

Santo Antônio de Goiás, GO / Março, 2026



Implicações do fenômeno “El Niño – Oscilação Sul” na semeadura no Brasil Central

Alexandre Bryan Heinemann ⁽¹⁾, Ludmilla Ferreira Justino ⁽²⁾, David Henriques da Matta⁽³⁾, Silvando Carlos da Silva⁽¹⁾ e Luís Fernando Stone⁽¹⁾

⁽¹⁾ Pesquisador, Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO. ⁽²⁾ Agrônoma, Dr. em Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO. ⁽³⁾ Professor, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.

Resumo – A compreensão em nível local da variabilidade das chuvas dentro da estação de cultivo e sua relação com o fenômeno El Niño — Oscilação do Sul (ENOS) pode explicar parte da variabilidade na produtividade das culturas ao longo dos anos. Assim, estabelecer calendários de cultivo apropriados em função do fenômeno ENOS em sistemas de sequeiro é fundamental. O objetivo deste estudo foi analisar o início e o término da época de semeadura utilizando dados históricos diários de precipitação pluvial (1980-2013) de 50 estações meteorológicas na região produtora de grãos no Brasil Central. O início da época de cultivo seguiu-se ao período chuvoso, começando pelo centro e norte de Mato Grosso em meados de outubro, seguido por Goiás e Tocantins, e finalmente Rondônia até o final de outubro. O comprimento da janela de semeadura foi reduzido, e a data média ideal de semeadura foi atrasada durante os anos de La Niña para a maioria das estações meteorológicas na região de estudo. Os resultados inferem a necessidade de ajustar os calendários de cultivo para fases específicas do ENOS apenas em regiões que realizam sucessão de culturas. Este estudo propôs um calendário médio de semeadura para as culturas anuais no Brasil Central.

Termos para indexação: Precipitação pluvial, época de cultivo, *Oryza sativa* L., Modelagem de culturas.

Implications of the “El Niño - Southern Oscillation” phenomenon in sowing in Central Brazil

Abstract – Local-level understanding of within-season rainfall variability and its relationship with the El Niño Southern Oscillation (ENSO) can shed light on crop yield variations and establish appropriate cropping calendars in rainfed systems. The objective of this study was to examine the onset and cessation of both the growing seasons using historical daily rainfall datasets (1980-2013) from 50 weather stations distributed across the main grain production region of Brazil. The onset of the growing season followed that of the rainy season, beginning across central and northern Mato Grosso in mid-October, followed by Goiás and Tocantins, and finally Rondônia by the end of October. The length of the sowing window was reduced, and the mean optimal sowing date was delayed during La Niña years for most weather stations in the study region. Our results infer the need to adjust

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

Comitê Local de Publicações
Presidente
Isaac Leandro de Almeida
Membros
Fabiano Severino,
Luís Fernando Stone,
Pedro Marques da Silveira,
Tereza Cristina de Oliveira Borba
e Pricila Vetrano Rizzo

Edição executiva
Tereza Cristina de Oliveira Borba
Normalização bibliográfica e
revisão de texto
Riquelma de Sousa de Jesus
(CRB-2/349)
Projeto gráfico
Leandro Sousa Fazio
Diagramação
Fabiano Severino

Publicação digital: PDF

Todos os direitos
reservados à Embrapa.

the cropping calendars for specific ENSO phases only in regions that conduct crop succession. We proposed a mean optimal crop sowing calendar for annual crops in Central Brazil.

Index terms: Precipitation; Growing season; *Oryza sativa* L.; Crop modeling.

Introdução

Na safra 2021/2022, o Brasil produziu cerca de 271,2 milhões de toneladas (11% da produção mundial) de grãos em uma área total de 74,3 milhões de hectares (Conab, 2022; International Grains Council, 2023). A principal região de produção de grãos (principalmente soja e milho) no país é o Brasil Central, e a expansão agrícola na região nas últimas três décadas foi impulsionada em grande parte pelo mercado internacional de *commodities* (Verburg et al., 2014a, b).

Os estados de Mato Grosso, Goiás, Rondônia e Tocantins abrigam 39% da área total de grãos produzidos no país (46% da produção de grãos) (Conab, 2022). Mato Grosso possui a maior área de produção de grãos (19,2 milhões de ha), seguido por Paraná (10,7 milhões de ha), Rio Grande do Sul (10 milhões de ha) e Goiás (6,9 milhões de ha). A agricultura e a produção regionais dependem muito da estação chuvosa. Portanto, a variabilidade da precipitação pluvial afeta significativamente o bem-estar socioeconômico da população da região, uma vez que seus meios de subsistência e segurança alimentar dependem de sistemas de cultivo que utilizam exclusivamente a água da chuva (Assad; Magalhães, 2014; Abrahão; Costa, 2018).

As relações entre as temperaturas tropicais da água da superfície do mar do Pacífico (SSTs), a Oscilação do Sul do El Niño (ENOS) e a variabilidade climática regional em todo o mundo estão bem estabelecidas (Coelho et al., 2002; Grimm; Tedeschi, 2009; Carvalho et al., 2011). Em particular, vários estudos demonstraram uma ligação entre o ENOS e a variabilidade climática regional do Nordeste (Liu; Juárez, 2010; Rodrigues et al., 2011; Moura et al., 2019), Sudeste (Carvalho et al., 2004) e Sul (Grimm; Pscheidt, 2001; Gelcer et al., 2013) do Brasil, nas quais a probabilidade de inundações anormais no Sul e secas intensas no Norte/Nordeste foram significativamente maiores durante os eventos do El Niño (fase quente do ENOS). O oposto foi observado durante os eventos La Niña (fase fria do ENOS), enquanto o Brasil Central foi classificado como uma região transitória

(Grimm, 2003; Penalba; Rivera, 2016; Moura et al., 2019; Nóia Júnior; Sentelhas, 2019a). Muitos estudos também avaliaram os impactos do ENOS no clima e na produtividade das culturas em escalas globais e regionais (Fraisse et al., 2008; Iizumi et al., 2014; Liu et al., 2014; Battisti et al., 2018, 2019; Nóia Júnior; Sentelhas, 2019a).

No entanto, existem poucos estudos sobre os impactos do ENOS na precipitação pluvial durante a época de cultivo na região Central do Brasil, apesar da alta produção agrícola da região. Além disso, as ligações entre a variabilidade de precipitação pluvial dentro da estação de cultivo e as atividades agrícolas não foram consideradas em investigações anteriores (Marengo et al., 2001; Liebmann et al., 2007; Debortoli et al., 2015). Características locais de variabilidade das chuvas (por exemplo, quantidade de chuvas, início e término das chuvas, número de dias chuvosos, duração da época de cultivo e janelas ótimas de semeadura), sua relação com o ENOS, e seus efeitos na distribuição hídrica sazonal são cruciais para entender as variações de rendimento das culturas nos sistemas de sequeiro (Delerce et al., 2016; Iizumi et al., 2014). Informações sobre essas variáveis ajudam a melhorar os calendários de cultivo existentes e a desenvolver novos sistemas agrícolas e opções estratégicas de manejo da semeadura (Nóia Júnior; Sentelhas, 2019b). Compreender a variabilidade da precipitação pluvial também pode indicar a adequação climática para uma determinada cultura (Araya et al., 2010; Zabel et al., 2014; Rippke et al., 2016), ou ajudar a determinar domínios geográficos para avaliações de lacunas de rendimento e gestão agrônômica (van Wart et al., 2015). Pode, ainda, impactar na questão da segurança alimentar, avaliando de forma mais adequada variações sazonais e geográficas na oferta de grãos para mitigar a escassez em determinadas épocas do ano (Mishra et al., 2008; Paeth et al., 2008; Simelton, 2011). Além disso, determinar o início, o término e o comprimento da época de cultivo e seus vínculos com o ENOS são úteis para quantificar os riscos potenciais de estresses abióticos e bióticos. Essas informações podem ser aplicadas em programas de melhoramento para desenvolver novas variedades para um ambiente de destino específico.

O objetivo deste estudo foi examinar a variabilidade interanual no início e término das épocas de cultivo em resposta ao ENOS na região Central do Brasil. Neste estudo é proposto um calendário de semeadura em função da fase ENOS e disponibilidade hídrica na região de estudo. Este estudo está

alinhado especialmente às metas 2.4 e 13.1 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Material e métodos

Configuração regional

A área de estudo abrange parte do bioma Cerrado (estados de Goiás, sul do Mato Grosso e Tocantins) e a zona de transição entre a Amazônia e o Cerrado (estados de Rondônia, norte do Mato Grosso e Tocantins). A região possui uma superfície de cerca de 1,76 milhão de km², com altitude, latitude e longitude de 300-900 m acima do nível médio do mar, 20° (S) a 5° (S) e 61° (O) a 46° (O) (Figura 1), respectivamente. O clima predominante na região é o tropical de savana (Aw), que representa 100%, 94% e 52,8% da área total do Tocantins, Goiás e Mato Grosso, respectivamente (Alvares et al., 2013). Rondônia (100%) e o norte de Mato Grosso (47,2%) têm clima tropical de monção (Am). O regime pluvial da região apresenta forte sazonalidade (padrão monomodal) com apenas duas estações (chuvosa e seca). Mais de 80% do total anual de chuvas ocorre na estação chuvosa, entre outubro e abril, com maiores chuvas de janeiro a março. Em contraste com a parte norte equatorial da bacia amazônica, que tem uma estação seca relativamente curta (Marengo, 2006), o período de seca na região do estudo normalmente é de maio a setembro (Funatsu et al., 2012). As chuvas anuais na região do estudo variam

de 1.300 (Aw) a 2.300 mm (clima Am, Rondônia e norte de Mato Grosso).

Dados meteorológicos

Foram utilizados conjuntos de dados temporais de precipitação pluvial diária obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram selecionadas 50 estações meteorológicas que apresentaram registros meteorológicos contínuos de 1980 a 2013 (33 anos) para representar a região de estudo (Figura 1; Tabela 1). Esse conjunto de dados foi submetido a um controle de qualidade, verificado quanto à homogeneidade e possíveis *outliers* devido a erros induzidos pelo homem ou equipamentos de medição defeituosos (Ramirez-Villegas; Challinor, 2012; Van Wart et al., 2015). Para preencher os dados faltantes, utilizou-se dados de duas bases: a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Centro de Previsão do Clima (CPC). A ANA é um banco de dados de estações meteorológicas, enquanto o CPC fornece dados em grid. Foi dada preferência para a utilização de dados da ANA, em relação ao CPC para preenchimento dos dados faltantes. O método de preenchimento de dados faltantes é descrito em detalhes em Ramirez-Villegas et al. (2018) e Heineemann et al. (2019). Esse método preenche os dados faltantes de precipitação da base do INMET, procurando o mesmo nos respectivos dia e ano, nas bases ANA e CPC. Os dados faltantes de precipitação pluvial representaram menos que 20% do número total de observações, não impactando na distribuição dos dados.

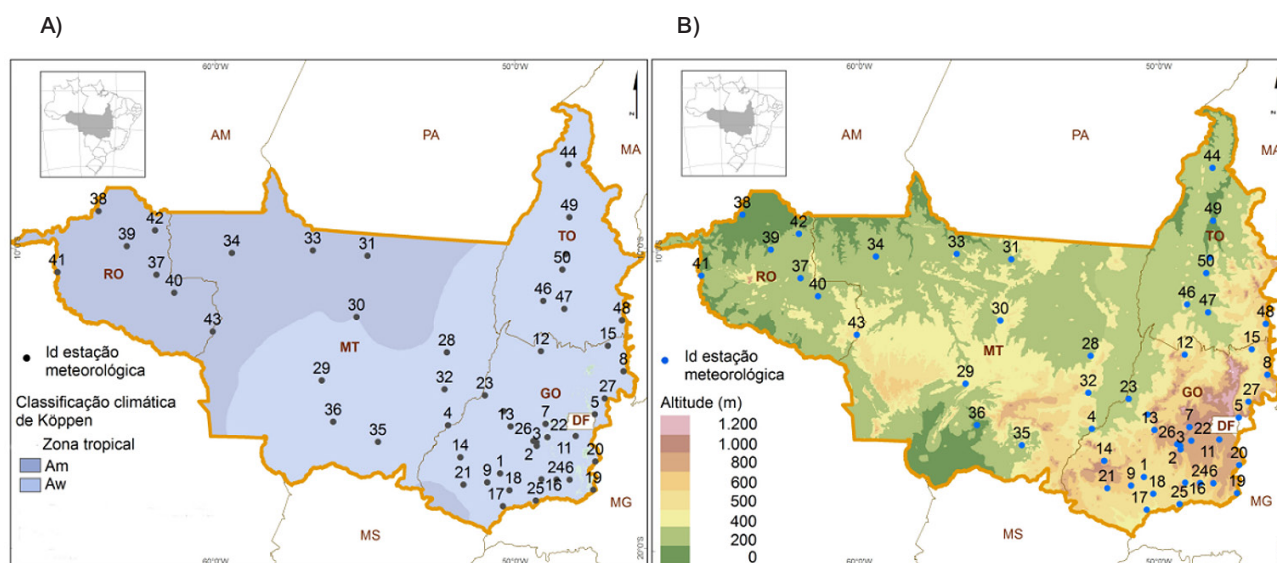


Figura 1. Distribuição das estações meteorológicas (pontos) na região de estudo sobrepostas em mapas geográficos de A) classificação climática de Köppen e B) altitude. Os números representam os identificadores (ID) das estações meteorológicas listados na Tabela 1.

Tabela 1. Identificação (ID), localização (Estado, Município, Latitude, Longitude), altitude e precipitação pluvial anual das estações meteorológicas utilizadas neste estudo, para o período de 1980—2013 (33 anos).

ID	Estado	Município	Latitude (°S)	Longitude (°O)	Altitude (m)	Chuva (mm ano ⁻¹)
1	Goiás	Paraúna	-17,51	-50,49	721	1448
2		Santo Antônio de Goiás	-16,47	-49,28	860	1528
3		Goiânia	-16,59	-49,27	749	1438
4		Aragarças	-15,9	-52,23	310	1458
5		Formosa	-15,53	-47,33	916	1336
6		Ipameri	-17,72	-48,17	764	1412
7		Pirenópolis	-15,85	-48,97	770	1609
8		Posse	-14,1	-46,37	811	1349
9		Rio Verde	-17,8	-50,92	715	1419
10		Faina	-15,43	-50,37	360	1517
11		Luziânia	-16,26	-47,97	930	1331
12		Porangatu	-13,43	-49,13	396	1522
13		Goiás	-15,94	-50,14	496	1667
14		Caiapônia	-16,97	-51,82	692	1490
15		Monte Alegre de Goiás	-13,25	-46,89	557	1280
16		Morrinhos	-17,7	-49,11	771	1529
17		Quirinópolis	-18,6	-50,4	541	1486
18		Bom Jesus de Goiás	-18,07	-50,18	619	1298
19		Catalão	-18,05	-47,38	835	1355
20		Cristalina	-17,11	-47,31	1189	1599
21		Jataí	-17,88	-51,72	696	1517
22		Anápolis	-16,3	-48,91	1017	1502
23		Aruanã	-14,9	-51,00	250	1512
24		Caldas Novas	-17,71	-48,61	686	1488
25		Itumbiara	-18,41	-49,3	448	1290
26		Brazabrantes	-16,42	-49,38	761	1514
27		Planaltina	-15	-47	944	1291
28	Mato Grosso	Canarana	-13,47	-52,27	420	1658
29		Cuiabá	-14,4	-56,45	176	2019
30		Diamantino	-12,29	-55,29	269	1879
31		Matupá	-10,25	-54,92	280	2025
32		Nova Xavantina	-14,7	-52,35	275	1316
33		Alta Floresta	-10,07	-56,75	283	2042
34		Aripuanã	-10,15	-59,45	105	1722
35		Rondonópolis	-16,45	-54,57	227	1555
36		Santo Antônio do Leverger	-15,78	-56,07	141	1671

Continua...

Tabela 1. Continuação...

ID	Estado	Município	Latitude (°S)	Longitude (°O)	Altitude (m)	Chuva (mm ano ⁻¹)
37	Rondônia	Ji-Paraná	-10,88	-61,97	170	1691
38		Porto Velho	-8,76	-63,91	85	1909
39		Ariquemes	-9,93	-62,96	142	1325
40		Cacoal	-11,48	-61,38	200	1358
41		Guajará-Mirim	-10,79	-65,28	128	1331
42		Machadinho D' Oeste	-9,4	-62,02	102	1416
43		Vilhena	-12,77	-60,09	600	1699
44	Tocantins	Araguaína	-7,2	-48,2	227	1654
45		Palmas	-10,19	-48,3	230	1737
46		Gurupi	-11,75	-49,05	287	1311
47		Peixe	-12,02	-48,35	240	1473
48		Taguatinga	-12,4	-46,42	599	1699
49		Pedro Afonso	-8,96	-48,18	201	1676
50		Porto Nacional	-10,71	-48,41	212	1655

Dados do ENOS

As fases do ENOS são definidas pela variação da temperatura da água da superfície do mar (SST) e sua persistência ao longo do Oceano Pacífico equatorial (NOAA, 2025). A Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA) define os eventos El Niño e La Niña com base em uma anomalia de temperatura da água limiar de $\pm 0,5$ °C no Índice Oceânico Niño (ONI), que por sua vez é computado pela média de três meses de anomalias SST através do Pacífico Equatorial Oriental (Bhuvaneshwari et al., 2013). Como a estação chuvosa ocorre entre setembro e março na região do estudo, foi calculada uma média dos valores do ONI de setembro, outubro e novembro (SON) a fevereiro, março e abril (FMA). Para a análise, valores inferiores a $-0,5^{\circ}\text{C}$ foram considerados anos La Niña, valores superiores a $0,5^{\circ}\text{C}$ foram considerados anos El Niño e $-0,5$ a $0,5^{\circ}\text{C}$ foram considerados como anos Neutros (NOAA, 2025).

Crítérios de início da época de cultivo

A época de cultivo foi determinada baseada nas datas de início e de término da estação chuvosa, definidas em Heinemann et al. (2021). O início da época de cultivo (IEC) é definido como um período quando as chuvas são suficientes para semeadura,

germinação, estabelecimento e desenvolvimento pleno (Odekunle, 2004). Existem vários métodos para determinar o IEC (Marteau et al., 2011; Ngetich et al., 2014; Oguntunde et al., 2014), cujos critérios dependem de variáveis subjetivas, como a quantidade de chuva acumulada. De acordo com a classificação americana de solos (textura), os tipos de solos mais relevantes na região de estudo são os Latossolos com textura franco-arenosa, seguidos pelos Latossolos franco-argilosos e argilosos (Heinemann et al., 2015). Para esses tipos de solo, uma quantidade total de chuva de 33 mm em quatro dias consecutivos é suficiente para levar a primeira camada (~17 cm) de solo à capacidade de campo. Esses parâmetros podem variar com fatores como práticas de manejo e tolerância das plantas à deficiência hídrica. No entanto, os valores utilizados neste estudo são considerados conservadores para solos comuns e práticas de manejo no Brasil. Para evitar a determinação de falsos inícios de época de cultivo devido a períodos de deficiência hídrica no início da estação chuvosa, o IEC tem início somente quando 33 mm de precipitação pluviométrica ocorrem em quatro dias consecutivos e ao menos 10 mm ocorrem nos primeiros 10 dias após esse período, com 5 mm distribuídos nos primeiros 5 dias e os outros 5 mm distribuídos nos outros 5 dias seguintes.

Assim, o IEC é definido se um total de 43 mm de chuva acumulada ocorrer durante 14 dias consecutivos. Neste estudo, o término da época de cultivo (TEC) foi assumido como sendo o término da estação chuvosa. O número de dias secos (NDS) e úmidos (NDU) na época de cultivo foi calculado como o número de dias acima (úmido) ou abaixo (seco) de uma quantidade de chuva de 0,1 mm entre IEC e TEC. Os valores de IEC, NDS e NDU foram calculados por estação e subsequentemente interpolados para produzir mapas geográficos.

Determinação da influência do ENOS nas características da época de cultivo

A relação entre o fenômeno ENOS (Anos La Niña/El Niño) e as características da época de cultivo foram analisadas. Para variáveis discretas (IEC, NDS e NDU), foram aplicados modelos lineares generalizados (GLM) com quatro distribuições de ligações discretas: 1) Regressão de Poisson, 2) Regressão binomial negativa, 3) Regressão de Poisson (conjunto de dados longitudinais) e 4) Regressão binomial negativa (conjunto de dados longitudinais). Para todos os modelos estatísticos, as fases ENOS (El Niño, La Niña e Neutro), o estado, e sua interação (estado x ENOS) foram consideradas como efeito fixo qualitativo. Quando a respectiva estrutura do modelo permitiu, a identificação das estações meteorológicas (Figura 1 e Tabela 1) foi testada como efeito aleatório (com interceptos aleatórios e preditores fixos ao nível individual). O critério de informação Bayesiano (BIC) foi considerado como o critério de melhor ajuste. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software STATA v.13.

Calendário do período de semeadura na época de cultivo e sua viabilidade

Um calendário de período de semeadura para cada estação meteorológica dentro do estado foi elaborado com base na influência do ENOS no IEC. O IEC médio considerando os anos de 1980 a 2013 foi definido como data de semeadura média ótima. As datas inicial e final do período de semeadura foram definidas baseadas no IEC médio menos seu respectivo desvio padrão e IEC médio mais o desvio padrão, respectivamente. Para verificar a viabilidade do calendário do período de semeadura (inicial, ótimo e final), o modelo de cultura ORYZA v3 (Li et al., 2017) foi aplicado para avaliar a dinâmica do uso da água pela cultura do arroz de terras altas. A cultivar de arroz de terras altas BRS Primavera foi selecionada, pois é mais sensível à deficiência hídrica, e por muitos anos foi utilizada como testemunha no programa de melhoramento de terras

altas e cultivada na região de estudo (Heinemann et al., 2019). A dinâmica do uso da água foi avaliada usando a variabilidade temporal das razões das médias móveis de cinco dias da transpiração real e potencial (PCEW).

Para cada estação meteorológica e ano (1980-2013), o modelo ORYZA v3 foi usado para simular as datas de semeadura inicial, média ótima e final ao longo dos primeiros 30 dias de desenvolvimento e crescimento do arroz de terras altas. Foram utilizados dados climáticos diários históricos de 1980 a 2013 (precipitação pluvial, temperatura máxima e mínima do ar e radiação solar de ondas curtas descendente) como entrada para o modelo de simulação da cultura. A radiação solar diária para todas as estações meteorológicas, exceto para a estação de Santo Antônio de Goiás (Lat: -16,47; Long: -49,28, ID 2, Tabela 1), foi estimada de acordo com o método de Richardson e Wright (1984). A média das temperaturas máxima e mínima do ar foi calculada quando o intervalo de dados faltantes foi menor ou igual a 2 dias. O conjunto de dados CPC foi usado para lacunas de dados com mais de 2 dias. Verificações visuais da série temporal finalizada (1980-2013) foram realizadas para garantir que os dados estivessem livres de erros ou características implausíveis.

A parametrização do modelo ORYZA v3 e avaliação da cultivar de arroz de terras altas BRS Primavera, utilizada neste estudo, foram descritas em Heinemann et al. (2015), Ramirez-Villegas et al. (2018) e Heinemann et al. (2019). Dados de um solo franco-arenoso foram utilizados para todas as simulações, pois é a textura do solo mais representativa na região (Heinemann et al., 2015). A dinâmica da água foi simulada usando o módulo de balanço hídrico do solo 'PADDY'. Esse é um modelo multicaudada unidimensional (até 10) que simula o balanço hídrico do solo para uma variedade de condições de crescimento, incorporando drenagem livre ou impedida em profundidades particulares no perfil do solo. Todas as simulações foram realizadas na condição de sequeiro, sem restrições bióticas e limitações de nitrogênio. As execuções do modelo foram iniciadas em fevereiro, independentemente da data de semeadura, a fim de estabelecer perfis de água do solo realistas com base nos padrões de chuva anteriores à data real de semeadura. As taxas potenciais de transpiração e evaporação foram calculadas com base no método Priestley-Taylor. A análise da PCEW ao longo das datas de semeadura e estações meteorológicas permitiu verificar a viabilidade do calendário de semeadura da cultura da região de estudo em resposta ao ENOS.

Resultados e Discussão

Início da época de cultivo e número de dias secos e úmidos

O IEC médio em toda a região variou em 35 dias, ocorrendo desde o início de outubro (277 DDA (dia do ano, a partir de 01 de janeiro)) até o início de novembro (312 DDA). O IEC médio, considerando a região de estudo, foi no final de outubro (301 DDA, desvio padrão (dp) = 7,1). As primeiras ocorrências sazonais foram verificadas nas regiões central e norte de Mato Grosso, seguidas por Goiás, Tocantins e Rondônia (Figura 2A). O início sazonal médio em Mato Grosso ocorreu em meados de outubro (295

DDA, dp = 10,4), enquanto em Rondônia, Tocantins e Goiás ocorreu no final de outubro (300, 302 e 303 DDA, dp = 9,0; 4,1; e 4,8, respectivamente). Deveria ser “O número de dias secos (NDS) e úmidos (NDU) durante a época de cultivo (Figura 2B e C) foram consistentes com o número de dias úmidos e secos durante a estação chuvosa (Heinemann et al., 2021). O estado de Tocantins apresentou o maior número de dias úmidos na época de cultivo (118 dias, dp = 7,7), seguido por Rondônia (94, dp = 9,9), Mato Grosso (93, dp = 16) e Goiás (90, dp = 12,6). Foi observada variabilidade temporal significativa no número de dias úmidos e secos, principalmente nos estados de Mato Grosso e Goiás, o que é consistente com as características da estação chuvosa.

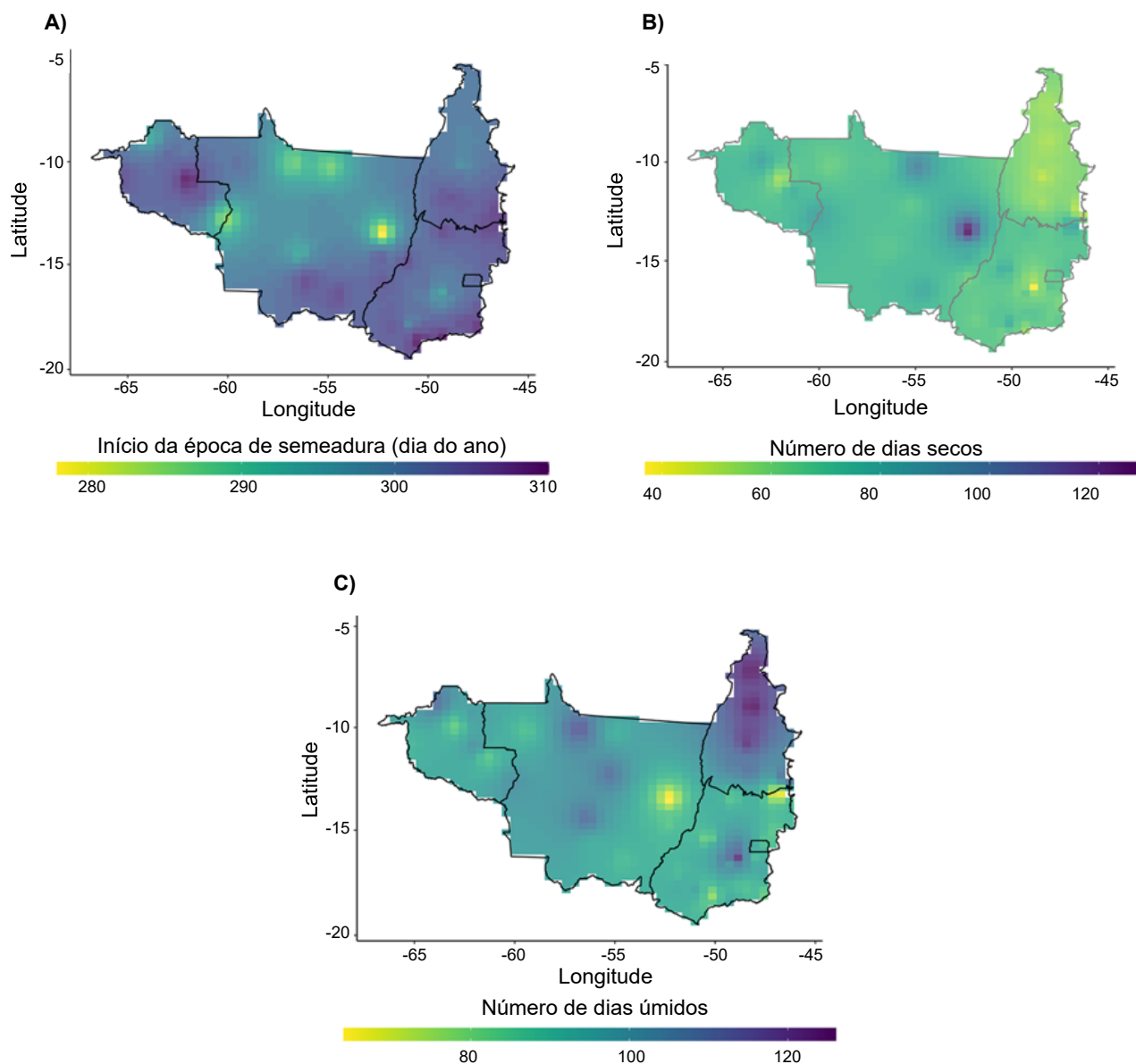


Figura 2. Variabilidade espacial das variáveis médias da época de cultivo, incluindo (A) início da época de cultivo (IEC em DDA - dia do ano); (B) número de dias secos durante a época de cultivo (NDS); e (C) número de dias úmidos na época de cultivo (NDU).

Efeitos do ENOS nas características da época de cultivo

O efeito das fases ENOS (El Niño, La Niña e Neutro) nas características da época de cultivo em cada estado é mostrado na Tabela 2 e Figura 3. O início da época de cultivo foi influenciado pelas fases La Niña e El Niño em Mato Grosso, enquanto apenas o La Niña mostrou influenciar o início da época de cultivo nos demais estados (Tabela 2). O NDS foi afetado positivamente pelo La Niña em Rondônia e Mato Grosso e negativamente pelo El Niño em Tocantins (Tabela 2).

Entre os quatro estados do Brasil Central, observamos as estações chuvosas mais longas em Mato Grosso e Tocantins, com inícios de chuvas mais precoces e terminos de chuvas mais tardios. No entanto, Tocantins apresentou a menor mediana para o número de dias secos durante a estação chuvosa que o Mato Grosso (Figura 3). Esse resultado para Tocantins contrasta com a fraca correlação positiva entre a duração da estação chuvosa e o número de dias secos observados em todos os outros estados. Os resultados demonstram que uma fase ENOS negativa (La Niña) diminui significativamente o número

Tabela 2. Características de variância dos métodos estatísticos aplicados baseados no critério de informação Bayesiano (BIC) para as variáveis “início da época de cultivo” (IEC), “número de dias secos” (NDS) e “número de dias úmidos” (NDU).

Variáveis explicativas	Variáveis dependentes		
	IEC	NDS	NDU
ENOS	Incremento Médio (coeficiente β)		
La Niña	0,01**	-0,085***	-0,023
Neutro	(base)	(base)	(base)
El Niño	0,007	-0,029	-0,023
Estado			
GO	(base)	(base)	(base)
MT	-0,002	0,199***	-0,047
RO	-0,005	0,103	0,066
TO	-0,002	-0,556***	0,227***
ENOS*Estado			
La Niña*GO	(base)	(base)	(base)
La Niña*MT	0,02**	-0,034	0,065
La Niña*RO	-0,02	-0,078	0,110**
La Niña*TO	0,003	0,162**	-0,059
Neutro*GO	(base)	(base)	(base)
Neutro*MT	(base)	(base)	(base)
Neutro*RO	(base)	(base)	(base)
Neutro*TO	(base)	(base)	(base)
El Niño*GO	(base)	(base)	(base)
El Niño*MT	-0,017*	0,009	0,055
El Niño*RO	0,002	0,011	-0,014
El Niño*TO	-0,002	0,164**	-0,081*
Constante	6,5***	128***	2,82***

* nível de significância estatística: *** p < 0,01, ** p < 0,05 e * p < 0,1.

de dias secos na estação chuvosa e na época de cultivo em toda a região. La Niña também atrasou o início da época de cultivo ($p < 0,05$). Tocantins experimenta os efeitos mais significativos do ENOS, particularmente durante as fases quentes deste fenômeno (El Niño), levando a eventos de chuva mais altos, mas pouco frequentes. As fases do El Niño também impactam Mato Grosso, levando ao início de chuvas um pouco mais cedo e duração sazonal mais longa. Em contraste, as fases frias do ENOS (La Niña) afetam predominantemente Rondônia,

levando a aumento da frequência de chuvas totais elevadas. Como esperado, as águas superficiais mais frias no Pacífico oriental durante os anos de La Niña causam redução no número de dias secos durante a época de cultivo em comparação com os anos Neutros e El Niño. O padrão típico de anomalia pluvial do El Niño é mais evidente nas regiões Norte/Nordeste da América do Sul, com condições mais secas nas regiões Sul/Sudeste (Grimm, 2003; Andreoli et al., 2017).

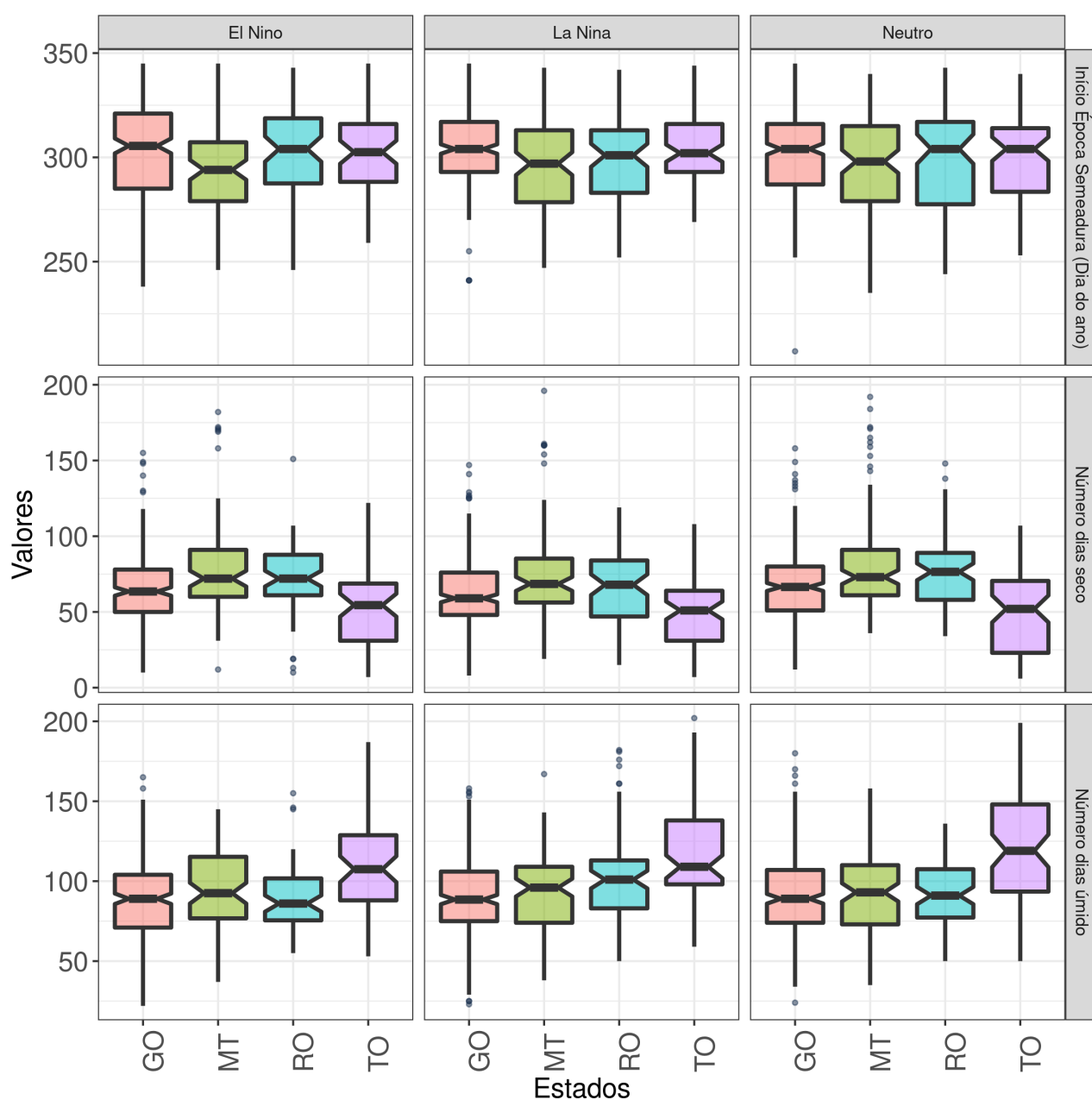


Figura 3. Boxplots destacando a variabilidade das variáveis (nomes no painel direito) em resposta ao ENOS (anos de La Niña, Neutro e El Niño (painel superior)) para os estados. As variáveis da época de cultivo incluem início (dia do ano; IEC), número de dias úmidos (número de dias; NDU) e número de dias secos (número de dias; NDS).

Dinâmica do uso da água e calendário de semeadura das culturas

O IEC foi afetado por La Niña e El Niño em Mato Grosso (Tabela 2). Simulações por meio do modelo ORYZA v3 foram realizadas para determinar as datas de início (IEC médio – desvio padrão), média ótima (IEC médio) e final (IEC médio + desvio padrão) da época de cultivo para os anos Neutros, La Niña e El Niño em cada estação meteorológica.

Em geral, foi observada ampla gama de épocas de semeadura em Mato Grosso, adequadas para a produção de arroz de terras altas e, consequentemente, para outras culturas em toda a região de estudo (Figura 4). Dentro do período de semeadura (Figura 4), a data com maior disponibilidade hídrica (data média ótima de semeadura) corresponde ao valor médio de IEC (círculos marcados em branco na Figura 4). A cultura do arroz de terras altas não sofre estresse por deficiência hídrica no estágio de crescimento inicial (os primeiros 30 dias após a semeadura) quando é semeado no valor médio ou muito próximo do IEC médio. Observou-se que a precipitação pluvial média acumulada nos primeiros 15 e 30 dias após a semeadura foi consistentemente menor nas datas de semeadura precoce em relação às datas de semeadura mais tardias e ótimas. Além disso, a PCEW média (relação entre transpiração real e potencial resultante do modelo de cultura) nos primeiros 30 dias após a semeadura foi consistentemente próxima de 1 (sem estresse hídrico) em datas de semeadura mais tardias e médias ótimas em relação às datas de semeadura precoces.

Também foi identificada maior variabilidade em períodos de semeadura durante os anos Neutros (painel superior, Figura 4) para a maioria das estações meteorológicas em Mato Grosso em relação aos anos de El Niño (painel do meio, Figura 4) e La Niña (painel inferior, Figura 4). A data de semeadura ótima média é geralmente deslocada para o final de outubro em anos de La Niña.

O IEC em Goiás, Tocantins e Rondônia foi afetado apenas durante os anos de La Niña (Tabela 2). Para esses estados, foram realizadas simulações pelo modelo ORYZA v3 para os anos Neutros, El Niño e La Niña para determinar as datas de início (IEC médio – desvio padrão), média ótima (IEC médio) e final (IEC médio + desvio padrão) para cada estação meteorológica. Foi identificada ampla gama de épocas de semeadura para Goiás, Rondônia e Tocantins, que são consideradas adequadas para a produção de arroz de terras altas e, consequentemente, para outras culturas

na região de estudo (Figura 5 e 6). Em média, o período de semeadura foi menor e a data ótima média foi deslocada para a direita (atrasada) nos anos La Niña (Figura 5 e 6) em Goiás. Para todos os estados, a semeadura antecipada ou posterior à data média ótima leva ao aumento da deficiência hídrica. No entanto, a época ainda é adequada para a produção de arroz de terras altas. Estudos anteriores usando simulações de modelos de culturas mostraram que a semeadura precoce pode aumentar o risco de deficiência hídrica para o arroz de terras altas (Heinemann et al., 2015), embora esse efeito tenha sido limitado apenas a algumas estações meteorológicas. A semeadura precoce também foi associada à menor precipitação pluvial acumulada nos primeiros 15 e 30 dias após a semeadura. Além disso, a PCEW média (relação entre transpiração real e potencial resultante do modelo de cultura) nos primeiros 30 dias após a semeadura foi consistentemente próxima de 1 (sem deficiência hídrica) em datas de semeadura mais tardias e médias ótimas em relação às datas de semeadura precoces. A semeadura precoce de soja no Brasil Central também aumentou o risco de perda de safra devido a déficits hídricos (Nóia Júnior; Sentelhas, 2019b).

Os resultados indicam que o ENOS não tem impacto na produtividade de culturas de 1ª safra semeadas no final de outubro/início de novembro (que representa a principal estação chuvosa da produção agrícola), mas influencia a produtividade de culturas de 2ª safra (também referida como “safrinha”) semeadas após fevereiro, como o milho, conforme observado por Anderson et al. (2017) e Arvor et al. (2012). O cultivo duplo – particularmente a sucessão soja-milho – é comum em Mato Grosso, Rondônia e regiões de Goiás. O baixo rendimento das culturas de 2ª safra pode ser atribuído ao La Niña, devido ao baixo teor de água do solo. Foi observada redução no comprimento da janela de semeadura em 23%, 22% e 13% durante os anos de La Niña (Figuras 5 e 6) em Goiás, Tocantins e Rondônia, respectivamente, em relação aos anos Neutros e El Niño. Em Mato Grosso, observou-se uma queda de 18%, em relação ao mesmo fator, para os anos Neutros. Também foi verificado um atraso na data média ótima de semeadura durante os anos de La Niña para todos os estados e durante os anos de El Niño para Mato Grosso. É improvável que uma janela de semeadura mais estreita e um atraso na data média ótima de semeadura sejam uma limitação em regiões com apenas uma safra. A semeadura da soja no final de outubro/início de novembro

(que inclui a data de semeadura ótima média estimada (Figura 5 e 6)) resultaria na semeadura da cultura de 2ª safra no final de fevereiro/início de março. No entanto, atrasos adicionais na semeadura da cultura de 2ª safra aumentariam o risco de déficit hídrico (Soler et al., 2007a, b). A partir

dos resultados deste estudo, pode-se inferir que atraso de 15 dias, além da duração da semeadura (2 a 4 semanas), levaria à semeadura de culturas de 2ª safra após fevereiro, o que aumenta o risco de déficit hídrico.

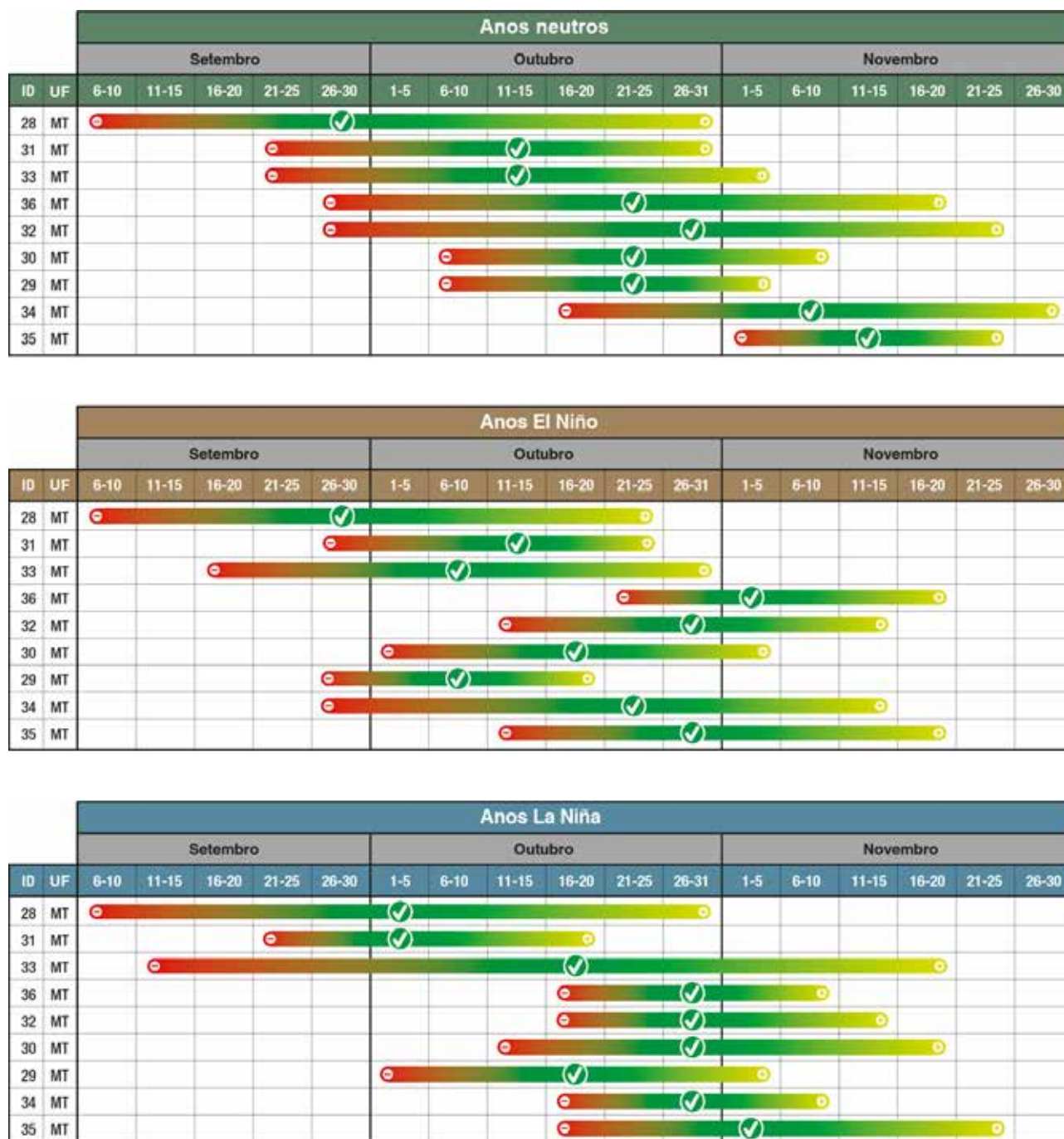


Figura 4. Calendário de semeadura para o Estado de Mato Grosso com base no início da época de cultivo (IEC) para os anos Neutros (painel superior), El Niño (painel do meio) e La Niña (painel inferior). As datas de início da semeadura (IEC médio menos o desvio padrão), ótima média (IEC médio) e final (IEC médio mais o desvio padrão) são representadas por círculos negativos vermelhos (esquerda), círculos marcados verde escuro (meio) e verde claro círculos positivos (direita), respectivamente. As estações meteorológicas (ID) e estado (UF) são indicados na primeira e segunda colunas. A descrição de cada ID de estação meteorológica é apresentada na Tabela 1 e na Figura 1. O número de anos considerados Neutros, El Niño e La Niña foram 13, 10 e 10, respectivamente.

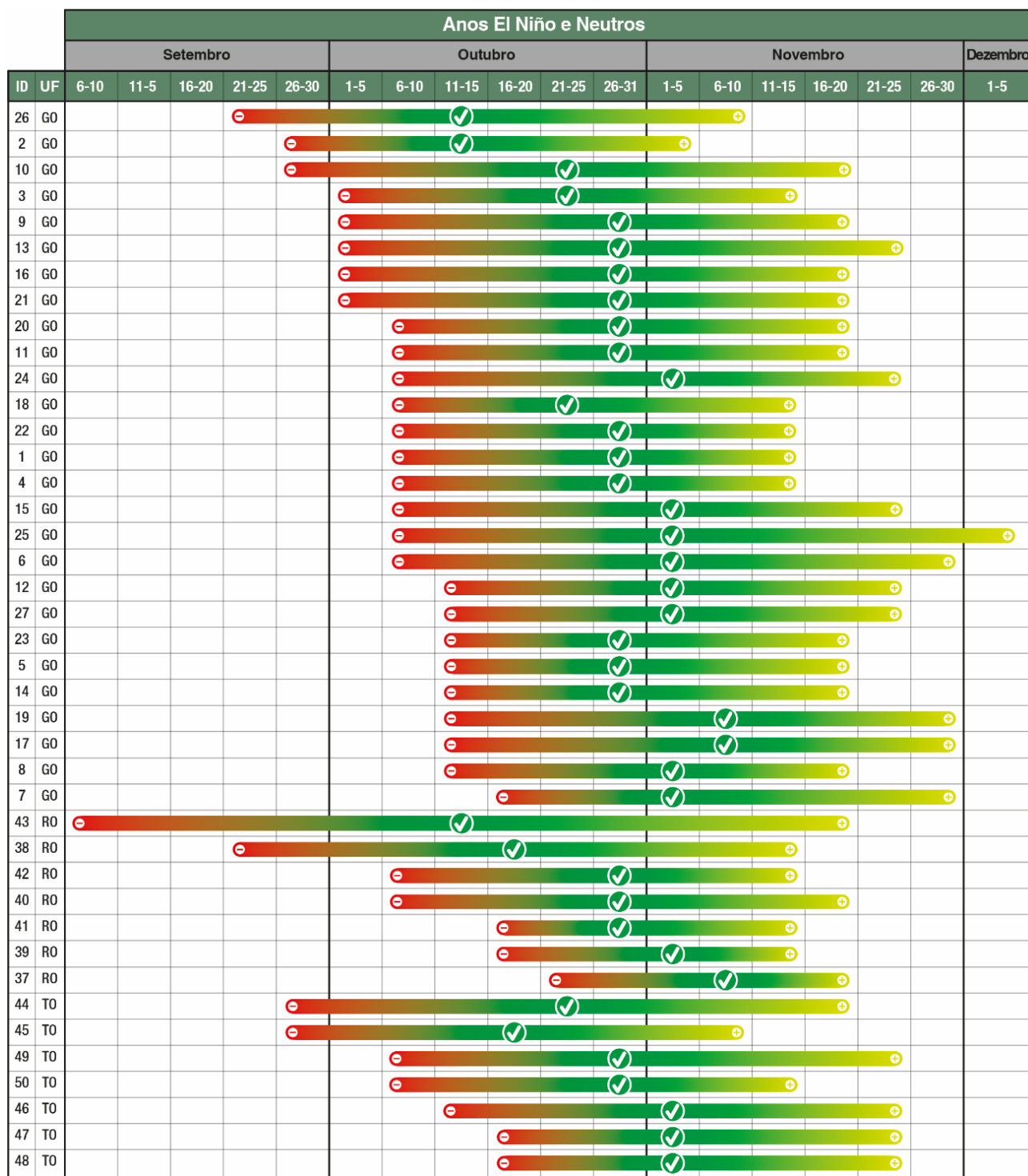


Figura 5. Calendário de semeadura para Goiás, Rondônia e Tocantins com base no início da época de cultivo (IEC) para os anos Neutros e El Niño. As datas de início da semeadura (IEC médio menos o desvio padrão), ótima média (IEC médio) e final (IEC médio mais o desvio padrão) são representadas por círculos vermelhos (esquerda), círculos verdes escuros (centro) e luz círculos verdes positivos (à direita), respectivamente. As estações meteorológicas (ID) e estados (UF) são indicados na primeira e segunda colunas. A descrição de cada ID de estação meteorológica é apresentada na Tabela 1 e Figura 1. O número de anos considerados Neutros, El Niño e La Niña foram 13, 10 e 10, respectivamente.

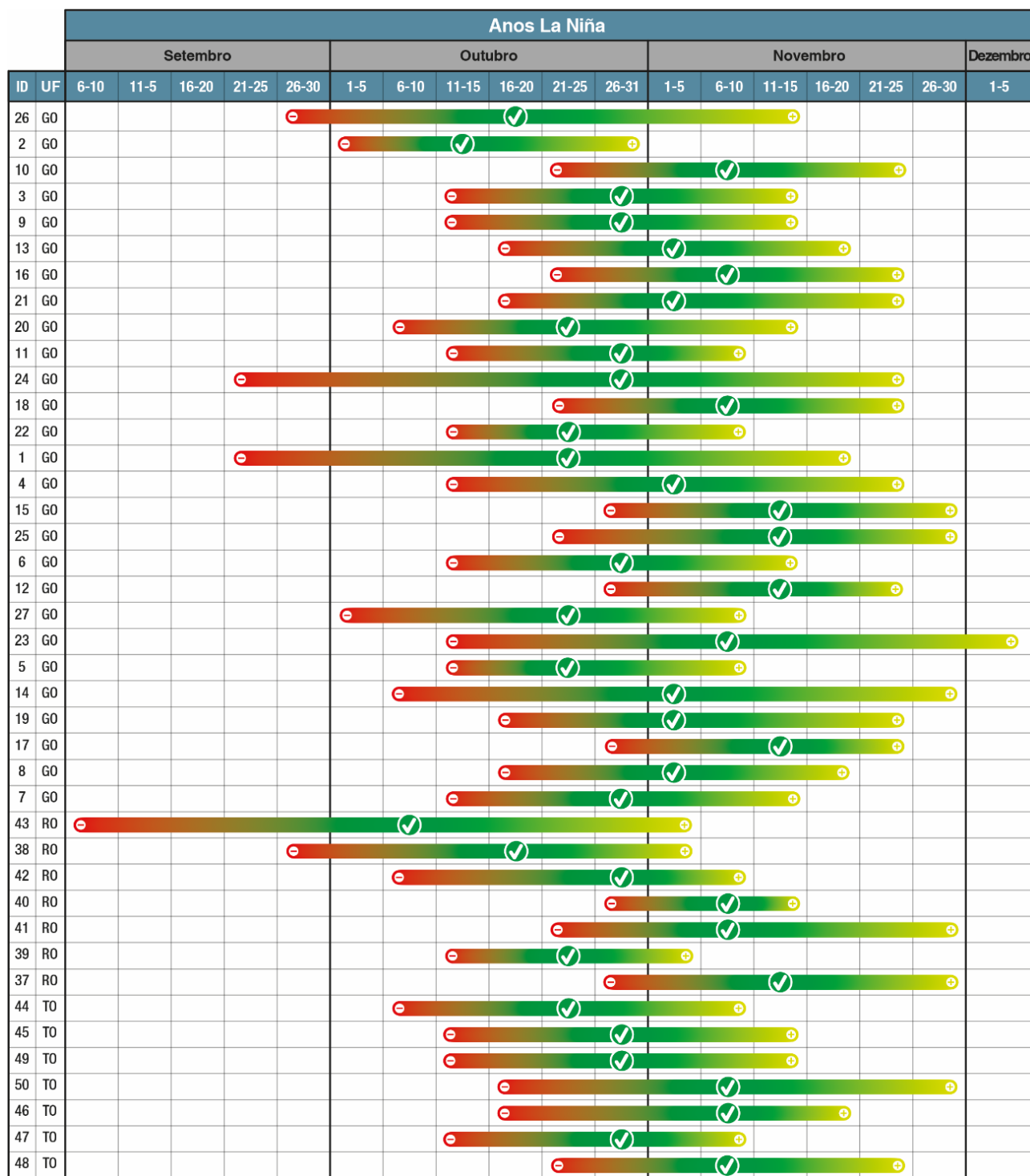


Figura 6. Calendário de semeadura para Goiás, Rondônia e Tocantins com base no início da época de cultivo (IEC) para anos de La Niña. As datas de início da semeadura (IEC médio menos o desvio padrão), ótima média (IEC médio) e final (IEC médio mais o desvio padrão) são representadas por círculos vermelhos negativos (esquerda), círculos verdes escuros (centro) e luz círculos verdes positivos (à direita), respectivamente. As estações meteorológicas (ID) e estados (UF) são indicados na primeira e segunda colunas. A descrição de cada ID de estação meteorológica é mostrada na Tabela 1 e Figura 1. O número de anos considerados Neutros, El Niño e La Niña foram 13, 10 e 10, respectivamente.

Considerações Finais

O ENOS não impacta a produtividade de culturas de 1ª safra semeadas no final de outubro/início de novembro, mas influencia a produtividade de culturas de 2ª safra semeadas após fevereiro. O baixo teor de água do solo em anos de La Niña pode causar redução no rendimento das culturas de 2ª safra. Nesses anos, houve redução no comprimento da janela de semeadura em relação aos anos Neutros e de El Niño, além do atraso na data média ótima de semeadura.

Os resultados também indicam que a duração do período de semeadura não é uma limitação para safras únicas. No entanto, sob sucessão de culturas, a semeadura precoce no Brasil Central teria impacto negativo no rendimento da cultura de 1ª safra devido ao aumento do risco de déficit hídrico durante a fase vegetativa da cultura. Em contraste, a semeadura tardia aumentará o risco de perda da cultura por déficit hídrico durante a fase de enchimento de grãos da cultura de 2ª safra. É importante ressaltar que, considerando apenas uma safra, não há necessidade de ajustar as janelas de semeadura em razão das condições do ENOS. Considerando duas safras, contudo, recomenda-se que diferentes estratégias sejam adotadas pelos agricultores, tanto para os anos de La Niña (todos os estados) quanto para os anos de El Niño (Mato Grosso), como evitar a semeadura de culturas de 2ª safra, selecionar uma cultura de 2ª safra menos suscetível ao déficit hídrico (por exemplo, sorgo), ou selecionar genótipos de ciclo mais curto para soja e milho, particularmente em Goiás. Os resultados deste estudo são úteis para melhorar a tomada de decisões de agricultores, governos, seguradoras, indústrias de insumos e outros setores envolvidos na produção agrícola.

As datas de semeadura identificadas neste estudo são baseadas em simulações para a cultura do arroz. No entanto, as janelas de semeadura estabelecidas podem adequar-se para outras culturas anuais e tolerantes à deficiência hídrica, como milho e soja. As datas de início da época de cultivo estabelecidas neste estudo podem ser usadas para ajudar agricultores e agências governamentais a desenvolver estratégias de adaptação que maximizarão a produtividade e reduzirão os riscos induzidos pelo clima para a produção agrícola.

Trabalhos futuros podem estender esta análise para ser realizada com conjuntos de dados em grade a fim de verificar a robustez das tendências espaciais encontradas neste estudo. Da mesma forma, trabalhos futuros podem se estender a outras culturas, confirmando que as informações para o

arroz são de fato extensíveis a outras culturas anuais, mas também criando calendários de semeadura confiáveis para culturas que são menos prováveis de serem representadas pelo arroz (por exemplo, mandioca, batata, trigo, cevada). Por fim, acreditamos que este trabalho também pode ser estendido a outras regiões de cultivo do Brasil e, futuramente, conectado a sistemas de assessoria ao produtor rural para apoiar a tomada de decisão sobre datas de plantio, caso se estabeleça uma rede de estações meteorológicas mais densa e uniformemente distribuída. A conexão com sistemas de assessoria pode ser feita vinculando nossa abordagem de modelagem a sistemas de previsão meteorológicas, sub-sazonais e/ou sazonais existentes.

Referências

- ABRAHÃO, G. M.; COSTA, M. H. Evolution of rain and photoperiod limitations on the soybean growing season in Brazil: the rise (and possible fall) of double-cropping systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 256–257, p. 32–45, Jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.031>.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, Dec. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- ANDERSON, W.; SEAGER, R.; BAETHGEN, W.; CANE, M. Crop production variability in North and South America forced by life-cycles of the El Niño Southern Oscillation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 239, p. 151–165, May 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.008>.
- ANDREOLI, R. V.; OLIVEIRA, S. S. de; KAYANO, M. T.; VIEGAS, J.; SOUZA, R. A. F. de; CANDIDO, L. A. The influence of different El Niño types on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 3, p. 1374–1390, Mar. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4783>.
- ARAYA, A.; KEESSTRA, S. D.; STROOSNIJDER, L. A new agro-climatic classification for crop suitability zoning in northern semi-arid Ethiopia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 7/8, p. 1057–1064, July 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.04.003>.
- ARVOR, D.; MEIRELLES, M.; DUBREUIL, V.; BÉGUÉ, A.; SHIMABUKURO, Y. E. Analyzing the agricultural transition in Mato Grosso, Brazil, using satellite-derived indices. **Applied Geography**, v. 32, n. 2, p. 702–713, Mar. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.08.007>.

ASSAD, E. D.; MAGALHÃES, A. R. (ed.). **Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas**: primeiro relatório de avaliação nacional. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.pbmc.coppe.ufrj.br/index.php/pt/publicacoes/relatorios-pbmc/item/impactos-vulnerabilidades-e-adaptacao-volume-2-completo>. Acesso em: 16 set. 2025.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PASCOALINO, J. A. L.; SAKO, H.; SÁ DANTAS, J. P. de; MORAES, M. F. Soybean yield gap in the areas of yield contest in Brazil. **International Journal Plant Production**, v. 12, p. 159-168, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0016-0>.

BATTISTI, R.; BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Assessment of different gridded weather data for soybean yield simulations in Brazil. **Theoretical Applied Climatology**, v. 135, p. 237-247, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2383-y>.

BHUVANESWARI, K.; GEETHALAKSHMI, V.; LAKSHMANAN, A.; SRINIVASAN, R.; SEKHAR, U. N. The impact of El Niño/Southern oscillation on hydrology and rice productivity in the Cauvery Basin, India: application of the soil and water assessment tool. **Weather and Climate Extremes**, v. 2, p. 39-47, Dec. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2013.10.003>.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88-108, Jan. 2004. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2).

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; SILVA, A. E.; LIEBMANN, B.; DIAS, P. L. S. The South American Monsoon System and the 1970s climate transition. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 8, p. 1248-1256, June 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.2147>.

COELHO, C. A. S.; UVO, C. B.; AMBRIZZI, T. Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 71, p. 185-197, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1007/s007040200004>.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: safra 2021/22. 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 12 set. 2025.

DEBORTOLI, N. S.; DUBREUIL, V.; FUNATSU, B.; DELAHAYE, F.; OLIVEIRA, C. H. de; RODRIGUES-FILHO, S.; SAITO, C. H.; FETTER, R. Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971-2010). **Climatic Change**, v. 132, p. 251-264, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1415-1>.

DELERCE, S.; DORADO, H.; GRILLON, A.; REBOLLEDO, M. C.; PRAGER, S. D.; PATIÑO, V. H.; VARÓN, G. G.; JIMÉNEZ, D. Assessing weather-yield relationships in rice at local scale using data mining approaches. **PLoS One**, v. 11, n. 8, e0161620, 2016. DOI: FRAISSE, C. W.; CABRERA, V. E.; BREUER, N. E.; BAEZ, J.; QUISPE, J.; MATOS, E. El Niño: Southern oscillation influences on soybean yields in eastern Paraguay. **International Journal of Climatology**, v. 28, n. 10, p. 1399-1407, Aug. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.1641>.

FUNATSU, B.; DUBREUIL, V.; CLAUD, C.; ARVOR, D.; GAN, M. Convective activity in Mato Grosso State (Brazil) from microwave satellite observations: comparisons between AMSU and TRMM datasets. **Journal of Geophysical Research**, v. 177, n. D16, D16109, Aug. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011JD017259>.

GELCER, E.; FRAISSE, C.; DZOTSI, K.; HU, Z.; MENDES, R.; ZOTARELLI, L. Effects of El Niño Southern oscillation on the space-time variability of agricultural reference index for drought in midlatitudes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 174/175, p. 110-128, June 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.02.006>.

GRIMM, A. M. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, n. 2, p. 263-280, Jan. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0263:TENIOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0263:TENIOT>2.0.CO;2).

GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. ENSO and extreme rainfall events in South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 7, p. 1589-1609, Apr. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2429.1>.

GRIMM, A. M.; PSCHIEDT, I. Atmospheric patterns associated with extreme rainfall events in the spring during El Niño, La Niña and neutral years in southern Brazil (in Portuguese). In: CONGRESS OF THE LATIN-AMERICAN AND IBERIAN FEDERATION OF METEOROLOGICAL SOCIETIES, 9.; ARGENTINEAN CONGRESS OF METEOROLOGY, 8., 2001. **Proceedings...** Buenos Aires: FLISMET, 2001.

HEINEMANN, A. B.; RAMIREZ-VILLEGAS, J.; STONE, L. F.; SILVA, A. P. G. A.; MATTA, D. H. da; DIAZ, M. E. P. The impact of El Niño Southern Oscillation on cropping season rainfall variability across Central Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. S1, p. E283-E304, Jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.6684>.

HEINEMANN, A. B.; RAMIREZ-VILLEGAS, J.; REBOLLEDO, M. C.; COSTA NETO, G. M. F.; CASTRO, A. P. Upland rice breeding led to increased drought sensitivity in Brazil. **Field Crops Research**, v. 231, p. 57-67, Feb. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.11.009>.

- HEINEMANN, A. B.; BARRIOS-PEREZ, C.; RAMIREZ-VILLEGAS, J.; ARANGO-LONDOÑO, D.; BONILLA-FINDJI, O.; MEDEIROS, J. C.; JARVIS, A. Variation and impact of drought-stress patterns across upland rice target population of environments in Brazil. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 12, p. 3625–3638, June 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erv126>.
- IIZUMI, T.; LUO, J.-J.; CHALLINOR, A. J.; SAKURAI, G.; YOKOZAWA, M.; SAKUMA, H.; BROWN, M. E.; YAMAGATA, T. Impacts of El Niño Southern oscillation on the global yields of major crops. **Nature Communications**, v. 5, 3712, May 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms4712>.
- INTERNATIONAL GRAINS COUNCIL. **Grain Market Report: GMR541**. 2023. Disponível: https://www.igc.int/en/gmr_summary.aspx. Acesso em: 16 set. 2025.
- LI, T.; ANGELES, O.; MARCAIDA III, M.; MANALO, E.; MANALILI, M. P.; RADANIELSON, A.; MOHANTY, S. From ORYZA 2000 to ORYZA (v3): An improved simulation model for rice in drought and nitrogen-deficient environments. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 237/238, p. 246–256, May 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.025>.
- LIEBMANN, B.; CAMARGO, S. J.; SETH, A.; MARENGO, J. A.; CARVALHO, L. M. V.; ALLURED, D.; FU, R.; VERA, C. S. Onset and end of the rainy season in South America in observations and the ECHAM 4.5 Atmospheric General Circulation Model. **American Meteorological Society**, v. 20, n. 10, p. 2037–2050, May 2007. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI4122.1>.
- LIU, W. T.; JUÁREZ, R. ENSO drought onset prediction in northeast Brazil using NDVI. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 17, p. 3483–3501, Nov. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160010006430>.
- LIU, Y.; YANG, X.; WANG, E.; XUE, C. Climate and crop yields impacted by ENSO episodes on the North China Plain: 1956–2006. **Regional Environmental Change**, v. 14, p. 49–59, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0455-1>.
- MARENGO, J. A. On the hydrological cycle of the Amazon Basin: a historical review and current state-of-the-art. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3a, p. 1–19, 2006.
- MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; KOUSKY, V. E.; FILIZOLA, N. P.; WAINER, I. C. Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon basin. **Journal of Climate**, v. 14, n. 5, p. 833–852, Mar. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<0833:OAEO-TR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<0833:OAEO-TR>2.0.CO;2).
- MARTEAU, R.; SULTAN, B.; MORON, V.; ALHASSANE, A.; BARON, C.; TRAORÉ, S. B. The onset of the rainy season and farmers' sowing strategy for pearl millet cultivation in Southwest Niger. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 10, p. 1356–1369, Oct. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.05.018>.
- MISHRA, A.; HANSEN, J. W.; DINGKUHN, M.; BARON, C.; TRAORÉ, S. B.; NDIAYE, O.; WARD, M. N. Sorghum yield prediction from seasonal rainfall forecasts in Burkina Faso. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 11, p. 1798–1814, Oct. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.06.007>.
- MOURA, M. M.; SANTOS, A. R. dos; PEZZOPANE, J. E. M.; ALEXANDRE, R. S.; SILVA, S. F. da; PIMENTEL, S. M.; ANDRADE, M. S. S. de; SILVA, F. G. R.; BRANCO, E. R. F.; MOREIRA, T. R.; SILVA, R. G. da; CARVALHO, J. R. de. Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. **Science of the Total Environment**, v. 651, part. 1, p. 1639–1651, Feb. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.242>.
- NGETICH, K. F.; MUCHERU-MUNA, M.; MUGWE, J. N.; SHISANYA, C. A.; DIELS, J.; MUGENDI, D. N. Length of growing season, rainfall temporal distribution, onset and cessation dates in the Kenyan highlands. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 188, p. 24–32, May 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.12.011>.
- NOAA. **Cold and warm episodes by season**. 2025. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 16 set. 2025.
- NÓIA JÚNIOR, R. S.; SENTELHAS, P. C. Soybean-maize off-season double crop system in Brazil as affected by El Niño Southern Oscillation phases. **Agricultural Systems**, v. 173, p. 254–267, July 2019a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.012>.
- NÓIA JÚNIOR, R. S.; SENTELHAS, P. C. Soybean-maize succession in Brazil: impacts of sowing dates on climate variability, yields and economic profitability. **European Journal of Agronomy**, v. 103, p. 140–151, Feb. 2019b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.008>.
- ODEKUNLE, T. O. Rainfall and the length of the growing season in Nigeria. **International Journal of Climatology**, v. 24, n. 4, p. 467–479, Mar. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.1012>.
- OGUNTUNDE, P. G.; LISCHIED, G.; ABIODUNC, B. J.; DIETRICH, O. Analysis of spatial and temporal patterns in onset, cessation and length of growing season in Nigeria. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 194, p. 77–87, Aug. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.03.017>.
- PAETH, H.; CAPO-CHICHI, A.; ENDLICHER, W. Climate change and food security in tropical West Africa -A dynamic-statistical modelling approach. **Erdkunde**, v. 62,

n. 2, p. 101–115, 2008. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/25648102>. Acesso em: 16 set. 2025.

PENALBA, O. C.; RIVERA, J. A. Precipitation response to El Niño/La Niña events in southern South America – emphasis in regional drought occurrences. **Advances in Geosciences**, v. 42, p. 1–14, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5194/adgeo-42-1-2016>.

RAMIREZ-VILLEGAS, J.; CHALLINOR, A. Assessing relevant climate data for agricultural applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 161, p. 26–45, Aug. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.03.015>.

RAMIREZ-VILLEGAS, J.; HEINEMANN, A. B.; CASTRO, A. P. de; BRESEGHELLO, F.; NAVARRO-RACINES, C.; LI, T.; REBOLLEDO, M. C.; CHALLINOR, A. J. Breeding implications of drought stress under future climate for upland rice in Brazil. **Global Change Biology**, v. 24, p. 2035–2050, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14071>.

RICHARDSON, C. W.; WRIGHT, D. A. **WGEN**: a model for generating daily weather variables. Washington, DC: US Department of Agriculture, 1984. 90 p.

RIPPKE, U.; RAMIREZ-VILLEGAS, J.; JARVIS, A.; VERMEULEN, S. J.; PARKER, L.; MER, F.; DIEKKRÜGER, B.; CHALLINOR, A. J.; HOWDEN, M. Timescales of transformational climate change adaptation in sub-Saharan African agriculture. **Nature Climate Changes**, v. 6, p. 605–609, Mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2947>.

RODRIGUES, R. R.; HAARSMA, R. J.; CAMPOS, E. D.; AMBRIZZI, T. The impacts of inter-El Niño variability on the tropical Atlantic and Northeast Brazil Climate. **Journal of Climate**, v. 24, n. 13, p. 3402–3422, Jul. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3983.1>.

SIMELTON, E. Food self-sufficiency and natural hazards in China. **Food Security**, v. 3, p. 35–52, Jan. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0114-7>.

SOLER, C. M. T.; HOOGENBOOM, G.; SENTELHAS, P. C.; DUARTE, A. P. Impact of water stress on maize grown off-season in a subtropical environment. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 193, n. 4, p. 247–261, Aug. 2007a. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2007.00265.x>.

SOLER, C. M. T.; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. Application of the CSM-CERES- Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off- season in a subtropical environment. **European Journal Agronomy**, v. 27, n. 2/4, p. 165–177, Oct. 2007b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.03.002>.

VAN WART, J.; GRASSINI, P.; YANG, H.; CLAESSENS, L.; JARVIS, A.; CASSMAN, K. G. Creating long-term weather data from thin air for crop simulation modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 209/210, p. 49–58, Sept. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.020>.

VERBURG, R.; RODRIGUES FILHO, S.; LINDOSO, D.; DEBORTOLI, N.; LITRE, G.; BURSZTYN, M. The impact of commodity price and conservation policy scenarios on deforestation and agricultural land use in a frontier area within the Amazon. **Land Use Policy**, v. 37, p. 14–26, Mar. 2014a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.10.003>.

VERBURG, R.; RODRIGUES FILHO, S.; DEBORTOLI, N.; LINDOSO, D.; NESHEIM, I.; BURSZTYN, M. Evaluating sustainability options in an agricultural frontier of the Amazon using multi-criteria analysis. **Land Use Policy**, v. 37, p. 27–39, Mar. 2014b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.12.005>.

ZABEL, F.; PUTZENLECHNER, B.; MAUSER, W. Global agricultural land resources: a high resolution suitability evaluation and its perspectives until 2100 under climate change conditions. **PLoS One**, v. 9, n. 12, e107522, Sept. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107522>.