

MARCELO MARQUES COSTA

**RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO EM AGRICULTURA DE
PRECISÃO COM BASE NO MODELO CERES-MAIZE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BR
2015**

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

C837r
2015
Costa, Marcelo Marques, 1985-
Recomendação de adubação em agricultura de precisão com
base no modelo CERES-Maize / Marcelo Marques Costa. –
Viçosa, MG, 2015.
ix, 131f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Milho - Cultivo. 3. Solo -
Adubação. 4. Plantas - Crescimento. 5. Produtividade agrícola.
6. Simulação por computador. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 621.3

**RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO EM AGRICULTURA DE
PRECISÃO COM BASE NO MODELO CERES-MAIZE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 02 de julho de 2015.




Rogério Faria Vieira




Elpídio Inácio Fernandes Filho



Francisco de Assis de
Carvalho Pinto
(Coorientador)



Domingos Sarvio
Magalhães Valente



Daniel Marçal de Queiroz
(Orientador)

Esse trabalho e todas as minhas obras, dedico a Deus.

Aos meus pais, Francisco e Almerinda.

A minha esposa Érica, com carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade do doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida.

Ao Professor Daniel Marçal de Queiroz, pela orientação e confiança.

Aos Professores Darly Geraldo de Sena Junior, Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Nerilson Terra Santos e Igor Rodrigues de Assis, pelo auxílio e sugestões para melhoria desse trabalho.

Agradeço em especial ao Prof. Darly pela amizade, companheirismo e valiosos conselhos em todas as minhas dificuldades.

A todos os professores, funcionários e amigos da Universidade Federal de Goiás – UFG Regional Jataí, pela colaboração, bom convívio e amizade.

Especial agradecimento para o amigo Eng. Agrônomo Cláudio Ragagnin Jr, cuja ajuda foi de grande importância para a realização desse trabalho.

Aos Professores e colegas do Laboratório de Mecanização Agrícola e do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV pelo auxílio, amizade e bom convívio.

A minha família pelo apoio constante.

A minha esposa Érica pelo carinho, estímulo e compreensão, pois o seu apoio tornou o meu fardo suportável. Que Deus nos conserve unidos na alegria, pois nos momentos difíceis Ele fez de você a minha sustentação.

Sinceros agradecimentos a todos que colaboraram para que este trabalho fosse realizado.

BIOGRAFIA

MARCELO MARQUES COSTA, filho de Almerinda Marques Costa e Francisco Marques Costa, nasceu em Registro, BA, no dia 23 de outubro de 1985.

Em julho de 2009 concluiu o curso de Agronomia na Universidade Federal de Goiás.

Em agosto de 2009 iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

Em julho de 2011 concluiu o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa.

Em agosto de 2011 iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

Em julho de 2015, concluiu o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa.

RESUMO

COSTA, Marcelo Marques, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2015. **Recomendação de adubação em agricultura de precisão com base no modelo CERES-Maize.** Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientadores: Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Nerilson Terra Santos, Darly Geraldo de Sena Junior e Igor Rodrigues de Assis.

A estimativa de produtividade representa uma informação importante para o gerenciamento dos riscos na agricultura, devido às instabilidades climáticas e econômicas. O Sudoeste de Goiás apresenta elevada produção de milho, devido ao alto nível tecnológico adotado e a possibilidade de duas safras anuais, em cultivo não irrigado. Os agricultores nessa região tradicionalmente utilizam grandes volumes de insumos, dos quais os fertilizantes representam uma parcela significativa dos custos. O uso excessivo de fertilizantes pode ser antieconômico e com aumento de riscos de contaminação ambiental. Uma solução coerente seria aplicar fertilizantes em função da expectativa de produtividade, que deveria ser limitada apenas por fatores climáticos. Os modelos de crescimento de planta são ferramentas computacionais utilizadas para previsão da produtividade de culturas agrícolas. O objetivo desse trabalho consistiu em utilizar o modelo CERES-Maize para auxiliar a tomada de decisão no gerenciamento de fertilizantes em agricultura de precisão. O modelo CERES-Maize está presente no pacote de programas de computador DSSAT (Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia), que gerencia a calibração dos modelos e elaboração dos cenários a serem simulados. Quatro híbridos de milho foram calibrados para a região com base em avaliações experimentais do acúmulo de matéria seca. Em seguida, foram realizadas avaliações climáticas, em que se verificou tendências na série temporal de temperaturas mais elevadas, associadas ao aumento na velocidade do vento e redução na umidade relativa do ar, que refletiram na redução do ciclo de vida e produtividade simulada do milho. O modelo CERES-Maize identificou variações na produtividade potencial dos talhões. A variação na produtividade potencial entre os talhões e entre diferentes épocas de semeadura justifica o uso dessa informação para gerenciar a quantidade de fertilizantes N-P-K aplicada para suprir as demandas da cultura. Em agricultura de precisão, o modelo CERES-Maize foi utilizado para identificar divergências na produtividade potencial de zonas de manejo. Nos talhões avaliados, a diferença entre produtividade potencial simulada para as diferentes zonas de manejo foi

menor do que a diferença observada segundo os dados coletados pelo monitor de produtividade. A análise de solo e a produtividade potencial simulada para as zonas de manejo indicam o enxofre como o nutriente manejável com elevado potencial de resposta.

ABSTRACT

COSTA, Marcelo Marques, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2015.
Fertilizer prescription in precision agriculture based on CERES-Maize model.
Adviser: Daniel Marçal de Queiroz. Co - Advisers: Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Nerilson Terra Santos, Darly Geraldo de Sena Júnior, Igor Rodrigues de Assis.

Crop yield estimate is important information for the management of risks in agriculture due to climate and economic instability. The Southwest region of Goiás has high yield of maize due to the high technological level adopted and the possibility of growing two crops per year in non-irrigated cultivation. Farmers in this region traditionally use large amount of inputs. Fertilizers represent a significant portion of the grain production cost. Excessive use of fertilizers can be uneconomical and can increase environmental contamination risks. A coherent solution would be to apply fertilizer according to potential yield, which should be limited only by climatic factors. The crop simulation models are computer tools used to predict the yield of agricultural crops. The objective of this work was to test the use of a crop simulation model in the decision making process of recommending fertilizer in precision agriculture systems. It was used CERES-Maize model that is part of the DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) software, which manages the calibration of models and the scenarios to be simulated. Four corn hybrids were calibrated for the region based on experimental evaluations of dry matter accumulation. Then climate assessments were carried out. The historical data showed a trend increasing air temperatures associated with an increase in wind speed and reduction in relative humidity. Under these conditions the crop model showed a trend on reduction of life cycle and yield of corn crop. The CERES-Maize model showed that different corn fields have different yield potential. The variation in the yield potential of the different fields and of different time of planting justifies the use of this information to find the amount of NPK fertilizer to be applied. The CERES-Maize model was used to identify differences in potential yields for each management zone in a precision agriculture system. For evaluated fields, the difference among simulated potential yield for the different management zones was smaller than the difference observed according to data collected by the yield monitor. The soil analysis and simulated yield potential for management zones indicate the nutrient sulfur as the one with highest response potential.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
OBJETIVOS	4
JUSTIFICATIVA	5
CONTEÚDO DO TRABALHO	6
LITERATURA CITADA	7
CAPÍTULO 1	9
CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE MODELOS DE CRESCIMENTO DE PLANTAS EM AGRICULTURA DE PRECISÃO	9
RESUMO.....	9
1.1 INTRODUÇÃO.....	10
1.2 MODELOS DE CRESCIMENTO DE PLANTA	12
1.3 FERRAMENTAS DE MODELAGEM DE CRESCIMENTO DE PLANTA	14
1.4 UTILIZAÇÕES EM AGRICULTURA DE PRECISÃO	16
1.5 DADOS MÍNIMOS NECESSÁRIOS PARA SIMULAÇÃO NO DSSAT	17
1.5.1 Estrutura dos arquivos utilizados no DSSAT	17
1.5.2 Construção do arquivo de solo para DSSAT	18
1.5.3 Definição do arquivo de clima.....	21
1.5.4 Definição dos coeficientes genéticos para o milho	29
1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
1.7 AGRADECIMENTOS	33
1.8 LITERATURA CITADA	34
CAPÍTULO 2	40
CALIBRAÇÃO DO MODELO CERES-MAIZE PARA HÍBRIDOS DE MILHO CULTIVADOS EM JATAÍ-GO	40
RESUMO.....	40
2.1 INTRODUÇÃO.....	41
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	42
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
2.4 CONCLUSÕES	59
2.5 AGRADECIMENTOS	59
2.6 LITERATURA CITADA	60
CAPÍTULO 3	63
TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS E A PRODUÇÃO DE MILHO NO MUNICÍPIO DE JATAÍ – GO	63
RESUMO.....	63
3.1 INTRODUÇÃO.....	64
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	65
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
3.4 CONCLUSÕES	79
3.5 AGRADECIMENTOS	79
3.6 LITERATURA CITADA	80

CAPÍTULO 4	81
RECOMENDAÇÃO DE FERTILIZANTES PARA O MILHO COM BASE NA PRODUTIVIDADE POTENCIAL SIMULADA	81
RESUMO.....	81
4.1 INTRODUÇÃO.....	82
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	84
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	89
4.4 CONCLUSÕES	108
4.5 AGRADECIMENTOS	108
4.6 LITERATURA CITADA	109
 CAPÍTULO 5	 111
MODELO CERES-MAIZE PARA RECOMENDAÇÃO DE FERTILIZANTES PARA CULTURA DO MILHO EM ZONAS DE MANEJO.....	111
RESUMO.....	111
5.1 INTRODUÇÃO.....	112
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	114
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	117
5.4 CONCLUSÃO.....	129
5.5 AGRADECIMENTOS	129
5.6 LITERATURA CITADA	130
 CONCLUSÕES GERAIS.....	 131

INTRODUÇÃO GERAL

Para tomar decisões mais seguras em questões agrícolas, é necessária a aquisição e o uso adequado de informações de qualidade sobre a área de produção. Os métodos tradicionais de investigação agrônômica são de custo elevado e a obtenção dos resultados pode ser demorada (JONES et al., 2003). Portanto, torna-se necessário desenvolver novos métodos de aquisição e processamento de informações, que possibilitem a análise dos riscos agrícolas em diferentes cenários.

O clima representa uma fonte de incerteza para cultivos não irrigados como o do milho. O estresse proporcionado por períodos de seca é um dos fatores que aumentam a vulnerabilidade do milho (FARHANGFAR et al., 2015). No cerrado brasileiro, o período seco ocorre entre o inverno e a primavera, com algumas oscilações anuais. Algumas regiões, como o município de Jataí, permitem duas safras não irrigadas durante o período chuvoso. Entretanto, à medida que o plantio da 1ª safra é antecipado, ou a semeadura da 2ª safra é adiada, a cultura se torna mais vulnerável ao clima. Assim, parte do risco da atividade pode ser relacionada ao período de semeadura, que na 2ª safra é condicionado à colheita da soja.

A agricultura de precisão tem avançado na aquisição de informações sobre a variabilidade espacial dos campos agrícolas por meio de sensores (CASTRIGNANÒ et al., 2012). Mapas de produtividade, sensoriamento remoto e amostragem sistematizada do solo são importantes fontes de informações. Zonas de baixa produtividade são comuns em áreas agrícolas, embora a correção não seja sempre fácil, pois são muitos os fatores que podem limitar a produtividade, uma vez que esta também é dependente de variáveis climáticas. Para Gregoret et al. (2011), um dos fatores que normalmente limitam a produção de milho é a restrição de água no solo. Santra et al. (2008) afirmam que conhecer a distribuição do teor de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente em diferentes zonas de manejo é importante para prever a água disponível para o crescimento de planta. Os autores obtiveram razoável precisão ao criar um mapa de disponibilidade de água com base em

funções de pedotransferência, mapas de textura e carbono orgânico do solo. Zhao, Guo e Mu (2015) avaliaram o relacionamento entre variáveis climáticas e a produção de milho na China por métodos estatísticos lineares. Observaram que as principais variáveis meteorológicas que afetam a produtividade do milho são temperatura, precipitação e luz solar.

Uma área agrícola extensa pode apresentar mais de um fator limitante que se alterna em determinados locais, devido à própria variabilidade espacial de cada um deles. Essa variabilidade resulta no padrão espacial da produtividade. Amado (2009) determinou zonas de manejo a partir de mapas de produtividade, de diferentes culturas irrigadas, com o intuito de diagnosticar fatores físicos e químicos do solo que definam áreas de baixa produtividade. Nesse caso, a deficiência hídrica seria descartada como fator limitante. Em cultivos não irrigados, as características físicas e hídricas do solo representam fatores de difícil manejo e devem ser preferencialmente utilizadas para delimitar zonas de manejo, ou regiões com potenciais de produtividade semelhantes.

A fertilidade do solo representa fator de mais fácil manejo. Nesse caso, recomenda-se a variação nas taxas de aplicações de fertilizantes em função da variabilidade de cada nutriente, e a expectativa de exportação do nutriente na colheita. Os micronutrientes são requeridos em pequenas quantidades, mas podem limitar a produção (ABREU; LOPES; GABRIELLI, 2007). Os macronutrientes são de grande importância para a agricultura, pois as plantas os absorvem em maiores quantidades e geralmente são os nutrientes limitantes a produção. Fertilizantes contendo esses nutrientes constituem uma parcela significativa dos custos de produção e, sem eles, a agricultura torna-se inviável economicamente para a maioria dos solos de regiões tropicais.

A utilização de modelos tem evoluído nas últimas décadas e possibilitado estimativa de produtividade de importantes culturas, em diferentes condições ambientais e de manejo (ZHU et al., 2011). Esses modelos complementam sistemas de suporte a decisão e são ferramentas com potencial de uso em agricultura de precisão para gerenciar zonas de manejo, ou talhões considerados uniformes (THORP et al., 2008). O Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT) mostrou-se eficiente para simular a produtividade de diversas culturas. Esse programa analisa o comportamento fenológico da cultura em respostas a características do solo, condições climáticas diárias durante o ciclo da cultura, ataques de pragas, características genéticas da espécie, cultivar ou híbrido em questão (SASEENDRAN et al., 2012). O potencial dos modelos de simulação está na capacidade de

integrar os efeitos de diferentes estresses que ocorre a cada dia durante o ciclo da cultura e suas implicações no crescimento das plantas (Basso et al., 2009).

Os modelos são utilizados para unidades homogêneas de solo. Por esse motivo sua integração com a agricultura de precisão ocorre por meio de zonas de manejo. Assim, o uso eficiente da modelagem de culturas em agricultura de precisão deve considerar a delimitação apropriada de zonas uniformes e a disponibilidade de dados mínimos necessários para alimentar e calibrar os modelos (THORP et al., 2008). Uma das possibilidades no uso desses modelos é estabelecer a produtividade potencial para cada área, a qual pode ser utilizada como referência para alocação de investimentos em fertilizantes e análise da rentabilidade de operações de manejo com alto custo. Também permite avaliar as incertezas referentes ao clima, ou seja, pode-se analisar a viabilidade econômica de uma operação de manejo caso as condições climáticas sejam favoráveis ou desfavoráveis ao desenvolvimento da cultura.

O modelo CERES-Maize está presente no DSSAT e foi desenvolvido para realizar simulação no cultivo do milho. Na região Centro-Oeste do Brasil, o milho é cultivado em grande escala devido às condições climáticas favoráveis que permitem duas safras anuais. A utilização na alimentação humana e animal faz do milho um importante cereal. Com a melhoria nos sistemas produtivos e na genética, observa-se aumento na produtividade das lavouras brasileiras que exporta parte da produção de grão (PINAZZA, 2007). Entre os cereais cultivados no Brasil, o milho é o mais expressivo, com cerca de 81 milhões de toneladas de grãos produzidos, em uma área de aproximadamente 15.821,9 mil hectares, referente às duas safras do ano agrícola (CONAB, 2013). Dessa forma, ferramentas que possibilitem melhor gestão da área cultivada com milho no Brasil devem ser estudadas, melhoradas e disponibilizadas aos gestores, a fim de aperfeiçoar o sistema de produção dessa cultura.

OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho consistiu em utilizar o modelo CERES-Maize para auxiliar a tomada de decisão no gerenciamento de fertilizantes em agricultura de precisão.

Os objetivos específicos foram:

- Calibrar o modelo CERES-Maize para híbridos de milho cultivados no município de Jataí -GO.
- Investigar a existência de tendências de mudanças em variáveis meteorológicas e suas implicações na produtividade e ciclo da cultura do milho.
- Aplicar o modelo CERES-Maize para auxiliar a tomada de decisões sobre fertilizantes em talhões de uma fazenda.
- Delimitar zonas de manejo em talhões que apresentem produtividade heterogênea e utilizar o modelo CERES-Maize para estimar doses de fertilizantes que atendam a produtividade potencial estimada.

JUSTIFICATIVA

A agricultura de precisão utiliza diferentes tecnologias, adaptando-as para melhor gerir os campos de produção agrícolas e sua heterogeneidade. Essa heterogeneidade espacial é constatada em mapas de produtividade. Assim, o manejo em que utiliza valores médios dos atributos do sistema solo-planta pode induzir a estimativas inapropriadas de insumos agrícolas a serem aplicadas. Em condições de elevada variabilidade espacial, a estimativa inapropriada desses insumos acarreta prejuízos econômicos, além de possível contaminação ambiental.

Uma forma de gerenciar a variabilidade espacial da produtividade consiste em identificar e delimitar áreas com padrões mais homogêneos para constituírem zonas de manejo. Entretanto, a produtividade de uma cultura é função de muitos fatores, dos quais alguns não são manejáveis ou o manejo não é viável economicamente. Assim, alguns fatores não manejáveis limitam a expressão do potencial produtivo de uma cultura. Zonas de manejo podem ser criadas para otimizar operações e insumos de alto custo e para isso deve-se considerar também as limitações impostas por fatores não manejáveis.

O manejo de fertilizantes N-P-K representa grande parcela do custo de produção e sua recomendação é tradicionalmente realizada considerando uma expectativa de produtividade. Por esse motivo, a estimativa do potencial de produtividade em cada zona de manejo é importante para recomendação desses fertilizantes. Esse potencial pode variar em função de características não manejáveis de cada zona de manejo. Também pode variar em função do período do ano em que a cultura se encontra instalada. Assim, considerar uma mesma produtividade potencial para diferentes zonas de manejo, ou mesmo utilizar como referência uma expectativa de produtividade inapropriada, pode resultar em decisões menos eficientes para a condução da lavoura.

Os modelos de crescimento de planta são capazes de estimar a produtividade em áreas agrícolas uniformes. As zonas de manejo podem ser concebidas para delimitar áreas mais homogêneas. Dessa forma, torna-se justificável a análise conjunta de zonas de manejo utilizadas em agricultura de precisão, com a simulação da produtividade potencial realizada por modelos de crescimento de planta. Os benefícios dessa integração são potencialmente elevados. Além de auxiliar a recomendação de fertilizantes, pode ser utilizado para determinar o período de semeadura com menores riscos climáticos e investigar estratégias de manejo frente a possíveis mudanças no clima.

CONTEÚDO DO TRABALHO

Esse trabalho foi organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo aborda a modelagem do crescimento de planta e informações sobre o programa computacional DSSAT. No segundo capítulo é apresentada a etapa de calibração dos coeficientes genéticos para quatro híbridos de milho cultivados em Jataí-GO. O terceiro capítulo apresenta uma análise das tendências climáticas para a região e suas implicações no cultivo do milho. O quarto capítulo consiste em um estudo de caso que demonstra uma forma de aplicação do modelo CERES-Maize para estimar a dose recomendada de fertilizantes em uma área de produção comercial. O quinto capítulo considera a heterogeneidade da produtividade do milho para delimitar zonas de manejo e a estimativa do potencial de produtividade para recomendação de fertilizantes em cada zona. Uma conclusão geral resume as principais contribuições do trabalho.

LITERATURA CITADA

ABREU, C. A. D.; LOPES, A. S.; GABRIELLI, G. C. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F. D.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa – MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, 2007. cap. XI, p.1017.

AMADO, T. J. C.; PES, L. Z.; LEMAINSKI, C. L.; SCHENATO, R. B. Chemical and physical attributes of oxisols and their relation with irrigated corn and common bean yields. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 33, n. 4, p. 831-843, 2009.

BASSO, B.; CAMMARANO, D.; GRACE, P. R.; CAFIERO, G.; SARTORI, L.; PISANTE, M.; LANDI, G.; DE FRANCHI, S.; BASSO, F. Criteria for selecting optimal nitrogen fertilizer rates for precision agriculture. **Italian Journal of Agronomy**, v. 4, n. 4, p. 147-158, 2009.

CASTRIGNANÒ, A.; WONG, M. T. F.; STELLUTI, M.; DE BENEDETTO, D.; SOLLITTO, D. Use of EMI, gamma-ray emission and GPS height as multi-sensor data for soil characterisation. **Geoderma**, v. 175-176, p. 78-89, 2012.

CONAB, C. N. D. A. Segundo levantamento intenção de plantio safra 2012/2013. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. , p. 66, Janeiro 2015 2013. Disponível em: <
http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_11_11_08_54_13_boletim_portugues_novembro_2013_-_ok.pdf. >

FARHANGFAR, S.; BANNAYAN, M.; KHAZAEI, H. R.; BAYGI, M. M. Vulnerability assessment of wheat and maize production affected by drought and climate change. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 13, p. 37-51, 2015.

GREGORET, M. C.; DÍAZ ZORITA, M.; DARDANELLI, J.; BONGIOVANNI, R. G. Regional model for nitrogen fertilization of site-specific rainfed corn in haplustolls of the central Pampas, Argentina. **Precision Agriculture**, v. 12, n. 6, p. 831-849, 2011.

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. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 235-265, Jan 2003.

PINAZZA, L. A. **Cadeia produtiva do milho**. Bib. Orton IICA/CATIE, 2007.

SANTRA, P.; CHOPRA, U. K.; CHAKRABORTY, D. Spatial variability of soil properties and its application in predicting surface map of hydraulic parameters in an agricultural farm. **Current Science**, v. 95, n. 7, p. 937-945, 2008.

SASEENDRAN, S. A.; NIELSEN, D. C.; AHUJA, L. R.; MA, L.; LYON, D. J. Simulated yield and profitability of five potential crops for intensifying the dryland wheat-fallow production system. **Agricultural Water Management**, 2012.

THORP, K. R.; DEJONGE, K. C.; KALEITA, A. L.; BATCHELOR, W. D.; PAZ, J. O. Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 64, n. 2, p. 276-285, 2008.

ZHAO, J.; GUO, J.; MU, J. Exploring the relationships between climatic variables and climate-induced yield of spring maize in Northeast China. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 207, p. 79-90, 2015.

ZHU, X. G.; ZHANG, G. L.; THOLEN, D.; WANG, Y.; XIN, C. P.; SONG, Q. F. The next generation models for crops and agro-ecosystems. **Science China Information Sciences**, v. 54, n. 3, p. 589-597, 2011.

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE MODELOS DE CRESCIMENTO DE PLANTAS EM AGRICULTURA DE PRECISÃO

RESUMO

A simulação do crescimento e desenvolvimento de plantas cultivadas tem avançado por intermédio da colaboração de pesquisadores de todo o mundo. No contexto da agricultura altamente especializada e dependente de insumos, a simulação do crescimento e desenvolvimento de plantas cultivadas constitui uma ferramenta de suporte a tomada de decisões. Os modelos de crescimento de planta possibilitam a previsão das incertezas da atividade agrícola perante as mudanças climáticas e otimizar os investimentos em insumos. Os modelos possuem estrutura modular que os tornam flexíveis e adaptáveis a diferentes situações. Em agricultura de precisão, essas ferramentas podem ser utilizadas na gestão de zonas de manejo, pois representam áreas mais homogêneas nos campos agrícolas. O uso eficiente da modelagem de culturas deve considerar a disponibilidade dos dados necessários para alimentar e validar os modelos. Assim, a elaboração dos arquivos requisitados pelos módulos de clima e de solo, assim como o ajuste de coeficientes genéticos são de extrema importância para o resultado de simulações. A descrição dos procedimentos e métodos utilizados na obtenção dos dados necessários são importante referência para outras pesquisas. O objetivo desse capítulo consiste em apresentar uma breve revisão sobre modelagem do crescimento de planta, além de alguns detalhes referentes à aquisição de dados mínimos requisitados pelo programa computacional DSSAT (Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia) e sobre a calibração do modelo CERES-Maize.

Palavras-chave: Agricultura de precisão, DSSAT, CERES-Maize.

OVERALL CONSIDERATIONS ON APPLYING CROP SIMULATION MODELS IN PRECISION AGRICULTURE

ABSTRACT

The crop modeling has advanced through the cooperation of researchers all over the world. In the context of highly specialized agriculture and dependent on inputs, simulating the growth and development of cultivated plants constitute a support decision-making tool. The

plant growth models enable the prediction of the uncertainty of agriculture to climate change and optimize investments in inputs. The models have a modular structure that makes them flexible and adaptable to different situations. In precision agriculture, these tools can be used in the managing a field and management zones are applied. Because each zone represents a homogeneous area in an agricultural fields. The efficient use of crop modeling should consider the availability of the data needed to feed and validate the models. Thus, the preparation of files requested by the climate and soil modules, as well as how to fit the genetic coefficients are essential for the result of simulations. The description of the procedures and methods used in obtaining the necessary data is important reference for others researches. The objective of this chapter is to present a brief review of crop simulation models, as well as some details related to the acquisition of minimum data requested by the computer program DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) and the calibration of the CERES-Maize model.

Key words: Precision Agriculture, DSSAT, CERES-Maize.

1.1 INTRODUÇÃO

A modelagem do crescimento de planta busca simular os processos biológicos da planta em interação com o ambiente e suas alterações devido ao clima e ao manejo, por meio de técnicas de computação aliadas ao conhecimento agrônomo (LU et al., 2010). Os modelos matemáticos que simulam processos que ocorrem no solo, nas plantas e na atmosfera, são codificados em linguagens de programação, e são capazes de simular o comportamento do sistema de cultivo de forma global (ADAM; BELHOUCLETTE et al., 2012). Esses modelos podem ser utilizados no gerenciamento de sistemas agrícolas complementando os sistemas de suporte a decisão e sistemas especialistas (GUO, 2007).

Para o desenvolvimento de modelos de crescimento de planta é necessário o conhecimento multidisciplinar envolvendo áreas como botânica, fisiologia vegetal, meteorologia, ciências do solo, matemática e ciência da computação. Para tanto, é necessário a colaboração de pesquisadores de diferentes formações e especialidades. Uma vez calibrados e validados, obtém-se a confiabilidade nos modelos para a simulação do mundo real. Assim, experimentos podem ser realizados utilizando o computador, quantas vezes forem necessárias

para se concluir sobre a melhor maneira de gerir. Dessa forma, economiza-se tempo e recursos que seriam gastos em experimentos reais (JONES et al., 2003).

Os estudos com modelagem de crescimento de planta iniciaram-se com o intuito de melhor compreender processos fisiológicos das plantas e evoluiu como ferramentas orientadas a resolução de problemas práticos (VAN ITTERSUM et al., 2003). Os programas de computador para simulação se tornaram complexos e os artigos publicados sobre o tema pouco descrevem os modelos matemáticos utilizados, restringindo-se aos resultados obtidos. Isso dificulta a reprodução dos modelos, além da dificuldade de interação entre os programadores e os usuários (ADAM et al., 2013).

A simulação da produtividade das culturas de importância econômica fornece informações de interesse comercial e governamental, para a previsão de produtividade ao nível de estado e países (PRINGLE; MARCHANT; LARK, 2008). Entretanto, esses modelos têm ganhado espaço entre os adeptos da agricultura de precisão que buscam melhor gerir suas propriedades ao tomar decisões sobre mudanças de manejo.

Os modelos de crescimento de planta foram concebidos inicialmente para serem simples e utilizarem o mínimo possível de dados de entrada. Entretanto, a demanda por diferentes áreas da pesquisa e a necessidade de descrever diversas situações experimentais faz com que o número de variáveis envolvidas seja cada vez maior. Segundo White et al. (2013), a modelagem tem evoluído para a máxima utilização de dados, o que torna os modelos cada vez mais complexos.

A existência de normas que padronizem a nomenclatura de arquivos e variáveis utilizadas em modelagem é necessária. Isso pode facilitar a documentação de experiências reais e o compartilhamento de informações entre pesquisadores de diferentes áreas e entre os diferentes programas utilizados para a modelagem de culturas. Um esforço de padronização de nomenclatura e descritores de processo teve impulso com o “International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer” (IBSNAT), que foi revisto e melhorado pelo “International Consortium for Agricultural Systems Applications” (ICASA). Esse trabalho resultou no padrão ICASA versão 1.0 (HUNT et al., 2001). A dificuldade em atender satisfatoriamente as diversas áreas da pesquisa e eliminar ambiguidades e erros torna necessárias atualizações de correção desses padrões. O trabalho de White et al. (2013) descreve a versão 2.0 do padrão ICASA, que deverão ser levados em consideração nas atualizações dos programas de modelagem.

Os modelos de crescimento de planta disponíveis no programa de computador DSSAT (Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia) necessitam de dados climáticos e de solo para executar simulações de experimentos virtuais. Os cultivares utilizados também necessitam de descrição para que a simulação seja satisfatória. No DSSAT, os processos envolvidos são segmentados em módulos, o que flexibiliza a criação de diferentes cenários. Dessa forma, os dados de solo, clima e genéticos são organizados em arquivos independentes. Isso permite, por exemplo, que o mesmo solo possa ser avaliado em diferentes climas, ou mesmos que se realizem simulações com rotação de culturas. Programas auxiliares, como o “WeatherMan”, “SBuild” e “XBuild” (HANSEN et al., 1994; WILKENS et al., 2004), possibilitam a criação e edição dos arquivos de entrada requeridos para executar simulações no DSSAT. O objetivo desse capítulo consiste em apresentar uma breve revisão sobre a modelagem do crescimento de planta, sua aplicação na agricultura de precisão e alguns detalhes de obtenção e estruturação dos dados mínimos necessários no DSSAT.

1.2 MODELOS DE CRESCIMENTO DE PLANTA

A modelagem do crescimento e desenvolvimento de plantas cultivadas tem seu estudo direcionado a algumas linhas básicas de pesquisa. Uma das principais linhas de estudo atua na simulação e modelagem gráfica do desenvolvimento estrutural da planta. Esses estudos buscam no conhecimento fisiológico e organogênico das espécies, modelar ideótipos que otimizem o aproveitamento de recursos como luz e absorção de nutrientes para fins de melhoramento genético. Outra linha amplamente estudada atua na modelagem do comportamento de variáveis de produtividade das culturas e suas interações com o ambiente. Essa vertente tem interesse em previsões de produtividade sob alterações ambientais provocadas por mudanças climáticas, manejo de insumos e outros. O trabalho de GUO (2007) também mostra o interesse da pesquisa em mesclar as duas linhas de modelagem do crescimento de planta.

O desenvolvimento de órgãos nas plantas pode ser controlado pelo tempo térmico mensurado em graus-dia (GD), fotoperíodo, tempo de exposição a temperaturas extremas e quantidade de biomassa produzida pela planta. A biomassa produzida pela planta consiste no saldo entre os processos de fotossíntese e a respiração. Esse saldo é particionado entre os órgãos, folhas, caules e fruto, seguindo um conjunto de regras de distribuição que depende do estágio fenológico da planta. Assim, a base para os modelos de crescimento de planta está em modelar o comportamento fenológico e fisiológico da espécie, e dos demais processos

envolvidos. A produção de biomassa, por exemplo, é um processo fisiológico que pode ser simulado considerando a evapotranspiração. O processo de evapotranspiração, por sua vez, é calculado utilizando dados climáticos e um coeficiente da cultura associado ao estágio fenológico. Esse coeficiente depende da área foliar da planta e do sombreamento por plantas vizinhas, que são dependentes do espaçamento entre plantas (ADAM et al., 2013; GUO, 2007; MATHIEU et al., 2012).

Os programas de computadores para modelagem do crescimento de planta exigem conhecimentos multidisciplinares para serem desenvolvidos. O conhecimento da ecofisiologia da planta deve ser estruturado primeiramente em um modelo conceitual que contemple os processos que se deseja simular, juntamente com processos complementares. Em seguida, um conjunto de regras e equações é definido para cada processo, segundo o conhecimento vigente documentado na literatura ou obtido de forma empírica. O próximo passo consiste na codificação das equações em uma linguagem de programação, obedecendo aos princípios da engenharia de sistemas (ADAM et al., 2013; LAMANDA et al., 2012). Vários modelos de crescimento de planta foram desenvolvidos por pesquisadores de diferentes áreas. Entretanto, o uso de diferentes linguagens de programação proporcionou falta de interação e dificuldade de reutilização dos modelos (LU et al., 2010).

Os modelos de crescimento de planta podem abranger vários processos simultaneamente. Entretanto, o modelo deve ser tão simples quanto o problema permitir, pois a simulação deve corresponder a questões específicas da pesquisa. A complexidade do modelo pode ser limitada, por exemplo, pela disponibilidade de dados. Isso deve ser considerada na concepção ou escolha do modelo (ADAM e CORBEELS et al., 2012; SINCLAIR e SELIGMAN, 1996). A busca por flexibilizar os modelos de crescimento de planta e ampliar sua aplicabilidade, levou a adoção de estruturas modulares. Cada conjunto de equações correspondentes a um processo ou subprocesso específico passa a ser representado por um módulo ou submódulos. A estrutura modular permite testar hipóteses alternativas sobre processos particulares, além de possibilitar a escolha entre módulos simples ou mais completos para uma determinada aplicação. Um componente do modelo responsável por um conjunto de processos específicos, tal como absorção de água do solo, interceptação de luz, fixação de nitrogênio e outros, será então constituído por um ou mais módulos e submódulos (ADAM et al., 2013).

Modelos são gerados e validados para um determinado problema de simulação e sua utilização em situações diferentes das que foram concebidas pode não ser adequada. Diante de

um problema específico, o pesquisador deve encontrar a solução de modelagem mais apropriada. Para isso, deve-se avaliar a necessidade de criar uma nova solução de modelagem, reutilizar um modelo existente, ou mesclar essas duas opções. Adam et al. (2013) apontam que a reutilização de modelos existentes é uma boa opção, visto que a estrutura modular permite flexibilizar um modelo para adaptá-lo a uma situação específica. Pode-se, por exemplo, modelar uma nova cultura a partir de um modelo existente. A modificação de um modelo pode ser feita pela alteração dos valores de seus parâmetros, alteração das equações ou até mesmo da estrutura global do modelo. As modificações podem ser feitas em apenas alguns módulos, não sendo necessário alterar a codificação dos demais.

Antes de aplicar os modelos de crescimento de planta, deve-se avaliar sua precisão e sendo necessário, calibrar os coeficientes de seus parâmetros. Para realizar essa operação são necessários dados reais provenientes de observações de alguma das variáveis de saída do modelo. Os modelos de crescimento de planta são concebidos para estimar variáveis de produtividade como produção de matéria seca, produtividade de grão e outros. Entretanto, variáveis como a estimativa do índice de área foliar também podem ser utilizadas para avaliar os modelos (JÉGO et al., 2012). As estatísticas utilizadas para avaliar a qualidade dos modelos são as que têm por base a diferença entre os valores reais e os valores estimados, como o erro quadrático médio (EQM). Análise de correlação entre valores reais e estimados também é bastante utilizado. O processo de calibração consiste em uma análise que busca reduzir ao máximo a soma de quadrado de resíduos. Para tanto, algoritmos de otimização são utilizados para ajustar os coeficientes dos parâmetros do modelo. O modelo também deve ser validado para utilização em um ambiente diferente do que foi calibrado, de forma que o erro de previsão esteja em um nível aceitável para os objetivos da pesquisa. Uma vez, que se tenha confiança no modelo, pode-se utilizá-lo para análise de diferentes cenários e avaliações ao longo de vários anos de cultivo (JÉGO et al., 2012).

1.3 FERRAMENTAS DE MODELAGEM DE CRESCIMENTO DE PLANTA

As ferramentas descritas na literatura são basicamente programas de computadores que englobam diversos modelos de crescimento de planta em estruturas modulares flexíveis, porém com suas peculiaridades. Pode-se citar o CropSyst (STÖCKLE et al., 2003), APSIM (DONATELLI et al., 2010), DSSAT (JONES et al., 2003), EPIC (WILLIAMS et al., 1989), WOFOST (SUPIT et al., 1994), APES (DONATELLI et al., 2010) como alguns dos programas de computadores que reúnem modelos para simulação dos sistemas de cultivos.

Esses programas de computador simulam o comportamento ecofisiológico das plantas ao estimarem suas variáveis de produtividade. Os modelos que simulam o desenvolvimento estrutural e morfogênico das plantas são contemplados em ferramentas como LIGNUM (PERTTUNEN et al., 1996) e GREENLAB (COURNÈDE et al., 2006), que modelam a arquitetura da planta, sendo ferramentas gráficas. Alguns exemplos de modelos de crescimento de planta são os modelos CERES para o milho (JONES e KINIRY, 1986) e trigo (RITCHIE e OTTER, 1985), SOYGRO para soja (WILKERSON et al., 1983) e PNUYGRO para amendoim (BOOTE et al., 1986).

Entre os programas computacionais citados, tem-se destacado o Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT), que foi concebido para simular o crescimento e a produtividade de culturas sobre uma área uniforme de terra. O DSSAT também simula as alterações que ocorrem no sistema de cultivo ao longo do tempo para água, carbono e nitrogênio no solo. Esse sistema tem sido usado por pesquisadores de todo o mundo e inclui modelos para as principais culturas comerciais. O DSSAT consiste em uma coleção de programas independentes que funcionam em conjunto, interligados aos modelos de crescimento de planta. Uma base de dados descreve o clima, condições do solo, medições experimentais e informações de genótipo, facilitando a criação de diferentes cenários para a aplicação dos modelos (JONES et al., 2003). O DSSAT usa módulos comuns para a dinâmica do solo e as interações solo-planta-atmosfera que funcionam de forma independente do módulo de crescimento de planta, o que permite simular cenários com rotação de culturas. Os dados mínimos requisitados incluem entradas do clima (temperaturas máxima e mínima diárias, precipitação e radiação solar), classificação do solo e práticas de manejo da cultura como data de semeadura, cultivar, espaçamento entre linhas, população de plantas, quantidades de fertilizantes e aplicação de irrigação (ADAM e CORBEELS et al., 2012).

No DSSAT, um programa principal gerencia um módulo de terra e os módulos para os componentes, clima, solo, planta, solo-planta-atmosfera e de gestão. Cada módulo tem seis fases operacionais (executar variáveis de inicialização, inicializar variáveis de saídas da temporada, calcular as taxas, realizar integrações, calcular a produção diária e gerar relatório de resumo). Cada módulo realiza suas operações completamente independentes das operações de outros módulos. O programa principal controla quando cada etapa é ativada e quando cada módulo realiza a tarefa solicitada. O programa principal lê a informação dos arquivos DSSAT padrão que descreve uma situação a ser simulada. Uma interação no tempo é iniciada para a temporada, ou um ciclo de cultivo, e o programa principal inicia um ciclo diário chamando o

módulo de terra para calcular as taxas, realizar a integração e relatar resultados diários. Depois de concluir uma safra ou uma temporada, são gerados arquivos que resumem as saídas (JONES et al., 2003).

1.4 UTILIZAÇÕES EM AGRICULTURA DE PRECISÃO

Os programas de computadores contendo modelos de crescimento de planta têm procurado integrar os benefícios que Sistemas de informações Geográficas (SIG) oferecem no tratamento de dados espaciais (HODSON e WHITE, 2010). Essa associação busca facilitar os estudos dos efeitos de parâmetros espacialmente variáveis. Os modelos podem ser utilizados em diferentes escalas espaciais. Em agricultura de precisão tem-se o interesse em escalas ao nível de campos agrícolas, que utiliza dados locais de pesquisas e de estações meteorológicas próximas, para avaliar a produção das culturas agrícolas em resposta às práticas de manejo (RESOP et al., 2012). O DSSAT apresenta a interface AEGIS desenvolvida por Engel et al. (1997). Entretanto, essa interface combina o DSSAT a uma versão mais antiga do ArcGIS, o ArcVIEW. Além disso, o usuário fica dependente das interfaces de entrada de dados do DSSAT (RESOP et al., 2012). Thorp et al. (2008) descreveram a metodologia para o uso da interface APOLLO que foi desenvolvido para complementar o DSSAT. A interface APOLLO atua na criação facilitada de arquivos de entrada para simulações, calibração e validação dos modelos em todas as zonas de manejo predefinidas.

A aplicação de modelos de crescimento de planta pode apresentar incertezas associada a valores reais de parâmetros de entrada. A calibração dos modelos é então necessária para aumentar a confiabilidade das previsões. Jégo et al. (2012) utilizaram dados de sensoriamento remoto (SR) para melhorar a capacidade preditiva dos modelos nas zonas de manejo estabelecidas com base no índice de área foliar (IAF). A estimativa de produção de biomassa para as culturas soja, milho e trigo em sequeiro, foi melhorada, quando comparada com a simulação antes da calibração. Entretanto, os autores alertam que a aquisição de imagens de satélites livres de nuvens e com resolução espacial apropriada à agricultura de precisão pode ser um desafio.

Oliver et al. (2010) simularam limitações físicas em zonas de manejo com fraco desempenho através de diferentes graus de restrição ao enraizamento, que alteram a capacidade da planta em explorar água e nutrientes do solo. Opções de manejo foram simuladas por modelos com os coeficientes de restrição ao desenvolvimento radicular

calibrados, em que se avaliaram as respostas ao manejo em diferentes condições de água no solo. Os autores afirmam que o diagnóstico apropriado das restrições ao crescimento das raízes reduz o risco de superestimar o potencial de melhoria proveniente do manejo em regiões com restrições ao desenvolvimento radicular.

A simulação do crescimento de planta também pode ser utilizada para auxiliar no manejo de fertilizantes como o nitrogênio. Anwar et al. (2009) utilizaram os modelos APSIM-Trigo e APSIM-Cevada para avaliar zonas de manejo com aplicação de doses de nitrogênio. Esses autores observaram uma capacidade preditiva satisfatória para os modelos ao simular a produtividade dessas culturas.

1.5 DADOS MÍNIMOS NECESSÁRIOS PARA SIMULAÇÃO NO DSSAT

1.5.1 Estrutura dos arquivos utilizados no DSSAT

Os arquivos necessários para simulação do crescimento de plantas no DSSAT são armazenados em um arranjo hierárquico de diretórios, no local de sua instalação. Esse arranjo de diretórios é apresentado na interface principal do programa, que possibilita a organização dos arquivos em locais preestabelecidos. Esses locais podem ser acessados durante a simulação por meio da codificação incorporada nos nomes e extensões dos arquivos.

Os arquivos utilizados no DSSAT possuem codificação ASCII (American Standard Code for Information Interchange) que podem ser visualizados e editados em um editor de texto simples como o “bloco de notas” no “Microsoft Windows”. Contudo, a extensão dos arquivos não é o “.txt” padrão, e sim um código que define o tipo de arquivo. Dessa forma, o arquivo de solos será encontrado na pasta “Soil” e terá uma extensão “.sol”, o arquivo de clima estará na pasta “Weather” com a extensão “.wth”. Para cada uma das culturas contempladas no DSSAT, haverá uma pasta com seu nome. No interior dessa pasta podem ser encontrados três tipos de arquivos diferenciados pelo último caractere da extensão. A extensão “.??X” representa o arquivo de simulação para a cultura ??. A extensão “.??A” representa o arquivo contendo o resumo de resultados de experimentos reais. A extensão “.??T” representa o arquivo com os resultados de experimentos reais organizados no formato de séries temporais, com as datas de cada observação. Os dois primeiros caracteres definem a cultura contemplada no arquivo, como exemplo a cultura do milho tem-se as extensões “.MZX”, “.MZA” e “.MZT”.

Os arquivos com os coeficientes genéticos de cada cultura são reunidos na pasta “Genotype” em que as culturas são diferenciadas pelo nome do arquivo, como “MZCER045”

para o modelo CERES-Maize e as extensões diferenciam os três tipos de arquivos utilizados para caracterizar um genótipo, que são o arquivo de espécie “*.SPE”, o arquivo de ecótipo “*.ECO” e o arquivo de cultivar “*.CUL”. Essas são características básicas da estrutura de arquivos utilizadas no DSSAT e são importantes para compreensão de procedimentos realizados neste trabalho. Para mais detalhes sobre os padrões de nomenclatura utilizados e estruturação dos arquivos deve-se consultar a documentação do DSSAT (JONES et al., 1994; TSUJI et al., 1994).

1.5.2 Construção do arquivo de solo para DSSAT

O preparo adequado do arquivo de solo no DSSAT é decisivo para o sucesso da simulação. Isso porque, os modelos são muito sensíveis ao balanço de água e alguns nutrientes do solo e normalmente não se tem todas as informações necessárias para produzir o arquivo com confiança. Alguns parâmetros importantes são estimados por funções de pedotransferências, outros são tomados como valores padrões e há ainda a necessidade de bom senso por parte do pesquisador em algumas atribuições.

Uma das importantes funções do arquivo de solo é regular o balanço hídrico. Esse balanço é obtido por meio da estimativa do LL, DUL e SAT, que são denominados no Brasil como o ponto de murcha permanente, capacidade de campo e a máxima saturação de água no solo respectivamente. No arquivo de solo, essas variáveis são expressas pelas siglas SLLL, SDUL e SSAT. O que define matematicamente a estimativa dessas variáveis no DSSAT são a textura do solo, o teor de matéria orgânica e a densidade do solo. Esses atributos são entradas para o arquivo de solos com a legenda SLSI para silte, SLCL para argila, OC para carbono orgânico e BD densidade do solo.

A quantidade de água disponível no solo para absorção pelas plantas pode ser estimada por meio da diferença entre a capacidade de campo DUL e o ponto de murcha permanente LL. Para o ponto de murcha permanente, considera-se o conteúdo de água retido a um potencial matricial de -1500 kPa. Entretanto, a capacidade de campo, representa um atributo de difícil determinação. Em um solo saturado, a capacidade de campo ocorrerá quando a condutividade hidráulica passa a ser mínima e a água remanecente é retida por tensões geradas a partir da força capilar ou tensão superficial. O potencial matricial do solo na capacidade de campo é função de muitos fatores relacionados a estrutura do solo, como a textura e a forma de agregação dos colóides. Para efeito de irrigação é comum atribuir a tensão de -33 kPa para capacidade de campo. Quando a textura é considerada, utiliza-se -33 kPa como recomendação para solos de textura fina e -10 kPa para solo de textura grossa. Em

solos de cerrado é comum a utilização de -10 kPa, pois a estrutura granular faz com que esse tipo de solo se assemelhe a solos de textura grossa (BERNARDO, 2006).

O acesso à água pelas plantas também é definido pela distribuição de raízes e o volume de solo explorado pelas mesmas. A distribuição das raízes nas camadas do solo é representada pela legenda SRGF e também influencia a absorção de nutrientes como o nitrogênio. O fator de crescimento de raízes pode ser estimado no DSSAT por meio da Equação 1. É importante ressaltar que o mesmo arquivo de solo pode ser utilizado por mais de uma cultura, sendo o fator um indicativo genérico de restrições físicas ou químicas do solo. Gijsman et. al (2002) alertam que o acesso à água do solo pelas plantas no DSSAT também é dependente do LL. Os autores relatam que solos com valores baixos de LL proporcionam menor estresse por água, ainda que a água disponível seja a mesma que outro solo com LL mais alto.

$$\begin{aligned} SRGF_i &= 1 && \text{se } P_{centro_i} \leq 20 \text{ cm} \\ SRGF_i &= e^{(-0,02P_{centro_i})} && \text{se } P_{centro_i} > 20 \text{ cm} \end{aligned} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

$SRGF_i$ = Fator de crescimento de raízes na camada i .

P_{centro_i} = Profundidade do centro da camada i do perfil do solo (cm).

Em alguns casos são disponíveis para modelagem apenas o mínimo possível de dados de entrada de mais fácil obtenção como a textura do solo. Os atributos LL, DUL e SAT, que são de difícil obtenção, pois demandam custo elevado e tempo, são preferencialmente estimados por funções de pedotransferência (FPT). Esse termo foi introduzido por Bouma (1989), sendo muito utilizado para predição de atributos importantes do solo e de difícil obtenção direta. O DSSAT utiliza o método de Saxton et al. (1986), ou o método de Rawls et al. (1982) para estimar variáveis hídricas do solo. As equações utilizadas por esses autores tiveram seus parâmetros ajustados a partir de solos de regiões temperadas. Essas regiões normalmente possuem solos com elevados teores de silte e argila de elevada atividade, quando comparadas à maioria dos solos de regiões tropicais, que possuem argila de baixa atividade e os teores de silte inferiores a 20% (TOMASELLA; HODNETT; ROSSATO, 2000). Além disso, muitos dos solos de regiões tropicais apresentam textura fora do intervalo

de validade das equações, o que torna suas estimativas imprecisas ou mesmo situações irreais como SAT menor que DUL, observado por Gijssman et al. (2002).

Os pesquisadores que trabalham com solos de regiões tropicais são então prejudicados ao utilizar as FPT implementadas no programa “Sbuild” do DSSAT. Como alternativa, pode-se utilizar dados reais de publicações que contenham informações de LL, DUL e SAT. O “International Soil Reference and Information Centre” (ISRIC) catalogou solos em muitos países, formando uma base de dados de solos chamada WISE “World Inventory of Soil Emission Potentials” (GIJSMAN et al., 2007; ROMERO et al., 2012). Jones et al. (2003) converteram muitos solos da base de dados WISE para um formato que pode ser utilizado por modelos de crescimento de planta presentes no DSSAT e se encontra disponível na pasta “Soil” do programa. Essa base de dados contempla perfis de solos brasileiros, além de perfis de solos de outros países de clima tropical que tiveram processo de formação semelhantes. O pesquisador pode utilizar um dos perfis de solo da base WISE, desde que sejam semelhantes ao solo em estudo. Ou ainda, pode obter os dados de LL, DUL e SAT em camadas de solo que apresentem texturas semelhantes e seja do mesmo tipo de solo. Essa abordagem talvez seja mais acertada que a utilização de FPT ajustadas com base em solos de clima temperados, ou que não apresentem uma boa capacidade preditiva.

Outra opção é utilizar FPT ajustadas a partir de dados obtidos de grupos de solos com características de formação geológica semelhante. Entre os trabalhos realizados no Brasil, Tomasella et al. (2000) se destacaram ao ajustarem os parâmetros da equação de Van Genuchten (1980), que modela o teor de água no solo em função do potencial matricial. Tomasella et al. (2000) utilizaram perfis dos solos contemplados em pesquisas realizadas no Brasil. Muitos desses perfis também são observados na base do WISE. Os parâmetros foram ajustados com base em dados experimentais de solos brasileiros, pelo método de regressões múltiplas e obteve ajustes bem melhores quando comparados a Saxton et al. (1986) e Vereecken et al. (1989). Tomasella et al. (2000) ajustaram os parâmetros para quatro níveis de entrada das equações em função da disponibilidade de dados.

As FPT ajustadas a partir de solos brasileiros são importantes referências a pesquisadores que trabalham com modelagem de culturas no Brasil. Isso porque permite ampliar as potencialidades de levantamentos pedológicos realizados pela “Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária” (EMBRAPA) e pelo projeto de levantamento dos recursos naturais do Brasil iniciados na década de 70 do século passado, denominado RADAMBRASIL (1973). Esses documentos são disponibilizados gratuitamente pela

EMBRAPA - Sistema de Informações de Solos Brasileiros. A base de dados RADAMBRASIL fornece amostras de perfis de solos brasileiros com uma considerável resolução espacial e informações importantes sobre características físicas e químicas de perfis de solos. Mesmo levantamentos antigos de perfis de solo fornecem informações importantes, pois algumas características do solo não são alteradas expressivamente ao longo do tempo. Além disso, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) disponibiliza gratuitamente o mapa de classificação dos solos brasileiros no formato “shape” que pode ser visualizado em um SIG. Essa base de dados pode ser utilizada para simulações com modelos de crescimento de planta em todo o território brasileiro.

Outras informações podem ser acrescentadas ao arquivo de solo, em função da disponibilidade de dados, do objetivo da pesquisa e dos métodos de simulação escolhidos pelo pesquisador. Algumas dessas variáveis são taxa de drenagem (SLDR), número da curva de escoamento – “Soil Conservation Service” (SLRO), fator de mineralização da matéria orgânica (SLNF), fator de fotossíntese (SLPF), ponto de murcha permanente (SLLL), capacidade de campo (SDUL), conteúdo de água na saturação (SSAT), fator de crescimento de raízes (SRGF), condutividade hidráulica em saturação (SSKS), densidade do solo (SBDM), carbono orgânico (SLOC), argila (SLCL), silte (SLSI), fração granulométrica grosseira maior que 2 mm (SLCF), nitrogênio total (SLNI), pH em água (SLHW), capacidade de troca catiônica (SCEC), fósforo trocável (SLPX), fósforo total (SLPT), fósforo orgânico (SLPO), conteúdo de CaCO_3 (CACO3), alumínio (SLAL), ferro (SLFE), manganês (SLMN), saturação por bases (SLBS), potássio extraível (SLKE), magnésio (SLMG), sódio (SLNA), enxofre (SLSU), condutividade elétrica (SLEC), cálcio trocável (SLCA) entre outros. Muitas dessas variáveis são apenas descritoras de experimentos reais, não sendo ainda contemplados nas análises de todos os modelos.

1.5.3 Definição do arquivo de clima

Os dados de clima são necessários para os modelos de crescimento de planta. No DSSAT esses dados são organizados em um arquivo de clima que caracteriza uma estação meteorológica. É necessário utilizar o programa “WeatherMan” para criar uma nova estação, em que os dados podem ser introduzidos manualmente ou importados de um arquivo nos formatos reconhecidos pelo programa (HANSEN et al., 1994). O arquivo de clima é utilizado para calcular a evapotranspiração da cultura e isso pode ser realizado pelo método da FAO (DOORENBOS, 1977), também descrito em Allen et al. (2005) ou pelo método de Priestley e Taylor (1972), complementado por Ritchie (1972). Ao utilizar o método proposto pela FAO,

os requisitos mínimos de dados climáticos consistem em radiação solar (SRAD), precipitação pluviométrica (RAIN), temperatura máxima (TMAX), temperatura mínima (TMIN), velocidade do vento (WIND) e umidade relativa do ar (HUM). Ao utilizar o método de Priestley e Taylor (1972), não são necessárias as variáveis WIND e HUM, dos dados citados.

No Brasil existem entidades públicas que disponibilizam gratuitamente os dados provenientes de estações meteorológicas convencionais ou estações automáticas. Algumas informações também podem ser obtidas de aeroportos, boias náuticas e estações de monitoramento. Importantes locais de acesso a essas informações estão na website do “Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos” - CPTEC/INPE, e na website do “Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa” – BDMET/INMET. O “International Research Institute for Climate Prediction” (IRI) disponibiliza dados climáticos para download em escala global e permite aplicação de filtros e formatação (IRI, 2006;2009). As diferentes fontes de dados disponibilizam arquivos de diferentes formatos que podem ser convertidos para uma planilha eletrônica. Entretanto, as variáveis climáticas mensuradas nas diferentes fontes podem não ser as mesmas, apresentarem uma taxa de amostragem diária e unidade de medida diferente, ou ainda o período de dados disponível pode ser limitado. No DSSAT as entradas de clima são diárias e com unidades definidas pelo programa, sendo necessário o processamento dos dados.

As estações meteorológicas convencionais brasileiras foram instaladas há mais tempo e muitas dessas estações possuem dados históricos superiores a 30 anos. A desvantagem desse banco de dados é que não apresentam a mensuração direta da radiação solar, que é uma variável importante no arquivo de clima do DSSAT.

A radiação solar pode ser estimada com uma boa precisão, a partir de dados de temperatura ou insolação, normalmente fornecidos pelas estações convencionais. Lima (2005) sugere a calibração dos parâmetros da equação de Angström para estimativa da radiação solar a partir da insolação. Na ausência desses dados o autor recomenda utilizar o método desenvolvido por Hargreaves e Samani (1982) para estimativa da radiação a partir da temperatura máxima e mínima do ar, Equações 2 e 3.

Equação de Angström

$$R_s = \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

n = Duração do brilho solar (horas);

N = Duração astronômica do período diurno (horas);

a, b = Coeficientes empíricos obtidos por análise de regressão linear de determinada localidade.

R_a = Radiação no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

Equação de Hargreaves e Samani (1982)

$$R_s = K_r \sqrt{(T_{max} + T_{min})} R_a \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que:

R_a = Radiação no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

K_r = Coeficiente de ajuste.

Na Figura 1 a 6 são apresentados os dados climáticos da estação convencional instalada na Universidade Federal de Goiás – Regional Jataí. Esses dados foram utilizados para criar o arquivo de clima utilizado no DSSAT para a região. No mesmo local também existe uma estação automática que registra a radiação solar. A radiação solar registrada na estação automática foi utilizada para ajustar os coeficientes a e b da Equação 1 e o coeficiente K_r da Equação 2, de forma a minimizar a raiz do erro quadrático médio (RSME) como apresentados nas Figuras 7 a 9.

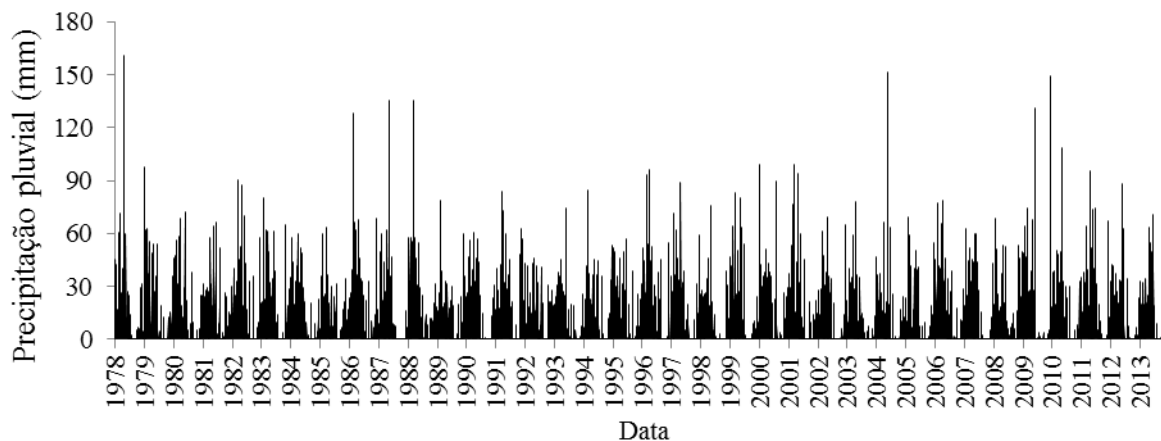


Figura 1: Precipitação pluviométrica registrada diariamente em Jataí –GO.

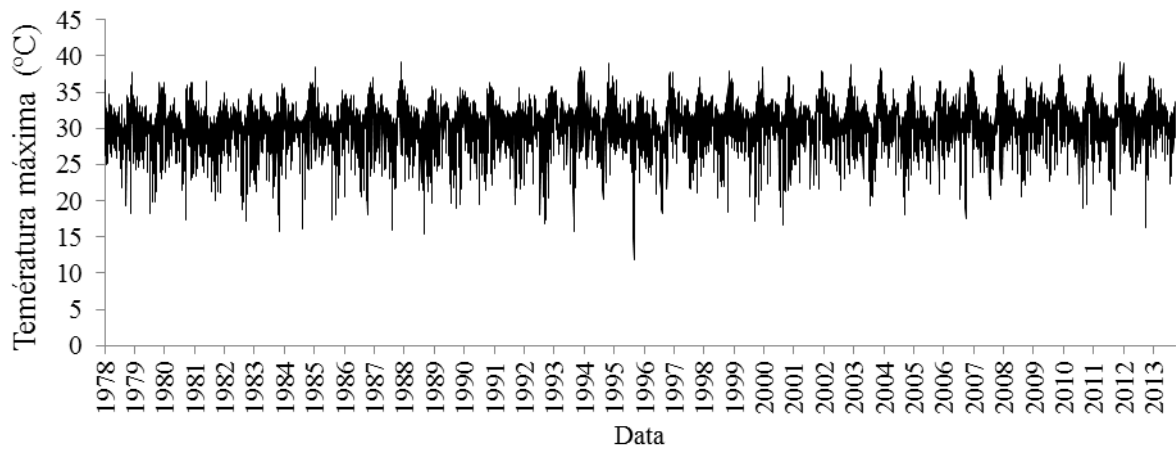


Figura 2: Temperatura máxima registrada diariamente em Jataí –GO.

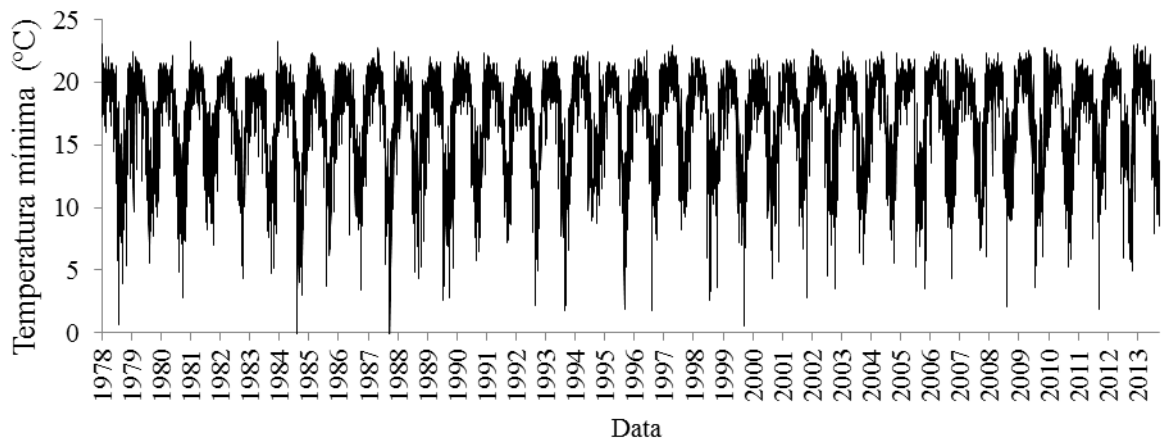


Figura 3: Temperatura mínima registrada diariamente em Jataí –GO.

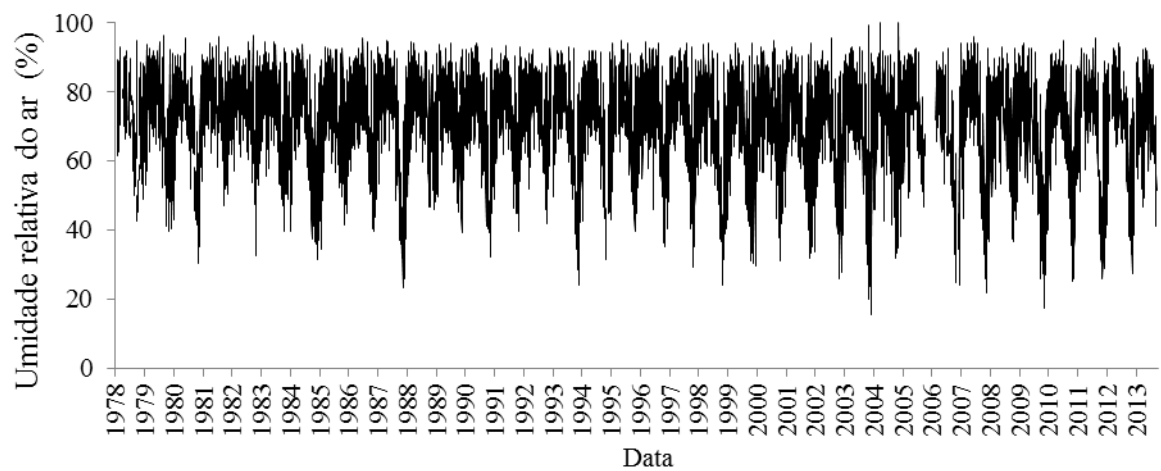


Figura 4: Umidade relativa do ar registrada diariamente em Jataí – GO.

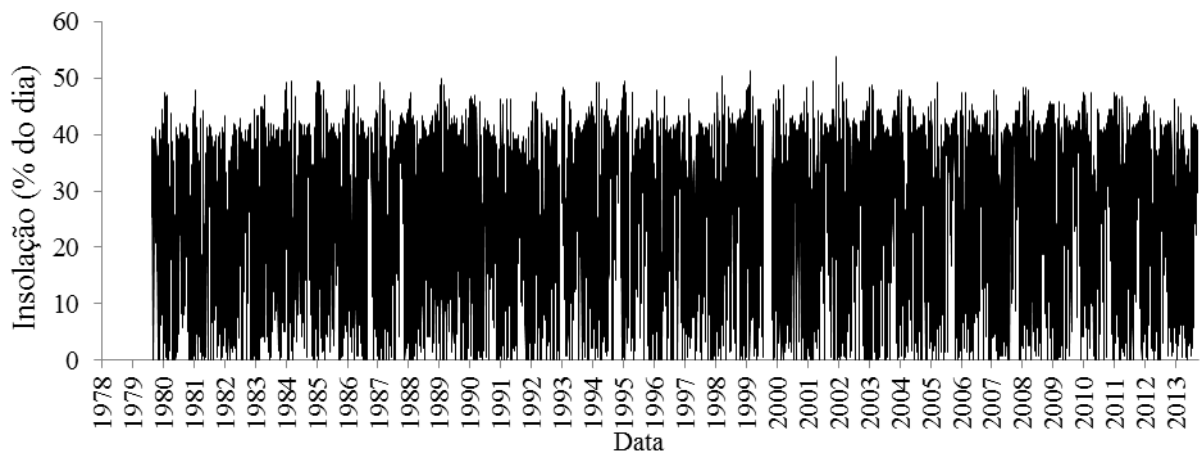


Figura 5: Insolação registrada diariamente em Jataí – GO.

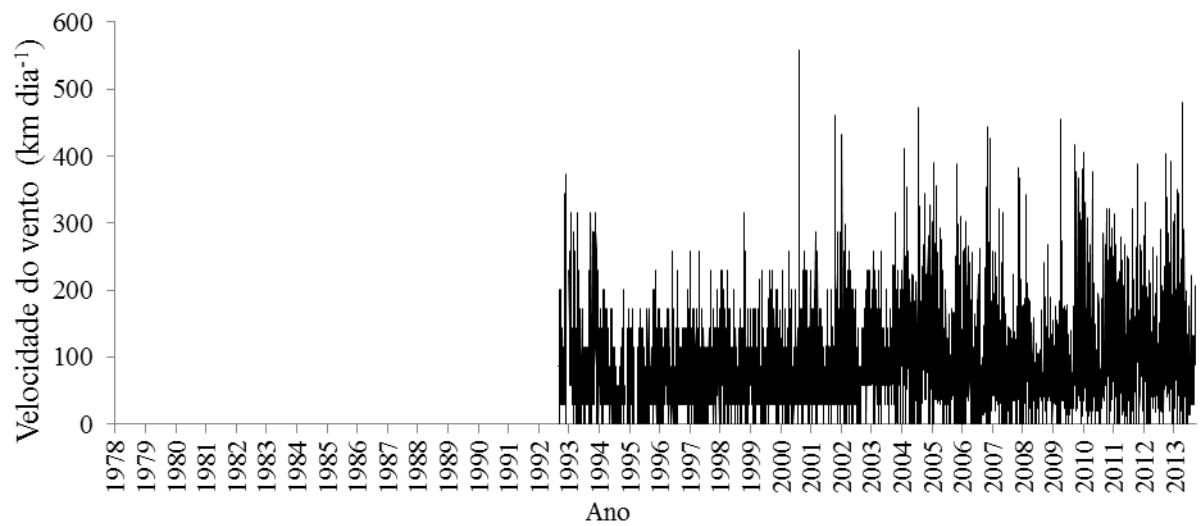


Figura 6: Velocidade do vento registrado diariamente em Jataí – GO.

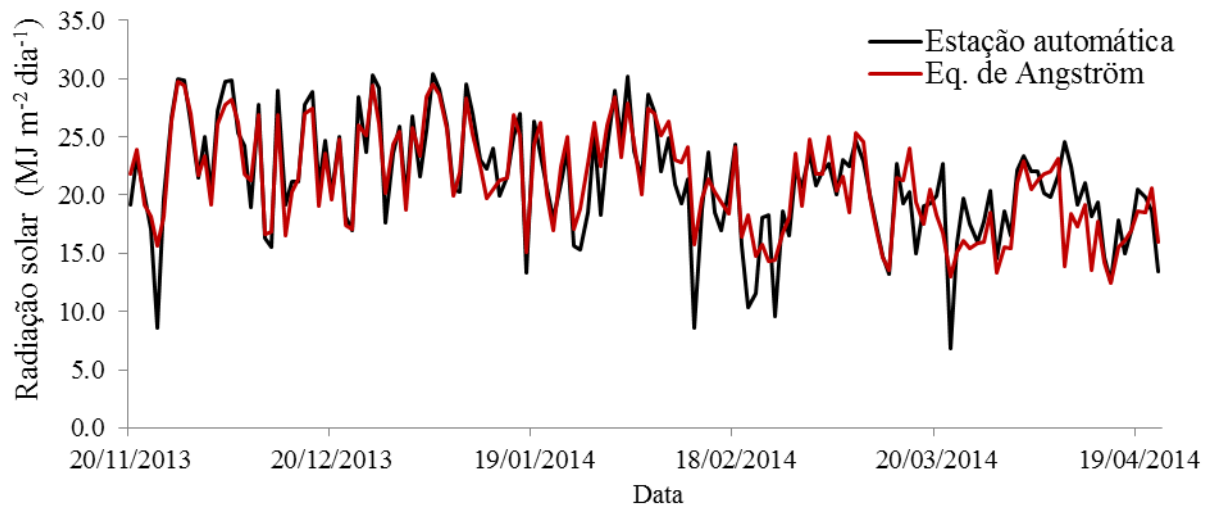


Figura 7: Radiação solar observada versus a radiação solar estimada pela equação de Angström.

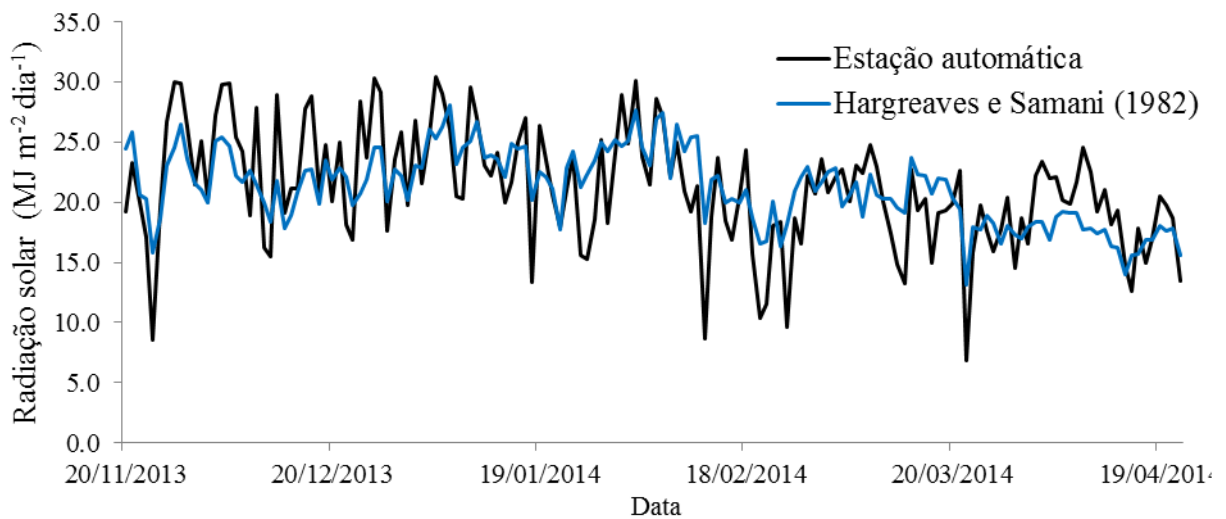


Figura 8: Radiação solar observada versus a radiação estimada pela equação de Hargreaves e Samani (1982).

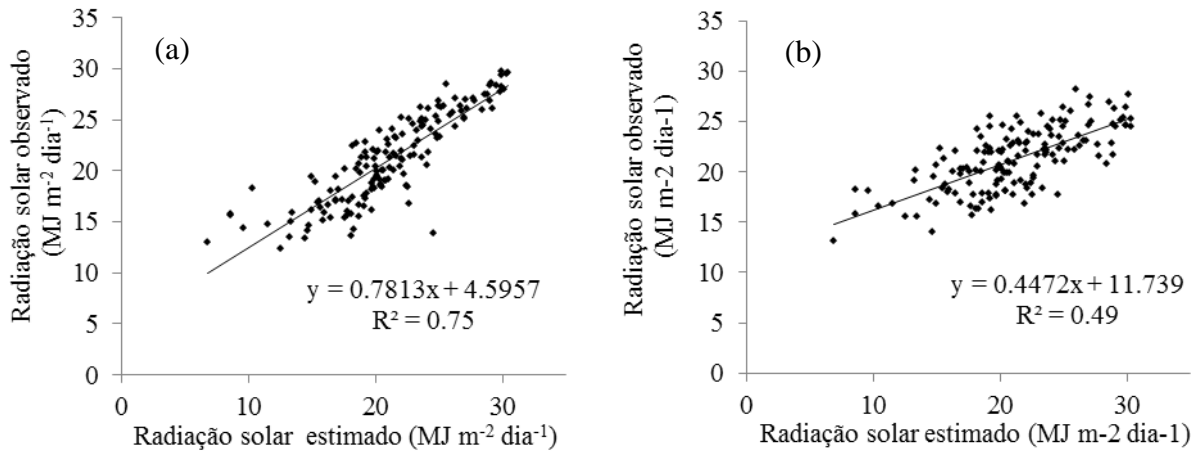


Figura 9: Ajuste da radiação solar pelo método de Angström (a); Ajuste da radiação solar pelo método de Hargreaves e Samani (1982) (b).

A radiação solar representa uma variável climática importante para a modelagem e a qualidade de sua estimativa deve ser avaliada. Na Tabela 1, são apresentadas algumas estatísticas que avaliam a qualidade das estimativas da radiação solar. O erro médio igual a zero indica que os valores estimados acompanharam a média do conjunto de dados. Isso também pode ser observado nas Figuras 7 e 8, embora a inclinação das retas de ajustes apresentadas nas figuras 9(a) e 9(b) apresentem coeficientes de inclinação que supõem uma amenização nos dados mais extremos. O coeficiente de inclinação foi menor para a radiação solar estimada no método de Hargreaves e Samani (1982). A dispersão dos dados pode ser analisada por meio da RSME e do R^2 , em que é possível observar que o método de Angström apresentou uma menor dispersão. Outra estatística utilizada para comparar modelos é o índice de concordância proposto por Willmott et al. (1985) denominado índice d , que é apresentado na Equação 4.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que:

- d = Índice de concordância.
- P_i = Valor estimado para o ponto i .
- O_i = Valor observado para o ponto i .
- O = Média dos valores observados.

O índice d varia de 0 a 1 e avalia a concordância entre os valores observados e preditos. A radiação solar estimada pelo método de Angström apresentou um maior valor para o índice d. O critério sugerido por Acosta et al. (2009) para classificar o quão bom é o ajuste de um modelo matemático consiste em avaliar o produto entre índice d e o r^2 . Segundo os intervalos sugeridos pelos autores, o método de Angström apresentou foi classificado como bom e o método de Hargreaves e Samani (1982) como péssimo, para os ajustes realizados com os dados do presente trabalho. Os coeficientes ajustados para as duas equações são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1: Estatísticas utilizadas para avaliar a estimativa da radiação solar

Método	EM	REQM	r^2	Índice d
Eq. de Angström	0,0	5,8	0,75	0,93
Hargreaves e Samani (1982)	0,0	11,9	0,49	0,79

EM – Erro médio; REQM – Raiz do erro quadrático médio; r^2 - coeficiente de determinação;

Tabela 2: Parâmetros estatísticos ajustados para os métodos descritos nas Equações 1 e 2

Método	Parâmetro	Ajuste
Eq. de Angström	A	0,35952
	B	0,43373
Hargreaves e Samani (1982)	K	0,16025

Lima (2005) relata que a diferença entre as temperaturas máximas e mínimas pode ser influenciada por outros fatores não associados a insolação, tais como a velocidade do vento e umidade relativa do ar. Entretanto, os autores afirmam que esse método representa uma boa estimativa da radiação solar. Para montar o arquivo de clima do DSSAT foi utilizado o método de Angström em todas as datas com dados de insolação. Nas datas cujos dados de insolação foram perdidos, a radiação solar foi estimada pelo método da diferença de temperatura. Na Figura 10 encontra-se apresentada a série histórica da radiação solar utilizada no arquivo de clima do DSSAT para a região de Jataí-GO.

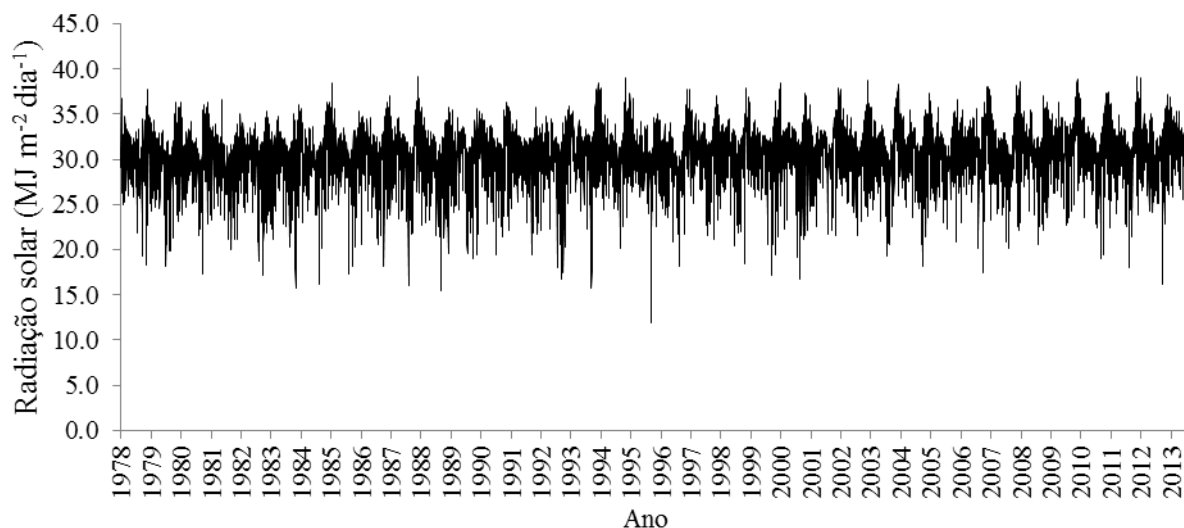


Figura 10: Série histórica diária da radiação solar estimada para Jataí-GO.

A radiação solar é utilizada nos modelos em processos fotossintéticos para estimativa de produção de matéria seca. A eficiência fotossintética na produção de matéria seca de grãos está associada ao coeficiente genético “G3” do milho, que determina a taxa de enchimento de grãos. No arquivo de ecótipo, o coeficiente “RUE” determina a eficiência fotossintética ao longo do ciclo de cultivo da cultura do milho. A radiação solar também influencia o balanço de água, pois segundo Lima (2005) é um dos fatores determinantes no processo de evapotranspiração.

1.5.4 Definição dos coeficientes genéticos para o milho

O DSSAT apresenta seis coeficientes genéticos para o modelo CERES-Maize, que simula o desenvolvimento da cultura do milho. Esses coeficientes podem ser divididos em dois grupos que se referem ao desenvolvimento fenológico e ao acúmulo de matéria seca, ou crescimento.

A calibração consiste na edição dos coeficientes genéticos contidos no arquivo MZCER045.CUL, de forma que os valores simulados sejam o mais próximo possível dos valores reais das variáveis de saída. Para calibrar os coeficientes genéticos de uma nova cultivar é necessário criá-la por meio da edição do arquivo de cultura. Atribuem-se o código e o nome da nova cultivar para que seja visualizada no arquivo “X”, que descreve um cenário a ser simulado. Os coeficientes podem ser iniciados com um valor arbitrário, ou a partir de outra cultivar existente. O GLUE descrito por He et al. (2010) e o GenCalc criado por Hunt et al. (1993) são programas complementares ao DSSAT que podem ser utilizados para ajustar os coeficientes genéticos por meio de métodos interativos que visam minimizar os erros. Como o

modelo CERES-Maize possui somente os seis coeficientes genéticos apresentados no Quadro 1, torna-se viável a calibração feita de forma manual. O princípio da calibração manual são os mesmos utilizados nos programas citados, entretanto, o entendimento dos coeficientes pode tornar o processo de calibração mais flexível e preciso.

Quadro 1: Coeficientes genéticos presentes no arquivo de cultivar do DSSAT para o milho

COEFICIENTES	DEFINIÇÕES
VAR#	Código para identificação ou número para uma cultivar específica.
VAR-NAME	Nome da cultivar.
EXPNO	Número de experimentos usados para estimar os parâmetros das cultivares.
ECO#	Código de ecótipo da cultivar, aponta para o ecótipo no arquivo ECO.
P1	Tempo térmico de emergência das plântulas até o fim da fase juvenil (expresso em graus-dia acima de uma temperatura base de 8 °C) durante o qual a planta não é sensível às mudanças no fotoperíodo.
P2	Até que ponto a evolução (expresso em dias) é adiada para cada aumento de hora em fotoperíodo, acima do fotoperíodo mais longo em que o desenvolvimento avança a uma taxa máxima (que é considerado como sendo 12,5 horas).
P5	O tempo térmico do pendoamento à maturação fisiológica (expresso em graus-dia acima de uma temperatura base de 8 °C).
G2	Número máximo possível de grãos por planta.
G3	Taxa linear de enchimento de grãos, sob condições ótimas (mg dia ⁻¹).
PHINT	Intervalo filocromático; o intervalo de tempo térmico (graus-dias) entre as sucessivas aparições das folhas.

O processo de calibração consiste basicamente em executar o modelo para determinada cultivar e comparar as variáveis de saída com os resultados de experimentos reais. É necessário que o experimento real utilizado na obtenção dos dados de calibração seja bem caracterizado no arquivo “X”, que o descreve virtualmente. Além disso, é importante documentar os métodos utilizados na simulação e o banco de dados, para que se possa ter confiança em utilizar os modelos calibrados em cenários diferentes.

As variáveis normalmente utilizadas para comparar os modelos são referentes ao número de dias entre a semeadura e a antese, dias entre a semeadura e a maturidade fisiológica, índice de área foliar máximo, matéria seca total na antese, matéria seca total na maturidade fisiológica e produtividade de grãos na colheita. Essas variáveis são apresentadas no resumo da simulação contido no arquivo “OVERVIEW.OUT”, sendo o mesmo resumo visualizado quando a simulação é realizada no modo de sensibilidade do DSSAT. O modo de sensibilidade executa o modelo para um único cultivar por vez, de forma rápida e flexível. A execução do modelo no modo de sensibilidade e a edição simultânea do arquivo

“MZCER045.CUL” permite o ajuste dos coeficientes de forma simples como exemplificado na Figura 11, em que o programa e o arquivo são visualizados paralelamente.

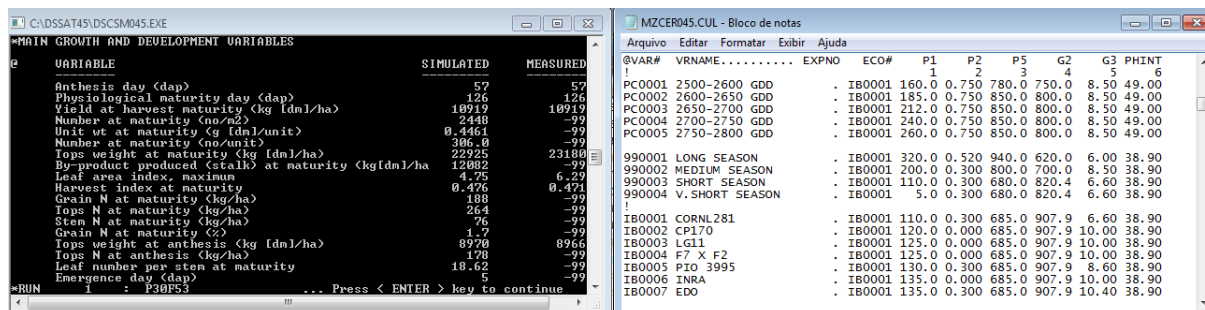


Figura 11: Visualização da execução do modelo no modo de sensibilidade, paralelamente ao arquivo que contem os coeficientes genéticos para o milho

Os coeficientes genéticos são ajustados manualmente por tentativas, avaliando-se as variáveis de saída. Entretanto, observa-se uma sequência lógica para o ajuste desses coeficientes no modelo CERES-Maize. Deve-se ajustar primeiramente o número de dias entre a semeadura e a antese. Essa variável depende dos coeficientes P1 e PHINT, que juntos influenciam também a matéria seca total na antese e na maturidade fisiológica, o índice de área foliar e o número de folhas por planta. Por esse motivo ajustar esses dois coeficientes manualmente, exige maior esforço. O coeficiente PHINT especifica o intervalo térmico necessário para emissão de uma nova folha. O número de folhas por planta dependerá também do intervalo térmico entre a semeadura e a antese, definido pelo coeficiente P1.

Para aumentar o número de folhas deve-se reduzir o coeficiente PHINT ou aumentar o coeficiente P1. Isso implica no incremento na matéria seca total na antese e na maturidade fisiológica e um maior índice de área foliar. Assim, esses coeficientes devem ser ajustados paralelamente, pois ao alterar o tempo térmico para a antese, altera-se também o número de folhas para um determinado PHINT. Esses dois coeficientes influenciam muitas variáveis e por vezes não é possível um ajuste perfeito para todas. A calibração feita manualmente permite beneficiar variáveis que se julguem mais importantes.

O coeficiente P5 define o tempo térmico entre a antese e a maturidade fisiológica considerando a temperatura de base como sendo 8 °C. O ajuste desse coeficiente posteriormente a data de antese permite definir a data da maturidade fisiológica. A relação entre a maturidade fisiológica e o coeficiente P5 se apresenta de forma linear e diretamente proporcional.

Os coeficientes que definem a produtividade de grãos são o G1 e G2. O coeficiente G1 pode ser ajustado, mas deve ser preferencialmente oriundo de valores observados em

condições potenciais. Isso porque, G1 representa o máximo número de grãos por espiga e a partir de certo nível esse coeficiente não altera o resultado da simulação, mas em outros cenários pode vir a ser limitante. O coeficiente G2 define a taxa de enchimento de grãos e deve ser o último ajustado. Sua relação é linear e diretamente proporcional à produtividade de grãos.

O coeficiente P2 implica em restrições no desenvolvimento das plantas em situações de fotoperíodo elevado. Isso faz com que esse coeficiente não influencie os resultados de simulações para a região do Cerrado brasileiro.

1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de modelos de crescimento de planta em agricultura de precisão representa ferramenta de elevado potencial para o gerenciamento de zonas de manejo. Limitações físicas e químicas do solo podem ser corrigidas para aumentar o potencial de produtividade. Quando essas limitações não podem ser corrigidas, a taxa de insumos agrícolas deve ser ajustada ao potencial de produtividade de cada região. Espera-se que as previsões dos modelos sejam mais confiáveis à medida que as zonas de manejo sejam atribuídas a regiões mais homogêneas.

Os modelos devem prever a utilização do mínimo possível de variáveis de entrada para que suas aplicações sejam mais abrangentes. Os dados mínimos requisitados não são sempre disponíveis diretamente. As variáveis hídricas do solo são essenciais e na ausência de dados reais podem ser estimadas por funções de pedotransferência. Entretanto, deve se atentar a capacidade preditiva dessas funções para o tipo de solo e região de utilização. Bases de dados gratuitas podem ser utilizadas para obtenção de dados meteorológicos, mas normalmente é necessário editar o arquivo para o formato requerido pelo programa. Para as bases de dados que não apresentem radiação solar, essa variável pode ser estimada a partir de dados de insolação, ou a partir de dados de temperaturas máximas e mínimas. Antes de aplicar os modelos para os diferentes cenários deve se calibrar os coeficientes genéticos que caracterizam as cultivares. Essa calibração consiste em ajustar os coeficientes genéticos que caracterizam o ciclo da cultura e sua produtividade, que pode ser feita manualmente para cultura do milho.

1.7 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro. À Universidade Federal de Viçosa – UFV e à Universidade Federal de Goiás, Regional Jataí – UFG que possibilitaram a realização desse trabalho.

1.8 LITERATURA CITADA

ACOSTA, J. F.; CARDOZO, N. P.; MARIN, F. R. Avaliação do desempenho de um modelo de estimativa de saldo de radiação em algumas culturas. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, 2009.

ADAM, M.; BELHOUCLETTE, H.; CORBEELS, M.; EWERT, F.; PERRIN, A.; CASELLAS, E.; CELETTE, F.; WERY, J. Protocol to support model selection and evaluation in a modular crop modelling framework: An application for simulating crop response to nitrogen supply. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 86, p. 43-54, 2012.

ADAM, M.; CORBEELS, M.; LEFFELAAR, P. A.; VAN KEULEN, H.; WERY, J.; EWERT, F. Building crop models within different crop modelling frameworks. **Agricultural Systems**, v. 113, p. 57-63, 2012.

ADAM, M.; WERY, J.; LEFFELAAR, P. A.; EWERT, F.; CORBEELS, M.; VAN KEULEN, H. A systematic approach for re-assembly of crop models: An example to simulate pea growth from wheat growth. **Ecological Modelling**, v. 250, p. 258-268, 2013.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; SMITH, M.; RAES, D.; WRIGHT, J. L. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 131, n. 1, p. 2-13, 2005.

ANWAR, M. R.; O'LEARY, G. J.; RAB, M. A.; FISHER, P. D.; ARMSTRONG, R. D. Advances in precision agriculture in south-eastern Australia. V. Effect of seasonal conditions on wheat and barley yield response to applied nitrogen across management zones. **Crop and Pasture Science**, v. 60, n. 9, p. 901-911, 2009.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8ª ed. Viçosa-MG. Editora UVF, 2006. 625p.

BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; MISHOE, J. W.; WILKERSON, G. G. Modeling growth and yield of groundnut. *Agrometeorology of Groundnut*. In: ICRISAT, P., Proceedings of an International Symposium, ICRISAT Sahelian Center, 1986. Niamey, Niger. 1986. p.243-254.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: Stewart, B. A. (Ed.). **Advances in soil science**: Springer, 1989. p.177-213.

COURNÈDE, P. H.; KANG, M. Z.; MATHIEU, A.; BARCZI, J. F.; YAN, H. P.; HU, B. G.; DE REFFYE, P. Structural factorization of plants to compute their functional and architectural growth. **Simulation**, v. 82, n. 7, p. 427-438, 2006.

DONATELLI, M.; RUSSELL, G.; RIZZOLI, A.; ACUTIS, M.; ADAM, M.; ATHANASIADIS, I.; BALDERACCHI, M.; BECHINI, L.; BELHOUCLETTE, H.; BELLOCCHI, G.; BERGEZ, J.-E.; BOTTA, M.; BRAUDEAU, E.; BREGAGLIO, S.; CARLINI, L.; CASELLAS, E.; CELETTE, F.; CEOTTO, E.; CHARRON-MOIREZ, M.; CONFALONIERI, R.; CORBEELS, M.; CRISCUOLO, L.; CRUZ, P.; GUARDO, A.; DITTO, D.; DUPRAZ, C.; DURU, M.; FIORANI, D.; GENTILE, A.; EWERT, F.; GARY, C.; HABYARIMANA, E.; JOUANY, C.; KANSOU, K.; KNAPEN, R.; FILIPPI, G.; LEFFELAAR, P.; MANICI, L.; MARTIN, G.; MARTIN, P.; MEUTER, E.; MUGUETA, N.; MULIA, R.; NOORDWIJK, M.; OOMEN, R.; ROSENMUND, A.; ROSSI, V.; SALINARI, F.; SERRANO, A.; SORCE, A.; VINCENT, G.; THEAU, J.-P.; THÉRON, O.; TREVISAN, M.; TREVISIOL, P.; EVERT, F.; WALLACH, D.; WERY, J.; ZEROUROU, A. A Component-Based Framework for Simulating Agricultural Production and Externalities. In: BROUWER, F. M.; ITTERSUM, M. K. (Ed.). **Environmental and Agricultural Modelling**: Springer Netherlands, 2010. cap. 4, p.63-108.

DOORENBOS, J. Guidelines for predicting crop water requirements. **FAO irrigation and drainage paper**, v. 24, p. 15-29, 1977.

ENGEL, T.; HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W. AEGIS/WIN: A computer program for the application of crop simulation models across geographic areas. **Agronomy Journal**, v. 89, n. 6, p. 919-928, Nov-Dec 1997.

GIJSMAN, A. J.; JAGTAP, S. S.; JONES, J. W. Wading through a swamp of complete confusion: how to choose a method for estimating soil water retention parameters for crop models. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 1-2, p. 77-106, 2002.

GIJSMAN, A. J.; THORNTON, P. K.; HOOGENBOOM, G. Using the WISE database to parameterize soil inputs for crop simulation models. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 56, n. 2, p. 85-100, 2007.

GUO, Y. Plant modeling and its applications to agriculture. Proceedings Second International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, 2007. p.135-141.

HANSEN, J. W.; PICKERING, N. B.; JONES, J. W.; WELLS, C.; CHAN, H. V. K.; GODWIN, A. D. C. WeatherMan: Managing Weather and Climate Data. In: TSUJI, G. Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. (Ed.). **DSSAT v3. Vol. 3-3**. Univ. of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 1994.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 108, n. 3, p. 225-230, 1982.

HE, J.; PORTER, C.; WILKENS, P.; MARIN, F.; HU, H.; JONES, J. W. Generalized Likelihood Uncertainty Analysis Tool for Genetic Parameter Estimation (GLUE Tool). In: JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; WILKENS, P. W.; PORTER, C. H.; TSUJI, G. Y. (Ed.). **Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.5**. University of Hawaii, Honolulu, HI: DSSAT v4.5: ICASA Tools, v.3, 2010.

HODSON, D.; WHITE, J. GIS and crop simulation modelling applications in climate change research. **Climate Change and Crop Production**, p. 245-262, 2010.

HUNT, L. A.; WHITE, J. W.; HOOGENBOOM, G. Agronomic data: advances in documentation and protocols for exchange and use. **Agricultural Systems**, v. 70, n. 2-3, p. 477-492, 11// 2001.

HUNT, L.; PARARAJASINGHAM, S.; JONES, J.; HOOGENBOOM, G.; IMAMURA, D.; OGOSHI, R. GENCALC: software to facilitate the use of crop models for analyzing field experiments. **Agronomy Journal**, v. 85, n. 5, p. 1090-1094, 1993.

IRI. ANEEL prcp_sta: Precipitation station data for South America, primarily Brazil. 2006. Disponível em: < http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.ANEEL/.prcp_sta >. Acesso em: Janeiro de 2015.

IRI. NOAA NCDC DAILY GLOBALSOD: Global daily WMO weather station data., 2009. Disponível em: <<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.DAILY/.GLOBALSOD/>>. Acesso em: Janeiro de 2015.

JÉGO, G.; PATTEY, E.; LIU, J. Using Leaf Area Index, retrieved from optical imagery, in the STICS crop model for predicting yield and biomass of field crops. **Field Crops Research**, v. 131, p. 63-74, 2012.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R. **CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development**. Texas A&M University Press. Texas: College Station, 1986.

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. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 235-265, Jan 2003.

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. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 235-265, Jan 2003.

JONES, J. W.; HUNT, L. A.; HOOGENBOOM, G.; GODWIN, D. C.; U. SINGH, G. Y. T.; PICKERING, N. B.; THORNTON, P. K.; BOWEN, W. T.; BOOTE, K. J.; RITCHIE, J. T. Input and Output Files. In: TSUJI, G. Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. (Ed.). **DSSAT version 3. A Decision Support System for Agrotechnology Transfer. Volume 2**. University of Hawaii. Honolulu, HI., 1994. p.1-94.

LAMANDA, N.; ROUX, S.; DELMOTTE, S.; MEROT, A.; RAPIDEL, B.; ADAM, M.; WERY, J. A protocol for the conceptualisation of an agro-ecosystem to guide data acquisition and analysis and expert knowledge integration. **European Journal of Agronomy**, v. 38, p. 104-116, 2012.

LIMA, E. D. P. **Evapotranspiração de referência de Penman-Monteith, padrão FAO (1998), a partir de dados de temperaturas máxima e mínima de Minas Gerais**. 2005. (Magister Scientiae). Universidade Federal de Viçosa

LU, S.; GUO, X.; WEN, W.; MIAO, T.; XIAO, B. A plug-in framework for modeling plant growth. In: **Computer Modeling and Simulation, 2010. ICCMS'10. Second International Conference on**. IEEE, 2010. p. 255-258.

MATHIEU, A.; LETORT, V.; COURNÈDE, P. H.; ZHANG, B. G.; HEURET, P.; DE REFFYE, P. Oscillations in functional structural plant growth models. **Mathematical Modelling of Natural Phenomena**, v. 7, n. 6, p. 47-66, 2012.

OLIVER, Y. M.; ROBERTSON, M. J.; WONG, M. T. F. Integrating farmer knowledge, precision agriculture tools, and crop simulation modelling to evaluate management options for poor-performing patches in cropping fields. **European Journal of Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 40-50, 2010.

PERTTUNEN, J.; SIEVÄNEN, R.; NIKINMAA, E.; SALMINEN, H.; SAARENMAA, H.; VÄKEVA, J. LIGNUM: A tree model based on simple structural units. **Annals of Botany**, v. 77, n. 1, p. 87-98, Jan 1996.

PRIESTLEY, C.; TAYLOR, R. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly weather review**, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

PRINGLE, M. J.; MARCHANT, B. P.; LARK, R. M. Analysis of two variants of a spatially distributed crop model, using wavelet transforms and geostatistics. **Agricultural Systems**, v. 98, n. 2, p. 135-146, 2008.

RADAMBRASIL, P. **Levantamento de recursos naturais**. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, Projeto Radambrasil, 1973.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. Estimation of soil water properties. **TRANS. AM. SOC. AGRIC. ENGRS. (GEN. EDN.)**, v. 25, n. 5, Sep.-Oct. 1982, p.1316-1320, 1328., 1982.

RESOP, J. P.; FLEISHER, D. H.; WANG, Q.; TIMLIN, D. J.; REDDY, V. R. Combining explanatory crop models with geospatial data for regional analyses of crop yield using field-scale modeling units. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 89, p. 51-61, 2012.

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water resources research**, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.

RITCHIE, J. T.; OTTER, N. S. **Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model**. Springfield, Missouri: Natl Tech Info Serv, 1985. p159-175

ROMERO, C. C.; HOOGENBOOM, G.; BAIGORRIA, G. A.; KOO, J.; GIJSMAN, A. J.; WOOD, S. Reanalysis of a global soil database for crop and environmental modeling. **Environmental Modelling & Software**, v. 35, p. 163-170, 2012.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J.; ROMBERGER, J. S.; PAPENDICK, R. I. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 1031-1036, 1986.

SINCLAIR, T. R.; SELIGMAN, N. G. Crop modeling: From infancy to maturity. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 5, p. 698-704, Sep-Oct 1996.

STÖCKLE, C. O.; DONATELLI, M.; NELSON, R. CropSyst, a cropping systems simulation model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 289-307, 2003.

SUPIT, I.; HOOIJER, A. A.; VAN DIEPEN, C. A.; (EDS). **System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS**. Luxembourg.: Publication EUR 15956 EN of the Office for Official Publications of the EU, 1994.

THORP, K. R.; DEJONGE, K. C.; KALEITA, A. L.; BATCHELOR, W. D.; PAZ, J. O. Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 64, n. 2, p. 276-285, 2008.

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, 2000.

TSUJI, G. Y.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; HUNT, L. A.; THORNTON, P. K. Introduction. In: TSUJI, G. Y.;UEHARA, G.;BALAS, S. (Ed.). **DSSAT version 3. A Decision Support System for Agrotechnology Transfer**. University of Hawaii. Honolulu, HI., v.1, 1994.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predictin the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 892-898, 1980.

VAN ITTERSUM, M. K.; LEFFELAAR, P. A.; VAN KEULEN, H.; KROPFF, M. J.; BASTIAANS, L.; GOUDRIAAN, J. On approaches and applications of the Wageningen crop models. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 201-234, 2003.

VEREECKEN, H.; MAES, J.; FEYEN, J.; DARIUS, P. Estimating the soilmoisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. **Soil science**, v. 148, p. 389-403, 1989.

WHITE, J. W.; HUNT, L. A.; BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; KOO, J.; KIM, S.; PORTER, C. H.; WILKENS, P. W.; HOOGENBOOM, G. Integrated description of agricultural field experiments and production: The ICASA Version 2.0 data standards. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 96, p. 1-12, 2013.

WILKENS, P. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; JONES, J. W.; URYASEV, O.; (ED). **Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. Volume 2**. DSSAT v4:Data Management and Analysis Tools. University of Hawaii, Honolulu, HI.: 2004.

WILKERSON, G. G.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J.; INGRAM, K. T.; MISHOE, J. W. MODELING SOYBEAN GROWTH FOR CROP MANAGEMENT. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 26, n. 1, p. 63-73, 1983.

WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; KINIRY, J. R.; SPANEL, D. A. EPIC crop growth model. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 32, n. 2, p. 497-511, Mar-Apr 1989.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; 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: Oceans (1978–2012)**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

CAPÍTULO 2

CALIBRAÇÃO DO MODELO CERES-MAIZE PARA HÍBRIDOS DE MILHO CULTIVADOS EM JATAÍ-GO

RESUMO

A simulação do crescimento de plantas pode ser uma ferramenta de suporte a tomada de decisões em agricultura, pois busca prever os resultados da atividade perante as mudanças climáticas e opções de manejo. O objetivo deste trabalho consiste em calibrar o modelo CERES-Maize para híbridos de milho cultivados em condição não irrigada no município de Jataí - GO. O modelo CERES-Maize foi calibrado para os híbridos Pioneer P30F53, Dow AgroSciences 2B587, Dekalb DKB390 e Pioneer P3646. Foi considerado no processo de calibração, variáveis de matéria seca de planta, produtividade e índice de área foliar. Após a calibração dos coeficientes genéticos, os resultados da simulação foram comparados com os valores experimentais das variáveis analisadas. Os intervalos de confiança obtidos com os valores experimentais foram utilizados para avaliar os modelos. O modelo simulou a produtividade dos híbridos dentro dos intervalos de confiança e foi considerado bom para prever essa variável. A simulação da matéria seca total foi superestimada para o estágio V6 dos híbridos, mas obteve um bom ajuste em outros estádios, com algumas exceções. O índice de área foliar foi a variável simulada com pior ajuste aos dados experimentais. Os coeficientes genéticos do modelo CERES-Maize, para os híbridos de milho analisados nesse estudo, são válidos e podem ser utilizados para simulação da produtividade em diferentes cenários.

Palavras-chave: *Zea mays*, DSSAT, coeficientes genéticos.

CERES-MAIZE MODEL CALIBRATION FOR CORN HYBRIDS CULTIVATED IN JATAÍ-GO

ABSTRACT

The crop simulation models can be a support tool for decision making in agriculture. These models can predict results in the face of climate change and effects of different management practices. The objective of this work is to calibrate the CERES-Maize model for

corn hybrids cultivated in non-irrigated condition in the municipality of Jataí - GO. The CERES-Maize model was calibrated for hybrids, Pioneer 30F53, Dow AgroSciences 2B587, Dekalb DKB390 and Pioneer 3646. In the calibration process, it was considered the variables related to plant dry matter, yield and leaf area index. After calibration of genetic coefficients, the simulation results were compared to the experimental values of the variables. The confidence intervals, obtained with experimental values, were used to evaluate the models. The model simulated the hybrids yield within the confidence intervals and it was considered good to predict this variable. The simulation of the total dry matter was overestimated for the V6 stage, but gets a good fit in other stages with some exceptions. The leaf area index was simulated with the worst adjustment to the experimental data. Genetic coefficients of the CERES-Maize model for corn hybrids analyzed in this study are valid and they can be used for simulating yield in different scenarios.

Keywords: *Zea mays*, DSSAT, genetic coefficients.

2.1 INTRODUÇÃO

O milho é um dos cereais mais importantes cultivados no mundo devido à sua utilização na alimentação humana e animal. Nos últimos anos, esta cultura ganhou destaque no cenário agrícola brasileiro devido, principalmente, ao aumento da produtividade e do volume de grãos destinados à exportação (PINAZZA, 2007).

Na região Centro-Oeste do Brasil o milho é cultivado em grande escala devido às condições climáticas favoráveis que possibilita a sucessão de culturas, favorecendo a sustentabilidade do sistema de produção. A importância econômica da semeadura de milho é comprovada por dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), que registrou uma produtividade média de 7.633 kg por hectare no estado de Goiás para a safra 12/13. Essa produtividade foi 33% maior que a média nacional na mesma safra (CONAB, 2013). Dentre os cereais cultivados no Brasil, o milho é o mais expressivo, com cerca de 81 milhões de toneladas de grãos produzidos, em uma área de aproximadamente 15.821,9 mil hectares, referente às duas safras do ano agrícola (CONAB, 2013).

A agricultura envolve fatores socioeconômicos e ambientais cuja análise pode reduzir os riscos da atividade. Para tomar decisões mais seguras torna-se necessário a aquisição e o uso adequado de informações de qualidade. Segundo Jones et al. (2003), as informações

obtidas por meio da experimentação agrônômica tradicional envolvem custos e tempo, tornando onerosas algumas investigações. O aprimoramento da modelagem de culturas deve auxiliar a aquisição e o processamento dessas informações de forma rápida, confiável e a baixo custo.

A modelagem matemática é capaz de simular o comportamento do sistema de cultivo de forma global, pois envolve os processos que ocorrem no solo, nas plantas e na atmosfera (ADAM et al., 2012; LU et al., 2010). Assim, essas técnicas permitem que experimentos virtuais possam avaliar as interações de muitas variáveis de forma simultânea.

Antes de aplicar os modelos de crescimento de planta, deve-se avaliar sua precisão e sendo necessário, calibrar os coeficientes de seus parâmetros. Para realizar essa operação são necessários dados reais de algumas das variáveis de saída do modelo. Esses modelos são concebidos para estimar variáveis de rendimento como produção de matéria seca, produtividade de grãos e outros. Entretanto, variáveis como a estimativa do índice de área foliar também podem ser utilizadas para avaliá-los (JÉGO et al., 2012).

Entre os programas computacionais existentes para modelagem de culturas, pode ser citado o Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT), que foi concebido para simular o crescimento e a produtividade de culturas sobre uma área uniforme da terra. O DSSAT também simula as alterações que ocorrem no sistema de cultivo ao longo do tempo para água, carbono e nitrogênio no solo. Esse sistema tem sido usado por pesquisadores de todo o mundo e inclui modelos para as principais culturas (JONES et al., 2003). Para simulações utilizando a cultura do milho o DSSAT apresenta o modelo CERES-Maize. O objetivo desse trabalho consiste em calibrar os coeficientes genéticos do modelo CERES-Maize, para quatro híbridos de milho cultivados no município de Jataí – GO, Brasil.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Caracterização da área experimental

O trabalho foi conduzido na safra de 2013/2014 na área experimental da Universidade Federal de Goiás – Regional Jataí. O município de Jataí está localizado na microrregião do Sudoeste Goiano e a Universidade se encontra nas coordenadas 17°55'S e 52°43' W, com altitude de 662 m, temperatura média de 23,7 °C e precipitação média anual de 1652 mm, segundo dados da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, no período de 1979 a 2013. A Figura 1 apresenta as condições meteorológicas durante a condução do experimento.

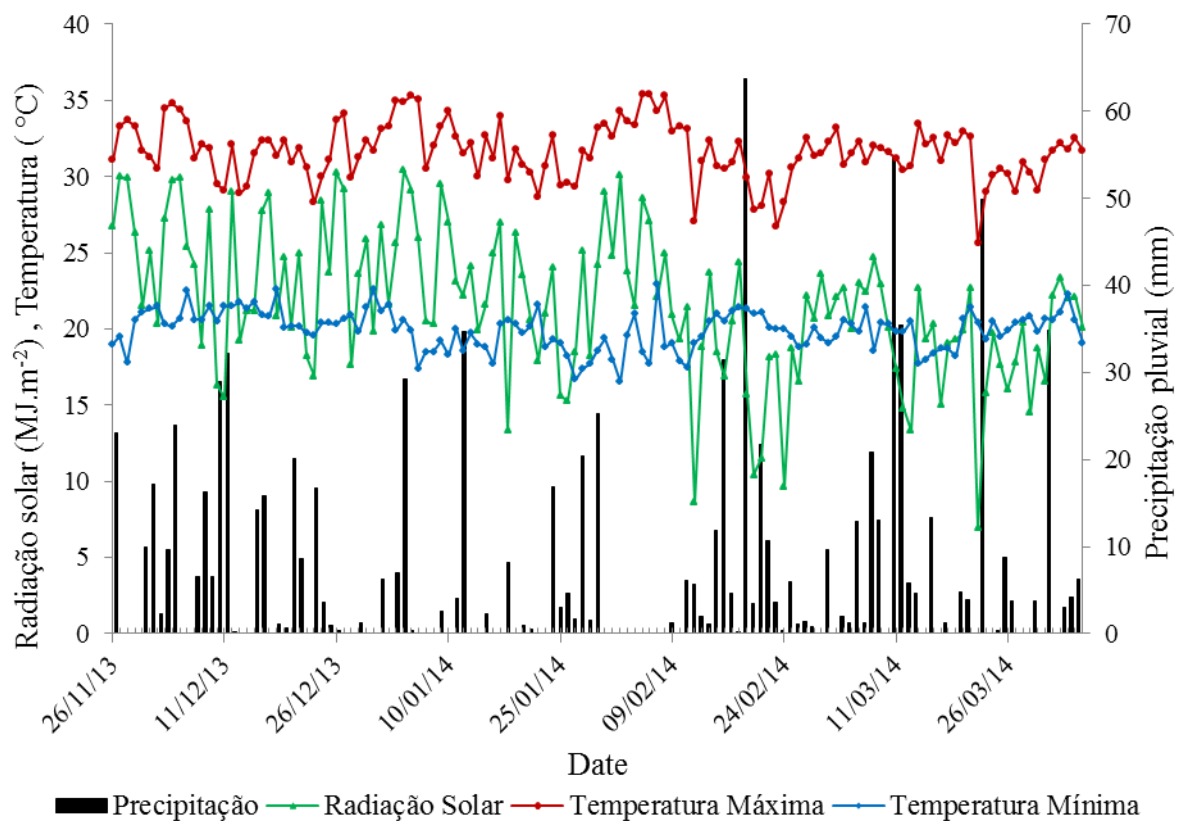


Figura 1: Dados meteorológicos registrados durante o período de condução do experimento.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico (EMBRAPA, 1999). A correspondência internacional é Rhodic Ferralsol segundo a classificação da FAO, e Rhodic Oxisols segundo a classificação Americana (MICHÉLI et al., 2006). A textura é composta por 58,5% de argila, 17,5% de silte e 24,0% de areia total, sendo classificado como de textura argilosa (EMBRAPA, 1999). A área experimental foi ocupada nos anos anteriores pela sucessão soja/milho no sistema de plantio direto. A análise de solo é apresentada na Tabela 1 para caracterização química da área experimental.

Tabela 1. Caracterização química da área experimental na camada de 0 a 0,20 m do perfil do solo

pH CaCl ₂	Ca	Mg cmol ^c dm ³	Al	K	P mg dm ⁻³	CTC cmol ^c dm ³	V %	MO g dm ⁻³
5	2,11	0,61	0,13	0,1	11	8,3	34	41,3

pH - potencial hidrogeniônico; Ca - cálcio; Mg - magnésio; Al - alumínio; K - potássio; P - fósforo, extrator Mehlich1; CTC - capacidade de troca catiônica; V - Saturação por bases ; MO - matéria orgânica.

2.2.2 Operações de manejo

O preparo do solo foi realizado com grade aradora. Após a passagem da grade aradora foi feita a calagem. A dose aplicada foi de 4 t ha⁻¹ de um calcário com PRNT

estimado em 60%, com o intuito de elevar a saturação por bases para 60%. Após essa operação utilizou-se uma grade niveladora/destorroadora, com a finalidade de incorporar o calcário e nivelar a superfície. O preparo do solo e a calagem foram realizados no início do período chuvoso. O manejo da fertilidade foi realizado conforme o recomendado pela 5ª Aproximação, para obter elevadas produtividades na cultura do milho (ALVES et al., 1999). A adubação utilizada na semeadura foi 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 90 kg ha⁻¹ de K₂O. A operação de adubação de plantio foi realizada antes da semeadura com uma máquina semeadora/adubadora com linhas espaçadas de 0,45 m, cuja distribuição de sementes foi desativada. Isso para que fosse possível realizar a semeadura manualmente. Para garantir a população recomendada foram semeadas duas sementes por cova e alguns dias após a germinação foi realizado o desbaste das plantas excedentes, deixando-se apenas o número de plantas necessário para garantir as populações esperadas. Passados 20 dias após a semeadura foi realizada a adubação de cobertura com 160 kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia protegida aplicada a lanço.

Os tratos culturais foram realizados de forma preventiva, para evitar perdas pela competição da cultura com plantas daninhas e danos causados por pragas. As aplicações de produtos fitossanitários iniciaram-se em 10 dias após o plantio, com aplicação dos herbicidas de pós-emergência, Atrazina Nortox 500 Sc (Atrazina), na dose 3 L ha⁻¹, e Sanson 40 Sc (Nicosulfuron), na dose de 1,5 L ha⁻¹. Em 19 dias após o plantio aplicou-se o inseticida não sistêmico de origem biológica, Tracer (Espinósinas) para o controle de *Spodoptera frugiperda* na dose de 0,1 L ha⁻¹, com um pulverizador costal. Em 31 dias após o plantio, foi realizado mais uma aplicação do inseticida biológico Tracer, na dose de 0,1 L ha⁻¹ para prevenir infestação com a lagarta *Helicoverpa armigera*. Nesse mesmo dia, realizou-se nova aplicação dos herbicidas de pós-emergência, Atrazina Nortox 500 Sc na dose 3 L ha⁻¹ e de Sanson 40 Sc na dose de 1,5 L ha⁻¹. Esta aplicação foi feita em jato dirigido utilizando pulverizador costal, visto que o milho já se encontrava em estágio fenológico de baixa tolerância ao Nicosulfuron. Com essa aplicação de herbicida, evitou-se problemas de competição do milho com plantas daninhas. Não houve aplicação de fungicidas para prevenção de doenças de final de ciclo.

2.2.3 Caracterização dos híbridos de milho

Os híbridos utilizados para calibração foram P30F53, 2B587, DKB390 e P3646. Cada híbrido foi plantado com a população recomendada pela EMBRAPA Milho e Sorgo (CRUZ et al., 2013). A população de 80 mil plantas ha⁻¹ foi utilizada para o híbrido P30F53, 70 mil plantas ha⁻¹ para o híbrido 2B587 e 65 mil plantas ha⁻¹ para os híbridos DKB390 e P3646. Os híbridos são caracterizados na Tabela 2.

Tabela 2: Características dos híbridos de milho utilizados no experimento

Híbridos	Base Genética	Ciclo	Porte	Empresa
P30F53	Híbrido Simples	Precoce	Médio	Pioneer
2B587	Híbrido Simples	Precoce	Baixo	Dow
DKB390	Híbrido Simples	Precoce	Médio	Monsanto
P3646	Híbrido Simples	Precoce	Médio	Pioneer

Fonte: Adaptado de Cruz et al. (2013)

2.2.4 Caracterização do experimento

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com quatro tratamentos e quatro repetições. As parcelas apresentaram 10 m de comprimento e 10 linhas de plantio espaçadas de 0,45 m. A parcela experimental foi dividida em três áreas de amostragem (Figura 2). Uma área de amostragem foi destinada à coleta de amostras destrutivas para análise de matéria seca durante o ciclo de cultivo. Cada uma das amostras destrutivas foi realizada coletando-se seis plantas em sequência. As amostras seguintes foram realizadas a uma distância mínima de 1 m da amostra anterior. Isso para evitar a influência da abertura do dossel na incidência de radiação solar. Outra área foi destinada a amostragens não destrutivas, tais como as avaliações do estágio fenológico, onde o trânsito de pessoas pode comprometer a integridade das folhas na entrelinha. Uma última área foi destinada à avaliação final de produtividade durante a colheita. A primeira e a última linha da parcela foram descartadas como bordadura, assim como as linhas de plantio entre as três áreas de amostragem. Essa metodologia foi adaptada Ogoshi et al. (1999).

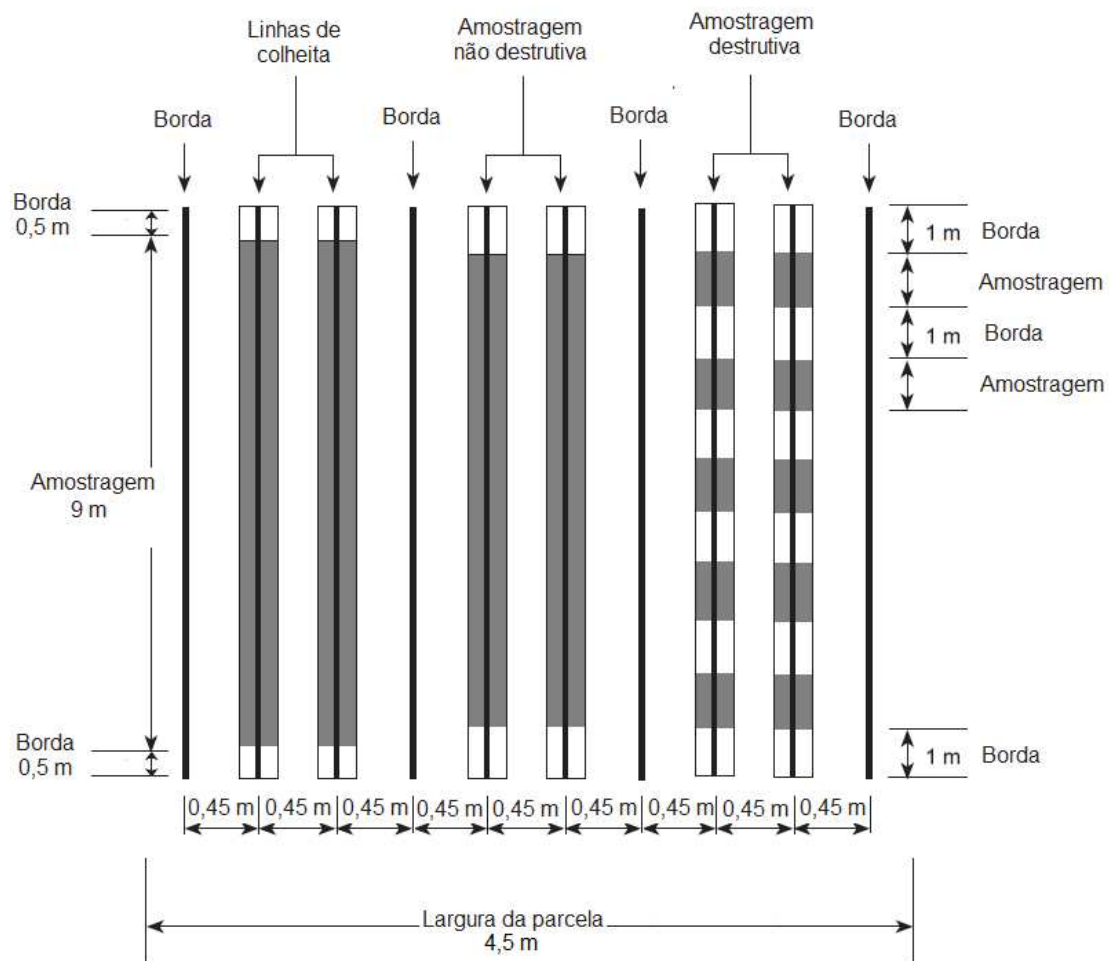


Figura 2: Diagrama da parcela experimental utilizada no processo de calibração.

2.2.5 Variáveis analisadas

As avaliações dos componentes de matéria seca da parte aérea foram realizadas nos estádios fenológicos V6 (seis folhas), R1 (antese) e R6 (maturidade fisiológica). As plantas coletadas em cada amostragem foram segmentadas em folhas (limbo + bainha), colmo, grãos e demais estruturas necessárias para o cálculo da matéria seca total. Em seguida foram secas em estufa de ventilação forçada a temperatura de 60 °C, até atingirem massa constante. Para avaliar a área foliar e o índice de área foliar, foram utilizadas três plantas, nas quais foram medidas a largura e o comprimento de todas as folhas verdes. O cálculo da área foliar foi feito com a utilização da Equação 1, e o índice de área foliar foi determinado pelo cálculo da razão entre a área foliar e área disponível para cada planta (SOLER, 2004).

$$AF = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i L_i k)}{N} \quad \text{Eq (1)}$$

em que,

AF	=	Área foliar (cm ²)
C	=	Comprimento da folha (cm),
L	=	Largura da folha (cm)
k	=	0,75 é o fator de correção para a cultura do milho.
i	=	Folha verde
n	=	Número de Folha verde
N	=	Número de plantas

Para a calibração do modelo no programa DSSAT são necessários os dados meteorológicos, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação e radiação solar. Esses dados foram obtidos na da estação meteorológica automática instalada na Universidade Federal de Goiás – Regional Jataí, cujo banco de dados se encontra disponível gratuitamente no website do DBMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa). O programa computacional “WeatherMan” foi utilizado para criar o arquivo de clima requerido no DSSAT (HANSEN et al., 1994).

O Arquivo de solo é um componente importante, pois os modelos são sensíveis às variações de componentes hídricos. Esse arquivo foi gerado com base na análise de solo de rotina e de textura (Figura 3). As variáveis SLLL, SDUL e SSAT, representam respectivamente a umidade no ponto de murcha permanente, na capacidade de campo e a umidade de saturação do solo e foram estimadas a partir da textura e carbono orgânico, segundo proposto por Tomasella et al. (2000). Outro parâmetro importante é a distribuição de raízes, em que se seguiu o padrão adotado pelo DSSAT, (URYASEV et al., 2004). Nesse método, o fator de distribuição de raízes é 1 na camada de 0 - 0,20 m e nas demais camadas esse fator é representado por um modelo exponencial que decresce em função do centro das camadas inferiores. Esses parâmetros foram repetidos nas camadas de solo abaixo de 0,20 m. O perfil de solo considerado para o Latossolo foi de 0,50 m, seguindo a análise do trabalho de Andrade et al. (2006) que aborda a profundidades de exploração radicular do milho. As demais informações são provenientes da análise de solo na camada de 0 – 0,20 m. Apesar do programa “Sbuild” está disponível para auxílio na construção de arquivos de solo, preferiu-se editar manualmente o arquivo de texto com base em um perfil de solo já existente.

```

*JIGO140002  UFG          C          001 UFG Área experimental
@SITE          COUNTRY        LAT      LONG SCS Family
-99           Brasil         -20.150 -47.783 Latossolo vermelho distroférico
@ SCOM  SALB  SLU1  SLDR  SLRO  SLNF  SLPF  SMHB  SMPX  SMKE
R  0.14  7.64  0.40  73.00  1.00  1.00 SA001 SA001 SA001
@  SLB  SLMH  SLLL  SDUL  SSAT  SRGF  SSKS  SBDM  SLOC  SLCL  SLSI  SLCF  SLNI  SLHW  SLHB  SCEC  SADC
20   B1  0.305  0.482  0.607  1.00  -99  -99  2.41  58.50  17.50  -99  -99  5.0  -99  8.30  -99
50   B1  0.305  0.482  0.607  0.50  -99  -99  2.41  58.50  17.50  -99  -99  5.0  -99  8.30  -99

```

Figura 3: A imagem representa o arquivo de solo utilizado no experimento e sua estrutura.

O arquivo de simulação foi construído a partir do programa “Xbuild”, em que o experimento realizado no campo foi codificado na forma de um cenário a ser simulado. Esse programa permite atribuir às características de manejo e atribuir referência ao arquivo de solo e a estação meteorológica utilizada. Registrou-se a data de plantio, população de plantas e as operações de manejo como adubação e preparo solo como realizado no campo. Uma caracterização importante consiste nas opções de simulação, em que se definem os métodos utilizados nos principais processos (Quadro 1). O início da simulação foi atribuído em 60 dias antes da semeadura para estabilização do balanço de água no solo.

Quadro 1: Opções de simulação adotadas no presente trabalho

Geral	
Data de início da simulação	26/09/2013
Modelo	CERES – Maize
Opções	
Simular Água	Sim
Simular nitrogênio	Sim
Simular Simbiose	Não
Simular fósforo	Não
Simular potássio	Não
Simular aplicação de químicos	Não
Simular doenças	Não
Simular preparo do solo	Sim
CO ₂	Usar valor padrão (380 ppm)
Métodos	
Clima	Dados mensurados
Cond. Iniciais do solo	Como descritas
Evapotranspiração	Priestley - Taylor / Ritchie
Infiltração	Soil Conservation Service
Fotossíntese	Curva de resposta da fotossíntese foliar
Hidrologia	Balanço hídrico de Ritchie
Método de matéria orgânica do solo	Century (Parton)
Método de evapotranspiração	Suleiman - Ritchie
Distribuição das camadas do solo	Perfil do solo modificado
Manejo	
Plantio	Em datas relatadas
Irrigação	Não irrigado
Nitrogênio	Em datas relatadas
Alterações orgânicas	Não aplicado
Colheita	Na maturidade

No DSSAT, os resultados dos experimentos reais são anexados por dois arquivos denominados arquivo A e arquivo T. O arquivo A utiliza apenas as variáveis que resume um determinado processo, como a matéria seca total na antese (CWAA). O Arquivo T representa as variáveis dispostas em uma série temporal e necessita de uma coluna com a data de cada observação. Os arquivos A e T permitem analisar paralelamente os dados reais e os resultados da simulação. O arquivo A é requerido quando a calibração é realizada com alguns dos programas complementares como o “GenCalc” e o “GULE”, além de facilita a calibração manual. O arquivo T é necessário para a visualização das saídas do modelo na forma de séries temporais, com o uso do programa gráfico “Graphical Display”. O Arquivo T também permite o cálculo de estatísticas importantes como o índice de concordância proposto por Willmott et al. (1985), denominado como índice d, o coeficiente de determinação r^2 e a raiz

do erro quadrático médio REQM. Nesse trabalho, os arquivos A e T foram criados com o auxílio do programa “Experimental Data” disponível em conjunto com o DSSAT. Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os formatos do arquivo A e T utilizados nesse trabalho.

```
*EXP. DATA (A): JIG01401MZ My Maize experiment time course (A) data
!
@TRNO   TNAM   CWAM   CWAA   HWAM   HIAM   ADAT   MDAT   LAIX
  1 P30F5 23180 8966 10919 0.471   22    91   6.29
  2 2B587 22597 8849 11174 0.494   20    73   5.38
  3 DKB39 22103 9890 11291 0.511   20    94   5.03
  4 P3646 20004 8628 10438 0.522   21    95   5.43
```

Figura 4: Representação do arquivo A, utilizado para calibração.

```
*EXP. DATA (T): JIG01401MZ My Maize experiment observed (T) data
!
@TRNO   DATE   CWAD   GWAD   LWAD   SWAD   LAID
  1 13352 1240   -99   -99   -99 0.383
  2 13354 1195   -99   -99   -99 0.495
  3 13352 1023   -99   -99   -99 0.465
  4 13352 1029   -99   -99   -99 0.394
  1 14022 8966   -99  4320  3553 6.293
  2 14020 8849   -99  3932  3103 5.378
  3 14020 9890   -99  4360  3954 5.025
  4 14021 8628   -99  4025  3358 5.426
  1 14091 23180 10919 3380  5978 0.686
  2 14073 22597 11174  3703  4633 1.476
  3 14094 22103 11291  3565  4210 0.596
  4 14095 20004 10438  3157  3451 0.146
```

Figura 5: Representação do arquivo T utilizado para calibração.

A calibração dos coeficientes genéticos foi realizada de forma manual, alterando seus valores no arquivo de cultura MZCER045.CUL. No Quadro 2, são apresentados os coeficientes genéticos ajustados para a cultura do milho. Foi criada uma referência no arquivo de cultivar para cada um dos quatro híbridos a partir de cultivares existentes na lista. A simulação foi feita no modo de análise de sensibilidade, que permitiu uma rápida análise dos principais resultados e a repetição da simulação o quanto necessário. O arquivo de cultivar foi aberto paralelamente à janela do modo de análise de sensibilidade, permitindo a alteração e avaliação dos resultados. Ajustou-se, primeiramente, os coeficientes P1, PHINT e P5, que definem a data de antese, a maturidade fisiológica e a matéria seca no estágio vegetativo, respectivamente. Em seguida ajustou-se os coeficientes G2 e G3, que definem a produtividade de matéria seca de grãos. O Coeficiente P2 foi considerado zero pois sua alteração não apresentou efeito nos resultados da simulação.

Quadro 2: Coeficientes genéticos presentes no arquivo de cultivar do DSSAT para o milho

COEFICIENTES	DEFINIÇÕES
VAR#	Código para identificação ou número para uma cultivar específica.
VAR-NAME	Nome da cultivar.
EXPNO	Número de experimentos usados para estimar os parâmetros das cultivares.
ECO#	Código de ecótipo da cultivar, aponta para o ecótipo no arquivo ECO.
P1	Tempo térmico de emergência das plântulas até o fim da fase juvenil (expresso em graus-dia acima de uma temperatura base de 8 °C) durante o qual a planta não é sensível às mudanças no fotoperíodo.
P2	Até que ponto a evolução (expresso em dias) é adiada para cada aumento de hora em fotoperíodo, acima do fotoperíodo mais longo em que o desenvolvimento avança a uma taxa máxima (que é considerado como sendo 12,5 horas).
P5	O tempo térmico do pendoamento à maturação fisiológica (expresso em graus-dia acima de uma temperatura base de 8 °C).
G2	Número máximo possível de grãos por planta.
G3	Taxa linear de enchimento de grãos, sob condições ótimas (mg dia^{-1}).
PHINT	Intervalo filocromático; o intervalo de tempo térmico (graus-dias) entre as sucessivas aparições das folhas.

Fonte: Adaptado do Manual de uso do programa DSSAT.

Como o número de amostras na série temporal foi pequena, os índices d e o REQM podem não ser suficientes para avaliar a resposta preditiva dos modelos. Assim, os valores simulados foram comparados com o intervalo de confiança das variáveis amostradas gerados com base na distribuição t de Student no intervalo de 95% de probabilidade, e quatro repetições. Assim, o valor simulado que estiver dentro do intervalo de confiança não difere significativamente da média dos valores observados. As diferenças entre os híbridos de milho foram avaliadas por meio da análise de variância e teste de Tukey a 5%.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No período de condução do experimento foi registrado temperatura média do ar de 25,8 °C, radiação solar média de 21,6 MJ $\text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e uma precipitação total de 905 mm. A cultura do milho de ciclo médio necessita de uma lâmina mínima entre 400 a 700 milímetros para completar o ciclo sem que haja prejuízo à produção (ANDRADE et al., 2006). Portanto, a precipitação acumulada no período foi suficiente para não restringir o desenvolvimento das plantas.

A emergência das plantas foi de cinco dias após a semeadura para todos os híbridos (Tabela 3). Isso evidencia as boas condições de umidade do solo nos dias que seguiram a semeadura. Os híbridos iniciaram os estádios V6 e R1 em datas semelhantes, com variações que não ultrapassaram dois dias. Os ciclos de vida dos híbridos foram definidos principalmente no intervalo entre a antese e a maturidade fisiológica. Nesse período ocorre o enchimento de grãos e as plantas estão sujeitas a doenças de final de ciclo que pode interferir na permanência das folhas verdes. O híbrido mais precoce foi o 2B587 com ciclo de vida de 108 dias após a semeadura.

Tabela 3: Acompanhamento do estágio fenológico da cultura do milho

Híbridos	VE		V6		R1		R6	
	Data	DAS	Data	DAS	Data	DAS	Data	DAS
P30F53	01/12/13	5	18/12/13	22	22/01/14	57	01/04/14	126
2B587	01/12/13	5	20/12/13	24	20/01/14	55	14/03/14	108
DKB390	01/12/13	5	18/12/13	22	20/01/14	55	04/04/14	129
P3646	01/12/13	5	18/12/13	22	21/01/14	56	05/04/14	130

VE: Emergência de plântulas; V6: sexta folha completamente desenvolvida; R1: florescimento e fecundação; R6: maturidade fisiológica; DAS: dias após a semeadura.

Diferentemente dos modelos para culturas como soja ou feijão, o modelo CERES-Maize apresenta apenas seis coeficientes que representam dois grupos de processos, desenvolvimento fenológico e acúmulo de matéria seca do milho. Isso torna a calibração de cultivares de milho bastante simples, podendo ser feita manualmente, com qualidade. Além disso, Grossi (2012) após a utilização do programa “GLUE” para calibração de cultivares de sorgo, relata a necessidade de ajuste manual, para melhorar a capacidade preditiva do modelo. Na Tabela 4, são apresentados os coeficientes genéticos para os híbridos de milho avaliados neste trabalho. A variação do tempo térmico da germinação à antese (P1) foi baixa entre os materiais, o que é justificado pela proximidade das datas de antese (R1) apresentadas. O tempo térmico da antese à maturidade fisiológica apresentou como destaque o híbrido 2B587, que devido ao seu ciclo inferior aos demais híbridos apresentou o coeficiente P5 também bastante reduzido em relação aos demais. O coeficiente P2 varia de 0 a 1 e representa a sensibilidade ao fotoperíodo (HOOGENBOOM et al., 2010). O coeficiente P2 foi considerado zero, pois sua alteração não influenciou os resultados dos modelos para a região no plantio de verão. O ajuste do coeficiente PHINT foi determinante para o número de folhas e variáveis associadas como o IAF, matéria seca de folhas, matéria seca na antese e na data até antese. O coeficiente G2 não foi ajustado por tentativas, atribuiu-se o número médio de grãos por espiga observado. Pela definição de G2, recomenda-se que este seja o valor observado do número de

grãos por espiga, em condições de elevado potencial de produtividade. Isso porque, em simulações com populações reduzidas, o número de grãos por espiga poderá ser limitado se a calibração considerar apenas o requerido em experimentos com populações mais densas. Já o coeficiente G3 foi ajustado para que a produtividade de grãos estimada se aproxime da produtividade real. O híbrido 2B587 apresentou maior taxa de enchimento de grãos G3, que é justificável pois obteve produtividade equiparada aos demais híbridos, mesmo com menor período para enchimento de grãos.

Tabela 4: Coeficientes genéticos ajustados para quatro híbridos de milho cultivados em Jataí-GO

Híbridos	P1 Graus dia	P2 Dias	P5 Graus dia	G2 Grãos planta ⁻¹	G3 mg dia ⁻¹	PHINT Graus dia
P30F53	257,0	0	1210	552,0	8,360	52,90
2B587	239,9	0	930	560,0	12,620	46,78
DKB390	258,0	0	1290	555,5	8,482	40,10
P3646	257,5	0	1299	541,0	8,178	47,54

O IAF foi o atributo como maior dificuldade de ajuste. Em todos os híbridos, o IAF foi maior que o simulado em R1 e menor que o simulado em V6 e R6. O trabalho de Soler (2004) apresentou um bom ajuste para o IAF, utilizando o mesmo método de análise e com maior número de observações durante o ciclo de vida do milho. A matéria seca total em V6 também foi menor que a observada para os quatro híbridos. Esse resultado sugere imprecisão do modelo em prever o acúmulo de matéria seca nos estádios iniciais de crescimento do milho (Figura 6, 7, 8 e 9).

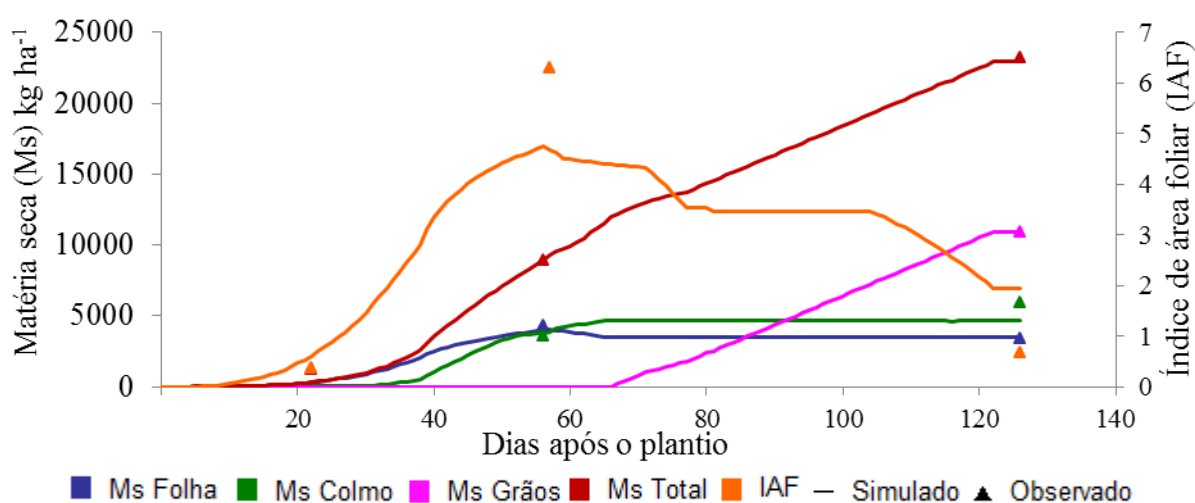


Figura 6: Simulação após a calibração dos coeficientes genéticos do híbrido P30F53.

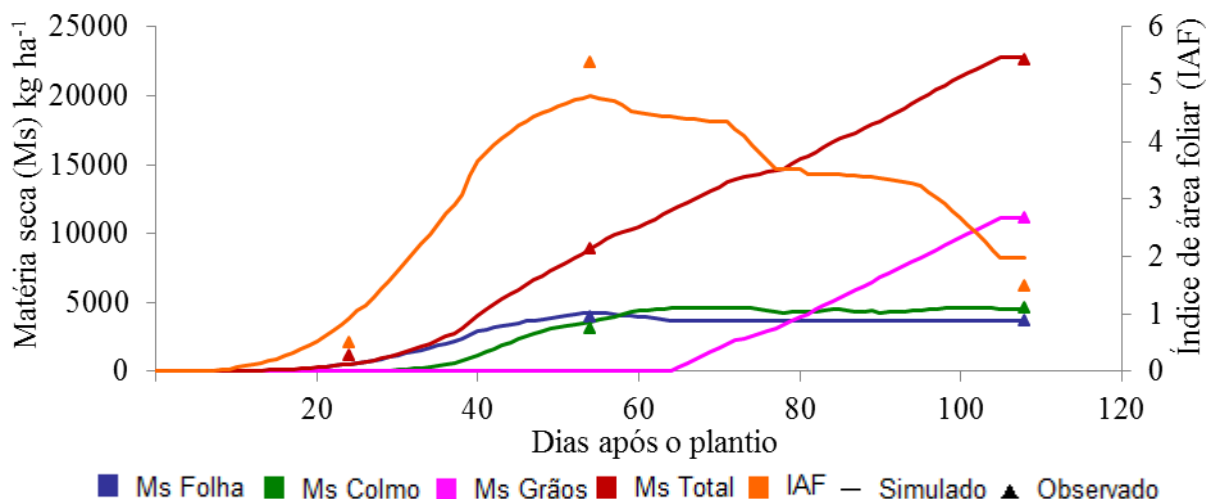


Figura 7: Simulação após a calibração dos coeficientes genéticos do híbrido 2B587.

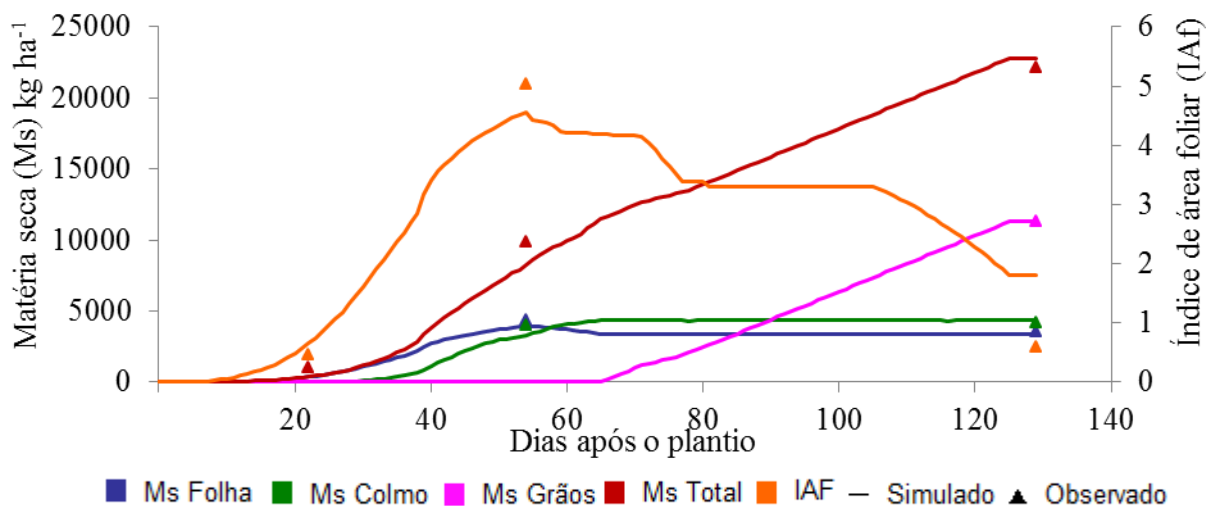


Figura 8: Simulação após a calibração dos coeficientes genéticos do híbrido DKB390.

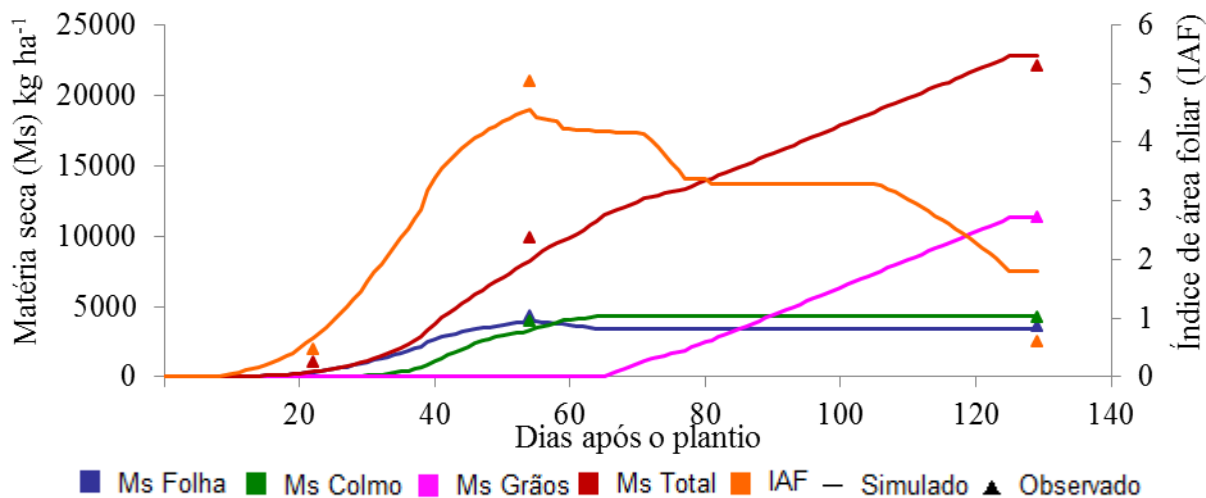


Figura 9: Simulação após a calibração dos coeficientes genéticos do híbrido P3646.

O arquivo T, em que se atribuí os resultados reais na forma de séries temporais permite ao programa “Graphical Display” (URYASEV et al., 2004), gerar os gráficos das séries temporais e as estatísticas como RMQE e o índice d (Tabela 5). Para o IAF e matéria seca total, o índice foi gerado com de três observações. Para matéria seca de folhas e matéria seca de colmos foram utilizadas duas observações. Analisando o REQM e o índice d, pode se concluir que a calibração dos modelos foi satisfatória. O IAF apresentou o índice d próximo de 1. Esse valor indica que o modelo apresentou uma boa concordância em relação aos dados reais. Uma boa concordância também para a matéria seca total foi observada em todos os híbridos. O híbrido DKB390 apresentou baixo valor do índice d para matéria seca de folhas e de colmo. Assim como o híbrido P3646 apresentou baixo valor do índice d para a matéria seca de colmo.

Tabela 5: Análise do índice d de Wilmott e a raiz do erro quadrático médio (REQM), para o índice de área foliar e variáveis de matéria seca (Ms) em kg ha⁻¹

Variáveis	P30F53		2B587		DKB390		P3646	
	REQM	d	REQM	d	REQM	d	REQM	d
LAI	1,20	0,93	0,52	0,98	1,01	0,94	1,17	0,91
Ms Folha	234	0,90	215	0,73	859	0,57	180	0,93
Ms Colmo	928	0,71	475	0,84	489	0,50	591	0,19
Ms Total	575	0,99	456	0,99	1333	0,99	1023	0,99

Os modelos foram válidos para estimar a variável matéria seca de folha, pois todos os valores simulados estiveram entre o intervalo de confiança da média dos valores experimentais, exceto para o híbrido DKB390 em R1 (Tabela 6). Em R1 as médias da matéria seca de folhas dos híbridos não diferiram significativamente. Em R6, a maior matéria seca ocorreu no 2B587 que diferiu da menor matéria seca do híbrido P3646. É importante ressaltar que o 2B587 foi o mais precoce e o P3646, mais tardio.

Tabela 6: Avaliação da matéria seca de folhas no estágio R1 e R6, em kg ha⁻¹

Híbridos	MS Folha R1			MS Folha R6		
	Observado	IC	Simulado	Observado	IC	Simulado
P30F53	4320 a	± 434	4042	3380 ab	± 540	3464
2B587	3932 a	± 598	4278	3703 a	± 216	3695
DKB390	4360 a	± 279	3981 *	3565 ab	± 304	3368
P3646	4025 a	± 402	3943	3157 b	± 360	3379
CV (%)	7,6			6,6		

As médias, na coluna, seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; CV – coeficiente de variação da análise de variância. * – O valor simulado difere significativamente da média dos valores observados pelo intervalo de confiança; IC – Intervalo de confiança da média à 95% de probabilidade; MS – Matéria seca.

Em R6, o modelo não apresentou uma predição acertada para a matéria seca de colmo em relação ao híbrido P3646 (Tabela 7). O híbrido P30F53 apresentou maior matéria seca de colmo, que diferiu significativamente dos híbridos DKB390 e P3646. Plantas de milho com colmos mais vigorosos são menos suscetíveis ao acamamento induzido por ventos fortes e são mais propícios a populações mais adensadas, como a do híbrido P30F53 que teve 80 mil plantas ha⁻¹. Em R1, o modelo simulou a quantidade de matéria seca dentro do intervalo de confiança obtido experimentalmente para os híbridos P30F53, 2B587 e P3646. O híbrido 2B587 teve a menor matéria seca de colmo que foi significativamente diferente do híbrido DKB390. O resultado da simulação foi subestimado para a matéria seca de colmo do híbrido DKB390, pois foi abaixo do intervalo de confiança inferior.

Tabela 7: Avaliação da matéria seca de colmo no estádio R1 e R6, em kg ha⁻¹

Híbridos	MS Como R1			MS Colmo R6		
	Observado	IC	Simulado	Observado	IC	Simulado
P30F53	3553 ab	± 397	3759	5978 a	± 2270	4708
2B587	3103 b	± 547	3599	4633 ab	± 553	4545
DKB390	3954 a	± 363	3297 *	4210 b	± 168	4352
P3646	3358 ab	± 385	3375	3451 b	± 663	4274 *
CV (%)	8,7			15,8		

As médias, na coluna, seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; CV – coeficiente de variação da análise de variância. * – O valor simulado difere significativamente da média dos valores observados pelo intervalo de confiança; IC – Intervalo de confiança da média à 95% de probabilidade; MS – Matéria seca.

A matéria seca total é variável importante para predição, pois representa o vigor da planta no estádio vegetativo. Na colheita a informação de massa total é importante quando se tem interesse em ciclagem, ou a extração de nutrientes durante o ciclo que voltará ao solo pela decomposição da cobertura vegetal. Na fase V6, não houve acerto dos modelos de crescimento de planta para os híbridos (Tabela 8). Nas demais análises em R1 e R6, o modelo foi bom preditor, exceto para o híbrido DKB390 em R1. A matéria seca total representa variável de difícil ajuste, pois depende indiretamente de outras variáveis de matéria seca. Os coeficientes genéticos atuam de forma conjunta e a alteração de um coeficiente altera o conjunto como um todo. Dessa forma, ao alterar os coeficientes genéticos para ajustar os resultados de uma variável, pode piorar a predição de outras. Os valores simulados de matéria seca total em V6 foram todos subestimados em relação aos dados reais. Os coeficientes genéticos que podem influenciar a matéria seca nesse estádio são o PHNIT e P1. Entretanto, ao alterar esses coeficientes para obter um bom ajuste da matéria seca total em V6, os valores simulados para a data de antese e o IAF seria muito diferente do observado

experimentalmente. Com relação às diferenças entre os híbridos, apenas em V6 o P30F53 se destacou como mais vigoroso em relação ao P3646 que obteve menor acúmulo de matéria seca nesse período.

Tabela 8: Análise de matéria seca total entre os híbridos e os valores simulado, em kg ha⁻¹

Híbridos	MS Total V6			MS Total R1			MS Total R6		
	Obs	IC	Sim	Obs	IC	Sim	Obs	IC	Sim
P30F53	1240 a	± 127	324 *	8967 a	± 941	8970	23180 a	± 4585	22925
2B587	1196 ab	± 178	547 *	8849 a	± 1690	8852	22597 a	± 1197	22800
DKB390	1073 ab	± 202	369 *	9891 a	± 773	8236 *	22103 a	± 936	22769
P3646	1029 b	± 45	355 *	8629 a	± 802	8351	20004 a	± 2370	21641
CV (%)	7,4			8,3			8,3		

As médias, na coluna, seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; Obs – média dos valores observados; Sim – Valor simulado; CV – coeficiente de variação da análise de variância. * – O valor simulado difere significativamente da média dos valores observados pelo intervalo de confiança; IC – Intervalo de confiança da média à 95% de probabilidade; MS – Matéria seca.

Em relação ao IAF o modelo simulou valores dentro do intervalo de confiança apenas para os híbridos 2B587 e P3646 no estágio R1 (Tabela 9). Apesar de o índice de concordância ter ficado próximo de 1, os intervalos de confiança do IAF foram relativamente curtos, indica pouca variação entre as repetições de cada híbrido. É possível que a falta de precisão nas predições seja devido à forma de cálculo do índice. Em V6, a média dos IAF não diferiu significativamente entre os híbridos. Em R1, o P30F53 apresentou maior IAF em relação aos demais híbridos. Possivelmente esse resultado seja devido à população de plantas desse híbrido ser maior que a das demais. Isso influencia a estimativa do IAF, pois a área disponível para cada planta é menor nessa situação.

Tabela 9: Avaliação dos modelos por meio do intervalo de confiança e comparação dos híbridos pelo teste Tukey a 5%, para o Índice de Área Foliar (IAF)

Híbridos	IAF V6			IAF R1			IAF R6		
	Obs	IC	Sim	Obs	IC	Sim	Obs	IC	Sim
P30F53	0,38 a	± 0,07	0,61 *	6,29 a	± 0,15	4,75 *	0,69 b	± 0,44	1,95 *
2B587	0,50 a	± 0,21	0,92 *	5,38 b	± 0,67	4,81	1,48 a	± 0,26	1,97 *
DKB390	0,46 a	± 0,05	0,66 *	5,03 b	± 0,14	4,56 *	0,60 b	± 0,17	1,81 *
P3646	0,39 a	± 0,10	0,63 *	5,43 b	± 1,00	4,54	0,15 c	± 0,12	1,86 *
CV (%)	19,0			6,8			24,9		

As médias, na coluna, seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; Obs – média dos valores observados; Sim – Valor simulado; CV – coeficiente de variação da análise de variância. * – O valor simulado difere significativamente da média dos valores observados pelo intervalo de confiança; IC – Intervalo de confiança da média à 95% de probabilidade; IAF – Índice de Área Foliar.

Os modelos apresentaram um resultado inesperado para a variável altura de planta. A altura de planta simulada dos híbridos foi limitada a 1,6 m (Tabela 10). A comparação entre os híbridos de milho não diferiu significativamente em relação à altura média das plantas. O número de folhas por planta no estágio R1 foi obtido contando-se o número de entrenós. Magalhães e Durães (2006) relatam que entre duas a seis folhas do milho são perdidas antes do início da fase reprodutiva. O número de folhas simulado apresentou-se superior ao número de entrenós observado para todos os híbridos, com diferenças variando de 2,8 a 6,3 folhas por planta. Em R1, o híbrido P3646 foi o que apresentou o maior número médio de nós, seguido por P30F53, 2B587 e DKB390, todos diferiram estatisticamente.

Tabela 10: Avaliação dos modelos por meio do intervalo de confiança e comparação dos híbridos pelo teste Tukey a 5%, para a altura de plantas (cm) e o número de entrenó

Híbridos	Altura de planta R1			Número de nós R1		
	Observado	IC	Simulado	Observado	IC	Simulado
P30F53	228 a	± 20	160 *	15,2 b	± 0,31	18 *
2B587	214 a	± 16	160 *	14,6 c	± 0,67	20 *
DKB390	221 a	± 14	160 *	13,7 d	± 0,43	20 *
P3646	229 a	± 11	160 *	15,7 a	± 0,43	20 *
CV (%)	4,5			1,2		

As médias, na coluna, seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; CV – coeficiente de variação da análise de variância. * – O valor simulado difere significativamente da média dos valores observados pelo intervalo de confiança; IC – Intervalo de confiança da média à 95% de probabilidade;

A principal finalidade dos modelos para os estudos de impacto econômico diz respeito à predição da produtividade de grãos. Os quatro híbridos apresentaram elevada produção de matéria seca de grãos como esperado para a região quando se utiliza alto nível tecnológico. A produção média de grãos não diferiu significativamente entre os híbridos (Tabela 11). Assim como os valores simulados para a produtividade não diferiram das médias dos valores observados, segundo a análise do intervalo de confiança.

Tabela 11: Avaliação dos modelos por meio do intervalo de confiança e comparação dos híbridos pelo teste Tukey a 5%, para matéria seca de grãos, em kg ha⁻¹

Híbridos	MS Grãos R6		
	Observado	IC	Simulado
P30F53	10919 a	± 1856	10925
2B587	11175 a	± 732	11170
DKB390	11291 a	± 303	11292
P3646	10438 a	± 1452	10433
CV (%)	8,0		

As médias, na coluna, seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; CV – coeficiente de variação da análise de variância. * – O valor simulado difere significativamente da média dos valores observados pelo intervalo de confiança; IC – Intervalo de confiança da média à 95% de probabilidade; MS – Matéria seca.

A maior parte das variáveis analisadas apresentou boa concordância entre os valores simulados e observados, expressa pelo índice de concordância e pela análise do intervalo de confiança. Esse resultado demonstra que a calibração dos coeficientes genéticos resultou em simulações confiáveis e válidas para a região. Além disso, os modelos com os coeficientes genéticos calibrados foram capazes de simular as elevadas produtividades que se obtém para a cultura do milho na região.

2.4 CONCLUSÕES

Os coeficientes genéticos do modelo CERES-Maize, foram calibrados para os quatro híbridos de milho utilizados nesse trabalho. Os resultados da simulação com estes coeficientes genéticos são confiáveis para prever o desenvolvimento fenológico e a produtividade de grãos.

2.5 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro. À Universidade Federal de Viçosa – UFV e à Universidade Federal de Goiás, Regional Jataí – UFG que possibilitaram a realização desse trabalho.

2.6 LITERATURA CITADA

ADAM, M.; BELHOUCLETTE, H.; CORBEELS, M.; EWERT, F.; PERRIN, A.; CASELLAS, E.; CELETTE, F.; WERY, J. Protocol to support model selection and evaluation in a modular crop modelling framework: An application for simulating crop response to nitrogen supply. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 86, p. 43-54, 2012.

ALVES, V. M. C.; VASCONCELLOS, C. A.; FREIRE, F. M.; PITTA, G. V. E.; FRANÇA, G. E. D.; FILHO, A. R.; ARAÚJO, J. M. D.; VIEIRA, J. R.; LOUREIRO, J. E. Milho. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa - MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. cap. 18, p.359.

ANDRADE, C. D. L. T.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; BRITO, R. A. L.; RESENDE, M. **Viabilidade e Manejo da Irrigação da Cultura do Milho**. Circular Técnica 85. Embrapa, Sete Lagoas, MG. 2006

CONAB, C. N. D. A. Segundo levantamento intenção de plantio safra 2012/2013. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. , p. 66, Janeiro 2015 2013. Disponível em: < http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_11_11_08_54_13_boletim_portugues_novembro_2013_-_ok.pdf. >.

CRUZ, J. C.; FILHO, I. A. P.; QUEIROZ, L. R. **Milho - Cultivares para 2013/2014**. 2013. Disponível em: < <http://www.cnpms.embrapa.br/milho/cultivares/> >. Acesso em: Janeiro de 2015.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 1999.

GROSSI, M. C. **CALIBRAÇÃO DO MODELO CSM-CERES-SORGHUM PARA AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**. 2012. Universidade Federal de Viçosa

HANSEN, J. W.; PICKERING, N. B.; JONES, J. W.; WELLS, C.; CHAN, H. V. K.; GODWIN, A. D. C. WeatherMan: Managing Weather and Climate Data. In: TSUJI, G. Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. (Ed.). **DSSAT v3. Vol. 3-3**. Univ. of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 1994.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; PORTER, C. H.; K.J. BOOTE; BATCHELOR, B.; HUNT, T.; GIJSMAN, A.; WILKENS, P.; SINGH, U.; BOWEN, W. Overview of DSSAT v4.5 Cropping System Model (CSM). In: HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; PORTER, C. H.; WILKENS, P. W.; BOOTE, K. J.; HUNT, L. A.; TSUJI, G. Y. (Ed.). **Decision Support**

System for Agrotechnology Transfer Version 4.5. University of Hawaii, Honolulu, HI, v.1, 2010. cap. 3, p.78.

JÉGO, G.; PATTEY, E.; LIU, J. Using Leaf Area Index, retrieved from optical imagery, in the STICS crop model for predicting yield and biomass of field crops. **Field Crops Research**, v. 131, p. 63-74, 2012.

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. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 235-265, Jan 2003.

LU, S.; GUO, X.; WEN, W.; MIAO, T.; XIAO, B. A plug-in framework for modeling plant growth. In: **Computer Modeling and Simulation, 2010. ICCMS'10. Second International Conference on. IEEE**, 2010. p.255-258.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da Produção de Milho**. Circular Técnica 76. Embrapa Sete Lagoas, MG, p.10. 2006

MICHÉLI, E.; SCHAD, P.; SPAARGAREN, O.; DENT, D.; NACHTERGAELE, F. **World reference base for soil resources: 2006: a framework for international classification, correlation and communication**. FAO, 2006.

OGOSHI, R. M.; B.G. CAGAUAN, J.; TSUJI, G. Y. Field and Laboratory Methods for the Collection of the Minimum Data Set. In: HOOGENBOOM, G.; WILKENS, P. W.; TSUJI, G. Y. (Ed.). **DSSAT version 3**. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii., v.4, 1999. cap. 8,

PINAZZA, L. A (Ed). **Cadeia produtiva do milho**. Bib. Orton IICA/CATIE, 2007. 108 p

SOLER, C. M. T. **Uso do modelo CERES-Maize para previsão de safra do milho "Safrinha"**. 2004. 146 (Doctor Scientiae). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo

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, 2000.

URYASEV, O.; GIJSMAN, A. J.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G. Soil Data Editing Program (Sbuild). In: WILKENS, P. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; JONES, J. W.; URYASEV, O. (Ed.). **Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0**. University of Hawaii, Honolulu, HI, v.2, 2004. cap. 3,

URYASEV, O.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G. Graphical Display Program (Gbuild). In: WILKENS, P. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; JONES, J. W.; URYASEV, O. (Ed.). **Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. DSSAT v4:Data Management and Analysis Tools**. University of Hawaii, Honolulu, HI, v.2, 2004. cap. 6,

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; 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: Oceans (1978–2012)**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

CAPÍTULO 3

TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS E A PRODUÇÃO DE MILHO NO MUNICÍPIO DE JATAÍ – GO

RESUMO

A produção agrícola é altamente dependente das condições climáticas. Por isso, as variáveis climáticas são levadas em consideração em estudos de aptidão agrícola de uma região. O controle ambiental pode ser realizado por meio de casas de vegetação e irrigação, mas apesar do menor risco à produção, nem sempre é economicamente viável. Além disso, mudança no clima também induz mudanças no cultivo não irrigado das culturas. Este trabalho teve como objetivo investigar a existência de tendências de mudança em variáveis meteorológicas no município de Jataí-GO e possíveis efeitos na produtividade e ciclo de vida do milho, simulada pelo modelo CERES-Maize. Foi utilizado o banco de dados meteorológicos de 35 anos, registrado pela estação convencional do Instituto Nacional de Meteorologia. Para avaliar a existência de tendência significativa realizou-se a análise não paramétrica de Mann-Kendall. O coeficiente de regressão foi utilizado para verificar a intensidade das mudanças em uma tendência significativa de aumento ou redução. Os resultados desse trabalho evidenciam a existência de tendência de aumento da temperatura, aumento da velocidade do vento e redução da umidade relativa do ar. Houve tendência significativa de redução na produtividade do milho semeado na 2ª quinzena de novembro e redução no ciclo quando semeados na 2ª quinzena de outubro e na 1ª e 2ª quinzena de novembro. As tendências observadas neste trabalho apontam para um cenário de maior demanda hídrica na agricultura da região, devido ao provável aumento da demanda evapotranspirativa, e indica alterações no ciclo de vida, que na cultura do milho é regulado pela temperatura.

Palavras-chaves: Produtividade de milho, Mudanças climáticas, Ciclo de vida do milho, CERES-Maize.

CLIMATE AND THE CORN YIELD TRENDS IN THE MUNICIPALITY OF JATAÍ-GO

ABSTRACT

The climate has great importance for agriculture because it determines the viability of crops in the regions. This is because the environmental control through irrigation houses and vegetation, despite the reduced risk for production, makes it more expensive. Thus, change in climate also induces changes in non-irrigated crops. The objective of this work was to investigate the existence of changing trends in meteorological variables in the municipality of Jataí-GO and possible effects on lifecycle and yield of corn by using the CERES-Maize model. The meteorological database of 35 years recorded by conventional station of the National Institute of Meteorology of Brazil was used. The non-parametric analysis of Mann-Kendall was used to evaluate the existence of significant trend on lifecycle and yield of corn. The coefficient of regression was used to determine the intensity of the changes in a significant trend of increase or decrease of the studied variables. The findings show the existence of increasing temperature trend, increasing wind speed and reducing relative humidity. There was a significant trend in reducing yield when corn is planted in the 2nd half of November and in reducing lifecycle when corn is planted in the 2nd half of October and during November. The trends observed in this study point to a higher water demand scenario in agriculture in the region, due to the likely increase in evapotranspiration demand, and indicates changes in crop cycles regulated by temperature as in corn.

Keywords: Corn yield, Climate changes, Life cycle of corn, CERES-Maize.

3.1 INTRODUÇÃO

O município de Jataí está localizado na microrregião do sudoeste de Goiás e tem grande importância na produção de grãos, cana-de-açúcar e pecuária do Estado. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), na safra 2012/13 o Estado de Goiás produziu 7125,7 mil toneladas de milho nas duas safras do ano e 8562,9 mil toneladas de soja (CONAB, 2013).

Fenômenos climáticos atípicos observados no Brasil nos últimos anos têm sido associados às mudanças climáticas no cenário mundial. Cita-se o exemplo da seca, chuvas

torrenciais e alagamentos, tempestades com ventos fortes e granizo, além de acidentes com descargas elétricas. Muitos desses eventos são inéditos em intensidade nas últimas décadas, em que há um registro mais acurado de dados meteorológicos. Na agricultura esses eventos extremos são causadores de perda de produtividade e uma das preocupações é se as mudanças climáticas podem aumentar a frequência e a intensidade de ocorrências desses eventos.

As tendências do clima mundial apontam para um aumento na temperatura do planeta. Esse aumento de temperatura tem sido atribuído a crescente concentração de gases causadores do efeito estufa na atmosfera, como exemplo é o gás CO₂. Uma das fontes de CO₂ atmosférico é a queima de combustíveis fósseis, mas a ocorrência de queimadas florestais e vulcões também são importantes emissores (PEDRO, 2005). Uma maior concentração de CO₂ atmosférico pode aumentar o potencial produtivo das plantas cultivadas, pois é matéria-prima para a fotossíntese e o aumento da temperatura torna o metabolismo celular mais intenso. Entretanto, o aumento de temperatura acarreta alguns inconvenientes como aumento da demanda hídrica pelas plantas e da evaporação da água do solo. A perspectiva é que às fontes de água sejam cada vez mais disputadas devido ao consumo humano e à demanda proveniente da expansão da agricultura irrigada (OLIVEIRA, 2003). O incremento de temperatura também pode aumentar a probabilidade de eventos extremos como tornados, tempestades, secas e precipitações intensas.

A análise de tendências climáticas pode ser realizada como sugerido por Wan et al. (2014). Esses autores utilizam históricos de dados climáticos de estações para avaliar a distribuição espacial de tendências climáticas e eventos extremos. O Brasil conta com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que monitoram as variáveis meteorológicas. O município de Jataí possui uma das estações meteorológicas do INMET, cujo banco de dados teve início em 1978. Essa base de dados é de acesso público e gratuito. Este trabalho teve por objetivo investigar a existência de tendências de mudança em variáveis meteorológicas no município de Jataí-GO e possíveis efeitos na produtividade e ciclo da cultura do milho, simulada pelo modelo CERES-Maize.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização do município

O município de Jataí está localizado na microrregião do Sudoeste Goiano e conta com uma estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia –

INMET. A estação se encontra na Universidade Federal de Goiás – Regional Jataí nas coordenadas geográficas 17°55'S e 52°43' W. Segundo dados da estação, a altitude no local e de 662 m, temperatura média 23,7 °C e a precipitação média anual de 1652 mm, conforme registrado no período de 1979 a 2013. O clima da região é caracterizado como Aw, segundo classificação de Köppen, com período seco definido (KÖPPEN; GEIGER, 1928)

3.2.2 Dados meteorológicos

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos de uma estação meteorológica convencional pública, disponível no website do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Os dados foram convertidos para o formato de planilha eletrônica e organizados em observações diárias. Em uma nova coluna foi criada a variável nominal “Dias sem chuva”, a partir de uma função condicional que atribui o valor 1 se a precipitação do dia for inferior a 1 mm e 0 se for superior. Em outra coluna, foi criada a variável “Intervalo de dias sem chuva”, em que, com a série ordenada temporalmente uma função condicional foi criada para contar os intervalos de dias sem chuva a partir da variável “Dias sem chuva”. Essas análises foram realizadas com o intuito de avaliar a distribuição da precipitação e a ocorrência de estiagem nos períodos chuvosos “veranicos”, pois esses eventos podem ter alto impacto na produção agrícola da região.

A ferramenta “Tabela dinâmica” foi utilizada para calcular em cada ano da série, a média das variáveis de temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar, calcular o somatório da precipitação pluvial, retornar o máximo intervalo de dias sem chuvas e contar o número de dias sem chuvas. Essas operações tiveram os meses do ano como filtro da tabela dinâmica. Assim, as variáveis foram obtidas para cada mês, em todos os anos da série temporal.

3.2.3 Simulação da produtividade e ciclo de vida do milho

A produtividade e o ciclo de vida do milho foram simulados para o híbrido Pioneer 30F53 com o modelo CERES-Maize, disponível no DSSAT (Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia). Esse híbrido teve seus coeficientes genéticos calibrados e validados por meio de dados experimentais obtidos na área da Universidade Federal de Goiás – Regional Jataí. O Banco de dados meteorológicos foi obtido da estação convencional do INMET, instalada na universidade, com base no qual se gerou o arquivo do clima necessário para simulação no DSSAT. Para construção do arquivo de solos, foram utilizadas apenas variáveis físicas e hídricas do solo exigidas para determinar a produtividade

potencial do milho. O arquivo de solo contempla o mesmo solo utilizado no processo de calibração do modelo.

Foi realizada a simulação do cultivo do milho em todas as datas de semeadura dos meses de outubro, novembro, janeiro e fevereiro. A simulação foi repetida para os 35 anos da série histórica de dados meteorológicos registrados. Para a análise de tendências, foram utilizadas as médias dos valores simulados a cada ano, para as quinzenas dos meses outubro, novembro, janeiro e fevereiro, referentes à produtividade e o ciclo de vida do milho.

3.2.4 Análise das tendências

Após a observação gráfica dos dados meteorológicos e de simulação, formulou-se a hipótese da existência de tendência linear nas séries temporais analisadas. Por isso, o ajuste de um modelo linear do tipo $f(x) = ax + b$, foi utilizado. O coeficiente angular “a” indica tendência crescente quando positivo e decrescente quando negativo. Além disso, o valor absoluto de “a” representa a amplitude ou a intensidade da taxa de variação na série temporal. O ajuste desse modelo pode ser realizado pelo método dos mínimos quadrados. Entretanto, o método de ajuste proposto por Sen (1968) é mais apropriado, pois é considerado menos sensível a valores extremos e com melhor desempenho e conjuntos de dados extensos. O método de ajuste linear de Sen (1968) é apresentado nas Equações 1 e 2.

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{f(x)_{k1} - f(x)_{j1}}{x_{k1} - x_{j1}} \right)_1 \\ \vdots \\ \left(\frac{f(x)_{kN} - f(x)_{jN}}{x_{kN} - x_{jN}} \right)_N \end{bmatrix} \quad \text{Eq (1)}$$

Em que:

$$N = \binom{n}{2} \frac{n!}{(n-2)! 2!}$$

kN e jN = Combinação do número de observações da série (n), tomados em dois elementos (k e j).

O coeficiente de inclinação de Sen (1968) é obtido pelo cálculo da mediana de Q.

$$a = \begin{cases} \frac{Q_{\left(\frac{N+1}{2}\right)}}{2} & \text{se } N \text{ é ímpar} \\ \frac{1}{2} \left(Q_{\left(\frac{N}{2}\right)} + Q_{\left(\frac{N+2}{2}\right)} \right) & \text{se } N \text{ é par} \end{cases} \quad \text{Eq (2)}$$

em que,

a = Coeficiente de regressão proposto por Sen (1968).

A hipótese de que a tendência da série temporal é diferente de zero foi testada pelo método não paramétrico de Mann-Kendall (MK) (KENDALL, 1948; MANN, 1945). Esse método é recomendado como procedimento padrão para a detecção de tendências em dados hidrológicos de séries independentes. Entretanto, uma maior probabilidade de detecção de tendência é observada quando a variável analisada apresenta autocorrelação significativa. Para testar a autocorrelação de uma variável temporalmente ordenada pode-se considerar a correlação entre “ x_i ” e “ $x_{(i+1)}$ ”, em que i varia entre 1 e no número de observações menos 1. Caso a autocorrelação seja diferente de zero a uma probabilidade de 5%, recomenda-se o pré-tratamento dos dados originais (HAMED; RAO, 1998; YUE et al., 2002). Para as variáveis analisadas neste estudo foi realizado o teste de autocorrelação, mas optou-se e utilizar os dados originais mesmos em casos de autocorrelação significativa. O método de Mann-Kendall segue descrito na Equação 3.

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n [S_j + (x_k - x_j)] \quad \text{Eq (3)}$$

Em que:

$$(x_k - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_k - x_i) > 0 \\ 0 & (x_k - x_i) = 0 \\ -1 & (x_k - x_i) < 0 \end{cases}$$

Em que x é a variável analisada e todas as combinações são testadas para dois grupos, (1,...j; k,...n) onde $k = j+1$ e n e o número de amostras da série. Para amostras maiores que nove a estatística S se aproxima da distribuição normal, com média e variância estimadas nas Equações 4 e 5. O valor calculado de Z pode ser obtido pela Equação 6. Caso Z calculado seja maior que Z tabelado, rejeita-se a hipótese que a tendência “ S ” seja igual a zero.

Esperança de S: Eq (4)

$$E(S) = 0$$

Variância de S: Eq (5)

$$Var(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5)]$$

Em que:

n = Número de observações da série.

Z calculado: Eq (6)

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases}$$

A análise de tendências pelo teste de Mann-Kendall e pela análise de inclinação de Sen (1968), também foi aplicada à série temporal da produtividade e do ciclo de cultivo simulado para o milho. A única fonte de variação para simulação utilizando o modelo foi série temporal dos dados meteorológicos. Assim, a existência de tendências significativas nos resultados da simulação foi associada à combinação dos efeitos das variáveis meteorológicas da série temporal. Também foi realizada a análise gráfica de algumas variáveis, para melhor visualizar o comportamento das séries temporais.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A influência do clima no ciclo de vida de importantes culturas agrícolas justifica uma análise para avaliar a existência de tendência de alterações no padrão climático. Na Tabela 1 são apresentadas inclinação de Sen (1968), o teste de tendência de Mann-kendall (MK) e o resultado do teste para autocorrelação diferente de zero, referentes às variáveis meteorológicas analisadas anualmente.

Tabela 1: Análise de tendência climáticas segundo para o município de Jataí –GO

Período		TMAX	TMIN	TMED	RAIN	NDSR	MISR	WIND	RHUM
Anual	Inclinação Sen	0,04	0,02	0,03	-1,52	0,11	0,36	0,02	-0,15
	Mann-Kendall	sg	sg	sg	Ns	ns	ns	sg	Sg
	Autocorrelação	sg	ns	sg	Ns	ns	ns	sg	Ns

TMAX – Temperatura máxima; TMIN - Temperatura mínima; TMED – Temperatura média; RAIN – Precipitação acumulada; NDSR – Número de dias sem chuva; MISR – Máximo intervalo de dias sem chuvas; WIND – Velocidade do vento; RHUM – Umidade relativa do ar; sg – Significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns – Não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

A temperatura máxima, mínima e média anual apresentaram tendências significativas de aumento, com autocorrelação observada para temperatura máxima e média. A velocidade do vento apresentou tendência de aumento anual, porém, com autocorrelação significativa. Para a umidade relativa do ar, o que se observa é uma tendência anual de redução, em que a série não apresentou autocorrelação significativa.

Para o município não foi constatada tendências para variáveis de precipitação acumulada anual, o máximo intervalo de dias sem chuva (MISR) e no número de dias sem chuva (NDSR). Isso indica que o volume de chuvas e sua uniformidade não apresentam variações sistemáticas no período ao ponto de caracterizar uma tendência. Para as variáveis MISR e NDSR é possível que o limite de 1 mm utilizado nesse trabalho para caracterizar dias sem chuva seja inadequado. Isso porque regionalmente há relatos de intervalos de dias sem chuvas maiores que os observados nessa análise, que para o mês de janeiro não foi maior que nove dias. Entretanto, não se tem elementos suficientes para definir um valor de precipitação que possa ser considerado significativo para a região. Esse limiar de precipitação poderia ser avaliado por tentativa, porém isso não representa o foco desse trabalho. Os coeficientes de inclinação de Sen (1968) são apresentados na forma de gráficos de linha para variáveis de temperatura (Figura 1 a 3). Embora alguns desses coeficientes não sejam significativos, essa análise permite interpretação das tendências ao longo dos meses do ano.

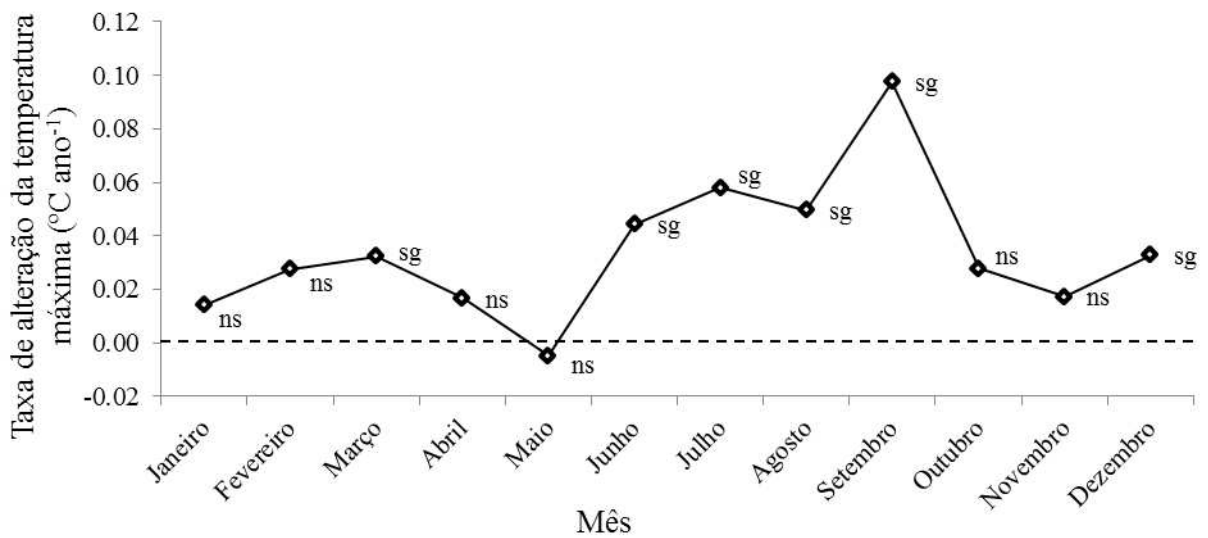


Figura 1: Coeficientes de inclinação de Sen (1968) da temperatura máxima nos meses do ano, sg - significativo para KM, sg* - significativo para KM e para autocorrelação, ns - não significativo para KM.

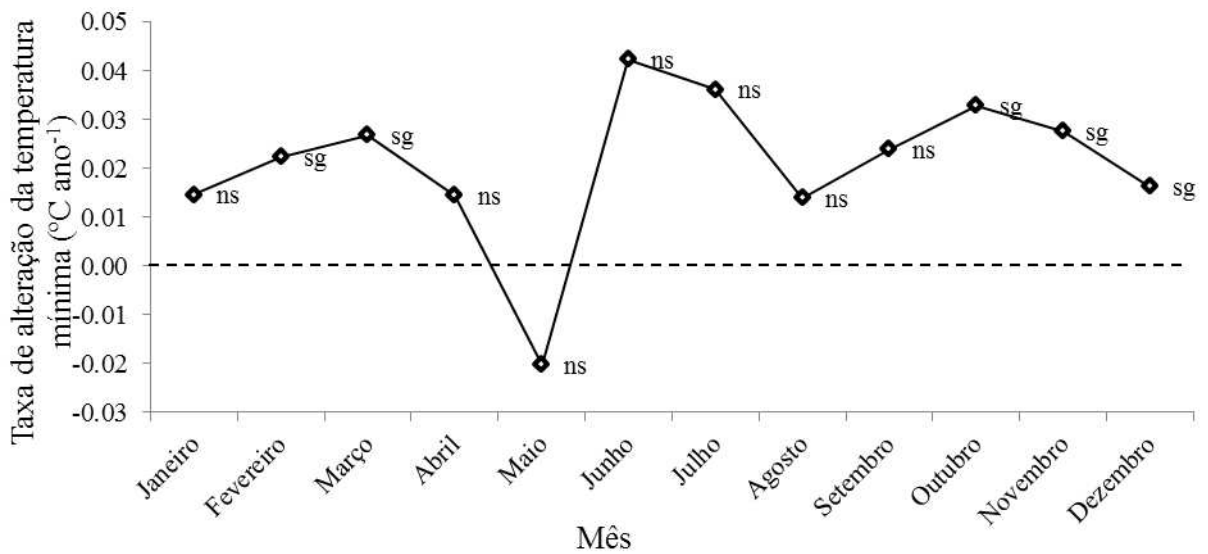


Figura 2: Coeficientes de inclinação de Sen (1968) da temperatura mínima nos meses do ano, sg - significativo para KM, sg* - significativo para KM e para autocorrelação, ns - não significativo para KM.

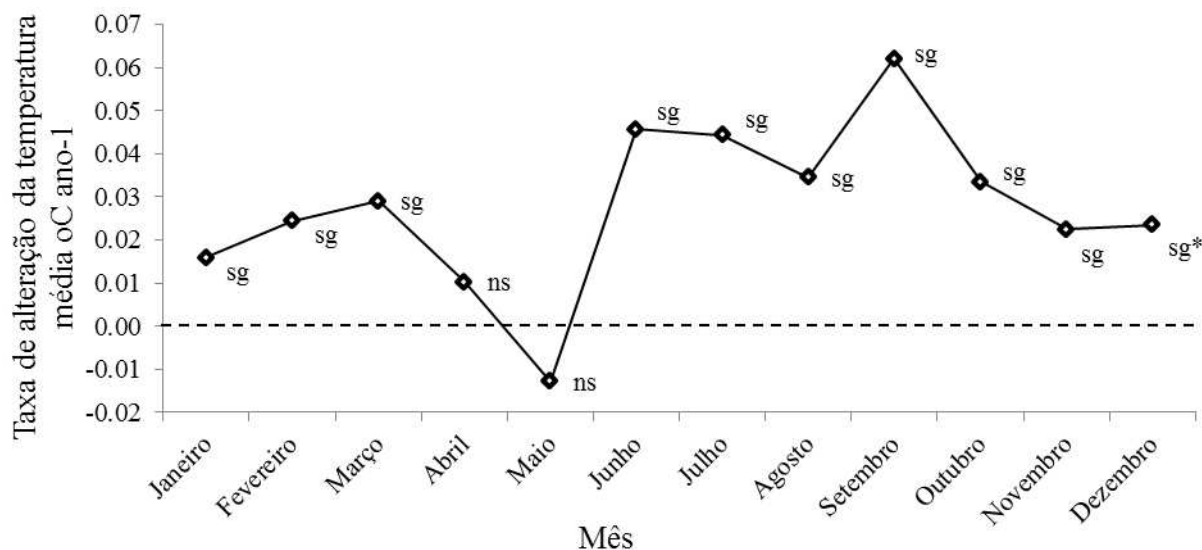


Figura 3: Coeficientes de inclinação de Sen (1968) da temperatura média nos meses do ano, sg - significativo para KM, sg* - significativo para KM e para autocorrelação, ns - não significativo para KM.

A temperatura média apresentou tendência de aumento em todos os meses exceto em abril e maio (Figura 3). A temperatura mínima apresentou tendência de aumento no intervalo contínuo de outubro a dezembro e de fevereiro a março, mas no período de abril a setembro a tendência não foi significativa (Figura 2). Houve período contínuo com tendências de aumento da temperatura máxima significativo entre junho e setembro (Figura 1). Dezembro e março também apresentaram tendência de aumento da temperatura máxima. Esses resultados sugerem que há tendência de aumento na temperatura durante o ano, exceto nos meses de abril e maio. Além disso, os coeficientes angulares de Sen (1968), das temperaturas máxima, mínima e média no mês de maio foram negativos, o que indica decréscimo na temperatura desse mês, embora não seja estatisticamente significativo pelo teste Mann-Kendall.

A precipitação acumulada não apresentou tendência significativa para todos os meses do ano (Figura 4). Entretanto, os coeficientes angulares de Sen (1968) apontam para uma redução na precipitação em janeiro e um posterior aumento, menos intenso, em fevereiro e março. Essas tendências não foram significativas, mas um cenário como esse pode favorecer os agricultores de soja e milho, pois a colheita da soja na 1ª safra com menos chuva torna a operação mais ágil e com menos perdas na colheita. Contudo, aumento na precipitação em fevereiro e março poderia aumentar os potenciais produtivos do milho de 2ª safra em cultivos não irrigados.

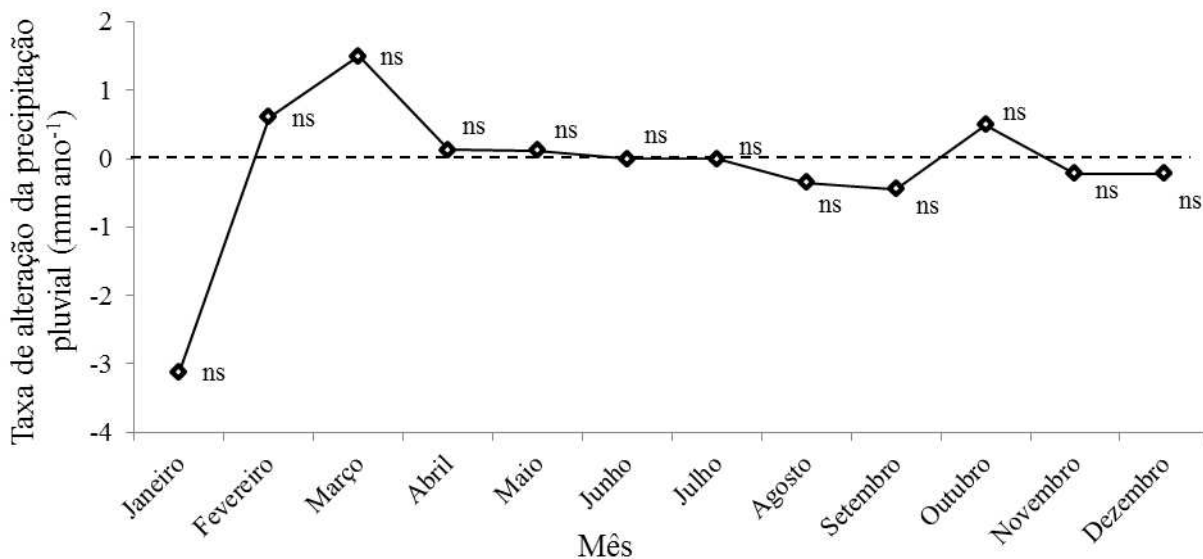


Figura 4: Coeficientes de inclinação de Sen (1968) da precipitação acumulada nos meses do ano, sg - significativo para KM, sg* - significativo para KM e para autocorrelação, ns - não significativo para KM.

A velocidade do vento e a umidade relativa do ar apresentaram padrões opostos durante os meses do ano (Figura 5 e 6). Um padrão interessante ocorre nos meses de julho, agosto e setembro, cuja tendência de redução da umidade relativa coincide com a tendência de aumento na velocidade do vento de forma significativa. Possivelmente, exista uma relação de dependência entre a umidade relativa do ar, a velocidade do vento e temperatura do ar, que determine o comportamento dessas variáveis durante o ano.

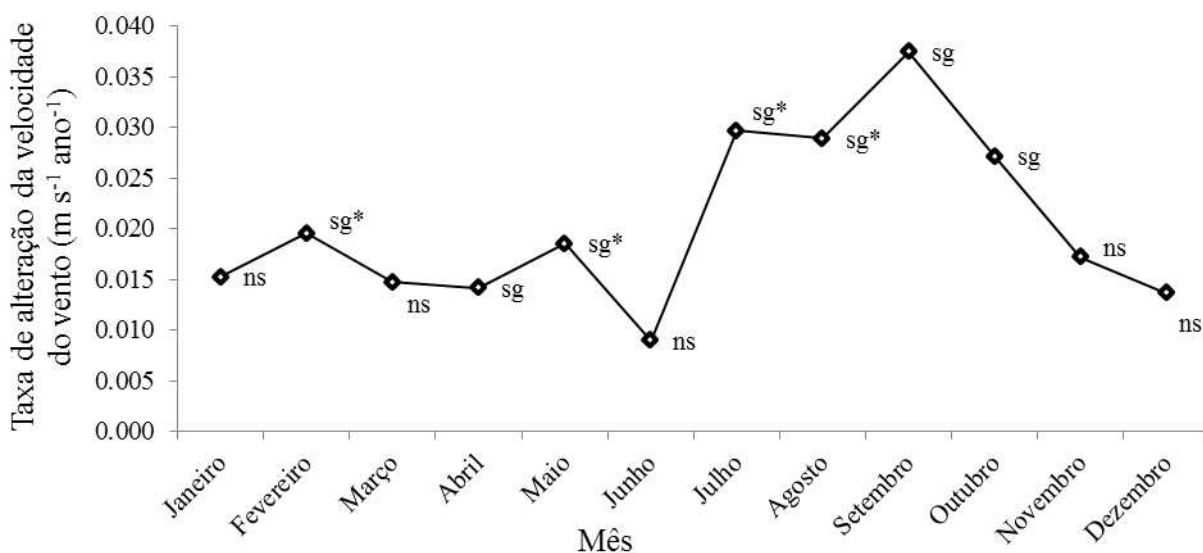


Figura 5: Coeficientes de inclinação de Sen (1968) da velocidade do vento nos meses do ano, sg - significativo para KM, sg* - significativo para KM e para autocorrelação, ns - não significativo para KM.

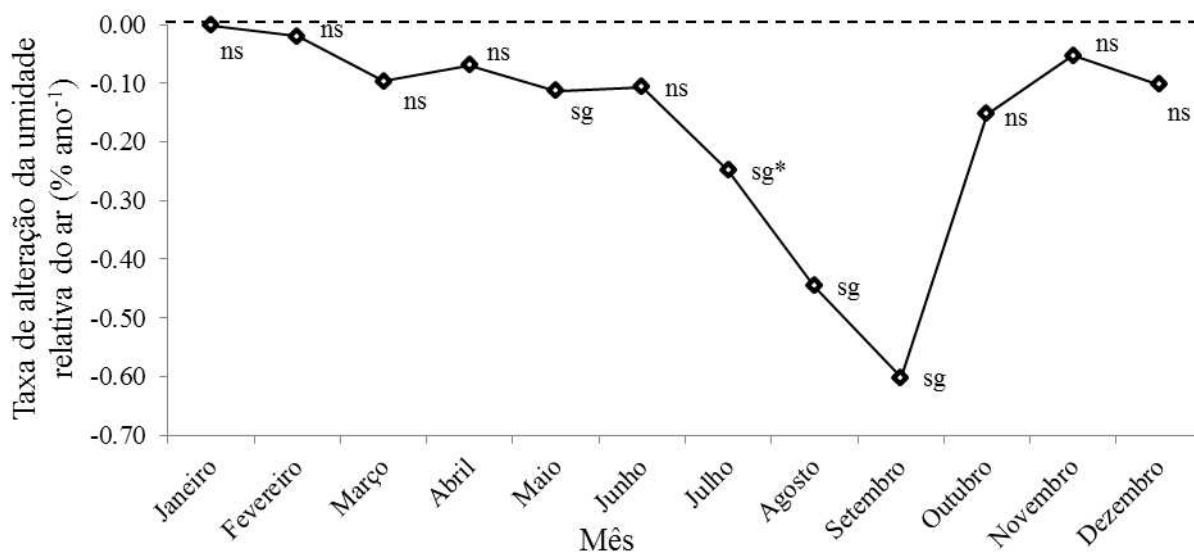


Figura 6: Coeficientes de inclinação de Sen (1968) da umidade relativa do ar nos meses do ano, sg - significativo para KM, sg* - significativo para KM e para autocorrelação, ns - não significativo para KM.

A configuração das tendências climáticas em Jataí converge à perspectiva de um cenário com temperaturas mais elevadas que induzem maior velocidade do vento e menor umidade relativa do ar. Essa configuração pode aumentar a frequência de eventos extremos como chuvas intensas e com ventos fortes. Na agricultura, esse cenário também leva a hipótese de maior demanda hídrica. Mesmo que a precipitação se mantenha o volume e a uniformidade, maior evaporação é esperada com o aumento da temperatura, aumento da velocidade do vento e a redução da umidade relativa do ar. Maior temperatura também pode influenciar o ciclo de vida de culturas como milho, que tende a ser reduzido.

A influência das mudanças climáticas sobre o milho na região de Jataí foi avaliada por meio do modelo CERES-Maize, considerando-se o histórico de 35 anos de dados meteorológicos registrados na região. O principal interesse em observar as tendências climáticas na agricultura consiste em avaliar sua influência na produtividade das culturas. A produtividade potencial é função das condições climáticas e das características hídricas do solo, que variam em função da data de semeadura. Por esse motivo a análise de tendência da produtividade foi simulada para os intervalos de semeadura nas quinzenas de outubro, novembro, janeiro e fevereiro, que contemplam o período de semeadura do milho de 1^a e 2^a safra (Figura 7).

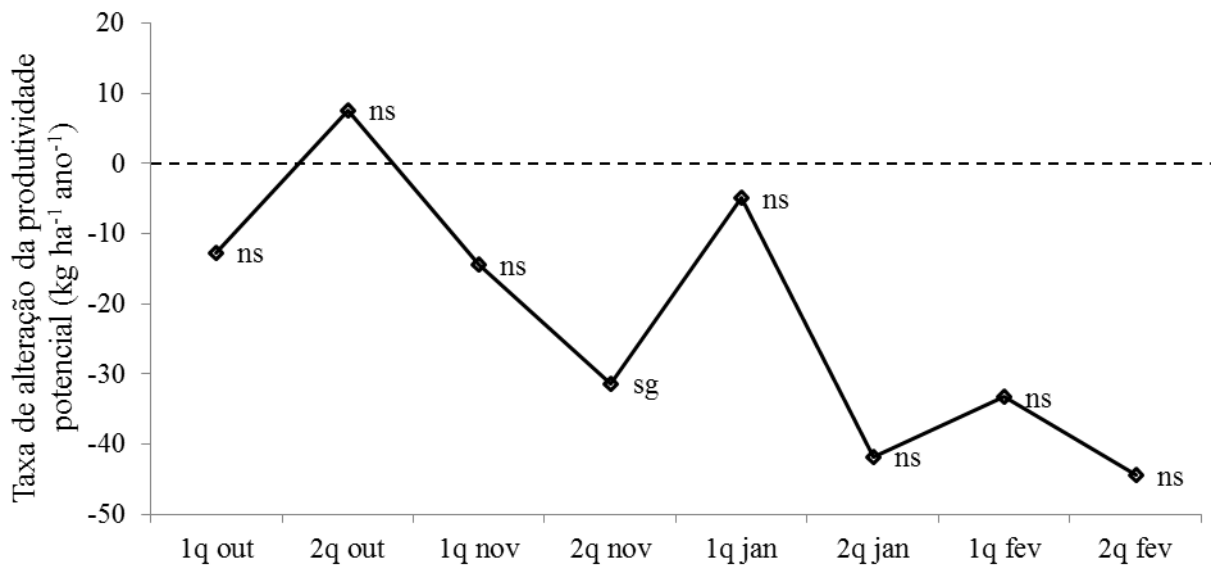


Figura 7: Coeficientes de inclinação de Sen (1968) da produtividade potencial do milho semeado nas quinzenas dos meses de outubro, novembro, janeiro e fevereiro: sg - significativo para KM, sg* - significativo para KM e para autocorrelação, ns - não significativo para KM.

A produtividade potencial do híbrido de milho P30F53 apresentou tendência significativa de redução apenas para a semeadura realizada na segunda quinzena de novembro (Figura 7). O coeficiente de Sen (1968) indicou redução na produtividade do milho quando semeado nesse período ao longo dos 35 anos de histórico climático. A segunda quinzena de novembro não é um período usual para a semeadura de milho na região, embora possa ser feita se ocorrerem atrasos operacionais ou em grandes propriedades cujo número de máquinas é insuficiente. O comportamento da produtividade potencial simulada na 2ª quinzena de novembro, é apresentada com linha de tendência ajustado pelo método de Sen (1968) (Figura 8).

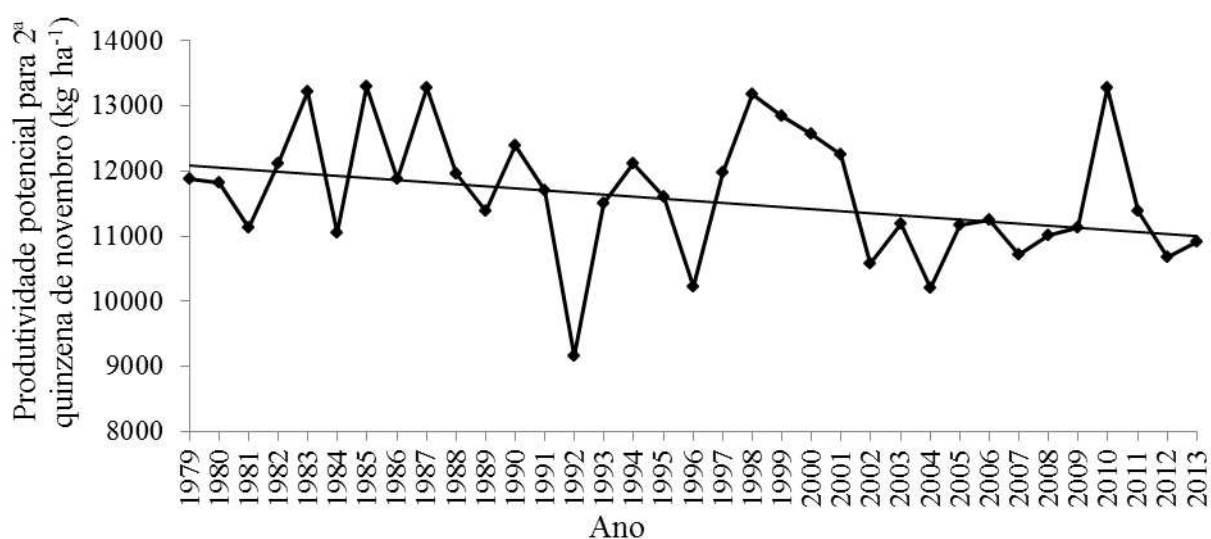


Figura 8: Comportamento da produtividade potencial do híbrido P30F53 em 35 anos de histórico climático, com linha de tendência ajustado pelo método de Sen (1968).

O ciclo de vida do milho é influenciado pelo somatório térmico do período a partir de uma temperatura basal. O ciclo mensurado em número de dias ou por meio da somatória dos graus dias. Como foi verificada a tendência de aumento de temperatura durante o ano em Jataí, avaliou-se a hipótese de redução no ciclo do milho (Figura 9).

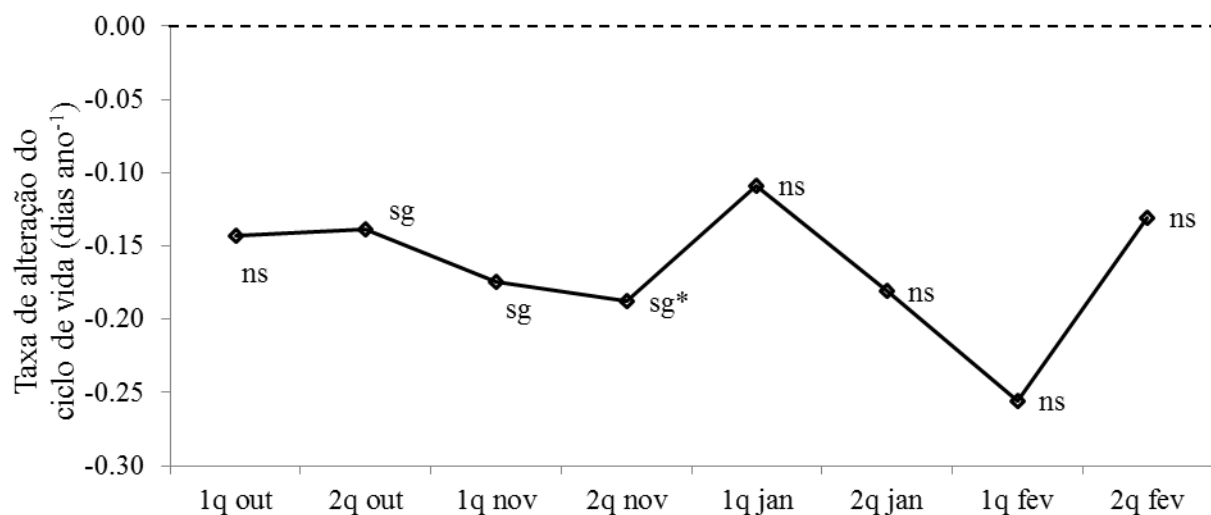


Figura 9: Coeficientes de inclinação de Sen (1968) para duração do ciclo do milho semeado nas quinzenas dos meses de outubro, novembro, janeiro e fevereiro: sg - significativo para KM, sg* - significativo para KM e para autocorrelação, ns - não significativo para KM.

O coeficiente de inclinação de Sen (1968) foi negativo em todos os períodos em análise, o que indica redução no ciclo do milho (Figura 9). Na semeadura realizada na 2ª quinzena de outubro, 1ª e 2ª quinzena de novembro ocorreu tendência significativa de redução do ciclo do milho. Os ciclos de vida simulado do milho, na 2ª quinzena de outubro e nas duas

quinzenas de novembro, são apresentados com linhas de tendência ajustadas pelo método de Sen (Figura 10 a 12).

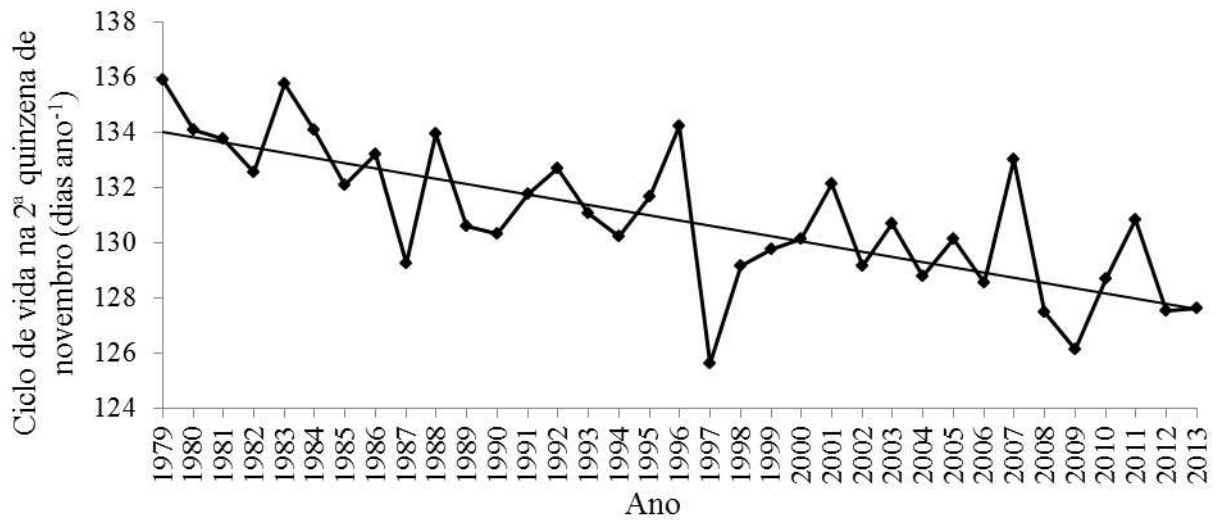


Figura 10: Ciclo de cultivo para o híbrido P30F53 em 35 anos de histórico climático, considerando a semeadura na 2ª quinzena de novembro.

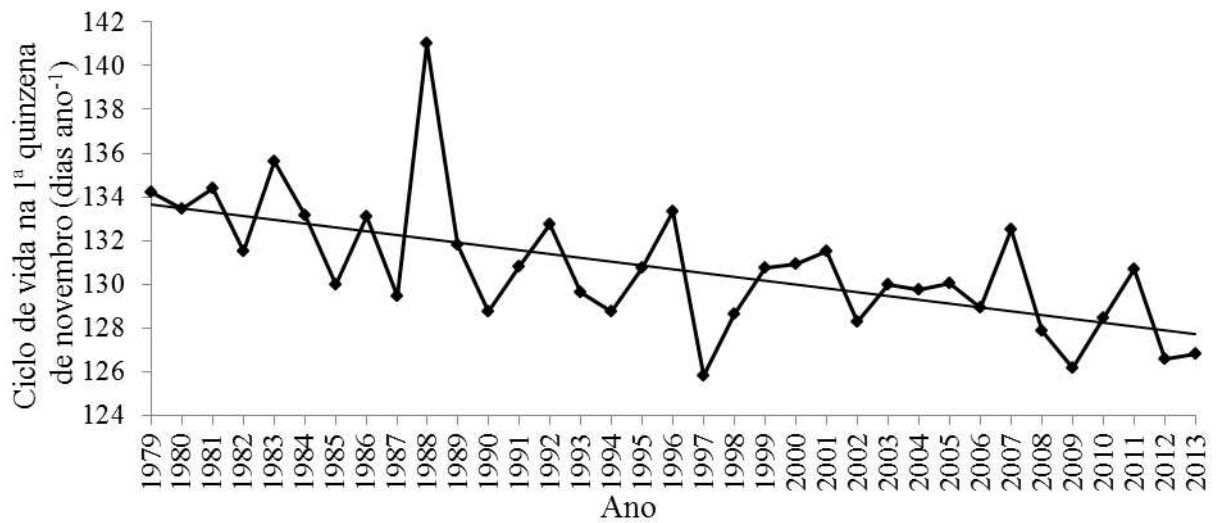


Figura 11: Ciclo de cultivo para o híbrido P30F53 em 35 anos de histórico climático, considerando a semeadura na 1ª quinzena de novembro.

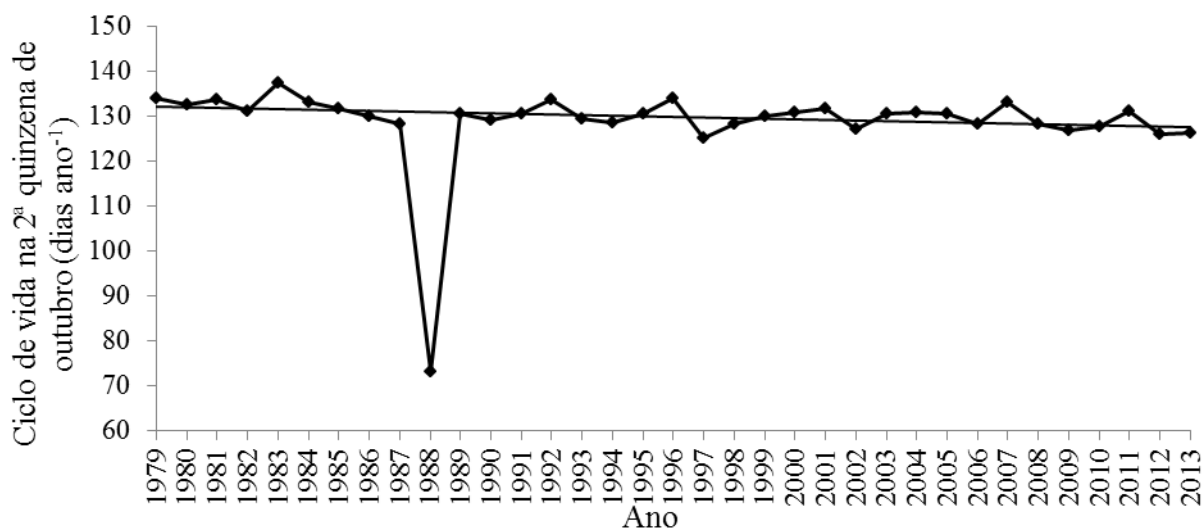


Figura 12: Ciclo de cultivo para o híbrido P30F53 em 35 anos de histórico climático, considerando a semeadura na 2ª quinzena de outubro.

Um comportamento atípico foi observado na semeadura realizada nas quinzenas de outubro do ano de 1988. Nesse período o número médio de dias do ciclo foi 73,2 dias na semeadura na 2ª quinzena de outubro. Na semeadura na 1ª quinzena de outubro o número médio de dias do ciclo de vida foi ainda menor, 21 dias. Esses valores foram anormais, pois na composição dessa média foram contabilizados ciclos iguais a zero, devido a não germinação para algumas semeaduras nesse período. O ano de 1988 foi um ano atípico no qual se registrou a menor temperatura mínima de $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ em julho e a maior temperatura máxima de $39,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ em setembro, considerando toda a série temporal. O mês de outubro desse ano choveu apenas 52 mm, antecedidos por quatro meses sem chuvas e com temperaturas elevadas. O modelo CERES-Maize foi sensível a essa condição climática atípica. Além disso, o coeficiente de inclinação de Sen (1968) mostrou-se robusto mediante a ocorrência de valor discrepante no conjunto de dados.

Ao analisar o cenário apresentado neste trabalho, supõe-se que variáveis meteorológicas determinantes no balanço hídrico sejam ainda mais limitantes à produtividade das culturas agrícolas na região. Assim, as operações de manejo devem prever técnicas que aumentem o armazenamento de água no solo, como a cobertura vegetal do solo e a eliminação das restrições químicas e físicas para a exploração radicular. O melhoramento genético de plantas também deve visar sistemas radiculares mais profundos e robustos, além de tolerância ao calor.

3.4 CONCLUSÕES

Em uma série temporal de 35 anos para dados meteorológicos do município de Jataí, constataram-se mudanças no padrão climático. Essas mudanças variaram entre os meses do ano e configuraram um cenário de temperaturas mais elevadas, maior velocidade do vento e menor umidade relativa do ar. A precipitação pluvial não apresentou alteração em sua quantidade e regularidade de distribuição. O modelo de CERES-Maize, foi sensível às mudanças observadas no clima ao identificar tendências na produtividade potencial e no ciclo de vida do milho cultivado na região. As mudanças no clima provocaram redução significativa nos valores simulados da produtividade e do tempo para o milho completar o ciclo de vida.

3.5 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro. À Universidade Federal de Viçosa – UFV e à Universidade Federal de Goiás, Regional Jataí – UFG que possibilitaram a realização desse trabalho.

3.6 LITERATURA CITADA

CONAB, C. N. D. A. Segundo levantamento intenção de plantio safra 2012/2013. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos.** , p. 66, Janeiro 2015 2013. Disponível em:

<

http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_11_11_08_54_13_boletim_portugues_novembro_2013_-_ok.pdf. >

DE OLIVEIRA, G. C. **Gestão de recursos hídricos: os fatores que influenciam no planejamento.** 2003. 89f. Dissertação (Mestrado em Administração de Empresas) - Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, 2003.

HAMED, K. H.; RAO, A. R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. **Journal of Hydrology**, v. 204, n. 1, p. 182-196, 1998.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods.** Oxford, England: Griffin. 1948.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der erde.** Gotha: verlag justus perthes. **Wall-map 150cmx200cm**, 1928.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, p. 245-259, 1945.

PEDRO, L. D. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379-1389, 1968.

WAN, L.; ZHANG, X.; MA, Q.; ZHANG, J.; MA, T.; SUN, Y. Spatiotemporal characteristics of precipitation and extreme events on the Loess Plateau of China between 1957 and 2009. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 18, p. 4971-4983, 2014.

YUE, S.; PILON, P.; PHINNEY, B.; CAVADIAS, G. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 9, p. 1807-1829, 2002.

CAPÍTULO 4

RECOMENDAÇÃO DE FERTILIZANTES PARA O MILHO COM BASE NA PRODUTIVIDADE POTENCIAL SIMULADA

RESUMO

Os modelos de crescimento de planta foram desenvolvidos para estimar a produtividade das principais culturas em diferentes cenários climáticos e de manejo. A agricultura de precisão pode utilizar essa ferramenta para auxiliar decisões que otimizem o uso de insumos. O objetivo desse trabalho foi avaliar a aplicação do modelo CERES-Maize para recomendação de fertilizantes no cultivo de milho não irrigado. O modelo foi utilizado para simular a produtividade potencial do milho em talhões de uma área comercial. Neste estudo, apenas as restrições hídricas provocadas pelo clima, nos diferentes solos da propriedade, foram consideradas como fator limitante da produtividade potencial. A produtividade potencial variou entre os talhões e entre as datas de semeadura. A análise com base no histórico climático de 35 anos permitiu gerar uma expectativa de produtividade para anos normais e atípicos, em diferentes períodos de semeadura para a 1ª e 2ª safra do ano agrícola. A produtividade potencial simulada foi utilizada para gerar a recomendação de fertilizantes, com base em tabelas de recomendação para a região, e com base na exportação de nutrientes, que visou à manutenção da fertilidade. Os resultados indicam que os modelos de crescimento de planta podem auxiliar a tomada de decisões no manejo de fertilizantes e do período de semeadura para cultivos não irrigados. Nesse estudo, a produtividade potencial simulada e, conseqüentemente, a quantidade de fertilizantes recomendada foram dependentes do período do ano em que o milho foi semeado.

Palavras-chave: N-P-K, DSSAT, CERES-Maize, data de semeadura.

RECOMMENDATION OF FERTILIZERS FOR CORN BASED ON A CROP SIMULATION MODEL

ABSTRACT

The crop simulation models were developed to estimate the yield of major crops in different climatic and management scenarios. Precision agriculture can use this tool to make

decisions that optimize the use of inputs. The objective of this study was to evaluate the application of CERES-Maize model for fertilizer recommendation on non-irrigated corn cultivation. The model was used to simulate the yield potential of maize fields in a commercial area. In this study, only the water restrictions caused by the climate, in the different soils of the farm, were considered as a yield-limiting factor. The yield potential was different for each plot and for each planting date. The analysis based on climate history of 35 years has enabled generate an expected yield to normal and atypical years in different periods of planting for the 1st and 2nd harvest season of the agricultural year. The simulated yield potential was used to generate the recommendation of fertilizers. These recommendations were based on recommendation tables for the region and on the nutrients exported by the crop. The idea was to maintain soil fertility. The results indicate that crop simulation models can help decision making in the management of fertilizers and choosing planting period for non-irrigated crops. In this study, the simulated yield potential and the recommended dosis of fertilizers to be applied were dependent on the time of year when maize was planted.

Keywords: N-P-K, DSSAT, CERES-Maize, seeding date.

4.1 INTRODUÇÃO

Os modelos de crescimento de planta podem ser utilizados em diferentes escalas espaciais, que vão desde m² às dimensões de zonas de manejo, talhões, fazendas, municípios, estados, países e continentes, por exemplo. A utilização de modelos de crescimento de planta em agricultura de precisão tem sido concentrada no gerenciamento de zonas de manejo, pois os modelos consideram entradas homogêneas para o módulo de solo. Entretanto, o uso de simulações em agricultura de precisão pode evoluir para mapas de simulações, pois não há restrições ao tamanho das unidades de solo. Assim, os mapas dos atributos do solo poderiam ser utilizados para gerar as unidades homogêneas de entrada nos no módulo de solo do DSSAT (Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia). A limitação do uso dos modelos, nesse sentido, refere-se ao preparo dos arquivos de entrada para cada unidade, que pode ser um número alto, em função da variabilidade espacial. Programas de computadores são desenvolvidos por pesquisadores para facilitar a manipulação de elevado volume de dados, e integrar os modelos de crescimento de planta aos sistemas de informações espaciais (SIG) (THORP et al., 2008).

A utilização dos modelos de crescimento de planta na escala de países, estados e continentes têm apresentado boas avaliações (LIU, 2009; RESOP et al., 2012). Entretanto, as experiências de utilização dos modelos de crescimento de planta, a nível de propriedades agrícolas e sobre os princípios da agricultura de precisão, devem ser melhor documentadas a fim de explorar seu potencial em tomadas de decisões.

A principal finalidade dos modelos consiste em prever a produtividade de importantes culturas agrícolas na perspectiva dos cenários de mudanças climáticas, mudanças no carbono e nitrogênio do solo. Em zonas de manejo, glebas, ou em talhões de uma fazenda, que compartilham do mesmo clima, a finalidade pode ser a previsão de produtividade em diferentes tipos de solos, em função do uso de fertilizantes, operações de preparo de solo, danos com pragas, doenças, competição com plantas invasoras, alterações do solo em sucessão de cultura, rotação de cultura, oscilações climáticas anuais, entre outros. Apesar de muitas dessas funcionalidades estarem disponíveis no pacote de programas do DSSAT, algumas ainda não se encontram completamente funcionais, ou exigem muita experiência do usuário, o que limita seus benefícios a usuários comuns.

Em plantio de sequeiro um dos principais limitadores de produtividade é o conteúdo de água do solo que é dependente das variações climáticas, sendo fonte de incertezas e risco de produção em cultivos não irrigados. Deste modo, a quantificação dos riscos climáticos consiste em importante fator para tomada de decisões na agricultura (SOLER, 2004; SOLER et al., 2009; SOLER et al., 2007).

Em fazendas com cultivo não irrigado é importante a informação da produtividade potencial esperada, restringida pela precipitação e as variações hídricas dos solos. Mesmo que em uma propriedade não haja variação expressiva nos parâmetros climáticos, a falta de uniformidade nos parâmetros físicos do solo pode sensibilizar os modelos para identificar os potenciais de cada região. Uma expectativa de produção permite calcular uma expectativa de exportação de nutrientes pela cultura. Recomendações de fertilizantes para cada nível de risco climático podem ser estimadas ao considerar também a eficiência na aplicação dos fertilizantes e fatores que dependem do solo.

Propriedades agrícolas no Centro-Oeste brasileiro se caracterizam por grandes extensões de terra, mecanização agrícola intensiva e elevados investimentos em insumos. Essas propriedades são normalmente delimitadas por estradas não pavimentadas que dividem as áreas em talhões e são utilizadas no escoamento da produção no interior das propriedades. A demarcação desses talhões por estradas ocorreu no passado, certamente motivada por

questões de logística, conhecimento do solo, relevo, reservas florestais e características observáveis por um gestor agrícola. Os motivos que levaram a demarcação dos talhões em uma propriedade não devem ser ignorados. Mesmo que não faça sentido técnico a configuração dos mesmos, é importante ressaltar que anos de manejo pela média podem induzir as diferenças químicas e biológicas. Algumas características como a textura do solo são pouco influenciadas pelo manejo e são recomendadas para delimitar regiões com potenciais de produção distintos. Entretanto, características hídricas também são definidas por compactação, matéria orgânica, cobertura vegetal e preparo do solo.

O objetivo desse trabalho foi avaliar a aplicação do modelo CERES-Maize, disponível no DSSAT, para tomada de decisões no manejo de fertilizantes, com base na estimativa de produção potencial para diferentes talhões de uma área comercial de milho.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Caracterização da área

O estudo foi realizado em propriedade rural localizada no município de Jataí - GO. O município está localizado na microrregião do sudoeste goiano. O clima da região é caracterizado como Aw, com período seco definido, segundo classificação de Köppen (KÖPPEN; GEIGER, 1928). A temperatura média do ar é de 23,7 °C, com uma precipitação média anual de 1652 mm e altitude de 662 m, segundo estação meteorológica instalada no campus da Universidade Federal de Goiás – Regional Jataí. A fazenda analisada neste trabalho apresenta solo do tipo Latossolo Vermelho Distrófico. Segundo Ker (2013), esse tipo de solo é normalmente profundo e bem drenado e apresenta estrutura granular formada por argilas oxídica de baixa atividade. As áreas de cultivo estão localizadas nas coordenadas 18° 02' 55" S e 51° 58' 17" W.

4.2.2 Obtenção dos dados

A análise de solo foi realizada em nove talhões da fazenda que totaliza 1091 ha (Figura 1). O banco de dados utilizados foi obtido da análise de textura realizada em 2009 e a análise química realizada em 2013. A propriedade apresenta duas áreas contíguas. Na primeira, de 449 ha, foram coletadas 89 amostras para análise químicas do solo, das quais em 30 pontos também foram coletadas amostras para análise físicas. Na segunda área, de 642 ha, foram coletadas 130 amostra químicas e em 42 ponto coletou-se também amostras para

análise físicas. Em ambas as áreas a relação entre o número de amostra e a área amostrada foi próximo de 5 ha por amostra para análise química e 15 ha por amostra para análise física do solo. A descrição dos pontos amostrados é apresentada na Figura 2. Também constam os mapas de produtividade do híbrido de milho P30F53 obtidos durante a 1ª safra e 2ª safra de 2013/2014.

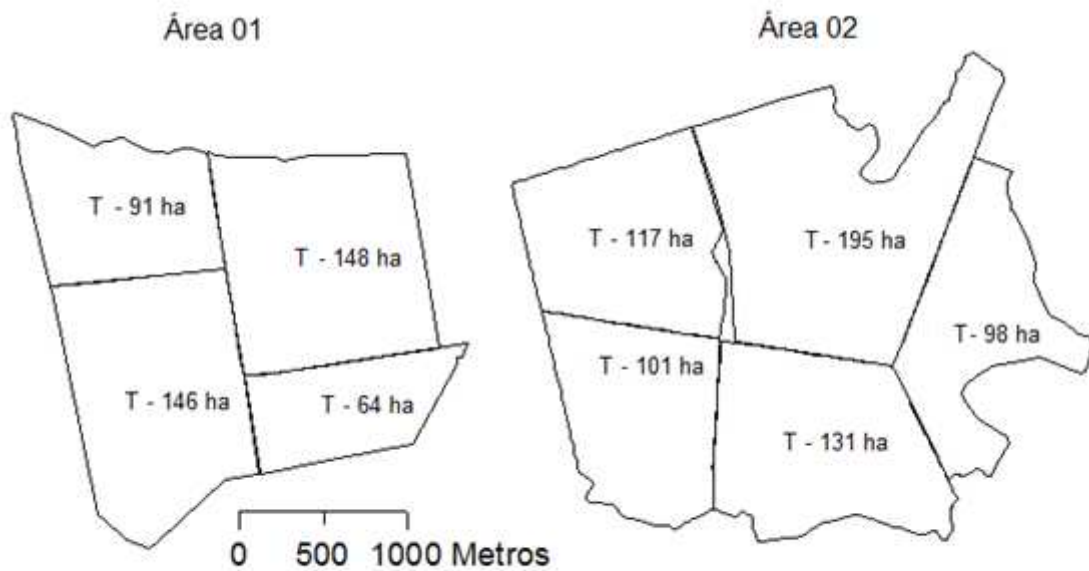


Figura 1: Disposição dos talhões nas duas áreas agrícolas. As legendas dos talhões representam suas respectivas áreas em hectares.

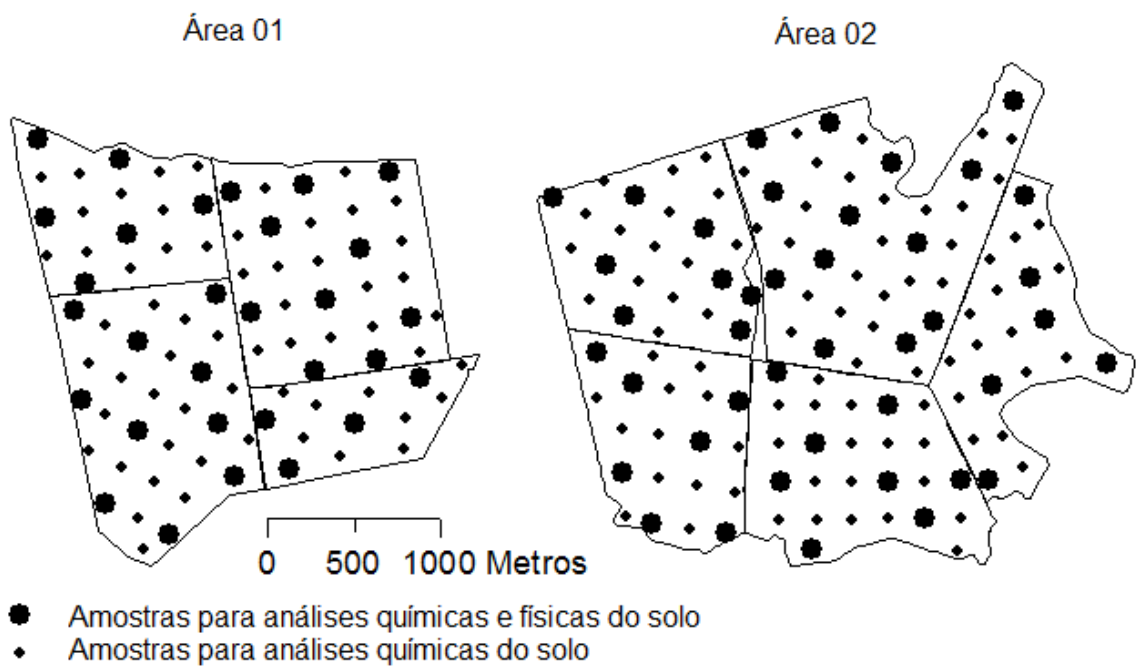


Figura 2: Disposição das amostras de solo nos talhões das duas áreas.

4.2.3 Construção dos arquivos de solo

Neste estudo, optou-se por não gerar mapas interpolados para os atributos do solo. Utilizou-se a média dos atributos nos talhões, pois, o número de amostras não é suficiente para gerar mapas interpolados confiáveis (WEBSTER E OLIVER 1992). Além disso, o DSSAT simula o desenvolvimento das culturas em áreas manejadas uniformemente.

As características hídricas do solo como capacidade de campo, ponto de murcha permanente e umidade de saturação, foram estimadas pela equação de Van Genuchten (1980), com os parâmetros ajustados por Tomasella et al. (2000), com base na textura e carbono orgânico do solo. Esses parâmetros são importantes requisitos do arquivo de solo do DSSAT, aos quais os modelos são bastante sensíveis. Para os atributos do solo, em cada talhão, foi realizada estatística descritiva para caracterizá-los. Com base nos valores médios desses atributos criou-se um arquivo de solo para cada talhão. Foi considerada a zona de exploração radicular do milho a camada de solo de 0 a 50 cm (ANDRADE et al., 2006).

4.2.4 Construção do arquivo de clima

Para criar o arquivo de clima utilizou-se o banco de dados de 35 anos da estação convencional do INMET, localizada na Universidade Federal de Goiás – Regional Jataí (UFG), que se encontra a uma distância linear de 25 km. As estações convencionais não fornecem a radiação solar, que é requerida pelos modelos. A radiação solar foi estimada pela equação de Angström com base na insolação diária, com os parâmetros $a = 0,35952$ e $b = 0,43373$ (Equação 1). Esses parâmetros foram ajustados com os dados de radiação obtidos em 2013, pela estação automática também situada na UFG Regional Jataí. Na ausência de dados de insolação, a radiação solar foi estimada em função da temperatura máxima e mínima, segundo Hargreaves e Samani (1982), com o parâmetro $K = 0,16025$, ajustado com base nos dados da estação automática (Equação 2).

Equação de Angström

$$R_s = \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

n = Duração do brilho solar (horas);

N = Duração astronômica do período diurno (horas);

a, b = Coeficientes empíricos obtidos por análise de regressão linear de determinada localidade.

R_a = Radiação no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

Equação de Hargreaves e Samani (1982)

$$R_s = K_r \sqrt{(T_{max} + T_{min})} R_a \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

K_r = Coeficiente de ajuste.

4.2.5 Validação dos modelos

A produtividade observada foi utilizada para validar os modelos, com base no valor médio de cada talhão. Esses dados de produtividade foram provenientes das colhedoras. Também foi realizada a krigagem com as amostras de produtividade para criar um mapa de produtividade no formato matricial, cujos pixels apresentam dimensões de 20 x 20 m. As colhedoras foram calibradas no campo. Para tal, foi informado ao monitor o peso de balança dos caminhões que transportam os grãos para os silos armazenadores. O mapa de produtividade foi interpolado utilizando o programa computacional ArcMap v10.1.

Os modelos foram validados com base na média e intervalo de confiança da produtividade em cada talhão. Também foi utilizado o coeficiente de determinação e o índice de concordância proposto por Willmott et al. (1985) para avaliar a validade dos modelos. Uma vez validados os modelos, foram utilizados para análise de cenários climáticos.

4.2.6 Recomendação de fertilizantes

Com base na produtividade potencial média, simulada para cada talhão em diferentes períodos de semeadura, foi calculada a quantidade de nutrientes exportados pelos grãos. Espera-se que essa exportação prevista de nutrientes ocorra, a medida que se investigue e corrija possíveis fatores limitantes à produtividade, que não sejam climáticos. Dessa forma, a produtividade potencial representa uma referência à capacidade de resposta ao uso dos fertilizantes. Com base na expectativa de exportação de nutrientes, foi realizada uma recomendação de adubação para repor os nutrientes no solo ou manter da fertilidade do solo. Para essa recomendação, não foram previstos fatores relacionados à eficiência de aplicação das fontes de fertilizantes disponíveis no mercado.

Também foi gerada a recomendação de fertilizantes com base em valores tabelados de recomendações para a região do cerrado, que considera a produtividade esperada e o nível em que os nutrientes se encontram no solo. A produtividade potencial simulada neste trabalho

representa a produtividade que provavelmente seja obtida, caso as limitações sejam apenas às relacionados a fatores climáticos. Essa produtividade não representa o potencial produtivo máximo que o híbrido de milho pode alcançar, mas sim uma fração dessa produtividade, que é dependente do clima e da disponibilidade de água no solo.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os níveis dos nutrientes no solo não foram restritivos ao desenvolvimento da cultura (SOUSA E LOBATO, 2004; ALVES et al., 1999) (Tabela 1). Isso indica que os fatores potencialmente limitantes da produção podem estar relacionados com a disponibilidade hídrica de cada talhão ou com os níveis de adubação nitrogenada.

Tabela 1: Caracterização dos talhões pelas médias dos atributos do solo

Talhão		T 64	T 91	T 101	T 117	T 131	T 98	T 146	T 148	T 195
pH	Média	5,32	5,56	5,13	5,13	5,32	5,24	5,42	5,59	5,46
	σ	0,06	0,26	0,17	0,20	0,18	0,20	0,21	0,24	0,25
MO (g dm ⁻³)	Média	40,3	42,5	41,8	42,0	39,5	39,2	42,2	38,1	41,5
	σ	4,75	2,88	7,60	3,25	5,79	6,94	4,16	2,19	3,17
T (cmol _c dm ⁻³)	Média	8,96	9,04	9,71	9,56	9,29	9,05	9,24	9,98	8,64
	σ	0,42	0,74	0,93	0,41	0,73	1,08	0,53	0,51	0,72
t (cmol _c dm ⁻³)	Média	4,20	5,51	4,45	4,12	4,62	4,25	5,65	6,92	4,91
	σ	0,57	0,74	0,59	0,34	0,78	0,86	0,90	0,89	0,80
SB (cmol _c dm ⁻³)	Média	5,36	5,59	4,33	4,27	4,60	4,31	5,52	6,45	4,68
	σ	0,42	0,74	0,61	0,57	0,69	0,89	0,70	0,86	0,76
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	Média	3,60	3,46	5,38	5,29	4,68	4,74	3,71	3,52	3,97
	σ	0,00	0,58	0,80	0,59	0,67	0,77	0,50	0,56	0,63
Al (cmol _c dm ⁻³)	Média	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	σ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
V (%)	Média	59,7	61,7	44,7	44,6	49,5	47,4	59,7	64,5	54,0
	σ	1,66	5,97	5,53	5,65	6,10	7,11	5,49	6,38	6,74
P-res (mg dm ⁻³)	Média	53,3	51,9	33,9	27,1	22,0	19,9	49,6	57,0	30,9
	σ	0,89	14,93	52,29	7,07	5,44	8,37	13,35	12,98	7,79
Ca (cmol _c dm ⁻³)	Média	3,86	4,12	3,08	2,89	3,13	3,26	3,91	4,48	3,31
	σ	0,22	0,55	0,46	0,41	0,46	0,69	0,44	0,47	0,52
Mg (cmol _c dm ⁻³)	Média	1,25	1,23	1,03	1,09	1,25	0,92	1,37	1,68	1,22
	σ	0,19	0,20	0,16	0,18	0,22	0,23	0,27	0,34	0,26
K (cmol _c dm ⁻³)	Média	93,8	93,8	89,9	113,4	86,0	50,8	97,7	113,3	58,6
	σ	2,2	17,1	29,8	19,5	18,2	15,4	21,6	30,0	13,1
S (mg dm ⁻³)	Média	-	9,17	11,33	15,88	8,56	13,18	7,20	6,85	9,91
	σ	-	1,94	3,78	3,31	2,13	5,40	1,23	3,51	4,72
B (mg dm ⁻³)	Média	-	0,26	0,34	0,45	0,40	0,29	0,32	0,40	0,33
	σ	-	0,05	0,07	0,09	0,06	0,07	0,06	0,06	0,05
Fe (mg dm ⁻³)	Média	-	33,0	47,5	39,8	41,6	40,2	46,1	43,1	27,6
	σ	-	6,36	6,22	2,95	6,06	6,69	6,14	1,75	3,62
Mn (mg dm ⁻³)	Média	-	3,10	2,42	2,15	2,22	2,05	4,46	5,35	1,94
	σ	-	0,77	0,31	0,09	0,19	0,56	0,53	0,66	0,16
Cu (mg dm ⁻³)	Média	-	1,12	1,30	1,13	1,06	0,77	1,58	1,45	0,91
	σ	-	0,15	0,57	0,13	0,39	0,17	0,29	0,09	0,20
Zn (mg dm ⁻³)	Média	-	2,68	1,88	1,99	1,77	1,68	4,27	4,43	2,07
	σ	-	0,72	0,48	0,19	0,49	0,62	0,48	0,70	1,00

pH – Potencial hidrogeniônico; MO – Matéria orgânica; T – capacidade de troca catiônica a pH 7; t – Capacidade de troca catiônica efetiva; SB – Soma de bases; (H+Al) – Acidez potencial; Al – Alumínio; V – Saturação por bases; P-res – Fósforo resina; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; K – Potássio; S – Enxofre; B – Boro; Fe – Ferro; Mn – Manganês; Cu – Cobre; Zn – Zinco.

O solo mais argiloso se encontra no talhão 64 com 73,3 % de argila e o menos argiloso no talhão 98 com 42,7 % de argila (Tabela 2). Latossolos com elevados teores de argila possuem características hídricas de drenagem semelhantes a solos arenosos, devido à estrutura granular que proporciona uma elevada macroporosidade (KER, 2013; TOMASELLA et al., 2000).

Tabela 2: Caracterização físico-hídrica do solo, estimadas para cada talhão

Talhão		T 64	T 91	T 101	T 117	T 131	T 98	T 146	T 148	T 195
Silte (%)	Média	20,27	39,57	32,60	20,52	30,77	17,17	19,33	37,68	19,08
	σ	2,62	2,07	6,70	8,41	6,94	7,97	3,10	3,62	5,67
Argila (%)	Média	73,30	49,82	54,29	68,90	52,62	42,72	72,64	50,14	62,97
	σ	1,99	2,70	2,36	8,70	1,87	11,12	4,10	5,58	8,31
CO (%)	Média	2,31	2,43	2,81	2,46	2,61	2,40	2,28	2,30	2,41
	σ	0,23	0,11	0,34	0,27	0,21	0,28	0,22	0,18	0,29
LL (cm ³ cm ⁻³)	Média	0,33	0,29	0,30	0,32	0,30	0,26	0,32	0,29	0,31
	σ	0,004	0,006	0,007	0,010	0,004	0,064	0,005	0,013	0,011
DUL (cm ³ cm ⁻³)	Média	0,41	0,43	0,43	0,42	0,43	0,39	0,41	0,43	0,42
	σ	0,002	0,003	0,004	0,005	0,007	0,075	0,004	0,003	0,007
Os (cm ³ cm ⁻³)	Média	0,63	0,62	0,63	0,63	0,62	0,58	0,63	0,61	0,62
	σ	0,010	0,003	0,007	0,022	0,013	0,039	0,015	0,006	0,024
Or (cm ³ cm ⁻³)	Média	0,32	0,26	0,27	0,30	0,27	0,22	0,31	0,26	0,28
	σ	0,007	0,011	0,008	0,015	0,009	0,053	0,010	0,022	0,023
CAT (cm ³ cm ⁻³)	Média	0,09	0,14	0,13	0,10	0,13	0,12	0,09	0,14	0,11
	σ	0,005	0,009	0,006	0,014	0,008	0,012	0,008	0,014	0,010

CO – Carbono orgânico; LL – ponto de murcha permanente; DUL – Capacidade de campo; Os – Umidade de saturação; CAT – Capacidade de Água Total (DUL – LL).

A maior produtividade para 1ª safra foi observada no talhão 146, seguido pelo talhão 91. Na 2ª safra, as produtividades médias foram de modo geral menores que na 1ª safra, quando as menores produtividades foram observadas nos talhões 117 e 195 com valores próximos de 6000 kg ha⁻¹. As maiores produtividades médias foram próximas de 8000 kg ha⁻¹ (Tabela 3). Entretanto, o mapa de produtividade indica que alguns talhões não são homogêneos e que zonas de manejo podem ser criadas para melhor representar a variabilidade espacial da propriedade (Figura 1).

Tabela 3: Produtividade média do híbrido de milho P30F53, obtidas de colhedoras nos talhões

Talhão		T 64	T 91	T 101	T 117	T 131	T 98	T 146	T 148	T 195
1ª Safra	kg ha ⁻¹		9657	8171		8325		10131		
2ª Safra	kg ha ⁻¹	7137			5995		8004		7181	5512

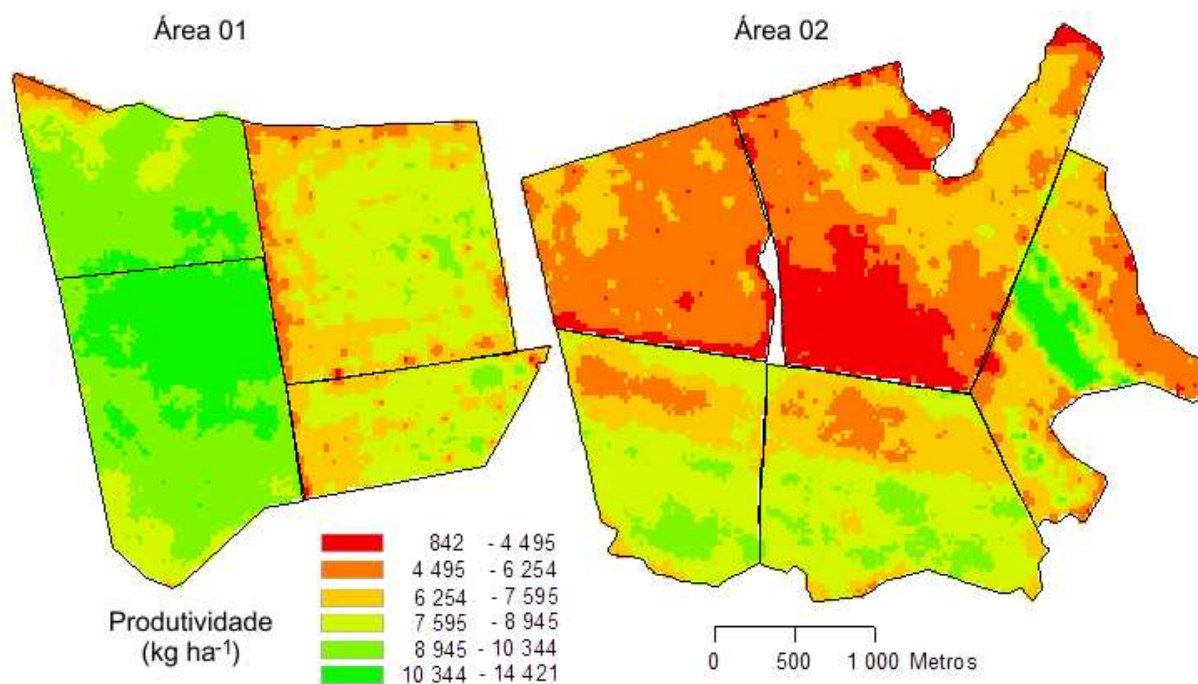


Figura 1: Mapa de produtividade do híbrido P30F53 nos talhões cultivados na 1ª e 2ª safra de 2013/14

Com os valores da variância dos dados de produtividade foi possível realizar um teste para comparar a produtividade dos talhões (Tabela 4). O teste Z foi utilizado devido ao grande número de amostras de produtividade existentes em cada talhão. Na 1ª safra, as médias dos talhões 146 e 91 não diferiram significativamente, assim como as médias dos talhões 101 e 131. Os talhões 101 e 131 apresentaram médias em torno de 8000 kg ha⁻¹ e podem ser considerados talhões de menor produção durante a 1ª safra. Esses talhões foram significativamente diferentes dos talhões 91 e 146 que apresentam um padrão de maior produtividade, próximos de 10000 kg ha⁻¹ com o manejo atual. Na 2ª safra, os talhões 148, 98 e 64 apresentaram médias que não diferem significativamente, já o talhão 195 não diferenciou apenas do talhão 117. Assim, o talhão 195 foi o talhão de menor produtividade, os talhões 98, 148 e 64 foram os mais produtivos e o talhão 117 com uma produção intermediária.

Tabela 4: Comparação da produtividade entre os talhões pelo p-valor do teste z

	1ª safra			2ª safra			
	T-91	T-101	T-131	T-64	T-98	T-117	T-148
T-101	0,006 *			T-98	0,562		
T-131	0,015 *	0,780		T-117 <td>0,122</td> <td>0,067</td> <td></td>	0,122	0,067	
T-146	0,293	< 0,001 *	< 0,001 *	T-148 <td>0,954</td> <td>0,419</td> <td>0,029 *</td>	0,954	0,419	0,029 *
-	-	-	-	T-195 <td>0,020 *</td> <td>0,006 *</td> <td>0,303</td>	0,020 *	0,006 *	0,303
							0,001 *

* Rejeita-se H₀ (μ₁=μ₂) com 95% de probabilidade pelo teste Z.

Ao considerar a produtividade observada na 1ª safra e 2ª safra pode-se presumir que maiores investimentos devem ser feitos nos talhões onde a produtividade foi menor e manter o manejo nos talhões onde a produtividade se encontra em nível elevado. Ou ainda, visto que o manejo no período foi o mesmo, pode-se reduzir os investimentos nos talhões com a produtividade menor, reduzindo assim os custos. Pode-se também tentar obter produtividades ainda maiores dos talhões de alta produção, alocando investimentos em insumos dos talhões menos produtivos. A princípio, essa decisão não é tão simples, pois não é certo que com a redução dos investimentos nos talhões menos produtivos a produção irá se manter, ou mesmo, se ao aumentar o investimento a produção também irá aumentar. Outra fonte de indecisão é que os investimentos podem proporcionar respostas diferentes em função do clima, o que aumenta os riscos nas operações de manejo. Dessa forma, questiona-se qual o potencial produtivo poderia ter cada talhão em diferentes condições climáticas visto que essas normalmente são mais limitantes na 2ª safra.

O híbrido de milho semeado na 1ª safra e na 2ª safra foi o P30F53. O modelo CERES-Maize foi previamente calibrado para esse híbrido em condições de elevado nível de fertilização em um solo com boas características hídricas. Entretanto, sua utilização em uma situação diferente da qual ele foi calibrado requer uma validação. Essa validação consiste em comparar os dados reais com os dados simulados e se a diferença for elevada os modelos devem ser reajustados para a nova situação. É possível ajustar um coeficiente de fertilidade que possibilita aproximação dos dados simulados com os dados reais. Isso é necessário, pois muito dos parâmetros que determinam a produtividade não são consideradas nos modelos durante o processo de calibração. Isso seria equivalente a uma nova calibração, não dos coeficientes genéticos, mas sim dos efeitos diversos não avaliados.

A calibração do híbrido visou obter máxima produção tendo por limitações apenas as condições climáticas e do solo, no que se refere ao seu balanço de água. Os demais manejos foram superdimensionados para altas produções. As produtividades observadas e simuladas apresentaram um bom ajuste após alteração de seus coeficientes de fotossíntese (Figura 3). Esse procedimento é importante para que os modelos possam ser utilizados considerando as mesmas condições de manejo ou a modificação de algum manejo. Entretanto, o intuito deste estudo foi avaliar a produção potencial, considerando como fator limitante apenas os atributos hídricos do solo e climáticos, por se tratar de plantios não irrigados.

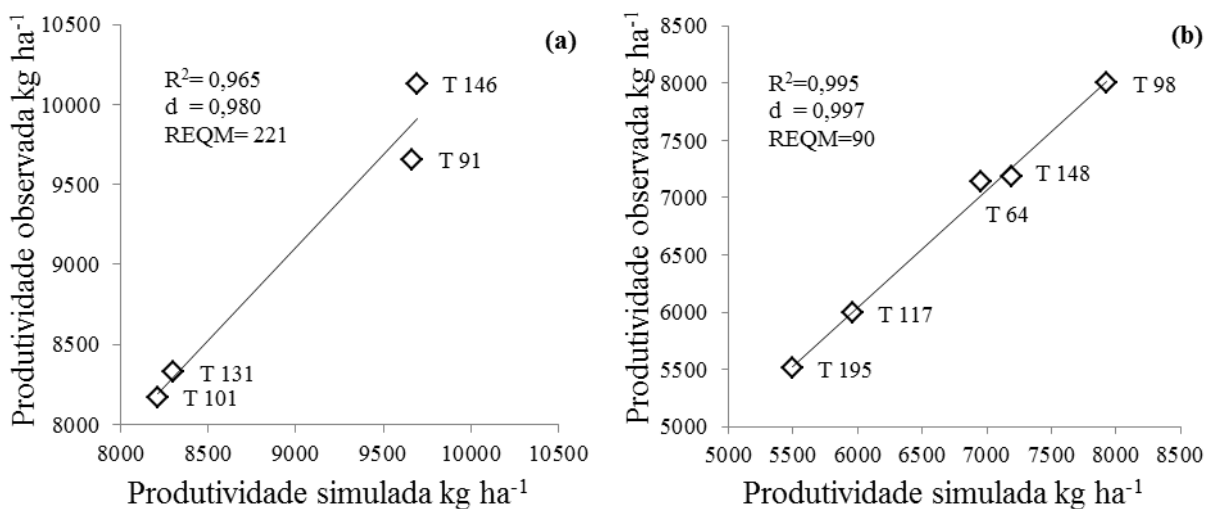


Figura 3: Validação dos modelos com base nos dados observados de produtividade, considerando limitações por água; (a) – Talhões T da 1ª safra; (b) – Talhões T da 2ª safra

Em alguns talhões os intervalos de confiança foram amplos indicando que existe uma grande variabilidade da produtividade no interior do talhão (Figura 4). Nesses talhões, é recomendada a investigação de ocorrência de dependência espacial para verificar a possibilidade de estratificar ainda mais a área. A produtividade nos talhões 64 e 98 da 2ª safra, assim como os talhões 146 da 1ª safra, apresentam produtividade observada muito próxima da produtividade potencial. Isso indica que o manejo dessas áreas se encontra próximo do ideal, podendo investigar o uso excessivo de insumos com intenção de otimizá-los. Entretanto, os talhões 91, 101 e 131 da 1ª safra, podem produzir ainda mais, assim como os talhões 117, 148 e 195 na 2ª safra. Investimentos realizados nesses talhões provavelmente terão reflexos positivos na produtividade. Dessa maneira, o gerente agrícola pode utilizar essa informação para decidir em quais talhões investir mais recursos.

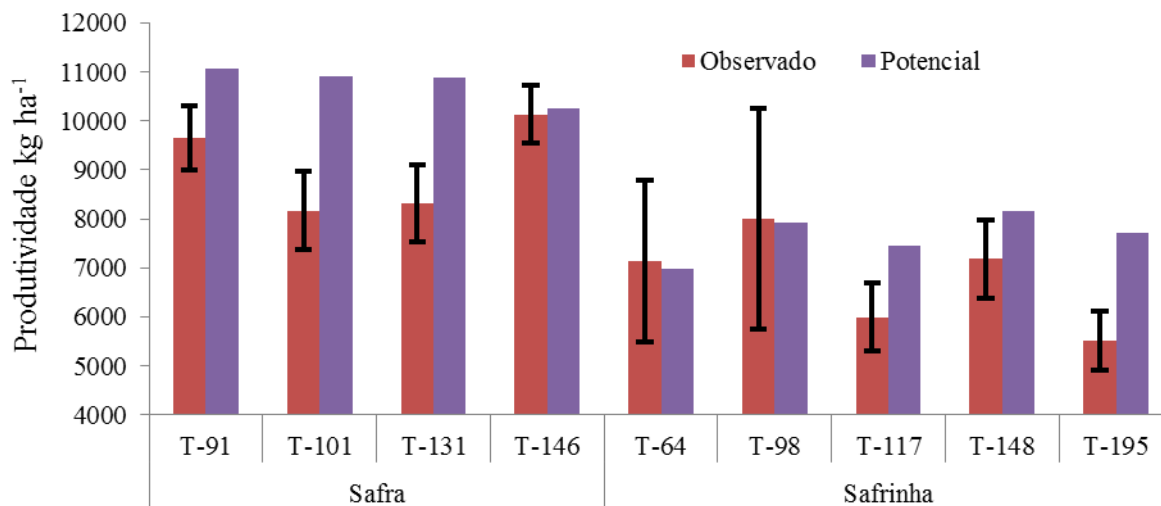


Figura 4: Comparação entre a produtividade observada e a produtividade potencial simulada para os talhões. As barras pretas verticais indicam o intervalo de confiança para a média considerando 95% de probabilidade.

Na 1ª safra, os talhões 101 e 131 apresentam maior potencial de resposta a investimentos e na 2ª safra, o talhão 195 foi o de maior potencial de resposta a investimentos. Esse tipo de análise é útil para a tomada de decisões no gerenciamento agrícola. As causas da menor produtividade podem ser muitas: falhas na semeadura, pragas, doenças, impedimentos físicos ou químicos do solo ao desenvolvimento radicular, acidez do solo e disponibilidade de micronutrientes, correção do solo com calagem, fosfatagem, potassagem, baixos níveis de adubação ou mesmo estresse hídrico durante o ciclo de vida da planta.

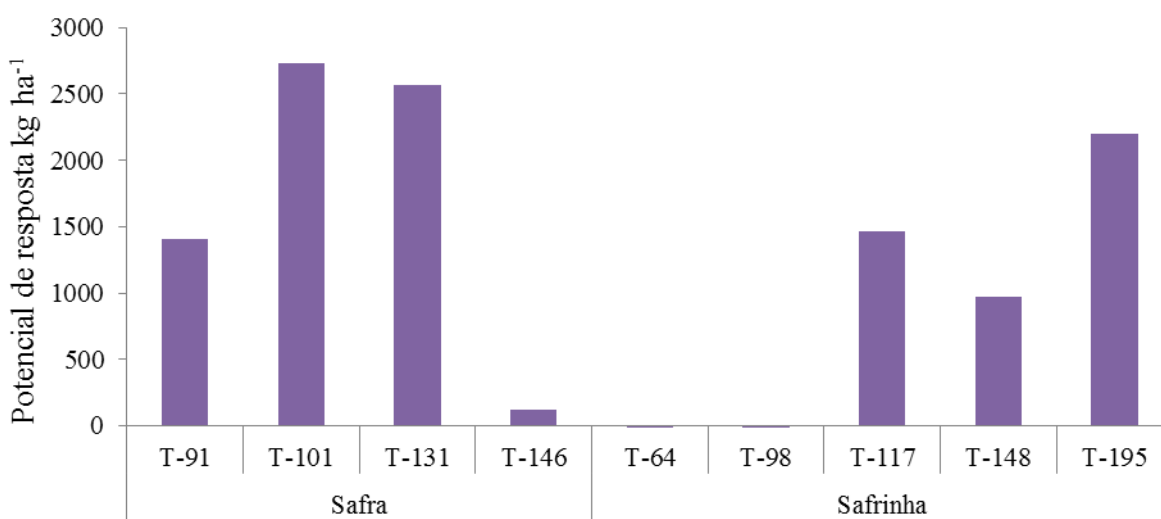


Figura 5: Potencial de melhoria na produtividade de grãos nos talhões.

Ao considerar 35 anos de simulação para a mesma condição de manejo, no que se refere ao híbrido, data de plantio e densidade de plantas, tem-se a produtividade potencial que representa o histórico climático da região. A produtividade potencial para 1ª safra foi semelhante nos quatro talhões, com médias variando entre 11000 e 12000 kg ha⁻¹ (Figura 6). Na 2ª safra, as produtividades potenciais foram menores e apresentaram maiores dispersões comparadas à 1ª safra, com médias variando entre 4000 e 8000 kg ha⁻¹. Em anos com condições climáticas boas, a produtividade na 2ª safra pode render até 12000 kg ha⁻¹ e em condições climáticas ruins pode render até 2000 kg ha⁻¹ segundo os resultados da simulação.

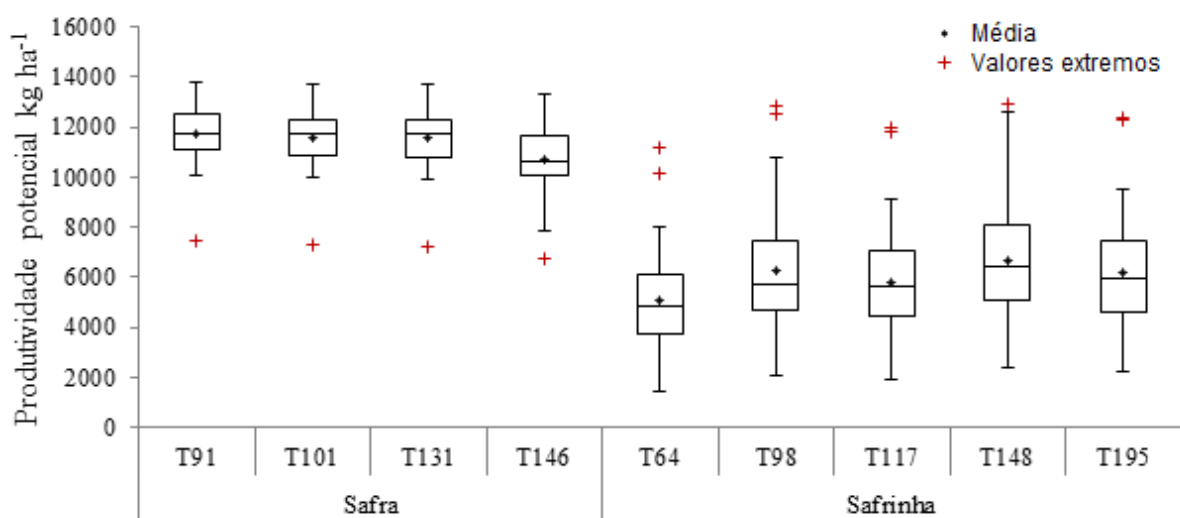


Figura 6: Distribuição de produtividades potenciais nos talhões (T) nos 35 anos de histórico climático.

Se o produtor optar em manter o manejo, a produtividade pode oscilar na 1ª safra nos talhões 101 e 131, entre 8000 e 9000 kg ha⁻¹, no talhão 91, entre 10000 a 11000 kg ha⁻¹ e no talhão 146, entre 10000 a 12000 kg ha⁻¹, considerando os intervalos entre o 1º quartil e o 3º quartil. Na 2ª safra as produções médias simuladas são mais semelhantes às potenciais oscilando entre 4000 a 7000 kg ha⁻¹ (Figura 7).

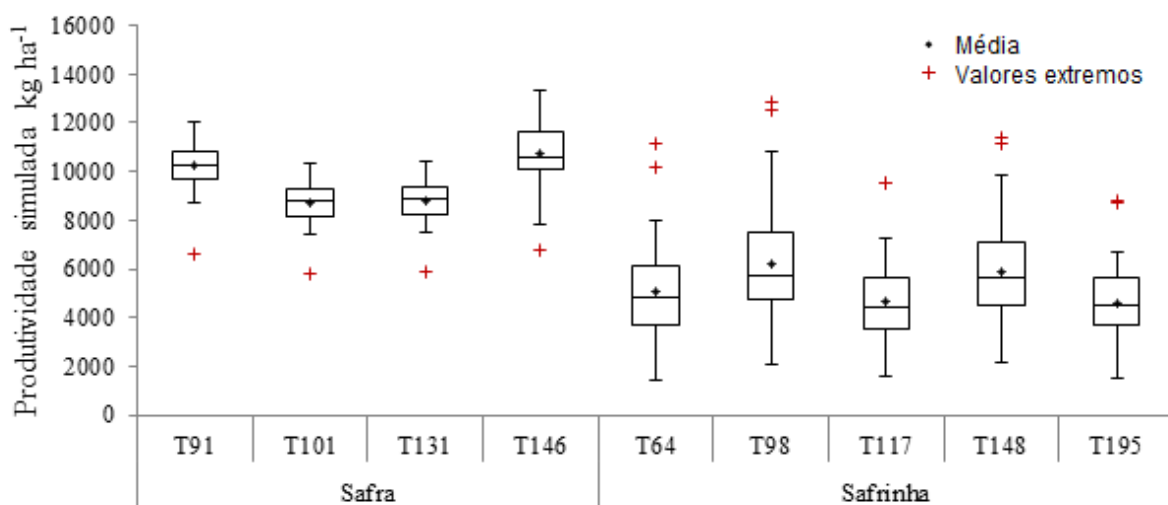


Figura 7: Distribuição dos valores da produtividade simulada nos talhões, mantendo o mesmo manejo em 35 anos de histórico climático.

As condições climáticas influenciam as expectativas de produtividade. Dessa forma, a data de semeadura representa uma operação de manejo determinante no potencial de produção de cada talhão. Isso porque a produtividade será maior ou menor em função da disponibilidade hídrica para plantios de sequeiro. Uma das principais dificuldades em tomada de decisão diz respeito ao momento da semeadura, pois características técnicas, econômicas e de logística devem ser consideradas. Essas escolhas são decisivas e uma estimativa do risco para cada situação é de grande importância na hora de tomar uma decisão.

Em grandes extensões de terra, a semeadura dificilmente é realizada em um único dia, mesmo com o uso de máquinas com elevada capacidade operacional. Por esse motivo, uma expectativa de produção foi criada com histórico climático de 35 anos nas quinzenas de outubro e novembro, com o intuito de estimar os riscos (Figura 8). Essa análise também foi realizada na segunda quinzena de janeiro e em fevereiro para a semeadura da 2ª safra.

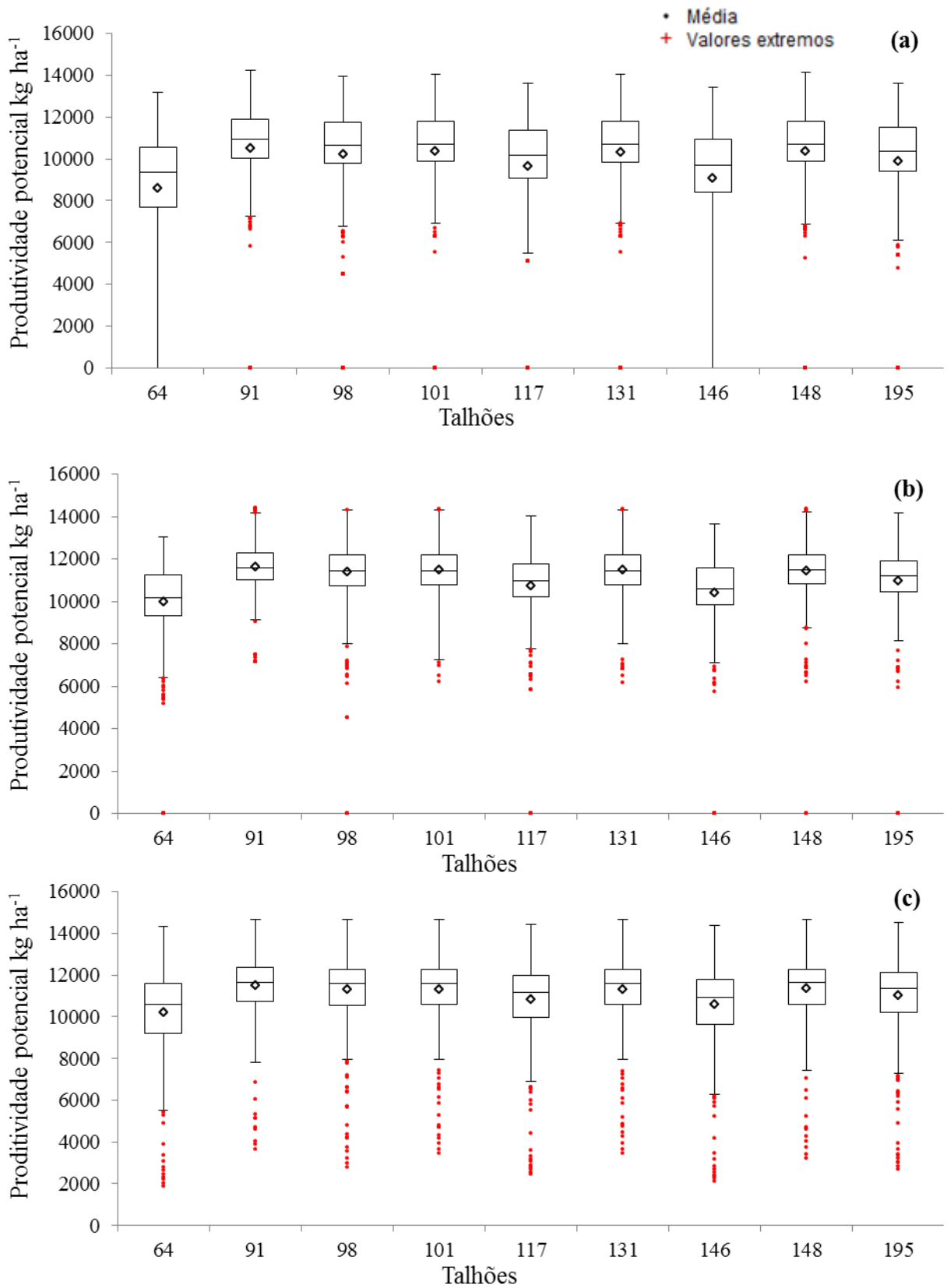


Figura 8: Distribuição dos valores da produtividade potencial para o híbrido P30F53 em 35 anos de histórico climático: (a) - semeado na 1^a quinzena de outubro; (b) - semeado na 2^a quinzena de outubro; (c) - semeado na 1^a quinzena de novembro.

Na 1ª safra, a média da produtividade potencial foi semelhante em todos os talhões e períodos, variando entre 10000 a 12000 kg ha⁻¹ nos 1º e 3º quartis. Contudo, entre os períodos de semeadura observam-se diferentes frequências na ocorrência de baixas produtividades ou produtividade zero. Essas perdas de safras podem ser atribuídas a não germinação devido ao estresse hídrico inicial elevado. Na semeadura na primeira quinzena de outubro todos os talhões apresentaram ocorrência de produção zero, e nos talhões 64 e 146, a ocorrência de produção zero tem maior probabilidade, pois se encontra no intervalo de bigode do gráfico de caixa. Em função dos riscos de perda total em uma operação de alto custo, a semeadura realizada na primeira quinzena de outubro não é recomendada. Na segunda quinzena de outubro os talhões 91, 101 e 131 não apresentaram riscos de produtividade zero e podem ser semeados nesse período. Na primeira quinzena de novembro, nenhum dos talhões apresentou ocorrências de produção zero, assim, todos os talhões podem ser semeados nesse período. Essa análise pode ser um critério para decidir em quais talhões se devem iniciar a semeadura.

A produtividade potencial pode ser estimada diariamente em todos os anos da série temporal para definir uma janela de semeadura para cada talhão. Simulações diárias para os talhões 64 e 91 foi realizada, com a intenção de exemplificar essa análise (Figura 9). Pode-se inferir que a semeadura da 1ª safra no talhão 64 seria menos arriscada quando iniciada a partir do dia 25 de outubro. No talhão 91, a semeadura poderia se iniciar a partir do dia 13 de outubro sem risco de não germinação, segundo resultado da simulação para 35 anos de dados climáticos.

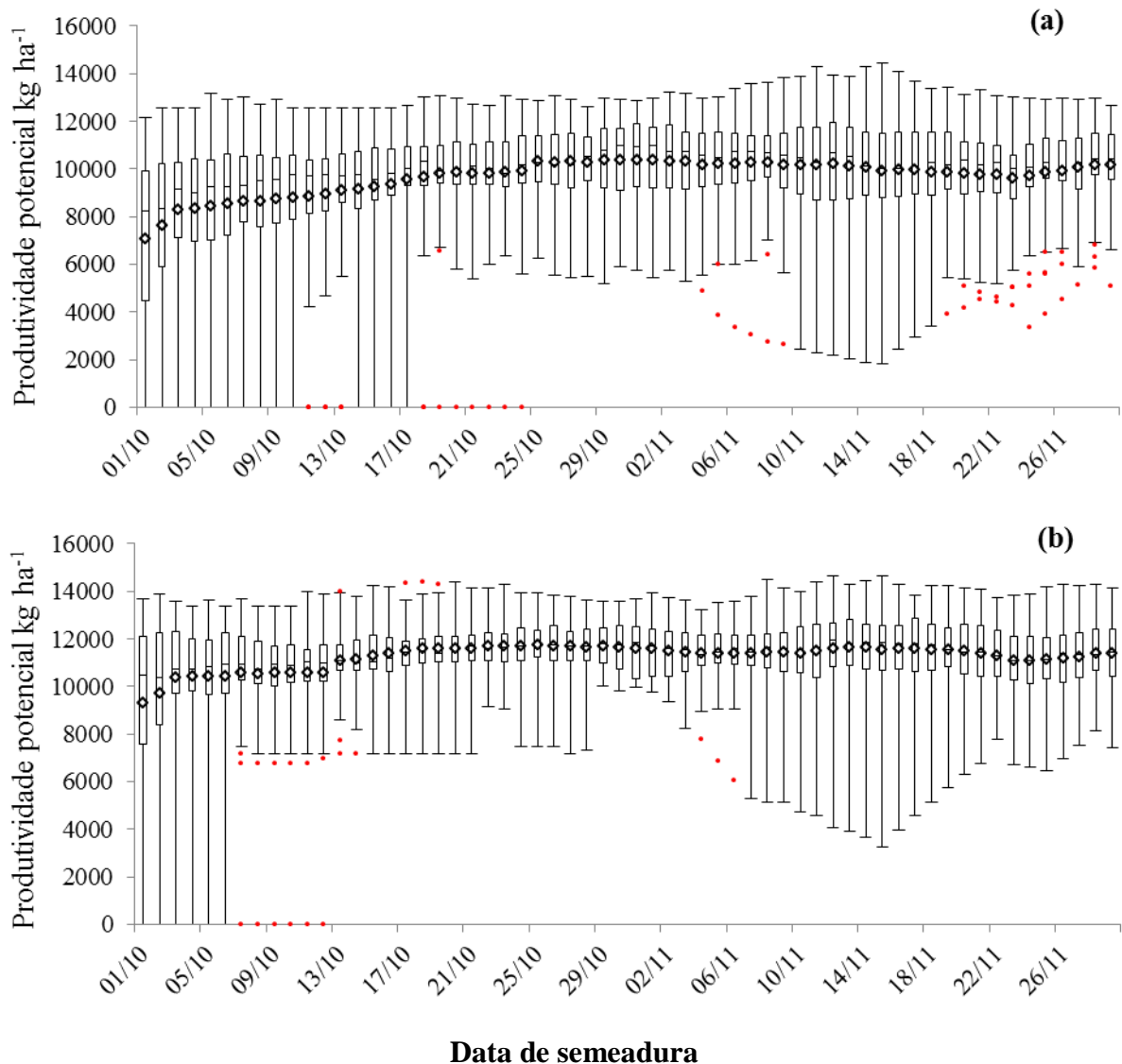


Figura 9: Risco de produção em função da data de semeadura: (a) - Talhão 64; (b) – Talhão 91.

A 2^a safra na região normalmente é semeada no início de fevereiro, mas a semeadura pode começar ainda em janeiro e se estender até o fim de fevereiro. A análise do risco de plantio para a 2^a safra foi realizada considerando a última quinzena de janeiro, a primeira quinzena de fevereiro e a segunda quinzena de fevereiro (do dia 15 ao último dia de fevereiro). Essa análise é apresentada na Figura 10 para todos os talhões. Observa-se que o potencial produtivo médio foi menor à medida que o período de semeadura foi mais tardio e o risco de produtividades baixas ou zero apresentou aumento.

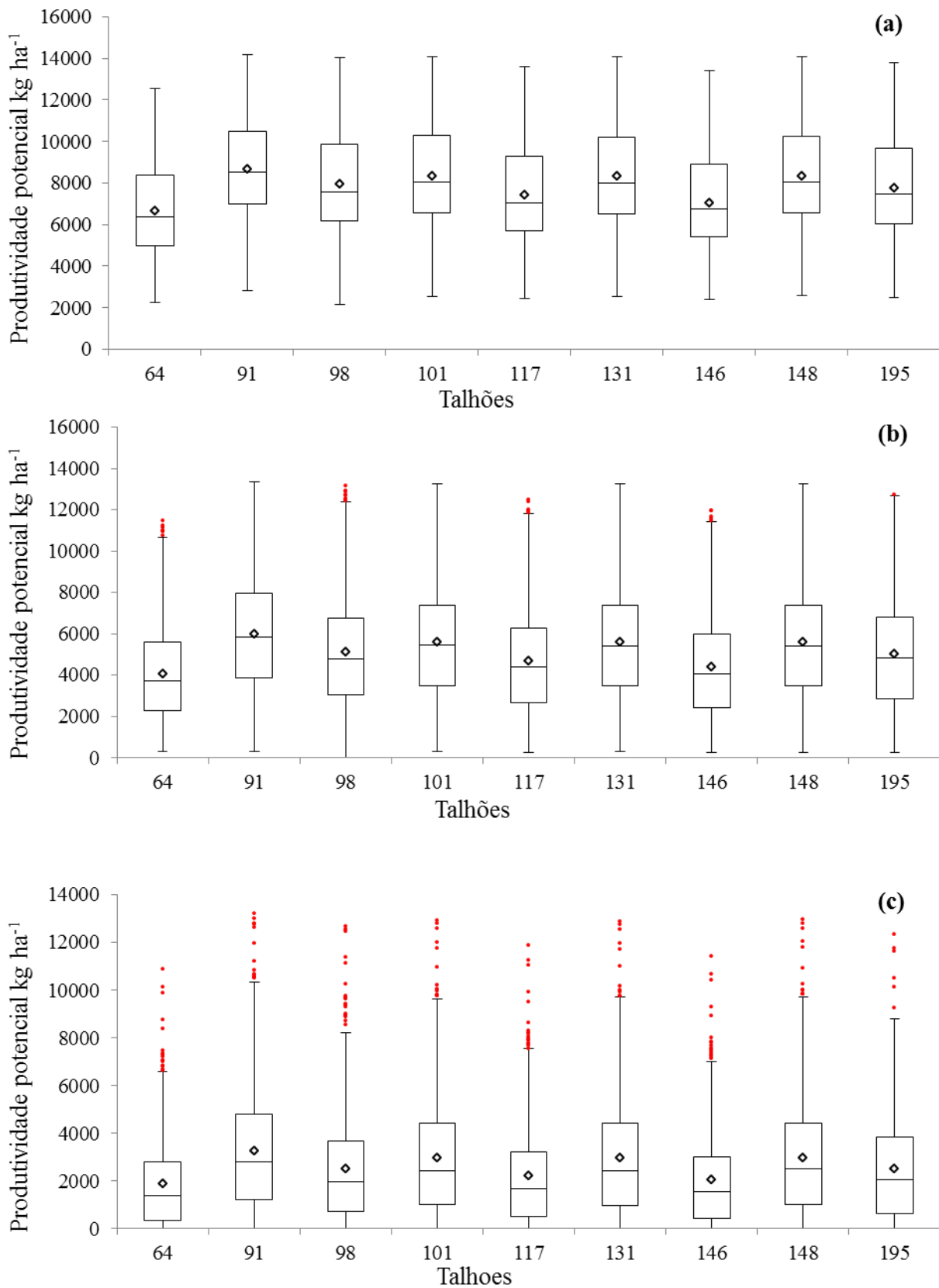


Figura 10: Distribuição dos valores de produtividade potencial para o híbrido P30F53 em 35 anos de histórico climático: (a) - semeado na 2ª quinzena de janeiro; (b) - semeado na 1ª quinzena de fevereiro; (c) - semeado na 2ª quinzena de fevereiro.

A análise diária da produção potencial foi realizada para os talhões 64 e 91, para exemplificar a tomada de decisão quanto à janela de semeadura para a 2ª safra (Figura 11). A produtividade potencial decresce à medida que a data de plantio é mais tardia para os dois talhões. Para o talhão 64 a partir do dia 16 e para o talhão 91 a partir do dia 18 existe maior possibilidade de perda total em função da cultura não completar o seu ciclo. Essa mesma análise pode ser feita para todos os talhões ou zonas de manejo de uma propriedade a fim de avaliar os riscos da data de semeadura e ordenar a sequência de talhões a serem semeados ou mesmo a decisão de não semear em função da data. Também se observa que no talhão 91, produtividades potenciais maiores são mais prováveis.

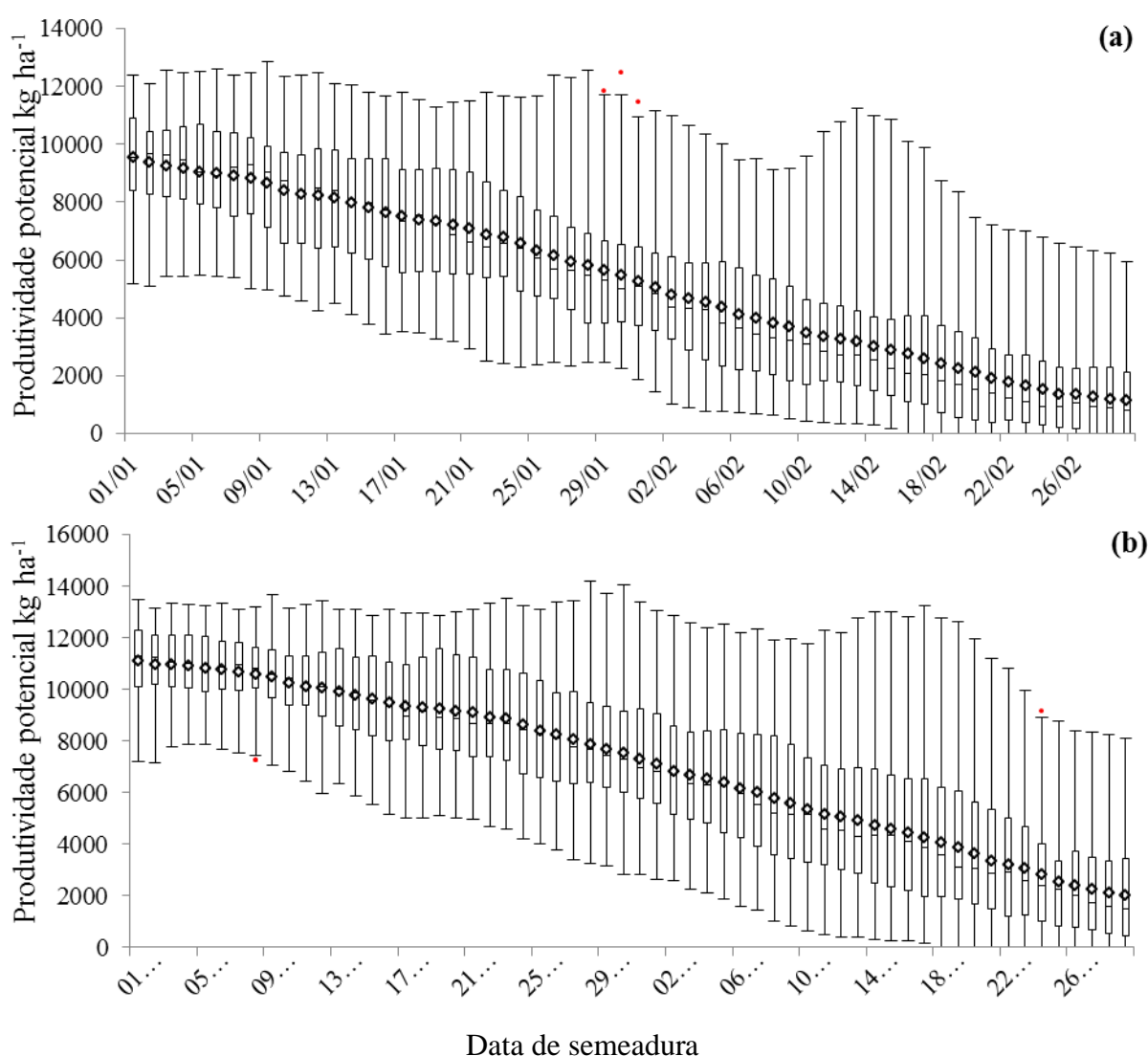


Figura 11: Produtividade simulada em função da data de semeadura: (a) - Talhão 64; (b) – Talhão 91.

Para recomendação de fertilizantes foi considerada como referência, as produtividades potenciais estimadas para a semeadura da 1ª safra na 1ª quinzena de novembro

e para a semeadura da 2ª safra na 1ª quinzena de fevereiro, segundo resultados das simulações para 35 anos de dados climáticos. Nas Tabelas 5 e 6 o potencial produtivo é agrupado em três classes, em que a primeira classe representa os anos ruins representados pelo intervalo entre o menor potencial e o primeiro quartil. Os anos normais são representados pelos potenciais de produtividade entre o primeiro quartil e terceiro quartil. Os anos bons são representados pelos potenciais produtivos entre o 3º quartil e o máximo potencial produtivo observado.

Tabela 5: Expectativa de produtividade para o híbrido P30F53 semeado na 1ª quinzena de novembro

Talhões	Expectativa de produtividade (10^3 kg ha^{-1})								
	Anos ruins			Anos normais			Anos bons		
64	1,8	-	9,2	9,2	-	11,5	11,5	-	14,3
91	3,6	-	10,7	10,7	-	12,3	12,3	-	14,6
98	2,7	-	10,5	10,5	-	12,2	12,2	-	14,6
101	3,4	-	10,5	10,5	-	12,2	12,2	-	14,6
117	2,4	-	9,9	9,9	-	11,9	11,9	-	14,4
131	3,4	-	10,5	10,5	-	12,2	12,2	-	14,6
146	2,1	-	9,6	9,6	-	11,8	11,8	-	14,3
148	3,2	-	10,5	10,5	-	12,2	12,2	-	14,1
195	2,6	-	10,2	10,2	-	12,1	12,1	-	14,5

Tabela 6: Expectativa de produtividade para o híbrido P30F53 semeado na 1ª quinzena de fevereiro

Talhão	Expectativa de produtividade (10^3 kg ha^{-1})								
	Anos ruins			Anos normais			Anos bons		
64	0,2	-	2,2	2,2	-	5,5	5,5	-	11,4
91	0,2	-	3,8	3,8	-	7,9	7,9	-	13,3
98	0,0	-	3,0	3,0	-	6,7	6,7	-	13,1
101	0,2	-	3,4	3,4	-	7,3	7,4	-	13,2
117	0,2	-	2,6	2,6	-	6,2	6,2	-	12,4
131	0,2	-	3,4	3,4	-	7,3	7,3	-	13,2
146	0,2	-	2,4	2,4	-	5,9	5,9	-	11,9
148	0,2	-	3,4	3,4	-	7,3	7,3	-	13,2
195	0,2	-	2,8	2,8	-	6,7	6,7	-	12,7

As interpretações da análise de solo são organizadas em manuais estaduais e regionais constituindo-se de tabelas de interpretação e recomendações para culturas em específico. Durante a interpretação é importante observar o extrator utilizado na análise do elemento ou nutriente, por exemplo, para o fósforo pode se utilizar o extrator Mehlich 1 e resina de troca, assim como para o potássio. Também é importante observar as unidades de medidas relacionadas aos nutrientes “ $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ”, “ $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ”, “ mg dm^{-3} ”, “%”, entre outras. Além disso, deve-se analisar tabelas de interpretações e recomendações geradas para a

região onde a cultura será implantada. Para a região de cerrado do Centro-Oeste pode-se utilizar como referência a coletânea de estudos organizados em Sousa e Lobato (2004)

Uma referência para interpretação de análise de solo para fósforo na região do cerrado é apresentada por Souza et al (1987), que utiliza o extrator de Mehlich 1. Para análise de fósforo utilizando extrator de resina de troca, pode se usar como referência de interpretação proposta no trabalho de Lins (1987) adaptado e apresentado por Sousa e Lobato (2004). Segundo os autores, os níveis de fósforo no solo podem ser interpretados em cinco classes, que são muito baixo, baixo, médio, adequado e alto. No trabalho de Lins (1987), o fósforo é considerado em sistema de sequeiro e sistemas irrigado, utilizando o extrator de resina de troca. Já o trabalho de Souza et al (1987), as classes de fósforo obtidas pelo extrator Mehlich 1 é função do teor de argila. A adubação fosfatada para a região consiste no princípio da adubação corretiva que visa elevar os teores de fósforo do solo do nível muito baixo, baixo e médio, para nível adequado, considerando o teor de argila. A interpretação dos níveis de potássio na região do cerrado também é feita nas mesmas cinco classes, considerando a situação em que o solo apresenta uma CTC a pH 7, menor ou maior que $4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, para o extrator Mehlich 1. O pH do solo em CaCl_2 se encontra adequado entre 4,9 a 5,5 e a saturação por base entre 36 e 60 %. Os níveis adequados de cálcio devem estar entre 1,5 a $7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, os níveis de magnésio entre 0,5 a $2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e a saturação por alumínio deve ser inferior a 20 %.

Para a cultura do milho a recomendação de adubação considera quatro classes de expectativa de produtividade, de 6000, 8000, 10000 e 12000 kg ha^{-1} . A recomendação de N na semeadura é 30 kg ha^{-1} para expectativa de produtividade acima de 6 toneladas e 20 kg ha^{-1} de N para expectativa de produtividade inferior. Para o fósforo de plantio, a recomendação é 60, 80, 100 e 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 , para as produtividades de 6000, 8000, 10000 e 12000 kg ha^{-1} , a partir dos níveis adequados de fósforo no solo. Para o nível alto de fósforo no solo a recomendação é de 30, 40, 50 e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 , para as produtividades de 6000, 8000, 10000 e 12000 kg ha^{-1} respectivamente. Para o potássio de plantio, a recomendação é de 60 kg ha^{-1} de K_2O , para todos os níveis de expectativa de produtividade, quando a classificação é adequada ou alta a recomendação é de 30, 40, 50 e 60 kg ha^{-1} de K_2O , para as produtividades de 6000, 8000, 10000 e 12000 kg ha^{-1} respectivamente. Já adubação de cobertura considerando o nitrogênio é 40, 70, 130 e 180 kg ha^{-1} de N, também para as expectativas de produtividade de 6000, 8000, 10000 e 12000 kg ha^{-1} , respectivamente. A dose de K_2O

recomendada em cobertura é 0, 30, 60, e 90 kg ha⁻¹, considerando as mesmas expectativas de produtividade (SOUSA; LOBATO, 2004).

A partir do valor médio da expectativa de produtividade nos intervalos que representam anos ruins, normais e bons, foi gerada a recomendação de adubação de plantio e cobertura para os talhões avaliados. Para o plantio na 1^a quinzena de novembro a recomendação de adubação de plantio foi a mesma para os anos normais e para os anos bons em todos os talhões, sendo essa a recomendação para elevadas produtividades (Tabela 7). Cabe lembrar que a classificação dos nutrientes foi alta para fósforo e potássio em todos os talhões. Para os anos ruins, a recomendação de adubação de plantio foi menor e os talhões 64 e 146 apresentaram expectativa de produtividade mais baixa, sendo também menor a adubação recomendada para os mesmos nessa situação (Tabela 8).

Tabela 7: Recomendação de adubação de plantios em função da expectativa de produtividade apresentada na tabela 5 para semeadura na 1^a quinzena de novembro, segundo Sousa e Lobato (2004), em kg ha⁻¹

Talhões	Anos ruins			Anos normais			Anos bons		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
64	20	30	30	30	60	60	30	60	60
91	30	40	40	30	60	60	30	60	60
98	30	40	40	30	60	60	30	60	60
101	30	40	40	30	60	60	30	60	60
117	30	40	40	30	60	60	30	60	60
131	30	40	40	30	60	60	30	60	60
146	20	30	30	30	60	60	30	60	60
148	30	40	40	30	60	60	30	60	60
195	30	40	40	30	60	60	30	60	60

As recomendações de adubação de plantio, para expectativa de produtividade do milho semeado na 1^a quinzena de fevereiro, foram menores devido ao menor potencial produtivo observado nesse período. Para os anos ruins e para os anos bons, a recomendação foi a mesma em todos os talhões. Para o cenário otimista dos anos bons, a recomendação da adubação de plantio foi maior como apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Recomendação de adubação de plantios em função da expectativa de produtividade apresentada na tabela 6 para semeadura na 1ª quinzena de fevereiro segundo Sousa e Lobato (2004), em kg ha⁻¹

Talhão	Anos ruins			Anos normais			Anos bons		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
64	20	30	30	20	30	30	30	50	50
91	20	30	30	20	30	30	30	60	60
98	20	30	30	20	30	30	30	50	50
101	20	30	30	20	30	30	30	60	60
117	20	30	30	20	30	30	30	50	50
131	20	30	30	20	30	30	30	60	60
146	20	30	30	20	30	30	30	50	50
148	20	30	30	20	30	30	30	60	60
195	20	30	30	20	30	30	30	50	50

Uma diferença considerável entre os cenários climáticos e o período de semeadura foi observada para o manejo da adubação de cobertura (Tabela 9). As recomendações provenientes de tabelas regionais de interpretação e prescrição apresentam o inconveniente da grande amplitude dos intervalos entre as classes. Para a 1ª safra a decisão se resume em duas opções, investir no cenário pessimista dos anos ruins ou nos cenários mais prováveis dos anos normais que requer o mesmo manejo dos cenários otimistas dos anos bons. Da mesma forma, para a 2ª safra têm-se duas opções de manejo, porém o mesmo manejo para os cenários ruins e normais e um maior investimento para a condição de otimismo. A sugestão mais lógica seria considerar os cenários dos anos normais, devido a maior probabilidade de sua ocorrência. Entretanto, o gestor pode tomar essa decisão considerando também as condições de mercado, no que se refere à negociação prévia do preço do milho, custo dos fertilizantes e a condição financeira da empresa.

Tabela 9: Recomendação de adubação de cobertura em função da expectativa de produtividade apresentadas nas tabelas 5 e 6, segundo Sousa e Lobato (2004), em kg ha⁻¹

Talhão	1ª quinzena de novembro						1ª quinzena de fevereiro					
	Anos ruins		Anos normais		Anos bons		Anos ruins		Anos normais		Anos bons	
	N	K ₂ O	N	K ₂ O	N	K ₂ O	N	K ₂ O	N	K ₂ O	N	K ₂ O
64	40	0	180	90	180	90	40	0	40	0	130	60
91	70	30	180	90	180	90	40	0	40	0	180	90
98	70	30	180	90	180	90	40	0	40	0	130	60
101	70	30	180	90	180	90	40	0	40	0	180	90
117	70	30	180	90	180	90	40	0	40	0	130	60
131	70	30	180	90	180	90	40	0	40	0	180	90
146	40	0	180	90	180	90	40	0	40	0	130	60
148	70	30	180	90	180	90	40	0	40	0	180	90
195	70	30	180	90	180	90	40	0	40	0	130	60

Com os níveis dos nutrientes do solo classificados como adequados, a recomendação de fertilizantes tem apenas o intuito de reposição dos nutrientes exportados. Dessa forma é coerente que a recomendação seja feita a partir da expectativa de produtividade de cada talhão. Essa expectativa, para ser mais acertada deve considerar o período da semeadura que implica nas variações das condições climáticas e as características hídricas do solo para os plantios de sequeiros. As características hídricas podem variar entre as áreas produtivas de uma fazenda, proporcionando também, variações na produtividade potencial dos mesmos. A modelagem de culturas representa uma ferramenta que possibilita a estimativa de produtividade nessa situação. A recomendação de adubação considerando a exportação pela planta é mais coerente com a abordagem da agricultura de precisão, pois permite um refinamento nas recomendações. Em casos em que o solo não se encontra em níveis adequados dos nutrientes, a recomendação pode considerar as tabelas de referência para obter a dose de adubação corretiva e somar a esse valor a expectativa de exportação. Para definir a estimativa de exportação de N-P-K, utilizou-se o ponto central da referência apresentada por Malavolta (1979) e Raij, (1996), que também é apresentada por Souza et al (1987). Os fatores de conversão também são obtidos no trabalho de Souza et al (1987) (Tabela 10). As recomendações de fertilizantes foram estimadas para a 1ª safra e 2ª safra a partir as expectativas de exportação (Figura 11 e 12).

Tabela 10: Parâmetros de exportação utilizados para recomendação de adubação

	N	P	K
Exportado (kg t ⁻¹)	20,0	5,0	5,5
Forma de utilização	N	P₂O₅	K₂O
Fator de conversão	1	0,437	0,83
Exportado (kg t ⁻¹)	20	11,4	6,6

Tabela 11: Recomendação de fertilizantes para semeadura na 1ª quinzena de novembro a partir da expectativa de exportação, em kg ha⁻¹

Talhões	Anos ruins			Anos normais			Anos bons		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
64	111	63	37	208	119	69	259	148	86
91	144	82	48	231	132	76	270	155	89
98	133	76	44	228	131	76	269	154	89
101	140	80	46	228	131	76	269	154	89
117	124	71	41	219	125	73	264	151	87
131	140	80	46	228	131	76	269	154	89
146	118	67	39	214	123	71	262	150	87
148	138	79	46	229	131	76	269	154	89
195	129	74	43	223	128	74	266	152	88

Tabela 12: Recomendação de fertilizantes para semeadura na 1ª quinzena de fevereiro a partir da expectativa de exportação, em kg ha⁻¹

Talhões	Anos ruins			Anos normais			Anos bons		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
64	25	14	8	78	45	26	170	97	56
91	42	24	14	118	68	39	213	122	71
98	30	17	10	98	56	32	199	114	66
101	37	21	12	109	62	36	206	118	68
117	29	16	10	89	51	30	188	107	62
131	37	21	12	108	62	36	206	118	68
146	27	15	9	84	48	28	179	103	59
148	37	21	12	109	62	36	206	118	68
195	31	18	10	96	55	32	195	112	65

Ao utilizar a expectativa de exportação dos nutrientes, as aplicações podem ser parceladas no plantio e na cobertura em função das características de cada nutriente como salinidade e mobilidade no solo. Tem sido adotado com frequência o conceito de adubação do sistema soja/milho. Nesse caso os fertilizantes com maior efeito residual são aplicados no início da 1ª safra, em doses elevadas que visam satisfazer a demanda das duas culturas a serem implantadas. Relata-se que essa operação seja feita em aplicações superficiais com aplicadores a lanço, pois apresentam elevada capacidade operacional e permite aplicação a taxa variada. Essa estratégia reduz os custos com mecanização e possibilita uma semeadura mais ágil da 2ª safra de milho. Durante a 2ª safra aplica-se somente o fertilizante nitrogenado em uma ou duas coberturas a lanço. Para a adubação nitrogenada deve-se considerar também o resíduo de N orgânico que a palhada da soja fornece para mineralização durante o ciclo do milho na 2ª safra.

Os modelos de crescimento de planta apresentam um elevado potencial de utilização para o gerenciamento de propriedades. Sua utilização em condições potenciais de sequeiro pode ser limitada pela precisão das estimativas das características hídricas do solo e pela

construção trabalhosa dos arquivos de solo. À medida que a pesquisa avança para amenizar esses problemas, as possibilidades de utilização em agricultura de precisão devem aumentar. Com o surgimento de interfaces mais otimizadas a grandes volumes de dados de entradas, pode-se pensar que as áreas homogêneas utilizadas nos modelos sejam na escala de m², o que possibilita a integração das previsões a aplicativos a taxa variada.

4.4 CONCLUSÕES

O modelo CERES-Maize do DSSAT (Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia) foi capaz de estimar a produtividade potencial do milho para diferentes condições de clima e solo. Essa informação possibilita tomar decisões quanto aos recursos investidos na propriedade.

Em área com baixa produtividade observada e elevado potencial, recomenda-se aumentar os investimentos e melhorar o processo produtivo, pois a expectativa de resposta é grande. Em áreas cuja produtividade obtida se encontra próximo da produtividade potencial, não se justifica aumentar os investimentos, pois a expectativa de resposta é pequena e deve se avaliar a possibilidade de reduzir ou compatibilizar os investimentos com a produtividade.

As tabelas de referências de adubação podem ser utilizadas para corrigir os níveis de nutrientes do solo para adequado ao desenvolvimento da cultura. A produtividade potencial simulada pode ser utilizada para recomendar fertilizantes com base em tabelas de recomendação, ou pela expectativa de exportação dos nutrientes. A utilização da expectativa de exportação de nutrientes pode ser considerada mais adequada a agricultura de precisão, pois permite maior discriminação entre as áreas.

4.5 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro. À Universidade Federal de Viçosa – UFV e à Universidade Federal de Goiás, Regional Jataí – UFG que possibilitaram a realização desse trabalho.

4.6 LITERATURA CITADA

ANDRADE, C. D. L. T.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; BRITO, R. A. L.; RESENDE, M. **Viabilidade e Manejo da Irrigação da Cultura do Milho**. Circular Técnica 85. Embrapa, Sete Lagoas, MG. 2006

GIJSMAN, A. J.; JAGTAP, S. S.; JONES, J. W. Wading through a swamp of complete confusion: how to choose a method for estimating soil water retention parameters for crop models. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 1-2, p. 77-106, 2002.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 108, n. 3, p. 225-230, 1982.

KER, J. C. LATOSSOLOS DO BRASIL: UMA REVISÃO. **Revista Geonomos**, v. 5, n. 1, p.17-40, 2013.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der erde*. Gotha: verlag justus perthes. **Wall-map 150cmx200cm**, 1928.

LINS, I. D. G. **Improvement of soil test interpretations for phosphorus and zinc**. Ph. D. thesis. Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 1987. 317 p.

LIU, J. A GIS-based tool for modelling large-scale crop-water relations. **Environmental Modelling and Software**, v. 24, n. 3, p. 411-422, 2009.

MALAVOLTA, E. **Potássio, magnésio e enxofre nos solos e culturas brasileiras**. Instituto da Potassa & Fosfato, 1979. 162p.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônômico & Fundação IAC, **Boletim técnico**, v. 100. 1996. 285p.

RESOP, J. P.; FLEISHER, D. H.; WANG, Q.; TIMLIN, D. J.; REDDY, V. R. Combining explanatory crop models with geospatial data for regional analyses of crop yield using field-scale modeling units. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 89, p. 51-61, 2012.

SOLER, C. M. T. **Uso do modelo CERES-Maize para previsão de safra do milho "Safrinha"**. 2004. 146 (Doctor Scientiae). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo

SOLER, C. M. T.; SENTELHAS, P. C.; GERRIT HOOGENBOOM. The impact of El Niño Southern Oscillation phases on off-season maize yield for a subtropical region of Brazil. **International Journal of Climatology**, p. n/a-n/a, 2009.

SOLER, C. M. T.; SENTELHAS, P. U.; HOOGENBOOM, G. Application of the CSM-CERES-maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. **European Journal of Agronomy**, v. 27, n. 2-4, p. 165-177, Oct 2007.

SOUSA, D. D.; LOBATO, E. Calagem e adubação para culturas anuais e semiperenes. **SOUSA, DM G. de; LOBATO, E.(Eds.). Cerrado: correção do solo e adubação**, v. 2, p. 283-315, 2004.

SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416p.

SOUZA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; LOBATO, E. **Interpretação de análise de terra e recomendação de adubos fosfatados para as culturas anuais nos cerrados**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1997. 7p. (EMBRAPA-CPAC. Comunicado técnico, 51)

THORP, K. R.; DEJONGE, K. C.; KALEITA, A. L.; BATCHELOR, W. D.; PAZ, J. O. Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 64, n. 2, p. 276-285, 2008.

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, 2000.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predictin the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 892–898, 1980.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. Sample adequately to estimate variograms of soil properties. **Journal of soil science**, v. 43, n. 1, p. 177-192, 1992.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; 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: Oceans (1978–2012)**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

CAPÍTULO 5

MODELO CERES-MAIZE PARA RECOMENDAÇÃO DE FERTILIZANTES PARA CULTURA DO MILHO EM ZONAS DE MANEJO

RESUMO

A delimitação de zonas de manejo possibilita o gerenciamento da variabilidade espacial dos campos de produção agrícola em diferentes escalas espaciais. As zonas de manejo delimitadas utilizando mapas de produtividade direcionam a investigação de fatores limitantes, causadores da variabilidade entre zonas. Ao utilizar modelos de crescimento de planta, essas zonas de manejo podem ser investigadas quanto ao potencial de produtividade e decisão em alocação de investimentos. A produtividade potencial também pode servir de base para recomendação de fertilizantes que apresentam custos elevados. Assim, o objetivo desse trabalho consistiu em delimitar zonas de manejo com base no mapa de produtividade da cultura do milho, avaliar possíveis fatores limitantes e recomendar a aplicação de fertilizantes em função da produtividade potencial simulada pelo modelo CERES-Maize no DSSAT (Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia). Para isso, foi utilizado o mapa de produtividade para dois talhões heterogêneos de produção comercial de milho. O método de classificação Fuzzy c-means agrupou duas classes de manejo para cada talhão. As classes de manejo definidas para os dois talhões foram significativamente diferentes segundo o teste z ao nível de confiança de 95 % . As análises de solo nas classes de manejo apontaram o enxofre como o atributo manejável de maior potencial de resposta. Provavelmente isso se deve ao efeito que esse nutriente tem no estímulo ao desenvolvimento radicular e absorção de água em camadas mais profundas de cultivos não irrigados. A recomendação de N-P-K com base na exportação de nutrientes pelo grão considerando a produtividade potencial mostrou-se pouco distinta entre as classes de manejo de cada talhão, mas com uma boa discriminação entre os talhões e as datas de semeadura.

Palavras-chave: Adubação, produtividade potencial, agricultura de precisão.

CERES-MAIZE MODEL FOR RECOMMENDATION OF FERTILIZERS FOR CORN CROP IN MANAGEMENT ZONES

ABSTRACT

Delimitation of management zones enables the management of spatial variability of agricultural fields at different spatial scales. The management zones delineated using yield maps directs the search for limiting factors that cause variability between areas. By using crop simulation models, these management zones can be investigated for the yield potential and decision can be made regarding the use of inputs. The yield potential can also be the basis for fertilizer recommendations that have high costs. The objective of this study was to delineate management zones based on corn yield map, to assess possible limiting factors and to recommend the application of fertilizers on the basis of simulated yield potential by CERES-Maize model in DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer). The yield maps of two heterogeneous field of maize production were analyzed. The fuzzy c –means clustering method divided each field in two management classes for each field. Management classes defined for the two fields were significantly different according to the Z test at 95% confidence. Soil analysis for each management classe showed sulfur as manageable attribute greater response potential. This is probably because this nutrient stimulates root development and water absorption in the soil deeper layers of non-irrigated crops. The NPK recommendation based on the nutrient exported to the grain considering the yield potential showed small differences between management classes of each field, however showed significative difference between fields and among the analyzed dates of planting.

Keywords: Fertilization, yield potential, precision agriculture.

5.1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão aborda a necessidade de considerar a heterogeneidade dos campos de produção agrícola e suas implicações econômicas e ambientais. Essa abordagem pode ser refletida tanto para a agricultura empresarial, quanto para a agricultura familiar. Em grandes áreas cultivadas a agricultura de precisão se torna uma importante ferramenta para a sustentabilidade do sistema, devido à utilização de uma maior quantidade de insumos.

As propriedades agrícolas empresariais típicas do Centro-Oeste brasileiro são subdivididas em talhões limitados por estradas rurais. Essas estradas são utilizadas na

logística do escoamento da produção. Os talhões são considerados unidades gerenciais, os quais recebem manejo individual em função de análise de solo e do histórico de produtividade, doenças e pragas. As variáveis utilizadas para definir os talhões referem-se não somente a logística de estradas, mas também ao relevo, tipo de solo, aspectos visuais de vegetação, resultados de análises de solo, entre outros. Dessa forma, os talhões podem ser considerados zonas de manejo para as dimensões de grandes propriedades. Isso porque segundo Castrignanò et al. (2012) não existe um protocolo amplamente aceito para delimitar zonas de manejo. Entretanto, os talhões apresentam áreas extensas e muitas vezes sua heterogeneidade justifica a subdivisão em novas zonas de manejo, menores e mais homogêneas. Além disso, a escala espacial utilizada para delimitar zonas de manejo, deve considerar a precisão das máquinas de aplicação de insumos e a precisão dos métodos de análise e recomendação.

Alguns atributos do solo não são alterados com operações de manejo e são importantes para determinar a produtividade potencial ou a escolha dos manejos a serem adotados. Isso os torna mais recomendados para estratificar a área em zonas ou classes de manejo (SPERANZA et al., 2014). Pode-se citar a textura, elevação, profundidade do solo, tipo de solo, proximidade do lençol freático entre outros. Atributos que se alteram com o manejo devem ser considerados sob uma perspectiva dinâmica e investigativa. Isso porque a correção desses atributos implicaria na reconfiguração das zonas de manejo a cada safra. Nesse raciocínio, é coerente utilizarmos a produtividade como variável para delimitar zonas ou classes de manejo dinâmicas, com o intuito investigativo e de recomendações.

As colhedoras comercializadas geralmente possuem sensores capazes de monitorar a produtividade da cultura durante a colheita. Apesar de algumas imprecisões, os mapas de produtividade são teoricamente muito úteis, pois os processos investigativos deveriam partir dos mesmos. Entretanto, observa-se certa dificuldade em utilizá-los e muitos produtores não armazenam essa informação, sendo apenas apresentada nos monitores das máquinas para simples conferência.

Os mapas de produtividade de uma safra podem ser utilizados para investigar a existência de fatores limitantes e corrigi-los para a próxima safra (GOZDOWSKI et al., 2014). Com o cultivo não irrigado, a manifestação de atributos limitantes em uma safra é condicionada às variações no clima a cada ano. Atributos associados à absorção de água pelas plantas são normalmente mais importantes na 2ª safra. Esses atributos podem definir a produtividade potencial para o plantio não irrigado (GREGORET et al., 2011). O

conhecimento da produtividade potencial das zonas de manejo é uma informação importante, pois permite dimensionar as quantidades de fertilizantes a serem aplicadas, visando à máxima produtividade possível e a reposição de nutrientes do solo. Contudo, a máxima produtividade para uma dada condição climática só pode ser obtida na ausência de outros eventuais fatores limitantes.

A data de semeadura determina o ciclo da cultura em uma determinada condição climática ao longo do ano, sendo determinante para a produtividade potencial de cultivos não irrigados. Essa produtividade pode ser estimada para a cultura do milho, utilizando o modelo CERES-Maize, presente no programa de computador DSSAT (Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia). O objetivo desse trabalho consiste em delimitar zonas de manejo com base no mapa de produtividade da cultura do milho, avaliar possíveis fatores limitantes e recomendar a aplicação de fertilizantes em função da produtividade potencial simulada pelo modelo CERES-Maize no DSSAT.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Caracterização da área

O estudo foi realizado com base na análise de uma propriedade rural localizada no município de Jataí – GO. O clima da região é caracterizado como Aw, com período seco definido, segundo classificação de Köppen (KÖPPEN; GEIGER, 1928). A temperatura média do ar é de 23,7 °C, com uma precipitação média anual de 1652 mm e altitude de 662 m, segundo estação meteorológica instalada no campus da Universidade Federal de Goiás – Regional Jataí. As áreas de cultivo utilizadas neste trabalho foram ocupadas nos anos anteriores pela sucessão soja/milho, no sistema de plantio direto, e podem ser localizadas a partir das coordenadas 18° 05' 21" S e 51° 59' 07" W.

5.2.2 Obtenção dos dados

Dois talhões foram avaliados neste estudo, pois apresentaram produtividade heterogênea. O talhão T – 131 foi cultivado com o híbrido de milho P30F53 na 1ª safra e possui área de 131 ha. O talhão T – 195, com área de 195 ha, foi cultivado com o mesmo híbrido de milho na segunda safra. Foram realizadas 26 amostras para análises químicas e 8 amostras para análises físicas do solo no talhão 131. No talhão T – 195, foram realizadas 39 amostras para análises químicas e 13 amostras para análises físicas do solo. A relação entre a

área e o número de amostras foi aproximadamente 5 ha por amostra química do solo, e 15 ha por amostra física do solo. O banco de dados utilizados nesse trabalho consiste nos mapas de produtividade do híbrido de milho P30F53 obtidos durante a 1ª safra e 2ª safra do ano agrícola 2013/2014, a análise de textura realizados no ano de 2009, e a análise química do solo realizada em 2013. A descrição dos pontos onde foram coletadas amostras de solo é apresentada na Figura 1.

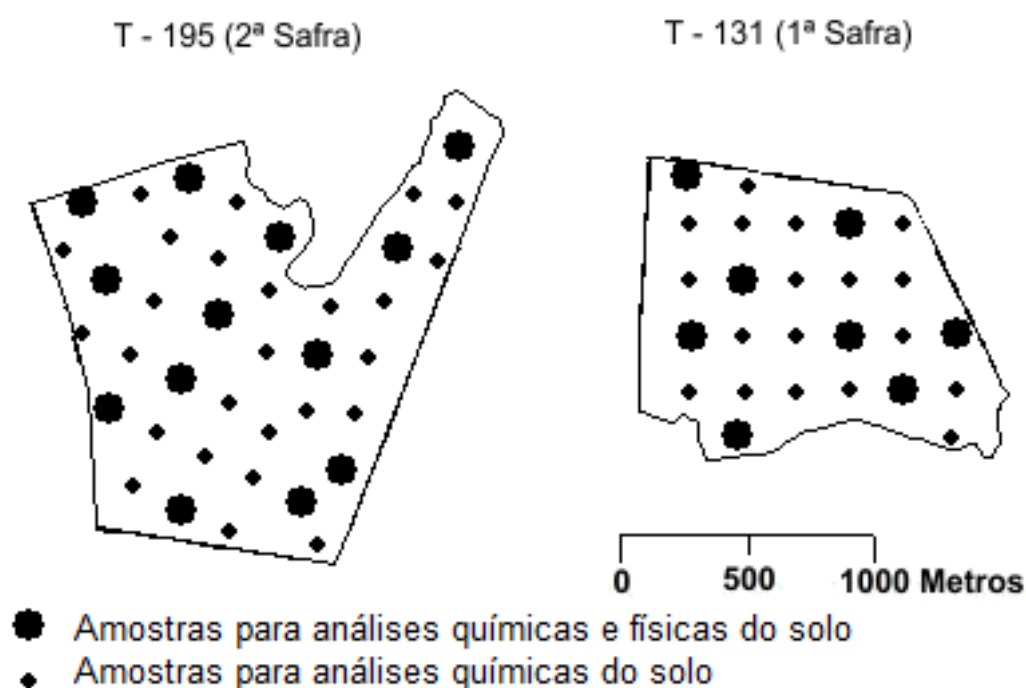


Figura 1: Esquema de coleta das amostras de solo nos talhões analisados.

5.2.3 Delimitação de zonas de manejo a partir do mapa de produtividade

Os dados de produtividade provenientes da colhedora são do tipo pontos e são coletadas durante o deslocamento da máquina na colheita. Esses dados foram convertidos para o formato matricial utilizando o método de interpolação por krigagem ordinária com dimensões dos pixels de 20 x 20 m. As colhedoras foram calibradas no campo informando ao monitor o peso de balança dos caminhões que transportam os grãos para os silos armazenadores. O mapa de produtividade foi interpolado utilizando o programa computacional ArcMap v10.1.

Para delimitar as zonas de manejo para a produtividade do milho foi utilizado o programa de computador FuzME versão 3.5 desenvolvido por Minasny e McBratney (2002). O Índice de Performance Fuzzy (FPI) e a Entropia de Partição Modificada (MPE) foram

utilizados para definir o número mais apropriados de zonas. Foi realizada a classificação com número de classes variando de 2 a 5. Para cada classificação foram determinados os índices FPI e MPE. O número de zonas foi definido para minimizar os dois índices (SUN et al., 2012).

5.2.4 Construção dos arquivos requisitados no DSSAT para simulação nas zonas de manejo

5.2.4.1 Arquivos de solo

As características hídricas do solo como capacidade de campo, ponto de murcha permanente e umidade de saturação, foram estimadas pela equação de Van Genuchten (1980), com os parâmetros ajustados por Tomasella et al. (2000), com base na textura e carbono orgânico do solo. Estatística descritiva foi realizada para os atributos do solo em cada zona de manejo com o intuito de caracterizá-las. Com base nos valores médios criou-se um arquivo de solo para cada zona de manejo. Foi considerada a zona de exploração radicular do milho na camada de 0 a 50 cm do solo (Andrade et al., 2006).

5.2.4.2 Arquivo de clima

Para criar o arquivo de clima utilizou-se o banco de dados de 35 anos da estação convencional do INMET, localizada na Universidade Federal de Goiás – Regional Jataí (UFG), que se encontra a uma distância linear aproximada de 25 km da área em estudo. As estações convencionais não fornecem a radiação solar, que é requerido pelos modelos. A radiação solar foi estimada pela equação de Angström com base na insolação diária, com os parâmetros $a = 0,35952$ e $b = 0,43373$ (Equação 1). Esses parâmetros foram ajustados com dados de radiação obtidos em 2013, pela estação automática também situada na UFG Regional Jataí. Na ausência de dados de insolação, a radiação solar foi estimada com base na temperatura máxima e mínima, segundo Hargreaves e Samani (1982), com o parâmetro $K = 0,16025$, ajustado com os dados da estação automática (Equação 2).

$$R_s = \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

n = Duração do brilho solar (horas);

N = Duração astronômica do período diurno (horas);

a, b = Coeficientes empíricos obtidos por análise de regressão linear de determinada localidade.

R_a = Radiação no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

$$R_s = K_r \sqrt{(T_{max} + T_{min})} R_a \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

T_{min} = Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$)

T_{max} = Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)

K_r = Coeficiente de ajuste.

5.2.4.3 Calibração e validação do modelo

Foi utilizado o híbrido de milho P30F53 para a simulação da produtividade potencial em cada zona de manejo. Os coeficientes genéticos desse híbrido foram calibrados e validados previamente para a região utilizando dados observados em experimentos reais. Uma nova validação somente seria necessária para estimar a produtividade real, pois variáveis não avaliadas durante a calibração do híbrido podem influenciar os resultados.

5.2.5 Recomendação de fertilizantes

Para recomendação de fertilizantes foram consideradas as análises de solo em cada zona de manejo com o intuito de identificar um possível fator que seja responsável pela variabilidade da produtividade. Com base na produtividade potencial estimada para as zonas de manejo, foi calculada a dose de fertilizantes N-P-K necessária para suprir a demanda de nutrientes exportadas pelos grãos de milho. Essa recomendação foi realizada considerando a variação da produtividade potencial em função do período de semeadura.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sistemas de monitoramento da produtividade presentes nas colhedoras permitem quantificar a variação relativa da produtividade em uma área. Quando calibrados esses mapas apresentam uma estimativa do valor absoluto da produtividade ao longo do trajeto da colhedora durante a colheita. Na Figura 2 são apresentados os mapas de produtividade para os talhões T -131 e T - 195, referentes à 1ª e 2ª safra de milho respectivamente. Esses talhões foram escolhidos por apresentarem variabilidade espacial da produtividade.

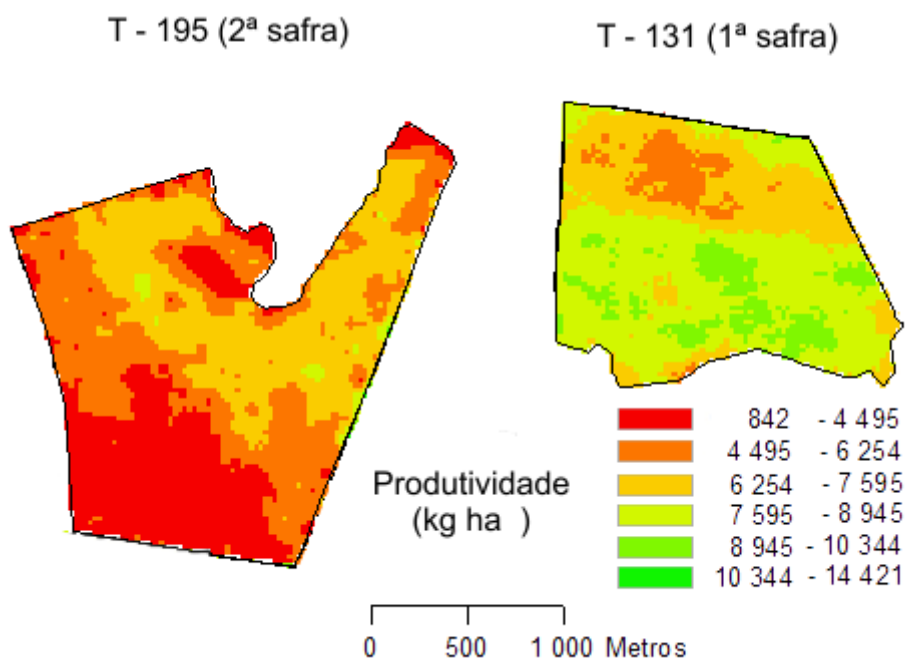


Figura 2: Mapa de produtividade de áreas agrícolas comerciais cultivados com o híbrido de milho P30F53 nas duas safras.

Para delimitar as zonas de manejo, o algoritmo fuzzy c-means foi utilizado tendo como variável de entrada apenas o mapa de produtividade das duas áreas. Para definir o número apropriado de classes foi analisado os índices FPI e MPE (Figura 3). O índice FPI avalia a adesão entre as classes e quanto maior for seu valor maior é a adesão e a distinção entre os grupos é menor. O MPE avalia a entropia no interior dos grupos e quanto maior o índice, maior é a entropia, sendo os grupos menos homogêneos internamente. Quando a classificação utiliza mais de uma variável de entrada, esses índices são bons indicadores do número de classes, pois nessa situação torna-se difícil reconhecer os padrões visualmente. Quando se utiliza somente uma variável de entrada a interpretação dos índices pode ser complementada com a análise visual do mapa de produtividade. Para o talhão T – 131, o número de duas classes pode ser escolhido para minimizar os dois índices, mas para o talhão T - 195 pode haver dúvidas entre duas ou quatro classes. Um menor número de classes pode ser operacionalmente mais interessante para o manejo. Ao analisar a o mapa de produtividade utilizando pelo classificador fuzzy, optpu-se por trabalhar com duas classes de manejo para o talhão T – 195, assim como para o talhão T – 131 (Figura 4).

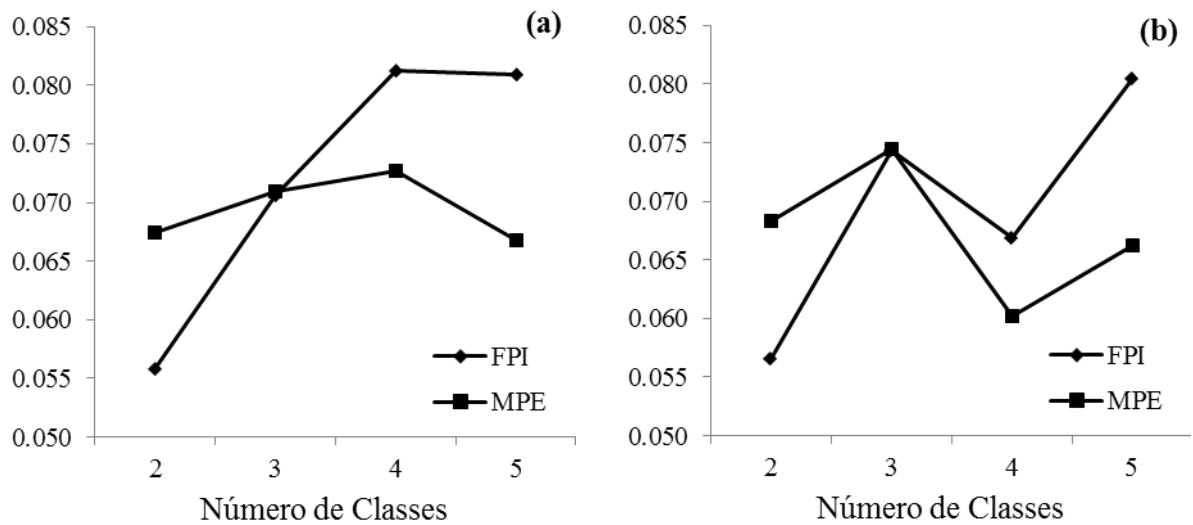


Figura 3: Índices FPI e MPE para escolha do número de zonas de manejo apropriadas para cada talhão; (a) – Talhão 131; (b) – Talhão 195

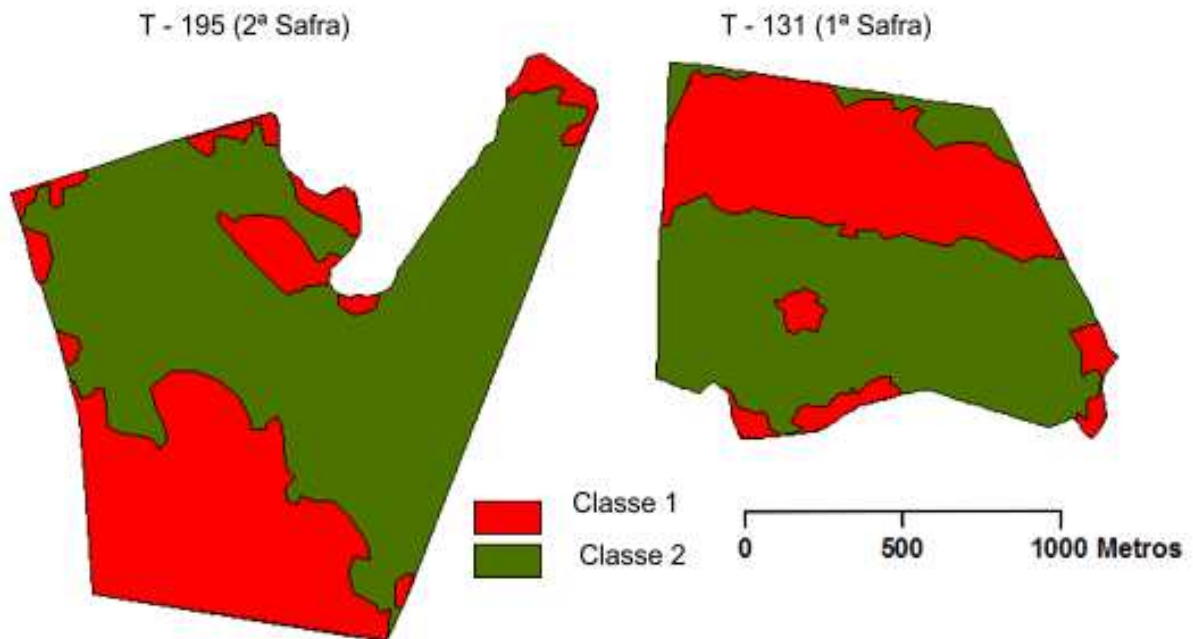


Figura 4: Mapa de classes de manejo para a produtividade, nos talhões T - 195 e T - 131.

As classes de manejo obtidas com base no mapa de produtividade podem ser consideradas dinâmicas, pois os atributos que definiram esse padrão de produtividade podem ser alterados com o manejo ou em outras condições climáticas podem apresentar um padrão diferente. Entretanto isso não anula o caráter investigativo dessas classes de manejo. Os dois talhões foram manejados no passado, primeiramente sob os preceitos convencionais que

gerencia a fazenda pelas médias de cada talhão, o que poderiam caracterizá-los com zonas de manejo de propriedade. A alguns anos, o produtor tem adotado um pacote de tecnologias em agricultura de precisão muito usual nesse mercado, que consiste em tentar equiparar os níveis de nutrientes em toda a área de cada talhão, na expectativa de uma produtividade uniforme ou economia de insumos. Essa vertente em agricultura de precisão direciona esforços às correções do solo. Nessa linha, o chamado “FeedBack” consiste em avaliar as alterações nas análises de solo após dois anos de aplicações de fertilizantes a taxa variada. O resultado dessa agricultura de precisão pode ser exemplificado ao analisar os níveis médios de nutrientes nas classes de manejo de cada talhão, cujos valores médios são muito próximos e em sua maioria em níveis adequados (Tabela 1). Apenas o nutriente enxofre “S”, apresenta uma relativa discrepância entre as classes de manejo, com maior destaque às classes do talhão 195.

Tabela 1: Valores médios de atributos químicos do solo e da produtividade nas classes de manejo dos talhões 195 e 131

Atributos do solo	T – 131				T – 195				
	Classe 1		Classe 2		Classe 1		Classe 2		
	Média	σ	Média	σ	Média	σ	Média	σ	
Produtividade									
kg ha ⁻¹	6767	1514	8573	1249	3439	1814	6230	1129	
Complexo de cargas									
pH(CaCl) -	5,36	0,17	5,28	0,17	5,32	0,20	5,53	0,25	
MO g dm ⁻³	45,8	2,79	43,8	2,44	47,7	2,49	41,5	4,54	
T cmol _c dm ⁻³	9,20	0,66	9,35	0,79	8,93	0,56	8,52	0,76	
t cmol _c dm ⁻³	4,90	0,73	4,40	0,82	4,90	0,86	4,91	0,83	
SB cmol _c dm ⁻³	4,69	0,54	4,54	0,80	4,74	0,59	4,65	0,83	
H + Al cmol _c dm ⁻³	4,51	0,66	4,81	0,68	4,19	0,46	3,87	0,68	
Al cmol _c dm ⁻³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
V %	51,0	5,30	48,4	6,58	53,0	4,96	54,5	7,44	
Macronutrientes									
P-res mg dm ⁻³	25,0	4,51	20,0	5,19	31,53	7,28	30,68	8,13	
Ca cmol _c dm ⁻³	3,17	0,38	3,09	0,53	3,28	0,43	3,31	0,56	
Mg cmol _c dm ⁻³	1,28	0,17	1,23	0,26	1,30	0,17	1,19	0,29	
K cmol _c dm ⁻³	0,23	0,05	0,21	0,05	0,15	0,04	0,15	0,03	
S mg dm ⁻³	7,75	2,22	9,20	2,05	5,27	1,62	11,11	3,88	
Micronutrientes									
B mg dm ⁻³	0,43	0,08	0,38	0,03	0,33	0,01	0,39	0,07	
Fe mg dm ⁻³	39,3	7,09	43,6	5,03	43,1	2,17	40,4	7,72	
Mn mg dm ⁻³	2,28	0,22	2,18	0,16	1,71	0,09	1,89	0,75	
Cu mg dm ⁻³	0,83	0,05	1,24	0,45	1,28	0,14	1,61	0,50	
Zn mg dm ⁻³	1,83	0,46	1,72	0,57	1,83	0,36	3,57	1,72	

pH – Potencial hidrogeniônico; MO – Matéria orgânica; T – capacidade de troca catiônica a pH 7; t – Capacidade de troca catiônica efetiva; SB – Soma de bases; (H+Al) – Acidez potencial; Al – Alumínio; V – Saturação por bases; P-res – Fósforo resina; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; K – Potássio; S – Enxofre; B – Boro; Fe – Ferro; Mn – Manganês; Cu – Cobre; Zn – Zinco.

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 1, observa-se que em cada talhão existem áreas cujos valores de produtividade são discrepantes. No talhão 131 a diferença de 1806 kg ha⁻¹ na produtividade da 1ª safra, entre as duas classes foi significativa, considerando o teste z ao nível de confiança de 95 % . Já no talhão 195 a diferença de produtividade na 2ª safra é de 2795 kg ha⁻¹, também significativa pelo teste z ao nível de confiança de 95 % . Tamanha discrepância nos valores médios de produtividade não poderia ser justificada somente sob a hipótese de deficiência de nutrientes na camada de 0 a 0,2 m do perfil do solo.

O potencial produtivo das classes de manejo foi avaliado por meio da simulação do crescimento e desenvolvimento da cultura do milho utilizando o modelo CERES-Maize. Essa produtividade potencial simulada considera que a planta não sofrerá limitações nutricionais, doenças e pragas. A produção é definida em função do balanço de água no solo, variáveis meteorológicas, condições de manejo como data de semeadura e densidade de plantas. As características genéticas do híbrido foram calibradas previamente pelo ajuste dos coeficientes genéticos e validação experimental. A caracterização das classes de manejo é realizada nos arquivos de solo, que deve contemplar os parâmetros hídricos dos mesmos. A estimativa dos parâmetros hídricos do solo representa uma fonte de incerteza, pois não são obtidos diretamente, mas por meio de funções de pedotransferência. Além disso, é difícil estimar com precisão a profundidade de exploração radicular, visto que impedimentos físicos e químicos são observados e as diferenças genéticas proporcionam diferentes respostas a esses fatores. Na Tabela 2 são apresentados os atributos físicos e hídricos das classes de manejo nos talhões. Observa-se no talhão 131 que as duas classes são muito semelhantes para esses atributos. No talhão 195 existe uma pequena diferença entre os parâmetros hídricos do solo.

Tabela 2: Caracterização física e hídrica das classes de manejo nos talhões, utilizadas na construção dos arquivos de solo do DSSAT

		T 131				T 195			
		Classe 1		Classe 2		Classe 1		Classe 2	
		Média	Σ	Média	Σ	Média	σ	Média	Σ
Silte	%	34,2	1,82	28,7	8,26	16,8	3,41	19,8	6,14
Argila	%	54,3	1,58	51,6	1,14	71,3	4,47	55,6	6,33
CO	%	2,75	0,24	2,52	0,16	2,66	0,12	2,17	0,26
LL	cm ³ cm ⁻³	0,300	0,003	0,295	0,003	0,320	0,004	0,300	0,010
DUL	cm ³ cm ⁻³	0,430	0,004	0,424	0,008	0,421	0,005	0,415	0,008
Os	cm ³ cm ⁻³	0,625	0,008	0,609	0,011	0,643	0,007	0,597	0,020
Or	cm ³ cm ⁻³	0,273	0,005	0,259	0,006	0,301	0,009	0,261	0,022
CAT	cm ³ cm ⁻³	0,130	0,007	0,129	0,009	0,101	0,007	0,115	0,009

CO – Carbono orgânico; LL – ponto de murcha permanente; DUL – Capacidade de campo; Os – Umidade de saturação; CAT – Capacidade de Água Toral (DUL – LL).

A produtividade potencial depende do período do ano em que a cultura é implantada, pois determina as condições climáticas às quais serão submetidas. Por isso, os gráficos de caixa foram gerados com as produtividades potenciais estimadas para as datas de semeadura nas quinzenas dos meses de outubro e novembro para a 1ª safra e nas quinzenas de janeiro e fevereiro para a 2ª safra (Figuras 5 a 12). No talhão 131, a produtividade potencial foi praticamente a mesma nas duas classes de manejo, variando apenas entre os períodos de semeadura, porque as duas classes apresentaram características físicas e hídricas semelhantes. No talhão 195, houve pequena variação da produtividade potencial em que todas as quinzenas apresentaram menor potencial produtivo na classe de manejo 1, assim como o observado no mapa de produtividade. Entretanto essa diferença na produtividade potencial foi menos discrepante em relação a diferença real observada.

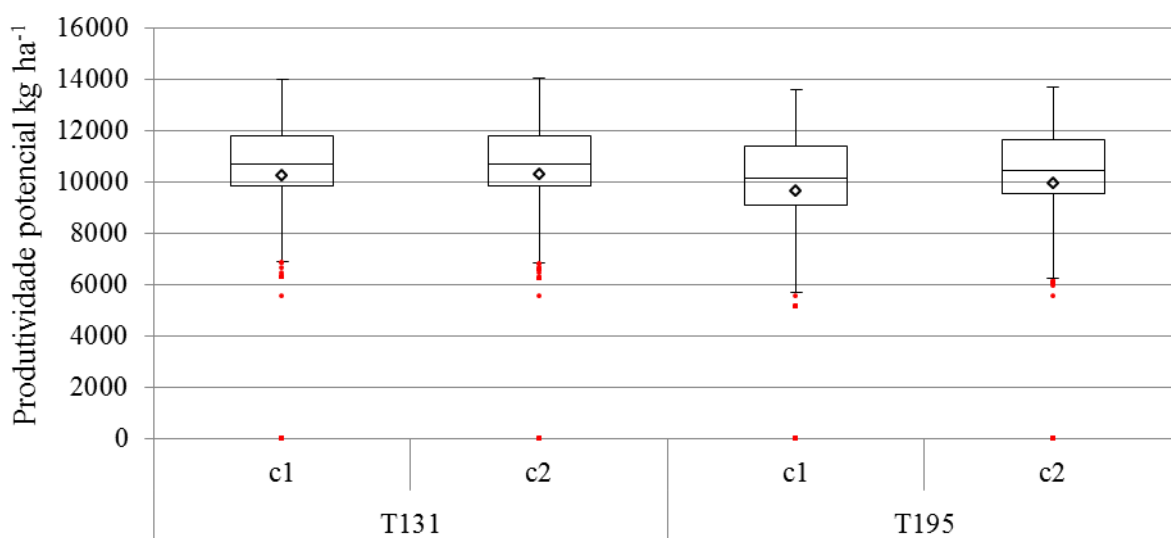


Figura 5: Gráfico de caixa da produtividade potencial do milho para as classes de manejo na 1ª quinzena de outubro.

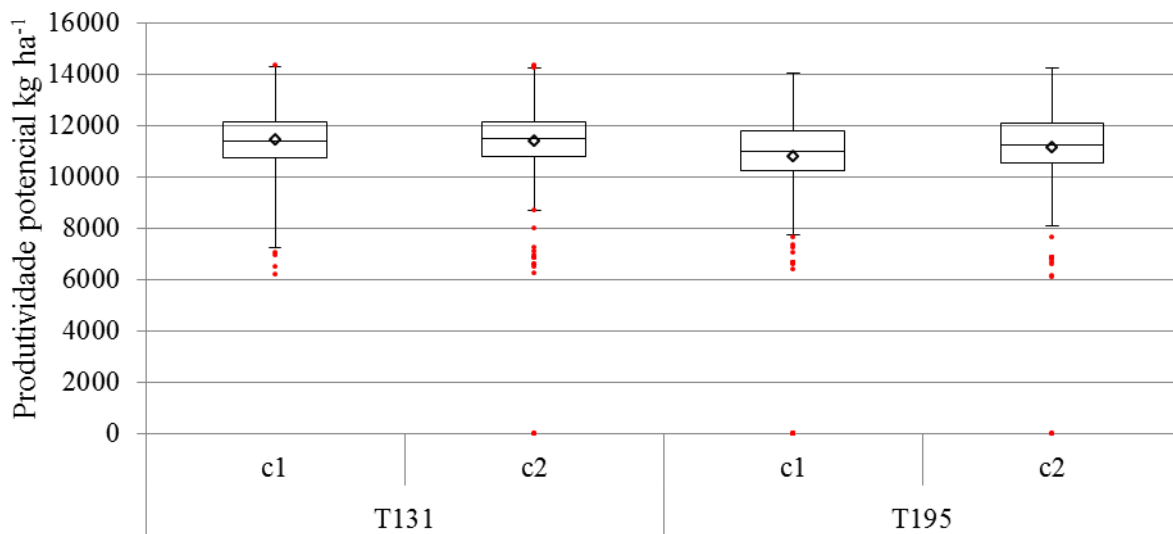


Figura 6: Gráfico de caixa da produtividade potencial do milho para as classes de manejo na 2ª quinzena de outubro.

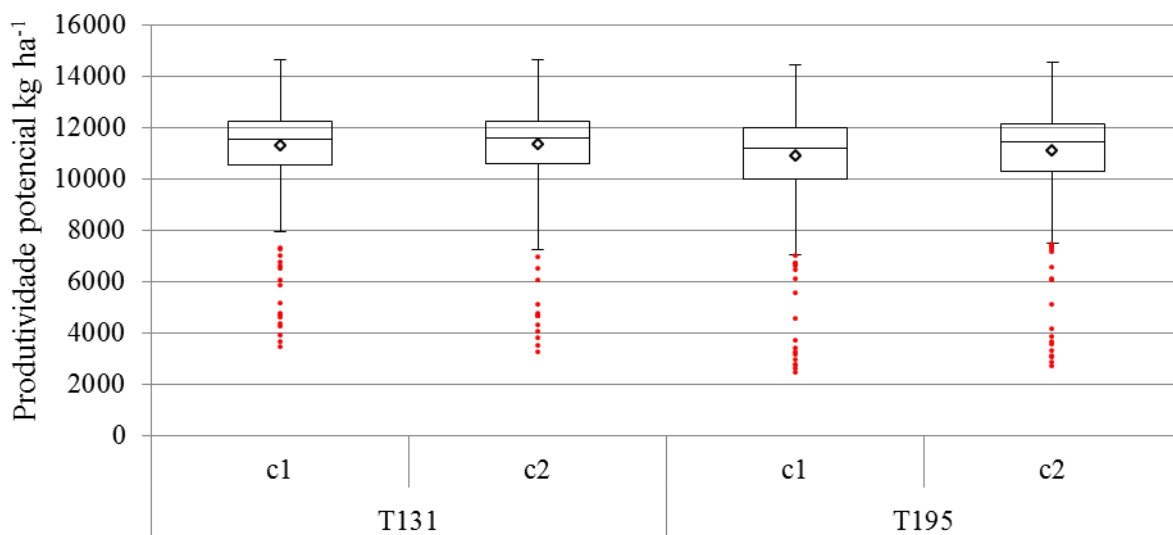


Figura 7: Gráfico de caixa da produtividade potencial do milho nas classes de manejo na 1ª quinzena de novembro.

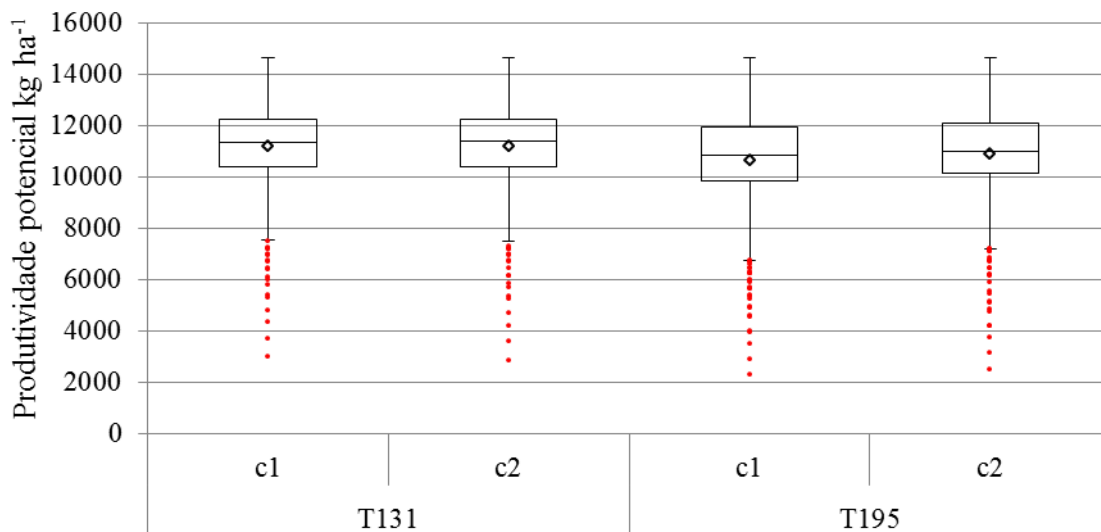


Figura 8: Gráfico de caixa da produtividade potencial do milho nas classes de manejo na 2ª quinzena de novembro.

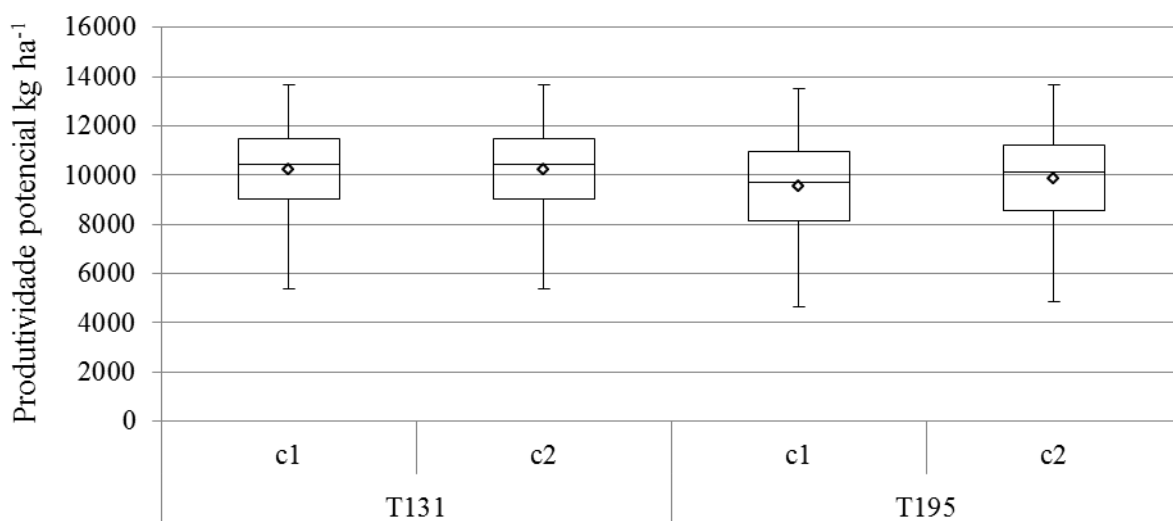


Figura 9: Gráfico de caixa da produtividade potencial do milho nas classes de manejo na 1ª quinzena de janeiro.

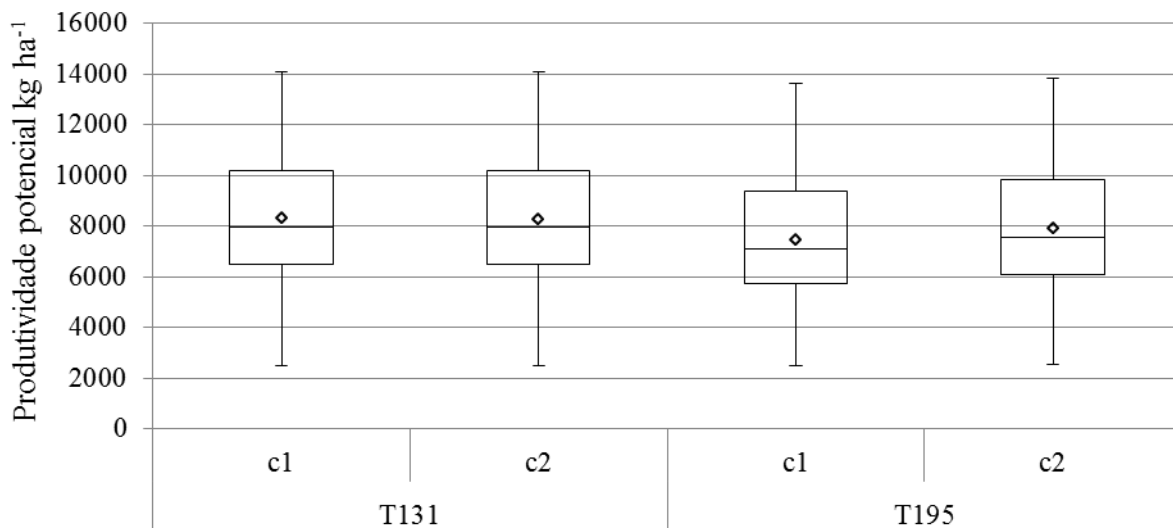


Figura 10: Gráfico de caixa da produtividade potencial do milho nas classes de manejo na 2ª quinzena de janeiro.

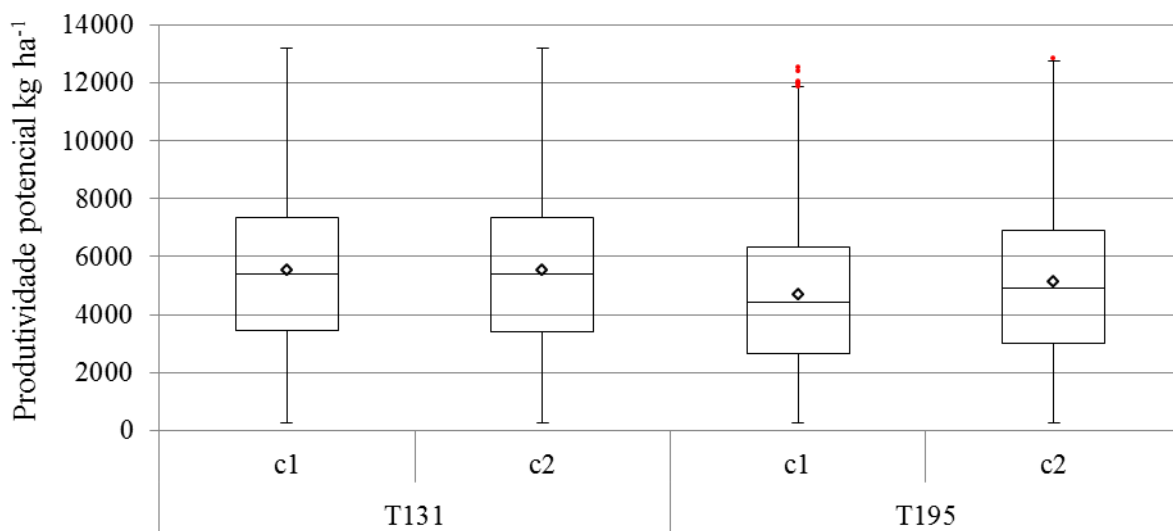


Figura 11: Gráfico de caixa da produtividade potencial do milho nas classes de manejo na 1ª quinzena de fevereiro.

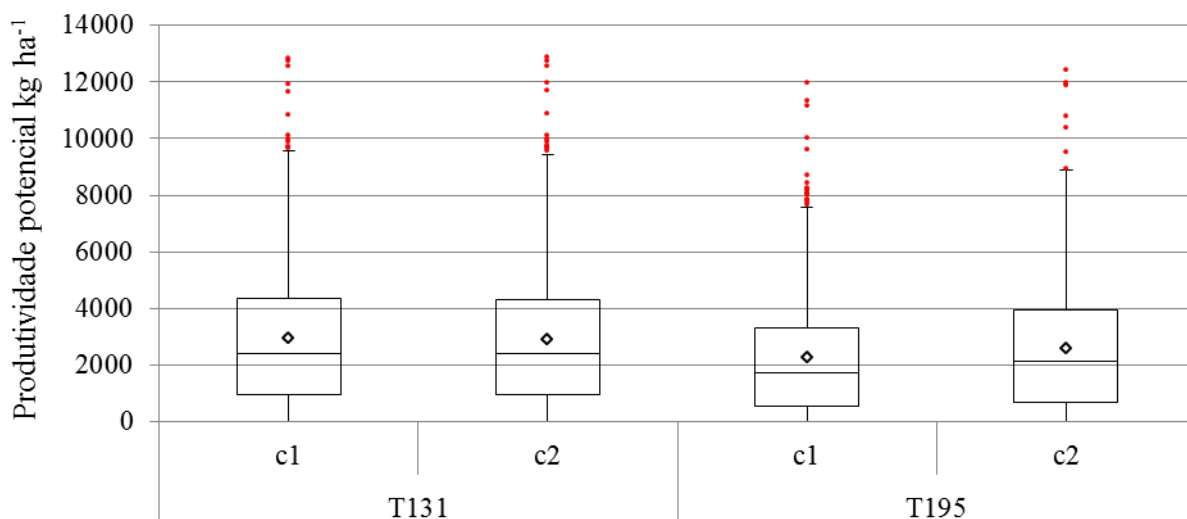


Figura 12: Gráfico de caixa as produtividade potencial do milho nas classes de manejo na 2ª quinzena de fevereiro.

A caracterização hídrica do solo, utilizada nos modelos, considerou a exploração radicular do milho em até 0,5 m de profundidade (ANDRADE et al. 2006). Entretanto, impedimentos químicos podem influenciar a capacidade de exploração hídrica devido ao menor desenvolvimento radicular. Uma evidência do impedimento químico é que a classe mais produtiva em ambos os talhões apresentou maior concentração de enxofre na camada de 0 a 0,2 m. O enxofre é um nutriente móvel no solo que apresenta a característica de transportar cálcio para camadas mais profundas. Por causa do cálcio nessas camadas, o enraizamento também é estimulado. Os benefícios do enxofre em cultivos de regiões de cerrado em plantio direto são apresentados por Zandoná et al. (2015). Por consequência do plantio direto, as camadas superficiais do solo são muito férteis e corrigidas e, em contrapartida, as camadas inferiores normalmente são pobres em nutrientes. A água no solo é importante para a planta e o sistema radicular profundo pode aumentar sua disponibilidade. A importância de um sistema radicular profundo normalmente só pode ser observada em anos de pouca chuva ou em plantios mais tardios. Ainda que o nível de enxofre a 0,2 m esteja adequado, pode-se inferir que seja o nutriente manejável com maior possibilidade de resposta para essa condição. Isso porque esse elemento está associado ao desenvolvimento radicular mais profundo, que permite a planta explorar maior volume de solo e consequentemente absorver mais água e nutrientes.

Com base na produtividade potencial do híbrido P30F53, para o plantio das quinzenas de outubro, novembro, janeiro e fevereiro, foi realizada uma recomendação de fertilizantes N-P-K considerando os níveis de exportação pelos grãos (Tabela 3). A estimativa

do potencial de produtividade foi realizada para os 35 anos de histórico de condições climáticas do município, o que permitiu avaliar a produtividade de anos bons, normais e ruins, segundo os intervalos entre o 1^a e 2^o quartil, 2^o e 3^o quartil e o 3^o e 4^o quartil respectivamente. Para o talhão 131, as duas classes de manejo apresentaram o mesmo potencial de produtividade e por esse motivo a recomendação de N-P-K é única para cada quinzena de semeadura. Já para o talhão 195 houve uma pequena diferença na produtividade potencial das classes de manejo e por esse motivo as doses de N-P-K foram diferentes para as duas classes, apesar das diferenças serem pequenas. Diferenciar as doses de aplicação passa a ser operacionalmente interessante quando comparadas as recomendações para o talhão 131 e as classes do talhão 195 e quando comparados os intervalos de semeaduras referentes às quinzenas.

Tabela 3: Recomendação de N-P-K para o híbrido P30F53 cultivado com diferentes períodos de semeaduras nas classes de manejo avaliadas, em kg ha⁻¹

	Anos ruins			Anos normais			Anos bons		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1ª quinzena de outubro									
T - 131	98	56	33	216	124	71	258	147	85
T - 195 classe 1	91	52	30	205	117	68	250	142	82
classe 2	96	55	32	212	121	70	253	144	84
2ª quinzena de outubro									
T - 131	169	97	56	229	131	76	265	151	88
T - 195 classe 1	102	59	34	220	126	73	259	147	85
classe 2	105	60	35	226	129	75	263	150	87
1ª quinzena de novembro									
T - 131	140	80	46	228	131	75	269	153	89
T - 195 classe 1	125	71	41	220	126	73	264	151	87
classe 2	130	74	43	225	128	74	267	152	88
2ª quinzena de novembro									
T - 131	134	77	44	226	130	75	269	153	89
T - 195 classe 1	122	70	40	218	125	72	266	151	88
classe 2	126	72	42	222	127	73	267	152	88
1ª quinzena de janeiro									
T - 131	144	82	48	205	117	68	251	143	83
T - 195 classe 1	128	73	42	191	109	63	245	139	81
classe 2	134	77	44	197	113	65	248	142	82
2ª quinzena de janeiro									
T - 131	90	51	30	167	95	55	243	138	80
T - 195 classe 1	82	47	27	151	86	50	230	131	76
classe 2	87	50	29	159	91	53	237	135	78
1ª quinzena de fevereiro									
T - 131	37	21	12	108	62	36	206	117	68
T - 195 classe 1	29	17	10	90	51	30	188	107	62
classe 2	32	19	11	99	57	33	198	113	65
2ª quinzena de fevereiro									
T - 131	9	5	3	53	30	17	172	98	57
T - 195 classe 1	5	3	2	38	22	13	152	87	50
classe 2	7	4	2	46	27	15	164	93	54

Evidente que as produtividades potenciais só poderão se manifestar à medida que outros fatores limitantes deixarem de existir. No presente trabalho, pressupõe-se que limitações químicas ao desenvolvimento radicular induzam limitações por água, mais acentuadas que a estimada pelos modelos. Ao considerar as limitações hídricas previstas nos modelos, observa-se a grande dispersão dos valores de produtividade potencial para as semeaduras realizadas nas quinzenas do mês de fevereiro. Nos anos de clima favorável, é tão elevado quanto nos demais meses, pois não há limitação hídricas. Porém, nos anos com clima não favorável a produtividade pode ser zero, pois o fator água se torna muito limitante. Ao

considerar além das limitações físicas, impedimentos químicos, espera-se que essa maior dispersão ocorra também nos demais períodos de semeadura.

Zonas ou classes de manejo obtidas a partir de mapas de produtividade anuais são excelentes ferramentas investigativas que possibilitam identificar fatores limitantes. Entretanto essas classes de manejo não são estáticas, pois realizada a correção da limitação ou em anos cujas condições climáticas favorecem outros fatores como limitantes, essas classes devem apresentar configurações diferentes. A tendência lógica é que, ao corrigir as limitações apresentadas a cada ano pelos mapas de produtividade, o produtor poderá chegar ao máximo de eficiência produtiva, que no cultivo não irrigado deve ser limitado apenas pelas condições climáticas e as características hídricas não manejáveis do solo. Espera-se que as pesquisas em agricultura de precisão no Brasil busquem explorar o potencial dos mapas de produtividade e aprimorar o uso dos modelos de crescimento de planta para tomada de decisões.

5.4 CONCLUSÃO

Os mapas de produtividade apresentaram heterogeneidade nos dois talhões de produção comercial de milho analisados. As classes de manejo delimitadas nesses talhões apontam o enxofre como o atributo manejável de maior potencial de resposta, não pela deficiência desse nutriente, mas pelo estímulo ao desenvolvimento radicular e absorção de água em camadas mais profundas. A recomendação de N-P-K com base na exportação de nutrientes pelo grão na produtividade potencial mostrou-se pouco distinta entre as classes de manejo de cada talhão, mas com uma boa discriminação entre os talhões e entre os intervalos de semeadura.

5.5 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro. À Universidade Federal de Viçosa – UFV e à Universidade Federal de Goiás, Regional Jataí – UFG que possibilitaram a realização desse trabalho.

5.6 LITERATURA CITADA

ANDRADE, C. D. L. T.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; BRITO, R. A. L.; RESENDE, M. **Viabilidade e Manejo da Irrigação da Cultura do Milho**. Circular Técnica 85. Embrapa, Sete Lagoas, MG. 2006

CASTRIGNANÒ, A.; WONG, M. T. F.; STELLUTI, M.; DE BENEDETTO, D.; SOLLITTO, D. Use of EMI, gamma-ray emission and GPS height as multi-sensor data for soil characterisation. **Geoderma**, v. 175-176, p. 78-89, 2012.

GOZDOWSKI, D.; STEPIEŃ, M.; SAMBORSKI, S.; DOBERS, E. S.; SZATYŁOWICZ, J.; CHORMAŃSKI, J. Determination of the Most Relevant Soil Properties for the Delineation of Management Zones in Production Fields. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 45, n. 17, p. 2289-2304, 2014.

GREGORET, M. C.; DÍAZ ZORITA, M.; DARDANELLI, J.; BONGIOVANNI, R. G. Regional model for nitrogen fertilization of site-specific rainfed corn in haplustolls of the central Pampas, Argentina. **Precision Agriculture**, v. 12, n. 6, p. 831-849, 2011.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 108, n. 3, p. 225-230, 1982.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der erde*. Gotha: verlag justus perthes. **Wall-map 150cmx200cm**, 1928.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. FuzME version 3.0. **Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, Australia**, 2002.

SPERANZA, E. A.; CIFERRI, R. R.; GREGO, C. R.; VICENTE, L. E. A cluster-based approach to support the delineation of management zones in precision agriculture. *Proceedings - 2014 IEEE 10th International Conference on eScience, eScience 2014*, 2014. p.119-126.

SUN, X.-L.; ZHAO, Y.-G.; WANG, H.-L.; YANG, L.; QIN, C.-Z.; ZHU, A.-X.; ZHANG, G.-L.; PEI, T.; LI, B.-L. Sensitivity of digital soil maps based on FCM to the fuzzy exponent and the number of clusters. **Geoderma**, v. 171, p. 24-34, 2012.

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, 2000.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predictin the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 892–898, 1980.

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)**, v. 1, n. 1, 2015.

CONCLUSÕES GERAIS

A calibração dos coeficientes genéticos do modelo CERES-Maize atendeu as expectativas desse trabalho. Pois o experimento de calibração concebido na região, utilizando altos níveis de insumos, permitiu a expressão do elevado potencial de produtividade dos híbridos, e os modelos calibrados foram capazes de estimá-los satisfatoriamente.

As variações naturais do clima que ocorrem a cada ano, são fontes de incertezas e seu impacto na agricultura pode ser investigado por modelos de crescimento de planta. Algumas variáveis climáticas sofreram variações sistemáticas além das variações naturais, que caracterizaram tendências de aumento ou decréscimo. Para a região onde o trabalho foi realizado, foi constatada tendências de aumento de temperatura, aumento da velocidade do vento e redução da umidade relativa do ar, que implicam em uma menor produtividade e redução no ciclo de cultivo do milho. Os modelos de crescimento de planta apresentaram potencial para avaliar o desempenho da cultura do milho caso essas tendências se mantenham, sendo útil para traçar estratégias de adaptação a possíveis mudanças de cenários climáticos.

Em uma propriedade comercial, o modelo CERES-Maize foi utilizado para estimar produtividade potencial nos talhões e zonas de manejo. Essa produtividade potencial variou em função de características hídricas do solo e do período do ano em que a cultura foi instalada no campo. A partir dos resultados da simulação para o histórico climático foi possível avaliar também, a possibilidade de perdas na produtividade em função das variações climáticas e utilizar essa informação para auxiliar decisões. A produtividade potencial simulada foi utilizada para estimar a recomendação de fertilizantes a partir da expectativa de exportação de nutrientes. Para cada período do ano em que a semeadura do milho não irrigado foi realizada, obteve-se uma expectativa de produtividade que definiu as quantidades de fertilizantes a serem aplicadas em função das restrições impostas pelo clima. Essa abordagem representa uma ferramenta para auxiliar a tomada de decisões quanto à utilização de fertilizantes.