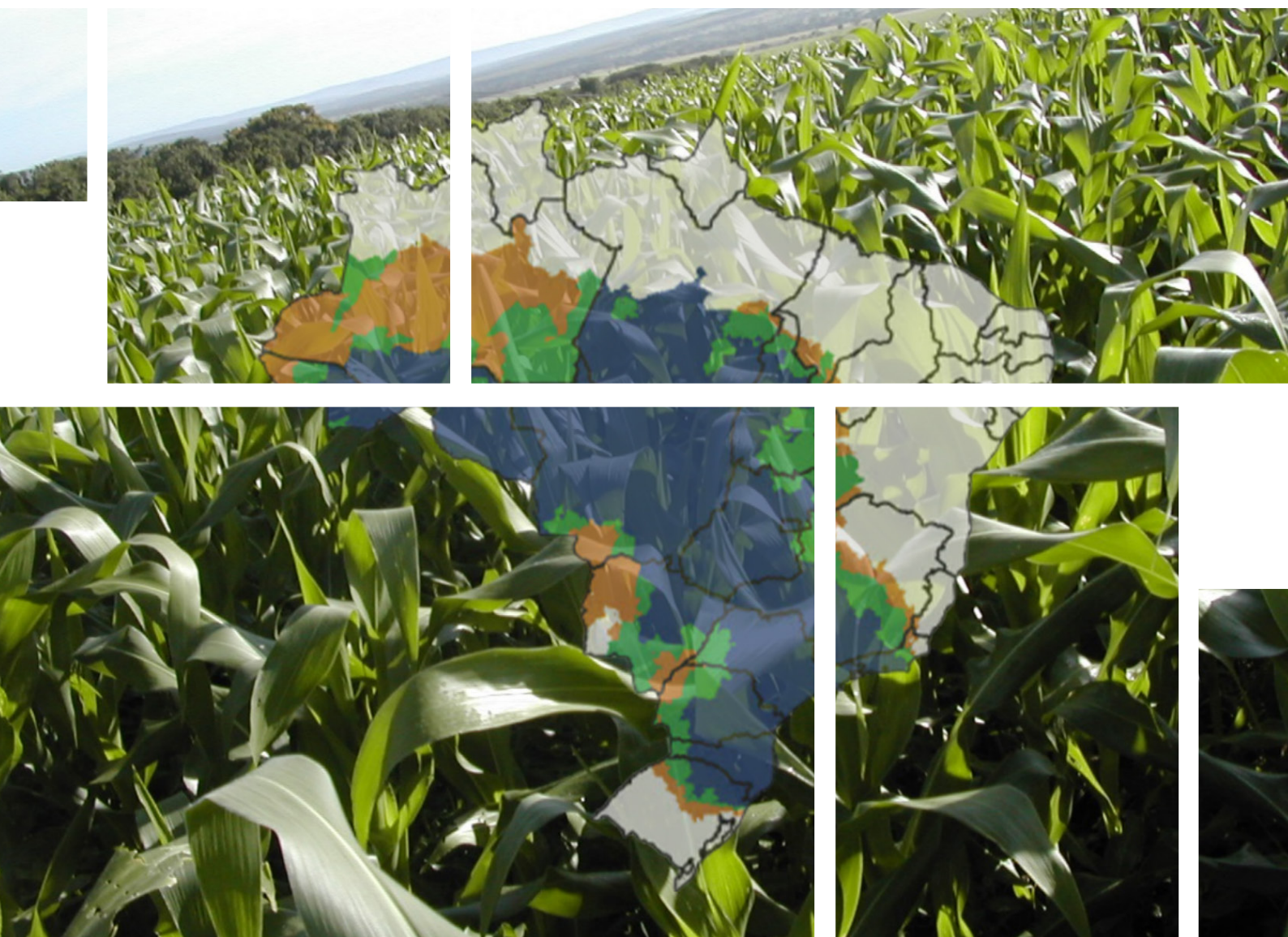




Metodologia para o Zoneamento Agrícola de Risco Climático da Produtividade do Milho – ZarcPro-Milho



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Milho e Sorgo
Ministério da Agricultura e Pecuária*

DOCUMENTOS 279

**Metodologia para o Zoneamento Agrícola de Risco
Climático da Produtividade do Milho – ZarcPro-Milho**

*Tales Antônio Amaral
Camilo de Lelis Teixeira de Andrade
Santiago Vianna Cuadra
José Eduardo Boffino de Almeida Monteiro
Paulo Evaristo de Oliveira Guimarães
Roberto dos Santos Trindade*

Esta publicação está disponível no endereço:
<https://www.embrapa.br/milho-e-sorgo/publicacoes>

Embrapa Milho e Sorgo
Rod. MG, 424 Km 45
Caixa Postal 151
CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG
Fone: (31) 3027-1100
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente
Maria Marta Pastina

Secretária-executiva
Elena Charlotte Landau

Membros
*Cláudia Teixeira Guimarães, Mônica Matoso
Campanha, Roberto dos Santos Trindade e Maria
Cristina Dias Paes*

Revisão de texto
Antonio Cláudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica
Rosângela Lacerda de Castro (CRB-6/2749)

Tratamento das ilustrações
Márcio Augusto Pereira do Nascimento

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Márcio Augusto Pereira do Nascimento

Foto da capa
Camilo de Lelis Teixeira de Andrade

1ª edição
Publicação digital (2023): PDF

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Milho e Sorgo

Metodologia para o Zoneamento Agrícola de Risco Climático da produtividade do
milho: ZarcPro-Milho / Tales Antônio Amaral... [et al.]. – Sete Lagoas :
Embrapa Milho e Sorgo, 2023.

PDF (35 p.) : il. color. – (Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1518-
4277; 279).

1. *Zea mays*. 2. Aptidão climática. 3. Perfil do solo. 4. Modelo de simulação. I.
Amaral, Tales Antônio. II. Andrade, Camilo de Lelis Teixeira de. III. Cuadra,
Santiago Vianna. IV. Monteiro, José Eduardo Boffino de Almeida. V. Guimarães,
Paulo Evaristo de Oliveira. VI. Trindade, Roberto dos Santos. VII. Série.

Autores

Tales Antônio Amaral

Biólogo, doutor em Agronomia, pós-doutorando em Modelagem de Sistemas Agrícola, bolsista da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG;

Camilo de Lelis Teixeira de Andrade

Engenheiro agrícola, doutor em Engenharia de Irrigação, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG;

Santiago Vianna Cuadra

Meteorologista, doutor em Agronomia, Meteorologia Aplicada, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP;

José Eduardo Boffino de Almeida Monteiro

Engenheiro agrônomo, doutor em Agrometeorologia, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP;

Paulo Evaristo de Oliveira Guimarães

Engenheiro agrônomo, doutor em Melhoramento de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG;

Roberto dos Santos Trindade

Engenheiro agrônomo, doutor em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Agradecimentos

Ao graduando em Engenharia Agrônoma Luiz Antônio Saraiva Júnior, pela preparação do mapa da Figura 1. Ao Banco Central do Brasil, pelo suporte financeiro, e à Embrapa, pelo suporte físico, durante a condução do projeto.

Apresentação

A maior parte da produção de milho no Brasil ocorre em regime de sequeiro, tanto na primeira quanto na segunda safra, estando, portanto, sujeita a instabilidades climáticas que podem afetar o rendimento de grãos.

A irregularidade no regime de chuvas, que induz estresse hídrico na cultura, é o principal fator responsável pela quebra da produtividade do milho no País. Algumas estratégias de manejo da cultura podem ser empregadas para atenuar esse problema, entre as quais, a escolha do período de semeadura adequado, preconizado no Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc), do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa). As ferramentas computacionais utilizadas no zoneamento necessitam, todavia, serem aprimoradas, principalmente em razão da nova era chamada agricultura digital, na qual os produtores do mundo e do Brasil tendem a se engajar. Esse novo paradigma deverá demandar o uso cada vez mais constante de modelos de simulação que permitem a integração de conhecimento para se avaliarem os diversos fatores que afetam a agricultura, e auxiliar os produtores na tomada de decisão.

O estudo em questão fez uso de um modelo de simulação, baseado em processos biofísicos, para estabelecer o Zarc para a cultura do milho no País, levando-se em consideração seis classes de água disponível no solo, três durações de ciclo das cultivares, três níveis de risco, além de dez classes de produtividade de grãos. Dessa forma, o produtor poderá saber, para o seu tipo de solo e cultivar, o risco de se semear em certa data, considerando um certo nível de produtividade esperada e, assim, ajustar o seu sistema de produção. A inclusão de níveis de produtividade esperada possibilitará, também, um melhor planejamento da aplicação de seguro agrícola, quer seja público ou privado.

Frederico Ozanan Machado Durães

Chefe-Geral da Embrapa Milho e Sorgo

Sumário

Introdução.....	8
Procedimentos Utilizados.....	11
Modelo de simulação.....	11
Base de dados de clima.....	12
Base de dados de perfis de solo.....	13
Base de dados da cultura do milho.....	14
Parametrização do modelo de simulação.....	15
Validação ou avaliação da capacidade preditiva do modelo.....	17
Aplicação do modelo no ZarcPro-Milho.....	17
Manejo da cultura do milho.....	17
Condições iniciais requeridas pelo modelo.....	18
Critérios de decisão implementados diretamente no modelo.....	18
Cenários simulados.....	18
Níveis de produtividade esperada e de risco climático.....	20
Avaliação do conceito do ZARCPro para Milho.....	21
Considerações.....	31
Referências.....	32

Introdução

O milho é uma gramínea pertencente à família Poaceae e à espécie *Zea mays* L. A cultura é amplamente adaptada às mais diversas condições edafoclimáticas. É um dos três cereais mais cultivados no planeta, sendo também uma das principais fontes de alimento dos brasileiros e de toda a população mundial. Todavia, enquanto apenas 2% da produção de milho é destinada ao consumo humano, 53% da demanda total vai para as rações animais (BRFétil, 2022). No Brasil, o milho é cultivado em todos os estados e em áreas desde o nível do mar até em grandes altitudes. Ele apresenta importância social e econômica, pois, além da alimentação humana e animal, é também utilizado na produção de etanol e faz parte da pauta de exportações. Em 2021, o País foi o terceiro maior exportador de milho (Henrique, 2022), com uma perspectiva de exportar, na temporada 2022/2023, 44,5 milhões de toneladas (Sanches; Sales, 2022), cifra que tende a aumentar com o início das exportações para a China.

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, atrás dos Estados Unidos e da China. A área plantada no nosso País, na safra 2020/2021, cresceu 7,2% em relação à safra anterior, alcançando 20 milhões de hectares, gerando uma produção total de 87 milhões de toneladas. Entretanto, a produção nas duas principais safras reduziu 15,1%, em razão da seca, que ocorreu em momentos cruciais das lavouras, e também pelas geadas ocorridas nos principais estados produtores da região Centro-Sul brasileira. Na segunda safra, a área cresceu 9%, aproximando de 15 milhões de hectares, enquanto a produção foi de 60,7 milhões de toneladas, com uma produtividade média pouco maior que 4 t ha⁻¹. No estado do Mato Grosso, maior produtor nacional na segunda safra, verificou-se que as lavouras de milho semeadas na janela ideal de plantio, em torno de 60%, obtiveram excelente desempenho, impulsionado pelos crescentes investimentos aplicados na cultura. Por outro lado, o restante das lavouras, semeadas fora da janela, enfrentou diferentes graus de estresse hídrico em razão da estiagem, o que gerou diversidade de rendimentos, levando a uma redução geral de 12% na produtividade do estado. É importante ressaltar que há, ainda, uma terceira safra de milho, de 1,6 milhão de hectares, proveniente do Nordeste e do Norte, que é estratégica para a segurança alimentar daquelas regiões (Anuário..., 2022).

O milho é cultivado no Brasil, predominantemente, no regime de sequeiro, estando sujeito aos eventuais efeitos deletérios das condições climáticas, como geada e estresse hídrico, entre outros, especialmente na segunda safra. Uma estratégia, praticamente sem custo, para mitigar esse problema é a semeadura na época recomendada pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc) (Brasil, 2022). Entretanto, o Zarc, nos moldes atuais, não possibilita a estimativa da produtividade esperada, o que limita a tomada de algumas decisões por parte de produtores, seguradoras, instituições que ofertam crédito e agências governamentais.

O período de crescimento e desenvolvimento do milho é limitado pela água do solo, pela temperatura do ar e pela radiação solar ou luminosidade. A cultura necessita que alguns índices, relacionados a esses elementos, atinjam condições ótimas para que ela expresse seu potencial produtivo (Mantovani et al., 2015).

O milho é uma planta com metabolismo C4, caracterizada por ter elevado potencial produtivo. Dentre as plantas que constituem o grupo C4, o milho é a que tem maior eficiência no uso da radiação solar e praticamente não apresenta saturação por radiação, ou seja, não reduz o processo de fotossíntese ao longo do dia, conseguindo, então, manter sua produção de carboidratos em um nível adequado. Outro ponto importante é que a planta de milho, sobretudo as cultivares mais recentes, é insensível ao fotoperíodo, sendo denominada fotoneutra. Nesse caso, o fator temperatura apresenta grande

influência sobre a entrada da planta no período reprodutivo (Rehagro, 2022). Dentre os fatores que mais limitam a produtividade de milho, o déficit hídrico é o principal, podendo causar perdas na ordem de até 50%.

O milho é uma cultura exigente em água, embora possa ser cultivado em regiões onde as precipitações vão desde 250 mm até 5.000 mm anuais (Mantovani et al., 2015), sendo que a quantidade de água usada pela planta, durante seu ciclo, pode variar de 400 mm a 700 mm (Doorenbos; Pruitt, 1975). No Brasil, o cultivo do milho é realizado, predominantemente, sob regime de sequeiro, estando sujeito a eventuais estresses hídricos decorrentes das instabilidades no regime de chuvas. O déficit hídrico afeta praticamente todos os aspectos relacionados ao desenvolvimento das plantas, reduzindo a área foliar, diminuindo a fotossíntese e interferindo em vários outros processos (Bergamaschi, 1992). Os efeitos causados pelo déficit hídrico são decorrentes das modificações na anatomia, morfologia, fisiologia e bioquímica das plantas de milho. Em termos práticos, o estresse hídrico reduz o índice de área foliar da cultura e, por consequência, o acúmulo de matéria seca que, por sua vez, afeta o rendimento. A maior redução na produção ocorre em consequência do déficit hídrico durante os períodos que englobam a polinização, a formação do zigoto e o desenvolvimento inicial do grão (Bergamaschi et al., 2006). Em cultivos de sequeiro, a variação interanual no regime de chuvas impõe grandes riscos aos agricultores, fazendo com que ocorram quebras consideráveis no rendimento de um ano para o outro. Os veranicos, que são períodos secos dentro do período chuvoso, muito comuns nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, sistematicamente causam quebras de produtividade no milho, especialmente quando coincidem com as fases críticas da cultura para o estresse hídrico. Por outro lado, as secas ou a redução no volume de chuvas, que ocorrem mais na região Nordeste, podem causar prejuízo, mesmo quando acontecem fora dos períodos críticos. O uso de práticas conservacionistas e de genótipos com diferentes ciclos e a observância do zoneamento agroclimático são práticas que podem atenuar os efeitos do estresse hídrico.

As necessidades hídricas de uma cultura, em diferentes ambientes e fases de seu desenvolvimento, podem ser estimadas por meio de relações entre sua evapotranspiração máxima (ET_m) e a evapotranspiração de uma planta de referência (ET_o). O coeficiente de cultura (K_c) é a razão entre a ET_m e a ET_o, sendo essa última comumente estimada empregando dados climáticos. Os métodos de estimativa de ET_o mais utilizados são descritos por Doorenbos e Pruitt (1975) e Doorenbos e Kassam (1979). Resultados de pesquisa indicam que, no Rio Grande do Sul, a ET_m do milho foi 17% maior quando se utilizou uma população de plantas de 67 mil plantas por hectare, em comparação com 50 mil (Radin et al., 2003; Bergamaschi et al., 2001). Portanto, deve-se atentar para o ajuste dos valores de K_c para sistemas de produção de milho empregando alta tecnologia que normalmente incorporam populações de plantas mais elevadas. Dados relevantes de coeficiente de cultura (K_c), para diferentes fases do ciclo do milho e para duas populações de plantas, foram reportados por Bergamaschi e Matzenauer (2009).

Considerando que o efeito do fotoperíodo no desenvolvimento milho é nulo ou mínimo, as condições de temperatura/calor é que têm influência significativa na duração do ciclo e no rendimento de grãos desse cereal (Rehagro, 2022). A soma térmica ou de graus-dia, baseada no acúmulo energético acima de determinada temperatura base, é geralmente utilizada em modelos que descrevem o desenvolvimento fenológico e o crescimento do milho. Dentro de um mesmo grupo de maturação, é possível estimar a ocorrência de fases da cultura, para diferentes genótipos, regiões e épocas de cultivo, utilizando a temperatura do ar como única variável (Bergamaschi; Matzenauer, 2009). Berlato e Sutili (1978) obtiveram, como melhores temperaturas mínimas basais, 4 °C para híbridos precoces, 6 °C para os de ciclo médio, e 8 °C para tardios, segundo a classificação adotada à

época. Porém, Kiniry (1991) considerou, como limites extremos para a fenologia do milho, 8 °C e 44 °C, sendo que o crescimento máximo ocorre entre 26 °C e 34 °C. Para diversos genótipos da Austrália, Birch et al. (1998) adotaram as seguintes temperaturas cardinais, para cálculo de graus-dia: Tb inferior de 8 °C, Tótima de 30 °C e TB superior de 40 °C.

A ocorrência de geadas, sobretudo no final de inverno e no início de primavera, é um risco provável, demandando que o zoneamento da cultura seja observado. Enquanto o ponto de crescimento das plantas estiver abaixo do solo (até em torno de V3), geadas, granizo e vendavais têm pequeno ou nenhum efeito sobre o rendimento final da lavoura. Em V6, as geadas são mais danosas, assim como o granizo e os vendavais, pois as plantas têm seu ponto de crescimento acima do nível do solo (Ritchie et al., 1993). Inundações podem ocorrer, mas em áreas específicas que favoreçam esse fenômeno. Entretanto, excesso de chuvas durante o estabelecimento da cultura ou na colheita podem causar danos consideráveis.

Durante o florescimento, a combinação de déficit hídrico e altas temperaturas diurnas afetam a polinização e a formação inicial dos grãos, resultando em diminuição do número de grãos por espiga. Noites quentes, durante esse estágio, também podem reduzir o número de grãos, afetando a sobrevivência e o desenvolvimento inicial dos grãos (Ritchie et al., 1993; Nielsen, 2005). Por outro lado, altas temperaturas, sobretudo durante a noite, podem reduzir a assimilação líquida das plantas, por causa do aumento das perdas por respiração. Brunini et al. (2006) também observaram que temperaturas noturnas elevadas podem prejudicar o desenvolvimento da cultura, embora a escolha de épocas de semeadura apropriadas possa evitar tais condições, inclusive mitigando estresses térmicos no período diurno, durante o florescimento.

A radiação solar é a principal forçante relacionada à produtividade de milho. Qualquer fator que afete o índice de área foliar e, por consequência, a interceptação da radiação fotossinteticamente ativa, afetará a produtividade da cultura. Dentre eles, destacam-se o déficit de água e de nitrogênio no solo, a densidade e o arranjo de plantas na área (Bergamaschi; Matzenauer, 2009).

O Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc) é uma ferramenta utilizada hoje no Brasil que permite, a partir do conhecimento das condições meteorológicas da localidade, do tipo de solo e da cultivar que está sendo trabalhada, definir janelas de semeadura que reduzem o risco de quebra de produtividade das culturas, dentre elas, o milho. Entretanto, patamares de produtividade ainda não são levados em consideração no atual zoneamento de risco climático.

Uma alternativa para se incluir classes de produtividade no Zarc é a utilização de modelos de crescimento de culturas, como o *Crop Simulation Model*, CSM-CERES-Maize, pertencente ao sistema *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (DSSAT) (Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2019). A modelagem pode ser uma ferramenta muito útil nesse caso, pois, além de possibilitar a simulação de cenários diversos de manejo dos fatores de produção, permite o entendimento dos processos e o isolamento do efeito de alguns fatores na produtividade das culturas. Possibilitam, ainda, a análise da dinâmica da água e de nutrientes no solo, do efeito das práticas de manejo das culturas e das condições meteorológicas.

O objetivo deste estudo foi desenvolver uma metodologia para aplicação de um modelo, baseado em processos biofísicos, no Zoneamento Agrícola de Risco Climático da Produtividade (ZarcPro), para a cultura do milho. Os resultados esperados, com a aplicação dessa metodologia, atendem aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), da Organização das Nações Unidas (ONU). Mais especificamente, contempla o ODS 13 – “Ação contra a mudança global do clima” (Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos), por auxiliar no cumprimento da meta 13.1, que consiste em

“Reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais em todos os países”.

Procedimentos Utilizados

Empregou-se neste estudo o modelo baseado em processos CSM-CERES-Maize, da plataforma de simulação *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (DSSAT, Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2019). Para a calibração e avaliação do modelo CSM-CERES-Maize procedeu-se à organização e à análise de dados de manejo, fenologia e produtividade de milho, obtidos em ensaios de valor de cultivo e uso (VCU), conduzidos em diferentes safras e locais no País. Parte dos dados foi empregada para parametrizar os coeficientes-modelo, e o restante foi utilizado para avaliar a capacidade preditiva dele. Para a execução das simulações, séries históricas de dados diários de clima, obtidas de diferentes bases ou fontes, foram organizadas e consistidas, assim como dados de solos coletados em todo o País.

Após o processo de calibração e avaliação do modelo, o modelo CSM-CERES-Maize foi empregado para simular o rendimento para todo o território nacional, e as séries históricas do rendimento simulado foram processadas para os diferentes cenários do ZarcPro. Nessa etapa, foram considerados os perfis de solos modais do Zarc (Teixeira et al, 2021) e as séries climáticas de 34 anos de dados históricos. As simulações são representativas para um manejo de uma lavoura de milho típica, de alta produtividade, e com critérios de decisão, como umidade do solo na semeadura e efeito de geada na cultura. Mapas e tabelas foram gerados e avaliados pela equipe de pesquisadores da Embrapa envolvidos com o Zarc e por usuários dos resultados finais do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) e do Banco Central do Brasil, durante reuniões de validação do produto gerado. A seguir, serão detalhados todos os procedimentos empregados no desenvolvimento da metodologia e nas etapas de avaliação dos produtos derivados.

Modelo de simulação

O modelo usado no ZarcPro-Milho é o CSM-CERES-Maize, da plataforma *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (DSSAT), que vem sendo desenvolvido e aprimorado há mais de 36 anos e contempla 42 culturas (Hoogenboom et al., 2019). O DSSAT é a suíte de modelos de culturas mais largamente utilizada em 183 países, pelos mais diversos tipos de profissionais. Os estudos realizados com o DSSAT geraram mais de 7.000 publicações. O pacote DSSAT inclui base de dados de clima, de solos e de resultados experimentais de culturas, além de ferramentas e interfaces que facilitam a adição de novos dados, a comparação de resultados de simulações com resultados observados e a determinação do manejo economicamente viável para uma certa condição de solo, clima e cultivar. O sistema permite ao usuário conduzir uma infinidade de ensaios virtuais, de forma a avaliar a resposta das culturas ao ambiente de produção e sua alteração. Desta forma, os resultados simulados complementam os dados de experimentação de campo, possibilitando compreender e verificar os efeitos de clima, solo e sistemas de produção no comportamento das culturas.

O modelo CSM-CERES-Maize simula o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade do milho, em função da dinâmica do sistema solo-planta-atmosfera. Como entrada, o modelo requer dados diários de clima, informações da superfície e do perfil do solo e detalhes do manejo da cultura, além de informações e regras de inicialização. As simulações são iniciadas no plantio, ou antes dele, estabelecendo-se um período de pousio suficiente para que as condições de manejo no modelo se aproximem das condições reais. A marcha de cálculos e de atualizações de valores das variáveis é

de um dia. Ao final de cada dia, os balanços de água, nitrogênio, fósforo e carbono são atualizados, assim como os estádios de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da cultura.

No caso do milho cultivado em ambiente tropical, a duração das fases fenológicas, em dias, depende exclusivamente da temperatura do ar, mediante um sistema de soma térmica, expressa em graus-dia. Cada fase ou estágio de desenvolvimento da cultura, da semeadura até a maturidade fisiológica, requer um certo valor de graus-dia para se completar (parâmetros P1 e P5 do modelo CSM-CERES-Maize). Da mesma forma, o número de folhas é definido por um parâmetro que corresponde à soma térmica necessária para emitir folhas subsequentes (parâmetro intervalo do filocrono, PHINT, do modelo). Portanto, a duração do ciclo e o número de folhas do milho dependem da interação entre a cultivar e as condições climáticas. Outros parâmetros do modelo estão relacionados ao número de grãos por unidade de área de plantio (parâmetro G1) e ao peso unitário de grãos (parâmetro G3). A obtenção dos valores desses parâmetros depende de dados reais, coletados em experimentos ou lavouras conduzidas em campo, sob condições ótimas de cultivo, e de um procedimento de ajuste denominado parametrização ou calibração. Os valores dos parâmetros são específicos para cada cultivar.

Em todas as simulações realizadas no processo de parametrização, avaliação e aplicação do modelo, os coeficientes P2 (até que ponto o desenvolvimento, expresso em dias, é atrasado para cada hora de aumento no fotoperíodo acima do fotoperíodo mais longo, no qual o desenvolvimento prossegue a uma taxa máxima, que é considerada 12,5 horas) e PHINT (intervalo do filocrono, que é o intervalo em soma térmica, graus-dia, entre sucessivas aparições de pontas de folhas) assumiram valores fixos de 0,5 dia e 45,5, respectivamente.

Ao final da simulação, o modelo fornece uma série de arquivos com dados detalhados de crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura, contemplando valores de dezenas de variáveis, em base diária, acumulados ao longo do ciclo, ou em pontos específicos do ciclo, permitindo, dessa forma, uma análise completa do desempenho agrônomo e biofísico da cultura.

Base de dados de clima

A base de dados climáticos utilizada no ZarcPro é composta por séries históricas obtidas a partir das redes de estações meteorológicas e pluviométricas, convencionais e automáticas, de várias instituições, como o Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) e o sistema HidroWeb, operado pela Agência Nacional de Águas (ANA). Os dados são também provenientes do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), além de redes estaduais mantidas por instituições ou empresas públicas. Os dados utilizados são da base gerada por interpolação, conforme descrito por Xavier et al. (2016).

Após a consolidação dos dados diários de temperatura máxima, *TMax*, temperatura mínima, *TMin*, radiação solar incidente, *SRAD* e precipitação, *RAIN*, eles foram interpolados em uma grade cobrindo todo o País.

Na fase de parametrização e avaliação do modelo, empregaram-se dados de clima diários, que compreenderam o período da semeadura à colheita dos ensaios, de cada genótipo, de cada local e em cada ano agrícola. Para tal, utilizaram-se dados do ponto de grade mais próximo de cada local onde foi conduzido um ensaio de VCU.

Da mesma base geral de dados de clima, previamente organizada em pontos de grade cobrindo todo o País, foram preparadas séries históricas, contendo 34 anos de dados diários de *TMax*, *TMin*,

SRAD e RAIN, iniciando-se em 1981. Essas séries, formatadas como arquivos de clima do DSSAT, foram utilizadas para simular os cenários do ZarcPro-Milho.

Base de dados de perfis de solo

Dados de perfis de solos, disponíveis na base BDSolos, da Embrapa (https://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/consulta_publica.html), estão agrupados por bioma, primeiro nível de classe de solo e textura (Santos et al., 2018). A textura de cada classe de solo, observada nos pontos de simulação (pontos de grade), foi determinada considerando-se a gênese do solo, obtida no mapa geológico do Brasil (Serviço Geológico do Brasil, 2001). Os valores de ponto de murcha permanente, capacidade de campo e porosidade foram estimados usando funções de pedotransferência (Tomasella et al., 2000). A condutividade hidráulica do solo saturado foi estimada empregando funções propostas por Tomasella e Hodnett (1998). Densidade e porcentagem de carbono no solo foram obtidas da base BDSolos da Embrapa.

Todos os perfis de solo foram descritos por meio de nove camadas, cada uma mantendo uma proporção constante em relação à profundidade informada. Todos os valores foram interpolados verticalmente para determinar os atributos do solo de cada camada.

Para uso na parametrização e avaliação do modelo, foram utilizados os dados do ponto de grade mais próximo dos locais onde os ensaios de VCU foram conduzidos e, posteriormente, foram preparados no formato do modelo DSSAT.

No zoneamento tradicional, Zarc, são considerados três tipos de solo: Tipo 1 (textura arenosa), Tipo 2 (textura média) e Tipo 3 (textura argilosa), resultando em capacidade de armazenamento de água de uma cultura de milho, com sistema radicular de 0,50 m, de 30 mm, 47 mm e 72 mm, respectivamente (Brasil, 2022).

Na implementação do ZarcPro-Milho, foi utilizada a nova metodologia de classificação de solos em seis classes de água disponível (AD). A estimativa da AD foi obtida aplicando-se os teores de argila, silte e areia total em uma função de pedotransferência, previamente ajustada para as condições edáficas brasileiras, conforme descrito em Teixeira et al. (2021). Para fins de Zarc, as classes de AD foram definidas conforme descrito em Monteiro et al. (2022) e apresentadas na Tabela 1: AD1: 0,40 mm cm⁻¹; AD2: 0,53 mm cm⁻¹; AD3: 0,69 mm cm⁻¹; AD4: 0,91 mm cm⁻¹; AD5: 1,21 mm cm⁻¹; e AD6: 1,59 mm cm⁻¹. Perfis de solo modais, divididos nas profundidades 0,05 m; 0,10 m; 0,30 m; 0,50 m; 0,70 m; 0,90 m; 1,10 m; 1,50 m e 2,00 m, para cada classe de água disponível, foram preparados utilizando, como base, um perfil de solo típico de Cerrado.

Como no modelo DSSAT as informações da distribuição de raízes da cultura ficam junto com os dados de solo, indicou-se, nesses arquivos, que a maior parte das raízes ativas do milho está concentrada na camada 0 m a 0,50 m do perfil do solo, reduzindo a presença até 0,70 m.

Tabela 1. Classes de água disponível (AD) predominantes nos solos do Brasil.

Identificação	Limite inferior (mm cm ⁻¹)	Valor médio ¹ (mm cm ⁻¹)	Limite superior (mm cm ⁻¹)
AD1	0,34	0,40	0,46
AD2	0,46	0,53	0,61
AD3	0,61	0,69	0,80
AD4	0,80	0,91	1,06
AD5	1,06	1,21	1,40
AD6	1,40	1,59	1,84

¹Valores utilizados nos arquivos de solo do modelo de simulação.

Fonte: Adaptado de Monteiro et al. (2022).

Base de dados da cultura do milho

Dados de ensaios de VCU, de 80 genótipos, semeados em 20 municípios (Tabela 2; Figura 1), na primeira ou na segunda safras agrícolas de 2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020, foram organizados para uso na parametrização e avaliação do modelo. As informações disponíveis nos ensaios de VCU foram: local, data da semeadura, data do florescimento, data da colheita, população de plantas, umidade dos grãos na colheita e rendimento. Os municípios de Luís Eduardo Magalhães, BA; Magalhães de Almeida, MA e Patos de Minas, MG não contavam com dados de florescimento. Entretanto, havia dados de produtividade, o que permitiu que fossem utilizados na parametrização e validação dos coeficientes G2 e G3 do modelo. A primeira dificuldade enfrentada, ao utilizar estes dados, foi a ausência de data de maturidade fisiológica dos genótipos, informação imprescindível para a parametrização e validação dos modelos de simulação. Para contornar esse problema, assumiu-se que o número de dias da semeadura até a maturidade fisiológica é o dobro do número de dias para atingir o florescimento (Yang et al., 2016).



Figura 1. Localização dos ensaios de valor de cultivo e uso (VCU), de onde foram obtidos os dados utilizados na parametrização do modelo. Mapa preparado por Luiz Antônio Saraiva Júnior.

Tabela 2. Locais onde foram conduzidos os ensaios de valor de cultivo e uso (VCU), que apresentaram pelo menos dados de produtividade.

Município	UF	Geo Code	Latst	Lonst
Altamira	PA	1500602	-6.375	-53.875
Bacabal	MA	2101202	-4.125	-44.875
Belterra	PA	1501451	-3.125	-54.875
Brejo	MA	2102101	-3.625	-42.875
Cascavel	PR	4104808	-25.125	-53.375
Correntina	BA	2909307	-13.375	-45.375
Goiânia	GO	5208707	-16.625	-49.375
Janaúba	MG	3135100	-15.875	-43.375
Londrina	PR	4113700	-23.625	-51.125
Luís Eduardo Magalhães	BA	2919553	-12.125	-46.125
Macapá	AP	1600303	0.625	-50.625
Magalhães de Almeida	MA	2106300	-3.375	-42.125
Manaus	AM	1302603	-2.625	-60.375
Paraíso de Tocantins	TO	1716109	-10.125	-48.875
Patos de Minas	MG	3148004	-18.625	-46.625
Pedro Afonso	TO	1716505	-9.125	-48.125
Sete Lagoas	MG	3167202	-19.375	-44.375
Sobral	CE	2312908	-3.875	-40.125
Teresina	PI	2211001	-5.125	-42.875
Vilhena	RO	1100304	-12.125	-60.375

Parametrização do modelo de simulação

Com os dados de número de dias para o florescimento e para a maturidade fisiológica, de cada genótipo, em cada ano e local, foi possível ajustar os parâmetros P1 (período da emergência à iniciação floral, expresso em graus-dia acima da temperatura base de 8 °C, durante o qual a planta não responde às alterações no fotoperíodo) e P5 (período do embonecamento à maturidade fisiológica, expresso em graus-dia acima da temperatura base de 8 °C) do modelo. O procedimento empregado, para obter os valores desses dois coeficientes, foi o de tentativa e erro, porém utilizando-se as estatísticas, índice de concordância (d-stat) (Willmott et al., 1985) e o quadrado médio do erro (RMSE) (Loague; Green, 1991), para avaliar a qualidade do ajuste. O parâmetro P1 foi ajustado primeiro, alterando-se, para cima ou para baixo, o seu valor inicial, obtido de uma parametrização preliminar (Andrade et al., 2016), e observando-se o quão próximo era o número de dias da sementeira ao embonecamento simulado do valor observado no ensaio de VCU. A cada tentativa, avaliaram-se as estatísticas d-stat e RMSE, buscando obter o maior valor de d-stat e o menor de RMSE. O mesmo procedimento foi empregado para ajustar o P5, comparando-se o número

de dias, simulados e observados, da sementeira à maturidade fisiológica e, também, avaliando-se as estatísticas d-stat e RMSE.

Dados observados de produtividade, provenientes dos ensaios de VCU, devidamente corrigidos para 0% de umidade (matéria seca), foram utilizados para ajustar os parâmetros G2 (número máximo possível de grãos por planta) e G3 (taxa de enchimento do grão durante a fase linear de enchimento de grãos, sob condições ótimas, em mg dia^{-1}). Como não haviam dados observados de número de grãos por m^2 e de peso unitário de grãos, que são utilizados para ajustar G2 e G3, empregou-se o mesmo procedimento de tentativa e erro para ajustar esses dois parâmetros simultaneamente. Partiu-se de valores de G2 e G3, obtidos na calibração preliminar (Andrade et al., 2016), que foram acrescidos ou reduzidos, até que a produtividade simulada se aproximasse da produtividade observada. Da mesma forma, as estatísticas d-stat e RMSE foram utilizadas para avaliar a qualidade do ajuste. O procedimento foi repetido, gerando os valores dos coeficientes P1, P5, G2 e G3 para cada genótipo.

Após uma primeira parametrização do modelo, para cada um dos genótipos de milho, realizou-se uma segunda etapa, na qual foram simuladas as produtividades dos 80 genótipos, em três anos de ensaios e em 20 locais, considerando uma condição sem estresse hídrico, ou seja, com irrigação plena. Para avaliar se houve ou não estresse hídrico durante a condução dos ensaios de VCU, subtraíram-se as produtividades simuladas, sob condições sem estresse hídrico, das respectivas produtividades, de cada genótipo, observadas em campo, em cada ano e local. Assumiu-se que, onde a diferença entre essas duas produtividades era maior que 500 kg ha^{-1} , ocorreu estresse hídrico em alguma das fases de crescimento e desenvolvimento da cultura.

Na sequência, os dados observados nos ensaios de VCU, de genótipo, ano e local, foram divididos em dois grupos: 1) dados de ensaios conduzidos sem estresse hídrico, empregados para melhoria da parametrização; e 2) dados de ensaios conduzidos com algum estresse hídrico, utilizados para validar a capacidade preditiva do modelo. É possível que os dados de um mesmo genótipo, em locais e anos diferentes, tenham sido utilizados, tanto na parametrização, quanto na validação do modelo, a depender da ocorrência ou não de estresse hídrico em algum local e/ou ano.

Numa terceira etapa, os genótipos, que foram anteriormente separados em dois grupos, sem estresse hídrico e com estresse hídrico, foram novamente divididos em outros três subgrupos G1, G2 e G3, de acordo com a soma térmica (graus-dia) da emergência ao início da fase juvenil (iniciação floral), correspondente ao coeficiente P1, e do embonecamento à maturidade fisiológica, correspondente ao coeficiente P5. Somaram-se os valores dos coeficientes P1 e P5, de cada genótipo do grupo sem estresse hídrico, e os classificaram em G1, G2 e G3. Cada subgrupo G1, G2 e G3, de cada grupo com e sem estresse hídrico, representaram cultivares com diferentes somas térmicas ou ciclos, uma vez que os coeficientes do modelo, P1 e P5, controlam a duração das fases fenológicas da cultura do milho.

Numa quarta etapa, procedeu-se à recalibração dos parâmetros do modelo para cada um dos subgrupos G1, G2 e G3, empregando-se os dados observados de cultivar, ano e local, de ensaios conduzidos sem estresse hídrico. Note-se que, desta vez, a parametrização foi realizada para um grupo de genótipos e não mais individualmente, para cada cultivar, como anteriormente. Dessa forma, obtiveram-se três conjuntos de valores dos coeficientes P1, P5, G2 e G3, um para cada subgrupo de dados, que correspondem a três cultivares, com três diferentes somas térmicas (graus-dia), equivalentes a três durações de ciclo. Para realizar a recalibração, iniciou-se com os valores médios de P1, P5, G2 e G3, obtidos para cada genótipo, de cada subgrupo. O procedimento utilizado, de tentativa e erro e avaliação das estatísticas d-stat e RMSE, foi o mesmo empregado nas parametrizações anteriores.

Validação ou avaliação da capacidade preditiva do modelo

A quinta etapa do processo de ajuste do modelo, antes de sua aplicação no ZarcPro-Milho, consistiu na avaliação da capacidade preditiva dele, após a reparametrização e a geração de coeficientes para as três cultivares, G1, G2 e G3. Os três grupos de dados observados, cujos ensaios de VCU foram submetidos a algum estresse hídrico, classificados de acordo com a soma térmica simulada de algumas fases da cultura, foram utilizados nesta etapa do procedimento.

Aplicação do modelo no ZarcPro-Milho

O ZarcPro estabelece o período de semeadura para cultivares com diferentes durações de ciclo, níveis de risco, classes de água disponível no solo e níveis de produtividade. A produtividade de milho simulada, para cada ponto de grade, foi obtida com o CSM-CERES-Maize, previamente parametrizado e avaliado, utilizando a base contendo 34 anos de dados diários de clima, seis perfis modais de solo e coeficientes (parâmetros) para três cultivares de milho, obtidos no processo de parametrização do modelo. Adicionalmente, o modelo foi alimentado com detalhes de manejo de uma lavoura de milho que não sofreu outros estresses, exceto o hídrico e o térmico, e com critérios de decisão sobre condições de umidade no solo no início das simulações e na época da semeadura. O modelo foi operado para os diferentes cenários de datas de semeadura, classes de água disponível no solo e cultivares com diferentes ciclos. Os dados simulados de rendimento foram, então, empregados para estabelecer níveis de risco para diferentes níveis de produtividade esperada, cultivar, classe de água disponível no solo e época de semeadura. Detalhes dos procedimentos são descritos a seguir.

Manejo da cultura do milho

O Zarc parte do pressuposto que os únicos estresses a que a cultura está submetida são o hídrico e o térmico, este representado por geada e temperatura acima do limite tolerável pela cultura. No ZarcPro-Milho, assumiu-se que a cultura não deve ser submetida a estresses bióticos ou abióticos, além desses dois já considerados. Portanto, o modelo CSM-CERES-Maize foi alimentado com dados de manejo capazes de evitar que o milho sofra qualquer estresse nutricional ou que se submeta a outro tipo de limitação que possa reduzir a sua produtividade, tal como baixo estande ou adubação insuficiente. Não se considera, também, o efeito de pragas, doenças e plantas daninhas.

No processo de parametrização e avaliação do modelo, assumiu-se que nos ensaios a cultura do milho apresentava espaçamento entre fileiras de 0,70 m, profundidade de plantio de 0,05 m e população de plantas de acordo com a anotação na planilha de cada ensaio de VCU. A adubação de plantio consistiu de 60 kg ha⁻¹ de N e 140 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de monoamônio fosfato, MAP (NH₄H₂PO₄), mais 80 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio, todos incorporados a 0,08 m de profundidade, ao lado da fileira de milho. As adubações de cobertura foram realizadas aos 25 dias após a semeadura e 40 dias após a semeadura (DAS), cada uma com 150 kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia (CH₄N₂O).

Na fase de aplicação do modelo no ZarcPro, este foi preparado para considerar uma população de 78 mil plantas por hectare, com espaçamento entre fileiras de 0,50 m. As demais estratégias de manejo foram as mesmas utilizadas no processo de parametrização e avaliação do modelo.

Todas essas informações foram devidamente incorporadas aos arquivos com extensão .MZX de manejo da cultura.

Condições iniciais requeridas pelo modelo

Todo modelo de simulação de crescimento de culturas, baseado em processos biofísicos, requer informações sobre as condições iniciais, como data de início das simulações, umidade no perfil do solo e detalhes do manejo cultural, incluindo dados da cultivar, adubação, população de plantas e espaçamento entre fileiras, entre outras.

As simulações foram programadas para iniciar três meses antes da data de semeadura do milho, assumindo-se que o perfil do solo, de cada uma das seis classes de AD, continha 50% da sua água disponível (Tabela 3). Por meio do balanço hídrico, que o modelo realiza diariamente, as condições iniciais de umidade do solo tendem a se aproximar da situação real por ocasião da semeadura, fazendo com que as simulações fiquem mais consistentes.

Crítérios de decisão implementados diretamente no modelo

Como critério para realizar ou não o plantio, o modelo avalia se a lâmina de água armazenada no perfil, até a profundidade de 0,30 m, expressa em porcentagem da CAD, está entre um limite inferior, definido para cada uma das seis classes de solo, e o limite superior, fixo em 100%. Os limites inferiores, estabelecidos para as classes de água disponível no solo de um a seis, foram 80%, 75%, 70%, 65%, 55%, 50%, respectivamente. Vale ressaltar que a classe de água disponível “1” é a que apresenta menor conteúdo de umidade, correspondente a um solo de textura arenosa, enquanto a classe de água disponível “6” apresenta o maior conteúdo de umidade. Ao se aplicarem esses percentuais decrescentes para os solos com classes de AD crescentes, os valores da lâmina de água armazenada no perfil necessários para a realização da semeadura são 9,6 mm, 11,9 mm, 14,5 mm, 17,7 mm, 19,8 mm e 23,8 mm, respectivamente.

Outro critério estabelecido no modelo para sucesso de estabelecimento da cultura foi com relação à temperatura do ar, tomada como um proxy da temperatura do solo. Assumiu-se que, se a temperatura mínima do ar, medida no abrigo meteorológico, for igual ou inferior a 3 °C, por um dia (adaptado de Miedema, 1982), inclusive na semeadura, o modelo interrompe definitivamente o crescimento da planta de milho. Adicionalmente, para os dias com a temperatura do ar no abrigo inferior a 8 °C, que é considerada a temperatura-base para o milho, o modelo cessa o crescimento e o desenvolvimento da planta, retomando-os quando a temperatura voltar a ultrapassar esse valor basal.

Cenários simulados

Para a obtenção de produtividade de grãos simulada, a ser utilizado na implementação do ZarcPro-Milho, vários arquivos de manejo foram criados, nos quais se indicaram quando e como a cultura foi semeada e conduzida. Como são três grupos de cultivares, G1, G2 e G3, com diferentes ciclos, e seis classes de solo, com diferentes níveis de água disponível, há 18 cenários, que deram origem a 18 arquivos de manejo no formato do modelo (MZX).

A verificação das condições ambientais necessárias para a realização da semeadura, como descrito na seção anterior, inicia-se no terceiro dia do decêndio. Se o critério for atendido, o plantio é realizado, caso contrário, o modelo avalia o dia subsequente e assim sucessivamente até o sétimo dia do decêndio. Caso o critério não seja atendido em nenhum dos cinco dias centrais do decêndio, o plantio não é realizado, a produtividade é assumida como nula e passa-se para o decêndio seguinte. Esse critério garante que a semeadura só é realizada se a umidade do solo estiver dentro dos limites estabelecidos para cada classe de água disponível do solo.

Para permitir o estabelecimento de janelas de semeadura, o modelo foi programado para semear o milho a cada 10 dias (decêndios), ao longo do ano, iniciando em 3 de janeiro e estendendo-se até 27 de dezembro, totalizando 36 datas de semeadura (Tabela 4). A combinação de três cultivares, seis classes de solo e 36 datas de semeadura geraram 648 cenários. Esses cenários, foram simulados para cada um dos 34 anos da série histórica de dados diários de clima, o que corresponde a 22.032 valores de produtividade simulada, que foram utilizados para determinar os níveis de risco para cada cenário.

Tabela 3. Conteúdo de umidade no limite inferior de água disponível (AD), (PMP), no limite superior de água disponível (CC) e no limite de 50% da água disponível, para seis classes de perfis de solos do Brasil.

Classe água disponível (AD1)				Classe água disponível (AD2)		
Profundidade	Ponto de murcha permanente	50% da água disponível (AD)	Capacidade de campo	Ponto de murcha permanente	50% da água disponível (AD)	Capacidade de campo
(m)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)
0,05	0,067	0,087	0,107	0,137	0,163	0,190
0,10	0,067	0,087	0,107	0,141	0,168	0,194
0,30	0,075	0,095	0,115	0,170	0,197	0,223
0,50	0,078	0,098	0,117	0,185	0,212	0,238
0,70	0,079	0,100	0,120	0,183	0,209	0,235
0,90	0,078	0,097	0,116	0,168	0,196	0,223
1,10	0,074	0,094	0,114	0,166	0,193	0,220
1,50	0,075	0,095	0,115	0,168	0,194	0,221
2,00	0,075	0,095	0,114	0,168	0,194	0,221
Classe água disponível (AD3)				Classe água disponível (AD4)		
Profundade	Ponto de murcha permanente	50% da água disponível (AD)	Capacidade de campo	Ponto de murcha permanente	50% da água disponível (AD)	Capacidade de campo
(m)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)
0,05	0,154	0,189	0,223	0,190	0,235	0,281
0,10	0,152	0,186	0,221	0,189	0,234	0,280
0,30	0,150	0,185	0,219	0,197	0,242	0,288
0,50	0,165	0,200	0,235	0,176	0,221	0,267
0,70	0,154	0,188	0,222	0,163	0,208	0,252
0,90	0,148	0,183	0,219	0,147	0,193	0,238
1,10	0,147	0,181	0,215	0,126	0,172	0,218
1,50	0,154	0,189	0,223	0,118	0,164	0,210
2,00	0,153	0,188	0,223	0,105	0,150	0,196
Classe água disponível (AD5)				Classe água disponível (AD6)		
Profundade	Ponto de murcha permanente	50% da água disponível (AD)	Capacidade de campo	Ponto de murcha permanente	50% da água disponível (AD)	Capacidade de campo
(m)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)
0,05	0,187	0,248	0,308	0,228	0,307	0,387
0,10	0,183	0,243	0,304	0,226	0,305	0,385
0,30	0,177	0,237	0,297	0,229	0,309	0,388
0,50	0,191	0,252	0,312	0,238	0,317	0,396
0,70	0,183	0,242	0,302	0,218	0,299	0,379
0,90	0,178	0,237	0,297	0,216	0,296	0,375
1,10	0,170	0,230	0,289	0,227	0,307	0,386
1,50	0,162	0,223	0,284	0,230	0,310	0,389
2,00	0,158	0,218	0,277	0,223	0,303	0,382

Tabela 4. Decêndios e datas aproximadas ao longo do ano, programadas nas simulações.

No. dec.	Data de semeadura	No. dec.	Data de semeadura	No. dec.	Data de semeadura
1	5/jan.	13	5/mai.	25	5/set.
2	15/jan.	14	15/mai.	26	15/set.
3	25/jan.	15	25/mai.	27	25/set.
4	5/fev.	16	5/jun.	28	5/out.
5	15/fev.	17	15/jun.	29	15/out.
6	25/fev.	18	25/jun.	30	25/out.
7	5/mar.	19	5/jul.	31	5/nov.
8	15/mar.	20	15/jul.	32	15/nov.
9	25/mar.	21	25/jul.	33	25/nov.
10	5/abr.	22	5/ago.	34	5/dez.
11	15/abr.	23	15/ago.	35	15/dez.
12	25/abr.	24	25/ago.	36	25/dez.

Níveis de produtividade esperada e de risco climático

O ZarcPro-Milho considera dez níveis de produtividade esperada (PE), que variam de uma a dez toneladas de grãos de milho por hectare, de forma a englobar desde condições edafoclimáticas mais restritivas e baixo nível de tecnologia de cultivo até condições edafoclimáticas mais favoráveis e nível médio de tecnologia de cultivo. Adicionalmente, assumiram-se três níveis de risco climático, 20%; 30% e 40%, além de inapto ou fora da janela de semeadura, com risco maior que 40%.

A avaliação dessa metodologia, foi implementada em uma planilha eletrônica, na qual, para cada local, foram inseridos os 34 valores de produtividades simuladas (um para cada ano), para cada um dos 648 cenários estabelecidos (três grupos de cultivares, seis classes de água disponível no solo e 36 decêndios). Para cada um desses 648 cenários, foram determinadas as probabilidades empíricas de ocorrência de produtividades simuladas inferiores a cada um dos dez níveis de PE. Esses valores de probabilidade correspondem aos níveis de risco para a obtenção de produtividades simuladas inferiores aos níveis de PE. As janelas de semeadura foram estabelecidas, considerando-se cada nível de risco (20%, 30% e 40%), cada nível de PE, cada cultivar de referência e cada classe de água disponível no solo.

As simulações foram processadas para cada ponto de grade e os riscos foram avaliados para cada município do País. Nessa última etapa, se ao menos 20% da área do município apresenta um risco inferior aos considerados (de 20% a 40%), o município é classificado com o referido risco, ou seja, o município é considerado apto para o cultivo de milho. Caso contrário, ele é considerado inapto. Os valores de risco de cada decêndio, nível de PE, classe de AD no solo e cultivar foram espacializados para gerar os mapas do ZarcPro-Milho, para todo o Brasil.

Avaliação do Conceito do ZARCPro para Milho

Apresentam-se, na Figura 2, as produtividades observadas e simuladas, de quatro genótipos de milho, dentre os 80 utilizados no processo de parametrização. Observa-se que, com base nos valores das estatísticas d-stat e RMSE, a parametrização do modelo (ajuste dos coeficientes internos), individualmente, para cada genótipo, foi bem-sucedida. Os valores de d-stat estão acima de 0,79 e os de RMSE estão abaixo de 1.825 kg ha⁻¹. Quanto mais próximos de 1 estejam os valores de d-stat e mais baixos os valores de RMSE, mais próximos estão os valores simulados daqueles observados. Vale ressaltar que os dados foram obtidos de ensaios em campo, em que o controle das condições experimentais nem sempre são os mais adequados.

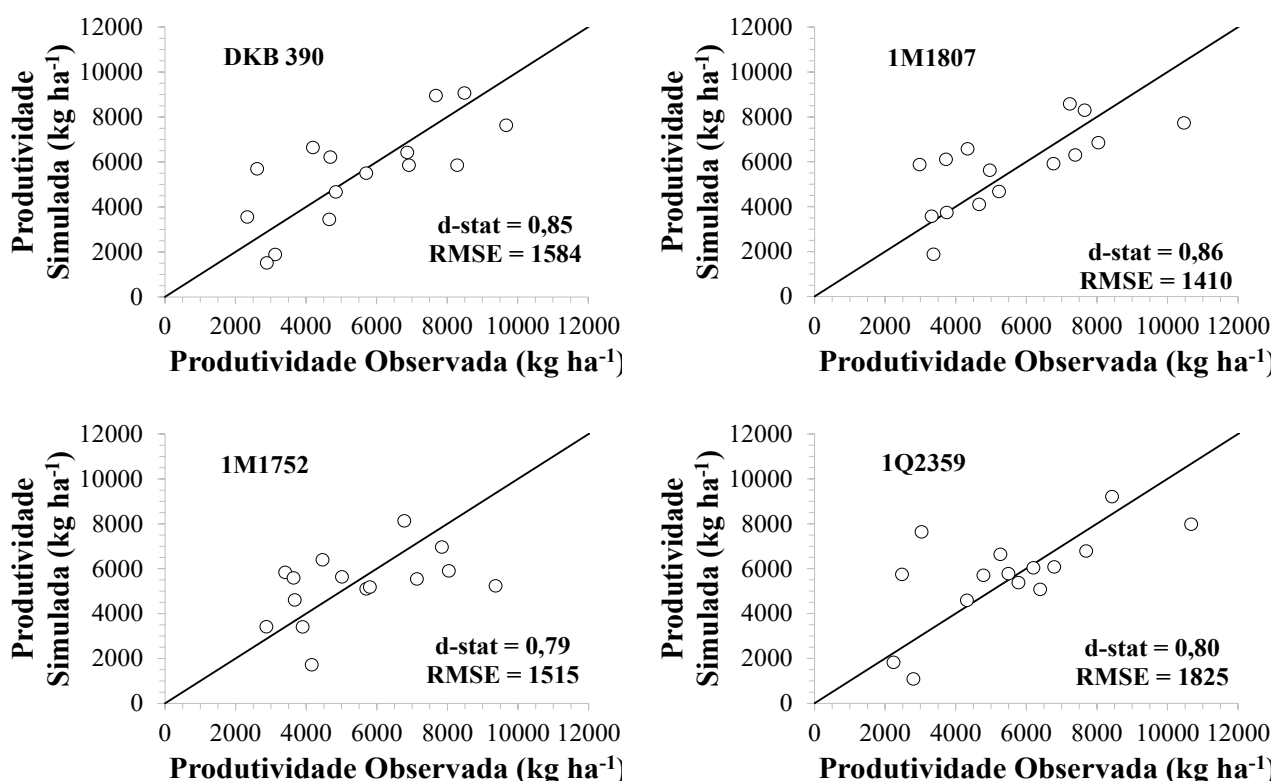


Figura 2. Produtividade observada versus produtividade simulada, obtida após o ajuste dos coeficientes P1, P5, G2 e G3, individualmente, para os genótipos DKB 390, 1M1807, 1M1752 e 1Q2359.

Os valores dos coeficientes, obtidos após a reparametrização do modelo por grupo de genótipos, classificados pela soma térmica de algumas fases fenológicas, são apresentados na Tabela 5. Nota-se que as diferenças entre as cultivares (G1, G2 e G3), considerando tanto os valores dos parâmetros ajustados quanto o número de dias para o embonecamento e para a maturidade fisiológica, são muito pequenas, indicando que os genótipos utilizados na parametrização são ecofisiologicamente muito parecidos, com uma tendência de apresentarem ciclo mais curto. Certamente um ajuste na parametrização deverá ser realizado, possivelmente com a inclusão de mais dados da região Sul e Centro-Oeste do País.

Tabela 5. Parâmetros do modelo de simulação, ajustados para as três cultivares (G1, G2 e G3), com diferentes dias para o embonecamento e para a maturidade fisiológica (ciclo).

Cultivar	Parâmetros do modelo				
	P1 (grau-dia)	P5 (grau-dia)	G2 (grão planta ⁻¹)	G3 (mg dia ⁻¹)	Intervalo do filocrono PHINT (grau-dia)
G1	200 (54 DAS*)	864 (105 DAS)	881	5,51	45,5
G2	230 (56 DAS)	893 (109 DAS)	884	5,52	45,5
G3	240 (58 DAS)	910 (111 DAS)	879	5,49	45,5

*DAS: dias após semeadura.

Dados de rendimento, número de dias para o embonecamento e número de dias para a maturidade fisiológica, simulados e observados, após reparametrização do modelo, por grupo de cultivares, são apresentados na Figura 3. A parametrização, por grupo de genótipos, criando as três cultivares, favoreceu consideravelmente a capacidade de o modelo prever a produtividade do milho, quando comparada à parametrização individual dos genótipos, como demonstram as estatísticas d-stat e RMSE (Figuras 2 e 3). O erro quadrado médio (RMSE) da produtividade estimada variou de 573 kg ha⁻¹ a 711 kg ha⁻¹, enquanto o RMSE do número de dias para o embonecamento e do número de dias para a maturidade fisiológica variaram de 2,8 DAS a 4,0 DAS e de 6,4 DAS a 9,4 DAS, respectivamente.

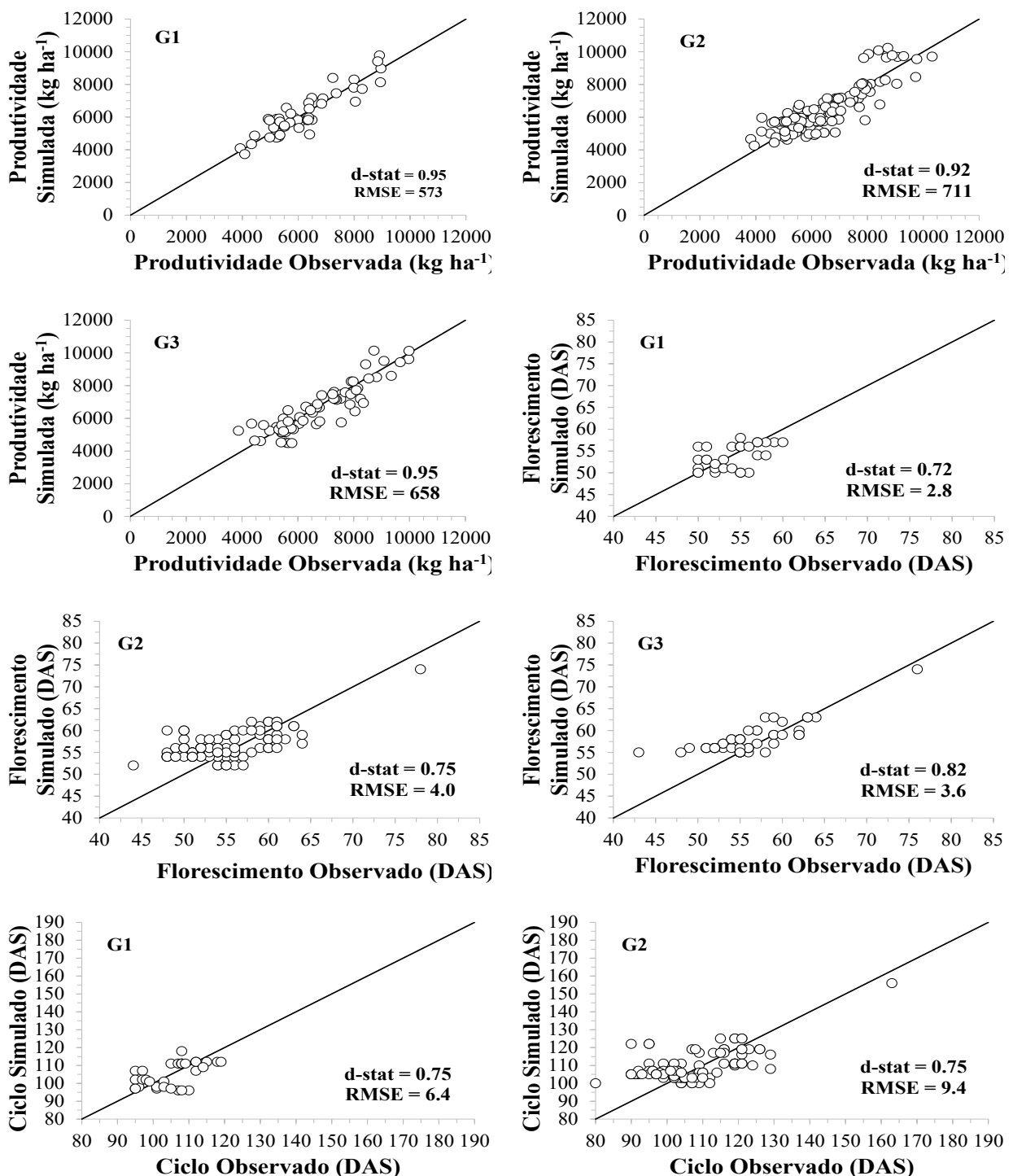
No processo de avaliação da capacidade preditiva do modelo, os dados simulados de rendimento, número de dias para o embonecamento e número de dias para a maturidade fisiológica, obtidos com o modelo reparametrizado, para os três grupos de cultivares, foram comparados com os respectivos dados observados nos ensaios de VCU, em que algum estresse hídrico ocorreu. Três grupos foram criados, classificando os dados de acordo com a soma térmica de algumas fases como foi feito no processo de parametrização. Observa-se (Figura 4) que houve uma maior dispersão dos dados de produtividade, data do embonecamento e data da maturidade fisiológica, em comparação com a parametrização (Figura 3), o que afetou a capacidade de predição do modelo, sem, entretanto, limitar a sua aplicação no ZarcPro-Milho.

Vale ressaltar, todavia, que não se dispunha de informações detalhadas sobre as condições em que foram conduzidos os ensaios de VCU, fazendo com que dados médios de manejo cultural e dados interpolados de perfil de solos e de clima tivessem sido utilizados como entrada no modelo. Ademais, o modelo apresentou dificuldades para capturar o efeito das condições edafoclimáticas no milho, como pode ser observado pelos mesmos valores de dias para o embonecamento simulados para diferentes valores observados. Podem ter ocorrido também problemas na coleta desses dados em campo, especialmente na cultivar G2.

Apresenta-se, nas Figuras de 5 a 10, o teste do conceito do ZarcPro-Milho, implementado em planilha eletrônica. Para facilitar o entendimento e tomando-se a Figura 5 como exemplo, será apresentado a seguir o significado do conteúdo das células da planilha. Nas células 1A a 4E, encontra-se a legenda dos níveis de risco, com as respectivas cores que aparecerão nas células dos períodos de semeadura mostrados na mesma figura.

Nas células 2I a 6AB, são identificados as datas e os decêndios do período de semeadura, que podem ser diferentes para cada classe de água disponível do solo e cada município, como se pode observar nas figuras subsequentes (Figuras 6 a 10). O decêndio 1 (célula 6S da Figura 5) corresponde ao período de semeadura de 1º a 10 de janeiro. Nas células 7A a 17G, estão as

legendas dos cenários considerados no Zarc tradicional: três tipos de cultivares (C1, C2 e C3), três classes de água disponível no solo (AD1, AD2 e AD3) e três níveis de risco, verde (20%), azul (30%) e amarelo (40%), para Sete Lagoas, MG. Nas células 7I a 17AB, são apresentadas as janelas de semeadura. Os números dentro das células correspondem aos decêndios. Note-se que, no solo com água disponível AD2 e cultivar C1, a janela de semeadura vai do decêndio 28 (11J) ao 4 (11V). O plantio nos decêndios 28 e 4 apresenta risco de 31% a 40% (amarelo), no decêndio 29 o risco é de 21% a 30% (azul) e nos decêndios 30 a 36 e 1 a 3, o risco é igual ou menor que 20% (verde). As células brancas apresentam risco maior que 40% e estão fora da janela de semeadura. Da linha 19 para baixo, os dados apresentados referem-se aos resultados do ZarcPro-Milho. Nas células 19A a 21G, estão as legendas para a média das produtividades simuladas, para o solo com água disponível AD2 e cultivares C1, C2 e C3 (Figura 5).



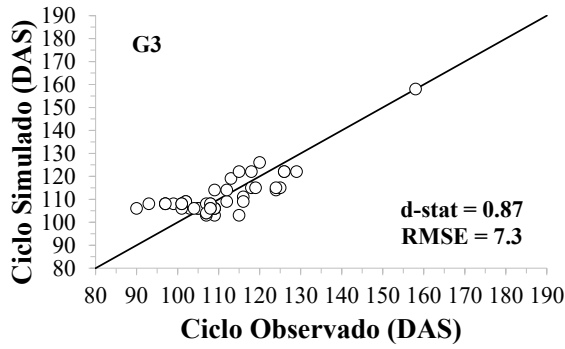
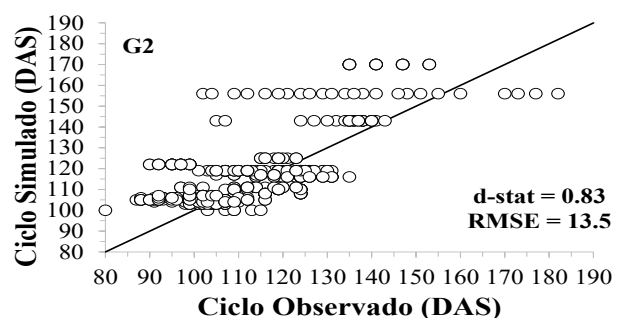
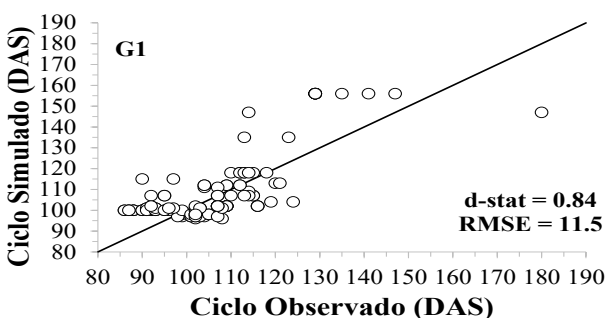
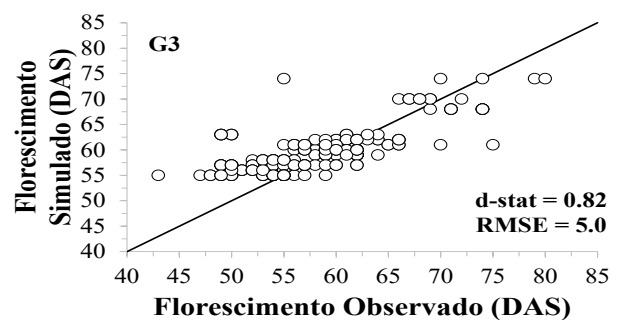
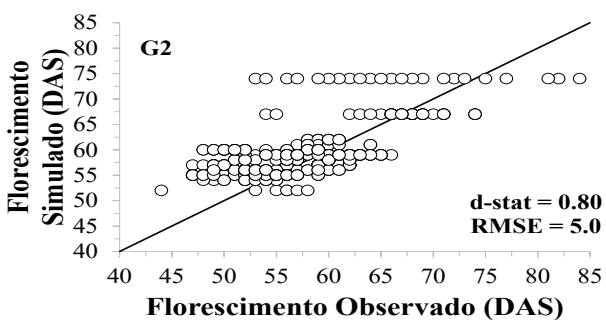
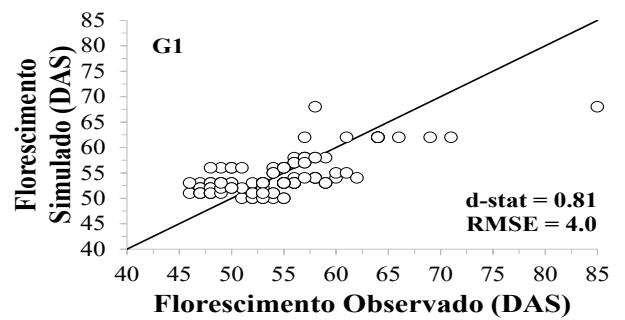
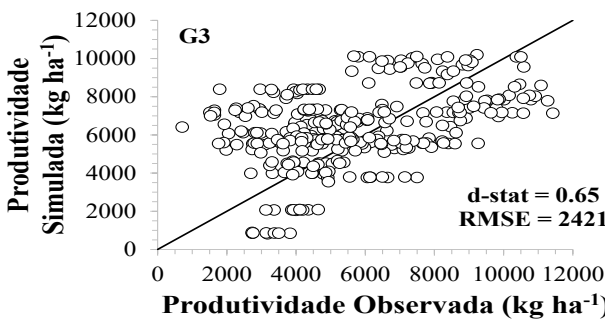
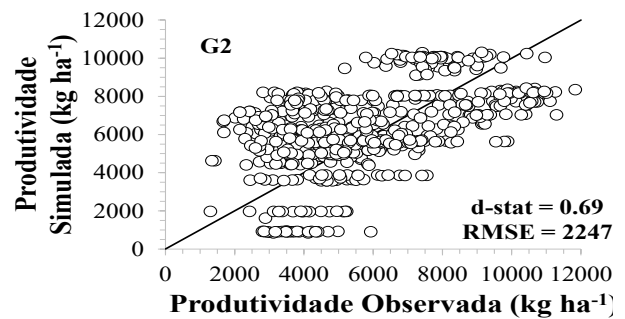
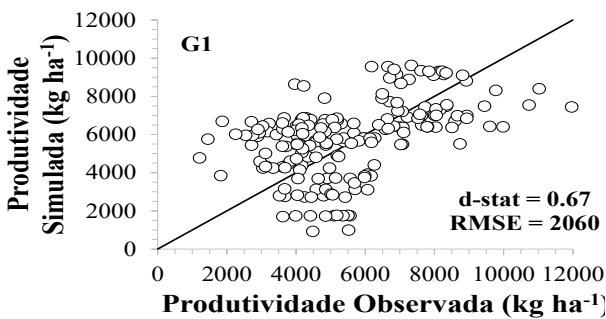


Figura 3. Produtividade, número de dias para o florescimento e número de dias para a maturidade fisiológica, simulados e observados, para as três cultivares (G1, G2, G3), com três diferentes somas térmicas (ciclos), após a reparametrização do modelo.



Os valores das médias de rendimento simulado, para 34 anos, sem associação com os níveis de risco, são apresentados nas células 19I a 21AB, para cada cultivar e decêndio, para o solo com AD2. Nas figuras subsequentes, mudaram-se a água disponível do solo e os locais das simulações.

Nas células 23A a 25G, constam as identificações de cultivar (C1, C2 e C3), água disponível no solo (AD2), nível de risco (20%, 30% e 40%) e nível de produtividade esperada de milho que, neste caso, é de 1.000 kg ha⁻¹. Nas células 23I a 25AB, são marcados, em cores, os períodos de semeadura, para os cenários identificados nas células 23A a 25G. Os números dentro das células são a probabilidade, em percentual, de o valor da produtividade simulada ser igual ou inferior ao valor da produtividade esperada (PE), indicada na legenda que, neste caso, é 1.000 kg ha⁻¹, o que corresponde ao risco de a produtividade simulada ser superada. As cores das células 23I a 25AB indicam os níveis de risco conforme a legenda nas células 1A a 4E. Nas demais linhas da planilha, são apresentados os períodos de semeadura e os níveis de risco para outros níveis de PE.

Como era de se esperar, as produtividades médias simuladas (34 anos) variam consideravelmente ao longo da estação de plantio (de setembro a abril ou dos decêndios 1 a 10 e 27 a 36), obviamente, por causa das condições climáticas, sobretudo a precipitação. Dentro de um mesmo decêndio, as diferenças de produtividade simulada entre as cultivares C1, C2 e C3 foi mínima, em razão das semelhanças genéticas dos genótipos utilizados na parametrização do modelo, especialmente quanto à duração do ciclo. As maiores produtividades médias, em torno de 6.569 kg ha⁻¹, foram simuladas para o decêndio 30 (21 a 31 de outubro), o que coincide com os decêndios de menor risco para produtividades esperadas acima de 3.000 kg ha⁻¹. Note-se que dados de produtividade média simulada, sem vinculação com qualquer nível de risco, não foram suficientes para a tomada de decisão quanto ao período de semeadura adequado para o milho, em Sete Lagoas, MG (Figura 5).

Analisando-se os dados de janelas de semeadura vinculadas à produtividade esperada (PE) e ao risco (Figura 5), observa-se que, à medida que a PE aumenta, o período de semeadura fica mais restritivo, para todas as cultivares e todos os níveis de risco. Para um nível de PE de 5.000 kg ha⁻¹, que é próximo do rendimento médio estimado pelo IBGE, para Sete Lagoas, MG (IBGE, 2023), o período de semeadura determinado empregando o ZarcPro-Milho, considerando um solo com água disponível AD2, ficou mais restritivo que o estabelecido pelo Zarc tradicional, para um solo com média retenção de água, independentemente da cultivar. Com este novo procedimento, há também mais decêndios com níveis de risco entre 31% e 40% e, consideravelmente, menos decêndios com nível de risco igual ou menor que 20%. A maior produtividade esperada, para um solo com água disponível AD2, é de 6.000 kg ha⁻¹. Porém, a janela de semeadura é de apenas um decêndio, com nível de risco entre 30% e 40% (Figura 5).

Quando se considerou um solo com maior água disponível, AD4, no mesmo município, a maior produtividade simulada média aumentou para 7.915 kg ha⁻¹, ou seja, 20,5%, em comparação com o solo AD2, tendo ocorrido no mesmo decêndio (Figura 6). Observaram-se grandes variações sazonais das produtividades médias e pequenas variações entre cultivares, como nos cenários com AD2. O período de semeadura se alongou, especialmente, para níveis mais baixos de PE, embora o início da janela tenha se atrasado em um decêndio, em comparação com AD2 (Figura 5).

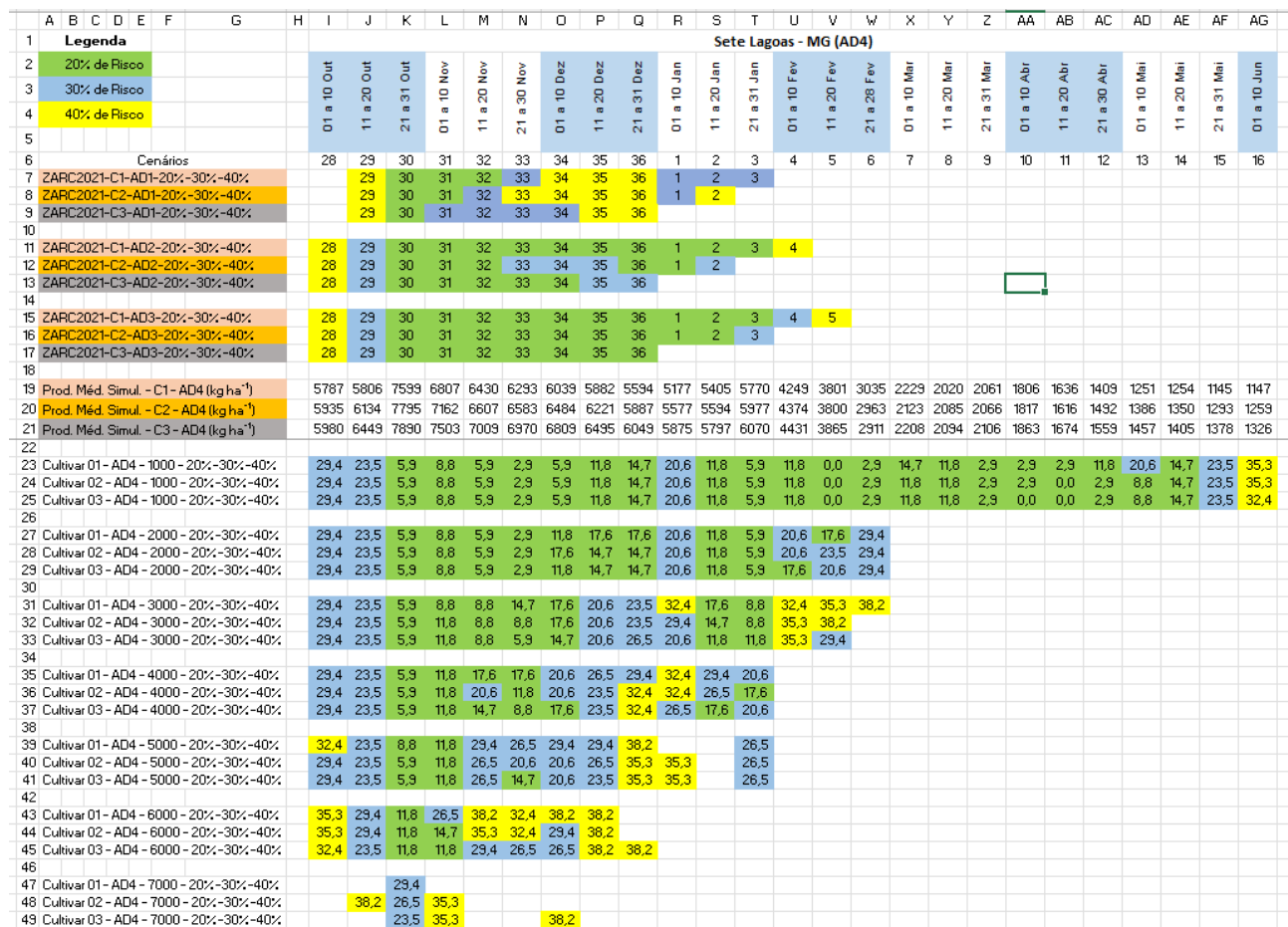


Figura 6. Períodos de sementeira do milho, para a classe de solo com água disponível AD4 (0,91 mm cm⁻¹), três grupos de cultivares, diferentes níveis de produtividade esperada e três níveis de risco, em comparação com o Zarc tradicional, para o município de Sete Lagoas, MG.

As PEs atingiram o nível de 7.000 kg ha⁻¹, com uma janela de sementeira não tão restritiva quanto a do solo com AD2. Além do mais, os decêndios com nível de risco de 40% diminuiram, enquanto aqueles com nível de risco de 30% aumentaram. Para esse nível de água disponível, mais próximo de um solo típico de Cerrado (Andrade, 1987), considerando produtividades esperadas entre 4.000 kg ha⁻¹ e 5.000 kg ha⁻¹, as janelas de sementeira estabelecidas (1º de outubro a 31 de janeiro) se aproximaram do Zarc tradicional, embora com riscos mais altos. Para o nível de PE de 7.000 kg ha⁻¹, a janela de sementeira se resume a poucos decêndios, com nível de risco acima de 30% (Figura 6).

Em Cascavel, PR, considerando um solo com água disponível AD2, de 0,53 mm cm⁻¹ (Tabela 1), observa-se que as produtividades simuladas médias máximas de milho, em torno de 7.000 kg ha⁻¹, ocorreram no decêndio 1 (1º a 10 de janeiro), independentemente da cultivar (Figura 7).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	
1	Legenda									Cascavel - PR (AD2)																					
2	20% de Risco									11 a 20 Ago																					
3	30% de Risco									21 a 31 Ago																					
4	40% de Risco									01 a 10 Set																					
5										11 a 20 Set																					
6	Cenários									21 a 30 Set																					
7	ZARC2021-C1-AD1-20%-30%-40%	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	1	2	3	4	5	6	7	8								
8	ZARC2021-C2-AD1-20%-30%-40%	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	1	2	3	4	5	6										
9	ZARC2021-C3-AD1-20%-30%-40%	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																
10																															
11	ZARC2021-C1-AD2-20%-30%-40%	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	1	2	3	4	5	6										
12	ZARC2021-C2-AD2-20%-30%-40%	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	1	2	3	4	5	6										
13	ZARC2021-C3-AD2-20%-30%-40%	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																
14																															
15	ZARC2021-C1-AD3-20%-30%-40%	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	1	2	3	4	5	6										
16	ZARC2021-C2-AD3-20%-30%-40%	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	1	2	3	4	5	6										
17	ZARC2021-C3-AD3-20%-30%-40%	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																
18																															
19	Prod. Méd. Simul. - C1 - AD2 (kg ha ⁻¹)	3594	3847	3880	4524	4536	5131	5433	5155	5587	5625	5966	5963	5978	5736	6641	5644	5858	6507	5686	4843	4001	2768								
20	Prod. Méd. Simul. - C2 - AD2 (kg ha ⁻¹)	3681	3906	3902	4664	4892	5650	5798	5674	5918	6069	6226	6217	6384	6027	7034	6330	6372	6756	5712	4603	3664	2604								
21	Prod. Méd. Simul. - C3 - AD2 (kg ha ⁻¹)	3856	3986	3996	4799	5047	6033	6016	5961	6113	6441	6454	6587	6554	6328	7295	6661	6627	6886	5739	4477	3614	2467								
22																															
23	Cultivar 01 - AD2 - 1000 - 20%-30%-40%	38,2	35,3	29,4	17,6	11,8	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	5,9	0,0	2,9	8,8	2,9	8,8	5,9	5,9	38,2								
24	Cultivar 02 - AD2 - 1000 - 20%-30%-40%	38,2	35,3	29,4	17,6	11,8	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	5,9	0,0	2,9	8,8	2,9	8,8	5,9	11,8									
25	Cultivar 03 - AD2 - 1000 - 20%-30%-40%	38,2	35,3	29,4	17,6	11,8	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	5,9	0,0	2,9	8,8	2,9	8,8	5,9	14,7									
26																															
27	Cultivar 01 - AD2 - 2000 - 20%-30%-40%	38,2	35,3	32,4	20,6	14,7	11,8	2,9	0,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	5,9	14,7	0,0	5,9	11,8	5,9	14,7	8,8	20,6								
28	Cultivar 02 - AD2 - 2000 - 20%-30%-40%	38,2	38,2	32,4	20,6	17,6	2,9	0,0	0,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	5,9	14,7	0,0	5,9	11,8	5,9	14,7	14,7	38,2								
29	Cultivar 03 - AD2 - 2000 - 20%-30%-40%	38,2	35,3	32,4	17,6	17,6	2,9	0,0	0,0	2,9	0,0	2,9	5,9	11,8	2,9	2,9	11,8	5,9	14,7	17,6	38,2										
30																															
31	Cultivar 01 - AD2 - 3000 - 20%-30%-40%	38,2		32,4	29,4	26,5	14,7	11,8	8,8	8,8	5,9	5,9	8,8	8,8	20,6	8,8	11,8	17,6	14,7	20,6	26,5										
32	Cultivar 02 - AD2 - 3000 - 20%-30%-40%	38,2	38,2	32,4	29,4	23,5	14,7	8,8	2,9	2,9	11,8	8,8	11,8	8,8	23,5	5,9	11,8	14,7	8,8	20,6	23,5										
33	Cultivar 03 - AD2 - 3000 - 20%-30%-40%	38,2	38,2	35,3	29,4	23,5	14,7	8,8	2,9	2,9	8,8	11,8	8,8	11,8	23,5	5,9	11,8	17,6	8,8	17,6	29,4										
34																															
35	Cultivar 01 - AD2 - 4000 - 20%-30%-40%				38,2	38,2	29,4	20,6	23,5	20,6	17,6	26,5	17,6	20,6	26,5	17,6	23,5	29,4	20,6	29,4											
36	Cultivar 02 - AD2 - 4000 - 20%-30%-40%				38,2	38,2	32,4	20,6	17,6	14,7	17,6	11,8	14,7	20,6	17,6	11,8	29,4	11,8	17,6	26,5	17,6	29,4									
37	Cultivar 03 - AD2 - 4000 - 20%-30%-40%				35,3	32,4	17,6	14,7	14,7	14,7	11,8	17,6	11,8	11,8	23,5	8,8	17,6	23,5	20,6	29,4											
38																															
39	Cultivar 01 - AD2 - 5000 - 20%-30%-40%						38,2	38,2		32,4	38,2		29,4	29,4	29,4	29,4				29,4	35,3										
40	Cultivar 02 - AD2 - 5000 - 20%-30%-40%						29,4	32,4	29,4	29,4	32,4	29,4	23,5	23,5	32,4	20,6	38,2	29,4	26,5	38,2											
41	Cultivar 03 - AD2 - 5000 - 20%-30%-40%						23,5	26,5	23,5	26,5	29,4	26,5	20,6	26,5	29,4	20,6	29,4	32,4	26,5	35,3											
42																															
43	Cultivar 01 - AD2 - 6000 - 20%-30%-40%															35,3				32,4											
44	Cultivar 02 - AD2 - 6000 - 20%-30%-40%															38,2				32,4											
45	Cultivar 03 - AD2 - 6000 - 20%-30%-40%															38,2	32,4		38,2	29,4											

Figura 7. Períodos de semeadura do milho, para a classe de solo com água disponível AD2 (0,53 mm cm⁻¹), três grupos de cultivares, diferentes níveis de produtividade esperada e três níveis de risco, em comparação com o Zarc tradicional, para o município de Cascavel, PR.

Por causa das condições climáticas, há uma grande variabilidade entre as produtividades simuladas médias ao longo do período de semeadura. Para produtividades esperadas (PE) até 3.000 kg ha⁻¹, as janelas de semeadura, determinadas com o ZarcPro-Milho, são similares às do Zarc tradicional, embora com risco de 30% a 40% no início do período. Acima desse valor de PE, os períodos de semeadura são, consideravelmente, mais curtos, chegando a apenas um decêndio (1º a 10 de fevereiro) para uma PE de 7.000 kg ha⁻¹, com risco de 30% a 40%. Para esse nível de água disponível no solo e PE de 6.000 kg ha⁻¹, que está em torno da média estimada pelo IBGE para Cascavel (IBGE, 2023), a janela de semeadura apresenta-se truncada e com elevado risco (Figura 7).

No mesmo município, porém com nível de água disponível AD4 (0,91 mm cm⁻¹) (Figura 8), a produtividade simulada média máxima, em torno de 8.930 kg ha⁻¹, ocorreu no decêndio 1 e foi superior à simulada para o solo com menor água disponível (AD2).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	Legenda								Castro - PR (AD2)																
2	20% de Risco																								
3	30% de Risco																								
4	40% de Risco																								
5	Cenários																								
6	ZARC2021-C1-AD1-20%-30%-40%	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	1	2	3	4	5							
7	ZARC2021-C2-AD1-20%-30%-40%	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36												
8	ZARC2021-C3-AD1-20%-30%-40%	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36												
9	ZARC2021-C1-AD2-20%-30%-40%	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	1											
10	ZARC2021-C2-AD2-20%-30%-40%	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36												
11	ZARC2021-C3-AD2-20%-30%-40%	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36												
12	ZARC2021-C1-AD3-20%-30%-40%	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	1											
13	ZARC2021-C2-AD3-20%-30%-40%	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36												
14	ZARC2021-C3-AD3-20%-30%-40%	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36												
15	Prod. Méd. Simul. - C1 - AD2 (kg ha ⁻¹)	4376	5407	6153	6304	6629	7208	7515	6642	7836	7532	7771	8200	7773	6855	5710	3920	2339							
16	Prod. Méd. Simul. - C2 - AD2 (kg ha ⁻¹)	4631	5994	6639	6711	7131	7869	8069	7115	8085	8092	8457	8442	7990	6700	5500	3383	1815							
17	Prod. Méd. Simul. - C3 - AD2 (kg ha ⁻¹)	4585	6059	6853	6885	7449	8135	8131	7366	8227	8347	8663	8490	7907	6522	5257	3195	1651							
18	Cultivar 01 - AD2 - 1000 - 20%-30%-40%	35,3	20,6	8,8	5,9	2,9	0,0	2,9	11,8	2,9	5,9	5,9	2,9	2,9	5,9	11,8	17,6	32,4							
19	Cultivar 02 - AD2 - 1000 - 20%-30%-40%	35,3	20,6	8,8	5,9	2,9	0,0	2,9	11,8	2,9	5,9	5,9	2,9	2,9	8,8	11,8	20,6								
20	Cultivar 03 - AD2 - 1000 - 20%-30%-40%	35,3	20,6	8,8	5,9	2,9	0,0	2,9	11,8	2,9	5,9	5,9	2,9	2,9	8,8	11,8	32,4								
21	Cultivar 01 - AD2 - 2000 - 20%-30%-40%	35,3	20,6	8,8	5,9	5,9	0,0	2,9	11,8	2,9	8,8	5,9	2,9	2,9	8,8	11,8	32,4								
22	Cultivar 02 - AD2 - 2000 - 20%-30%-40%	35,3	20,6	8,8	5,9	5,9	0,0	2,9	11,8	2,9	5,9	5,9	2,9	2,9	8,8	23,5	38,2								
23	Cultivar 03 - AD2 - 2000 - 20%-30%-40%	35,3	20,6	8,8	5,9	2,9	0,0	2,9	11,8	2,9	5,9	5,9	2,9	2,9	11,8	23,5									
24	Cultivar 01 - AD2 - 3000 - 20%-30%-40%	35,3	20,6	14,7	5,9	11,8	2,9	2,9	11,8	2,9	8,8	5,9	2,9	5,9	11,8	26,5	38,2								
25	Cultivar 02 - AD2 - 3000 - 20%-30%-40%	35,3	23,5	11,8	8,8	5,9	0,0	5,9	11,8	2,9	5,9	5,9	2,9	8,8	20,6	26,5									
26	Cultivar 03 - AD2 - 3000 - 20%-30%-40%	35,3	20,6	11,8	8,8	5,9	0,0	5,9	11,8	2,9	5,9	5,9	5,9	5,9	20,6	29,4									
27	Cultivar 01 - AD2 - 4000 - 20%-30%-40%		26,5	17,6	17,6	14,7	5,9	5,9	14,7	2,9	11,8	8,8	2,9	11,8	23,5	29,4									
28	Cultivar 02 - AD2 - 4000 - 20%-30%-40%	35,3	23,5	14,7	8,8	11,8	2,9	5,9	14,7	8,8	5,9	5,9	5,9	14,7	23,5	29,4									
29	Cultivar 03 - AD2 - 4000 - 20%-30%-40%	38,2	23,5	17,6	8,8	5,9	2,9	5,9	11,8	8,8	5,9	5,9	8,8	14,7	29,4	29,4									
30	Cultivar 01 - AD2 - 5000 - 20%-30%-40%		32,4	26,5	29,4	17,6	8,8	8,8	20,6	11,8	14,7	11,8	5,9	14,7	26,5										
31	Cultivar 02 - AD2 - 5000 - 20%-30%-40%		23,5	23,5	17,6	14,7	2,9	5,9	20,6	11,8	11,8	8,8	8,8	20,6	32,4										
32	Cultivar 03 - AD2 - 5000 - 20%-30%-40%		23,5	17,6	17,6	8,8	5,9	5,9	20,6	11,8	8,8	5,9	8,8	23,5	32,4										
33	Cultivar 01 - AD2 - 6000 - 20%-30%-40%			35,3	38,2	32,4	14,7	23,5	35,3	20,6	17,6	11,8	11,8	23,5	35,3										
34	Cultivar 02 - AD2 - 6000 - 20%-30%-40%			32,4	32,4	35,3	23,5	17,6	8,8	29,4	14,7	11,8	14,7	29,4	35,3										
35	Cultivar 03 - AD2 - 6000 - 20%-30%-40%			32,4	32,4	29,4	20,6	14,7	14,7	26,5	14,7	11,8	14,7	32,4											
36	Cultivar 01 - AD2 - 7000 - 20%-30%-40%								35,3		32,4	23,5	17,6	32,4											
37	Cultivar 02 - AD2 - 7000 - 20%-30%-40%								29,4	20,6	23,5	14,7	20,6	23,5	35,3										
38	Cultivar 03 - AD2 - 7000 - 20%-30%-40%								35,3		38,2	20,6	17,6	32,4	23,5	38,2									
39	Cultivar 01 - AD2 - 8000 - 20%-30%-40%													38,2	38,2	38,2	35,3								
40	Cultivar 02 - AD2 - 8000 - 20%-30%-40%													38,2	29,4	32,4									
41	Cultivar 03 - AD2 - 8000 - 20%-30%-40%													38,2	38,2	29,4	38,2								

Figura 9. Períodos de semeadura do milho, para a classe de solo com água disponível AD2 (0,53 mm cm⁻¹), três grupos de cultivares, diferentes níveis de produtividade esperada e três níveis de risco, em comparação com o Zarc tradicional, para o município de Castro, PR.

Para produtividades esperadas de até 5.000 kg ha⁻¹, as janelas de semeadura, obtidas com o ZarcPro-Milho, foram mais longas que as determinadas pelo Zarc tradicional e com riscos baixos na maior parte do período. A partir desse valor de PE, os riscos aumentaram, bem como reduziu-se a duração do período de semeadura. As maiores produtividades esperadas, de 8.000 kg ha⁻¹, foram simuladas em um período de semeadura estreito, truncado e com elevados riscos (Figura 9).

As produtividades simuladas médias máximas para Castro, PR, em torno de 10.024 kg ha⁻¹, considerando um solo com nível de água disponível AD4, ocorreram no decêndio 35 (11 a 20 de dezembro) (Figura 10). Esse rendimento é maior que o obtido para o solo com AD2 e, praticamente, idêntico ao valor médio estimado pelo IBGE (IBGE, 2023). Tal como nos demais municípios, para os mesmos níveis de água disponível e cultivares, à medida que as produtividades esperadas aumentam, os períodos de semeadura encurtam e os riscos associados aumentam. O maior nível de produtividade esperada, de 10.000 kg ha⁻¹, pode ser obtido com semeaduras realizadas apenas nos decêndios 35 e 36 e tolerando riscos acima de 30% (Figura 10).

Considerando um solo com nível de água disponível AD2 e todos os níveis de produtividade esperada (PE), o início do período de semeadura deve ser no decêndio 23, em Cascavel, PR; no

Para as mesmas condições climáticas, a maior disponibilidade de água no solo teve papel preponderante na expectativa de produtividade de milho. Por outro lado, para um mesmo nível de água disponível no solo, as condições climáticas é que controlaram os níveis de produtividade média simuladas.

Independentemente de cultivar e nível de água disponível no solo, à medida que as produtividades esperadas (PE) aumentaram, os períodos de semeadura encurtaram e os níveis de risco aumentam. Para o cenário de água disponível AD2, as maiores PEs foram de 5.000 kg ha⁻¹ a 6.000 kg ha⁻¹, em Sete Lagoas; de 6.000 kg ha⁻¹ a 7.000 kg ha⁻¹, em Cascavel; e de 7.000 kg ha⁻¹ a 8.000 kg ha⁻¹, em Castro (Figuras 5, 7 e 9). Na condição do solo com AD4, as PEs aumentaram para 6.000 kg ha⁻¹ a 7.000 kg ha⁻¹, 8.000 kg ha⁻¹ a 9.000 kg ha⁻¹ e 9.000 kg ha⁻¹ a 10.000 kg ha⁻¹, em Sete Lagoas, MG; Cascavel, PR; e Castro, PR, respectivamente (Figuras 6, 8 e 10).

Considerações

Dados representativos das regiões produtoras de milho do País, com o mínimo de observações requeridas para parametrização e avaliação de modelos, baseados em processos biofísicos, são difíceis de serem obtidos. Algumas informações cruciais, que estão ausentes, dificultam a parametrização de cultivares com diferentes durações de ciclo.

Critérios de decisão, baseados em simulações preliminares com o próprio modelo a ser parametrizado, permitem separar dados de ensaios com e sem estresse hídrico, e em três categorias de duração de ciclo dos genótipos. Os índices estatísticos obtidos nos processos de parametrização e avaliação são adequados à aplicação do modelo no Zoneamento Agrícola de Risco Climático de Produtividade (ZarcPro-Milho).

As metodologias utilizadas no ZarcPro-Milho, avaliadas em planilha eletrônica, para alguns municípios, apresentam resultados comparáveis aos do Zarc tradicional, produtividades correspondentes a um nível médio de tecnologia de produção. A aplicação do ZarcPro-Milho no Brasil gera mapas de risco compatíveis com os gerados com o Zarc tradicional.

O modelo baseado em processos gera resultados de produtividade que permitem o estabelecimento de períodos de semeadura de milho com base em classes de produtividade esperada, bem como o risco de não se alcançar uma determinada produtividade em função do clima, para cultivares com diferentes durações de ciclo e tipos de solo. A despeito da maior complexidade e do grande número de informações requeridas, essa metodologia gera um novo tipo de informação, que é o risco baseado em produtividades esperadas, que o Zarc tradicional não contempla. Esse tipo de informação permite, por exemplo, no âmbito do planejamento dos sistemas de produção, uma avaliação da compatibilidade das produtividades esperadas e dos custos associados com a oferta ou potencial climático de cada local. Outro uso reside no suporte a uma nova gama de tipos de contratos de seguro rural com diferentes níveis de cobertura, adequados à produtividade esperada para cada local ou época do ano.

Há espaço para melhoria da parametrização e avaliação do modelo, mediante a incorporação de mais dados, sobretudo de outras regiões do País não amplamente contempladas.

Referências

- ANDRADE, C. de L. T. de. **Balanço de água de um Latossolo Vermelho-Escuro Alico, cultivado com milho (*Zea mays* L.), sob irrigação por aspersão**. 1987. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- ANDRADE, C. de L. T. de; SILVA, P. P. G. da; MAGALHÃES, B. G.; PAIXÃO, J. S.; MELO, B. F. de; TIGGES, C. H. Parametrização do modelo CSM-CERES-Maize para uma cultivar de alta produtividade. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 31., 2016, Bento Gonçalves. **Milho e sorgo: inovações, mercados e segurança alimentar: anais**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2016.
- ANUÁRIO brasileiro do milho. Santa Cruz do Sul: Gazeta, 2022. 96 p.
- BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento do déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI, H. (coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. p. 25-32.
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MÜLLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.; PEREIRA, P. G. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000200008>.
- BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. Milho. In: MONTEIRO, J. E. A. (org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. p. 239-260.
- BERGAMASCHI, H.; RADIN, B.; ROSA, L. M. G.; BERGONCI, J. I.; ARAGONÉS, R. S.; SANTOS, A. O.; FRANÇA, S.; LANGENSIEPEN, M. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. **Revista Argentina de Agrometeorologia**, v. 1, n. 1, p. 23-27, 2001.
- BERLATO, M. A.; SUTILI, V. R. Determinação das temperaturas bases dos subperíodos emergência-pendoamento e emergência-espigamento de três cultivares de milho (*Zea mays* L.). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MILHO E SORGO, 11., 1976, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1978. p. 523-527.
- BIRCH, C. J.; HAMMER, G. L.; RICKERT, K. G. Temperature and photoperiod sensitivity of development in five cultivars of maize (*Zea mays* L.) from emergence to tassel initiation. **Field Crops Research**, v. 55, n. 1/2, p. 93-107, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00062-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00062-2).
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Programa Nacional de Zoneamento Agrícola de Risco Climático**: Portarias por Unidade Federativa. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/portarias>. Acesso: 3 nov. 2022.
- BRFÉRTIL. **Brasil no ranking dos principais produtores de milho**. Curitiba, 2022. Disponível em: <https://brfertil.com.br/brasil-no-ranking-dos-principais-produtores-de-milho/>. Acesso em: 11 dez. 2022.
- BRUNINI, O.; ABRAMIDES, P. L. G.; BRUNINI, A. P. C.; CARVALHO, J. P. Caracterizações macroclimáticas, agrometeorológicas e restrições ambientais para o cultivo de milho em regiões

tropicais baixas. **InfoBibos**, v. 1, n. 3, 2006. Disponível em: http://www.infobibos.com.br/artigos/2006_3/ambientemilho/index.htm. Acesso em: 11 dez. 2022.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting cropwater requirements**. Rome: FAO, 1975. 179 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

HENRIQUE, D. **Milho em 2021**: confirma os principais números do cereal mundo afora. Disponível em: <https://somensmilhoes.com/milho-em-2021-principais-numeros/>. Acesso em: 11 dez. 2022.

HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; SHELIA, V.; BOOTE, K. J.; SINGH, U.; WHITE, J. W.; HUNT, L. A.; OGOSHI, R.; LIZASO, J. I.; KOO, J.; ASSENG, S.; SINGELS, A.; MORENO, L. P.; JONES, J. W. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT): version 4.7**. Gainesville: DSSAT Foundation, 2019. Disponível em: <https://dssat.net/>. Acesso em: 13 set. 2023.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. **Produção Agrícola Municipal**: Tabela 839 – área plantada, área colhida, quantidade produzida e rendimento médio de milho, 1ª e 2ª safras. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuário/censo-agropecuário-2017>. Acesso em: 30 ago. 2023.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 235-265, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7).

KINIRY, J. R. Maize physics development. In: HANKS, J.; RITCHIE, J. T. (ed.). **Modeling plant and soil systems**. Madison: American Society of Agronomy, 1991. p. 55-71. (Agronomy Monographs, 31).

LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 7, n. 1/2, p. 51-73, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0169-7722\(91\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0169-7722(91)90038-3).

MANTOVANI, E. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; VIANA, J. H. M.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. de; OLIVEIRA, M. F. de; GONTIJO NETO, M. M.; ALVARENGA, R. C.; MATRANGOLO, W. J. R.; CRUZ, J. C. Plantio. In: PEREIRA FILHO, I. A. (ed.). **Cultivo do milho**. 9. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de Produção, 1).

MIEDEMA, P. The effects of low temperature on *Zea mays*. **Advances in Agronomy**, v. 35, p. 93-128, 1982. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60322-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60322-3).

MONTEIRO, J. E. B. de A.; VICTORIA, D. de C.; FARIAS, J. R. B.; BARROS, A. H.C.; LIMA, E. de P.; ARAÚJO FILHO, J. C. de; SILVA, F. A. M. da; EVANGELISTA, B. A.; TEIXEIRA, W. G. **Classes de água disponível do solo para uso no Zoneamento Agrícola de Risco Climático**. Campinas: Embrapa Agricultura Digital, 2022. 6 p. (Embrapa Agricultura Digital. Comunicado Técnico, 135).

NIELSEN, R. L. **Kernel set scuttlebutt**. West Lafayette: Purdue University, 2005. Disponível em: <https://www.agry.purdue.edu/ext/corn/news/timeless/kernelset.html>. Acesso em: 11 dez.2022.

RADIN, B.; BERGAMASCHI, H.; SANTOS, A. O.; BERGONCI, J. I.; FRANÇA, S. Evapotranspiração da cultura do milho em função da demanda evaporativa atmosférica e do crescimento de plantas. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 9, n. 1/2, p. 7-16, 2003.

REHAGRO. **Produtividade do milho**: como o clima atua no rendimento dos grãos? Disponível em: <https://rehagro.com.br/blog/clima-e-produtividade-do-milho/>. Acesso em: 11 dez. 2022.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. **How a corn plant develops**. Yowa State University, 1993. (Special Report, 48). Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/83024409.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2022.

SANCHES, A.; SALES, C. **Expressivo aumento nas exportações brasileiras de milho impõe mudanças na dinâmica do mercado nacional**. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opinia0-cepea/expressivo-aumento-nas-exportacoes-brasileiras-de-milho-impoe-mudancas-na-dinamica-do-mercado-nacional.aspx>. Acesso em: 7 dez. 2022.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geológico do Brasil**. Rio de Janeiro, 2001.

TEIXEIRA, W. G.; VICTORIA, D. C.; BARROS, A. H. C.; LUMBRERAS, J. F.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, F. A. M. LIMA, E. P.; BUENO FILHO, J. S. S.; MONTEIRO, J. E. B. A. **Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no zoneamento agrícola de risco climático**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 272).

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, v. 163, p. 190-202, 1998.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 1, p. 327-338, 2000. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.641327x>.

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, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4518>.

WILLMOTT, C. J.; AKLESON, G. S.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>.

YANG, A.; DOBERMANN, K. G.; CASSMAN, D. T.; WALTERS, P. GRASSINI **User manual of the hybrid-maize**. Lincoln: University of Nebraska, 2016.

Embrapa

Milho e Sorgo

CGPE 018489

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA E
PECUÁRIA

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO