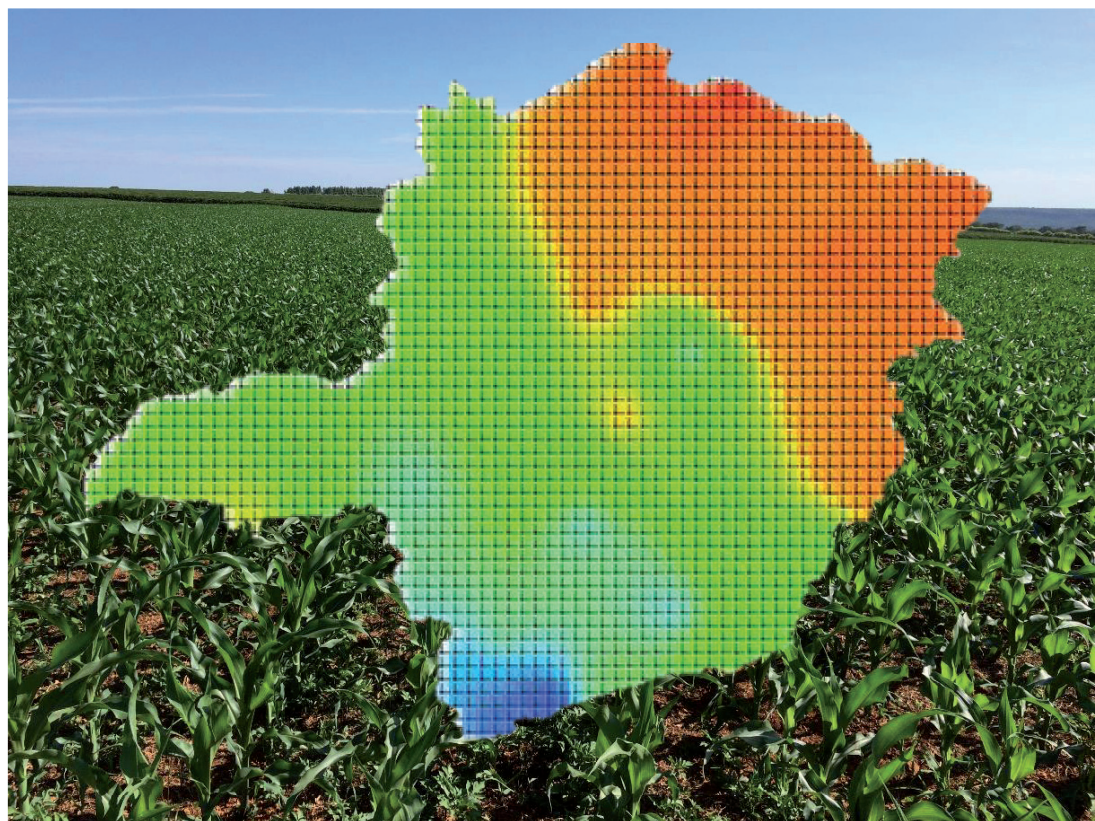


Aptidão e Potencial de Produção de Milho em Municípios de Minas Gerais



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

Documentos 199

Aptidão e Potencial de Produção de Milho em Municípios de Minas Gerais

Jéssica Sousa Paixão
Camilo de Lelis Teixeira de Andrade
Priscila Ponciana Gomes da Silva
Bruna Gomes Magalhães
Bruno Ferreira de Melo

Embrapa Milho e Sorgo
Sete Lagoas, MG
2016

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Milho e Sorgo

Rod. MG 424 Km 45

Caixa Postal 151

CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG

Fone: (31) 3027-1100

Fax: (31) 3027-1188

www.embrapa.br/fale-conosco

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Sidney Netto Parentoni

Secretário-Executivo: Elena Charlotte Landau

Membros: Antonio Claudio da Silva Barros, Cynthia Maria Borges

Damasceno, Maria Lúcia Ferreira Simeone, Monica Matoso

Campanha, Roberto dos Santos Trindade, Rosângela Lacerda de

Castro

Revisão de texto: Antonio Claudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica: Rosângela Lacerda de Castro

Tratamento de ilustrações: Tânia Mara Assunção Barbosa

Editoração eletrônica: Tânia Mara Assunção Barbosa

Foto(s) da capa: Miguel Marques Gontijo Neto. Montagem: Camilo

de Lelis Teixeira de Andrade

1ª edição

Versão Eletrônica (2016)

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

Aptidão e potencial de produção de milho em municípios de Minas

Gerais / Jéssica de Sousa Paixão ... [et al.] . -- Sete Lagoas :

Embrapa Milho e Sorgo, 2016.

41 p. : il. -- (Documentos / Embrapa Milho e Sorgo,

ISSN 1518-4277; 199).

1. *Zea mays*. 2. Semeadura. 3. Modelo de simulação. I. Paixão, Jéssica de Sousa. II. Série.

CDD 633.15 (21. ed.)

© Embrapa 2016

Autores

Jéssica Sousa Paixão

Mestranda em Produção Vegetal pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
- UENF, jsousa.paixao@hotmail.com

Camilo de Lelis Teixeira de Andrade

PhD, Engenharia da Irrigação, Embrapa Milho e Sorgo, Rod. MG 424 Km 45, Sete Lagoas, MG,
camilo.andrade@embrapa.br

Priscila Ponciana Gomes da Silva

Engenheira Agrônoma, Universidade Federal de São João del Rey (UFSJ),
prigomes18@hotmail.com

Bruna Gomes Magalhães

Mestranda em Produção Vegetal, Universidade Federal de São João del Rey (UFSJ),
bruna@setelagoas.com.br

Bruno Ferreira de Melo

Graduando em Eng. Ambiental, UNIFEMM,
brunoferreiramelos@hotmail.com

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. 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 este problema, entre as quais a escolha do período de semeadura adequado, preconizado no zoneamento de risco climático do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (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. Este 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 modelos de simulação, baseados em processo, para simular produtividades potenciais e atingíveis e para definir a aptidão e o período de semeadura para a cultura de milho, em regime de sequeiro, para municípios de Minas

Gerais. Com isso, foi possível quantificar, por exemplo, a importância da retenção de água no solo para a aptidão e período de semeadura para produção de milho, e também avaliar em quais municípios seria vantajoso o uso da irrigação para aumentar a produtividade.

Antonio Alvaro Corsetti Purcino

Chefe-Geral

Embrapa Milho e Sorgo

Sumário

Resumo	7
Introdução	8
Metodologia.....	13
Resultado e Discussão	18
Conclusões	35
Agradecimentos	36
Referências	36

Aptidão e Potencial de Produção de Milho em Municípios de Minas Gerais

Jéssica Sousa Paixão¹

Camilo de Lelis Teixeira de Andrade²

Priscila Ponciana Gomes da Silva³

Bruna Gomes Magalhães⁴

Bruno Ferreira de Melo⁵

Resumo

A cultura do milho é bastante sensível à disponibilidade hídrica no solo que, por sua vez, está relacionada ao regime de chuvas do local. Além da precipitação, existem vários fatores climáticos que podem afetar o desempenho das culturas, tais como radiação solar e temperatura. Produzir milho, sob condições de sequeiro, é uma prática comum no Brasil. Neste sistema de produção, as culturas são fortemente afetadas pela inerente variabilidade climática anual e interanual, especialmente pelos veranicos. Portanto, a data de semeadura é crucial para o sucesso das safras. A realização da semeadura na época adequada é uma prática que não custa nada ao agricultor e, em contrapartida, pode garantir uma melhor produtividade da cultura do milho. Utilizou-se o modelo CSM-CERES-Maize, alimentado com dados históricos de clima, para simular cenários de épocas de semeadura do milho, em regime de sequeiro, para 20 municípios de Minas Gerais. Diferentes níveis de redução da produtividade de sequeiro, em relação à produtividade sem estresses, foram avaliados para determinar

a aptidão dos municípios para o cultivo de milho. Quanto mais elevado o nível de redução da produtividade e menor a capacidade de retenção de água do solo, menor é o número de municípios aptos a semeadura do milho. O uso de tecnologias que minimizem os estresses bióticos e abióticos, como a irrigação, nem sempre garante melhores produtividades. Entretanto, independentemente da capacidade de retenção de água do solo, em municípios quentes e secos, nos quais a produtividade média de milho de sequeiro é baixa, o uso da irrigação tem o potencial para aumentar em até 40% o rendimento na cultura do milho.

Palavras-chave: Produtividade, época de semeadura, DSSAT, *Zea mays* L.

Introdução

O milho (*Zea mays* L.) é uma planta pertencente à família *Poaceae*, originária da América Central, cultivado em praticamente todas as regiões do mundo sob as mais diversas condições edafoclimáticas. Trata-se de um alimento rico em carboidratos, considerado como energético e também como fonte de óleo, fibras, vitaminas E, B1, B2 e ácido pantotênico, além de alguns minerais, como o fósforo e o potássio (MATOS et al., 2006).

Em função de seu potencial produtivo, composição química e valor nutritivo, o milho constitui-se em um dos mais importantes cereais cultivados e consumidos no mundo. Por causa da sua multiplicidade de aplicações, tanto na alimentação humana quanto animal, assume um relevante papel socioeconômico, além de constituir-se em indispensável

matéria-prima impulsionadora de diversificados complexos agroindustriais no mundo (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

O milho em grão, utilizado na alimentação animal, representa a maior parte do consumo desse cereal no mundo. No Brasil, o consumo varia de 70 a 90%, dependendo da região geográfica. Embora a utilização do milho na alimentação humana não seja significativa no Brasil, esse cereal tem grande importância como alimento em regiões com baixa renda, como no Nordeste, onde é uma das principais fontes de energia para muitas pessoas que vivem no Semiárido (DUARTE et al., 2010).

A produção do milho tende a se expandir consideravelmente para suprir a demanda gerada em função do crescimento populacional e, principalmente, pelo aumento do consumo do cereal para a fabricação de energia renovável como o etanol (SILVA, 2004). As plantas de milho se desenvolvem bem em uma grande diversidade de solos, clima e variadas tecnologias de manejo cultural.

No entanto, de acordo com Andrade (1995), apesar do elevado potencial produtivo, a planta de milho apresenta acentuada sensibilidade a estresses de natureza biótica (plantas daninhas, pragas e doenças) e abiótica (temperatura, luminosidade, umidade, solo, precipitação, dentre outros). Para a grande maioria das culturas, os efeitos dos fatores abióticos são maiores na fase reprodutiva, mais especificamente no florescimento. Os efeitos causados pelos fatores abióticos são potencializados quando existe atuação de dois ou mais fatores atuando simultaneamente (GALON et al., 2010).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, sendo este o cereal com maior volume de produção mundial, com uma produção estimada em 906,82 milhões de toneladas para a safra de 2014/2015, sendo cultivado em área de 160,2 milhões de hectares (FAO, 2014).

Contudo, apesar de estar entre os três maiores produtores, o Brasil não se destaca entre os países com maior nível de produtividade, por causa do grande número de pequenos produtores que cultivam esse cereal empregando menor investimento em tecnologia. A importância da cultura do milho ainda está relacionada ao aspecto social, pois a maioria dos produtores não são tecnificados, não possuem grandes extensões de terras, mas dependem dessa produção para viver (DUARTE et al., 2010).

O rendimento médio de grãos de milho no Brasil está abaixo do potencial e apresenta grande variação entre as regiões. Nota-se, também, uma grande disparidade na produtividade desta cultura entre as diversas regiões de Minas Gerais. Na safra de 2014, a produtividade média estimada pelo IBGE variou de 7.655 kg ha⁻¹, no Noroeste de Minas, a apenas 1.567 kg ha⁻¹, no Jequitinhonha (IBGE, 2016).

A maior parte da produção de milho no Brasil é realizada em condições de sequeiro, estando sujeita às várias instabilidades climáticas (SOUSA; PERES, 1998), o que torna fundamental o conhecimento do efeito da deficiência hídrica nos principais estádios de desenvolvimento das plantas de milho (SILVA et al., 2010). A água é um dos fatores mais determinantes na produção do milho, principalmente em algumas fases, como na germinação, floração e enchimento de grãos. A disponibilidade

de água é determinada pela distribuição e intensidade pluviométrica, capacidade de armazenamento de água do solo e consumo de água pela cultura (SANS et al., 2001).

Uma das estratégias para minimizar o risco de perdas na produtividade, por causa das condições climáticas, é a semeadura na época adequada. Na região Centro-Oeste, para cada dia de atraso na semeadura do milho pode ocorrer uma redução de 30 kg ha⁻¹ na produtividade do milho (COELHO et al., 2003). A escolha da data de semeadura mais adequada é uma prática que não apresenta custos extras ao agricultor, mas pode garantir a produtividade da cultura do milho (FORSTHOFER et al., 2006). O sucesso dessa prática agrícola está fortemente relacionado com a capacidade de planejamento do agricultor de forma que a semeadura seja realizada no período recomendado (SANS; GUIMARÃES, 2006).

Existem diversas maneiras de se definir um período de semeadura para uma determinada região. Uma das formas mais tradicionais é através da condução de ensaios em campo, com datas de semeaduras escalonadas ao longo do tempo, o que requer um grande esforço de pesquisa em termos de recursos materiais e humanos e com resultados limitados, em decorrência da grande variabilidade climática interanual (AMARAI et al., 2009). O zoneamento de risco climático elaborado pelo Ministério da Agricultura se baseia na satisfação das necessidades hídricas e térmicas das culturas quando cultivadas em certo município. Trata-se de um instrumento de política agrícola e de gestão de riscos na agricultura, elaborado anualmente com o objetivo de minimizar os riscos relacionados aos fenômenos climáticos e de permitir que cada município identifique a melhor data de semeadura das culturas, nas

diferentes texturas de solos e ciclos de cultivares (BRASIL, 2012). Outra opção, de grande potencial para a determinação das épocas de semeadura mais apropriadas, é a utilização da simulação do crescimento de culturas, empregando modelos previamente calibrados e validados.

Modelos de simulação, baseados em processos, capazes de prever o rendimento final de diversas culturas, têm sido utilizados intensivamente em várias partes do mundo. Estes descrevem matematicamente a dinâmica do crescimento das culturas por meio da integração numérica, com a ajuda de computadores (RECH et al., 2009). Atualmente, existe uma grande disponibilidade de modelos desenvolvidos para a simulação de crescimento de diversas culturas, com eficácia já comprovada em várias situações. Dentre estes, destaca-se o *Cropping System Model* (CSM)-CERES-Maize, do sistema DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) (JONES et al., 2003; HOOGENBOOM et al., 2014).

Esta ferramenta permite simular a produção de diversas culturas semeadas em diferentes datas, utilizando como entrada dados de séries históricas de clima, dados de solos e coeficientes que controlam a duração das fases fenológicas (florescimento e maturidade fisiológica) e os componentes de produção (número de grãos por unidade de área e peso unitário de grãos). Por empregar séries históricas de dados de clima, a variabilidade climática entre os anos é considerada, obtendo-se valores de produtividade máximos, mínimos, médios e mais frequentes, para uma certa data de semeadura.

Neste intuito, este trabalho foi realizado com os objetivos de definir as melhores datas de semeadura e a aptidão para a

produção do milho, sob condições de sequeiro, em municípios representativos do Estado de Minas Gerais.

Metodologia

Dados de 14 ensaios experimentais, obtidos sob condições com e sem estresses bióticos e abióticos, foram utilizados para parametrizar e para avaliar o modelo para a cultivar DKB390PRO. O processo de calibração consistiu em ajustar, por tentativa e erro, os coeficientes que controlam a data do florescimento e da maturidade fisiológica e os componentes de produção (número de grãos por unidade de área e peso unitário de grãos) da cultura do milho, para que o modelo simule corretamente estes processos.

Em uma etapa posterior, o modelo CSM-CERES-Maize, da suíte de modelos DSSAT, versão 4.5.1.013 (HOOGENBOOM et al., 2014), foi usado para simular a produtividade do milho, em condições de sequeiro. Simulações de épocas de semeadura semanais foram realizadas para 20 municípios de Minas Gerais.

Dados diários de temperatura mínima e máxima, precipitação e de insolação, de cada município, foram obtidos no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A ferramenta *Weatherman* (PICKERING et al., 1994), do DSSAT, foi utilizada para analisar a consistência dos dados, para preencher falhas na temperatura do ar e na precipitação em períodos curtos, inferiores a sete dias, e para estimar a radiação solar a partir de dados de insolação, usando a equação de Angstrom-Prescott (ANGSTROM, 1924; PRESCOTT, 1940). Os coeficientes “a” e “b” da equação de Angstrom-Prescott foram padronizados em 0,25 e 0,50, respectivamente, conforme recomendado por

Allen et al. (1998), por causa da inexistência de valores para os coeficientes em todos os municípios. Nas simulações, para cada um dos municípios, foi utilizada uma série com 33 anos de dados diários de clima, iniciando-se em 1980.

Em termos de retenção de água do solo, utilizou-se a mesma metodologia empregada pelo Mapa (SANS et al., 2001), ou seja, considerou-se a cultura do milho com um sistema radicular com 0,50 m de profundidade e três tipos de solos, como empregado no Zoneamento de Risco Climático do Mapa. Dados existentes foram ajustados para se criarem três perfis de solo fictícios com características de baixa (20 mm), média (40 mm) e alta capacidade de retenção de água (60 mm) (Tabela 1).

Considerou-se o cultivo do híbrido simples de milho DKB390PRO, cujos coeficientes genéticos foram previamente parametrizados em trabalhos anteriores. As condições de manejo para a cultura do milho, adotadas nas simulações, foram ajustadas para não ocorrerem estresses bióticos e abióticos (CRUZ et al., 2006), exceto estresse hídrico. Assumiu-se um espaçamento de 0,5 m entre fileiras, com uma população final de 69 mil plantas ha^{-1} . A adubação de plantio consistiu de 40 kg ha^{-1} de nitrogênio, na forma de ureia, 140 kg ha^{-1} de P_2O_5 , na forma de superfosfato simples e 80 kg ha^{-1} de K_2O , na forma de cloreto de potássio. Em cobertura, foram aplicados 150 kg ha^{-1} de nitrogênio, como ureia, aos 25 dias após a semeadura (DAS), 70 kg ha^{-1} de K_2O , como cloreto de potássio, aos 40 DAS e 150 kg ha^{-1} de nitrogênio, como ureia aos 40 DAS.

Tabela 1. Atributos dos três perfis de solo genéricos

Solo de Baixa Capacidade de Retenção de Água (20 mm)										
P ¹	PMP	CC	S	F _{raiz}	CH _{sat}	DA	CO	Argila	Silt	pH
(m)	(m ³ m ⁻³)			(adm)*	(m h ⁻¹)	(kg m ⁻³)		(%)		(adm)
0,05	0,170	0,195	0,445	1,0	0,682	1470	0,21	10	0,5	5,7
0,10	0,175	0,200	0,461	1,0	0,682	1430	0,21	10	0,5	5,8
0,30	0,190	0,230	0,435	1,0	0,601	1500	0,19	9	0,5	5,7
0,50	0,200	0,250	0,493	0,9	0,625	1340	0,17	11	1,0	5,2
0,70	0,220	0,270	0,509	0,01	0,327	1300	0,16	13	2,5	5,0
0,90	0,230	0,275	0,530	0,0	0,451	1250	0,14	14	1,0	5,0
1,10	0,240	0,280	0,540	0,0	0,435	1220	0,14	16	0,0	5,0
Solo de Média Capacidade de Retenção de Água (40 mm)										
0,05	0,288	0,368	0,568	1,0	0,0523	1050	0,21	63	19	5,7
0,10	0,278	0,358	0,577	1,0	0,0977	1020	0,21	63	22	5,8
0,30	0,280	0,360	0,561	1,0	0,0786	1070	0,19	68	20	5,7
0,50	0,270	0,350	0,599	0,9	0,0645	960	0,17	71	13	5,2
0,70	0,262	0,352	0,611	0,01	0,2302	930	0,16	72	13	5,0
0,90	0,253	0,340	0,627	0,0	0,3719	890	0,14	72	14	5,0
1,10	0,250	0,329	0,631	0,0	0,3730	870	0,14	72	14	5,0
Solo de Alta Capacidade de Retenção de Água (60 mm)										
0,05	0,265	0,390	0,525	1,0	0,0418	1260	0,21	63	19	5,7
0,10	0,260	0,380	0,577	1,0	0,0782	1120	0,21	63	22	5,8
0,30	0,260	0,380	0,556	1,0	0,0629	1180	0,19	68	20	5,7
0,50	0,256	0,375	0,602	0,9	0,0516	1060	0,17	71	13	5,2
0,70	0,255	0,362	0,614	0,01	0,1842	1020	0,16	72	13	5,0
0,90	0,253	0,340	0,631	0,0	0,2975	980	0,14	72	14	5,0
1,10	0,250	0,329	0,639	0,0	0,2984	960	0,14	72	14	5,0

¹Profundidade (P), ponto de murcha permanente (PMP), capacidade de campo (CC), saturação (S), fator de crescimento de raiz (F_{raiz}), condutividade hidráulica saturada (CH_{sat}), densidade aparente (DA) e carbono orgânico (CO), *adm = adimensional.

O modelo foi programado para realizar semeaduras semanais, iniciando em 1º de agosto e estendendo-se por 52 semanas até 24 de julho. Desta forma, para cada semana, cada tipo de solo e cada município, foram gerados 33 valores simulados de produtividade, expressos em matéria seca de grãos, que foram, posteriormente, corrigidos para 13% de umidade.

Utilizou-se a metodologia descrita em Amaral et al. (2009) para estabelecer a curva de quebra da produtividade ao longo do ano, possibilitando que uma janela de semeadura fosse estabelecida para diferentes níveis de risco que o tomador de decisão estaria disposto a correr. O maior valor médio (média de 33 anos) de produtividade simulada foi identificado e quebras de produtividade foram estabelecidas de acordo com a equação:

$$Y_q = \left(1 - \frac{Y_s}{Y_{\max}} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

em que Y_q é a porcentagem de redução da produtividade; Y_s é a produtividade de uma dada semana, em kg ha^{-1} e $Y_{\max}$ é a produtividade máxima entre todas as semanas, em kg ha^{-1} . No presente estudo adotou-se como referência um nível de risco de 10%, ou seja, o tomador de decisão toleraria quebras de, no máximo, 10% na produtividade de milho. Definiram-se as janelas de semeadura considerando o período no qual as quebras de produtividade eram inferiores a 10% (Figura 1).

O estabelecimento da janela de semeadura não garante, todavia, que o município seja apto para a produção de milho, requerendo, então, outro critério. O critério utilizado para definir a aptidão de um município para a produção de milho foi estabelecido com base na relação:

$$Y_p = \left(1 - \frac{Y_m}{Y_{\text{pot}}} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

onde Y_p é a porcentagem de quebra da produtividade em relação à potencial, que é a produtividade sem quaisquer estresses; Y_m é a produtividade média de sequeiro na janela de semeadura, em kg ha^{-1} e Y_{pot} é a produtividade média

potencial, no mesmo período, em kg ha^{-1} . Os valores de Y_m foram determinados calculando-se a média aritmética das produtividades simuladas de sequeiro considerando 33 anos e todas as datas compreendidas na janela de semeadura. Os valores de Y_{pot} foram determinados da mesma forma, considerando-se, entretanto, as produtividades potenciais obtidas desligando-se as rotinas de balanço de água e de nitrogênio do modelo. As produtividades assim obtidas refletem as condições de temperatura do ar e de radiação incidente apenas. Três níveis de redução da produtividade média de sequeiro, em relação à produtividade potencial (40%, 50% e 60%), foram avaliados e comparados com a aptidão estabelecida pelo Mapa.

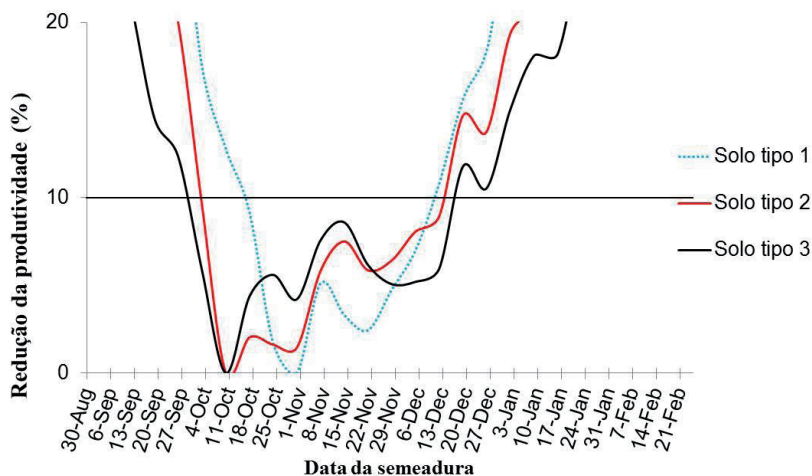


Figura 1. Redução da produtividade de grãos de milho em relação ao valor médio máximo histórico, para diferentes datas de semeadura, em regime de sequeiro, no município de Patos de Minas, Minas Gerais.

Além do período de semeadura, o uso da modelagem de processos permite que se obtenham também estimativas da produtividade e da duração do ciclo da cultura, o que favorece o planejamento por parte de agentes de crédito e produtores. Assim, para cada município e tipo de solo determinou-se a média da produtividade mínima, mediana, máxima e média, para o período de semeadura previamente estabelecido, em regime de sequeiro e sem estresses (potencial). O mesmo foi realizado para a duração do ciclo da cultura. Embora a produtividade potencial não seja dependente do tipo de solo, os períodos de semeadura o são, pois são estabelecidos empregando-se dados de produtividade de sequeiro, que sofrem influência do tipo de solo. Assim, os valores mínimo, mediano, máximo e médio de produtividade e comprimento de ciclo, para os períodos de semeadura, podem ser diferentes para cada tipo de solo.

Resultados e Discussão

Após a parametrização, o modelo foi capaz de simular bem uma ampla faixa de rendimento, incluindo situações em que a cultura foi submetida ao estresse hídrico e apresentou baixas produtividades (Figura 2).

Considerando como aceitável uma redução de 40% na produtividade de grãos de milho, em regime de sequeiro, em comparação com a produção potencial, observa-se que, para o solo com baixa retenção de água, apenas dois dentre os 20 municípios estudados foram admitidos como aptos para o plantio de milho, quais sejam, Machado e Uberaba (Tabela 2). Para uma mesma condição climática, a cultura do milho pode esgotar a água disponível dos solos com baixa capacidade de

retenção, submetendo-se mais rapidamente ao estresse hídrico, o que causa redução da produtividade ou mesmo a morte da cultura. Adicionalmente, solos arenosos, ou seja, com teor de argila inferior a 15% apresentam, em geral, baixos níveis de fertilidade, baixa capacidade de retenção de água, perdem mais água por evaporação e são mais propensos à lixiviação de nutrientes, como nitrogênio e potássio. Entretanto, em regiões com um regime hídrico mais favorável e com um manejo cultural adequado, as produções de milho em solos de textura mais arenosa têm sido bem-sucedidas (LANDAU et al., 2009).

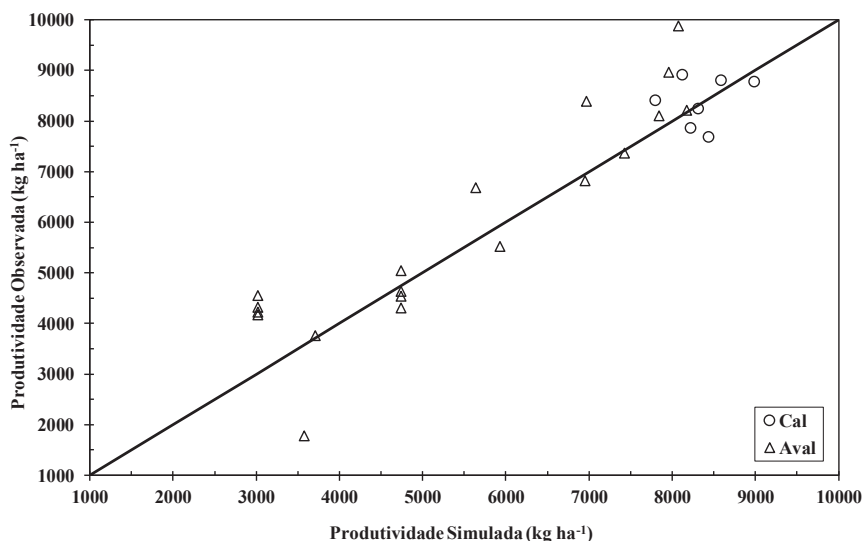


Figura 2. Dados observados e simulados de produtividade de grãos de milho, após parametrização e avaliação do modelo para a cultivar DKB390PRO.

À medida que a capacidade de retenção de água do solo aumenta, também aumenta o número de municípios aptos, que passa para 14, se o solo for de média capacidade de retenção, e para 18 se for de alta capacidade de retenção (Tabela 2).

Tabela 2. Aptidão e janelas de semeadura para a cultura do milho em solos de baixa (20 mm), média (40 mm) e alta (60 mm) capacidade de retenção de água, tolerando-se 40% de redução na produtividade média de sequeiro, em relação à produtividade média potencial

Cidades	Período de Semeadura Simulado		
	Baixa Retenção	Média Retenção	Alta Retenção
Aimorés	---	---	17/10
Araçuaí	---	---	---
Araxá	---	26/09 – 05/12	05/09 – 12/12
Bambuí	---	03/10 – 31/10	12/09 – 28/11
Caratinga	---	03/10 – 24/10	26/09 – 10/10
Curvelo	---	10/10 – 07/11	10/10 – 07/11
Itamarandiba	---	—	19/09 – 24/10
Ituiutaba	---	10/10 – 28/11	10/10 – 02/01
Janaúba	---	---	---
Januária	---	---	17/10 – 07/11
Lavras	---	19/09 – 21/11	05/09 – 05/12
Machado	03/10 – 05/12	19/09 – 05/12	12/09 – 23/01
Montes Claros	---	---	10/10 – 24/10
Paracatu	---	17/10 – 07/11	03/10 – 07/11
Patos de Minas	---	03/10 – 12/12	03/10 – 12/12
Pompéu	---	10/10 – 31/10	10/10 – 07/11
Sete Lagoas	---	03/10 – 31/10	26/09 – 31/10
Uberaba	24/10 – 19/12	03/10 – 31/10	26/09 – 31/10
Unaí	---	17/10 – 07/11	03/10 – 07/11
Viçosa	---	26/09 – 07/11	05/09 – 31/10

* Linhas tracejadas indicam que o município é considerado inapto para o cultivo de milho.

A disponibilidade de água no solo governa a produção vegetal. Assim sua falta ou excesso afetam de maneira decisiva o crescimento e desenvolvimento das plantas (REICHARDT, 1996), pois alteram a absorção dos nutrientes e da própria água (HUMBRET, 1968). A capacidade de retenção de água, a aeração e a resistência à penetração das raízes são propriedades do solo diretamente relacionadas com o crescimento das plantas (LETEY, 1985). Valores-limites dessas propriedades, em relação

ao crescimento e desenvolvimento das plantas, têm sido documentados na literatura.

No caso do solo com alta capacidade de retenção de água, apenas Araçuaí e Janaúba não foram considerados aptos para a produção de milho. Já em Aimorés o plantio de milho, mesmo no solo de alta capacidade de retenção, foi altamente restritivo com apenas uma data para semeadura.

Quando se considera como tolerável uma redução de 50% na produtividade de sequeiro, em relação à produtividade potencial, nota-se um maior número de municípios aptos à produção de milho (Tabela 3).

Para o solo com baixa capacidade de retenção de água, seis dentre os 20 municípios estudados foram considerados aptos, enquanto que para o solo com média e alta capacidade de retenção de água o número de municípios aptos passou para 15 e 20, respectivamente.

Ao se considerar como aceitável uma redução de até 60% na produtividade de sequeiro, em comparação com a produtividade potencial (Tabela 4), o número de municípios aptos para a produção de milho, para os solos com baixa e média capacidade de retenção de água, aumentou para 11 e 18, respectivamente, mantendo-se em 20 o número de municípios aptos para o solo alta capacidade de retenção de água. Para este nível de redução da produtividade, as janelas de semeadura se alongaram consideravelmente, em comparação com aquelas determinadas quando se admitiram níveis de redução na produtividade de 50% (Tabela 3) ou 40% (Tabela 2). Ao se aceitar uma redução de 60%, a maioria das cidades

estudadas, sem distinção do tipo de solo, foi considerada apta para a produção de milho.

Tabela 3. Aptidão e janelas de semeadura para a cultura do milho em solos de baixa (20 mm), média (40 mm) e alta (60 mm) capacidade de retenção de água, tolerando 50% de redução na produtividade média de sequeiro, em relação à produtividade média potencial

Cidades	Período de Semeadura Simulado		
	Baixa Retenção	Média Retenção	Alta Retenção
Aimorés	---	---	17/10
Araçuaí	---	---	03/10 – 31/10
Araxá	03/10 – 05/12	26/09 – 05/12	05/09 – 12/12
Bambuí	---	03/10 – 31/10	12/09 – 28/11
Caratinga	---	03/10 – 24/10	26/09 – 10/10
Curvelo	---	10/10 – 07/11	10/10 – 07/11
Itamarandiba	---	03/10 – 24/10	19/09 – 24/10
Ituiutaba	---	10/10 – 28/11	10/10 – 02/01
Janaúba	---	---	17/10 – 24/10
Januária	---	---	17/10 – 07/11
Lavras	26/09 – 05/12	19/09 – 21/11	05/09 – 05/12
Machado	03/10 – 05/12	19/09 – 05/12	12/09 – 23/01
Montes Claros	---	---	10/10 – 24/10
Paracatu	---	17/10 – 07/11	03/10 – 07/11
Patos de Minas	17/10 – 05/12	03/10 – 12/12	03/10 – 12/12
Pompéu	---	10/10 – 31/10	10/10 – 07/11
Sete Lagoas	---	03/10 – 31/10	26/09 – 31/10
Uberaba	24/10 – 19/12	03/10 – 31/10	26/09 – 31/10
Unaí	---	17/10 – 07/11	03/10 – 07/11
Viçosa	03/10 – 21/11	26/09 – 07/11	05/09 – 31/10

* Linhas tracejadas indicam que o município é considerado inapto para o cultivo de milho.

A capacidade de retenção de água do solo teve um papel fundamental na definição do início e da duração das janelas de semeaduras, especialmente nos municípios com menor precipitação e altas temperaturas. Mas nem sempre uma maior capacidade de retenção de água do solo favorece uma janela de semeadura mais longa.

Tabela 4. Aptidão e janelas de semeadura para a cultura do milho em solos de baixa (20 mm), média (40 mm) e alta (60 mm) capacidade de retenção de água, tolerando 60% de redução na produtividade média de sequeiro, em relação à produtividade média potencial

Cidades	Período de Semeadura Simulado		
	Baixa Retenção	Média Retenção	Alta Retenção
Aimorés	---	17/10 – 07/11	17/10
Araçuaí	---	---	03/10 – 31/10
Araxá	03/10 – 05/12	26/09 – 05/12	05/09 – 12/12
Bambuí	24/10 – 05/12	03/10 – 31/10	12/09 – 28/11
Caratinga	---	03/10 – 24/10	26/09 – 10/10
Curvelo	---	10/10 – 07/11	10/10 – 07/11
Itamarandiba	---	03/10 – 24/10	19/09 – 24/10
Ituiutaba	21/11 – 28/11	10/10 – 28/11	10/10 – 02/01
Janaúba	---	---	17/10 – 24/10
Januária	---	17/10 – 07/11	17/10 – 07/11
Lavras	26/09 – 05/12	19/09 – 21/11	05/09 – 05/12
Machado	03/10 – 05/12	19/09 – 05/12	12/09 – 23/01
Montes Claros	---	10/10 – 14/11	10/10 – 24/10
Paracatu	24/10 – 28/11	17/10 – 07/11	03/10 – 07/11
Patos de Minas	17/10 – 05/12	03/10 – 12/12	03/10 – 12/12
Pompéu	24/10 – 28/11	10/10 – 31/10	10/10 – 07/11
Sete Lagoas	10/10 – 14/11	03/10 – 31/10	26/09 – 31/10
Uberaba	24/10 – 19/12	03/10 – 31/10	26/09 – 31/10
Unai	---	17/10 – 07/11	03/10 – 07/11
Viçosa	03/10 – 21/11	26/09 – 07/11	05/09 – 31/10

* Linhas tracejadas indicam que o município é considerado inapto para o cultivo de milho.

Como as produtividades simuladas de sequeiro, de certa semana, foram comparadas com a maior produtividade simulada entre todas as semanas, mesmo que as produtividades de sequeiro estivessem bem abaixo da produtividade potencial, ocorreram casos em que a janela de semeadura para o solo de baixa retenção de água foi maior que aquela obtida para o solo com maior capacidade de retenção de água. Para a maioria dos municípios, todavia, observou-se uma tendência de se obterem períodos de semeadura mais longos

em solos com maior capacidade de retenção de água (Tabelas 2, 3 e 4). A semeadura no período inadequado é uma das principais causas das baixas produtividades de milho no Brasil (FORSTHOFER, 2004).

Ao se compararem os dados obtidos com o uso do modelo CSM-CERES-Maize, com o zoneamento de risco climático do Mapa, verifica-se que existem consideráveis diferenças nas janelas de semeadura (Tabelas 2, 3, 4 e 5). Pela metodologia do Mapa, os únicos municípios considerados inaptos para a produção de milho são Aimorés, Araçuaí e Janaúba quando o solo é de baixa capacidade de retenção de água. O início do período de semeadura da cultura do milho, em todos os municípios e para os três tipos de solo, é 1º de outubro. Ao contrário, pelas simulações com o modelo CSM-CERES-Maize, o início da janela de semeadura varia com o tipo de solo e também com o nível aceitável de redução da produtividade de sequeiro em relação à potencial (40%, 50% ou 60%). De maneira geral, para os municípios situados em regiões mais secas, a metodologia utilizada pelo modelo CSM-CERES-Maize é mais rigorosa, estabelecendo períodos de semeadura mais curtos que os do zoneamento do Mapa. Tais discrepâncias entre os resultados obtidos pelo modelo CSM-CERES-Maize, comparativamente aos disponibilizados pelo zoneamento de risco climático do Mapa, são decorrentes da utilização de abordagens bastante diferentes para se determinar a duração das janelas de semeadura. O zoneamento de risco climático do Mapa se baseia no Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), determinado em simulações, em escala decendial, por meio de um modelo de balanço hídrico da cultura (SANS et al., 2001). As variáveis meteorológicas, precipitação pluvial e temperatura do ar, empregadas nas simulações, são

provenientes de séries históricas de dados com média de 20 anos. Por outro lado, a metodologia proposta neste estudo utiliza como critério quebras de produtividade, obtidas com o emprego de um modelo de simulação, baseado em processo, capaz de avaliar a resposta da cultura a outras variáveis, como temperatura do ar e radiação solar, e não somente aos estresses hídrico e térmico.

No modelo de simulação CSM-CERES-Maize, o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura do milho são simulados de forma determinística, resultando em previsões exatas das variáveis de interesse, isto é, sem qualquer distribuição de probabilidade ou elementos aleatórios associados (JONES, 1986). Outra diferença entre as duas metodologias diz respeito à base de dados de clima utilizada. Enquanto no zoneamento de risco climático do Mapa se utilizou uma base com 20 anos de dados, no presente estudo se empregou uma série com 33 anos de dados diários. Como há uma tendência de mudança nos elementos do clima ao longo dos anos, o uso de base de dados com número de anos diferentes pode afetar os valores simulados de produtividade e, conseqüentemente, o período de semeadura.

Os diferentes limites testados para se definir a aptidão de um município ao plantio do milho propiciaram resultados consistentes. Obviamente que, assumindo uma redução de 40% na produtividade média de sequeiro, em relação à produtividade potencial, torna o plantio de milho inapto em muito mais municípios do que quando se aceita uma redução de 50% ou 60%.

Tabela 5. Janelas de semeadura para a cultura do milho em solos de baixa (20 mm), média (40 mm) e alta (60 mm) capacidade de retenção de água, obtidos pelo zoneamento de risco climático do Mapa, considerando 20 municípios de Minas Gerais.

Cidades	Período de Semeadura do Mapa		
	Baixa Retenção	Média Retenção	Alta Retenção
Aimorés	---	1/10 – 31/10	1/10 – 31/10
Araçuaí	---	1/10 – 20/10	1/10 – 31/10
Araxá	1/10 – 31/12	1/10 – 31/12	1/10 – 31/12
Bambuí	1/10 – 30/11	1/10 – 31/12	1/10 – 31/12
Caratinga	1/10 – 20/10	1/10 – 10/11	1/10 – 20/11
Curvelo	1/10 – 20/10	1/10 – 10/11	1/10 – 30/11
Itamarandiba	1/10 – 20/10	1/10 – 10/11	1/10 – 20/11
Ituiutaba	1/10 – 31/12	1/10 – 31/12	1/10 – 31/12
Janaúba	---	1/10 – 31/10	1/10 – 10/11
Januária	1/10 – 20/10	1/10 – 31/10	1/10 – 10/11
Lavras	1/10 – 20/12	1/10 – 31/12	1/10 – 31/12
Machado	1/10 – 20/12	1/10 – 31/12	1/10 – 31/12
Montes Claros	1/10 – 20/10	1/10 – 31/10	1/10 – 10/11
Paracatu	1/10 – 30/11	1/10 – 31/12	1/10 – 31/12
Patos de Minas	1/10 – 10/11	1/10 – 31/12	1/10 – 31/12
Pompéu	1/10 – 31/10	1/10 – 20/11	1/10 – 31/12
Sete Lagoas	1/10 – 31/10	1/10 – 20/11	1/10 – 30/11
Uberaba	1/10 – 31/12	1/10 – 31/12	1/10 – 31/12
Unaí	1/10 – 10/11	1/10 – 30/11	1/10 – 10/12
Viçosa	1/10 – 10/11	1/10 – 31/12	1/10 – 31/12

* Linhas tracejadas indicam que o município é considerado inapto para o cultivo de milho.

Considerando como aceitável uma redução de apenas 40% faz com que, para o solo com baixa retenção de água, a maioria dos municípios estudados se torne inaptos à produção de milho (Tabela 2). Já a metodologia utilizada pelo zoneamento de risco climático não utiliza essa redução de produtividade para classificar a aptidão dos municípios e sim a porcentagem da área do município com ISNA satisfatório.

Ao se analisarem os dados de produtividade simulada média, para os períodos de semeadura e nível aceitável de quebra da produtividade de 60%, constata-se grande variabilidade denotada pela amplitude entre os valores mínimo e máximo e também grande variação entre os municípios e tipo de solo (Tabelas 6, 7 e 8). Para um dado tipo de solo e município, a amplitude entre os valores mínimo e máximo decorre da variabilidade interanual dos elementos do clima, que podem submeter a cultura do milho a estresses hídricos e térmicos.

Para o cenário com solo de baixa capacidade de retenção de água (Tabela 6), a menor produtividade, zero, foi obtida em Araçuaí, Janaúba e Januária, que são municípios secos e quentes.

Produtividades médias máximas, acima de 7.000 kg ha⁻¹, foram determinadas para Araxá, Machado e Uberaba, as quais apresentam temperaturas mais amenas e regime de chuvas, em volume e distribuição, adequados à cultura do milho. A maior produtividade média, de 4.975 kg ha⁻¹, foi simulada para Uberaba. Observou-se também, entre os municípios estudados, uma grande variabilidade na duração do ciclo fenológico do milho. Valores médios de duração de ciclo muito baixos (28 dias) foram simulados em locais onde o forte estresse hídrico e térmico induziu a morte prematura da cultura na maioria dos anos (Tabela 6). Verificou-se uma estreita correlação entre a duração média do ciclo e a produtividade média da cultura. Em locais com temperatura mais amena e chuva bem distribuída, uma maior duração do ciclo fenológico da cultura do milho favorece a acumulação de fotoassimilados e, conseqüentemente, maior produtividade de grãos.

Tabela 6. Produtividade simulada mínima, mediana, máxima e média, e duração do ciclo do milho de sequeiro semeado em solo de baixa (20 mm) capacidade de retenção de água

Cidades	Produtividade de Sequeiro (kg ha ⁻¹)				Ciclo (dias)			
	Mín.	Med.*	Máx.	Média	Mín.	Med.*	Máx.	Média
Aimorés	151	861	2330	967	64	111	122	108
Araçuaí	0	887	2687	1004	28	113	127	109
Araxá	1961	4748	7510	4686	131	139	149	139
Bambuí	1055	3679	6528	3609	123	132	141	132
Caratinga	149	3019	5864	3066	49	133	148	131
Curvelo	387	2345	4806	2429	111	125	142	126
Itamarandiba	520	3324	6054	3244	87	145	168	144
Ituiutaba	1014	2889	6205	3039	107	119	124	118
Janaúba	0	1147	3390	1237	34	118	131	117
Januária	0	1506	4184	1523	44	120	133	119
Lavras	1656	4623	6876	4527	130	139	152	139
Machado	1863	4802	7263	4781	118	139	148	138
Montes Claros	111	1776	5420	1942	56	126	138	123
Paracatu	828	3165	5507	3118	116	124	137	125
Patos de Minas	1225	4407	6919	4274	129	137	145	137
Pompéu	969	2978	6030	3056	119	126	135	126
Sete Lagoas	651	3499	6073	3408	70	133	142	131
Uberaba	2134	5036	7337	4975	121	129	138	129
Unai	919	2521	5386	2624	114	119	128	120
Viçosa	957	3490	6277	3503	127	137	147	136

* Mediana.

Considerando o cenário com solo de média capacidade de retenção de água (Tabela 7), observa-se que valores de produtividade zero ainda ocorreram em Araçuaí, Caratinga, Itamarandiba e Janaúba, indicando que estresses hídricos e térmicos afetaram drasticamente a cultura do milho, mesmo em um solo com maior capacidade de retenção de água, em comparação com o solo de baixa capacidade de retenção de água (Tabela 6). Produtividades médias máximas acima de 8.000 kg ha⁻¹ foram simuladas em 11 dos 20 municípios, sendo

que a maior média máxima, de 8.872 kg ha⁻¹, ocorreu em Araxá. A maior produtividade média, de 6.501 kg ha⁻¹, foi determinada em Machado. Maiores produtividades estão associadas aos municípios com regime de chuvas com volume e distribuição adequados e temperaturas mais amenas, que prolongam a duração do ciclo fenológico do milho.

Tabela 7. Produtividade simulada mínima, mediana, máxima e média, e duração do ciclo do milho de sequeiro semeado em solo de média (40 mm) capacidade de retenção de água

Cidades	Produtividade de Sequeiro (kg ha ⁻¹)				Ciclo (dias)			
	Mín.	Med.*	Máx.	Média	Mín.	Med.*	Máx.	Média
Aimorés	179	2561	5474	2521	62	112	126	109
Araçuaí	0	2320	5498	2430	20	115	129	110
Araxá	2962	6590	8972	6482	121	139	150	139
Bambuí	3540	5892	8610	5811	123	132	141	132
Caratinga	0	5092	8207	4981	26	134	150	128
Curvelo	387	4724	7659	4614	78	127	143	124
Itamarandiba	0	5570	8130	4942	21	146	169	140
Ituiutaba	2013	5155	7991	5014	109	118	128	118
Janaúba	0	2928	6353	2661	21	120	134	106
Januária	139	3224	6756	3160	43	121	138	117
Lavras	2394	6604	8722	6382	107	140	152	138
Machado	3004	6594	8959	6501	110	140	150	138
Montes Claros	520	3572	7326	3474	86	126	141	123
Paracatu	2224	5346	7573	5255	116	124	141	126
Patos de Minas	2130	6233	8386	6013	119	137	147	137
Pompéu	1146	5501	8157	5472	71	126	141	125
Sete Lagoas	1343	5686	8098	5561	62	133	146	130
Uberaba	1343	5686	8098	5561	62	133	146	130
Unaí	1879	4869	7048	4649	114	120	135	121
Viçosa	1289	5594	8493	5474	81	138	149	135

* Mediana.

Ciclos mais curtos estão associados com locais mais quentes e secos e com os menores rendimentos simulados. Segundo Ritchie et al. (2003), híbridos de ciclo mais longo geralmente

apresentam maiores produtividades que os híbridos de ciclo mais curto. Para o cenário de solo com média capacidade de retenção de água, observou-se grande variabilidade interanual e também entre os municípios, nos valores de produtividade e de duração de ciclo. A amplitude entre valores máximos e mínimos de produtividade foi maior no solo com maior capacidade de retenção de água, pois a cultivar pôde expressar seu potencial produtivo em um número maior de anos e locais.

Com relação ao cenário de solo com alta capacidade de retenção de água nota-se que produtividades médias mínimas com valores muito baixos foram simuladas, mas não zeradas (Tabela 8). Valores de rendimento abaixo de 1.000 kg ha^{-1} foram simulados em cinco dos 20 municípios.

O maior valor médio máximo de produtividade, de $10.267 \text{ kg ha}^{-1}$, foi determinado para Lavras, que também apresentou o maior valor médio de 7.399 kg ha^{-1} . Para um mesmo município, nota-se grande amplitude entre os valores de produtividade mínima e máxima, como consequência da grande variabilidade climática interanual. Da mesma forma, observa-se elevada variação nos valores de produtividade simulada mínima, mediana, máxima e média, de cada município, indicando a grande diversidade nas condições climáticas dos mesmos.

Os menores valores médios mínimos de duração de ciclo ocorreram em municípios mais quentes e com irregularidades no regime de chuvas, como Araçuaí, Janaúba e Montes Claros, enquanto os maiores valores médios máximos foram simulados para cidades de clima mais ameno, como Itamarandiba, Lavras, Machado e Viçosa. Quando não há restrição hídrica,

ciclos fenológicos do milho mais longos favorecem maiores produtividades.

Tabela 8. Produtividade simulada mínima, mediana, máxima e média, e duração do ciclo da cultura do milho de sequeiro semeado em solo com alta (60 mm) capacidade de retenção de água

Cidades	Produtividade de Sequeiro (kg ha ⁻¹)				Ciclo (dias)			
	Mín.	Med.*	Máx.	Média	Mín.	Med.*	Máx.	Média
Aimorés	646	4019	7637	3982	106	112	119	112
Araçuaí	321	3478	6592	3442	65	114	123	113
Araxá	3602	7473	9992	7346	131	139	149	139
Bambuí	3094	6502	9347	6455	124	132	140	132
Caratinga	252	6680	9312	6569	101	135	143	134
Curvelo	1052	5727	8945	5729	117	124	142	126
Itamarandiba	1266	6527	9848	6360	134	146	165	147
Ituiutaba	2710	5956	8532	5839	109	118	124	118
Janaúba	497	4267	7858	4275	71	118	127	116
Januária	1066	4452	7791	4545	93	120	129	119
Lavras	3838	7512	10267	7399	130	140	152	140
Machado	3814	7254	9885	7160	131	144	158	144
Montes Claros	717	5049	8288	5107	89	125	135	125
Paracatu	3160	6300	8808	6302	116	124	138	125
Patos de Minas	3526	7191	9613	7061	129	137	145	137
Pompéu	3608	6481	8882	6531	120	126	133	126
Sete Lagoas	3764	6853	9358	6822	111	133	142	133
Uberaba	3764	6853	9358	6822	111	133	142	133
Unaí	2450	5737	8025	5523	114	119	126	120
Viçosa	3826	6663	9330	6615	129	140	150	139

* Mediana.

De uma forma geral, para um mesmo cenário de capacidade de retenção de água a variação nas condições climáticas foi o que mais afetou a produtividade de milho. Em municípios com temperaturas mais amenas e chuvas bem distribuídas a duração do ciclo da cultura foi maior, bem como a produtividade de grãos. Quando se comparam produtividades

médias de sequeiro do período de semeadura (Tabelas 6, 7 e 8) dos municípios, nota-se que a produtividade aumentou com o aumento da capacidade de retenção de água do solo, indicando a importância deste atributo de solo para o sucesso no cultivo de milho. A disponibilidade de água é fator decisivo no potencial de produção e rendimento, no período compreendido entre o 3º e o 5º estádios (plantas com doze folhas e florescimento e polinização, respectivamente), ou seja, com 85 a 90% de área foliar e florescimento até o estágio de enchimento dos grãos (FANCELLI; DOURADO NETO, 1996).

Mesmo tendo sido estabelecidos períodos para semeadura do milho nos diversos municípios, isso não garante que produtividades adequadas serão obtidas. A previsão de ocorrência dos veranicos é fundamental e, aliada às consequentes perdas que este evento climático pode acarretar, torna-se ferramenta importante para o desenvolvimento da agricultura com menor risco para o produtor (SOUSA; PERES, 1996).

Quando se analisam dados de produtividade potencial (Tabela 9), observa-se que valores mínimos de produtividade menores que 3.800 kg ha⁻¹ foram simulados para Aimorés e Montes Claros. Mesmo com o uso de alta tecnologia de produção, capazes de minimizar estresses bióticos e abióticos, o efeito de outros elementos climáticos como temperatura do ar e radiação incidente pode afetar negativamente o rendimento de grãos de milho. Por outro lado, valores acima de 11.000 kg ha⁻¹ foram determinados para Itamarandiba e Lavras. A amplitude entre valores máximos e mínimos variou de 4.132 kg ha⁻¹, em Uberaba, a 5.958 kg ha⁻¹, em Montes Claros. Portanto, mesmo com o emprego de tecnologia de produção de elevado padrão,

que incluiria o uso de irrigação, grande variabilidade interanual e variação entre municípios foram observadas. Considerando dados médios, o uso de alta tecnologia, como a irrigação, tem o potencial para aumentar a produtividade em pelo menos 40% para o cenário de solo de baixa retenção de água.

Tabela 9. Produtividade potencial mínima, mediana, máxima e média e duração do ciclo do milho, considerando valores médios para os três tipos de solo e para o período de semeadura de cada município

Cidades	Produtividade Potencial (kg ha ⁻¹)				Ciclo (dias)			
	Mín.*	Med.	Máx.	Média	Mín.	Med.	Máx.	Média
Aimorés	3695	5466	8053	5535	105	111	117	111
Araçuaí	4226	6011	8616	6150	107	114	123	115
Araxá	5964	8046	10847	8137	106	114	123	139
Bambuí	5149	7451	10265	7587	123	132	140	132
Caratinga	5665	7963	10340	7977	125	134	143	134
Curvelo	4778	7173	10162	7201	117	124	142	126
Itamarandiba	6178	8504	11828	8514	135	145	164	147
Ituiutaba	4489	6812	9141	6863	108	118	124	118
Janaúba	5328	7446	9676	7348	112	118	127	119
Januária	5243	7511	9793	7484	113	120	129	120
Lavras	5986	8353	11060	8398	130	140	152	140
Machado	5818	7847	10496	7920	129	141	151	141
Montes Claros	3781	6815	9739	6848	108	125	135	125
Paracatu	5372	7279	10118	7381	116	124	138	125
Patos de Minas	5934	8138	10648	8166	129	137	145	137
Pompéu	5226	7448	9998	7492	120	126	134	126
Sete Lagoas	5946	8091	10788	8065	124	133	141	133
Uberaba	5982	8031	10114	7994	122	129	139	129
Unaí	4676	6598	9090	6750	114	119	127	120
Viçosa	5641	7652	10417	7697	128	138	148	137

* Produtividade mínima (Mín.), mediana (Med.), máxima (Máx.).

Em municípios como Aimorés, Araçuaí, Janaúba e Januária, o uso de alta tecnologia neste mesmo tipo de solo pode aumentar

em mais de 80% a produtividade do milho, em comparação com o regime de sequeiro. Se o cenário for de solo de média retenção de água, o incremento na produtividade com o uso de alta tecnologia foi em média 50% a 60%, nestes mesmos municípios. Já para o cenário de solo com alta capacidade de retenção de água, as melhores respostas da cultura do milho ao uso de alta tecnologia foram determinadas para Araçuaí, Janaúba e Januária e as piores para Araxá e Machado. A interpretação destes resultados requer, todavia, cuidados. A baixa resposta do milho ao uso de tecnologias antiestresse em alguns municípios indica que as condições climáticas, incluindo as hídricas, já são favoráveis ao cultivo de milho. Neste caso, o uso de irrigação suplementar pode mitigar eventuais efeitos deletérios de veranicos e estabilizar ainda mais a produtividade. Em contrapartida, nos municípios em que a resposta às tecnologias que eliminam os estresses foi alta, há que se determinarem a eficiência de uso da água e o custo, pois, certamente, as lâminas de irrigação a serem aplicadas no ciclo da cultura deverão ser elevadas.

Embora o modelo não considere diretamente o efeito do estresse hídrico na duração do ciclo do milho, ele interrompe o crescimento e o desenvolvimento da cultura, ou seja, ele “mata” a planta. Por isso, quando se calcula a média de vários anos, alguns valores de duração do ciclo são reduzidos (Tabelas 6, 7 e 8). Já no caso de produção potencial (Tabela 9), não há efeito algum de estresse hídrico interrompendo o ciclo da cultura. Os valores mínimos, medianos, máximos e médios são o reflexo da interação da cultura com a temperatura do ar e, eventualmente, com o fotoperíodo se a cultivar de milho for responsiva a este elemento climático. A variabilidade interanual e a variação na duração do ciclo entre os municípios foram

consideráveis. A maior amplitude, de 30 dias, entre valores máximos e mínimos, foi simulada para Itamarandiba, enquanto a menor, em torno de 12 dias, foi determinada para Aimorés e Unaí. Em termos médios, ciclos com duração acima de 140 dias foram simulados para Itamarandiba, Lavras e Machado, que são locais de clima mais ameno. O menor comprimento médio de ciclo, de 111 dias, foi determinado para Aimorés, que é um município com temperatura do ar mais elevada, em comparação com os demais.

Conclusões

A metodologia aqui aplicada, independentemente do nível de tolerância adotado, é mais restritiva que a empregada no zoneamento de risco climático do Mapa.

Independentemente da capacidade de retenção de água do solo, observa-se grande amplitude nos valores simulados de produtividade de milho de sequeiro, em decorrência da variabilidade interanual dos elementos do clima. Mesmo para condições sem estresses bióticos e abióticos, a variabilidade da temperatura do ar e da radiação incidente afeta significativamente a produtividade de milho. De uma forma geral, a temperatura do ar controla a duração do ciclo da cultura que, por sua vez, afeta a produtividade de grãos. Ciclos mais curtos estão associados a municípios mais quentes e secos e a menores produtividades.

Embora tenham sido observadas produtividades de milho de sequeiro máximas elevadas em alguns dos municípios estudados, em termos médios, os valores simulados estão abaixo do potencial produtivo da cultivar utilizada no estudo,

indicando o forte efeito das interações da cultura com o solo e com a variabilidade climática regional e interanual.

Em municípios quentes e secos, nos quais as produtividades médias de sequeiro são baixas, o uso de irrigação tem o potencial para aumentar em pelo menos 40% o rendimento do milho, independentemente da capacidade de retenção de água.

Agradecimentos

Ao Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, pela cessão dos dados climatológicos históricos dos municípios de Minas Gerais. À Fapemig pela bolsa de iniciação científica e à Embrapa Milho e Sorgo, onde foi desenvolvido o presente trabalho.

Referências

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper n° 56).

AMARAL, T. A.; ANDRADE, C. L. T.; OLIVEIRA, A. C.; SILVA, D. F.; SANTANA, C. B.; MOURA, B. F.; CASTRO, L. A. **Metodologia para o estabelecimento do período de semeadura de milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. 6 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 88).

ANDRADE, F. H. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 41, n. 1, p. 1-12, 1995.

ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berkshire, v. 50, p. 121-125, 1924.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento agrícola de risco climático**. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola>>. Acesso em: 15 set. 2015.

COELHO, A. M.; CRUZ, J. C.; FILHO, I. A. P. Rendimento de milho no Brasil: chegamos ao máximo? **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 101, p. 1-12, 2003.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALVARENGA, R. C.; GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, J. H. M.; OLIVEIRA, M. F.; SANTANA, D. P. **Manejo da cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. 12 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica 87).

DUARTE, J. de O.; CRUZ, J. C.; GARCIA, J. C.; MATTOSO, M. J. Economia da produção. In: CRUZ, J. C. (Ed.). **Cultivo do milho**. 6. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de produção, 1).

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Milho: fisiologia da produção. In: SEMINÁRIO sobre fisiologia da produção e manejo de água e nutrientes na cultura do milho de alta produtividade. Piracicaba: POTAFOS, 1996. 30 p.

FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360 p.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2014. Disponível em: <<http://statistics.amis-outlook.org/data/index.html#DOWNLOAD>>. Acesso em: 13 set. 2015.

FORSTHOFER, E. L. **Rendimento de grãos e desempenho econômico do milho em cinco níveis de manejo e três épocas de semeadura**. 2004. 96 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FORSTHOFER, E. L.; SILVA, P. R. F.; STRIEDER, M. L.; MINETTO, T.; RAMBO, L.; ARGENTA, G.; SANGOI, L.; SUHRE, E.; SILVA, A. A. Desempenho agrônômico e econômico do milho em diferentes níveis de manejo e épocas de semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 3, p. 399-407, mar. 2006.

GALON, L.; TIRONI, S. P.; ROCHA, A. A.; SOARES, E. R.; CONCENÇO, G.; ALBERTO, C. M. Influência dos fatores abióticos na produtividade da cultura do milho. **Revista Tropical. Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 4, n. 3, p. 18, 2010.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; PORTE, C. H.; BOOTE, K. J.; HUNT, L. A.; SINGH, U.; LIZASO, J. L.; WHITE, J. W.; URYASEV, O.; ROYCE, F. S.; OGOSHI, R.; GIJSMAN, A. J.; TSUJI, G. Y. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer**: version 4.6. Washington: DSSAT Foundation, 2014.

HUMBRET, R. P. **The growing of sugar cane**. Amsterdam: Elsevier, 1968. 779 p.

IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=839&z=p&o=28>>. Acesso em: 13 jan. 2016.

JONES, C. A. **Ceres-Maize**: a simulation model of maize growth and development. College Station: Texas A & M University, 1986. 194 p.

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.

LANDAU, E. C.; SANS, L. M. A.; SANTANA, D. P. Clima e solo. In: CRUZ, J. C. (Ed.). **Cultivo do milho**. 5. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistemas de produção, 1).

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. In: STEWART, E. (Ed.). **Advances in soil science**. New York: Springer-Verlag, 1985. v. 1, p. 277-294.

MATOS, M. J. L. F.; TAVARES, S. A.; SANTOS, F. F.; MELO, M. F.; LANA, M. M. **Milho verde**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2006. Disponível em:

<http://www.cnph.embrapa.br/paginas/dicas_ao_consumidor/milho_verde.htm>. Acesso em: 14 set. 2015.

PICKERING, N. B.; HANSEN, J. W.; JONES, H.; GODWIN, D. Weatherman: a utility for managing and generating daily

weather data. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, n. 2, p. 332-337, 1994.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions Royal Society of South Australia**, v. 64, p. 114-118, 1940.

RECH, G.; PAVAN, W.; HÖLBIG, A. C. Modelo de simulador aplicado ao desenvolvimento de culturas. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, Passo Fundo, v. 1, n. 1, p. 15-29, 2009.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: USP: ESALQ, 1996. 513 p.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. Como a planta de milho se desenvolve? **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 103, 2003.

SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D.; GUIMARÃES, D. P.; AVELLAR, G. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura de milho na Região Centro-Oeste do Brasil e para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p.1-10, 2001.

SANS, L. M. A.; GUIMARÃES, D. P. **Zoneamento agrícola de riscos climáticos para a cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. 5 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 82).

SILVA, D. F. Biocombustíveis e produção animal impulsionarão a cultura. **Agrianual**, São Paulo, p. 373-374, 2004.

SILVA, D. F.; AMARAL, A. A.; ANDRADE, C. L. T.; MAGALHÃES, P. C.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; GOMIDE, R. L.; ARAUJO, S. G. A. Avaliação da produtividade de milho (*Zea mays* L.) sob condições de três regimes hídricos em Sete Lagoas, MG. In: PEREIRA L. S.; VICTORIA, F. R. B.; PAREDES, P.; GARCÍA, M.; PALACIOS, E.; TORRECILLAS, A. (Ed.). **Tecnologias para o uso sustentável da água em regadio**. Lisboa: Edições Colibri, 2010. p. 1-7.

SOUSA, S. A. V.; PERES, F. C. Programa computacional para a simulação da ocorrência de veranicos e queda de produção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25.; CONGRESSO LATINO AMERICANO DE INGENIERIA AGRÍCOLA, 2., 1996, Bauru, SP. **Conbea 96**: resumos. Bauru: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola: UNESP, 1996. 1 CD-ROM.

SOUSA, S. A. V.; PERES, F. C. Programa computacional para simulação da ocorrência de veranicos e queda de rendimento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 33, n. 12, p. 1951-1956, 1998.

