



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
PRÓ-REITORIA DE ENSINO
ENGENHARIA AGRÔNOMICA

PRISCILA PONCIANA GOMES DA SILVA

**PRODUTIVIDADE DA ÁGUA E DE GRÃOS PARA A CULTURA DO MILHO
SUBMETIDA A DIFERENTES MANEJOS DE IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA**

Sete Lagoas

2015

PRISCILA PONCIANA GOMES DA SILVA

**PRODUTIVIDADE DA ÁGUA E DE GRÃOS PARA A CULTURA DO MILHO
SUBMETIDA A DIFERENTES MANEJOS DE IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Agrônômica da
Universidade Federal de São João Del-Rei
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharelado em Engenharia Agrônômica.

Área de concentração: Irrigação.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Borges
Júnior.

Sete Lagoas

2015

PRISCILA PONCIANA GOMES DA SILVA

**PRODUTIVIDADE DA ÁGUA E DE GRÃOS PARA A CULTURA DO MILHO
SUBMETIDA A DIFERENTES MANEJOS DE IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Agrônômica da
Universidade Federal de São João Del-Rei como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharelado em Engenharia Agrônômica.

Área de concentração: Irrigação

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Borges Júnior

Sete Lagoas, 16 de dezembro de 2015.

Banca Examinadora:

Dr. Camilo de Lelis Teixeira de Andrade (Embrapa Milho e Sorgo)

Dra. Daniela de Carvalho Lopes (UFSJ - CSL)

Dr. João Carlos Ferreira Borges Júnior (UFSJ - CSL)
Orientador

AGRADECIMENTOS

À Deus, por estar sempre presente.

Aos meus pais, pelo exemplo de vida a seguir. Pela confiança, carinho, paciência, incentivo e apoio incondicional.

A Mari e Fê pela agradável convivência.

Aos meus amigos de graduação Geslins Mars, e Priscila Marques, companheiros de todas horas, pela amizade e momentos de alegria.

Ao Professor Dr. João Carlos Ferreira Borges Junior, pela orientação, paciência, dedicação e ensinamentos ao longo deste trabalho.

Ao Dr. Camilo de Lelis Teixeira de Andrade, pela orientação, pelos ensinamentos, oportunidades, apoio e motivação sempre.

A Embrapa Milho e Sorgo, pela oportunidade de estágio.

Aos colegas no NSAM, pelo auxílio e cooperação na condução dos trabalhos.

Enfim, a todos aqueles que, embora os nomes não tenham sido citados, contribuíram de forma significativa na realização deste trabalho e de minha formação.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

A precipitação pluvial é uma das principais variáveis climáticas que influencia a produtividade da cultura do milho. Uma das estratégias para diminuir o risco de perda na produtividade devido às condições de indisponibilidade hídrica é através do uso da irrigação. Porém, no planejamento de sistemas irrigados é primordial a adoção de manejos de irrigação apropriados que permitam a economia de água. Uma estratégia que visa à economia de água é a utilização da irrigação deficitária. Esta técnica tem como objetivo o uso de menores lâminas de irrigação, resultando em aumento da eficiência do uso da água e a maximização da sua produtividade. Neste trabalho, utilizou-se o modelo CSM-CERES-Maize do Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT), juntamente com dados históricos de clima e de solo para simular diferentes estratégias de manejo de irrigação deficitária em seis municípios do Estado de Minas Gerais. Os municípios de Janaúba, Paracatu e Sete Lagoas apresentaram diferenças significativas de produtividades médias da cultura em resposta aos manejos de irrigação deficitária simulados. Em relação a produtividade da água, o município de Sete Lagoas foi o que apresentou médias maiores para os tratamentos com redução da lâmina plena de irrigação em 10% e 15%. Por outro lado, os municípios de Patos de Minas e Uberaba apresentaram melhores médias de produtividade da água para o tratamento com irrigação total requerida pela cultura.

Palavras-chave: *Zea mays L.*; Ceres-Maize, Irrigação Deficitária, Produtividade da Água.

ABSTRACT

Rainfall is one of the main climatic variables that influence on maize yield. One of the strategies to reduce the risk of yield loss due to water availability conditions is through the use of irrigation. However, when planning irrigation systems is essential to always adopt an appropriate irrigation management system that allow saving water. A strategy aimed to save water is the use of deficit irrigation. This technique aims the use of smaller irrigation depths, resulting in increased water use efficiency and maximizing yield. In this work, we used the CSM-CERES-Maize model from the System Decision Support for Agrotechnology Transfer (DSSAT), along with historical weather and soil data to simulate different management strategies for deficit irrigation in six cities in the state of Minas Gerais. The cities: Janauba, Paracatu and Sete Lagoas showed significant differences in crop yield average in response to the simulated deficit irrigation managements. Regarding water productivity, the county of Sete Lagoas showed the highest average for the treatments with reduction of the full irrigation depth by 10% and 15%. On the other hand, the counties of Patos de Minas and Uberaba showed better average water productivity for treatment with full irrigation.

Keywords: *Zea mays L.*, Ceres-Maize, Deficit Irrigation, Water Productivity.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1. CULTURA DO MILHO.....	10
2.2. IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA.....	12
2.3. MODELAGEM NA AGRICULTURA.....	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	22
5. CONCLUSÕES.....	45
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
7. ANEXOS.....	52

1. INTRODUÇÃO

O milho é um dos cereais mais importantes como fonte de energia para humanos e animais, destacando-se como uma das culturas de maior produção de grãos (FAO, 2015).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho. As regiões Centro-Oeste Sul e Sudeste, representam as maiores participações nacionais, contribuindo com 47%, 30% e 13%, respectivamente, da produção nacional (CONAB, 2015). No Sudeste, o estado de Minas Gerais se destaca na produção e rendimento da cultura do milho, sendo responsável por 8,1% da produção nacional (IBGE, 2015). Porém, de acordo com os dados da Conab (2015), no estado de Minas Gerais houve uma redução na produção do milho, saindo de 5.742,5 mil toneladas na safra 2013/2014, para 5.459,6 mil toneladas na safra 2014/2015, totalizando uma perda de 4,9% da produção da cultura.

Uma possível causa para esta baixa produtividade esta relacionada a fatores climáticos. Durães (2006) afirma que:

[...] fatores ambientais primários; latitude, altitude, chuva, topografia, textura do solo, composição do solo; e fatores climáticos secundários; radiação solar, comprimento do dia, temperatura, água no solo, aeração do solo, minerais do solo de ação direta, afetam os processos fisiológicos e consequentemente o rendimento de culturas [...].

Em relação aos efeitos climáticos, Nied et al. (2005) em seus estudos demonstraram que a precipitação pluvial é a principal variável climática que, ao longo dos anos, tem determinado as variações na produção de grãos da maioria das culturas.

Uma das estratégias para minimizar o risco de perdas na produtividade, devido às condições de indisponibilidade hídrica, é através do uso da irrigação. Segundo Bergamaschi et al. (2006), a redução do coeficiente de variação no rendimento de grãos, em resposta à irrigação, demonstra que esta prática tem efeito estabilizador no rendimento do milho, o que pode ser traduzido em redução de risco climático para a cultura. Porém, no planejamento de uma área irrigada pode se encontrar situações inesperadas, como reservatórios com nível de água armazenada abaixo do máximo ou insuficiente para realizar a irrigação durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura na área plantada (ZWIRTES, 2013).

Uma estratégia de manejo do recurso hídrico, para minimizar este tipo de problema, é através da utilização da irrigação deficitária, que visa atender somente fração da demanda de água da cultura (FRIZZONE, 2007). A irrigação deficitária pode ser utilizada sem resultar em perdas expressivas de produtividade e alcançar patamares elevados de produtividade da água (GEERTS & RAES, 2009).

A modelagem computacional é uma ferramenta que se baseia em dados agrometeorológicos, edáficos e de culturas que permite simular cenários com diversas variáveis que influenciam rendimento das culturas. Os modelos de simulação são ferramentas que podem auxiliar no estabelecimento de lâminas de irrigação para as culturas e avaliar estratégias adequadas para modificar sistemas de irrigação com base em variáveis como evapotranspiração, disponibilidade de água no solo, efeito do estresse hídrico no rendimento final dos grãos entre outras. Modelos computacionais são extremamente úteis e necessários quando os efeitos nas culturas dependem de interações complexas com o solo, clima e outras decisões relacionadas ao próprio manejo do agroecossistema (JONES et al., 2006).

O Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT) (HOOGENBOOM et al., 2014) é um sistema integrado de apoio à decisão que permite avaliar diversas opções de manejo da cultura do milho (TSUJI et al. 1994). O DSSAT é um modelo computacional aplicável como suporte a decisões de manejo das culturas e de estimativa de produtividade, entre outras finalidades. Além disso, pode ser usado como ferramenta de auxílio no melhoramento genético, análise da interação genótipo versus ambiente, no manejo cultural, em sistemas de produção, no planejamento agrícola em nível regional ou nacional e na área ambiental (ANDRADE et al., 2009).

Este trabalho foi realizado com objetivo de avaliar a produtividade da água e de grãos, a partir de simulações no DSSAT para a cultura do milho sob diferentes estratégias de manejo de irrigação deficitária em seis municípios produtores de milho no estado de Minas Gerais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CULTURA DO MILHO

O milho (*Zea mays* L.) é uma planta monocotiledônea, herbácea, pertencente à família Gramineae/Poaceae (MAGALHÃES et al., 2002). Pode ser cultivado em diversas partes do mundo, pois adapta-se bem em latitude de 58° Norte até 40° Sul (FORNASIERI FILHO, 2007). É um cereal que tem relevância econômica mundialmente em virtude das suas diversas formas de utilização, pois este fornece produtos para alimentação humana, animal e matéria-prima para indústria tecnificada (SPRAGUE & DUDLEY, 1988).

O Brasil ocupa a terceira posição mundial na produção de milho, sendo responsável por 84.729,2 mil toneladas na safra 2014/2015 (CONAB, 2015c). Minas Gerais se destaca na produção e rendimento da cultura do milho, sendo responsável por 19% da produção nacional (IBGE, 2015b).

As épocas de plantio da cultura do milho são diferentes para cada região do país Cruz et al. (2009), pois são definidas de acordo com a estação chuvosa de cada localidade. Segundo o autor citado acima, em média as épocas de plantio das lavouras de milho no Brasil são 40% plantadas no mês de setembro, 33% no mês de outubro, 19% no mês de novembro, 2% no mês de dezembro e 1% no mês de janeiro.

Nos últimos anos o cultivo de milho Safrinha tem adquirido importância no Brasil, constituindo-se em instrumento fundamental para o complemento no abastecimento da produção de milho no país (SHIOGA et al., 2004). Além disso, o cultivo do milho na Safrinha é viável economicamente para o produtor (CASAGRANDE & FORNASIERI FILHO, 2002). De acordo com CRUZ et al., (2011) o milho safrinha é caracterizado pelo cultivo em sequeiro, com semeadura realizada nos meses de janeiro a abril, após a cultura de verão, geralmente após soja precoce.

O milho pertence ao grupo de plantas com metabolismo fotossintético C4, que se caracteriza pelo elevado potencial produtivo (BERGAMASCHI, 2004). No entanto, alguns fatores abióticos estressantes podem interferir na produtividade ainda no início do ciclo de desenvolvimento da cultura, reduzindo o acúmulo de fitomassa, velocidade de crescimento e conseqüentemente a produtividade (CASTRO & GARCIA, 1996). Entre os diversos fatores abióticos se destacam a radiação solar, temperatura e

disponibilidade hídrica. Estes fatores influenciam diretamente nas atividades fisiológicas da planta, interferindo na produção de matéria seca e de grãos (BRACHTVOGEL et al., 2009).

A disponibilidade hídrica é um fator abiótico essencial para que a cultura expresse seu potencial produtivo. A água é um recurso natural determinante para a produção de alimento e sua disponibilidade e distribuição podem definir a viabilidade da produção agropecuária, principalmente em regiões onde há ocorrência de déficit hídrico ou distribuição irregular de chuvas (FAGGION et al., 2009). A distribuição irregular de chuvas, durante o ciclo de desenvolvimento da planta, pode explicar muito a variabilidade do seu rendimento ao longo dos anos (BERGAMASCHI et al., 2007). Frequentemente durante o período de cultivo do milho, devido à maior demanda evaporativa da atmosfera, as chuvas não são suficientes para suprir as necessidades hídricas da cultura (MATEZNAUER et al., 2002).

As oscilações nas safras de milho, nas principais regiões produtoras do Brasil, estão associadas principalmente a disponibilidade de água, sobretudo no período crítico da cultura, que vai do pendoamento ao início do enchimento de grãos (BERGAMASCHI et al., 2004). Para Carlesso (1998), a limitação na disponibilidade de água no solo durante o período de pré-florescimento afeta o desenvolvimento das estruturas vegetativas das plantas, reduzindo a capacidade de produção de fitomassa pela cultura. De acordo com Denmead & Shaw (1960), a redução do rendimento dos grãos, causada pelo estresse hídrico, ocorre a partir da emergência do pendão até cerca de uma semana após o espigamento.

A disponibilidade hídrica é um fator crucial na definição dos períodos preferenciais de cultivo para obtenção das melhores produtividades (WAGNER et al., 2013).

2.2. IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA

A produtividade do milho é afetada pela distribuição da disponibilidade de água ao longo do ciclo fenológico e a probabilidade média de redução de produção por deficiência hídrica é de aproximadamente 50% (WAGNER et al., 2013). Diante disso, há um crescente investimento dos produtores em sistemas de irrigação como tentativa de manter a produtividade dos cultivos em períodos de escassez hídrica (MARTIN et al., 2012).

A agricultura irrigada no Brasil ocupa apenas 18% da área cultivada e responde por 42% da produção total de alimentos (CHRISTOFIDIS, 2005). Uma parte desta área irrigada é por uso do pivô central. Este sistema permite uma irrigação mecanizada de extensas áreas, facilidade no manejo, pois a estrutura não interfere nas operações agrícolas, além da possibilidade de aplicação de pequenas lâminas a intervalos reduzidos (FOLEGATTI et al., 1998).

Entretanto, em alguns casos a água é um fator limitante. Assim, deve-se optar por culturas que requerem menor quantidade de água ou se realizar investimentos em sistemas de irrigação mais eficientes (PAYERO et al., 2009). É importante planejar o manejo de irrigação para aumentar o rendimento, a eficiência do uso da água, a adoção de estratégias eficientes na gestão da irrigação, mantendo a viabilidade econômica da atividade (MARTIN et al., 2012).

A utilização da irrigação deficitária é uma das estratégias de manejo de irrigação. Esta prática consiste na reposição de lâminas de irrigação inferiores ao requerimento hídrico das culturas, para satisfazer parcialmente as necessidades hídricas (KANG et al., 2002). A produtividade da água pode ser definida de duas formas, sendo elas: calculando-se a razão das lâminas médias de irrigação de cada tratamento transformada em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ pela produtividade em kg ha^{-1} . Ou de acordo com Pereira et al.; (2009) através da razão a razão entre produção atingida pela cultura em kg de massa seca e a quantidade de água utilizada, expressa em m^3 .

Em geral, as irrigações são controladas e realizadas em períodos em que a planta é mais sensível aos efeitos de déficit hídrico (LIMA, 2012). Dessa forma, o principal objetivo desta prática é aumentar a eficiência da água na cultura e, conseqüentemente, a eliminação de irrigações que não favoreçam incrementos de produtividade nas culturas

(KIRDA, 2002). A adoção da irrigação deficitária pode maximizar a produtividade da água, pois mesmo havendo redução na produtividade da cultura, a sua qualidade ainda é assegurada, sendo semelhante à irrigação plena (GEERTS & RAES, 2009).

De acordo com English (1990), em áreas com escassez de água, a maximização da produtividade da água pode ser economicamente mais rentável do que a maximização da produção. O aumento da produtividade da água na agricultura desempenha um papel relevante para aliviar a competição por recursos em escassez e prevenção ambiental, além de garantir a segurança alimentar (MOLDEN et al., 2003).

Em estudos realizados por Martin et al. (2012), verificou-se que na cultura do milho a adoção de irrigação deficitária provocou um aumento da produtividade da água.

2.3. MODELAGEM NA AGRICULTURA

Na agricultura, a modelagem computacional é uma ferramenta que tem sido bastante aplicada na simulação do crescimento das culturas. Para Hoogenboom (2000), os modelos de simulação têm sido bastante estudados e utilizados em todas as partes do mundo, pois são capazes de prever o rendimento final das culturas.

Os modelos de crescimento de culturas apresentam potencial de uso em pesquisas, manejo de culturas, no entendimento sobre as interações genéticas, fisiológicas e do ambiente e nas decisões de práticas culturais (BOOTE et al., 1996). Além disso, representam o funcionamento dinâmico do sistema solo-planta e sua interação com o clima (ANDRADE et al., 2009). E pode ser aplicado na tomada de decisão, que tem como finalidade prever a produtividade, sendo útil esta informação para médios e grandes produtores ou para governos na resolução de questões políticas e de segurança alimentar (HOOGENBOOM, 2000).

Entre as vantagens de uso dos modelos de simulação, ressalta-se a possibilidade de economizar tempo, esforço e recursos necessários para a tomada de decisões relacionadas ao manejo das culturas (JAME & CURTFORTH, 1996). Além disso, é possível combinar os resultados do modelo com fatores econômicos, para a análise de riscos associados a cada estratégia (JONES & RITCHIE, 1990).

Entre os modelos de simulação de cultura utilizados atualmente, destaca-se o CROPWAT 8.0 que é um programa livre, desenvolvido pelo Land and Water

Development Division da FAO (2015). É um programa de computador desenvolvido para o cálculo dos requerimentos hídricos das culturas e necessidade de irrigação, com base em dados de solo, clima e cultura. É utilizado para avaliar práticas de irrigações e estimar o desempenho das culturas sob condições de sequeiro e irrigado (FAO, 2015).

O CENTURY é outro modelo computacional desenvolvido para simular a dinâmica de Carbono, e nutrientes como nitrogênio, fósforo, enxofre e molibdênio do solo em pastagens naturais nas planícies norte americanas (PARTON et al. 1987). É aplicado com sucesso a diversos ecossistemas e tipos de solo, especialmente sob condições de clima temperado (PAVAN, 2007).

Outros modelos de simulação, segundo Pavan (2007), merecem destaque na simulação de culturas. O APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) é um exemplo. Este foi desenvolvido na Austrália, e tem como objetivo auxiliar na recomendação de diferentes cultivos, possuindo um grande número de módulos agrossilvopastoris, processos do solo e de gerenciamento.

O DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) é outro modelo de relevância muito usado nos sistemas agrícolas. Foi desenvolvido em um projeto americano na Universidade do Havaí e é considerado um dos mais difundidos na área de simulação de crescimento e desenvolvimento de culturas (PAVAN, 2007).

A base do modelo de culturas provinda do DSSAT é ampla e abrange diversas culturas, considerando-se que o sistema estudado seja uma unidade homogênea (THORP et al., 2008). Os modelos de simulação CERES (Crop Environmet Resource Synthesis) estão agrupados no Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT). Possuem plataformas exclusivas para as culturas do sorgo, trigo, milheto, arroz e milho, (HOOGENBOOM et al., 2012).

O Ceres-Maize é um modelo determinístico que já foi amplamente testado para diversos tipos de solos, climas e híbridos de milho ao redor do mundo (JONES et al., 2003). O modelo é usado para pesquisas básicas e aplicadas relacionadas aos efeitos do clima (regime térmico e estresse hídrico), do manejo (irrigação, população e espaçamento entre fileiras, datas de semeadura) e do crescimento/rendimento do milho. Também é muito utilizado em trabalhos de alterações globais para avaliar os potenciais efeitos do aquecimento do clima e de mudanças na precipitação e eficiência de uso de água devido ao aumento de CO₂ (ANDRADE et al., 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo CSM-CERES-Maize do pacote DSSAT, versão 4.6.1 (HOOGENBOOM et al., 2014), foi utilizado para simular cenários de manejo da irrigação, para economia de água na cultura do milho. Considerou-se o cultivo do híbrido simples DKB 390PRO, cujos coeficientes genéticos foram calibrados.

Os dados para calibração foram extraídos de 15 ensaios experimentais realizados nos municípios de Sete Lagoas, Papagaios, Patos de Minas e Paracatu, em Minas Gerais, e Rio Verde, Goiás. Nestes ensaios foram obtidos dados da cultura do milho submetida a diferentes tratamentos como déficit hídrico, população de plantas e cultivo em safrinha. Para cada ensaio, quando possível, foram preparados arquivos tipo X, A e T. Nos arquivos X são organizados os dados das condições iniciais de umidade, nitrato e amônio, palhada e informações de manejo, como cultivar, data de semeadura, espaçamento, densidade de plantio, adubações e irrigações. Nos arquivos A são organizados os dados obtidos em datas específicas do ciclo da cultura, como data de florescimento, maturidade fisiológica e colheita. E nos arquivos T são organizados os dados temporais, obtidos ao longo do ciclo da cultura.

A calibração, feita em etapa preliminar, consistiu num processo de tentativa e erro, mediante comparação de resultados simulados e com aqueles observados no campo (AMARAL et al., 2010). As estatísticas RMSE (LOAGUE & GREEN, 1991) e d-Start (WILLMOTT et al., 1985) foram utilizadas para avaliar a qualidade da calibração. A estatística RMSE quantifica a magnitude dos prováveis erros do modelo e avalia a precisão do modelo de estimativa. Além disso, fornece uma informação em relação à dispersão dos valores, isto é, o grau de espalhamento obtido na correção entre os valores simulados e observados. E a estatística d-Start avalia a exatidão do modelo de estimativa, indicando o grau de exatidão entre os valores preditos e observados, destacando-se que quanto mais próximo de um melhor o desempenho do modelo.

Para calibração numa etapa inicial foi avaliado o balanço de água do solo e realizado pequenos ajustes nos dados de retenção de água da área experimental para que o modelo simule corretamente a dinâmica da água no solo. Posteriormente, ajustes foram realizados nos coeficientes que controlam a fenologia e o número de folhas emitidas pela cultura. Finalmente, ajustes foram procedidos nos coeficientes que

controlam a produtividade da cultura, como número de grãos por unidade de área e peso unitário de grãos.

De acordo com os dados preliminares da calibração o modelo simulou com razoável acurácia o número de dias para a antese, com um RMSE de 4,3 e um d-Start de 0,759 (Tabela 1). A acurácia do modelo foi mais elevada para a simulação da maturidade fisiológica e da produtividade de grãos, com valores de d-Start acima de 0,9. De acordo com Silva et al., (2012), quanto maior o d-Start, melhor exatidão do modelo em relação aos dados observados.

Tabela 1. Dados fenológicos e de produtividade da cultivar DKB 390PRO após calibração do modelo CSM-CERES-Maize.

Fases Fenológicas	Dados Observados	Dados Simulados	Diferença	RMSE	d-Start
Antese (DAS)	67	67	0 (dias)	4,245	0,759
Mat. Fisiológica (DAS)	148	148	0 (dias)	4,555	0,964
Produtividade (kg ha ⁻¹)	6591	6509	82 (kg)	918,115	0,957

As simulações foram realizadas em seis localidades do Estado de Minas Gerais: Janaúba, Lavras, Patos de Minas, Paracatu, Sete Lagoas e Uberaba (Figura 1).

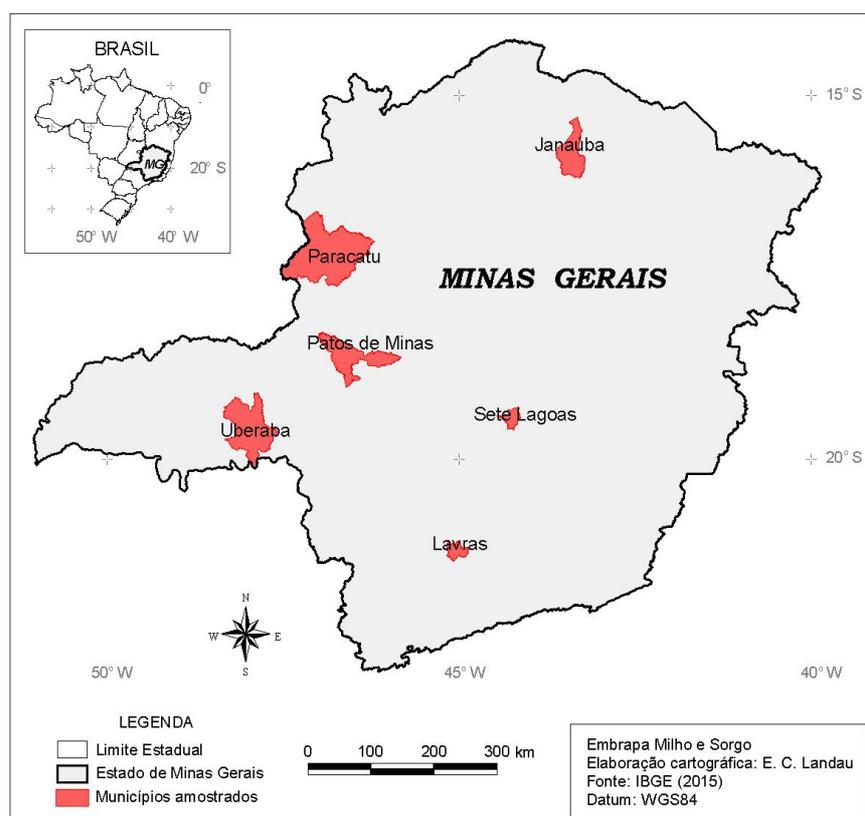


Figura 1: Localização geográfica dos municípios amostrados no Estado de Minas Gerais, Brasil.

As variáveis meteorológicas usadas como dados de entrada no modelo CSM-CERES-Maize foram temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação pluvial e número de horas de brilho solar. Estas variáveis foram obtidas no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o período compreendido entre 1981 a 2013, totalizando 33 anos. Na Tabela 2 encontram-se as coordenadas das estações meteorológicas.

Tabela 2: Localização das estações meteorológicas.

Localidades	Latitude	Longitude	Altitude
	(^o)	(^o)	(m)
Janaúba	-15,78	-43,30	516
Lavras	-21,75	-45,00	919
Paracatu	-17,23	-46,88	712
Patos de Minas	-18,51	-46,43	940
Sete Lagoas	-19,46	-44,25	732
Uberaba	-20,75	-42,85	690

A ferramenta Weatherman (PICKERING et al., 1994) do sistema DSSAT foi utilizada para analisar a consistência dos dados, para preencher falhas na temperatura máxima e mínima, na precipitação em períodos curtos (inferiores a 15 dias) e para estimar a radiação solar a partir de dados do número de horas de brilho solar usando a equação de Angstrom-Prescott (ANGSTROM, 1924; PRESCOTT, 1940). Em virtude da ausência de valores para os coeficientes “a” e “b” requeridos pela equação para os municípios, estes foram padronizados em 0,25 e 0,50, respectivamente, conforme recomendado por Allen et al., (1998).

Para obtenção de dados de atributos físicos e químicos do solo para análise química e física realizou-se amostragens de campo conduzidas durante o ano de 2013 nas localidades escolhidas para realizar as simulações de manejo de irrigação deficitária. Foram abertas trincheiras com 100 centímetros de profundidade e estratificadas em cinco níveis de profundidade. Os intervalos de profundidade foram: 0-5 cm, 5-20cm, 20-40cm, 40-70cm e 70-100 cm. Os resultados dessas análises foram inseridos no modelo como dados de entrada. Na Tabela 3 abaixo são informados dados preliminares da Disponibilidade Total de Água (DTA) e da Capacidade Total de Água no Solo (CTA) para as camadas de 0-100 cm para as seis localidades estudadas.

Tabela 3: Valores de Disponibilidade Total de Água no Solo (DTA) e Capacidade Total de Água no Solo (CTA), para as camadas de 0 - 100 cm, para as seis localidades estudadas.

Localidade	Camada (cm)	DTA (mm/m)	CTA (mm)
Janaúba	5	0,158	7,90
	20	0,103	15,45
	40	0,108	21,60
	70	0,12	36,00
	100	0,136	40,80
			121,75
Lavras	5	0,158	7,90
	20	0,114	22,80
	40	0,125	50,00
	70	0,124	86,80
	100	0,083	83,00
			250,50
Paracatu	5	0,109	5,45
	20	0,108	21,60
	40	0,109	43,60
	70	0,113	79,10
	100	0,102	102,00
			251,75
Patos de Minas	5	0,152	7,60
	20	0,145	29,00
	40	0,094	37,60
	70	0,104	72,80
	100	0,110	110,00
			257,00
Sete Lagoas	5	0,109	5,45
	20	0,113	22,60
	40	0,125	50,00
	70	0,125	87,50
	100	0,108	108,00
			273,55
Uberaba	5	0,144	7,20
	20	0,146	29,20
	40	0,128	51,20
	70	0,138	96,60
	100	0,153	153,00
			337,20

Na simulação, para todas as cidades considerou-se que a cultura anterior ao milho foi braquiária, deixando para o plantio do milho um resíduo vegetal de 2000 kg ha⁻¹, onde 1% era composto de nitrogênio. Na simulação considerou-se espaçamento entre linhas de 50 cm, com uma população inicial de 68 mil plantas ha⁻¹. Considerou-se também que a semeadura foi feita a 5 cm de profundidade. O início de todas as simulações ocorreu um mês antes da data de semeadura para que se obtenha uma estimativa razoável de umidade inicial do solo.

Ainda durante as simulações a adubação consistiu em 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio, na forma de ureia; 140 kg ha⁻¹ de P na fórmula de P₂O₅ e 80 kg ha⁻¹ de K na fórmula de K₂O aplicados na semeadura. Na adubação de cobertura considerou 150 kg ha⁻¹ de nitrogênio, na forma de ureia, aplicados 25 dias após semeadura, mais 70 kg ha⁻¹ de K₂O na fórmula de cloreto de potássio, aplicados 40 dias após semeadura.

Valores médios de produtividade de grãos foram determinados permitindo que se estabelecesse a melhor data de semeadura para as seis localidades avaliadas. Na Tabela 4 observa-se as melhores datas de semeadura para regime irrigado para as seis localidades avaliadas.

Tabela 4: Melhor data de semeadura para seis localidades avaliadas.

Localidade	Melhor Data de Semeadura
Janaúba	20/Fev
Lavras	01/Ago
Paracatu	20/Fev
Patos de Minas	13/Fev
Sete Lagoas	20/Fev
Uberaba	13/Fev

Para a execução das simulações foi utilizada a ferramenta de análise experimental juntamente com os dados históricos diários de clima e de solo de cada município para simular estratégias de manejo da irrigação deficitária. As simulações feitas pelo programa tiveram como início o ano 1981 e término o ano de 2013, resultando em 33 anos de simulação. A princípio, foi feito para cada localidade um arquivo para cada ano, totalizando 198 arquivos; nestes arquivos o DSSAT simulou as datas e as lâminas ideais de irrigação conforme requerimento da cultura do milho. As simulações de irrigação para este arquivo foram modeladas para serem realizadas automaticamente sempre que os teores de água no solo estivessem a 50% da

disponibilidade total de água no solo para a planta na profundidade de 50 cm. Considerou-se um sistema de irrigação por aspersão com eficiência de 100%

Depois de finalizadas as simulações realizadas pelo modelo, buscou-se nos arquivos de saída a produtividade da cultura e as datas em que a cultura foi irrigada e as lâminas de irrigação líquidas aplicadas. A produtividade, as datas e os valores das lâminas de irrigação foram copiados em planilha Eletrônica Excel (Microsoft Corporation). As lâminas de irrigação aplicadas foram reduzidas 5%, 10%, 15%, 20% e 25%.

Em seguida para cada localidade foram criados 33 arquivos, sendo um para cada ano simulado. Nestes arquivos foram inseridas as datas simuladas pelo programa em que a cultura foi irrigada e as lâminas de irrigação originais reduzidas em 5%. Sucessivamente, foi feito o mesmo para as lâminas líquidas de irrigação reduzidas 10%, 15%, 20% e 25%. Os valores de produtividades simuladas pelo modelo são gerados em peso de matéria seca. Diante disto, as produtividades foram corrigidas para a umidade dos grãos de 13%.

Para encontrar a produtividade da água na cultura do milho, calculou-se a razão das lâminas médias de irrigação de cada tratamento, transformada em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, pela produtividade em kg ha^{-1} .

Foi empregado o Teste de Lilliefors ao nível de 5% de significância, a fim de verificar a normalidade das distribuições de produtividade da cultura e produtividade da água, aplicando-se o programa StatTools versão 6.0 (PALISADE, 2015). A análise de aderência visou auxiliar na verificação do requerimento de normalidade para aplicação da análise de variância (ANOVA). A ANOVA foi executada em planilha eletrônica Excel (Microsoft Corporation) com um nível de 5% de significância, para cada município, considerando-se delineamento inteiramente casualizado.

Posteriormente à ANOVA, para as localidades em que os tratamentos apresentaram valores de F superiores aos valores tabelados ao nível de significância de 5%, foi realizado o teste de Tukey ao nível de 5% de significância, por meio do Programa R, versão 3.2.2.

4. RESULTADOS E DICUSSÕES

Nas Figuras 2, 3 e 4 são apresentadas as lâminas de irrigação aplicadas ao longo do ciclo da cultura do milho para os 33 anos de simulação.

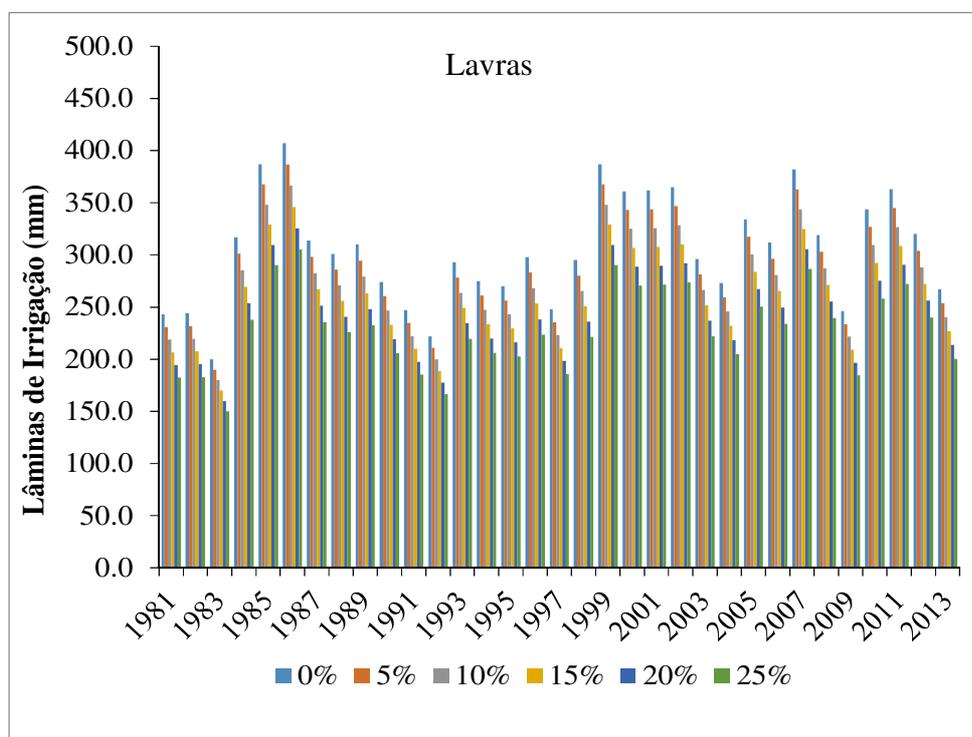
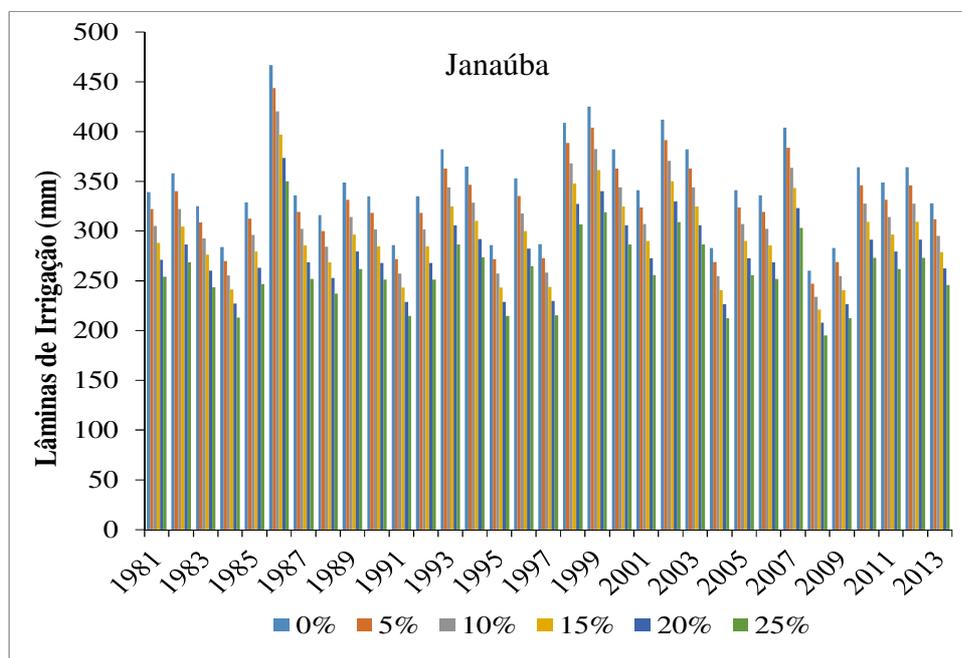


Figura 2: Lâminas de irrigação requeridas pela cultura do milho (0%) e lâminas reduzidas em 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, para os municípios de Janaúba e Lavras.

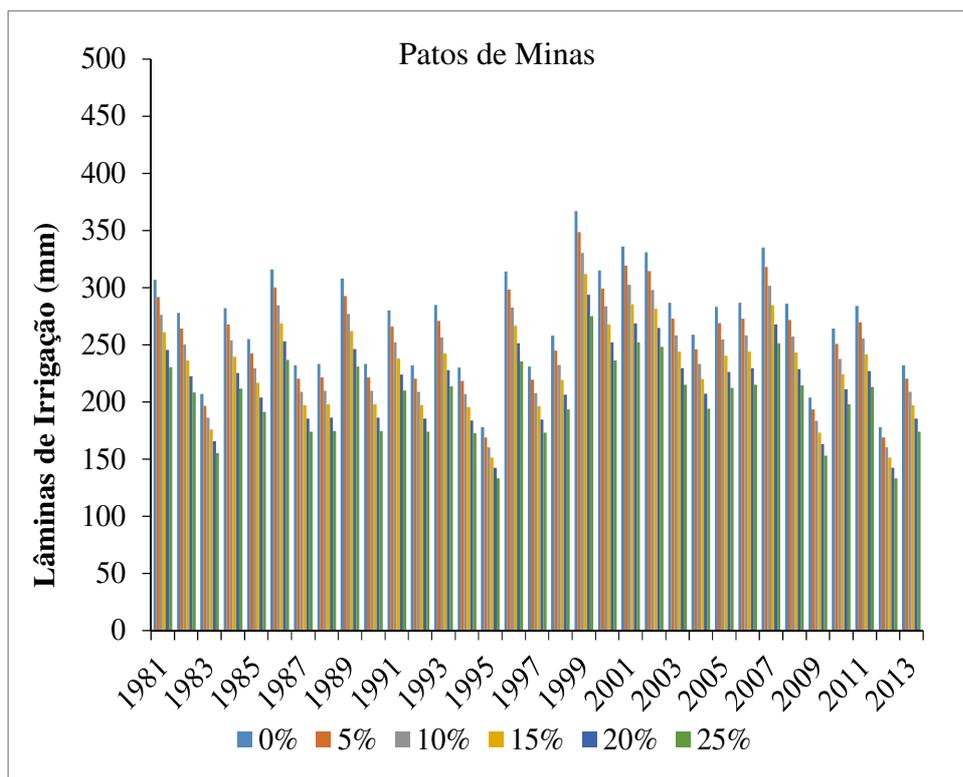
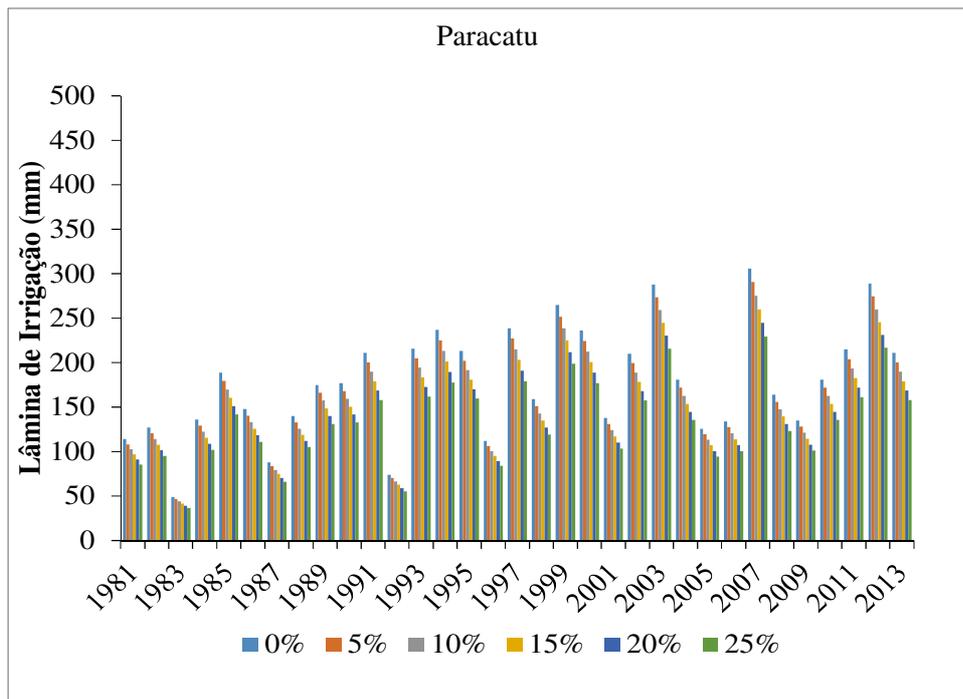


Figura 3: Lâminas de irrigação requeridas pela cultura do milho (0%) e lâminas reduzidas em 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, para os municípios de Paracatu e Patos de Minas.

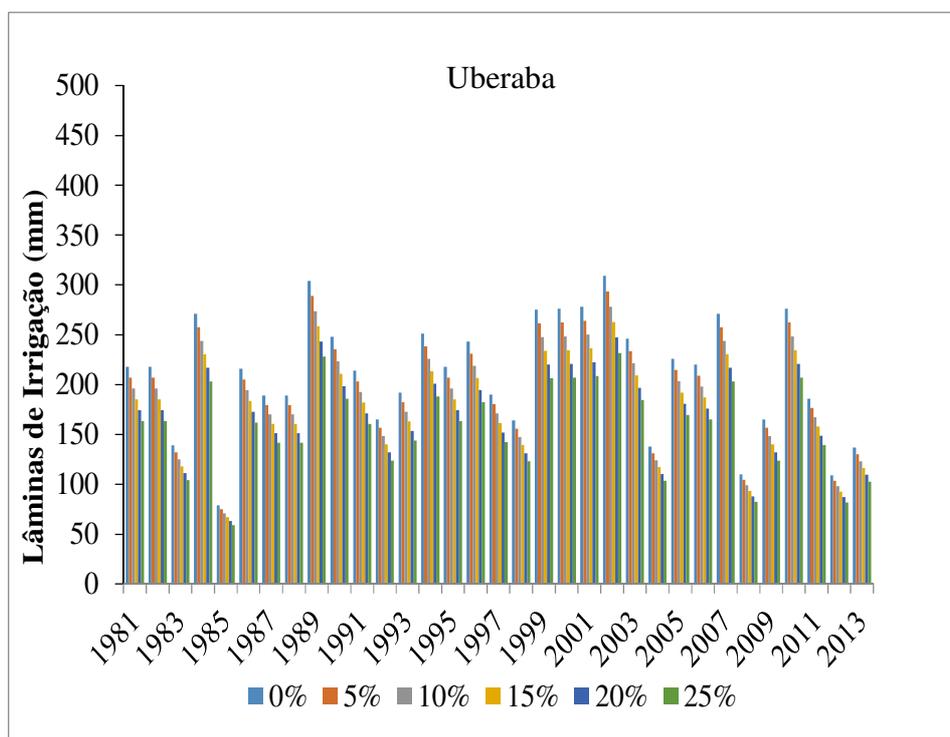
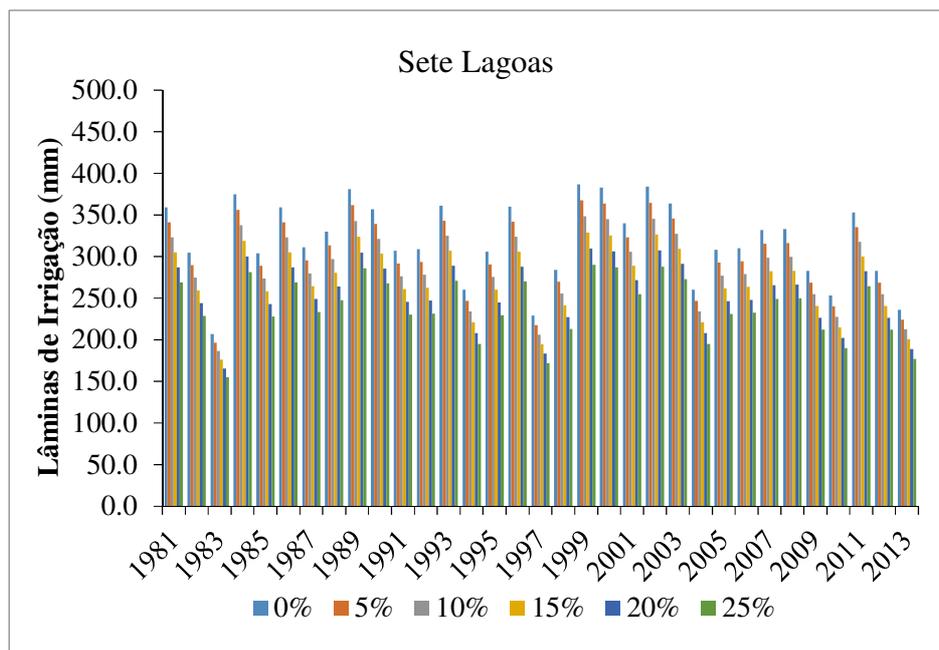


Figura 4: Lâminas de irrigação requeridas pela cultura do milho (0%), e lâminas reduzidas em 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, para os municípios de Sete Lagoas e Uberaba.

Observa-se nas figuras anteriores que o município de Janaúba foi o que recebeu as maiores lâminas de irrigação em todos os anos de simulação. Por outro lado,

os municípios de Lavras e Uberaba foram os que receberam as menores lâminas de irrigação ao longo do ciclo da cultura do milho em todos os anos de simulação. Isso pode ser atribuído às condições climáticas e à capacidade de armazenamento de água do solo das localidades estudadas.

No Anexo desta dissertação são apresentados os gráficos de produtividades de grãos obtidas com os diferentes tratamentos para os seis municípios considerados. Para os 33 anos simulados pelo modelo, nota-se nas Tabelas 5, 6 e 7 que há uma tendência de maiores produtividade de grãos para os tratamentos em que houve irrigação total requerida pela cultura, para os municípios de Janaúba, Paracatu e Sete Lagoas. De acordo com estudo realizado por Bergamaschi (2006), a irrigação máxima requisitada pela cultura do milho pode proporcionar aumento próximo a 70% no rendimento de grãos, em relação à cultura não irrigada. Para Bergonci et al. (2001) uma dose intermediária de irrigação, a partir de 60% daquela necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo é ideal para que sejam obtidos os melhores rendimentos de milho.

Tabela 5: Produtividade da cultura do milho (kg ha^{-1}) simulada para o município de Janaúba com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (0%) e as lâminas originais reduzidas em 5%, 10%, 15%, 20% e 25%.

Ano	Produtividade (kg ha^{-1})					
	Tratamento ⁽¹⁾					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
1981	8432	8430	7971	7846	7638	7446
1982	9323	9286	8578	8161	8061	7752
1983	8037	8037	7432	7197	6926	6685
1984	10047	10047	9471	9372	9167	8956
1985	8787	8787	8130	7743	7272	6899
1986	7817	7530	6455	5848	5324	4876
1987	9028	9028	8554	8341	7885	6960
1988	8930	8929	8346	8152	7872	7567
1989	9784	9693	8490	7613	6868	6364
1990	9387	9387	8882	8882	8882	8882
1991	9391	9377	8871	8744	8514	8110
1992	7854	7814	7052	6703	6329	6005
1993	9791	9517	8537	7724	7016	6195
1994	9837	9792	8853	8372	7602	6929
1995	8339	8330	7825	7679	7474	7270
1996	8090	8084	7441	7191	6929	6676
1997	7748	7748	7439	7439	7439	7439
1998	8114	7699	6791	6264	5633	5084
1999	9663	9374	8156	7311	6889	5974
2000	9147	9057	8183	7732	7230	6555
2001	8818	8572	7352	6946	6457	6037
2002	9120	8797	7808	7064	6408	5744
2003	9402	9202	7961	7269	6587	5838
2004	10129	10130	9533	9428	9271	9054
2005	8956	8928	8177	7857	7347	6744
2006	9932	9932	9063	8897	8654	8402
2007	8921	8746	7732	6951	6232	5439
2008	8631	8631	8125	8037	7918	7792
2009	7870	7856	7879	7740	7566	7384
2010	8740	8660	7246	7176	6426	5861
2011	8751	8726	8101	7762	7023	6403
2012	9087	8687	7583	7021	6528	5791
2013	8203	8203	7749	7657	7454	7243
Média	8912	8819	8054	7701	7298	6859

⁽¹⁾I00, I05, I10, I15, I20 e I25, respectivamente, para os tratamentos com 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de redução nas lâminas de irrigação.

Tabela 6: Produtividade da cultura do milho (kg ha^{-1}) simulada para o município de Paracatu com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (0%) e as lâminas originais reduzidas em 5%, 10%, 15%, 20% e 25%.

Ano	Produtividade (kg ha^{-1})					
	Tratamento ⁽¹⁾					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
1981	7210	7194	7159	7111	7063	6992
1982	9101	8932	8785	8629	8356	8098
1983	8409	8166	8124	8105	8100	8062
1984	8172	8133	8007	7845	7595	7325
1985	9599	9500	9500	9151	8870	8586
1986	11490	9700	8789	8087	7208	6378
1987	9554	9362	9256	9111	8949	8694
1988	10363	10363	10224	10122	9920	9691
1989	9577	8305	7899	7462	6707	5905
1990	8995	8460	8392	8220	8011	7760
1991	9085	7762	7575	7277	6956	6654
1992	8816	8816	8803	8766	8676	8510
1993	11567	11567	11439	11217	10811	10171
1994	11290	10244	10037	9771	9553	9131
1995	9374	9325	9199	9059	8948	8797
1996	9769	9438	9246	9054	8843	8641
1997	10748	10748	10746	10526	10440	10151
1998	10262	9420	9299	8531	8099	7689
1999	10853	10239	9414	8847	8070	7617
2000	11093	9363	8860	8448	8120	8120
2001	10656	10530	10360	9841	9182	8424
2002	10729	10556	9948	9268	8552	7900
2003	11255	11255	11115	10921	10560	10164
2004	9916	9738	9579	9414	9237	9046
2005	9431	8743	8510	8222	7617	7170
2006	12168	10120	9861	9445	8990	8610
2007	11356	11195	10930	10599	10009	9472
2008	10748	10014	9959	9772	9570	9300
2009	8757	8567	8470	8324	8093	7969
2010	11092	10977	10522	9886	9193	8552
2011	10798	10847	10845	10277	10264	9891
2012	9368	9257	8885	8399	7978	7594
2013	10495	10495	10495	10426	10215	10041
Média	10064	9616	9401	9095	8750	8397

Tabela 7: Produtividade da cultura do milho (kg ha^{-1}) simulada para o município de Sete Lagoas com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (0%) e as lâminas originais reduzidas em 5%, 10%, 15%, 20% e 25%.

Ano	Produtividade (kg ha^{-1})					
	Tratamento ⁽¹⁾					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
1981	12533	12061	12047	11605	11841	11413
1982	12533	10777	10705	10777	11003	11251
1983	10132	9548	9520	9552	9932	9932
1984	11777	10485	10294	10030	9291	8882
1985	13601	13325	12897	13026	12991	13009
1986	10443	9915	9576	9125	8851	8769
1987	12476	11776	11693	11763	12006	12313
1988	11405	10756	10756	10583	11039	10752
1989	12556	12049	11051	10206	10231	8962
1990	12395	11825	11775	11075	11399	10176
1991	12702	11666	11509	11301	11989	11687
1992	9500	8947	8947	8901	9476	9430
1993	13555	12676	12283	11279	11831	10334
1994	11747	10554	10286	10463	11059	11186
1995	11426	10763	10737	10702	11023	11000
1996	12610	11855	11803	11133	11682	10875
1997	12726	11985	11955	11985	12623	12585
1998	12459	12183	12183	12092	12317	11884
1999	12782	12363	11039	10605	10062	8423
2000	12524	11549	11469	10187	10624	9311
2001	12546	11994	11490	11405	10332	10156
2002	12164	11683	11702	10989	11229	9664
2003	13617	12882	12882	12857	12675	12761
2004	11349	11030	10982	11030	11056	11169
2005	10518	10446	9960	9998	9791	8869
2006	12154	11595	11561	10992	11302	10813
2007	10823	10698	10746	10300	10562	9894
2008	11939	11436	11271	11371	11354	11384
2009	12321	11801	11754	11772	11990	12001
2010	11557	10995	10908	10993	11092	11213
2011	11707	11409	11091	10792	10107	9601
2012	10720	10136	10141	9891	10638	10077
2013	11006	10667	10659	10534	10790	10136
Média	11949	11328	11142	10888	11036	10603

Em contrapartida, nos municípios de Patos de Minas e Uberaba (Tabelas 8 e 9) em alguns anos, para os tratamentos com as lâminas de irrigação total necessária, obteve-se produtividades menores ou iguais às obtidas para os tratamentos com redução da irrigação total requerida. Fatores climáticos, capacidade de retenção de água do solo e lixiviação de N podem ter contribuído para que a cultura do milho nestas localidades apresentasse redução da produtividade. Vale observar, que para estas localidades não se identificou contrastes significativos entre médias de produtividade da cultura.

Tabela 8: Produtividade da cultura do milho (kg ha⁻¹) simulada para o município de Patos de Minas com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (0%) e as lâminas originais reduzidas em 5%, 10%, 15%, 20% e 25%.

Ano	Produtividade (kg ha ⁻¹)					
	Tratamento ⁽¹⁾					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
1981	10934	10934	10934	11601	11446	11230
1982	10968	10968	10968	11438	11201	10880
1983	8893	8895	8895	9445	9447	9447
1984	8872	8872	8872	9266	9205	9082
1985	9987	9987	9987	10422	10254	10026
1986	9984	9926	9683	10023	9680	9216
1987	9444	9444	9444	10016	9998	9924
1988	10395	10395	10395	10869	10869	10869
1989	9533	9518	9486	9932	9424	8793
1990	11720	11720	11720	12103	12103	12068
1991	11161	10926	10764	11244	11091	10844
1992	8138	8102	8102	8484	8484	8379
1993	10315	10315	10315	10938	10847	10710
1994	11603	11601	11600	12292	12287	12262
1995	9695	9695	9695	10287	10286	10261
1996	11877	11877	11877	12425	12392	12278
1997	11236	11236	11236	11771	11771	11734
1998	11566	11566	11566	11928	11928	11903
1999	11100	11091	10864	11013	10291	9561
2000	10301	10301	10301	10770	10638	10390
2001	11977	11977	11977	12403	12178	11934
2002	11091	11087	11052	11436	11125	10389
2003	11355	11355	11355	11966	11766	11497
2004	10037	10034	10034	10536	10397	10201
2005	10089	10089	10087	10305	10102	9872
2006	12716	12716	12716	13371	13116	12841
2007	9877	9825	9602	10703	10180	9680
2008	11403	11403	11403	11602	11491	11263
2009	10169	10169	10169	10795	10795	10795
2010	12154	12154	12154	12807	12592	12308
2011	11028	11028	11028	11592	11379	11084
2012	10409	10409	10409	11046	11046	11046
2013	10877	10877	10877	11524	11422	11232
Média	10633	10621	10593	11102	10946	10727

Tabela 9: Produtividade da cultura do milho (kg ha^{-1}) simulada para o município de Uberaba com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (0%) e as lâminas originais reduzidas em 5%, 10%, 15%, 20% e 25%.

Ano	Produtividade (kg ha^{-1})					
	Tratamento ⁽¹⁾					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
1981	10972	10972	10972	10972	10972	10972
1982	10610	10446	10408	10343	10239	10379
1983	10021	10021	10021	10021	10021	10021
1984	9864	9864	9864	9822	9666	9589
1985	9022	9022	9022	9022	9022	9022
1986	12390	12390	12390	12390	12390	12356
1987	10845	10845	10845	10845	10845	10822
1988	11925	11925	11925	11925	11925	11925
1989	12029	12029	12029	12015	11941	11843
1990	10698	10698	10698	10698	10691	10666
1991	11469	11469	11469	11469	11455	11310
1992	9138	9138	9138	9138	9138	9134
1993	11303	11303	11303	11303	11303	11303
1994	10199	10199	10183	10063	9909	9783
1995	10267	10267	10267	10267	10256	10187
1996	12003	12003	12003	11925	11836	11809
1997	11732	11732	11732	11732	11730	11675
1998	10569	10569	10569	10569	10569	10569
1999	10707	10707	10672	10606	10407	10300
2000	10822	10822	10822	10761	10656	10539
2001	11254	11254	11234	11101	11026	10770
2002	11226	11226	11211	10979	10728	10475
2003	11574	11574	11574	11566	11502	11444
2004	9668	9668	9668	9668	9668	9668
2005	9567	9567	9567	9567	9567	9567
2006	10336	10336	10336	10336	10331	10300
2007	9571	9571	9571	9571	9522	9453
2008	7971	7971	7971	7971	7971	7971
2009	11000	11000	11000	10989	10894	10779
2010	11901	11891	11876	11803	11705	11607
2011	11521	11521	11521	11521	11521	11521
2012	9485	9485	9485	9485	9485	9485
2013	9254	9254	9254	9254	9254	9229
Média	10634	10628	10624	10597	10550	10499

Em relação ao município de Lavras, observa-se que os tratamentos com déficit de irrigação em 10% e 15% geraram produtividades de cultura, em alguns anos, maior do que os tratamentos com redução da lâmina plena de irrigação em 5% (Tabela 10).

Tabela 10: Produtividade da cultura do milho (kg ha^{-1}) simulada para o município de Lavras com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (0%) e as lâminas originais reduzidas em 5%, 10%, 15%, 20% e 25%.

Ano	Produtividade (kg ha^{-1})					
	Tratamento ⁽¹⁾					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
1981	8254	8311	8311	8249	8237	8220
1982	11645	11033	11033	11645	11637	11617
1983	9386	9203	9246	9428	9461	9460
1984	12707	11795	11795	12707	12707	12707
1985	9240	8109	8109	9240	9240	9240
1986	11798	11199	11199	11798	11798	11798
1987	10218	9683	9683	10218	10218	10218
1988	8554	8361	8361	8548	8526	8479
1989	11525	10931	10931	11518	11307	10817
1990	10424	10089	10089	10424	10417	10393
1991	11274	10383	10383	11271	11210	11125
1992	7120	6718	6718	7120	7120	7120
1993	8011	7302	7259	7887	7762	7531
1994	9684	9186	9140	9589	9300	8974
1995	9369	9052	9034	9279	9253	9221
1996	9686	9433	9433	9686	9686	9686
1997	8746	8723	8008	7639	7166	6769
1998	10395	9421	9421	10395	10395	10395
1999	11985	11341	10922	11045	10664	10223
2000	11998	12091	11932	11440	10805	9857
2001	12460	11829	11829	12460	12460	12460
2002	11833	11586	10854	10232	9347	8761
2003	9915	10268	9378	9608	9206	8780
2004	9349	8845	8840	9322	9276	9210
2005	11369	10953	10953	11363	11176	10954
2006	8829	8361	8361	8829	8829	8829
2007	8992	9167	8657	7690	7210	6748
2008	9891	9372	9371	9870	9851	9809
2009	9449	8917	8917	9449	9449	9449
2010	10221	9695	9691	10201	10162	10110
2011	9574	9043	9015	9495	9397	9225
2012	10247	9207	8663	8649	8346	7989
2013	11636	11037	11016	11583	11555	11509
Média	10175	9117	9593	9936	9793	9627

Na Tabela 11 são apresentados os valores de F calculados e os valores tabelados ao nível de 5% de significância para os valores de produtividade da cultura do milho, para as localidades estudadas.

Tabela 11: Valores calculados e tabelados de F (ANOVA) para o nível de significância (α) igual a 5%, relativo aos valores de produtividade da cultura.

Localidade	F calculado	F crítico (α 5%)
Janaúba	31,680	2,261
Lavras	0,785	2,261
Paracatu	9,935	2,261
Patos de Minas	1,262	2,261
Sete Lagoas	6,771	2,261
Uberaba	0,089	2,261

Observa-se que para os municípios de Lavras, Patos de Minas e Uberaba os valores calculados de F foram inferiores aos valores tabelados ao nível de 5% de significância. Portanto, não houve diferença estatística significativa entre as médias de produtividade em resposta aos manejos de irrigação deficitária para estas localidades. A não variação das médias de produtividade da cultura decorrentes de reduções das lâminas de irrigação é, possivelmente, consequência de características de maior retenção de água no solo. Nota-se na Tabela 3 que o município de Uberaba possui solo com a mais elevada capacidade total de água (CTA) para a profundidade de 100 cm no perfil do solo. Considerando-se a CTA contabilizada até a profundidade de 70 cm, região em que se concentra o sistema radicular, obteve-se para Uberaba, Lavras e Sete Lagoas os três maiores valores, sendo, respectivamente, 184,2, 167,5 e 165,6 mm.

Para Babalola (1978), a alta capacidade de retenção de água pelo solo é resultante da alta variabilidade de propriedades físicas do solo, tais como o conteúdo de areia, argila e silte e da densidade do solo. Em trabalhos realizados por Albuquerque et al. (1992) e Fiorin et al. (1997), concluiu-se que existe uma relação entre o armazenamento de água no solo e o rendimento de grãos de milho.

Para as localidades de Patos de Minas e Lavras, para os tratamentos em que a cultura recebeu lâminas inferiores às requisitadas percebe-se que o rendimento foi maior em alguns anos em comparação ao tratamento que recebeu irrigação plena, observando-se que não houve diferença significativa entre as médias de produtividade. Isto pode ser atribuído a lixiviação de nitrogênio no solo. Segundo Sangoi et al. (2003), o principal processo de perda de N do solo é devido a lixiviação, principalmente na

forma de nitrato. Em trabalho publicado por Andrade et al. (2004), constatou-se que a irrigação pode causar perda média de N mineral. Para Oliveira et al. (2002), as perdas de N podem ser entre 2 e 20 kg ha⁻¹ dependendo do tipo de solo. De acordo com Artuni (2014), a lixiviação de nitrogênio está associada com as precipitações pluviométricas. Segundo o autor, em anos em que as precipitações pluviométricas são bem distribuídas, a lixiviação pode não ser problema, pois há um balanço entre a água adicionada e a evapotranspiração da cultura. Porém, quando as chuvas são intensas a lixiviação torna-se mais acentuada. Em estudos realizados por Singh et al. (1984), constatou-se que em solo de textura franco arenosa pode haver lixiviação de nitrogênio devido a água de irrigação. Sexton (1996) demonstrou em seus estudos que a lixiviação de nitrogênio pode ser alta quando as doses de N aplicadas na cultura do milho excedem 100 kg ha⁻¹ em solo arenoso; e para doses de N acima de 250 kg ha⁻¹, a lixiviação pode ser exponencialmente maior. Para Araújo et al. (2004), a lixiviação de NH₄⁺ é uma realidade também em solos muito argilosos.

Nos municípios de Janaúba, Paracatu e Sete Lagoas os valores médios calculados de F foram superiores aos valores tabelados ao nível de 5% de significância (Tabela 11). Logo, houve diferença estatística significativa entre as médias das produtividades em resposta aos manejos de irrigação deficitária.

Resultados do teste Tukey realizados para análise das médias de produtividades ao nível de 5% de probabilidade são apresentados na Tabela 12 a 13, sendo que as letras iguais determinam tratamentos que não se diferenciam entre si estatisticamente. Os tratamentos foram rotulados da seguinte forma: I00 para 0% de redução na lâmina de irrigação; e I05, I10, I15, I20 e I25, respectivamente, para os tratamentos com 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de redução nas lâminas de irrigação.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados do teste Tukey para Janaúba.

Tabela 12: Teste de Tukey ao nível de significância $\alpha = 5\%$ para médias de produtividades da cultura do milho (kg ha⁻¹) em Janaúba.

Tratamento ⁽¹⁾	Produtividade	Queda
I00	8912,3 a	0,0%
I05	8818,7 a	1,1%
I10	8053,5 b	9,6%
I15	7700,6 bc	13,6%
I20	7297,6 cd	18,1%
I25	6859,3 d	23,0%

⁽¹⁾ I00, I05, I10, I15, I20 e I25, respectivamente, para os tratamentos com 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de redução nas lâminas de irrigação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5%.

Comparando-se as médias de produtividade de milho para Janaúba, observa-se que estas se apresentaram estratificadas para os diferentes manejos de irrigação deficitária. Observa-se uma grande diferença dos valores simulados, para os tratamentos em que a irrigação foi plena (I00) e o tratamento em que a lâmina de irrigação foi reduzida 25% (I25). No total, houve uma redução da produtividade em 23%. Possivelmente, no município de Janaúba além da redução de água nos manejos de irrigação, fatores climáticos como temperatura e radiação solar podem ter influenciado diretamente as atividades fisiológicas da cultura do milho, interferindo na produção de matéria seca e de grãos (CARGNELUTTI FILHO et al., 2009). Outra razão para a redução da produtividade pode ser devido à capacidade de armazenamento total de água no solo (CTA). De acordo com a Tabela 3, entre todos os municípios estudados, Janaúba apresenta um solo com a mais baixa capacidade de armazenamento de água. Para Fiorin et al. (1997), a capacidade de armazenamento de água no solo depende de sua textura, estrutura, distribuição e diâmetro médio dos poros. De acordo com Letey (1985), a produtividade de grãos é afetada pela capacidade de armazenamento de água no solo, pois suas restrições podem prejudicar a velocidade do fluxo de absorção de água pela planta.

Nas figuras 5 a 6 são apresentados gráficos do tipo box plot para os municípios em que se constatou diferenças estatísticas entre médias de produtividade de cultura. Nestes gráficos, as linhas nos centros dos retângulos indicam a mediana. Os lados superior e inferior dos retângulos indicam os valores da variável estudada (produtividade da cultura neste caso) relativos aos percentis 75% e 25%, respectivamente. A diferença de valor da variável estudada entre os percentis 75% e 25% define o intervalo interquartil (IIQ). O traço superior acima dos retângulos indica o valor da variável estudada obtido da soma do valor ao percentil 75% e de 1,5 vezes o IIQ. O traço inferior abaixo dos retângulos indica o valor da variável estudada obtido subtraindo-se 1,5 vezes o IIQ do valor ao percentil 25%. Círculos abertos, quando presentes, indicam discrepâncias, isto é, outliers (CHAMBERS et al., 1983).

Conforme se apresenta na Figura 5, para o município de Janaúba, observa-se que houve uma grande variação da produtividade nos tratamentos I10, I15, I20 e I25. A

menor variação da produtividade ocorreu para os tratamentos I00 e I05, o que provavelmente é consequência das maiores lâminas de irrigação.

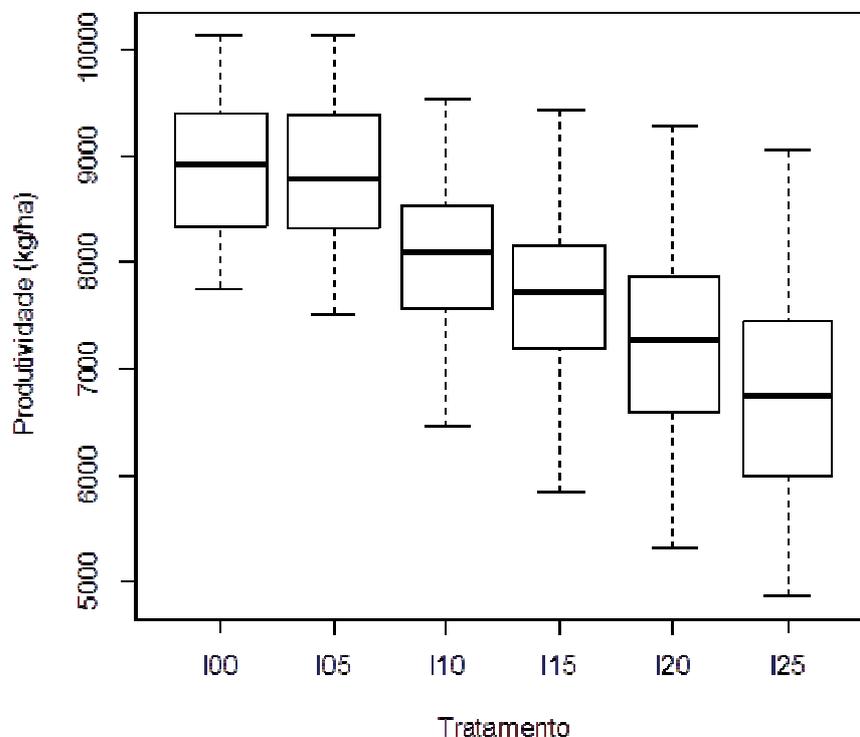


Figura 5: Variação da produtividade da cultura do milho simulada para o município de Janaúba, com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (I00) e as lâminas originais reduzidas em 5% (I05), 10% (I10), 15% (I15), 20% (I20) e 25% (I25).

No município de Paracatu, pelo teste Tukey, verifica-se menor variação nas médias de produtividade. Nos grupos de tratamentos I00, I05 e I10; I05, I10 e I15; I10, I15 e I20; e I15, I20 e I25, as médias de produtividade de cultura não se diferenciaram entre si. O tratamento com lâmina de irrigação plena requerida pela cultura (I00) resultou em maior produtividade (Tabela 13). As maiores diferenças de produtividade foram observadas entre os manejos com irrigação total requerida pela cultura com a irrigação reduzida 20% (I20) e 25% (I25), totalizando reduções de 13% e 16,5%, respectivamente. De acordo com Martins (2012), as maiores produtividades são alcançadas quando é atendido totalmente as necessidades hídricas da cultura.

Tabela 13: Teste de Tukey ao nível de significância $\alpha = 5\%$ para médias de produtividades da cultura do milho (kg ha^{-1}) em Paracatu.

Tratamento	Produtividade		Queda
I00	10063,5	a	0%
I05	9616,0	ab	4,4%
I10	9400,9	abc	6,5%
I15	9094,9	bcd	9,6%
I20	8750,1	cd	13,0%
I25	8397,1	d	16,5%

⁽¹⁾ I00, I05, I10, I15, I20 e I25, respectivamente, para os tratamentos com 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de redução nas lâminas de irrigação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5%.

Na Figura 6 observa-se que entre os tratamentos I05, I10, I15 e I20 houve pequena diferença de medianas. As maiores diferenças de produtividade medianas foram observadas entre os tratamentos I00 e I25, conforme esperado.

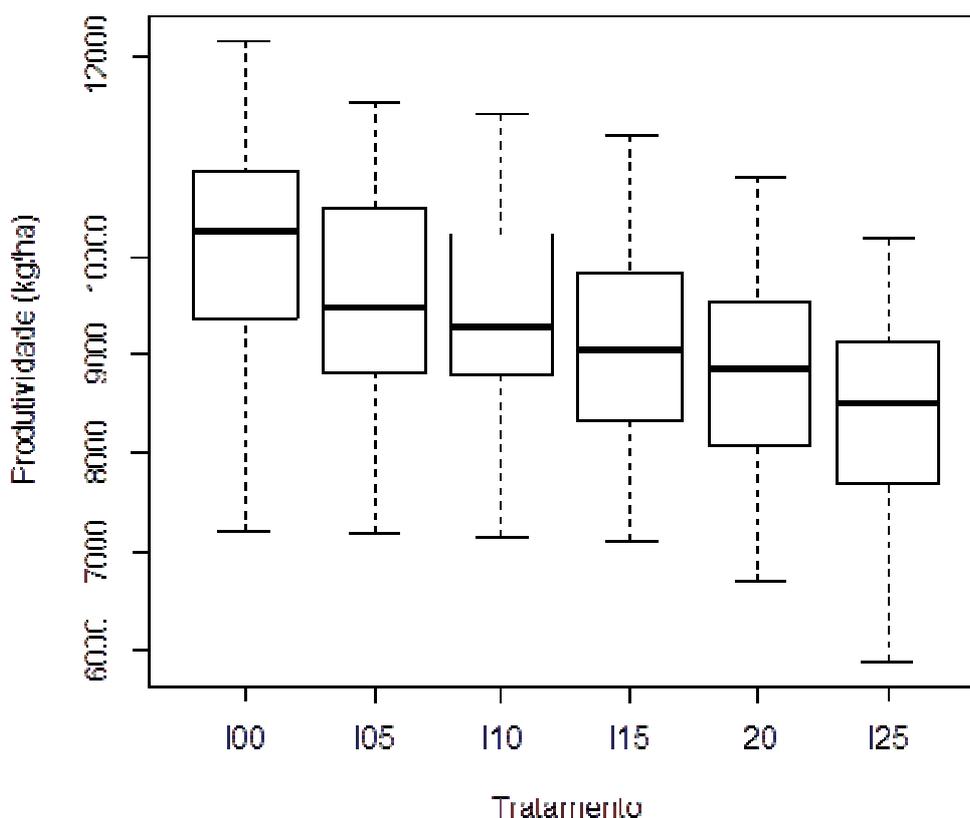


Figura 6: Variação da produtividade da cultura do milho simulada para o município de Paracatu, com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (I00) e as lâminas originais reduzidas em 5% (I05), 10% (I10), 15% (I15), 20% (I20) e 25% (I25).

No município de Sete Lagoas foram apresentadas as melhores médias de produtividades em todos os tratamentos em relação às demais localidades estudadas (Tabela 14). De acordo com o teste Tukey, apresentado nesta tabela, as médias de produtividade também se mantiveram com maior uniformidade. Os tratamentos I00 e I05; I05, I10, I15 e I20; e I10, I15, I20 e I25 apresentaram diferença mínima entre as médias de produtividade da cultura. Os menores valores de produtividade média foram encontrados nos tratamentos I15 e I25, estes totalizaram uma redução de 8,9% e 11,3%, respectivamente em relação ao tratamento com a lâmina de irrigação plena (I00).

Tabela 14: Teste de Tukey ao nível de significância $\alpha = 5\%$ para médias de produtividades da cultura do milho (kg ha^{-1}) em Sete Lagoas.

Tratamento	Produtividade		Queda
I00	11948,6	a	0%
I05	11328,2	ab	5,1%
I10	11141,5	bc	6,7%
I15	11035,9	bc	8,8%
I20	10888,3	bc	7,6%
I25	10603,3	c	11,2%

⁽¹⁾ I00, I05, I10, I15, I20 e I25, respectivamente, para os tratamentos com 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de redução nas lâminas de irrigação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5%.

De acordo com a Figura 7, observa-se que as maiores diferenças das medianas de produtividade ocorreram entre os tratamentos I00 e I25. Nota-se que no tratamento com redução de 20% (I20) da lâmina de irrigação total requerida pela cultura apresentou uma produtividade mediana maior que o tratamento com redução da lâmina de irrigação em 15% (I15). Outliers inferiores foram observados para os tratamentos I00 e I10. Para o tratamento I15, obteve-se um outlier superior tratamentos a cultura respondeu bem ao déficit de irrigação (Figura 7).

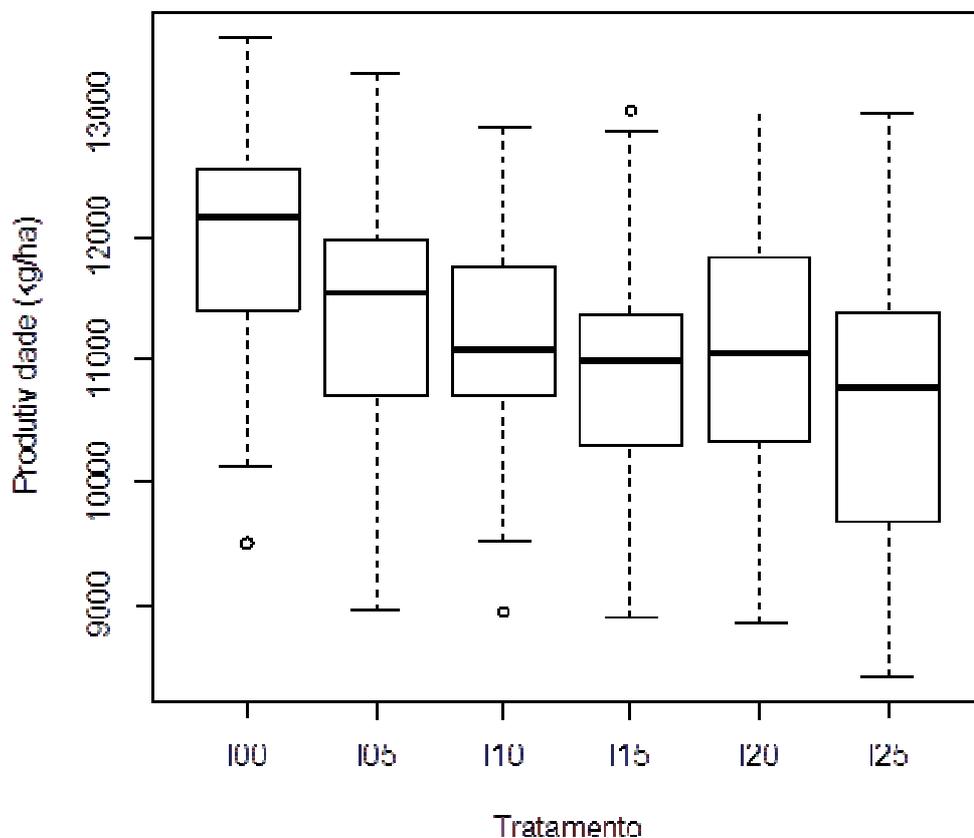


Figura 7: Variação da produtividade da cultura do milho simulada para o município de Sete Lagoas, com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (I00) e as lâminas originais reduzidas em 5% (I05), 10% (I10), 15% (I15), 20% (I20) e 25% (I25).

Nos critérios tradicionais de manejo de irrigação procura-se à máxima produção agrônômica, independente da quantidade de água utilizada, tendo em vista que a água não é um fator limitante e atualmente não entra no custo de produção (PAZ et al., 2000). Porém, se o objetivo do agricultor for maximizar a eficiência do uso da água, pode-se adotar irrigação deficitária controlada (PEREIRA et al., 2002). A irrigação com déficit bem planejada pode ocasionar no aumento da produtividade da água para diversas culturas sem causar reduções de rendimento drásticas (LIMA et al., 2012).

Na Tabela 15 são apresentados os valores de F calculados e os valores tabelados ao um nível de 5% significância, para os valores de produtividade da água de irrigação para as localidades estudadas.

Tabela 15: Valores calculados e tabelados de F (ANOVA) para nível de significância (α) igual a 5% para produtividade da água de irrigação.

Localidade	F calculado	F crítico (α 5%)
Janaúba	0,193	2,261
Lavras	1,441	2,261
Paracatu	1,209	2,261
Patos de Minas	12,794	2,261
Sete Lagoas	6,314	2,261
Uberaba	5,035	2,261

Observa-se que os municípios de Janaúba, Lavras e Paracatu tiveram valores de F calculados abaixo que os valores de F tabelados. Sendo assim, para esses municípios não houve diferença estatística significativa da produtividade da água entre os tratamentos de irrigação deficitária. Para os municípios de Patos de Minas, Sete Lagoas e Uberaba ocorreram diferenças estatísticas significativas entre médias de produtividade da água obtidas por diferentes manejos de irrigação.

Na Tabela 16 são apresentados os resultados do teste de Tukey para a produtividade da água, com um nível de 5% de significância de probabilidade, para Patos de Minas. As letras iguais indicam que os tratamentos não diferenciaram entre si. A adoção de irrigação deficitária reduz a produtividade da maioria das culturas, entretanto aumenta a produtividade da água (MARTINS, 2012); porém para a localidade de Patos de Minas, o tratamento que recebeu a lâmina de água total requerida pela cultura (I00) foi o que obteve a maior produtividade da cultura e maior produtividade da água.

Tabela 16: Teste de Tukey ao nível de significância $\alpha = 5\%$ para médias de produtividade da água para a cultura do milho ($m^3 kg^{-1}$) em Patos de Minas.

Tratamento	Produtividade da Água	Queda
I00	0,255	a
I05	0,243	a
I10	0,231	ab
I15	0,208	bc
I20	0,199	c
I25	0,191	c

⁽¹⁾ I00, I05, I10, I15, I20 e I25, respectivamente, para os tratamentos com 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de redução nas lâminas de irrigação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5%.

De acordo com a Figura 8, houve resposta da produtividade da água para os tratamentos em que a lâmina de irrigação total foi reduzida. As maiores reduções ocorreram para os tratamentos com irrigação plena requerida pela cultura (I00) e o tratamento com redução de 25% da lâmina de irrigação (I25). O tratamento I00 alcançou uma mediana da produtividade da água em torno de $0,25 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ e o tratamento I25 atingiu uma produtividade da água de aproximadamente $0,20 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. Contudo, nota-se que não houve grande diferença entre os tratamentos I00, I10 e I15. Isso demonstra que para estes tratamentos a cultura do milho apresentou potencial para ser irrigada com déficit, sem comprometer a produtividade (MISHRA et al., 2001).

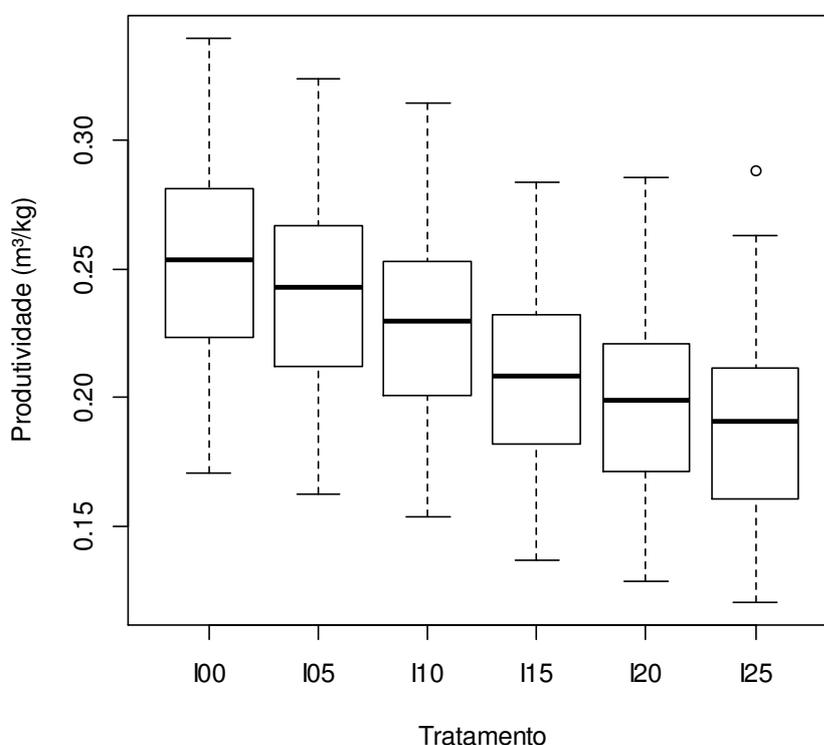


Figura 8: Variação da produtividade da água simulada para o município de Patos de Minas, com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (I00) e as lâminas originais reduzidas em 5% (I05), 10% (I10), 15% (I15), 20% (I20) e 25% (I25).

Assim como se verificou para o município de Patos de Minas, para o município de Uberaba a produtividade da água foi maior no tratamento em que a irrigação foi plena (I00). Entretanto, observa-se que as médias de produtividades da água apresentaram menor amplitude (Tabela 16).

Tabela 17: Teste de Tukey ao nível de significância $\alpha = 5\%$ para médias de produtividade da água para a cultura do milho ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) em Uberaba.

Tratamento ⁽¹⁾	Produtividade da Água		Queda
I00	0,196	a	0%
I05	0,187	ab	4,9%
I10	0,177	abc	9,9%
I15	0,168	abc	14,6%
I20	0,159	bc	19,2%
I25	0,150	c	23,8%

⁽¹⁾ I00, I05, I10, I15, I20 e I25, respectivamente, para os tratamentos com 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de redução nas lâminas de irrigação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5%.

Comparando-se os tratamentos, percebe-se que não houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos I00, I05, I10 e I15. Estes resultados indicam que a cultura do milho, quando submetida a estes tratamentos de irrigação deficitária, foi eficiente na utilização da água com maior rendimento de grãos por m^3 de água (Figura 9).

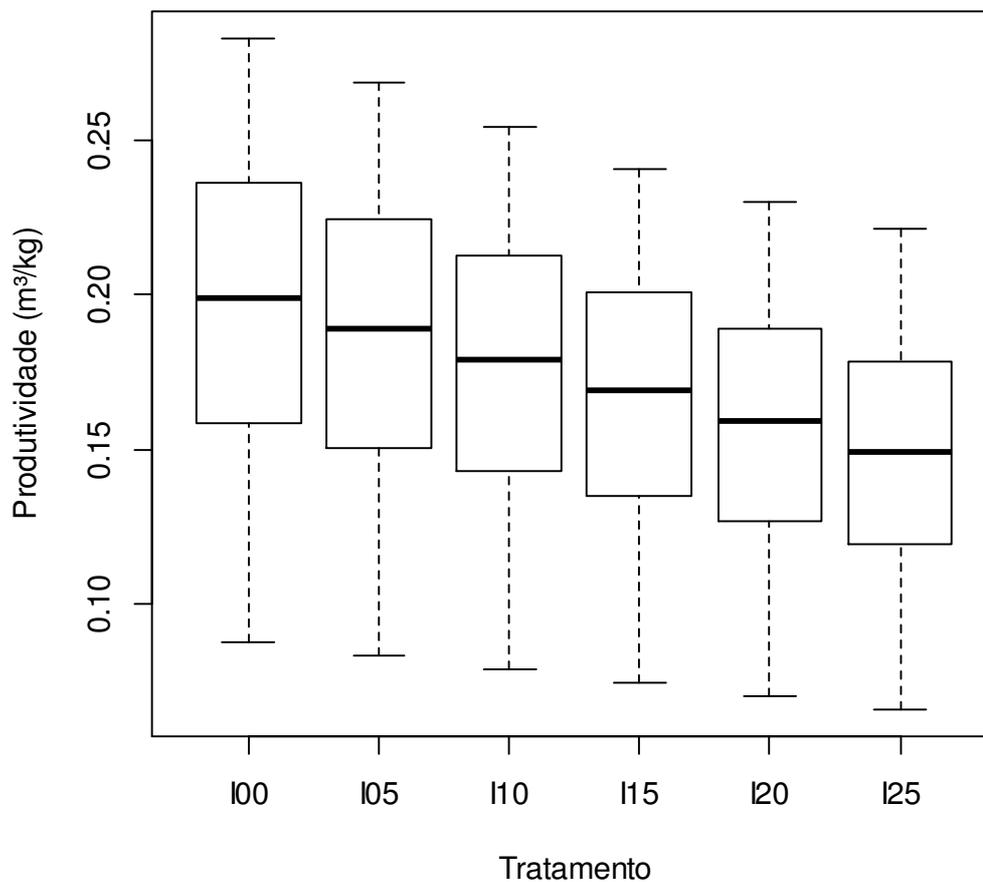


Figura 9: Variação da produtividade da água simulada para o município de Uberaba, com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (I00) e as lâminas originais reduzidas em 5% (I05), 10% (I10), 15% (I15), 20% (I20) e 25% (I25).

Conforme Tabela 17, para o município de Sete Lagoas o tratamento com redução de 15% da lâmina total requerida pela cultura (I15) foi o que alcançou a maior média de produtividade da água. Porém, os tratamentos I10 e I05 são estatisticamente iguais ao tratamento I15. De acordo com Martins (2012), a maior produtividade da água pode ser alcançada com estratégias de irrigação deficitária.

Tabela 17: Teste de Tukey ao nível de significância $\alpha = 5\%$ para médias de produtividade da água para a cultura do milho ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) em Sete Lagoas.

Tratamento	Produtividade da Água		Queda
I15	0,280	a	0%
I10	0,267	ab	5,0%
I05	0,254	abc	8,7%
I10	0,244	bc	4,7%
I20	0,233	c	12,6%
I25	0,230	c	13,9%

⁽¹⁾ I00, I05, I10, I15, I20 e I25, respectivamente, para os tratamentos com 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de redução nas lâminas de irrigação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5%.

Considerando os dados medianos da produtividade da água simulados, observa-se na Figura 10 que o tratamento I15 foi o que obteve uma amplitude da produtividade da água maior em relação aos outros tratamentos. Em estudo desenvolvido por Andrade et al. (2004), foi constatado que a produtividade da água foi de 1,74 a 1,22 kg m^{-3} de água, sendo o maior valor associado a aplicação de lâminas inferiores aquelas requerida pela cultura. Diante desses resultados, pode-se dizer que o correto manejo de recursos hídricos pode influenciar positivamente a eficiência do uso da água.

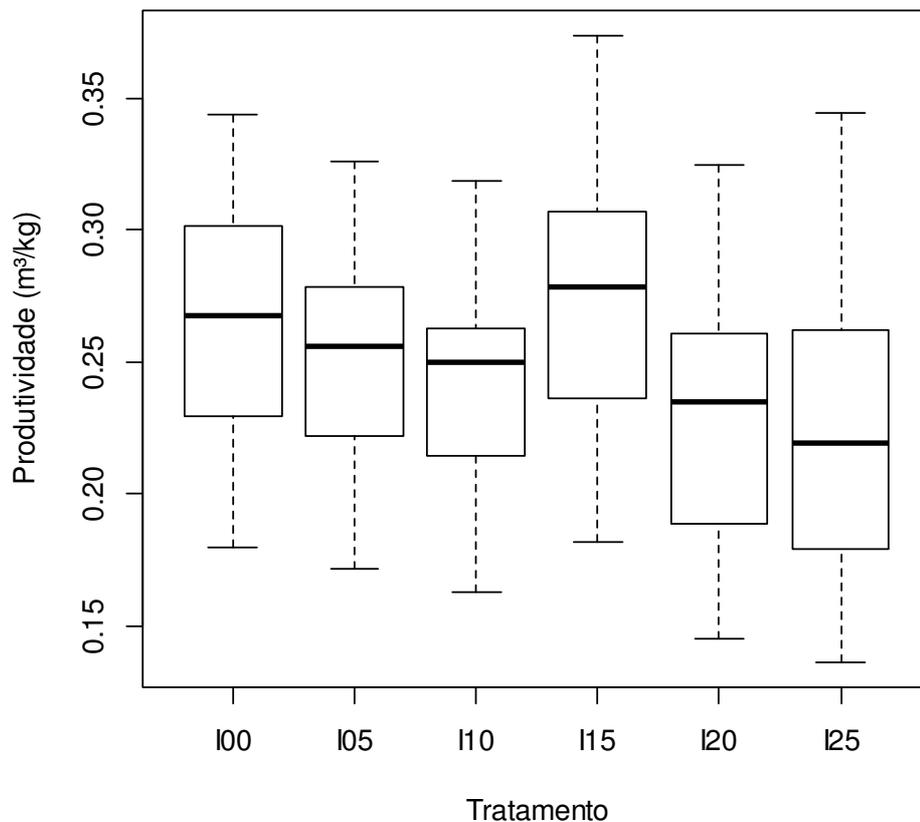


Figura 10: Variação da produtividade da água simulada para o município de Sete Lagoas, com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (I00) e as lâminas originais reduzidas em 5% (I05), 10% (I10), 15% (I15), 20% (I20) e 25% (I25).

5. CONCLUSÕES

Os resultados indicam que a adoção de irrigação deficitária reduz a produtividade da cultura do milho. Entretanto, para localidades que possuem solo com elevada capacidade retenção de água, a irrigação deficitária pode não causar redução do rendimento da cultura.

Em solos onde há alta retenção de água, a irrigação deficitária pode ser uma alternativa para economia de água e melhoria da sua eficiência.

Para os municípios de Uberaba, Patos de Minas e Lavras foram observadas as menores reduções quando se considerou a irrigação deficitária.

A irrigação deficitária pode ser uma alternativa para aumentar a produtividade da água; no município de Sete Lagoas o tratamento com a redução da lâmina plena de irrigação em 15%, foi o que obteve maior produtividade da água.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J. A.; FIORIN, J. E.; REINERT, D. J.; MUTTI, L. S. M.; SILVA, E. P. Variabilidade espacial de propriedades do solo e produção de milho. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 21., e Simpósio de Engenharia Agrícola do Cone Sul. Santa Maria, 1002. Anais. Santa Maria, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1992. P. 417-430.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, 1998. 300 p.

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

AMARAL, T. A., ANDRADE, C. T., SILVA, D. F., NOCE, M. A., SANTANA, C. B., MOURA, B.F. Capacidade preditiva do modelo CSM-Ceres-Maize para simular a utilização de cama de frango na cultura do milho. In: XXVIII Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 2010, Goiânia. Potencialidades, Desafios e Sustentabilidade, 2010.

ANDRADE, C.L.T.; AMARAL, T.A.; JUNIOR, J.C.F.B.; HEINEMANN, A.B.; GARCIA, A.G.; TOJO-SOLER, C.M.; SILVA, D.F.; HICKMANN, C.; SANTANA, C.B.; MOURA, B.F.; CASTRO, L.A. Modelagem do crescimento de culturas: aplicações à cultura do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, Documento 91, 2009. 65 p.

ANDRADE, C. L. T. ; ALVARENGA, R. C. ; ALBUQUERQUE, P. E. P. ; COELHO, A. M. ; TEIXEIRA, E. G. . Dinâmica de água e soluto em um latossolo cultivado com milho irrigado: 1- percolação e produtividade da água. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 14, 2004, Porto Alegre. XIV Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. Porto Alegre: ABID, 2004.

ANDRADE, C. L. T. ; ALVARENGA, R. C. ; COELHO, A. M. ; MARRIEL, I. E. ; TEIXEIRA, E. G. . Dinâmica de água e soluto em um latossolo cultivado com milho irrigado: 2-lixiviação de nitrogênio. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 14, 2004, Porto Alegre. XIV Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. Porto Alegre: ABID, 2004.

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

ARAÚJO, A. R. D.; GUIMARÃES, L. R. G.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Movimentação de nitrato e amônio em colunas de solo. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 28, n. 3, p. 537-541, 2004.

ARNUTI, F. Dinâmica do Nitrogênio em Argissolo em Função de Irrigação e Adubação Nitrogenada no Milho em Plantio Direto. 2014, 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

BABALOLA, O. Spatial variability of soil water properties in tropical soils of Nigeria. Soil Science, v. 126, n. 5, p. 269-279, 1978.

BERGAMASCHI, H. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.39, n.9, p.831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F. et al. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. Brasília, Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 41, n.2, p.243-249. 2006.

BERGAMASCHI, H.; WHEELER, T. R.; CHALLINOR, J. A.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Maize yield and rainfall on different spatial and temporal scales in Southern Brazil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.42, n.5, p.603-613, 2007.

BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; SANTOS, A. O., FRANÇA, S.; RADIN, B. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.36, p.949-956, 2001.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. Agronomy Journal, v.88, p. 704-716, 1996.

BRACHTVOGEL, E.L.; PEREIRA, F.R.S.; CRUZ, S.C.S.; BICUDO, S.J. Densidades populacionais de milho em arranjos espaciais convencional e equidistante entre plantas. Ciência Rural, v.39, n.8, p. 2334-2339, 2009.

BRASIL, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Milho. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/milho>. Acessado em: 15 ago. 2015.

CASAGRANDE, J. R. R.; FORNASIERI FILHO, D. Adubação nitrogenada na cultura do milho safrinha. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, DF, v. 37, p. 33-40, 2002.

CASTRO, C.R.; GARCIA, R. Competição entre plantas com ênfase no recurso luz. Ciência Rural, v.26, p.167-174, 1996.

CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L.; RIBOLDI, J.; GUADAGNIN, J.;P. Associação entre métodos de adaptabilidade e estabilidade em milho. Ciência Rural, v.39, n.2, p. 340-347, 2009.

CARLESSO, R.; SANTOS, R.F.; DÉFICIT HÍDRICO E OS PROCESSOS MORFOLÓGICOS E FISIOLÓGICO DAS PLANTAS. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.2, n.3, p.287-294, 1998. Campina Grande, PB. DEag/UFPB.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em 22 de Setembro de 2015.

CHAMBERS, J.M., CLEVELAND, W.S., KLEINER, B., TUKEY, P.A., 1983. Graphical Methods for Data Analysis. Wadsworth International Group, Belmont.

CHRISTOFIDIS, D. Água na produção de alimentos: o papel da irrigação no alcance do desenvolvimento sustentável. Brasília: Universidade de Brasília, 2005. 29 p.

CRUZ, J. C., SILVA, G. H., PEREIRA FILHO, I. A., CONTIJO, M. M. N., MAGALHÃES, P. C., Sistema de Produção de Milho Safrinha de Alta Produtividade: Safras 2008 e 2009. Circular Técnica, Embrapa Milho e Sorgo, p. 10. Nov. 2011

DENMEAD, O.T.; SHAW, R.H. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. Agronomy Journal, v.52, p. 497-498, 1960.

DURÃES, F.O.M. Limitações fisiológicas do milho nas condições de plantio nas regiões tropicais baixas, 2006. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2007_1/limitemilho/index.htm>. Acesso em: 29 de setembro de 2014.

ENGLISH, M. Deficit irrigation. I. Analytical framework. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, v.116, n.3, p. 399-412, May. 1990.

FAGGION, F.; OLIVEIRA, C. A. S.; CHRISTOFIDIS, D. Uso eficiente da água: uma contribuição para o desenvolvimento sustentável da agropecuária, Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia, Guarapuava, v. 2 n. 1 Jan. – Abr. 2009.

FAO, Food and Agriculture Organization. Disponível em <http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html > Acessado em 15 de agosto de 2015.

FERERES, E.; SORIANO, M. A. Deficit irrigation form reducing agricultural water use, Journal of Experimental Botany, Lancaster, v.58, n.2. p.147-159, 2007.

FIORIN, E. J.; REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A. Armazenamento de Água no Solo e Crescimento e Produção do Milho. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, p. 249-255, 1997.

FOLEGATTI, M.V.; PESSOA, P.C.S.; PAZ, V.P.S. Avaliação de um pivô central de grande porte e baixa pressão. Revista Scientia Agrícola, v.55, n.1, 1998.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO (2008). Disponível em: <[http:// faostat.fao.org](http://faostat.fao.org)>. Acesso em 29/09/15.

FORNASIERI FILHO, D.; Manual da cultura do milho. Jaboticabal: Funep. 2007.576p.

FRIZZONE, J. A. Planejamento da irrigação com o uso de Otimização. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, Fortaleza, v , n. 1, p. 24-49, dez. 2007.

GEERTS, S.; RAES, D.; Deficit irrigation as na on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas, Agricultural Water Management, Amsterdam, v.96, p. 1275-1284, Sep. 2009.

HOOGENBOOM, G., J.W. Jones, P.W. Wilkens, C.H. Porter, K.J. Boote, L.A. Hunt, USingh, J .ILizaso, J.W. White, O. Uryasev, R. Ogoshi, J. Koo, V. Shelia, and G.Y. Tsuji. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6 (www.DSSAT.net). DSSAT Foundation, Prosser, Washington. 2014.

HOOGENBOOM, G., JONES, J.M.; WILKENS, P.W.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; HUNT, L.A.; SINGH, U.; LIZASO, J.L.; WHITE, J.W.; URYASEV, O.; ROYCE, F.S.; OGOSHI, R.; GIJSMAN, A.J.; TSUJI, G.Y.; KOO. J. Decision support system for agrotechnology transfer: version 4.5. Honolulu: University of Hawaii, 2013. CD-ROM.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; WILKENS, P.W.; PORTE, C. H.; BOOTE, K. J.; HUNT, L. A.; SINGH, U.; LIZASO, J.L.; WHITE, J.W.; URY ASEV, O.; ROYCE, F. S.; OGOSHI, R.; GIJSMAN, A. J.; TSUJI, G. Y. Decision Support for Agrotechnology Transfer: version 4.5. Honolulu: University of Hawaii, 2012.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. Agricultural and Forest Meteorology, v. 103, n. 1-2, p. 137–157, 2000.

IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola. 2015. Instituto brasileiro de geografia e estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 29 de agosto 2015.

JAME, Y.W.; CURTFORTH, H.W. Crop growth models for decision support systems. *Canadian Journal of Plant Science*, v.76, n.1, p. 9-19, 1996.

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.; RICHTIE, J.T.DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy*, v.18, p.235 -265, 2003.

JONES, J.W.; MAKOWSKI, D.; WALLACH, D. Introduction to section II. In: WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J.W. *Working with Dynamic Crop Models: Evaluation, Analysis, Parametrization and Applications*. Amsterdam: Elsevier, p. 251-256, 2006.

JONES, J.W.; RITCHIE, J.T. Crop growth models. In: HOFFMANN, G.L. et al. *Management of Farm Irrigation System*. St. Joseph: ASAE, p. 63-89, 1990.

KANG, S.; SHI, W.; ZHANG, J. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. *Field Crops Research*, v.67, p.207-214, 2000.

KIRDA, C.; Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. In: *FAO, Deficit Irrigation Practices*. FAO Water report, n. 22. FAO, Rome. Italy, 2002, 111 p.

KITAMURA, A. E.; CARVALHO, M. P.; LIMA, C.G. Relação entre variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. *Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 31, p. 361-369, 2007.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294. 1985

LIMA, S. C. R. V. et al. Estimativa da Produtividade de Água em uma Área Irrigada no Sul da Espanha. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, Fortaleza, v. 6, n.1, p.51-60, 2012.

LOAGUE, K.; GREEN, R.E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 7, p. 51-73.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; CARNEIRO, N. P.; PAIVA, E. *Fisiologia do milho*. Sete Lagoas: EMBRAPA, CNPMS, 2002. 23 p. (Circular Técnica, 22).

MARTIN, J. D.; CARLESSO, R.; AIRES, N. P.; GATTO, J. C.; V. DUBOU.; FRIES, H. M.; SCHEIBLER, R. B. Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho. 2012. *Irriga, Botucatu, Edição Especial*, p. 192 - 205, 2012.

MARTINS, J. D.; CARLESSO, D.; AIRES, N. P.; GATTO, J. C.; DUBOU, V.; FRIES, H. Irrigação deficitária para aumentar a eficiência de uso da água na produção de silagem de milho. 2012. *Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação*. Fortaleza. 2012.

MATZENAUER, R. et al.; Consumo de água e disponibilidade hídrica para o milho e soja no Rio Grande do Sul. Porto Alegre. FEPAGRO, 2002. 105 p. (Boletim FEPAGRO, 10).

MISHRA, H.S., RATHORE, T.R., SAVITA, U.S. Water-use efficiency of irrigated winter maize under cool weather conditions of India. *Irrigation Science*, New York, v.21, p.27-33, 2001.

MOLDEN, D., RUST, H. M., SAKTHIVADIVEL, R., MAKIN, I. A water productivity Framework for Understanding and Action. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka. CAB International 2003, pag.18, 2003

NIED, A. H.; Heldwein, A. B.; Estefanel, V.; Silva, J. C.; Alberto, C. M. Épocas de semeadura de milho com menor risco de ocorrência de deficiência hídrica no município de Santa Maria, RS, Brasil. *Ciência Rural*, v.35, p.995-1002, 2005.

OLIVEIRA, M.W., TRIVELIN, P.C.O., BOARETTO, A.E., MURAOKA, T., MORTATTI, J. Leaching of nitrogen, potassium, calcium and magnesium in sandy soil cultivated with sugarcane. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.37, n.6, p.861-868, 2002.

PALISADE. Disponível em <<http://www.palisade.com/stattools/>> Acessado em 28 de novembro de 2015, 2015.

PARTON, W. J. et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, Soil Science Society of America, Madison, v. 51, n. 5, p. 1173–1179, 1987. ISSN 0361-5995.

PAVAN, W. Técnicas de engenharia de software aplicadas à modelagem e simulação de doenças de plantas. 2007. 182p. Tese (Doutorado), Universidade de Passo Fundo. 2007.

PAYERO, J.O; TARKALSON D.D; IRMAK S; DAVISON D; PETERSEN. J. L. Effect of Timing of a Deficit-Irrigation Allocation on Corn Evapotranspiration, Yield, Water Use Efficiency and Dry Mass, *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 96, n, 10, p. 1387-1397, oct. 2009.

PAZ, V. P. S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.3, p.465-473, 2000.

PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Coping with Water Scarcity. Addressing the Challenges. **Springer**, Dordrecht, 382 p. 2009.

PEREIRA, L.S.; OWEIS, T.; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*, v.57: p.175-206, 2002.

PICKERING, N.B.; HANSEN, J.W.; JONES, H.; GODWIN, D. Weatherman: a utility for managing and generating daily weather data. *Agronomy Journal*, v.86, n.2, p. 332-337, 1994.

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

SANGOI, L.; ERANANI, P. R.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C. Volatilização de N-NH₃ em decorrência da forma de aplicação de ureia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 33, n.4, p. 687-692, 2003.

SEXTON, B. T. Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn based on nitrate leaching and yield on a coarse-textured soil. *Journal of Environmental Quality*, Madson, v. 25, p. 983-992, 1996.

SILVA, F.D.; et al. Calibração e avaliação do modelo CSM-CERES-Maize para simulação do manejo da fertilização mineral e com dejetos de suínos em milho. XXIX CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO - Águas de Lindóia - 26 a 30 de Agosto de 2012.

SING, M.; YADAV, D. S.; KUMAR, V. Leaching and transformation of urea in dry wet soils as affected by irrigation water. *Plan and Soil*, Dordrecht, v. 81, n. 3 p. 411-420, 1984.

SHIOGA, P. S., OLIVEIRA, E. L., GERAGE, A. C. DENSIDADE DE PLANTAS E ADUBAÇÃO NITROGENADA EM MILHO CULTIVADO NA SAFRINHA. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.3, n.3, p.381-390, 2004.

SPRAGUE, G.F.; DUDLEY, J.W. *Corn and corn improvement*. 3th Ed. Madison, Wisconsin: AGRONOMY, n. 18, 1988. 986p.

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

TSUJI, G.Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. DSSAT version 3. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer. Honolulu: University of Hawaii. v.1-3. 1994.

WAGNER, M.V.; JADOSKI, S.O.; MAGGI, M.F.; SAITO, L.R.; LIMA, A.S. Estimativa da produtividade do milho em função da disponibilidade hídrica em Guarapuava, PR, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.2, p. 170-179, 2013.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K. M. & KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, Ottawa, 90(5):8995-9005, 1985.

ZWART, S. J.; BASTIAANSEN, W. G. M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*. Amsterdam, v. 69, n.2 p.115-133, Sep. 2004.

ZWIRTES, Anderson Luiz. Características Morfofisiológicas e Produtividade de Plantas de Sorgo Submetidas à Irrigação Deficitária. 2013. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Santa Maria. Centro de Ciências Rurais. 2013.

7. ANEXOS

Figuras com gráficos de produtividades (kg ha^{-1}) simuladas para os municípios estudados, com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (0%), e lâminas originais reduzidas em (5%), (10%), (15%), (20%) e (25%).

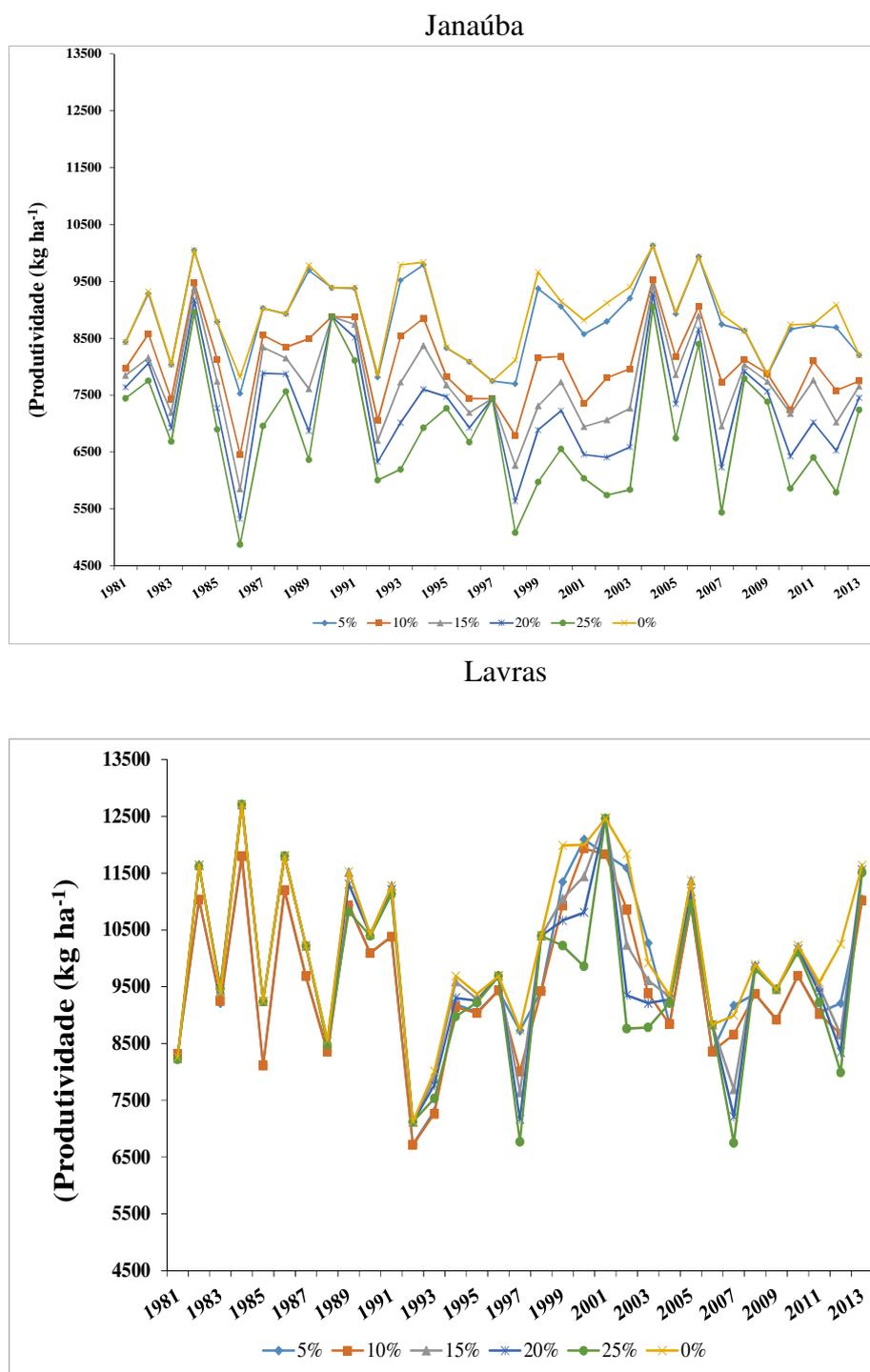
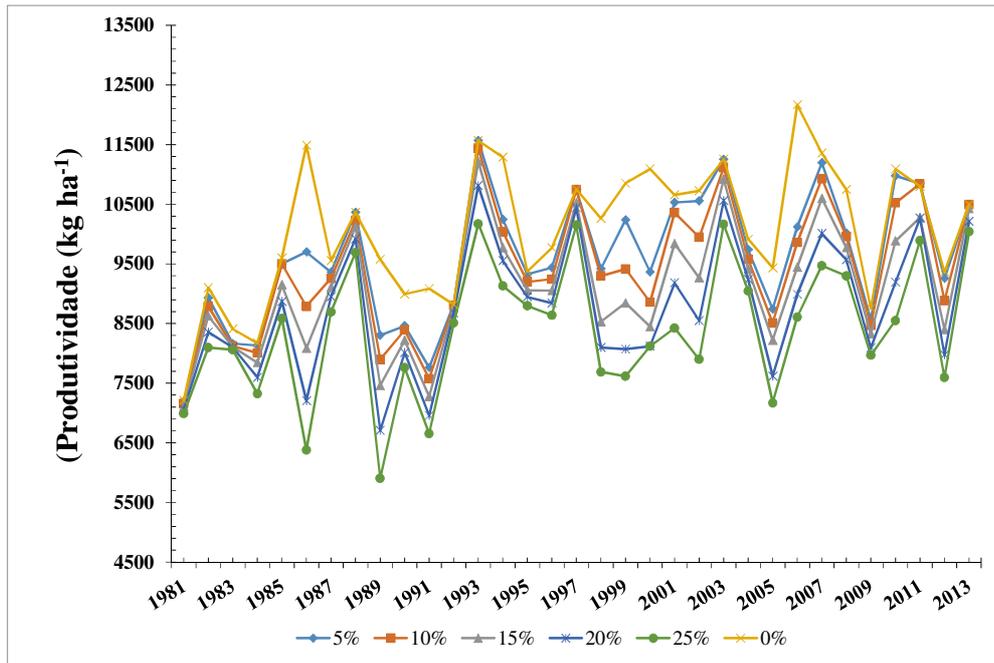


FIGURA A1. Gráficos de produtividades (kg ha^{-1}) simuladas para os municípios de Janaúba e Lavras, com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (0%), e lâminas originais reduzidas em (5%), (10%), (15%), (20%) e (25%).

Paracatu



Patos de Minas

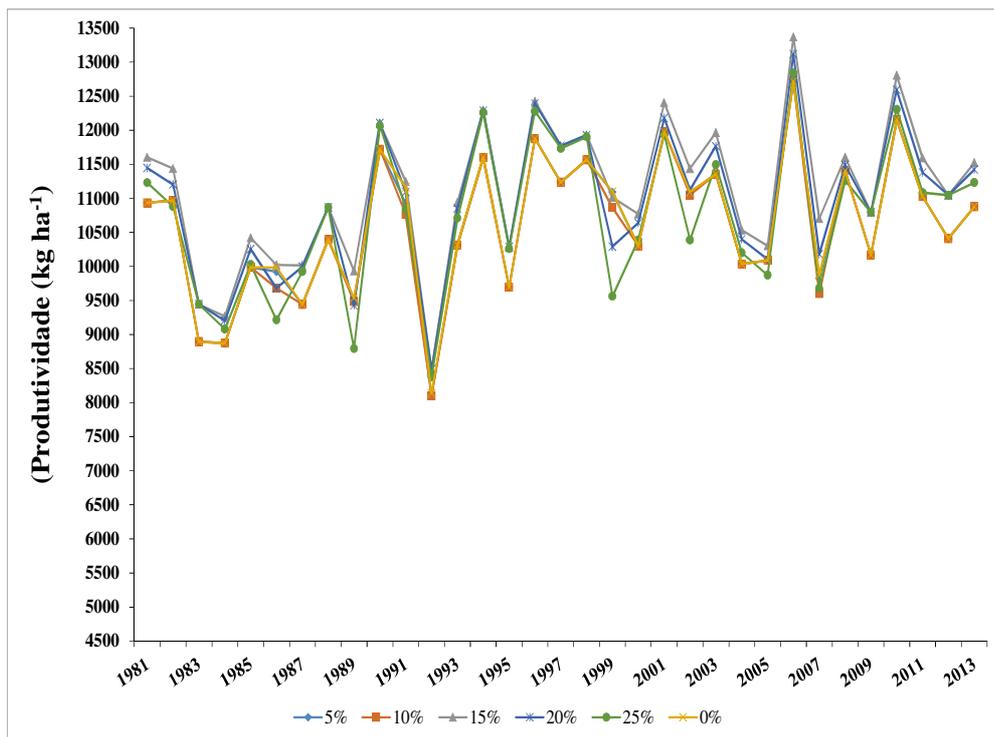
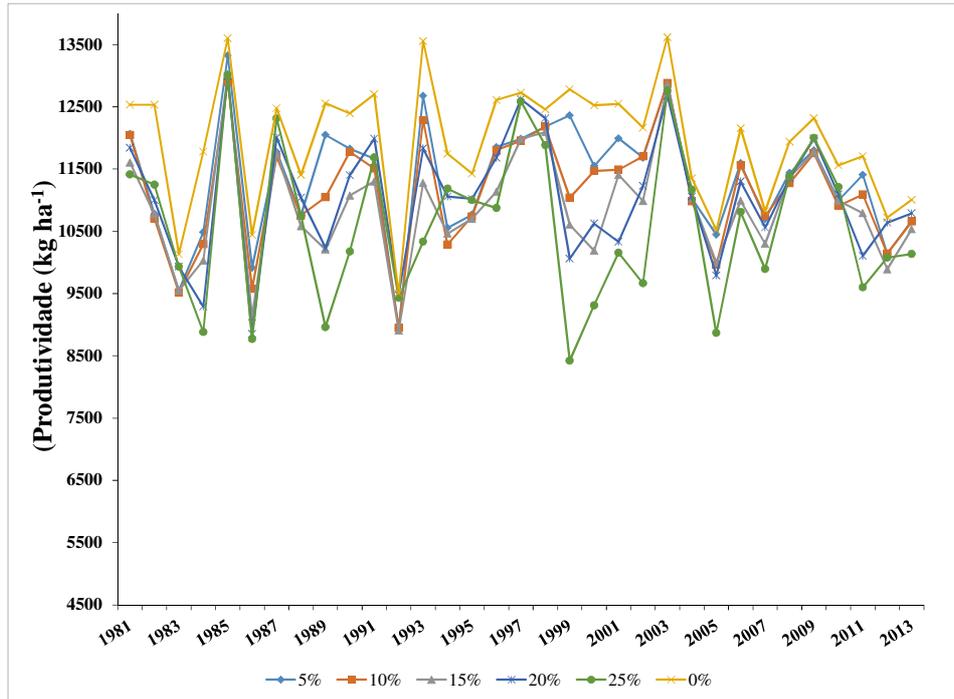


FIGURA A2. Gráficos de produtividades (kg ha⁻¹) simuladas para os municípios de Paracatu e Patos de Minas e Lavras, com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (0%), e lâminas originais reduzidas em (5%), (10%), (15%), (20%) e (25%).

Sete Lagoas



Uberaba

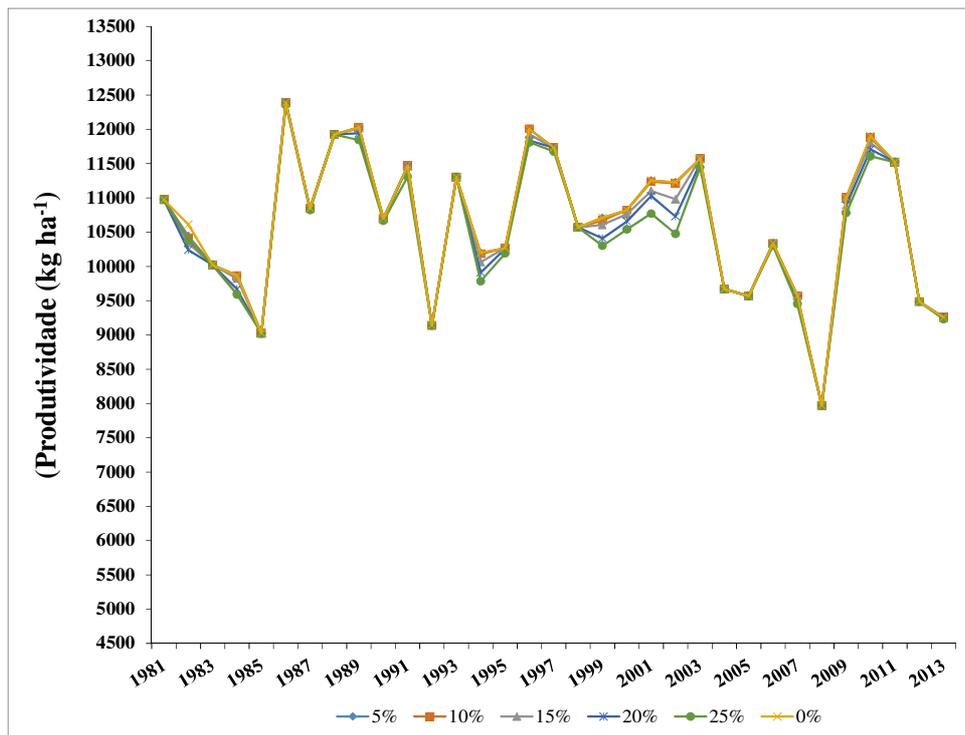


FIGURA A3. Gráficos de produtividades (kg ha^{-1}) simuladas para os municípios de Sete Lagoas e Uberaba, com as lâminas de irrigação requerida pela cultura (0%), e lâminas originais reduzidas em (5%), (10%), (15%), (20%) e (25%).