eucalipto

As projeções climáticas nos cenários CNRM-CM6-1 e SSP58.5 do WorldClim indicam mudanças significativas na probabilidade de incidência do DFE (Figura 2). Essas projeções resultam de mudanças na temperatura e precipitação, o que resulta em alterações na distribuição geográfica de ocorrência dessa doença (Figura 2).

Essas mudanças climáticas projetadas têm implicações diretas nas condições em que as espécies de eucalipto crescem e se desenvolvem. Por exemplo, alterações na temperatura média anual (BIO01) podem influenciar o ciclo de vida das plantas, afetando seu desenvolvimento e vulnerabilidade a distúrbios fisiológicos (KÜHN et al., 2018). A precipitação no trimestre mais frio (BIO19), que é geralmente o mais seco no Brasil, também desempenha um papel

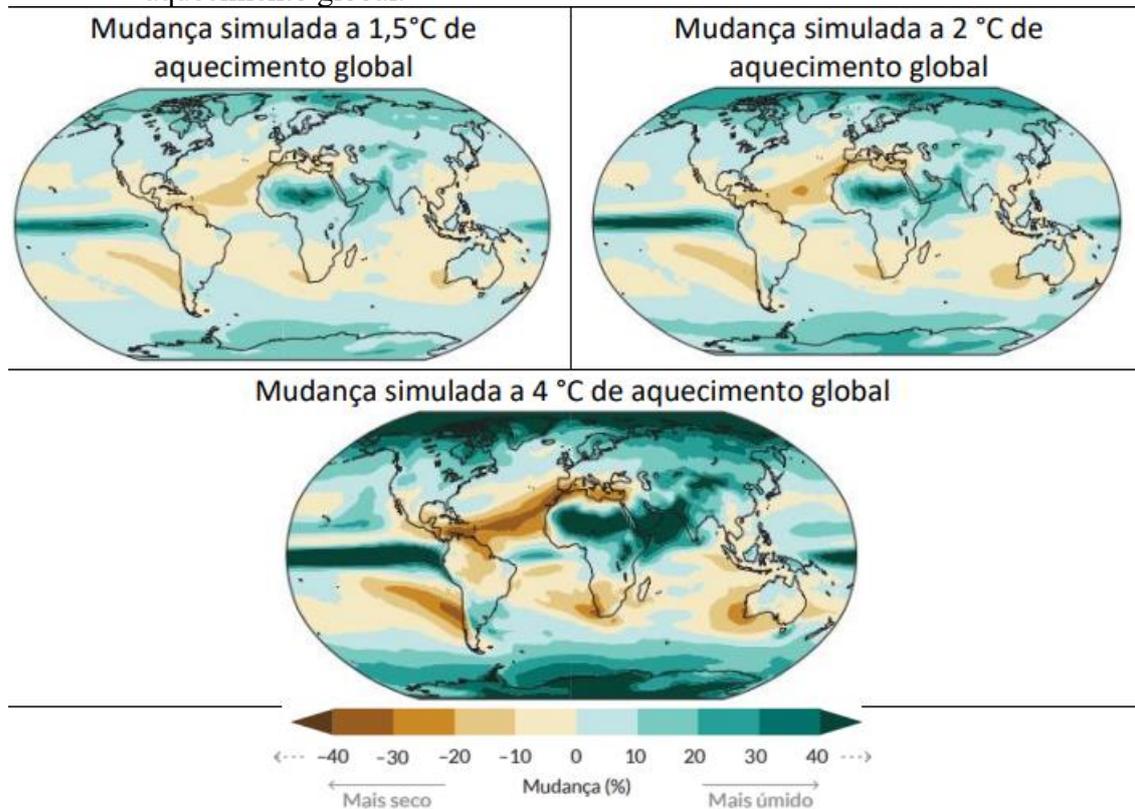
fundamental no fornecimento de água para as árvores, afetando sua resistência a doenças e estresses ambientais.

Essas mudanças nas variáveis climáticas podem resultar em condições menos favoráveis para a ocorrência do DFE. À medida que as condições se aproximam de um ambiente menos propenso ao desenvolvimento desse distúrbio específico, é razoável presumir que a probabilidade de ocorrência do DFE diminua ao longo do tempo.

6.3.1 Impacto na Redução da Probabilidade do desenvolvimento do DFE

É esperado que as mudanças climáticas tenham um grande impacto sobre vegetação da Terra, gerando menor adaptabilidade e perdas (WILLIAMS et al., 2013). Espera-se um aumento da temperatura média e diminuição das chuvas em boa parte do território brasileiro, variando conforme a previsão de aquecimento global (INMET 2022, IPCC, 2022) (Figura 5). O resultado de diminuição da incidência de distúrbio fisiológico foi, de certa forma, inesperado, pois espera-se que o aumento da temperatura associado à baixas chuvas, aumente o stress oxidativo e dificulte ainda mais a recuperação do eucalipto aos estresses (NAGEL et al., 2017; RODRIGUES, 2013). Com isso, esperava-se que a incidência da doença aumentasse ao longo dos anos.

Figura 5. Previsão da mudança na precipitação anual média conforme diferentes cenários de aquecimento global.



Fonte: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Cenarios-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas.pdf>

Além disso, a modificação na distribuição da precipitação (BIO19), fornecerá um ambiente menos propício ao desenvolvimento de condições favoráveis para o DFE, o que pode contribuir para a redução da probabilidade de ocorrência do distúrbio associado a altas temperaturas (ALLEN et al., 2010). O que se tem observado empiricamente é que esta desordem fisiológica está intimamente ligada a fatores abióticos, mais especificamente às condições locais de clima que possui altas temperaturas, pluviosidade e umidade relativa do ar. Tais fatores climáticos, quando combinados com o material genético utilizado, acarretam modificações fisiológicas expressivas, comprometendo o desenvolvimento normal da planta (MAFIA et al., 2013; CÂMARA et al., 2018). O destaque está para os três fatores em alta quantidade: temperatura, pluviosidade e umidade relativa do ar. Como as previsões climáticas indicam diminuição da pluviosidade, o ‘balanço’ que ocorre atualmente para ocorrência do DFE irá se quebrar e teremos por consequência uma diminuição na probabilidade de ocorrência dessa doença. Uma explicação para isso é que, com a diminuição da pluviosidade teremos uma umidade relativa do ar mais baixa. Isso pode levar a uma maior facilidade de respiração da

planta mesmo em temperaturas altas, pois não há acúmulo de água na atmosfera que dificultaria a transpiração.

É importante destacar que essas projeções são baseadas em modelos climáticos e estão sujeitas a incertezas (COLLINS et al., 2014). Além disso, é possível que o nosso modelo logístico, apesar de possuir grande acurácia preditiva com os dados bioclimáticos atuais, pode ser inadequado para realizar extrapolações com as condições climáticas futuras. Porém, se confirmada a tendência de aproximação de condições menos favoráveis ao desenvolvimento do DFE ao longo do tempo, isso indicaria um impacto positivo das mudanças climáticas projetadas na redução da probabilidade desse distúrbio. Novos estudos são necessários para elucidar intrinsecamente como as regiões específicas apresentadas no modelo conseguem explicar essa diminuição da incidência frente ao cenário de projeção apresentado.

7. CONCLUSÃO

O presente estudo abordou a predição da probabilidade de incidência do Distúrbio Fisiológico do Eucalipto (DFE) em todo o Brasil através de um modelo de regressão logística utilizando dados de presença (1) e ausência (0), evidenciando resultados altamente promissores. A capacidade do modelo em discriminar entre casos positivos e negativos de DFE, expressa pela Área sob a Curva ROC (AUC) de 0.99, destaca sua capacidade de identificação precisa de áreas possivelmente afetadas pela doença. A consistência nas previsões, com acurácia média de 0.996, sensibilidade de 0.997 e especificidade de 0.998, reforça sua habilidade em identificar regiões com e sem histórico do DFE.

As variáveis climáticas selecionadas como variáveis preditoras no modelo reduzido (GEO01, BIO01, BIO06, BIO10, BIO19) foram identificadas como elementos cruciais na fisiologia das espécies vegetais, especialmente nos eucaliptos. Estudos anteriores destacaram associações dessas variáveis com distúrbios fisiológicos em árvores, incluindo o DFE. A influência da altitude (GEO01) sobre temperatura e umidade, além da correlação entre diferentes temperaturas (BIO01, BIO06, BIO10) e precipitação (BIO19) com a suscetibilidade das plantas a distúrbios, evidenciam a importância desses fatores na ocorrência do DFE.

Ao projetar cenários climáticos (com CNRM-CM6-1 e SSP58.5 do WorldClim), observamos mudanças significativas na probabilidade de incidência do DFE, provavelmente resultantes de alterações na temperatura e precipitação. Essas mudanças têm implicações diretas

nas condições de crescimento das espécies de eucalipto. As projeções indicam uma possível redução na incidência do DFE, à medida que as condições climáticas se aproximam de um ambiente menos propenso ao desenvolvimento desse distúrbio.

Entretanto, é importante destacar que essas projeções são baseadas em modelos climáticos e estão sujeitas a incertezas. A tendência de diminuição da probabilidade de ocorrência do DFE frente aos cenários de projeção apresentados sugere um impacto positivo das mudanças climáticas. No entanto, novos estudos são necessários para validar e aprofundar essa compreensão, especialmente em relação às regiões específicas e como elas se relacionam com a diminuição da incidência do DFE.

Este estudo contribui para a compreensão da relação entre variáveis climáticas, o DFE e as projeções futuras, oferecendo percepções para estratégias de manejo florestal sustentável e ressaltando a importância de considerar os impactos das mudanças climáticas na saúde das plantações de eucalipto.

O estudo não apenas prediz a ocorrência do distúrbio em novas áreas, beneficiando a empresa na aquisição de terras e na recomendação de cultivares, mas também visa compreender os fatores geoclimáticos associados ao distúrbio fisiológico do eucalipto. Esse conhecimento não só impacta a empresa, mas também a indústria e a comunidade científica, contribuindo com literatura existente sobre o tema. A modelagem da incidência da doença permite uma escolha mais precisa de clones nas áreas da empresa, reduzindo os riscos de impactos negativos na produtividade das plantações de eucalipto. A seleção criteriosa de áreas que precisa da recomendação de clones resistentes minimiza os riscos de perdas.

A modelagem da incidência da doença permite uma escolha mais precisa de clones nas áreas da empresa, reduzindo os riscos de impactos negativos na produtividade das plantações de eucalipto. Essa estratégia eficiente não só aumenta os lucros da empresa, mas também contribui para seu crescimento, criação de empregos e um impacto positivo na sociedade, ao viabilizar contratações.

INDICADORES DE IMPACTO

Além da predição da ocorrência da doença em locais sem plantio atual, que é de muito valor para a empresa no sentido de aquisição de novas áreas, também se espera compreender melhor os fatores geoclimáticos associados à doença. O conhecimento destas variáveis climáticas que desencadeiam o DFE é fundamental para identificar as respostas fisiológicas da planta que levam ao distúrbio. Isso, por sua vez, pode ser um primeiro passo para a identificação de biomarcadores para identificação precoce da suscetibilidade/resistência dos clones e para o desenvolvimento de biotecnologias que aumentem a resistência das árvores. Este conhecimento tem grande importância não apenas para a empresa, mas também para a indústria florestal e a comunidade científica. O valor agregado de conhecimento também fará composição com as produções científicas já geradas em relação ao distúrbio fisiológico do eucalipto. Assim, buscase adicionar uma nova camada à essa literatura. Tal tecnologia será um novo passo no entendimento desse fenômeno e será de grande impacto para zoneamento e ganho de poder de decisão para plantio. Estudos futuros envolvendo o distúrbio fisiológico poderão utilizar-se do conhecimento gerado nesse trabalho, e trarão novas contribuições para melhor entendimento da doença.

A modelagem da incidência de doenças permite uma seleção mais precisa de clones resistentes e suscetíveis nas áreas da empresa, garantindo maior eficiência na alocação dos genótipos. Esta racionalização reduz significativamente os riscos de incidência de doenças prejudiciais à produtividade de madeira de eucalipto, resultando em maiores lucros para a empresa. Essa é uma questão fundamental para o sucesso da atividade. A implementação de uma estratégia de seleção de novas áreas com maior acurácia e segurança permite uma alocação mais eficiente dos recursos da empresa, contribuindo para o seu crescimento e a geração de empregos. Isso resulta em um impacto positivo na sociedade, uma vez que a empresa é capaz de contratar mais pessoas. Além disso, a seleção de áreas com alto potencial de produção de clones resistentes e suscetíveis à incidência de doenças na cultura de eucalipto, garante maiores ganhos para a empresa, na medida em que minimiza os riscos de perda de produção.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, C. D. et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 4, p. 660-684, 2010.
- ALMEIDA, M. N. F. et al. Wood properties as potential biomarkers of physiological disorder tolerance: comparison of divergent eucalyptus genotypes. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 50, 2022.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- ALVARES, C.A, MAFIA,R. Mudança no uso da Terra e Crescimento da Sivicultura no Brasil. Em: **ANAIS DO XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2023**, Florianópolis. Anais eletrônicos... São José dos Campos, INPE, 2023. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/mudanca-no-uso-da-terra-e-crescimento-da-silvicultura-no-brasil?lang=pt-br>> Acesso em: 22 Fev. 2024.
- APARECIDO, L. E. DE O. et al. Agroclimatic zoning for urucum crops in the state of Minas Gerais, Brazil. **Bragantia**, v. 77, n. 1, p. 193–200, 1 jan. 2018.
- BOLAND, D. J.; BROOKER, M. I. H.; CHIPPENDALE, G. M.; HALL, N.; HYLAND, B. P. M.; JOHNSTON, R. D.; TURNER, J. D. (Ed.). **Forest trees of Australia. 5º ed., CSIRO publishing, Collingswood**, 2006.
- CARVALHO, B. M.; RANGEL, E. F.; VALE, M. M. Evaluation of the impacts of climate change on disease vectors through ecological niche modelling. **Bulletin of Entomological Research**, v. 107, n. 4, p. 419–430, 15 ago. 2017.
- CHUMANOVÁ, E. et al. Predicting ash dieback severity and environmental suitability for the disease in forest stands. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 34, n. 4, p. 254–266, 19 maio 2019.
- COLLINS, M. et al. Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In: **Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, 2014.
- CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético - Vol 2 - 3ª Edição**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2003.
- DE SÁ JÚNIOR, A. et al. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 108, n. 1–2, p. 1–7, 27 abr. 2012.

DOS REIS, A. A. et al. Spatial prediction of basal area and volume in Eucalyptus stands using Landsat TM data: an assessment of prediction methods. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 48, n. 1, p. 1, 16 dez. 2018.

DUDNEY, J. et al. Navigating Novelty and Risk in Resilience Management. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 33, n. 11, p. 863–873, nov. 2018.

ESTEVES, Márcia Helena Santos. Marcadores moleculares para distúrbio fisiológico em eucalipto. 2023. 141 f. **Dissertação (Mestrado em Bioquímica Aplicada)** - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2023.

EYRING, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 26 maio 2016.

FALASCA, S. L.; ULBERICH, A. C.; ULBERICH, E. Developing an agro-climatic zoning model to determine potential production areas for castor bean (*Ricinus communis* L.). **Industrial Crops and Products**, v. 40, p. 185–191, nov. 2012.

FLORES, Thiago Bevilacqua et al. **Eucalyptus no Brasil: zoneamento climático e guia para identificação**. . Piracicaba: IPEF. . Acesso em: 10 dez. 2023.

GEERTS, S. et al. Agro-climatic suitability mapping for crop production in the Bolivian Altiplano: A case study for quinoa. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 139, n. 3–4, p. 399–412, out. 2006.

GODEFROID, M. et al. Xylella fastidiosa: climate suitability of European continent. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 8844, 20 jun. 2019.

HEARST, M. A. et al. Support vector machines. **IEEE Intelligent Systems and their Applications**, v. 13, n. 4, p. 18–28, jul. 1998.

HIJMANS, R. J.; GHOSH, A.; MANDEL, A. **geodata: Download Geographic Data**. CRAN: The Comprehensive R Archive Network, , 2022.

JONES, P. D. et al. **Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017.

KÜHN, I. et al. Diversity and distribution of vascular plant species in a global biodiversity hotspot. **Biodiversity and Conservation**, v. 27, n. 9, 2018.

KUNSTLER, G., FALSTER, D., COOMES, D. A., HUI, F., KOOYMAN, R. M., LAUGHLIN, D. C., ... WESTOBY, M. Plant functional traits have globally consistent effects on competition. **Nature**, **529(7585)**, 204–207, .2015.

Ludwig, E., Polydore, S., Berry, J., Sumner, J., Ficor, T., Agnew, E., Haine, K., Greenham, K., Fahlgren, N., Mocker, T. C., & Gehan, M. A Natural variation in *Brachypodium distachyon* responses to combined abiotic stresses. **The Plant Journal**, **16387**, 2023.

MAFIA, R. G.; ABAD, J. I. M.; FERREIRA, M. A. **Desafios e perspectivas para o controle de doenças do eucalipto**. In: NÚCLEO DE ESTUDOS EM FITOPATOLOGIA – NEFIT. Patologia Florestal: desafios e perspectivas. São Carlos-SP: Suprema. p. 119-136. 2013.

MEINSHAUSEN, M. et al. **The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500**. *Geoscientific Model Development*, v. 13, n. 8, p. 3571–3605, 13 ago. 2020.

MILLAR, C. I.; STEPHENSON, N. L.; STEPHENS, S. L. CLIMATE CHANGE AND FORESTS OF THE FUTURE: MANAGING IN THE FACE OF UNCERTAINTY. **Ecological Applications**, v. 17, n. 8, p. 2145–2151, dez. 2007.

NAGEL, L. M. et al. Adaptive Silviculture for Climate Change: A National Experiment in Manager-Scientist Partnerships to Apply an Adaptation Framework. **Journal of Forestry**, v. 115, n. 3, p. 167–178, 19 maio 2017.

PANDEY, P.; RAMEGOWDA, V.; SENTHIL-KUMAR, M. Shared and unique responses of plants to multiple individual stresses and stress combinations: physiological and molecular mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, 16 set. 2015.

PEARCE, J.; FERRIER, S. Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression. **Ecological Modelling**, v. 133, n. 3, p. 225–245, 3 set. 2000.

PENA, D. S. et al. Agroclimatic zoning for jatropa crop (<i>Jatropha curcas</i> L.) in the State of Goiás. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 38, n. 3, p. 329, 24 jun. 2016.

QUINLAN, J. R. Induction of decision trees. **Machine Learning**, v. 1, n. 1, p. 81–106, mar. 1986.

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores **Relatório Anual, 2022**.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. **Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2022.

RITTER, M. Field Affected by Physiological Disorders. **Forests**, v. 13, n. 4, 1 abr. 2022.

RODRIGUES, B. P. **Qualidade do lenho de árvores de clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* sob estresse abiótico e o impacto na produção de celulose**. 2013.

90p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Mosteiro/ES, 2013.

RODRIGUES, Any Carolyn Pinto. Perfil de expressão gênica em guide to the cultivated Eucalyptus (Myrtaceae) and how to identify them. **Annals of the Missouri Botanical Garden**. California, USA, 99: 642–687, 2014.

ROCHA, H. R. et al. Impact of precipitation changes on the productivity of eucalyptus plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 463, 2020.

RODRIGUES, B. P. et al. Chemical and Kraft Pulping Properties of Young Eucalypt Trees

híbridos de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla afetados pelo distúrbio fisiológico do eucalipto (DFE). 2020. 143 p. **Tese (Doutorado em Ciência Florestal)** – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2020.

SCHNEIDER, L. M. et al. Zoneamento agroclimático de noqueira-macadâmia para o Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 2, p. 515–524, jun. 2012.

SMITH, S. J. et al. **Effects of temperature variation on plant physiology**. Plant Physiology, v. 181, n. 2, 2019.

SILLERO, N. What does ecological modelling model? A proposed classification of ecological niche models based on their underlying methods. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 8, p. 1343–1346, abr. 2011.

SILVA, S.R. ; BAZANI, J.H. ; VRECHI, A. ; GENTIL, M.S. ; ZAMPROGNO-FERREIRA, K. C. ; ROSSE, L.N. . Palestra no 'VI Workshop de Melhoramento e XVI Reunião Técnica Científica do Programa Temático de Silvicultura e Manejo - PTSM' (Botucatu - SP): **Distúrbios fisiológicos ocasionados pelo estresse hídrico em clones de eucalipto na Veracel: estudo de caso e hipóteses**. 2010

SPARKS, A. nasapower: A NASA POWER Global Meteorology, Surface Solar Energy and Climatology Data Client for R. **Journal of Open Source Software**, v. 3, n. 30, p. 1035, 19 out. 2018.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5 ed. Porto Alegre: Artmed, 918p., 2013.

TESHOME, D. T.; ZHARARE, G. E.; NAIDOO, S. The Threat of the Combined Effect of Biotic and Abiotic Stress Factors in Forestry Under a Changing Climate. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 30 nov. 2020.

VALVERDE, S. R.; MAFRA, J. W. A.; MIRANDA, M. A.; SOUZA, C. S.; VASCONCELOS, D. C. **Silvicultura brasileira – Oportunidades e desafios da economia verde**. Coleção de estudos sobre diretrizes para uma economia verde no Brasil. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável. FBDS. São Paulo. v. 1. 2015.

VOLDOIRE, A. et al. Evaluation of CMIP6 DECK Experiments With CNRM-CM6-1. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, n. 7, p. 2177–2213, 1 jul. 2019.

WANG, A., MELTON, A. E., SOLTIS, D. E., & SOLTIS, P. S. Potential distributional shifts in North America of allelopathic invasive plant species under climate change models. **Plant Diversity**, 44(1), 11–19. 2022.

WREGGE, M. S. et al. DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL DE OLIVEIRAS NO BRASIL E NO MUNDO. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 37, n. 3, p. 656–666, set. 2015.

WILLIAMS, A. P. et al. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 4, p. 292-297, 2013.