

Santo Antônio de Goiás, GO / Junho, 2024



Predição do florescimento do arroz (*Oryza sativa* L.) irrigado nas macrorregiões brasileiras

Alexandre Bryan Heinemann⁽¹⁾ Gutemberg Resende Honorio Filho⁽²⁾, Ludmilla Ferreira Justino⁽²⁾, David Henriques da Matta⁽³⁾ e Luís Fernando Stone⁽¹⁾

⁽¹⁾ Pesquisador, Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO. ⁽²⁾ Estudante de pós-graduação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO. ⁽³⁾ Professor, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.

Resumo – Conhecer as variáveis climáticas que afetam o florescimento do arroz (*Oryza sativa* L.) é importante para o planejamento da rizicultura. Este estudo visa compreender a influência das variáveis climáticas e geográficas no florescimento do arroz irrigado no Brasil. Dados agrônômicos provenientes do Programa de Melhoramento do Arroz foram relacionados às variáveis climáticas temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar global, precipitação pluvial e graus-dia, além da latitude, longitude e altitude. Na análise, aplicaram-se modelos de regressão linear múltipla (LM) e aditivo generalizado (GAM), utilizando-se validação cruzada para determinar o mais adequado. Para a região Sul, o modelo LM apresentou melhor performance, enquanto para as demais o modelo GAM foi mais adequado e a macrorregião Norte deve ser segmentada em novas análises. Tanto na fase vegetativa, quanto na reprodutiva, a elevação das temperaturas mínima e máxima do ar tende a antecipar o florescimento e das temperaturas acumuladas mínima e máxima tende a retardar o florescimento. Deve-se evitar cultivos em períodos de calor intenso na macrorregião Nordeste. Para o Sudeste, a recomendação se aplica ao estágio reprodutivo, devendo-se evitar também períodos de frio intenso na fase vegetativa. Para as demais macrorregiões recomenda-se evitar períodos de baixas temperaturas do ar.

Termos para indexação: fenologia, modelo preditivo, clima.

Flowering prediction for irrigated rice (*Oryza sativa* L.) in Brazilian macroregions

Abstract – Knowing the climatic variables that affect rice (*Oryza sativa* L.) flowering is important for planning rice farming. The objective of this study was to understand the influence of climatic and geographic variables on the flowering of irrigated rice in Brazil. Agronomic data from the Embrapa irrigated rice breeding program were related to climatic variables air temperature, relative humidity, global solar radiation, rainfall, and degree days, as well as latitude, longitude and altitude. In the analysis, multiple linear regression (ML) and generalized additive model (GAM) models were applied and cross-validation was used to determine the most appropriate. For the Southern region, the LM model presented the best performance, while for the others, the GAM model was more suitable and the northern macroregion should be

Embrapa Arroz e Feijão

Rod. GO 462, Km 12, Zona Rural
Caixa Postal 179
75375-000 Santo Antônio de
Goiás, GO
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac/

Comitê Local de Publicações

Presidente
Isaac Leandro de Almeida

Membros

Ana Lúcia Delalibera de Faria,
Luís Fernando Stone, Newton
Cavalcanti de Noronha Júnior,
Tereza Cristina de Oliveira Borba

Edição executiva e revisão de texto
Tereza Cristina de Oliveira Borba

Normalização bibliográfica
Ana Lúcia Delalibera de Faria
(CRB-1/324)

Projeto gráfico
Leandro Sousa Fazio

Diagramação
Fabiano Severino

Publicação digital: PDF

Todos os direitos
reservados à Embrapa.

segmented in further analyses. In both the vegetative and reproductive phases, the increase in minimum and maximum temperatures tends to anticipate flowering and the elevation of the accumulated minimum and maximum temperatures tends to delay flowering. Crops should be avoided during periods of intense heat in the Northeast macroregion. For the Southeast, this recommendation applies to the reproductive stage, also avoiding periods of intense cold in the vegetative stage. For the other macroregions, it is recommended to avoid periods of low temperatures.

Index terms: phenology, predictive model, climate.

Introdução

O arroz (*Oryza sativa* L.) destaca-se por ser a terceira cultura mais produzida no planeta (0,8 bilhão de toneladas), componente da dieta básica diária de cerca de 3 bilhões de pessoas (Bresghele et al., 2016; FAO, 2020), sendo uma planta de dias curtos, cujo florescimento é influenciado pelo fotoperíodo. Florescer estimulado pelo ambiente favorece a perpetuação do vegetal ao garantir que a semente encontre ambiente favorável à germinação e desenvolvimento. Por outro lado, isso torna a cultura vulnerável às mudanças climáticas que, além de fatores ambientais desafiadores e fontes de estresses, alteram as variáveis que determinam a época de florescimento, como a temperatura do ar. O estágio de florescimento é importante para a produção de grãos e determinante para a adaptação regional e sazonal das culturas, permitindo que as plantas se adaptem às condições de crescimento em diferentes ambientes (Srikanth; Schmid, 2011; Tsuji et al., 2011; Taiz; Zeiger, 2017; Ye et al., 2019).

Há séculos as interferências das variáveis climáticas sobre os vegetais são objetos de estudos (Réaumur, 1735; Wang et al., 2019). As alterações nessas variáveis causam, desde modificações nas características físicas, como a fluidez da camada lipídica das biomembranas, a bioquímicas, como a taxa fotossintética, afetando o ciclo da cultura. O arroz é uma cultura muito sensível às variações climáticas, e o estágio de floração é crítico para a produção do arroz (Yang et al., 2019). Conhecer a fenologia e as exigências térmicas, hídricas, de radiação solar global e de umidade relativa do ar, é importante para o planejamento da rizicultura (Alves et al., 2000; Larcher, 2006).

As mudanças climáticas podem promover alterações na temperatura média global do ar, a qual

poderá subir de 1,8 °C a 5,8 °C nos próximos 80 anos e ser superior, conforme o nível da emissão de gases de efeito estufa (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001). Tais alterações podem influenciar sensivelmente o crescimento das plantas (Larcher, 2006), impactando drasticamente a cultura do arroz, gerando graves danos à segurança alimentar mundial.

Assim, este estudo visa à compreensão dos impactos das variáveis climáticas e geográficas no florescimento do arroz irrigado nas regiões Centro-Oeste, Nordeste, Norte, Sudeste e Sul do Brasil. Esta publicação contribui com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 02 - “Fome Zero e Agricultura Sustentável”.

Material e métodos

Região de estudo

A região de estudo compreendeu o intervalo entre as latitudes 33,15° Sul, e 2,35° Norte, e entre as longitudes 60,65° e 36,35° Oeste. Os experimentos utilizados abrangeram 43 municípios pertencentes aos estados de Alagoas, Amapá, Ceará, Espírito Santo, Goiás, Maranhão, Mato Grosso do Sul, Paraná, Paraíba, Piauí, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Roraima, São Paulo, Sergipe e Tocantins. A distribuição espacial dos experimentos pode ser visualizada na Figura 1, sendo que a densidade dos pontos representa a quantidade de experimentos realizados, na escala 1: 250.000, usando o Sistema de Referência Geodésica para as Américas 2000 (Sirgas 2000), CRS (4674), no pacote R geobr (Peireira; Goncalves, 2021).

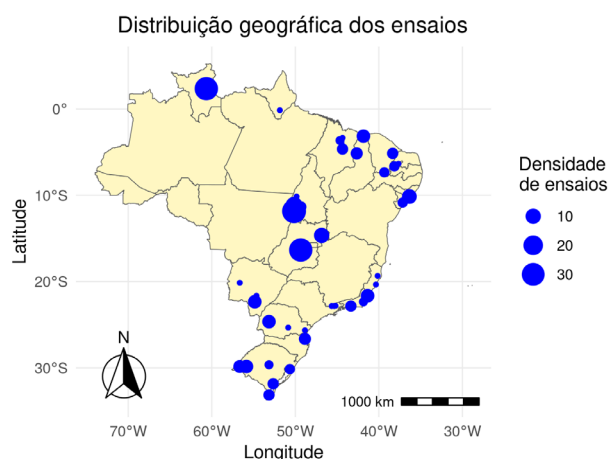


Figura 1. Distribuição espacial e densidade de ensaios realizados com arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) entre 1995 e 2018.

Dados

A base de dados do estudo é derivada do conjunto de dados do Programa de Melhoramento de Arroz da Embrapa (Bresseghele et al., 2021), composta por dados agronômicos (data de semeadura, florescimento e maturação fisiológica) obtidos em ensaios de valor de cultivo e uso (VCU), contemplando 530 genótipos e 238 experimentos, realizados no período de 1995 a 2018.

As variáveis climáticas relacionadas à temperatura do ar, precipitação pluvial e radiação solar global foram obtidas de estações climáticas pertencentes às instituições Embrapa Arroz e Feijão, Embrapa Clima Temperado, Embrapa Meio Norte, Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Nasa Power, Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás (SIMEHO) e da Base de Dados Climáticos Interpolados, desenvolvida por Xavier et al. (2016). As variáveis climáticas foram conectadas aos dados agronômicos por meio de um script desenvolvido na linguagem R (R Core Team, 2021) representando as fases e ciclo da cultura nos ensaios de campo. Nesse processo, graus-dia foram calculados conforme a metodologia utilizada pelo modelo de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade do arroz (ORYZA2000)

(Bouman et al., 2001), descrita em detalhes por Honorio Filho (2022).

Genótipos

Foram considerados somente os genótipos presentes em, no mínimo, quatro ensaios de VCU, garantindo maior variância entre os valores observados. Os dados foram analisados utilizando-se as médias das datas de florescimento por ensaios e por genótipos de VCU, totalizando 91 genótipos (Honório Filho, 2022).

Variáveis

Foram avaliadas como preditoras as variáveis climáticas e geográficas, além do genótipo, sendo o último a única variável qualitativa incluída para seleção dos modelos. As variáveis geográficas analisadas no estudo foram a latitude, longitude e a altitude.

Foram avaliadas 32 variáveis independentes, sendo 28 climáticas, três geográficas e uma genotípica, visando a predição da data de florescimento médio (FLO_M), em dias após a emergência (DAE). As variáveis climáticas envolvidas, assim como os acrônimos, estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Acrônimos das variáveis climáticas analisadas.

Variável	Acrônimo	Covariante ambiental	Fase
Temperatura do ar (°C)	Tmáx_Máx	Máximo valor da máxima temperatura	Todo o ciclo
	Tmáx_Mín	Mínimo valor da máxima temperatura	Todo o ciclo
	Tmáx_M	Valor médio da máxima temperatura	Todo o ciclo
	Tmáx_V	Valor máximo da temperatura	Vegetativo (V)
	Tmáx_R		Reprodutivo (R)
	Tmáx_ACC_V	Valor acumulado da máxima temperatura	Vegetativo (V)
	Tmáx_ACC_R		Reprodutivo (R)
	Tmáx_FLO	Valor máximo da temperatura	Florescimento (FLO)
	Tmín_Máx	Máximo valor da mínima temperatura	Todo o ciclo
	Tmín_Mín	Mínimo valor da mínima temperatura	Todo o ciclo
	Tmín_M	Valor médio da mínima temperatura	Todo o ciclo
	Tmín_V	Valor mínimo da temperatura	Vegetativo (V)
	Tmín_R		Reprodutivo (R)
	Tmín_ACC_V	Valor acumulado da mínima temperatura	Vegetativo (V)
	Tmín_ACC_R		Reprodutivo (R)
	Tmín_FLO	Valor mínimo da temperatura	Florescimento (FLO)

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Variável	Acrônimo	Covariante ambiental	Fase
Precipitação pluvial (mm)	<i>Rainfall_ACC</i>	Valor acumulado de precipitação	Todo o ciclo
	<i>Rainfall_ACC_V</i>		Vegetativo (V)
	<i>Rainfall_ACC_R</i>		Reprodutivo (R)
Radiação solar global (MJ m ⁻²)	<i>Rad_ACC</i>	Valor acumulado de radiação	Todo o ciclo
	<i>Rad_ACC_V</i>		Vegetativo (V)
	<i>Rad_ACC_R</i>		Reprodutivo (R)
Umidade relativa do ar (%)	<i>HU_M</i>	Valor médio da umidade	Todo o ciclo
	<i>HU_V</i>		Vegetativo (V)
	<i>HU_R</i>		Reprodutivo (R)
	<i>HU_FLO</i>		Florescimento médio (FLO)
Graus-dia (°C)	<i>Degree_days_FLO</i>	Valor acumulado	Florescimento médio (FLO)
	<i>Degree_days_cycle</i>		Todo o ciclo

Análise exploratória

Para resumir as características principais do banco de dados, foram empregadas técnicas gráficas e quantitativas para a análise exploratória. As tendências dos dados foram analisadas graficamente, por meio de histogramas e diagramas de caixa, observando-se a distribuição tanto em nível nacional quanto regionalizado em macrorregiões. Por meio da análise exploratória, notou-se a presença de dados discrepantes e possíveis erros de escala e digitação.

As correlações entre as variáveis foram verificadas pelo método Spearman. Para a pré-visualização e melhor entendimento das relações entre as variáveis independentes e a variável dependente, utilizou-se o escore de poder preditivo (PPS). A técnica consiste de um índice normalizado que varia de 0 (sem poder preditivo) a 1 (poder preditivo perfeito), indicando até que ponto uma variável X pode prever Y. O PPS é calculado implementando-se uma árvore de decisão com validação cruzada como algoritmo de *machine learning* (Wetschoreck, 2020).

Modelo estatístico

Foram utilizadas duas classes de modelo, o Linear Múltiplo (LM) e o Aditivo Generalizado (GAM). A ideia central do LM é estimar uma relação linear que melhor descreva a relação entre variáveis, assumindo assim, existir uma expectativa condicional da variável resposta ser uma função linear da variável preditora (Gujarati; Porter, 2011; Hoffmann, 2016). O GAM, introduzido em 1986 por Hastie e Tibshirani (1990), é uma extensão não paramétrica

do Modelo Linear Generalizado (GLM) que, por sua vez, é uma evolução científica do LM (Padua, 2013). A estrutura dos modelos LM e GAM é detalhada por Honorio Filho (2022).

A seleção das variáveis quantitativas nos modelos LM foi realizada por meio da exclusão, uma a uma, conforme a significância parcial, até que restassem somente as significativas. Para esse modelo, como forma de garantir que a exclusão ou a junção das variáveis fosse uma escolha adequada, utilizou-se o teste $c\beta$. Para o GAM, a pré-seleção das variáveis quantitativas foi realizada com a técnica *stepwise bootstrap* (Effroymsen, 1960; Hastie; Tibshirani, 1990) utilizando-se o pacote *gam* (Hastie, 2020) em linguagem R, assumindo como parâmetros a família gaussiana, link identidade, funções suaves *splines* de regressão de placa fina e quatro graus de suavização (graus de liberdade). Os modelos foram gerados com o pacote *mgcv* (Wood, 2021). Após os parâmetros ajustados, em ambos os modelos, a seleção exercida sobre a variável qualitativa genótipo foi realizada, agrupando-os conforme indícios de similaridade de comportamento.

Após o ajuste dos modelos, realizou-se a fase de diagnóstico, verificando se as suposições para o dado modelo foram atendidas e se existem observações que promovem interferências desproporcionais nos resultados dos ajustes (Padua, 2013). Para os casos anormais dos resíduos foi aplicada a transformação de dados sobre a variável resposta (Gujarati; Porter, 2011; Padua, 2013). Para os LM, os chamados pontos de alavancagem, caracterizados como observações influentes que fornecem peso desproporcional no próprio valor ajustado,

exercendo forte influência nas estimativas dos coeficientes de regressão, foram identificados pelas técnicas gráficas: distância de Cook e matriz de projeção H (Padua, 2013).

A qualidade dos modelos gerados foi mensurada pelo coeficiente de determinação R^2 ajustado, para os LM, e da deviança explicada para os GAM. Através desses parâmetros pode-se medir o quão bem ajustada (adequada) aos dados é uma linha de regressão amostral. Para verificar a qualidade do modelo também foi avaliada a concordância dos sinais dos coeficientes com a teoria para o problema em questão (Gujarati; Porter, 2011; Chein, 2019).

Em média, foram gerados aproximadamente dez modelos por macrorregião. O critério de informação Bayesiano (BIC) e o critério de informação de Akaike (AIC) foram usados para comparação entre tipos e dentro dos tipos de modelos, considerando-se o nível de significância 0,05.

As variáveis independentes discriminadas pelos LM foram ranqueadas conforme a capacidade explicativa para previsão do florescimento de arroz irrigado para cada uma das macrorregiões. O ranqueamento foi realizado de acordo com a análise de variância, em que o valor da soma dos quadrados das diferenças da média expressa a variação total que pode ser atribuída às variáveis. Devido à complexidade estrutural, o modelo GAM não permite ranquear a capacidade explicativa das variáveis independentes.

Validação cruzada

Para comparar a capacidade preditiva dos modelos LM e GAM foi utilizado o princípio de aprendizado de máquina, com validação cruzada, tendo como alvo o menor erro médio absoluto. Para cada validação cruzada, 70% das observações foram selecionadas aleatoriamente para estimação dos parâmetros do modelo (treinamento) e 30% para validação dos modelos (testes). Esse processo foi repetido 100 vezes, e os resultados das diferenças entre os preditos e os observados foram plotados em gráfico *boxplot*.

Predição

Após parametrizados, os melhores modelos selecionados foram utilizados para predição da data de florescimento, utilizando-se a linguagem R (R Core Team, 2021). Os cenários de avaliação foram fundamentados no valor médio das covariáveis numéricas componentes do modelo, considerando-se também somente os genótipos agrupados por similaridade. Na mesma perspectiva, avaliou-se a data de florescimento em diversos cenários que utilizaram o desempenho médio.

Resultados e discussão

Análise descritiva

A análise conjunta de todas as macrorregiões demonstrou que as variáveis geográficas estiveram entre os principais preditores do florescimento. Ao regionalizar a análise exploratória (PPS), as variáveis geográficas perdem força como predictoras do florescimento, assumindo conjuntos distintos de variáveis climáticas.

Conforme a análise exploratória, o florescimento ocorre, em média, aos 89,22 ($\pm 12,58$) dias após a emergência (DAE). Na região Sudeste, o florescimento é tardio, média de 103,20 ($\pm 14,69$) DAE. No Norte, a média é de 83,91 ($\pm 11,17$) DAE, e no Centro-Oeste e no Sul a média é de 90,64 ($\pm 9,85$) e 89,26 ($\pm 11,28$) DAE, respectivamente. Os dois picos de florescimento observados para a região Nordeste são reflexos da existência de duas épocas de semeadura, comumente adotadas na região, cuja média é de 90,76 ($\pm 11,67$) DAE (Figura 2A).

O valor mediano do coeficiente de variação do florescimento por experimento é abaixo de 15%, caracterizando a baixa dispersão e maior homogeneidade dos dados, demonstrando também ser adequada a utilização do valor médio do florescimento na análise (Figura 2B).

Nas Figuras 2A e 2B, observa-se uma interação entre macrorregião e data de floração, reforçando a necessidade de análises individuais, por macrorregião, e evidenciando a variabilidade edafoclimática entre as regiões de produção. A Figura 3, que ilustra os graus-dia acumulados por macrorregião, também evidencia tal interação, sendo que a região Sul apresentou a menor necessidade. Entretanto, as macrorregiões Sudeste e Nordeste apresentaram a maior necessidade de graus-dia. Conforme esperado, há semelhança na distribuição de graus-dia (Figura 3) e da temperatura média (Figura 4B).

A temperatura média do ar, gerada a partir da média entre a temperatura mínima média ($T_{mín_M}$) e a temperatura máxima média ($T_{máx_M}$), possui alta correlação com a $T_{mín_M}$ e $T_{máx_M}$ e não foi utilizada na elaboração dos modelos. Todavia, permite exemplificar bem as diferenças climáticas entre as macrorregiões. A região Sul possui médias térmicas menores ($23,39\text{ }^\circ\text{C} \pm 1,41\text{ }^\circ\text{C}$), enquanto no oposto geográfico, Norte e Nordeste apresentam as maiores médias térmicas ($28,01\text{ }^\circ\text{C} \pm 1,19\text{ }^\circ\text{C}$ e $27,68\text{ }^\circ\text{C} \pm 2,06\text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente). Em terceiro lugar encontra-se a região Sudeste ($26,55\text{ }^\circ\text{C} \pm 1,32\text{ }^\circ\text{C}$), seguida pela Centro-Oeste ($25,37\text{ }^\circ\text{C} \pm 1,19\text{ }^\circ\text{C}$).

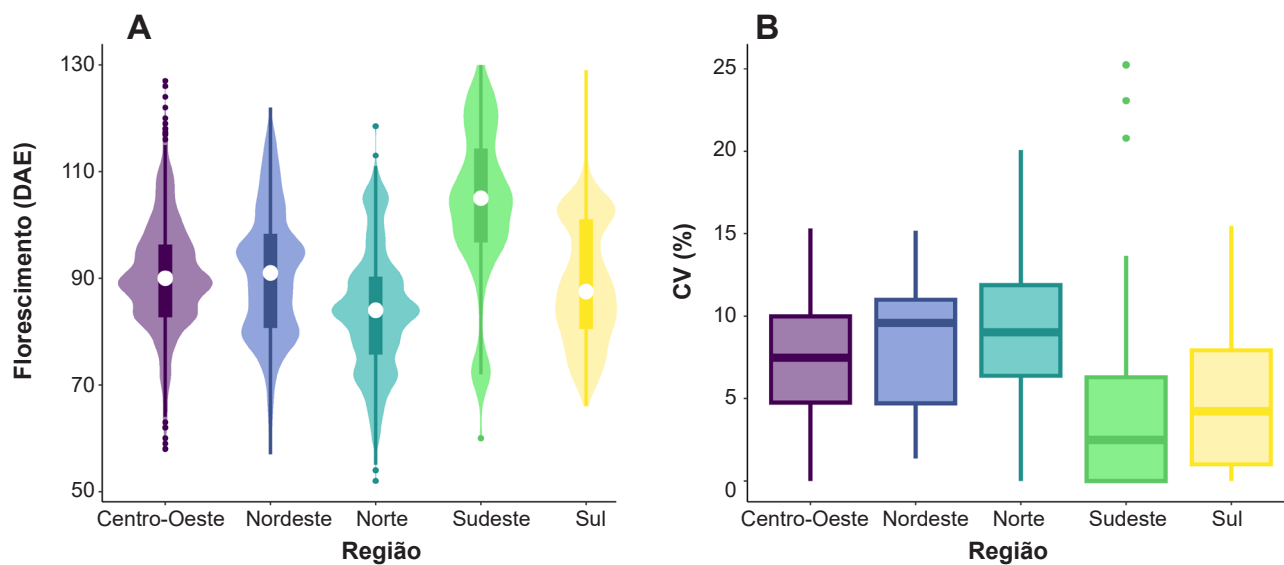


Figura 2. Florescimento observado, em dias após a emergência (DAE) (A), e coeficiente de variação (CV) do florescimento dos ensaios (B) para o arroz irrigado (*Oryza sativa* L.), por macrorregião.

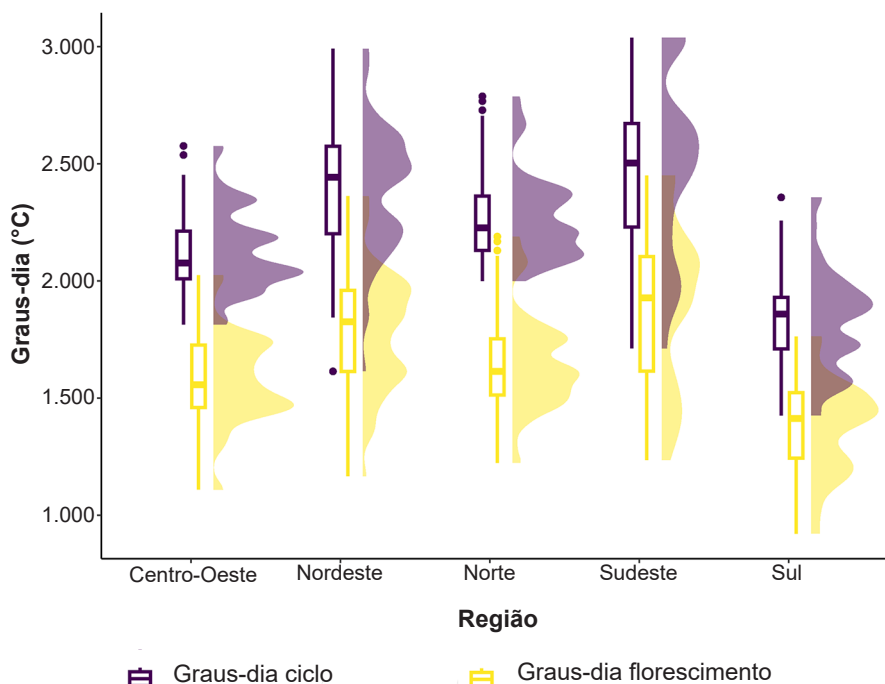


Figura 3. Graus-dia para o florescimento e para a maturação fisiológica do arroz irrigado (*Oryza sativa* L.), por macrorregião.

Apesar da amplitude da temperatura ótima para o florescimento do arroz, na literatura são comumente aceitos valores próximos a 27 °C, e abaixo de 16 °C e superiores a 35 °C são considerados críticos para essa fase (Sánchez et al., 2014). Ocasionalmente, todas as regiões do País alcançam temperaturas do ar superiores a 35 °C, com a mediana da $T_{máx_Máx}$ em todas as regiões ultrapassando esse valor.

A região Sudeste apresentou os maiores picos de $T_{máx_Máx}$, além da maior frequência em altas temperaturas do ar. O estresse térmico por

calor pode provocar atraso na floração, visto que acima de aproximadamente 35 °C a planta paralisa seu desenvolvimento, alongando o estágio vegetativo (Figura 4A) (Sánchez et al., 2014).

Para a $T_{mín_Mín}$, ultrapassar o limite inferior é um evento raro nas regiões Norte e Nordeste, mas ocorre com maior frequência nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e, especialmente, Sul. Para o Sul, $T_{mín_Mín}$ superiores a 15 °C são considerados eventos raros, fazendo que o florescimento tenda a ser mais tardio, devido ao estresse térmico por frio (Figura 4C).

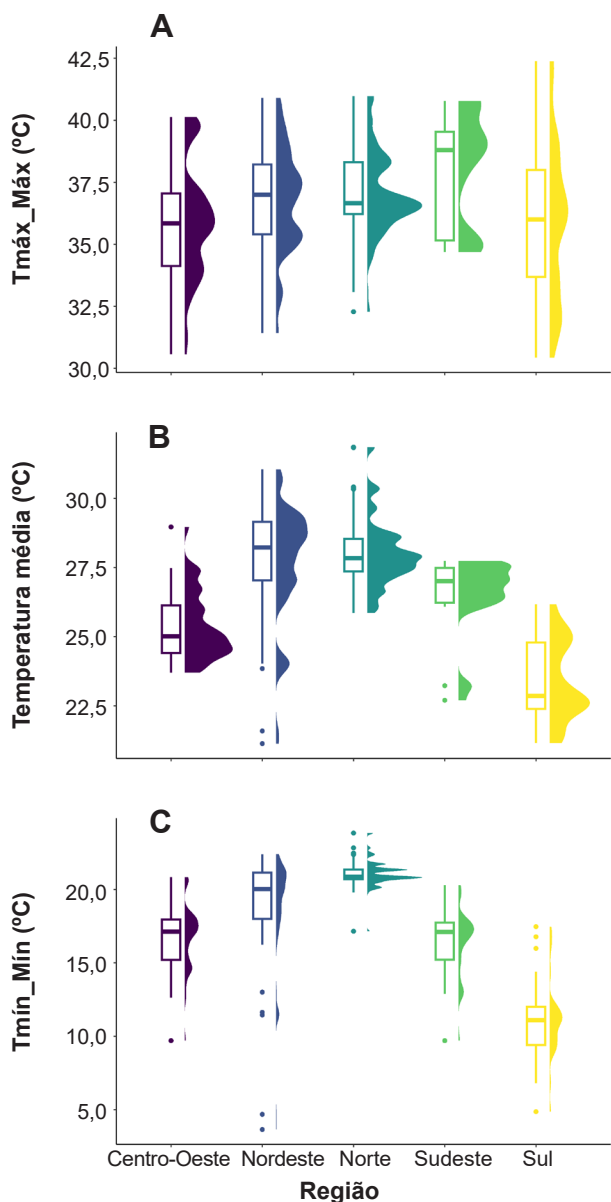


Figura 4. Valores regionalizados observados para máxima temperatura máxima do ar (A); temperatura média do ar (B); e mínima temperatura mínima do ar (C).

A região Nordeste se destaca por apresentar a menor mediana para umidade relativa do ar média (HU_M), 66,49%, e valores distribuídos entre 50% e 80%. O Norte teve a maior mediana (78,11%), seguido da região Sul (76,98%). Nas regiões Centro-Oeste (75,20%) e Sudeste (75,03%) os dados observados concentram-se principalmente entre 70% e 80% (Figura 5A).

Nordeste é a região com menor precipitação pluvial acumulada (Rainfall_ACC), com 75% das observações abaixo de 387 mm. No entanto, a região Norte registrou precipitação pluvial mediana de 831 mm, superior às demais regiões. As regiões Sul e Sudeste são semelhantes nesse aspecto, possuindo medianas próximas, 600 mm e 616 mm,

respectivamente. O Centro-Oeste possui a segunda maior mediana, 799 mm, e não apresenta precipitação pluvial inferior a 375 mm (Figura 5B).

A radiação solar global acumulada durante o ciclo (Rad_ACC) foi a variável climática que teve valores de mediana mais distintos entre as regiões (Figura 5C). A menor radiação foi observada no Norte (2.137 MJ m⁻²), possivelmente pela elevada precipitação pluvial, em que a nebulosidade dificulta a passagem dos raios solares. Assim, a maior radiação solar global encontra-se no Sudeste (2.811 MJ m⁻²), seguida e bem próxima do Nordeste (2.789 MJ m⁻²). O Centro-Oeste é a região intermediária (2.488 MJ m⁻²), bem como o Sul (2.578 MJ m⁻²) com amplitude de observação maior, e ambas possuem massas de dados deslocadas para baixo (Figura 5C).

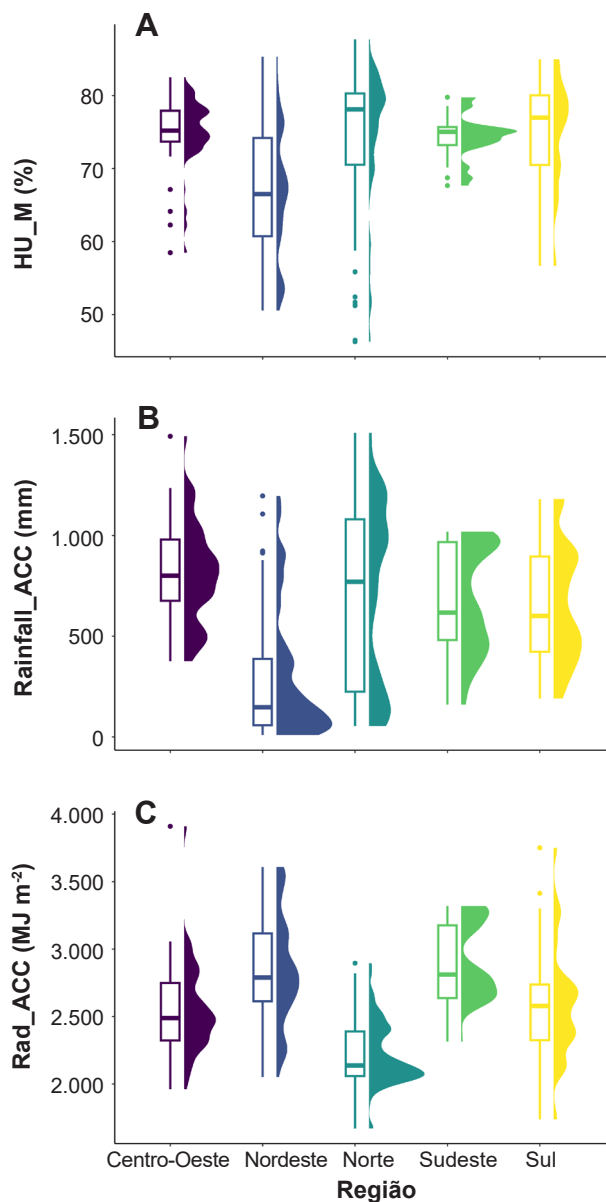


Figura 5. Valores regionalizados observados para umidade relativa do ar média no ciclo (A); precipitação pluvial acumulada no ciclo (B); e radiação solar global acumulada no ciclo (C).

Modelos estatísticos

A melhor performance pelo LM foi obtida para a região Nordeste (R^2 ajustado a 95%), seguida das regiões Sul (93%), Norte (92%), Centro-Oeste (80%) e Sudeste (73%). Para os GAM, as melhores performances foram obtidas nas regiões Norte e Sul (deviância explicada igual a 92%), seguidas pelo Nordeste (90%), Centro-Oeste (83%) e Sudeste (77%).

Genótipos

As Figuras 6 a 10 ilustram o impacto do genótipo no florescimento para os modelos LM (Figuras 6A, 7A, 8A, 9A e 10A) e GAM (Figuras 6B, 7B, 8B, 9B e 10B) para as macrorregiões Centro-Oeste (Figura 6), Norte (Figura 7), Sul (Figura 8), Sudeste (Figura 9) e Nordeste (Figura 10). Nas Figuras é possível verificar a interação entre genótipo x ambiente para as diferentes macrorregiões, ressaltando-se que o valor central 0 representa o intercepto, interpretado como o florescimento médio. Um exemplo da interação é notado para os genótipos BRS Pampeira e Metica 1. Tais genótipos têm a tendência de retardar o florescimento em todas as macrorregiões, exceto na Nordeste (Figura 10A). No caso do genótipo BRS Pampeira, a tendência de florescimento variou entre +18,74 dias para a macrorregião Sul (Figura 8A) e -0,97 dias para a macrorregião Nordeste (Figura 10A). Para o modelo GAM o mesmo genótipo mostrou variações no florescimento entre as macrorregiões

(Figuras 6B a 10B), ilustrando que a interação genótipo x ambiente modifica as estimativas do valor genético para o florescimento (Costa Neto et al., 2020). O maior efeito nos genótipos para os modelos LM foi observado na macrorregião Sudeste, na qual o genótipo BRS Pelota tendeu a retardar o florescimento, em média, 23,47 dias (Figura 9A). Para os modelos GAM o maior efeito foi observado na macrorregião Nordeste no genótipo BRS IRGA 414, que tendeu a adiantar o florescimento, em média, 32,99 dias (Figura 10B). O modelo LM para a macrorregião Norte teve a menor variabilidade entre os genótipos para antecipar ou atrasar o florescimento em \pm um dia (Figura 7A). Somente para a macrorregião Sudeste (Figuras 9A e 9B) os modelos LM e GAM divergiram na tendência de antecipar ou atrasar o florescimento. Nessa região o modelo LM considerou que todos os genótipos têm a tendência em atrasar o florescimento. Por fim, o maior efeito de antecipação do florescimento promovido pelos genótipos, entre todos os LM, foi observado na região Centro-Oeste, na qual o genótipo IRGA 430 antecipou, em média, 13,2 dias. Para a mesma região, o genótipo SCS116 Satoru foi o mais tardio, atrasando o florescimento em 10,79 dias, em média (Figura 6A). No GAM, IRGA 430 permaneceu com maior tendência em adiantar, em média, 14,67 dias, e o genótipo Epagri 109 teve o maior efeito, ao retardar, em média, 10,3 dias (Figura 6B).

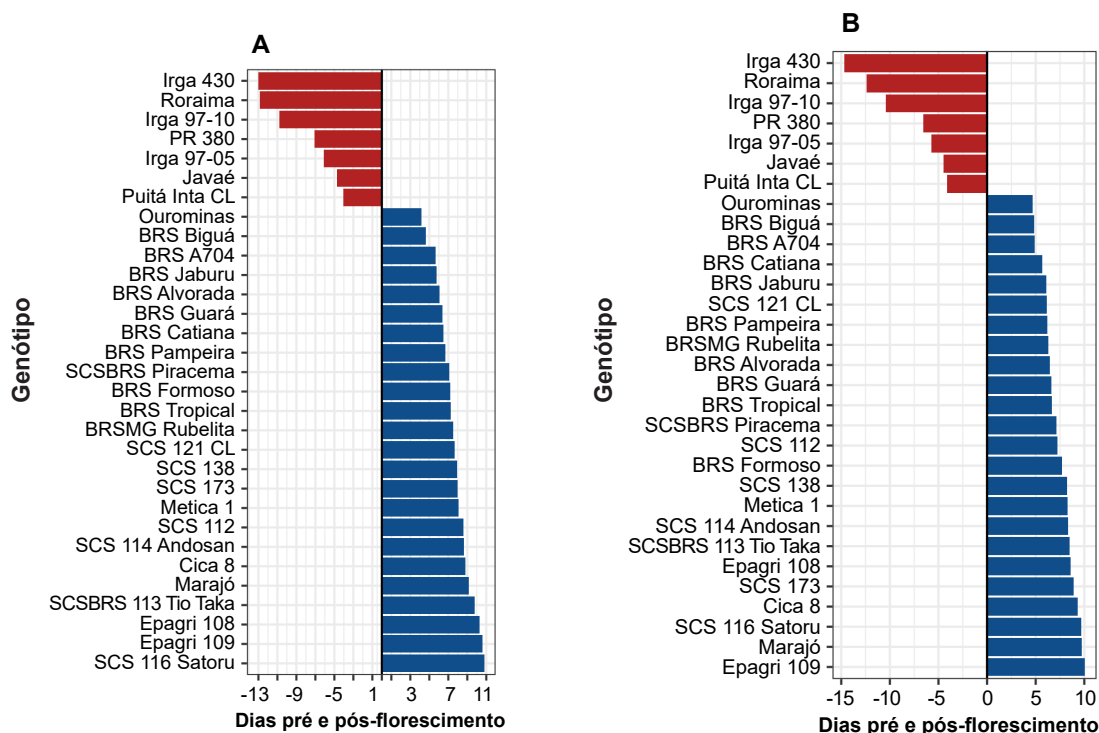


Figura 6. Ganho médio por genótipo, listado no modelo linear (A) e modelo aditivo generalizado (B), em relação aos genótipos agrupados na média, sobre a data de florescimento de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) cultivado na região Centro-Oeste.

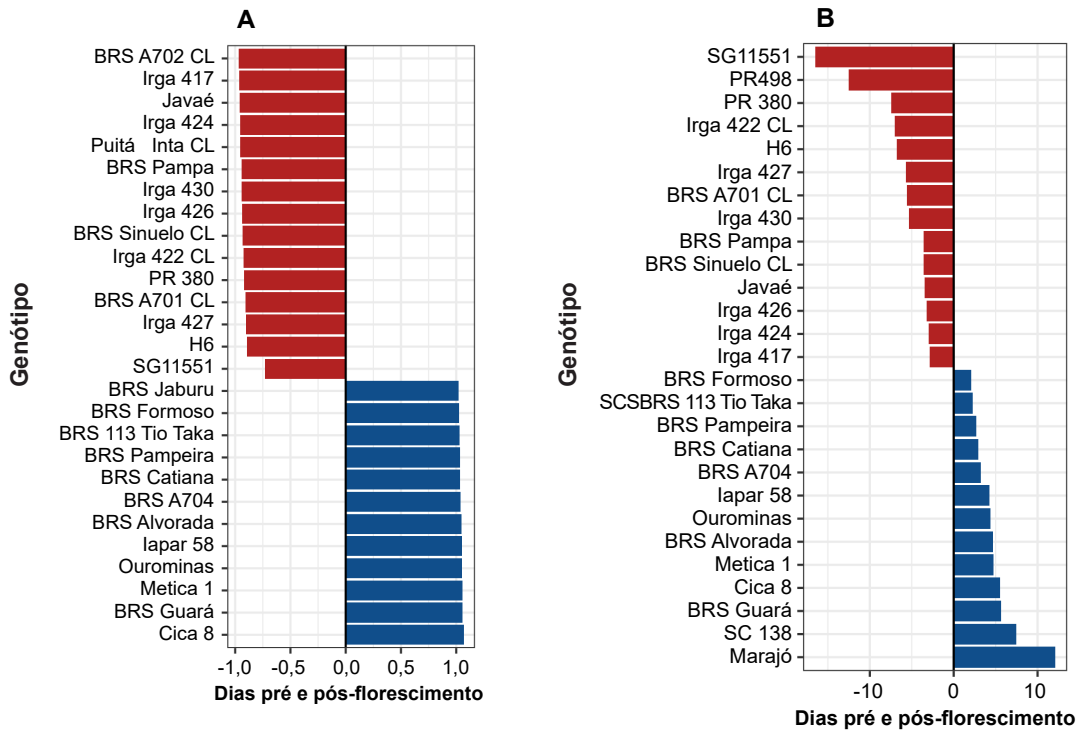


Figura 7. Ganho médio por genótipo, listado no modelo linear (A) e modelo aditivo generalizado (B), em relação aos genótipos agrupados na média, sobre a data de florescimento de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) cultivado na região Norte.

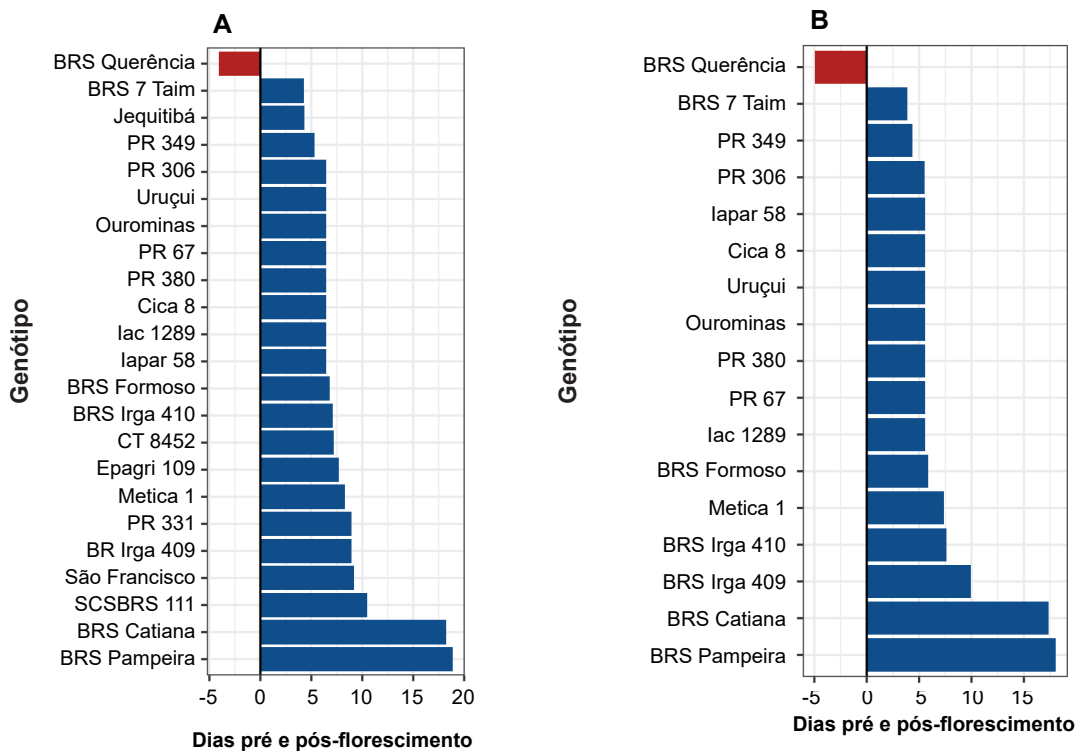


Figura 8. Ganho médio por genótipo, listado no modelo linear (A) e modelo aditivo generalizado (B), em relação aos genótipos agrupados na média, sobre a data de florescimento de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) cultivado na região Sul.

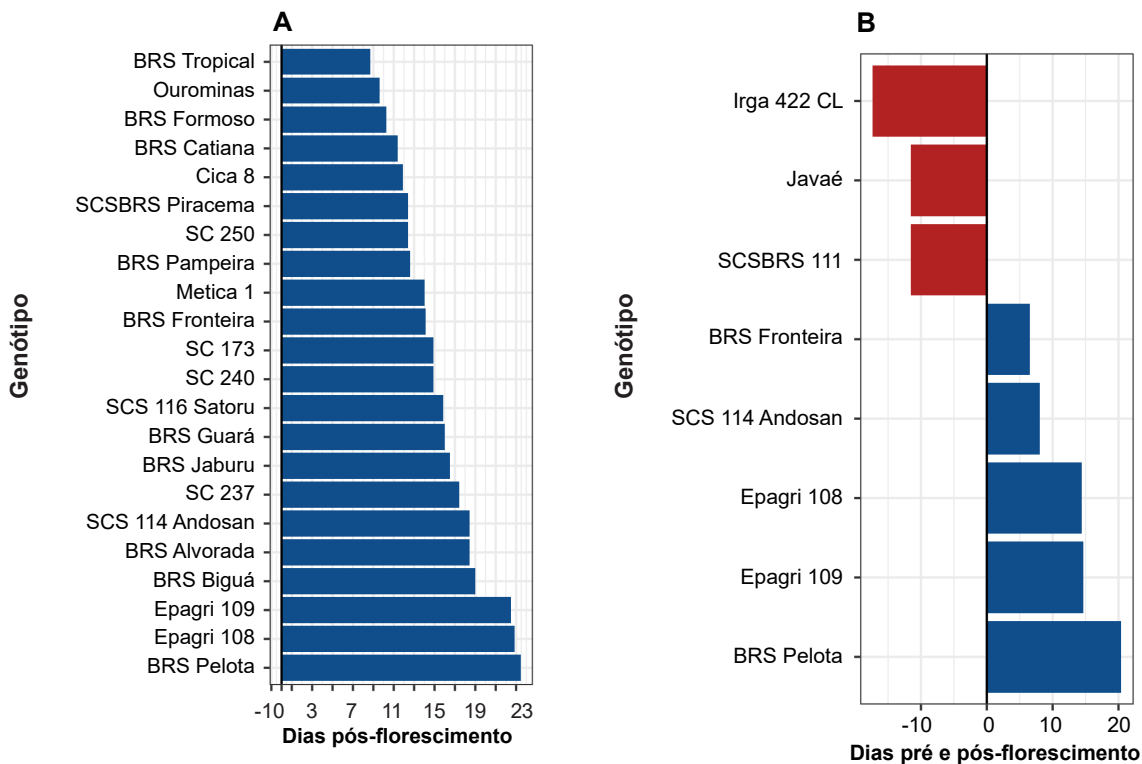


Figura 9. Ganho médio por genótipo, listado no modelo linear (A) e modelo aditivo generalizado (B), em relação aos genótipos agrupados na média, sobre a data de florescimento de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) cultivado na região Sudeste.

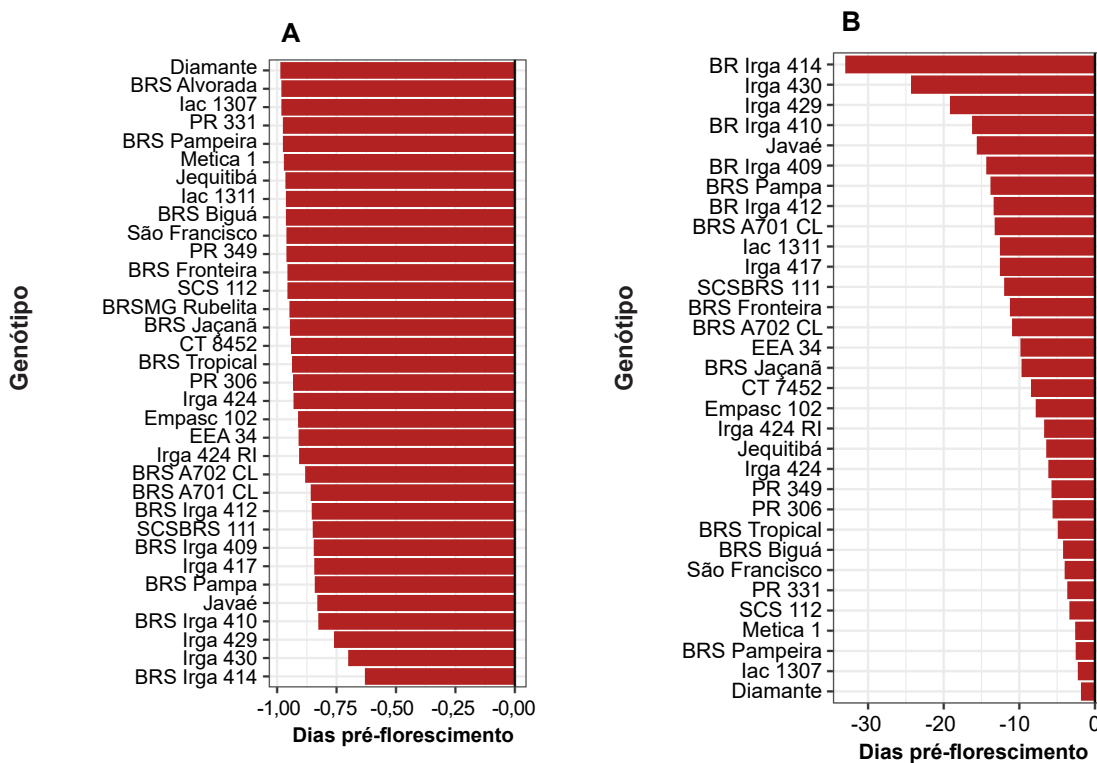


Figura 10. Ganho médio por genótipo, listado no modelo linear (A) e modelo aditivo generalizado (B), em relação aos genótipos agrupados na média, sobre a data de florescimento de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) cultivado na região Nordeste.

Capacidade explicativa das variáveis independentes

Compreender a relevância dos fatores ambientais sobre o desempenho do genótipo consiste em como, quando e quanto esses fatores limitam a expressão do potencial genotípico. O limite acontecerá sob multiplicidade de fatores, quando um estiver mais próximo do limite da tolerância, tornando-se este o limitante da expressão fenotípica. Dentro desses limites, o genótipo possui certa flexibilidade fenotípica, promovendo a sobrevivência do indivíduo quando os fatores do ambiente forem limitantes (Costa Neto et al., 2020).

Os GAM, em comparação aos LM, tiveram menor número de variáveis climáticas discriminantes (Tabela 2), exceto para a macrorregião Sul, a qual apresentou o mesmo número de variáveis climáticas para os dois modelos. Modelos com menor número de variáveis são desejáveis desde que não prescindam de variáveis explicativas. Assim, espera-se que variáveis periféricas que, no conjunto, exercem pequena influência, tenham seus efeitos combinados incluídos no resíduo (Gujarati; Porter, 2011).

As variáveis latitude, altitude, Rainfall_ACC, Rad_ACC_R, Rad_ACC_V, Tmáx_FLO, Tmáx_Máx, Tmín_FLO, Tmín_M, Tmín_Mín, HU_FLO, HU_M e HU_V não foram discriminantes nos modelos GAM para nenhuma macrorregião. Para os modelos LM as variáveis Rad_ACC_R e latitude também não foram discriminantes. A ausência de significância da Rad_ACC_R pode ser atribuída à redução da absorção de energia

luminosa após a antese (Campbell et al., 2001). Entretanto, para todas as macrorregiões foram discriminantes variáveis relacionadas à temperatura do ar, em ambos os modelos (Tabela 2), tornando evidente o impacto da temperatura do ar, especialmente a mínima, sobre o florescimento.

O modelo GAM, dada a complexidade, geralmente não permite ranquear a capacidade explicativa das variáveis independentes. Desse modo, foi analisada somente a capacidade explicativa das variáveis independentes utilizadas nas análises referentes aos modelos LM para as cinco macrorregiões. A Figura 11 ilustra o ranqueamento das variáveis independentes em relação à capacidade de discriminação.

A variável independente genótipo apresentou maior capacidade explicativa para as macrorregiões Sul e Nordeste, explicando cerca de 58% e 37%, respectivamente (Figuras 11C e 11E) e nas demais macrorregiões o genótipo ficou em segundo lugar. No Centro-Oeste, 42% da variação é explicada pela temperatura máxima do ar acumulada no vegetativo (Tmáx_ACC_V) (Figura 11A). No Sudeste a principal variável independente é a radiação solar global acumulada no ciclo (Rad_ACC), explicando 26% da variação (Figura 11D). Na macrorregião Norte a longitude (47%) foi considerada a mais explicativa (Figura 11B). Já o resíduo que agrupa fatores não considerados no estudo obteve maior valor na região Sudeste (20%) e menor no Sul (6%), provavelmente devido ao menor número de experimentos disponíveis na macrorregião Sudeste, contrastando à macrorregião Sul.

Tabela 2. Número de ocorrências das classes de variáveis e respectivas fases de atuação.

Fase	Temp. mínima	Temp. máxima	Variáveis geográficas	Precipitação pluvial	Umidade relativa	Radiação solar	Graus-dia	Total
Modelos lineares múltiplos								
Ciclo	6	4	4	1	1	3	1	20
Vegetativa	7	4	-	2	1	3	-	17
Reprodutiva	7	5	-	1	2	0	-	15
Florescimento médio	2	1	-	0	1	0	2	6
Total parcial	22	14	4	4	5	6	3	
Modelos aditivos generalizados								
Ciclo	1	3	1	0	0	2	0	7
Vegetativa	6	2	-	1	0	0	0	10
Reprodutiva	4	3	-	1	1	0	0	9
Florescimento médio	0	0	-	0	0	0	1	1
Total parcial	11	8	1	2	1	2	1	
Total	33	22	5	6	6	8	4	

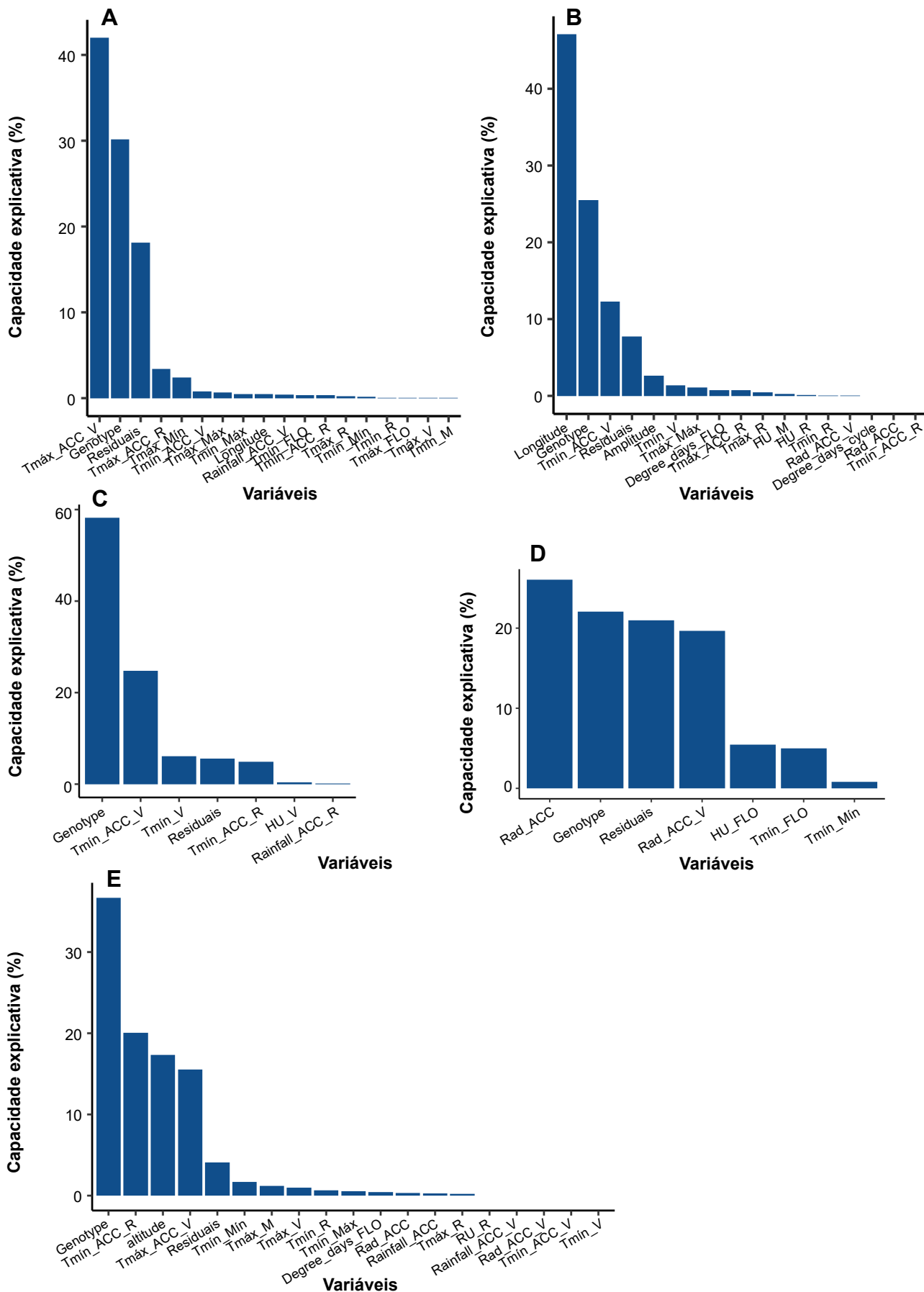


Figura 11. Capacidade explicativa das variáveis independentes que compõem o modelo linear para previsão do florescimento de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) cultivado nas regiões: Centro-Oeste (A); Norte (B); Sul (C); Sudeste (D); e Nordeste (E).

Modelos selecionados e predição

Comparando-se os modelos LM e GAM por meio da validação cruzada, com alvo no erro médio absoluto (EMA), observou-se que o GAM foi mais assertivo nas previsões dos dias necessários para o florescimento para todas as macrorregiões, exceto para a Sul, na qual o EMA para o LM foi 5,27% menor que o GAM. O maior EMA foi observado na região Sudeste, que teve também a maior diferença em relação ao valor mediano do EMA entre as classes de modelo (GAM 17,02% < LM). A menor diferença em relação ao valor mediano do EMA entre as classes de modelo foi observada na região Nordeste (GAM 0,65% < LM). O modelo GAM também teve menor número de variáveis independentes.

Centro-Oeste

Para a macrorregião Centro-Oeste o modelo GAM discriminou três variáveis climáticas

não suavizadas — temperatura mínima do ar no ciclo vegetativo ($T_{mín_V}$), temperatura mínima do ar no reprodutivo ($T_{mín_R}$) e temperatura mínima do ar acumulada no vegetativo ($T_{mín_ACC_V}$), e quatro variáveis climáticas suavizadas — graus-dia para o florescimento (*Degree_days_FLO*), *Rad_ACC*, mínima temperatura máxima do ar ($T_{máx_Mín}$) e temperatura mínima do ar acumulada no reprodutivo ($T_{mín_ACC_R}$). Dos 31 genótipos avaliados na macrorregião, sete apresentaram tendência de adiantar o florescimento e 24 de atrasar (Figura 6B). Essa macrorregião obteve o maior número de variáveis discriminantes, demonstrando a complexidade em relação às demais. A predição do florescimento do arroz irrigado no Centro-Oeste é ilustrada na Figura 12.

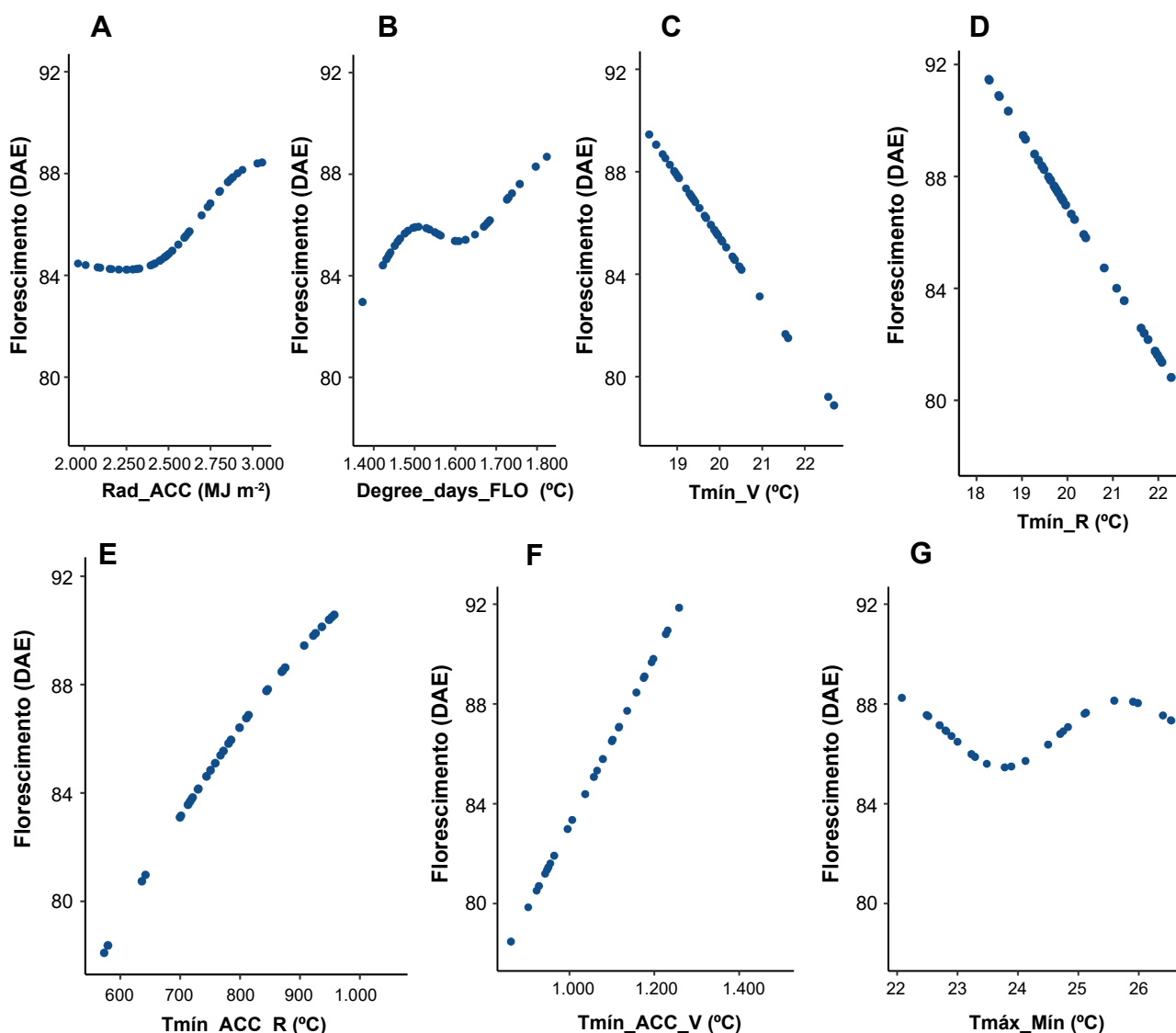


Figura 12. Predição do florescimento de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.), em dias após a emergência (DAE), no Centro-Oeste, variando as predictoras e permanecendo as demais covariáveis fixas na média.

O Centro-Oeste foi a única macrorregião na qual a variável *Degree_days_FLO* foi discriminada. O efeito dessa variável no florescimento é nulo, entre 1.440 °C e 1.680 C° (Figura 12B). Acima desse intervalo há tendência de atrasar o florescimento, entretanto, abaixo, há tendência de antecipar. Esse intervalo pode ser considerado ótimo para a macrorregião (Figura 3).

A variável independente *Rad_ACC* teve pouco efeito no florescimento, elevando os dias necessários quando superior a 2.300 MJ m⁻² (Figura 12A). Em condições nutricionais e hídricas satisfatórias, a disponibilidade de radiação solar global é um dos fatores que mais interferem no desenvolvimento potencial do arroz (Steinmetz et al., 2009). O efeito protetador da alta radiação solar global sobre o florescimento pode estar associado à saturação luminosa. Sobre o excesso de luz, isto é, quando a planta é exposta a uma quantidade de luz maior do que a capacidade de uso, ocorre fotoinibição, provocando a inibição da fotossíntese (Taiz; Zeiger, 2017). No Centro-Oeste, 50% das observações para *Rad_ACC* estão acima de 2.488 MJ m⁻² (Figura 5C).

O aumento da *Tmín_V* e da *Tmín_R* na macrorregião Centro-Oeste tendeu na antecipação do florescimento linearmente (Figuras 12C e 12D). Por outro lado, o acúmulo das temperaturas *Tmín_AC-C_V* e *Tmín_ACC_R* tendeu em atrasar o florescimento (Figuras 12E e 12F). Em síntese, o aumento da temperatura mínima do ar, tanto na fase vegetativa quanto na fase reprodutiva, reduz a necessidade de dias para o florescimento. Em relação à *Tmáx_Mín*, o impacto é baixo no florescimento sobre as demais covariáveis. A menor quantidade de dias para o florescimento ocorre próximo aos 23,5 °C (Figura 12G).

Norte

Na macrorregião Norte o modelo GAM discriminou três variáveis com tendência linear (longitude, *Tmín_ACC_R* e máxima temperatura mínima - *Tmín_máx*) e três variáveis independentes suavizadas (precipitação acumulada no ciclo reprodutivo - *Rainfall_ACC_R*, *Rad_ACC* e *Tmín_ACC_V*). Dos 27 genótipos, 14 apresentaram tendência de antecipar e 13 de retardar o florescimento (Figura 7B). A predição do florescimento de arroz irrigado na região Norte é ilustrada na Figura 13.

Dentre os modelos selecionados pela validação cruzada, somente a macrorregião Norte discriminou uma variável geográfica, a longitude, corroborando a importância como preditora na região. Nos modelos LM essa variável explicou 47% da variação do

florescimento (Figura 11B). A alteração da longitude é acompanhada também por grande alteração da latitude, levando os cultivos a enfrentarem microclimas distintos. A Figura 1 mostra o quão distantes estão os cultivos na região.

Semelhantes aos observados na macrorregião Centro-Oeste, os efeitos da variável independente *Rad_ACC* foram baixos em comparação às demais covariáveis. O menor número de dias para florescimento é observado quando a *Rad_ACC* está próxima de 2.250 MJ m⁻² (Figura 13A). A proximidade dos valores estimados nas duas regiões traz indícios de que o melhor valor para *Rad_ACC*, onde não ocorre fotoinibição no arroz irrigado ou provoca redução no desenvolvimento por baixa radiação solar, está próximo de 2.300 MJ m⁻². No Norte, 75% das observações para *Rad_ACC* são inferiores a 2.389 MJ m⁻² (Figura 5C). Estudos demonstram que as ações antrópicas promovem alteração das propriedades óticas da atmosfera, provocando reduções significativas na radiação solar que atinge a superfície da Terra (Stanhill; Cohen, 2001). Tal perspectiva torna a macrorregião Norte mais suscetível a efeitos da radiação solar global que a Centro-Oeste.

A variável *Rainfall_ACC_R* também mostrou pouco impacto no florescimento (Figura 13B), contudo, possui tendência de retardar o florescimento quando inferior a aproximadamente 200 mm ou superior a aproximadamente 500 mm. Essas respostas estão relacionadas indiretamente a outras variáveis climáticas que são afetadas pela precipitação pluvial, a exemplo da disponibilidade de radiação solar global e a temperatura do ar, e às constituições genéticas das variedades de arroz. Atrasar a floração pode ser uma estratégia eficaz e flexível para ajustar o tempo da fase reprodutiva de acordo com o estresse ambiental (Galbiati et al., 2016; Jagadish et al., 2016). Por outro lado, o excesso de precipitação pluvial pode prejudicar a cultura ao elevar a umidade relativa do ar, propiciando a ocorrência de doenças, como também a formação de nuvens, que reduz a disponibilidade de radiação solar global, prejudicando o desenvolvimento do vegetal com o prolongamento do ciclo. Desde que se disponha de água para a irrigação, anos secos são favoráveis ao bom desenvolvimento do arroz (Sociedade Brasileira de Arroz Irrigado, 2018).

Para a macrorregião Norte a elevação da *Tmín_Máx* acelera o florescimento linearmente (Figura 13C). Assim como observado para a macrorregião Centro-Oeste, o acréscimo na *Tmín_ACC_V* e na *Tmín_ACC_R* tende a atrasar o florescimento (Figuras 13D e 13E).

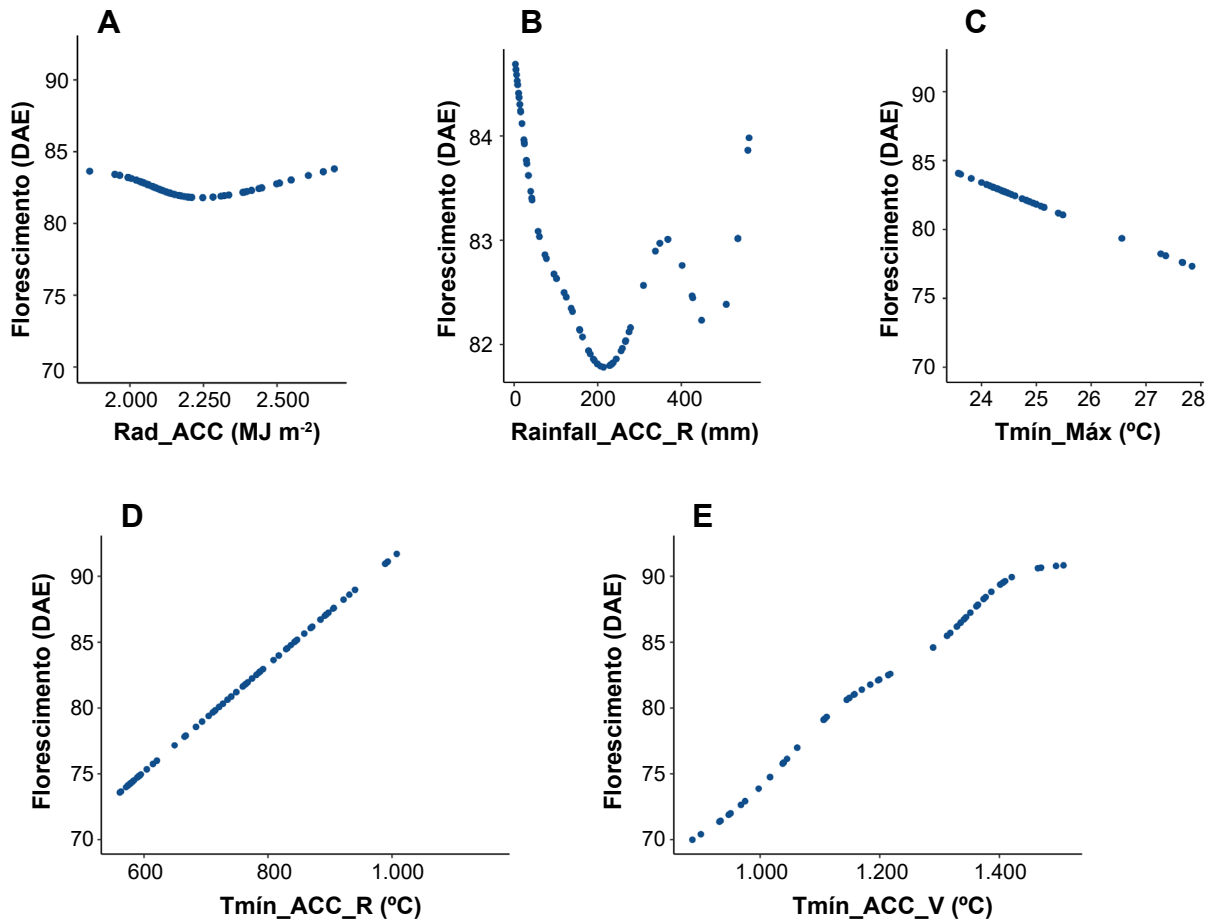


Figura 13. Predição do florescimento de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.), em dias após a emergência (DAE), na região Norte, variando as preditoras e permanecendo as demais covariáveis fixas na média.

Sul

Para a macrorregião Sul o modelo LM discriminou cinco variáveis climáticas: Tmín_V, Tmín_ACC_R, Tmín_ACC_V, *Rainfall_ACC_R* e umidade relativa na fase reprodutiva (HU_R). Dos 22 genótipos, somente um tem tendência de antecipar o florescimento (Figura 8A). A predição do florescimento de arroz irrigado no Sul está na Figura 14. A variável independente HU_V foi discriminada somente para essa macrorregião, tendendo a reduzir linearmente os dias necessários para o florescimento conforme seu aumento (Figura 14A). A fotossíntese apresenta respostas indiretas às variações da umidade relativa do ar, mediadas por efeitos do controle estomático, controlada pela planta com a presunção de maximizar a fotossíntese e reduzir a transpiração. Desta forma, a tendência pode estar associada ao fato de que, sob temperaturas do ar altas, a alta transpiração resultante do deficit de pressão de vapor no ambiente pode reduzir o estresse ao resfriar os órgãos da planta de arroz em até 6,4 °C abaixo da temperatura do ar (Matsui et al., 2007). Na região Sul a Tmín_V possui os valores menores entre todas

as macrorregiões (média de 17,83 °C ± 1,58 °C), entretanto, em alguns experimentos os valores de Tmáx_V são superiores a 28,7 °C. Isso, somado à HU_V, comumente entre 71% e 77%, auxilia o resfriamento da planta nos níveis térmicos internos adequados ao desenvolvimento.

O aumento da *Rainfall_ACC_R* tende a antecipar linearmente o florescimento, divergindo do observado para a macrorregião Norte, para o qual o modelo também discriminou a variável independente (Figura 14B).

Todas as variáveis relacionadas à temperatura são relativas à temperatura mínima do ar. Como observado para as demais macrorregiões, a elevação da temperatura do ar tende a antecipar o florescimento na macrorregião Sul. O acréscimo na Tmín_V tem tendência de reduzir linearmente a necessidade dos dias para a floração (Figura 14C), entretanto os acréscimos da Tmín_ACC_V e da Tmín_ACC_R tendem a aumentar a quantidade de dias necessários para o florescimento (Figuras 14D e 14E).

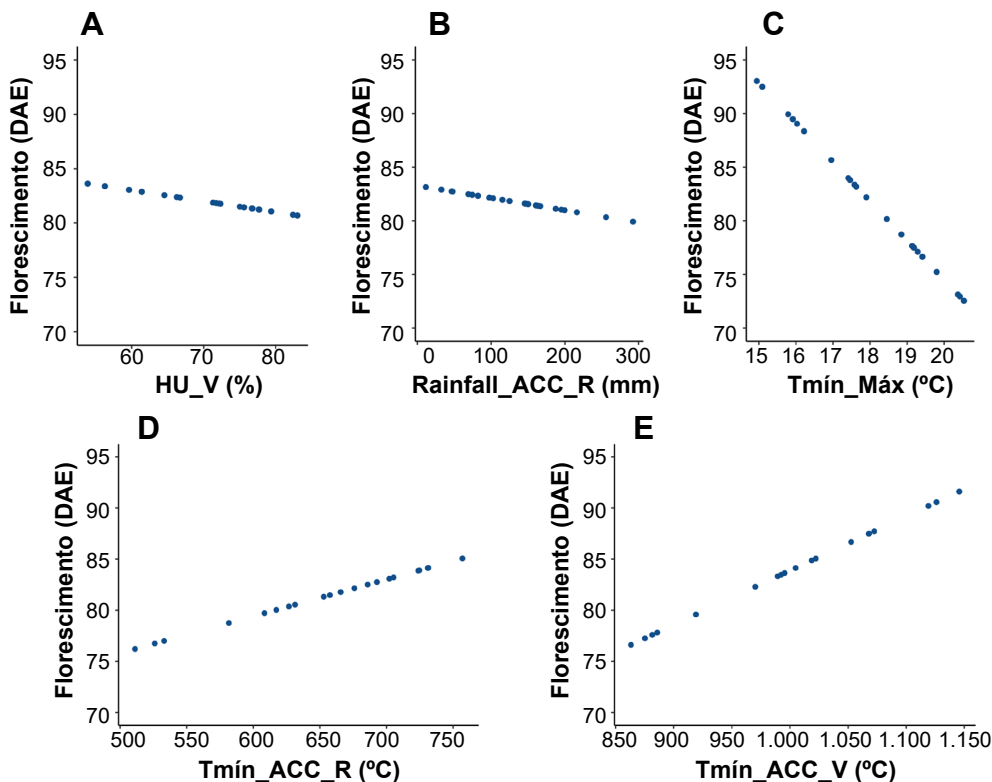


Figura 14. Predição do florescimento de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.), em dias após a emergência (DAE), no Sul, variando as preditoras e permanecendo as demais covariáveis fixas na média.

Sudeste

Somente três variáveis foram discriminadas pelo modelo GAM na região Sudeste, temperatura máxima acumulada no período reprodutivo (Tmáx_ACC_R), temperatura máxima mínima (Tmáx_mín) e Tmín_ACC_V, todas relacionadas à temperatura do ar, trazendo indícios de que o fator mais limitante ao desenvolvimento do arroz irrigado na macrorregião é a temperatura do ar. Dos oito genótipos, três possuem tendência de antecipar o florescimento

(Figura 9B). A predição de florescimento do arroz irrigado no Sudeste pode ser visualizada na Figura 15.

A Tmáx_Mín, considerada ótima para a macrorregião no florescimento, é próxima de 23,5 °C. Acima ou abaixo desse valor, a tendência é de retardar o florescimento (Figura 15B), o que foi observado na macrorregião Centro-Oeste, na qual a menor quantidade de dias para o florescimento também ocorreu nessa

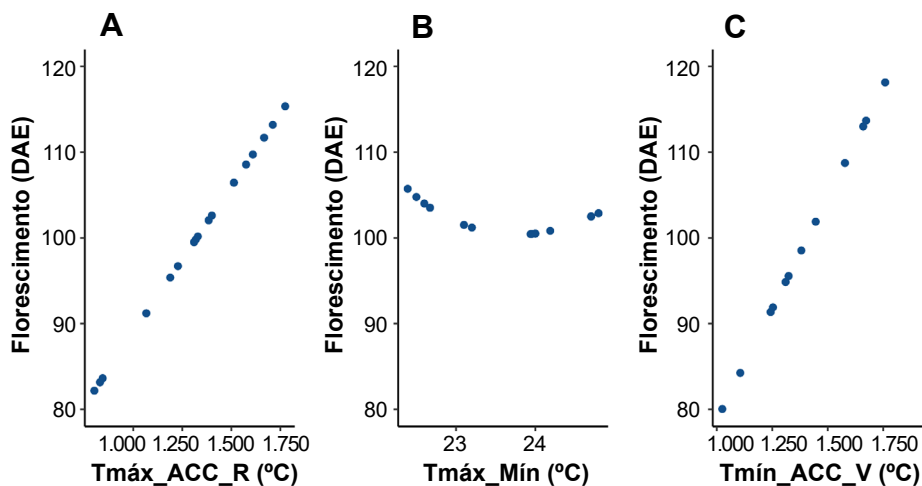


Figura 15. Predição do florescimento de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.), em dias após a emergência (DAE), no Sudeste, variando as preditoras e permanecendo as demais covariáveis fixas na média.

temperatura (Figura 12G), no entanto os efeitos são baixos quando comparados com as demais variáveis.

Mesmo suavizadas, as variáveis independentes $T_{máx_ACC_R}$ e $T_{mín_ACC_V}$ tiveram indícios de linearidade. O valor de EDF foi menor que 1 para as duas variáveis. A variável independente $T_{máx_ACC_R}$ tendeu a acrescentar dias para o florescimento linearmente ao aumento (Figura 15A). Logo, a elevação da temperatura máxima do ar na macrorregião Sudeste pode ser limitante ao desenvolvimento do arroz irrigado. Do mesmo modo, o incremento da temperatura mínima do ar, caracterizada pelo aumento da variável independente $T_{mín_ACC_V}$, tendeu a retardar o florescimento (Figura 15C).

Nordeste

Na macrorregião Nordeste o modelo GAM discriminou três variáveis não suavizadas, temperatura máxima acumulada no período vegetativo ($T_{máx_ACC_V}$), temperatura máxima média no período vegetativo ($T_{máx_V}$) e temperatura máxima média no período reprodutivo ($T_{máx_R}$), e duas variáveis

independentes suavizadas, precipitação pluvial acumulada no período vegetativo ($Rainfall_ACC_V$) e $T_{máx_ACC_R}$. Todos os 32 genótipos tiveram tendência de antecipar o florescimento (Figura 10B). A predição do GAM para o florescimento de arroz irrigado na macrorregião Nordeste está discriminada na Figura 16.

Na macrorregião Nordeste a temperatura máxima do ar é notoriamente o fator climático mais limitante. As variáveis $T_{máx_V}$ e a $T_{máx_R}$ têm relação linear com o florescimento, com ambas antecipando em razão do aumento do valor (Figuras 16A e 16B).

Como na macrorregião Norte, a elevação da $T_{máx_ACC_R}$ tende a retardar o florescimento (Figura 16C). Da mesma forma, a variável $T_{máx_ACC_V}$ tende a atrasar o florescimento linearmente, conforme o seu aumento (Figura 16D).

Somente para essa macrorregião o modelo discriminou a precipitação acumulada para a fase vegetativa. A elevação da $Rainfall_ACC_V$ até 250 mm atrasa o florescimento (Figura 16E).

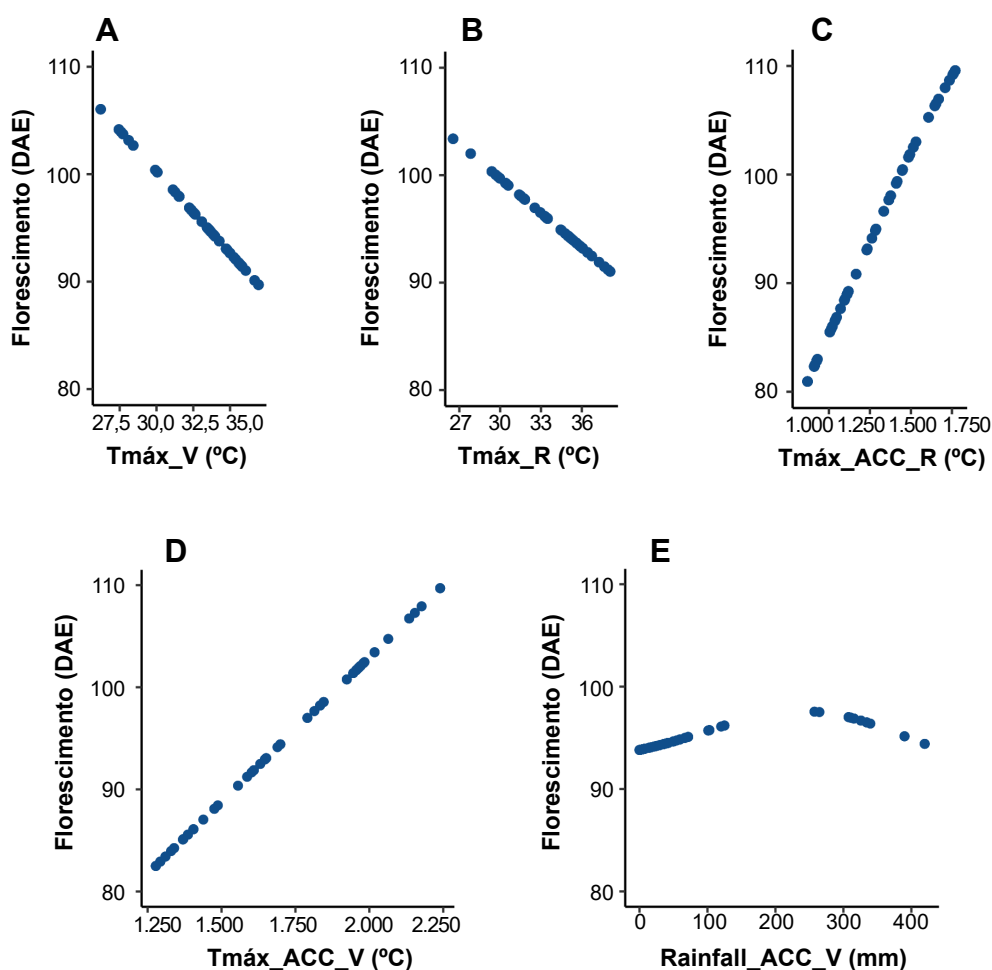


Figura 16. Predição do modelo aditivo generalizado (GAM) para o florescimento de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.), em dias após a emergência (DAE), no Nordeste, variando as preditoras e permanecendo as demais covariáveis fixas na média.

A tendência das variáveis independentes, discriminadas pelos modelos selecionados, está sintetizada em Honorio Filho (2022). Com exceção das variáveis independentes relacionadas à precipitação pluvial, há similaridade nas tendências das variáveis climáticas entre as macrorregiões, notada principalmente sobre as variáveis relacionadas à temperatura do ar, sendo esse elemento climático determinante sobre a data de florescimento do arroz irrigado. O aumento da temperatura mínima do ar tende a antecipar o florescimento, entretanto, se a temperatura máxima do ar ultrapassar o ideal térmico fotossintético, aproximadamente 27 °C (Sánchez et al., 2014), no qual ocorre o máximo desenvolvimento, a fase vegetativa pode se prolongar, dada a diminuição da taxa fotossintética e o aumento da taxa respiratória. Neste sentido, o acúmulo de temperaturas mínimas ou máximas do ar pode provocar estresses térmicos que, ultrapassando certos limites, desaceleram o desenvolvimento e atrasam o florescimento. Assim, o aumento das variáveis de temperatura acumulada sempre tende a retardar o florescimento.

A temperatura do ar é o principal determinante do momento e da duração das principais fases de desenvolvimento, incluindo a floração, e importante determinante do crescimento da planta (Craufurd; Wheeler, 2009; Bahuguna; Jagadish, 2015). No contexto, as mudanças climáticas tendem a impactar o processo de floração. As plantas de arroz respondem a fatores externos e internos para uma transição bem-sucedida da fase vegetativa para a reprodutiva (Bahuguna; Jagadish, 2015; Taiz; Zeiger, 2017) e um dos principais fatores externos é o fotoperíodo. O arroz é uma planta quantitativa de dias curtos, ou seja, o florescimento pode ocorrer na ausência de fotoperíodo adequado, mas, desde que supridas as exigências internas, o florescimento ocorrerá tardiamente (Tsuji et al., 2011, Ye et al., 2019). Florescer tardiamente pode não ser bom, pois, apesar de promover maior acúmulo de biomassa, pode causar menor enchimento dos grãos, além da permanência por mais tempo no campo impactar o custo de produção e deixar as plantas sujeitas a eventualidades como os estresses bióticos e abióticos (Srikanth; Schmid, 2011).

Conforme os resultados obtidos neste estudo, o principal fator ambiental nas macrorregiões capaz de acelerar o florescimento é a elevação da temperatura mínima do ar. Por meio da predição, observou-se que o incremento de dias sobre o florescimento é maior quando relacionado à temperatura do ar. Rushing e Primack (2008) constataram que a elevação da temperatura do ar em 2,4 °C, no

período entre 1852 e 2006, modificou o tempo de floração de espécies norte-americanas, levando ao aumento de sete dias na data de floração. Dados históricos da data de floração de mais de 400 espécies de plantas, coletados ao longo de alguns séculos, evidenciaram que os tempos de floração avançaram, em média, quatro a seis dias por grau centígrado (Jagadish et al., 2016). As plantas possuem também mecanismos que impedem o florescimento prematuro, sendo um importante a exigência da soma térmica (Steinmetz et al., 2009; Taiz; Zeiger, 2017).

As plantas podem sentir com precisão a mudança na temperatura do ar, percebida simultaneamente em todos os componentes celulares. A capacidade de resposta da planta à variação térmica pode alterar com os estádios fenológicos e de desenvolvimento (Bahuguna; Jagadish, 2015). Na fase juvenil, a planta não responde aos estímulos para o florescimento, mas, ao passar para a adulta vegetativa, se torna apta ao florescimento, necessitando somente dos estímulos corretos (Taiz; Zeiger, 2017). Essa resposta é fortemente influenciada por outros fatores ambientais como a umidade relativa do ar, a radiação solar global e o fotoperíodo (Bahuguna; Jagadish, 2015).

Conclusões

- 1) As escolhas e tendências dos genótipos, o conjunto de variáveis climáticas, e a importância individual e os efeitos são dependentes da região de cultivo;
- 2) De forma geral, as variáveis relacionadas à temperatura do ar estiveram presentes em maior número nos modelos;
- 3) O florescimento do arroz irrigado nas macrorregiões Centro-Oeste, Norte, Sudeste e Nordeste foi melhor predito pelo modelo GAM, e para a Sul o modelo LM foi mais eficiente;
- 4) A permanência da longitude como variável discriminada para a macrorregião Norte indica um alerta para que essa deva ser segmentada em novas análises;
- 5) A elevação das temperaturas mínima e máxima do ar, independentemente da fase fenológica, tende a antecipar o florescimento;
- 6) A elevação das temperaturas acumuladas mínima e máxima do ar, independentemente da fase fenológica, tende a retardar o florescimento;
- 7) Recomenda-se evitar cultivos em períodos de calor intenso (acima de 35 °C) na macrorregião

Nordeste. Para a macrorregião Sudeste a recomendação se aplica à fase reprodutiva, evitando períodos de frio intenso (abaixo de 16 °C) na fase vegetativa. Para as demais macrorregiões recomenda-se evitar períodos de baixas temperaturas do ar, independentemente do estágio fenológico.

Referências

- ALVES, V. C.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; SENTELHAS, P. C.; AZZINI, L. E. Exigências térmicas do arroz irrigado 'IAC 4440'. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.8, n. 2, p.171-174, 2000.
- BAHUGUNA, R. N.; JAGADISH, K. S. V. Temperature regulation of plant phenological development. **Environmental and Experimental Botany**, v. 111, p. 83-90, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.10.007>.
- BOUMAN, B. A. M.; KROPFF, M. J.; TUONG, T. P.; WOPEREIS, M. C. S.; TEN BERGE, H. F. M.; VAN LAAR, H. H. **ORYZA2000**: modeling lowland rice. Los Baños: International Rice Research Institute; Wageningen: Wageningen University and Research Centre, 2001. p. 31-32.
- BRESEGHELLO, F.; BYERLEE, D.; PANAUD, O.; RERKASEM, B.; SY, A.; TENG, P.; KUILE, M. T. **Evaluation of the CGIAR Research Program on Global Rice Science Partnership (GRiSP)**: Evaluation report. Rome: CGIAR, 2016, v. 1, 84 p. Disponível em: <https://iaes.cgiar.org/sites/default/files/pdf/GRiSP-Evaluation-Volume-1-Final.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2020.
- BRESEGHELLO, F.; MELLO, R. N.; PINHEIRO, P. V.; SOARES, D. M.; LOPES JÚNIOR, S.; NAKANO RANGEL, P. H. N.; GUIMARÃES, E. P.; CASTRO, A. P.; COLOMBARI FILHO, J. M.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M.; FAGUNDES, P. R. R.; NEVES, P. C. F.; FURTINI, I. V.; UTUMI, M. M.; PEREIRA, J. A.; CORDEIRO, A. C. C.; SILVEIRA FILHO, A.; ABREU, G. B.; MOURA NETO, F. P.; PIETRAGALLA, J.; HERNÁNDEZ, M. V.; CROSSA, J. Building the Embrapa rice breeding dataset for efficient data reuse. **Crop Science**, v. 61, n. 5, p. 3445-3457, Sept./Oct. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/csc2.20550>.
- CAMPBELL, C. S.; HEILMAN, J. L.; McINNES, K. J.; WILSON, L. T.; MEDLEY, J. C.; WU, G.; COBOS, D. R. Seasonal variation in radiation use efficiency of irrigated rice. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 110, n. 1, p. 45-54, Dec. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00277-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00277-5).
- CHEIN, F. **Introdução aos modelos de regressão linear**: um passo inicial para compreensão da econometria como uma ferramenta de avaliação de políticas públicas. Brasília, DF: Enap, 2019. 77 p.
- COSTA NETO, G. M. F.; DUARTE, J. B.; CASTRO, A. P.; HEINEMANN, A. B. **Uso de informações ambientais na modelagem e interpretação da interação genótipo x ambiente**: revisão bibliográfica. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2020. 46 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 56). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1124389>.
- CRAUFURD, P. Q.; WHEELER, T. R. Climate change and the flowering time of annual crops. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 9, p. 2529-2539, July 2009. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erp196>.
- EFFROYMSON, M. A. Multiple regression analysis. In: RALSTON, A.; WILF, H. S. (ed.). **Mathematical methods for digital computers**. New York: Wiley, 1960. p. 191-203.
- FAO. **World food and agriculture**: statistical yearbook 2020. Rome, 2020. 366 p. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb1329en>.
- GALBIATI, F.; CHIOZZOTTO, R.; LOCATELLI, F.; SPADA, A.; GENGA, A.; FORNARA, F. Hd3a, RFT1 and Ehd1 integrate photoperiodic and drought stress signals to delay the floral transition in rice. **Plant, Cell & Environment**, v. 39, n. 9, p. 1982-1993, Sept. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.12760>.
- GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 924 p.
- HASTIE, T. **Package 'gam'**. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/gam/gam.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2020.
- HASTIE, T. J.; TIBSHIRANI, R. J. **Generalized additive models**. Boca Raton: Chapman & Hall, 1990. 352 p.
- HOFFMANN, R. **Análise de regressão**: uma introdução à econometria. 5. ed. Piracicaba: O Autor, 2016. 393 p.
- HONORIO FILHO, G. R. **Predição do florescimento do arroz (*Oryza sativa* L.) irrigado nas macrorregiões brasileiras**. 2022. 73 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2001**: impacts, adaptation, and vulnerability. Working Group II. TAR: Summary for Policy makers, 2001. Disponível em: http://www.meto.gov.uk/sec5/CR_div/ipcc/wg1/WG1-SPM.pdf. Acesso em: 30 jul. 2020.
- JAGADISH, S. V.; BAHUGUNA, R. N.; DJANAGUIRAMAN, M.; GAMUYAO, R.; VARA PRASAD, P. V.; CRAUFURD, P. Q. Implications of high temperature and elevated CO₂ on flowering time in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 913, June 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00913>.

- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMA, 2006. 531 p.
- MATSUI, T.; KOBAYASI, K.; YOSHIMOTO, M.; HASEGAWA, T. Stability of rice pollination in the field under hot and dry conditions in the Riverina region of New South Wales, Australia. **Plant Production Science**, v. 10, n. 1, p. 57-63, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1626/pps.10.57>.
- PADUA, G. A. **Modelos de regressão com apoio computacional**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2013. 446 p.
- PEREIRA, R. H. M.; GONÇALVES, C. N. **Geobr**: download official spatial data sets of Brazil. R package version 1, 2021.
- R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2021. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- RÉAUMUR, M. de. Observations du thermometre, faites à Paris pendant l'année M.DCCXXXV. Comparées avec celles qui ont été faites sous la ligne à l'île de France, à Alger et en quelques-unes de nos îles de l'Amérique. **Mémoires de l'Académie Royale des Sciences**, p. 545-576, 1735.
- RUSHING, A. J. M.; PRIMACK, R. B. Global warming and flowering times in Thoreau's Concord: a community perspective. **Ecology**, v. 89, n. 2, p. 332-341, Feb. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1890/07-0068.1>.
- SÁNCHEZ, B.; RASMUSSEN, A.; PORTER, J. R. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. **Global Change Biology**, v. 20, n. 2, p. 408-417, Feb. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12389>.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. Cachoeirinha, 2018. 205 p. Disponível em: <https://irga-admin.rs.gov.br/upload/arquivos/201812/06085952-recomendacoes-tecnicassosbai.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2021.
- SRIKANTH, A.; SCHMID, M. Regulation of flowering time: all roads lead to Rome. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v. 68, n. 12, p. 2013-2037, June 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00018-011-0673-y>.
- STANHILL, G.; COHEN, S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 107, n. 4, p. 255-278, Apr. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00241-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00241-0).
- STEINMETZ, S.; FAGUNDES, P. R. R.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M.; SCIVITTARO, W. B.; DEIBLER, A. N.; ULGUIM, A. R.; NOBRE, F. L. L.; PINTANEL, J. B. A.; OLIVEIRA, J. G.; SCHNEIDER, A. B. Graus-dias para atingir os principais estádios de desenvolvimento de 16 cultivares de arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 6., 2009, Porto Alegre. **Estresses e sustentabilidade**: desafios para a lavoura arrozeira: anais. Porto Alegre: Palotti, 2009. p. 76-79. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/747453>.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.
- TSUJI, H.; TAOKA, K.; SHIMAMOTO, K. Regulation of flowering in rice: two florigen genes, a complex gene network, and natural variation. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 14, n. 1, p. 45-52, Feb. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2010.08.016>.
- WANG, Y.; WANG, L.; ZHOU, J.; HU, S.; CHEN, H.; XIANG, J.; ZHANG, Y.; ZENG, Y.; SHI, Q.; ZHU, D.; ZHANG, Y. Research progress on heat stress of rice at flowering stage. **Rice Science**, v. 26, n. 1, p. 1-10, Jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2018.06.009>.
- WETSCHORECK, F. **RIP correlation**: introducing the predictive power score. 2020. Disponível em: <https://towardsdatascience.com/rip-correlation-introducing-the-predictive-power-score-3d90808b9598>. Acesso em: 26 jan. 2021.
- WOOD, S. **Package 'mgcv'**. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/mgcv/mgcv.pdf>. Acesso em: 10 set. 2021.
- XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, May 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4518>.
- YANG, X.; WANG, B.; CHEN, L.; LI, P.; CAO, C. The different influences of drought stress at the flowering stage on rice physiological traits, grain yield, and quality. **Scientific reports**, v. 9, 3742, 2019. DOI: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-40161-0>.
- YE, T.; LI, Y.; ZHANG, J.; HOU, W.; ZHOU, W.; LU, J.; XING, Y.; LI, X. Nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization affects the flowering time of rice (*Oryza sativa* L.). **Global Ecology and Conservation**, v. 20, e00753, Oct. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00753>.



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO