

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS E  
PRODUTIVIDADE DE PLANTAS DE SORGO  
SUBMETIDAS À IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Anderson Luiz Zwirtes**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2013**

**CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS E  
PRODUTIVIDADE DE PLANTAS DE SORGO SUBMETIDAS  
À IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA**

**Anderson Luiz Zwirtes**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

**Orientador: Prof. PhD. Reimar Carlesso**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2013**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo autor.

Zwirtes, Anderson Luiz

Características morfofisiológicas e produtividade de plantas de sorgo submetidas à irrigação deficitária / Anderson Luiz Zwirtes. -2013.

95 p.; 30cm

Orientador: Reimar Carlesso

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2013

1. Sorghum bicolor 2. Produtividade da água 3. Manejos de irrigação 4. Evapotranspiração da cultura I. Carlesso, Reimar II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a dissertação de Mestrado

**CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS E PRODUTIVIDADE  
DE PLANTAS DE SORGO SUBMETIDAS À IRRIGAÇÃO  
DEFICITÁRIA**

elaborada por  
**Anderson Luiz Zwirtes**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Agrícola**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



**Reimar Carlesso, Ph.D.**  
(Presidente/Orientador)



**Mirta Teresinha Petry, Dr. (UFSM)**



**Cleudson José Michelin, Dr. (IFFarroupilha-JC)**

Santa Maria, 02 de Abril de 2013.

Aos pais, irmãos e familiares, que souberam compreender todos os momentos que se passaram para que eu pudesse chegar até aqui.

**Ofereço e dedico**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pai e criador, por ter me presenteado com o dom da vida, uma família maravilhosa e iluminar meus passos.

A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), pelo ensino de qualidade.

Ao professor orientador Reimar Carlesso, pelos ensinamentos, dedicação, paciência, orientação e amizade.

Aos meus pais, Guido e Selma, pelo amor, carinho, incentivo e principalmente pelo exemplo de vida, simplicidade e respeito à vida.

Aos irmãos, Jadir, Rosane, Solange e Rosicler, pelo apoio e motivação.

Aos sobrinhos, que chegaram para alegrar nossas vidas e nos dar força para a caminhada.

A minha namorada, Gabriela Giacomini de Macedo, pela compreensão, apoio e carinho, nos momentos tumultuados do trabalho.

Aos colegas de pós-graduação, Alberto, Juliano, Junior, Maria Gabriela, Marta, Moacir e Zanandra pelo auxílio e força prestado durante todas as etapas do mestrado.

Aos integrantes do grupo de pesquisa do Sistema Irriga, Vinicius, Henrique, Núbia, Jonas, Julio, Guilherme e Tiago, pelo auxílio na condução dos experimentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, e ao quadro de professores que compõem o mesmo, pela oportunidade da realização deste mestrado e pelos conselhos e ensinamentos a mim passados.

A professora Mirta, pela ajuda nas definições e condução deste trabalho.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Aos membros da banca examinadora, pelas sugestões e considerações apresentadas para a melhoria deste trabalho.

Enfim, a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

“Uma geração vai e outra geração vem, porém a terra sempre permanece...”

(Eclesiastes 4:1)

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria

# CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS E PRODUTIVIDADE DE PLANTAS DE SORGO SUBMETIDAS À IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA

AUTOR: Anderson Luiz Zwirtes

ORIENTADOR: Reimar Carlesso

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 02 de abril de 2013.

A sustentabilidade do manejo de irrigação implica em uma gestão conservatória e ambientalmente sustentável. A irrigação deficitária pode ser utilizada para obtenção de elevada produtividade da água sem, no entanto, ocasionar perdas expressivas na produtividade de grãos da cultura. O presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes manejos de irrigação deficitária sobre os índices morfológicos (área foliar, altura de plantas), fisiológicos (taxa fotossintética, condutância estomática, taxa de transpiração), produção de forragem e produtividade de grãos do sorgo, além de identificar o manejo de irrigação deficitária que apresenta a maior produtividade da água. O experimento foi desenvolvido no interior de uma cobertura móvel, sob trilhos, que quando fechada impedia o ingresso da precipitação pluvial no interior da área experimental. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com três repetições. Foram testados cinco tratamentos de manejo de irrigação na cultura do sorgo, sendo os tratamentos mantidos com 100, 75, 50 e 25 %  $ET_c K_c$  simples e 100%  $ET_c K_c$  dual. Diariamente foram avaliados o armazenamento e perdas acumuladas de água no solo e, semanalmente, as características morfológicas do sorgo (altura de plantas e o índice de área foliar). As seguintes características fisiológicas das plantas de sorgo foram avaliadas: taxa fotossintética, condutância estomática, eficiência intrínseca do uso da água e fotossíntese total da planta. Determinou-se a produtividade de grãos do sorgo, produtividade da água e produtividade da água irrigada. A redução de 25% na aplicação da água provocou redução de 6,5 cm (7%) na altura das plantas de sorgo e 5% no índice de área foliar das plantas. A redução de 75% na aplicação da água na irrigação deficitária passando de 100 para 25% a  $ET_c K_c$  simples, reduziu em até 0,675 mol  $H_2O m^{-2} s^{-1}$  a condutância estomática e 43,50  $\mu mol CO_2 m^{-1} s^{-1}$  a taxa fotossintética. Esta redução na reposição da  $ET_c$  também apresentou redução linear na fotossíntese total das plantas de sorgo. As irrigações deficitárias ocasionam redução na produção de forragem e de grãos. A redução de 25% na aplicação da água provocou redução de 7414, 2169 e 1113 kg  $ha^{-1}$  na PMV, PMS, e rendimento de grãos, respectivamente. A máxima eficiência técnica da produtividade da água foi observada com a reposição de 64% da  $ET_c K_c$  simples e, o valor da produtividade da água irrigada e do retorno econômico aumentou com a redução de 100% para 25% da  $ET_c K_c$  simples. O manejo de irrigação com 100% de  $ET_c K_c$  dual, parametrizado pela FAO, proporcionou uma redução na aplicação de água de 120 mm em relação ao manejo de irrigação com 100 % de  $ET_c K_c$  simples. As características morfológicas, produtividade de massa verde e massa seca e rendimento de grãos das plantas de sorgo foram semelhantes entre estes dois manejos de irrigação. As plantas mantidas com 100% da  $ET_c K_c$  dual apresentaram melhores índices para a produtividade de água e produtividade de água irrigada em comparação aos obtidos com a irrigação do tratamento 100% de  $ET_c K_c$  simples.

**Palavras-chave:** *Sorghum bicolor*. Produtividade da água. Manejos de irrigação. Evapotranspiração da cultura.



## ABSTRACT

Master Course Dissertation  
Post Graduate Program in Agricultural Engineering  
Federal University of Santa Maria

# MORPHOPHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS AND PRODUCTIVITY OF SORGHUM PLANTS SUBMITTED TO DEFICIT IRRIGATION

AUTHOR: Anderson Luiz Zwirtes

ADVISER: Reimar Carlesso

Defense Place and Date: Santa Maria, April, 02<sup>nd</sup>, 2013.

The sustainability of irrigation management implies a conservatory management and environmentally sustainable. The deficit irrigation can be used to obtain high water productivity without, however, cause significant losses in seed yield of culture. This study aims to evaluate the effects of different deficit irrigation management on morphological indices (leaf area, plant height), physiological (photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate), forage production and grain yield, and to identify the deficit irrigation management that has the highest water productivity. The experiment was conducted inside a mobile greenhouse, that prevents the rainfall on the experimental area. The experimental design was completely randomized design with three replications. Five irrigation management treatments using sorghum were tested; the treatments were maintained with 100, 75, 50 and 25%  $ET_c K_c$  <sub>single</sub> and 100%  $ET_c K_c$  <sub>dual</sub>. It was also evaluated the daily water storage and accumulated water losses of the soil profile, and weekly morphological characteristics of sorghum (plant height and leaf area index). Some physiological characteristics of the sorghum plants were evaluated, such as: photosynthetic rate, stomatal conductance, intrinsic efficiency of water use and total plant photosynthesis. Besides, it was also measured the sorghum grain yield, water productivity and irrigation water productivity. A 25% reduction in water application caused a reduction of 6.5 cm (7%) in the sorghum plant height and 5% in leaf area index of plants. A 75% reduction in the application of irrigation water deficit, reducing from 100 to 25%  $ET_c K_c$  <sub>single</sub> reduced 0.675 mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> in stomatal conductance and 43.50 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> in photosynthetic rate. The reduction in the replacement of  $ET_c$  also showed linear reduction in photosynthesis total sorghum plants. A 25% reduction in the application of water caused a reduction of 7414, 2169 e 1113 kg ha<sup>-1</sup> in the green dry matter, dry matter production and grain yield, respectively. The maximum technical efficiency of water productivity was observed with the replacement of 64%  $ET_c K_c$  <sub>single</sub>, and the irrigation water productivity and economic return reduced with the increased of 25 to 100%  $ET_c K_c$  <sub>single</sub>. The irrigation management with 100%  $ET_c K_c$  <sub>dual</sub> parameterized by FAO, provided a reduction in water application of 120 mm compared to irrigation management with 100%  $ET_c K_c$  <sub>single</sub>. The morphological characteristics, green and dry mass yield and grain yield of sorghum plants were similar between these two irrigation managements. Plants maintained at 100%  $ET_c K_c$  <sub>dual</sub> had better rates for water productivity and irrigation water productivity compared to those obtained with the irrigation treatment 100%  $ET_c K_c$  <sub>single</sub>.

**Key words:** *Sorghum bicolor*. Water productivity. Irrigation management. Crop evapotranspiration.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Ilustração da cobertura móvel (“ <i>Rainfall Shelter</i> ”) utilizada no experimento, com a estrutura aberta (a) e fechada (b). Santa Maria, RS, 2013. Fonte: Martins (2010).....	26
Figura 2 -	Detalhe da grade quadriculada posicionada sobre a linha de cultivo para a avaliação do índice de cobertura vegetal da superfície do solo pelo dossel vegetativo da cultura do sorgo. Santa Maria, RS. 2013. ....	33
Figura 3 -	Condições meteorológicas observadas ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo. Santa Maria, RS, 2013. ....	39
Figura 4 -	Fração de água disponível (FAD) na camada de 0-0,55 m de profundidade do solo, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura sorgo submetido a diferentes manejos de irrigação. Santa Maria, RS. 2013. ....	40
Figura 5 -	Variação da lâmina de água armazenada nas camadas de 0,0-0,10 m, 0,10-0,25 m e 0,25-0,55 m de profundidade do solo durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo. Santa Maria, RS. 2013. ....	42
Figura 6 -	Altura de plantas da cultura do sorgo aos 29, 39, 49, 57 e 80 dias após a emergência, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da $ET_c K_c$ simples. Santa Maria, RS. 2013. ....	44
Figura 7 -	Resultados do índice de área foliar (IAF) das plantas de sorgo determinado aos 32, 39, 44, 49 e 60 dias após a emergência, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da $ET_c K_c$ simples. Santa Maria, RS. 2013. ....	45
Figura 8 -	Resultados do índice de cobertura vegetal do solo pelo dossel vegetativo da cultura do sorgo aos 32, 35 e 43 dias após a emergência (DAE) para os tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da $ET_c K_c$ simples. Santa Maria, RS. 2013. ....	46
Figura 9 -	Resultados da condutância estomática das plantas de sorgo aos 39, 46, 53, 60, 71 e 84 dias após a emergência, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da $ET_c K_c$ simples. Santa Maria, RS. 2013.....	48
Figura 10 -	Resultados da taxa fotossintética das plantas de sorgo aos 39, 46, 53, 60, 71 e 84 dias após a emergência, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da $ET_c K_c$ simples. Santa Maria, RS. 2013. ....	49
Figura 11 -	Resultados de fotossíntese total das plantas de sorgo determinados aos 32, 39, 46, 53, 60, 71 e 84 dias após a emergência, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da $ET_c K_c$ simples. Santa Maria, RS. 2013. ....	51
Figura 12 -	Resultados da taxa de transpiração das plantas de sorgo aos 39, 53, 60, 71 e 84 dias após a emergência (DAE), nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da $ET_c K_c$ simples. Santa Maria, RS. 2013.....	53
Figura 13 -	Resultados da eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) em plantas de sorgo aos 22, 39, 46, 53, 60, 71 e 84 dias após a emergência (DAE), nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da $ET_c K_c$ simples. Santa Maria, RS. 2013. ....	54
Figura 14 -	Perda acumulada de água do solo aos 38, 48, 58, 78, 88 e 98 dias após a emergência (DAE) da cultura do sorgo, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da $ET_c K_c$ simples. Santa Maria, RS. 2013. ....	55

Figura 15 – Resultados de produção de massa verde de forragem (A) e produção de massa seca de forragem (B), produtividade da água irrigada na produção de massa verde (C) e produtividade da água irrigada na produção de massa seca (D) da cultura do sorgo, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da $ET_c K_c$ simples. Santa Maria, RS. 2013. ....	57
Figura 16 – Resultado do teor de matéria mineral (A), fibra em detergente neutro (B) e fibra em detergente ácido (C) apresentadas na forragem pré-ensilada de plantas de sorgo, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da $ET_c K_c$ simples. Santa Maria, RS. 2013. ....	58
Figura 17 - Produtividade (A), massa de 100 grãos (B), massa de grãos por panícula (C), comprimento das panículas (D) produtividade da água (E) e produtividade da água irrigada (F), nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da $ET_c K_c$ simples. Santa Maria, RS. 2013.....	60
Figura 18 – Resultado da receita (A), lucro (B) e retorno econômico da irrigação (C) da cultura do sorgo nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da $ET_c K_c$ simples. Santa Maria, RS. 2013. ....	63
Figura 19 – Evapotranspiração da cultura acumulada (A), e perda acumulada de água do solo (B) na cultura do sorgo. Santa Maria, RS, 2013.....	65
Figura 20 - Altura de plantas (A), Índice de área foliar (IAF) das plantas (B), Índice de cobertura vegetal (C) das plantas de sorgo. Santa Maria, RS, 2013. ....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Densidade do solo, densidade de partícula, macroporos, microporos e porosidade total, distribuição granulométrica, classe textural, limite superior (LS) e limite inferior (LI) de água disponível às plantas nas camadas do solo. Santa Maria, RS, 2013.....	28
Tabela 2 -	Análise química do solo para as camadas de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade para a área experimental. Santa Maria, RS, 2013.....	29
Tabela 3 -	Calendário de irrigações, em dias após a emergência (DAE), para os diferentes manejos de irrigação da cultura do sorgo. Santa Maria, RS, 2013.....	31
Tabela 4 -	Produção de massa verde (PMV), produção de massa seca (PMS), rendimento de grãos, produtividade da água (WP) e produtividade da água irrigada (WPi) na produção de grãos da cultura do sorgo. Santa Maria, RS, 2013.....	67

## LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A - Resultado do quadrado médio da análise de variância para fração de água disponível no solo para os diferentes manejos de irrigação durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo, Santa Maria, RS, 2013. ....	86
Apêndice B - Resultado da análise de variância para a lâmina de água no solo acumulada na camada de 0,0-0,10m para os diferentes manejos de irrigação durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo, Santa Maria, RS, 2013.....	87
Apêndice C - Resultado da análise de variância para a lâmina de água no solo acumulada na camada de 0,10-0,25m para os diferentes manejos de irrigação durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo, Santa Maria, RS, 2013.....	88
Apêndice D - Resultado da análise de variância para a lâmina de água no solo acumulada na camada de 0,25-0,55 m para os diferentes manejos de irrigação durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo, Santa Maria, RS, 2013.....	89
Apêndice E - Resultados do quadrado médio da análise de variância para a altura de plantas de sorgo, índice de área foliar (IAF) e índice de cobertura do solo pelo dossel vegetativo da cultura do sorgo submetida a diferentes níveis de reposição da $ET_c$ . Santa Maria, RS. 2013. ....	90
Apêndice F - Resultado do quadrado médio da análise de variância para a taxa fotossintética e taxa fotossintética total, condutância estomática e taxa de transpiração das plantas de sorgo submetida a diferentes níveis de reposição da $ET_c$ . Santa Maria, RS. 2013. ....	91
Apêndice G - Resultado do quadrado médio da análise de variância para a eficiência intrínseca do uso da água em plantas de sorgo submetida a diferentes níveis de reposição da $ET_c$ . Santa Maria, RS. 2013.....	92
Apêndice H - Resultado do quadrado médio da análise de variância para perda de água acumulada na cultura do sorgo submetida a diferentes níveis de reposição da $ET_c$ . Santa Maria, RS. 2013. ....	92
Apêndice I - Resultado do quadrado médio da análise de variância para produção de forragem e produtividade da água e qualidade da forragem de sorgo submetida a diferentes níveis de reposição da $ET_c$ . Santa Maria, RS. 2013.....	93
Apêndice J - Resultado do quadrado médio da análise de variância para rendimento de grãos, massa de 100 grãos, massa de grãos por espigas, comprimento da panícula, produtividade da água (WP) e produtividade da água irrigada (WPI), Receita, Lucro e Retorno econômico da cultura do sorgo submetido a diferentes níveis de reposição da $ET_c$ . Santa Maria, RS. 2013. ....	93
Apêndice K - Resultado do quadrado médio da análise de variância para a altura de plantas, índice de área foliar, e cobertura do solo pelo dossel vegetativo das plantas de sorgo submetidas a diferentes manejos de irrigação, Santa Maria, RS, 2013. ....	94
Apêndice L - Resultado do quadrado médio da análise de variância para a produção de massa verde (PMV), produção de massa seca (PMS), rendimento de grãos, produtividade da água (WP) e produtividade da água irrigada (WPI) na produção de grãos da cultura do sorgo submetido a diferentes manejos de irrigação. Santa Maria, RS. 2013. ....	95

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Abreviações	Variável/ parâmetro	Unidade
ET <sub>c</sub>	Evapotranspiração da cultura	mm dia <sup>-1</sup>
ET <sub>o</sub>	Evapotranspiração de referência	mm dia <sup>-1</sup>
K <sub>c</sub>	Coefficiente de cultura	adimensional
K <sub>c simples</sub>	Coefficiente de cultura simples	adimensional
K <sub>c dual</sub>	Coefficiente de cultura dual	adimensional
k <sub>cb</sub>	Coefficiente de cultura basal	adimensional
k <sub>e</sub>	Coefficiente de evaporação de água do solo	adimensional
LS	Limite superior de água disponível as plantas	mm
LI	Limite inferior de água disponível as plantas	mm
AD	Água disponível as plantas	mm
FAD	Fração de água disponível as plantas	adimensional
DAE	Dias após a emergência	dias
IAF	Índice de área foliar das plantas	m m <sup>-1</sup>
EIUA	Eficiência intrínseca do uso da água	μmol CO <sub>2</sub> mol <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O
WP	Produtividade da água	kg mm <sup>-1</sup>
WPI	Produtividade da água irrigada	kg mm <sup>-1</sup>
PMS	Produção de massa seca	kg ha <sup>-1</sup>
PMV	Produção de massa verde	kg ha <sup>-1</sup>
MS	Matéria seca	%
MM	Matéria mineral	%
PB	Proteína bruta	%
FDA	Fibra detergente ácido	%
FDN	Fibra detergente neutro	%
DMS	Diferença mínima significativa	adimensional

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
2.1 A cultura do sorgo .....	18
2.2 Efeitos do déficit hídrico na cultura do sorgo .....	19
2.3 Irrigação deficitária e produtividade da água .....	21
2.4 Necessidades hídricas da cultura .....	23
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
3.1 Caracterização do local e experimento.....	26
3.2 Caracterização física e química do solo.....	27
3.3 Implantação e manejo da cultura do sorgo.....	29
3.4 Manejo da irrigação .....	30
3.5 Determinações do conteúdo de água no solo.....	31
3.6 Determinações das características morfológicas das plantas .....	32
3.7 Determinações do índice de cobertura vegetal da superfície do solo.....	33
3.8 Determinações das características fisiológicas das plantas .....	34
3.9 Produção e qualidade da forragem das plantas de sorgo .....	34
3.10 Rendimento de grãos da cultura do sorgo.....	35
3.11 Produtividade da água .....	36
3.12 Análise econômica da produção de grãos.....	36
3.13 Análise estatística.....	37
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>38</b>
4.1 Condições meteorológicas e fração de água disponível.....	38
4.2 Respostas das plantas de sorgo submetidas a diferentes níveis de irrigação deficitária (100, 75, 50 e 25% da $ET_c K_c$ simples).....	44
4.2.1 Características morfológicas das plantas de sorgo .....	44
4.2.2 Características fisiológicas das plantas de sorgo.....	47
4.2.3 Perda acumulada de água da cultura do sorgo.....	55
4.2.4 Produção e qualidade de forragem de plantas de sorgo.....	56
4.2.5 Rendimento de grãos das plantas de sorgo.....	59
4.2.6 Análise econômica da produção de grãos da cultura do sorgo.....	62
4.3 Respostas da cultura do sorgo submetidas a diferentes manejos de irrigação .....	64
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>85</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A água é um fator essencial para a produção agrícola, estando fortemente relacionada com as variações de produtividade das culturas. Grande parte das oscilações nas safras brasileiras está atrelada à distribuição irregular de chuvas durante o ciclo de desenvolvimento das culturas (BERGAMASCHI et al., 2007). A água é um recurso natural determinante para a produção de alimentos, 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 sustentabilidade do uso da água implica no desafio de um manejo conservacionista da água, assegurando a viabilidade econômica, pois os recursos hídricos se apresentam cada vez mais escassos, seja em quantidades ou em qualidade para atender uma demanda crescente de uso da água (PEREIRA, 2007).

A ocorrência de déficit hídrico ocasiona oscilações na produção de grãos de milho em nível mundial (BERGONCI et al., 2001; BERGAMASCHI et al., 2004), e essa escassez de milho no mercado provoca aumento do preço do produto, resulta em custos mais elevados para a produção animal. Em especial no Rio Grande do Sul, a variação anual da produtividade do milho está fortemente relacionada com a quantidade de chuva (BERGAMASCHI et al., 2007). Para a estabilização e redução dos custos de produção de rações, o cultivo do sorgo (*Sorghum bicolor*) vem apresentando destaque no mercado de grãos no Brasil, principalmente na substituição do uso de grãos de milho na formulação de rações, reduzindo assim, o custo de produção animal. O sorgo também apresenta boa produção de massa forrageira, podendo esta ser utilizada para alimentação animal em substituição à forragem de milho.

A cultura do sorgo se destaca pela elevada produção de biomassa, rusticidade e maior tolerância ao déficit hídrico em relação ao milho. Apesar dessa tolerância, o déficit hídrico provoca reduções na produtividade de grãos, sendo que a resposta está diretamente relacionada ao estágio fenológico em que ocorre a restrição e à intensidade do déficit hídrico.

Em regiões com disponibilidade limitante de água às plantas, a irrigação representa a maneira mais eficiente de garantir elevadas produtividades nas culturas agrícolas (PAZ et al., 2000). As práticas de irrigação tradicionais consistem na reposição total da água perdida por evapotranspiração, onde a irrigação é realizada com o fim de proporcionar as condições hídricas ideais às plantas, buscando obter as máximas eficiências técnicas expressa pela



cultura irrigada. O desenvolvimento da agricultura irrigada exige procedimentos tecnológicos e econômicos para otimizar o uso da água e obter melhores produtividades, sem comprometer a qualidade e disponibilidade do recurso hídrico (PAZ et al., 2000).

Uma estratégia de manejo do recurso hídrico está na utilização da irrigação deficitária, que visa atender somente uma fração da demanda de água da cultura (FRIZZONE, 2007). De acordo com Geerts e Raes (2009) a irrigação deficitária pode ser utilizada sem resultar em perdas expressivas de produtividade e alcança patamares elevados para a produtividade da água. Porém, para um correto manejo de irrigação deficitária, é necessário conhecer o nível de deficiência da evapotranspiração que cada cultura pode ser submetida, sem que ocorram expressivas reduções nas produtividades das culturas.

A irrigação pode representar a sustentabilidade do sistema produtivo nas regiões de ocorrência da má distribuição de chuvas. Porém, o planejamento de uma área irrigada muitas vezes encontra situações inesperadas, resultando em 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. Neste caso, o produtor deve escolher entre a redução da área irrigada para que o volume armazenado supra as necessidades da cultura, ou então, na redução da lâmina irrigada à cultura, aplicando sobre a cultura um déficit hídrico controlado, à fim de provocar o mínimo de perdas no rendimento da cultura.

Na região do cerrado brasileiro, a cultura do sorgo vem sendo cultivada na condição de safrinha, no período sem ocorrência de chuva ou período seco. A cultura é semeada após o cultivo de soja ou milho, devido a sua maior tolerância ao déficit hídrico e fornecimento de matéria vegetal (DUARTE, 2010). Porém, como durante o ciclo de desenvolvimento da cultura praticamente não ocorre precipitação pluvial, a água armazenada no perfil do solo é a responsável por suprir a demanda hídrica da cultura. Em muitos casos, o volume armazenado não é o suficiente para suprir toda a demanda hídrica da cultura do sorgo, sendo a produtividade fortemente reduzida em decorrência do déficit hídrico. Nesta situação, a utilização de manejo com irrigação deficitária pode resultar um significativo aumento na produtividade de grãos e forragem na cultura.

O conhecimento dos efeitos do déficit hídrico ocasionado pelo uso de irrigações deficitárias sobre as características morfofisiológicas e produtivas das plantas de sorgo é fundamental para estabelecer parâmetros de resposta da cultura. Resultados da irrigação deficitária com a cultura do sorgo são importantes para a tomada de decisões no manejo de irrigação da cultura, contribuindo para um aumento na eficiência do manejo da cultura e melhor utilização dos recursos hídricos.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes manejos de irrigação deficitária, baseada na reposição da evapotranspiração da cultura, nos índices morfológicos (área foliar, altura de plantas), fisiológicos (taxa fotossintética, condutância estomática), produção de forragem e produtividade de grãos, além de identificar o manejo de irrigação deficitária que resulta em maior produtividade da água.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A cultura do sorgo

O sorgo é o quinto cereal mais importante do mundo, superado apenas pelo trigo, arroz, milho e cevada, e aproximadamente 35% da produção de grãos é destinado para o consumo humano, o restante é destinado basicamente à alimentação animal (AWIKA; ROONEY, 2004). O sorgo é a principal fonte de alimento em grande parte dos países da África, Sul da Ásia e América Central, e importante componente da alimentação animal nos Estados Unidos, Austrália e América do Sul (SANTOS, 2003). Ainda segundo o autor, o grão pode ser processado em farinha ou amido industrial, e a cultura ainda fornece produção elevada de resíduo vegetal, destinada à forragem ou cobertura vegetal do solo.

No Brasil, a cultura do sorgo foi introduzida no início do século XX, identificada como substituta do milho na produção agrícola e, principalmente, na alimentação animal, não apresentando, porém, afirmação como cultura comercial entre os produtores e consumidores, devido a aspectos culturais, que atuam sobre os agentes do agronegócio brasileiro (DUARTE, 2009).

A área cultivada com a cultura no Brasil entre 2000 e 2011 aumentou 20,9%, enquanto que a produção obteve crescimento de 115,4% no mesmo período (FEPAGRO, 2011). Segundo estimativas da CONAB (2012), para a safra brasileira de 2012/2013 serão semeadas 788,6 mil hectare com a cultura do sorgo, e a estimativa para produtividade em torno de 2844 kg ha<sup>-1</sup>, totalizando uma produção de 2243,9 mil toneladas.

O sorgo, como suplemento energético para animais, tem se mostrado um produto interessante, devido a seu preço ser de 15 a 25% inferior ao do milho e o seu teor energético corresponder a 90% do teor energético do mesmo (VALENTE, 1992). Segundo o mesmo autor, a ração à base de grãos de sorgo não resulta em diferença expressiva na produção de leite, teor de gordura e ganhos de peso em bovinos, se comparada à base de milho. Desempenho semelhante foi observado por Scheuermann (1998) em frangos, quanto à comparação das dietas à base de milho e sorgo. De acordo com Silva et al. (2009), devido à semelhança entre os resultados obtidos e as características nutricionais do sorgo e do milho, torna-se promissora a inclusão do sorgo na formulação de rações para frango de corte,

principalmente por não ser tradicionalmente utilizado na alimentação da população brasileira, e apresentar seu custo, em média, 20% inferior ao do milho.

Devido às suas características nutricionais, o sorgo tem sido pesquisado como ingrediente energético alternativo ao milho, apresentando vantagens para o cultivo em regiões de solo arenoso e clima seco, onde apresenta maior produção de alimento por unidade de área, representando uma alternativa importante para o abastecimento do mercado de grãos (SCHEUERMANN, 1998).

A oscilação de preço do milho, principalmente no período de entre safra, aumentam o custo de produção animal e, ingredientes alimentares energéticos à base de sorgo podem ser utilizados como substitutos do milho (LEITE et al., 2011). Isso demonstra uma potencial expansão nas áreas plantadas com a cultura do sorgo no Brasil, comprovando a importância de sorgo na alimentação animal (LEÃO et al., 2011). O sorgo pode ser utilizado para pastejo e silagem, possuindo potencial produtivo e valor nutritivo elevado, além da silagem de sorgo poder ser utilizada em substituição da silagem de milho, sem acarretar perdas na produtividade dos animais (BUSO et al., 2011; SKONIESKI et al. 2010). Entre as espécies forrageiras que podem ser ensiladas, o sorgo destaca-se por ser um alimento de alto valor nutritivo (NEUMANN et al., 2002). O uso da silagem de sorgo é eficiente como volumoso para bovinos de corte confinados (BARROS et al., 2010).

## **2.2 Efeitos do déficit hídrico na cultura do sorgo**

O sorgo é uma planta C4, de dia curto e com elevada taxa fotossintética, requerendo uma temperatura superior a 21°C para um bom crescimento e desenvolvimento (MAGALHÃES et al., 2003). Em termos evolutivos, as plantas C4 apresentam evolução recente, possuindo mecanismo fotossintético mais eficiente e apresentam maior eficiência no uso da água, se comparadas às plantas C3, além de apresentarem capacidade fotossintética em ambientes com temperaturas mais elevadas (SAGE; ZHU, 2011).

O sorgo pode tolerar curtos períodos de déficit hídrico. No entanto, períodos prolongados ou déficit hídrico severo, podem afetar o crescimento das plantas e a produtividade final da cultura (FARAH et al., 1997; ASSEFA et al., 2010). De acordo com Camacho et al. (2002), o sorgo possui tolerância a períodos de déficit hídrico durante seu ciclo vital, apresentando produtividade de grãos e de massa verde relativamente elevados em

condições de pluviosidade baixa e em solos de baixa fertilidade. Esta tolerância é verificada na cultura do sorgo devido às plantas possuírem a capacidade de manter a abertura estomática em níveis mais baixos de potencial de água na folha e alto ajuste osmótico, em baixas condições de disponibilidade de água (ASSEFA et al., 2010). Mesmo assim, o déficit hídrico pode causar reduções acentuadas na produtividade da cultura (VIEIRA JUNIOR et al., 2007). O déficit hídrico pode provocar uma redução de 25% na produtividade de grãos da cultura, se a incidência ocorrer entre as fases de perfilhamento e emissão da panícula, período compreendido, aproximadamente, dos 30 aos 60 dias após a emergência das plantas (SILVA; PARFITT, 2005). Também foram verificadas por Carlesso et al., (1997), reduções no comprimento final dos entrenós da cultura e maior senescência de plantas quando a ocorrência do déficit hídrico ocorreu durante a fase de desenvolvimento vegetativo.

Respostas de redução da produtividade da cultura do sorgo em situações de deficiência hídrica ao longo do ciclo foram encontradas por Boyer (1982), Peiter e Carlesso (1996), Chaudhuri e Kanemasu (1982), Tolk e Howell (2008). Quando o déficit hídrico se inicia durante o estágio de desenvolvimento de panícula, resulta em redução de tamanho das mesmas (SOLAIMALAI et al., 2001). Em trabalhos de Lima et al. (2011); Diawara (2012) o déficit hídrico do solo durante o estágio de iniciação da panícula ou florescimento resultou em redução na produtividade da cultura do sorgo.

O déficit hídrico nas plantas ocasiona a diminuição da divisão celular e da atividade enzimática. À medida que o déficit hídrico é intensificado, desencadeia redução da transpiração, devido ao fechamento dos estômatos das plantas (CARVALHO, 2010). Em plantas de sorgo, Rosenthal et al. (1987) encontrou que, valores de FAD abaixo de 0,30 reduzem drasticamente a transpiração das plantas.

A redução na transpiração e condutância estomática de plantas de sorgo sob efeito de déficit hídrico também foram estudadas e verificadas em trabalhos recentes conduzidos por Cechin (1998); Kakani et al. (2011), Kapanigowda et al. (2012), enquanto que trabalhos de Kidambi et al. (1990); Aishah et al. (2011) relatam a resposta do déficit hídrico nas plantas, ocasionando menores taxas fotossintéticas.

A diminuição da água no solo afeta as respostas obtidas para a altura de plantas de sorgo forrageiro (NASCIMENTO, 2008). As plantas de sorgo apresentam alterações em suas características morfológicas quando as plantas são conduzidas em situações de deficiência hídrica no solo. A redução da área fotossinteticamente ativa foi verificada quando a fração de água disponível (FAD) às plantas na profundidade do sistema radicular foi inferior a 0,60 (CARLESSO et al., 1997), 0,45 (ROSENTHAL et al. 1987), 0,25 (RITCHIE et al. 1972);

estes dois últimos apresentam este valor como os limite da FAD. Segundo Peiter e Carlesso (1996), a manutenção de FAD a abaixo de 0,65 provoca modificações morfofisiológicas no crescimento e desenvolvimento das plantas de sorgo granífero.

As raízes de sorgo possuem a capacidade de extração de água a potenciais abaixo de -1500 kPa podendo, desta forma, ser ampliado o limite inferior de água disponível às plantas (CABELGUENNE; DEBAEKE 1998; PETRY, 2000; TOLK; EVETT, 2012). Esta extração de água em potenciais abaixo de -1500 kPa pode ser ocasionada devido às plantas de sorgo possuírem em seu sistema radicular maior quantidade de raízes secundárias por unidade de raiz primária, principalmente em comparação a outros cereais com menores capacidades de extração de água no solo (ASSEFA et al., 2010).

### **2.3 Irrigação deficitária e produtividade da água**

A produção agrícola mundial ocupa cerca de 1,54 bilhões de hectares, dos quais cerca de 277 milhões são irrigados, produzindo cerca de 44% da produção agrícola total, consumindo aproximadamente 70,2% de toda a água derivada das fontes (rios, lagos e aquíferos subterrâneos), enquanto que, as indústrias e o uso doméstico são responsáveis pela utilização dos 29,8% restantes (CHRISTOFIDIS, 2006). Assim, devido ao elevado consumo de água pela agricultura (70,2%), tornou-se necessário uma utilização eficiente dessa, para a conservação deste recurso limitado (FARRÉ; FACI, 2006). A utilização da irrigação deficitária pode resultar em incremento na produtividade da água em mais de 200% em relação à produtividade da água obtida com a irrigação plena (ZWART; BASTIAANSSEN, 2004).

A utilização da irrigação deficitária difere das práticas tradicionais de irrigação (KIRDA, 2002). Esta prática consiste na reposição de lâminas de irrigação inferiores ao requerimento hídrico das culturas, para satisfazer parcialmente as necessidades hídricas da cultura (KANG et al., 2000). Em geral, as irrigações são controladas e realizadas em períodos em que a planta é mais sensível aos efeitos do déficit hídrico (KANG, et al 2002; GEERTS; RAES, 2009, LIMA 2012). Kang et al. (2002) apresentam que esta prática tem se tornado importante nos últimos anos, principalmente em locais onde os recursos hídricos são limitados.

Devido à escassez de água, para uma irrigação de reposição total da evapotranspiração de água para algumas áreas cultivadas, em algumas situações os agricultores são obrigados a optar por uma redução na área irrigada, para atender plenamente à demanda da evapotranspiração da cultura ou na aplicação de déficit hídrico ao longo do ciclo da cultura, possibilitando, desta forma, cultivar sob irrigação uma maior área de cultivo. Assim, deve-se optar por culturas que requerem menor quantidade de água, ou realizar investimentos em sistemas de irrigação mais eficientes (PAYERO et al., 2009).

O correto manejo da água, em um manejo de irrigação deficitária, requer o conhecimento do nível de deficiência da transpiração da cultura que é permitido sem que ocorra redução significativa na produtividade das culturas. Desta forma, o principal objetivo com esta prática é o aumento do uso e eficiência da água na cultura e, conseqüentemente, a eliminação de irrigações que não favoreçam incrementos de produtividade nas culturas (KIRDA, 2002). O manejo da água para a irrigação, em um cenário de escassez, deve ser realizado de forma eficiente, visando a economia de água e maximização da sua produtividade (FERERES; SORIANO, 2007).

De acordo com English (1990), em áreas com escassez de água, para o produtor, a maximização da produtividade da água pode ser economicamente mais rentável do que a maximização da produção. Segundo Molden et al. (2003), o aumento da produtividade da água na agricultura desempenha um papel fundamental para aliviar a competição por recursos em escassez e prevenção ambiental, além de garantir a segurança alimentar. Melhorar a produtividade da água continua a ser um tema de preocupação devido à água ser um importante fator que limita a produção de grãos em todo o mundo e conseguir maiores rendimentos por unidade de água é um dos principais desafios da agricultura (ALI; TALUKDER 2008).

A produtividade da água é um indicador extremamente útil para quantificar o impacto das decisões num sistema de irrigação, no que diz respeito ao manejo dos recursos hídricos, devido a produtividade da água representar o máximo retorno sobre um recurso limitado (TENNAKOON; MILROY, 2002; ALMEIDA, 2008). Maiores valores de produtividade da água resultam em uma produção elevada, porém com menores valores de lâmina de água utilizados (ZWART; BASTIAANSEN, 2004).

A produtividade da água pode ser expressa de diversas maneiras, ao se variar os valores do denominador e numerador da equação (produção/água utilizada) (SECKLER et al., 1998). Vários autores têm apresentado o termo eficiência do uso da água como sinônimo do uso da produtividade da água (produção/água utilizada), (STEDUTO 1996; SOUSA et al.,

2000; OLIVEIRA et al., 2011). Porém, a utilização desses dois termos (produtividade da água e eficiência do uso da água) tem causado sérios problemas de interpretação, principalmente em casos onde os termos estão ocultos (BLUM, 2005). Portanto, em termos gerais, a produtividade da água é a relação entre a produção (biomassa ou grãos) e a água utilizada (STEDUTO et al., 2007; RODRIGUES; PEREIRA, 2009).

De acordo com Geerts e Raes, (2009), através da adoção da irrigação deficitária, pode-se maximizar a produtividade da água, pois, mesmo havendo redução na produtividade da cultura, a sua qualidade ainda é assegurada, sendo semelhante à irrigação plena. Em situações onde a água é fator limitante, o objetivo principal não é a máxima produtividade por área de terra, mas sim, a máxima produtividade por unidade de água (ALI; TALUKDER, 2008). Essa unidade de água pode ser o total de água (armazenada no solo + irrigações + precipitações) ou a água aplicada via irrigação (ALI; TALUKDER, 2008; TOLK; HOWELL, 2008; RODRIGUES; PEREIRA, 2009; MARTINS, et al. 2012).

ENGLISH e RAJA, (1996) encontraram resultados positivos para a produtividade da água, que apontam vantagens significativas para a irrigação deficitária, especialmente em situações limitantes de água, sendo os riscos associados à práticas consideradas aceitáveis. O trabalho conduzido por Howell et al. (2007), encontrou, com a utilização da irrigação deficitária, um aumento na produtividade da água. Em contrapartida, não observaram reduções na produtividade. No Brasil, produtividades da água de  $10,93 \text{ kg mm}^{-1}$  foram encontradas no trabalho conduzido com a cultura do sorgo sem déficit hídrico por Sharma e Neto, (1986).

Verificou-se para diferentes culturas que, com a adoção do manejo de irrigação deficitária, ou imposição de restrições hídricas em determinado estágio de desenvolvimento da cultura, foi possível um aumento da produtividade da água. Estas respostas foram observadas na cultura do sorgo por MELO (2006); TOLK; HOWELL, (2008), batata (AHMADI et al., 2010), milho (MARTINS et al., 2012), feijoeiro (FRANÇOIS, 2012).

## **2.4 Necessidades hídricas da cultura**

A máxima produtividade de grãos de sorgo requer entre 450-650 mm de água durante o seu ciclo (ASSEFA et al., 2010). A distribuição deste volume deve ser uniforme ao longo do ciclo de desenvolvimento, pois a produtividade de grãos da cultura demonstra ser mais



sensível à falta de água durante o período reprodutivo (SOLAIMALAI, et al., 2001; ASSEFA et al., 2010). A cultura do sorgo geralmente é afetada pelo déficit hídrico quando este ocorre na fase reprodutiva, logo após a floração (MASTRORILLI et al., 1990; SOLAIMALAI, et al., 2001, ALI et al. 2009).

A determinação diária da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) apresenta-se como um requisito fundamental para a adoção de um correto manejo de irrigação (BEZERRA et al., 2010), e sua determinação é de grande importância para a determinação das necessidades hídricas da cultura (MENDES, 2006). Desta forma, através da  $ET_c$ , pode-se identificar a necessidade hídrica da cultura, resultando em um manejo de irrigação com maior controle sobre a quantidade de água irrigada.

A evapotranspiração é a combinação da evaporação do solo e a transpiração da cultura, afetada por características da cultura, parâmetros meteorológicos, manejo e aspectos ambientais, sendo que, a taxa de evapotranspiração a partir de uma superfície de referência é denominada de evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) (FAO, 2009). A equação de Penman-Monteith é a recomendada pela FAO para a determinação da  $ET_o$ , utilizando dados meteorológicos, sendo os resultados correspondentes à superfície de referência (ALLEN et al., 1998). O coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) expressa a diferença entre a evapotranspiração da cultura e a superfície de referência (ALLEN, et al., 1998). Os autores ainda apresentam duas metodologias para a estimativa da  $ET_c$ , (i) através da utilização de  $K_c$  simples, onde é utilizado apenas um coeficiente integrando a transpiração da cultura e evaporação de água do solo; (ii) através do  $K_c$  duplo ou  $K_c$  dual, onde são abordados dois coeficientes determinados separadamente, denominados de coeficiente de cultura basal ( $k_{cb}$ ) e coeficiente de evaporação da água do solo ( $k_e$ ).

O  $K_c$  simples varia ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, iniciando com valores baixos após a semeadura, elevando-se com o desenvolvimento da cultura até atingir um máximo e, posteriormente, diminuindo o seu valor, tão logo a planta iniciar a senescência das folhas (ALLEN et al., 1998). Para o  $K_c$  dual, o  $K_{cb}$  é definido pela razão entre  $ET_c$  e  $ET_o$ , quando a camada superficial do solo estiver seca, mas com conteúdo de água na zona radicular adequado para sustentar a total transpiração das plantas, enquanto o coeficiente de evaporação ( $k_e$ ) descreve o componente de evaporação a partir da superfície do solo, apresentando um valor elevado quando a superfície do solo estiver molhada (chuva ou irrigação) e apresentando valores menores conforme o solo vai secando, podendo ser zerado quando o solo estiver seco e não apresentar mais água para a evaporação. A soma dos dois

coeficientes não pode ultrapassar um valor máximo para a cultura, determinado pela energia disponível para a evapotranspiração na superfície do solo (ALLEN et al., 1998).

A estimativa da  $ET_c$  pelo  $K_c$  dual, foi criada com a finalidade de fornecer diariamente, a estimativa da evaporação do solo úmido em conjunto com a transpiração da cultura, representando o balanço hídrico diário de uma superfície do solo molhada (irrigação ou chuva) exposto à radiação e ventilação (ALLEN et al., 2005). Ainda segundo os autores, esta metodologia é útil quando há a necessidade da estimativa de curta duração, por exemplo, da programação de irrigação para culturas individuais, bem como do consumo total de água onde frequentemente ocorre o molhamento do solo. Rosa et al. (2012) apresentam que a separação do  $K_c$  nos componentes de evaporação da água do solo e de transpiração das plantas possibilita avaliar os impactos resultantes do molhamento do solo pelo precipitação pluvial ou irrigação, permitindo estimativas mais precisas das perdas de água por evaporação, melhorando a recomendação dos manejos de irrigação (SALDANHA, 2009).

O  $K_c$  dual, apresenta como finalidade a estimativa da  $ET_c$  para pesquisas, o manejo de irrigação em tempo real e com alta frequência, a alta precisão da  $ET_c$  em curto período de tempo e, geralmente, dados diários ou horários, sendo o cálculo realizado com auxílio de planilhas eletrônicas, enquanto que o  $K_c$  simples é, geralmente, mais utilizado em planejamentos e manejo de irrigação, onde não há a necessidade de elevada precisão para a estimativa da  $ET_c$  do ciclo da cultura, e quando se necessita apenas de dados diários, semanais ou mensais, possibilitando assim, o cálculo manual ou com auxílio de planilhas eletrônicas (ALLEN et al., 1998).

A estimativa das necessidades hídricas da cultura do sorgo granífero estimada pelo  $K_c$  dual, apresentou melhores resultados quando comparados aos estimado pelo  $K_c$  simples (TOLK; HOWELL, 2001). Os autores afirmam ainda que as irrigações programadas utilizando a estimativa pelo  $K_c$  simples poderiam não atender às necessidades de uso da água pela cultura e, dessa forma, ocasionar redução da produtividade.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização do local e experimento

O trabalho foi desenvolvido em área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria, RS, no ano agrícola de 2012/13. A área está localizada na latitude de 29° 43' 40''S, longitude de 53°43'11''W e altitude de 103 m. O clima é classificado como do tipo "Cfa", de acordo com a classificação climática de Köppen (MORENO, 1961). O solo foi classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (SANTOS et al., 2006).

O experimento foi conduzido no interior de uma cobertura móvel ("*Rainout Shelter*") (Figura 1), composta de duas estruturas metálicas de 16 x 10 metros, aloçadas sob trilhos metálicos e acionamento mecânico, ocupando uma área de 740 m<sup>2</sup> (74 x 10 m). A área experimental está localizada na parte central da estrutura, tendo 320 m<sup>2</sup> (32 x 10 m).

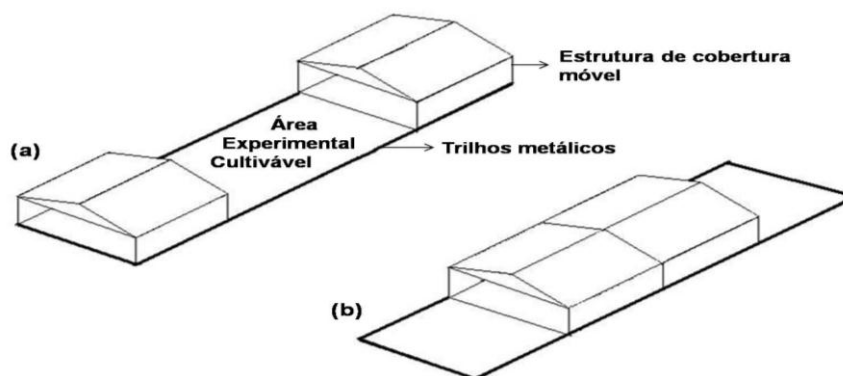


Figura 1 - Ilustração da cobertura móvel ("*Rainfall Shelter*") utilizada no experimento, com a estrutura aberta (a) e fechada (b). Santa Maria, RS, 2013. Fonte: Martins (2010).

O uso da cobertura móvel permite evitar a entrada de água de precipitação pluvial no experimento, possibilitando avaliações de diferentes manejos de irrigação. A cobertura móvel era acionada, sobre a área experimental, instantes antes da ocorrência de qualquer evento de precipitação pluvial. Foi instalado um sistema de drenagem na bordadura da área

experimental, com a finalidade de evitar a entrada de água subsuperficial nas parcelas, constituído de um tubo corrugado perfurado, envolto por manta de fibras têxteis.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), com três repetições. As unidades experimentais apresentaram uma área de 18 m<sup>2</sup> (3 x 6 m). Foram avaliados cinco tratamentos de manejo de irrigação na cultura do sorgo, sendo quatro níveis mantidos com reposição de 100, 75, 50 e 25% da  $ET_c K_c \text{ simples}$  e, um tratamento mantido com reposição de 100%  $ET_c K_c \text{ dual}$ .

Irrigações com lâmina total de 30 mm eram aplicadas nos tratamentos na seguinte maneira: (i) 100%  $ET_c K_c \text{ simples}$  – Quando a  $ET_o * K_c \text{ simples}$  acumulava 30 mm; (ii) 75%  $ET_c K_c \text{ simples}$  – Quando a  $ET_o * K_c \text{ simples}$  acumulava 40 mm.; (iii) 50%  $ET_c K_c \text{ simples}$  – Quando a  $ET_o * K_c \text{ simples}$  acumulava 60 mm; (iv) 25%  $ET_c K_c \text{ simples}$  – Quando a  $ET_o * K_c \text{ simples}$  acumulava 120 mm.; (v) 100%  $ET_c K_c \text{ dual}$  – reposição de 100% da  $ET_c$  estimada pelo  $K_c \text{ dual}$ , parametrizado pela FAO. A lâmina de 30 mm era aplicada quando a depleção de água atingia valores de FAD iguais a 0,45 na camada 0,0-0,85 m.

A  $ET_c$  foi estimada multiplicando-se a  $ET_o$  (Penman-Monteith) pelos coeficientes de cultura ( $K_c \text{ simples}$  e  $K_c \text{ dual}$ ) proposto por Allen et al. (1998). Os dados meteorológicos diários de temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento a 2 m ( $m s^{-1}$ ), pressão atmosférica (kPa) e radiação solar ( $W m^{-2}$ ), necessários para a estimativa da  $ET_o$ , foram obtidos de uma estação meteorológica automática situada a 150 metros do local de condução do experimento.

### 3.2 Caracterização física e química do solo

Antes da instalação do experimento, foram realizadas coletas de solo com estrutura indeformada (anéis volumétricos) e deformada, para a determinação das características físicas do solo, nas camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,25; 0,25-0,55 e 0,55-0,85 m de profundidade.

Com as amostras de estrutura indeformada foram determinados a densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, seguindo a metodologia descrita pela EMBRAPA (1997). As amostras coletadas com estrutura deformada foram usadas para a determinação da análise granulométrica (USDA, 1972), e densidade de partículas (GUBIANI et al., 2006). O conteúdo de água no solo nos potenciais -500, -1000 e -1500 kPa foi determinado com o psicrômetro de termopar WP4 (KLEIN et al., 2010).

Os resultados obtidos para a densidade do solo, densidade de partículas, macroporos, microporos, porosidade total, distribuição granulométrica, classe textural, limite superior (LS) e limite inferior (LI) de água disponível às plantas nas camadas do solo são apresentados na tabela 1. O LS de água disponível foi considerado como o conteúdo volumétrico de água no solo 24 horas após a saturação do solo. O LI compreende o valor da umidade volumétrica no potencial de -1500 kPa.

Tabela 1 - Densidade do solo, densidade de partícula, macroporos, microporos e porosidade total, distribuição granulométrica, classe textural, limite superior (LS) e limite inferior (LI) de água disponível às plantas nas camadas do solo. Santa Maria, RS, 2013.

Camada (m)	Densidade ( $\text{Mg m}^{-3}$ )		Porosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )		
	Solo	Partícula	Macro	Micro	Total
0,0-0,10	1,41	2,54	0,08	0,37	0,45
0,10-0,25	1,37	2,56	0,11	0,35	0,46
0,25-0,55	1,38	2,57	0,12	0,34	0,46
0,55-0,85	1,31	2,61	0,07	0,42	0,49

Camada (m)	Areia	Silte	Argila	Classe Textural	LS	LI <sup>1</sup>
	( $\text{g kg}^{-1}$ )				( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )	
0,0-0,10	352	440	208	Franco	0,26	0,119
0,10-0,25	367	457	176	Franco	0,26	0,112
0,25-0,55	355	453	191	Franco	0,30	0,117
0,55-0,85	196	320	484	Argila	0,39	0,191

<sup>1</sup>potencial -1500 kPa;

A água disponível às plantas foi considerada como a diferença entre o LS e o LI de água disponível às plantas. A lâmina de água disponível foi obtida pelo produto da água disponível na camada ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) pela espessura da camada (mm). A camada 0,0-0,55 m de profundidade apresentou 68 mm de lâmina de água disponível às plantas, e a camada 0,0-0,85 m de profundidade apresentou uma lâmina de água disponível de 128 mm.

A coleta de solo para análise química foi realizada antes de semeadura do sorgo, nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m. Os resultados da análise são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Análise química do solo para as camadas de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade para a área experimental. Santa Maria, RS, 2013.

Camada	pH água 1:1	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC efet.	Saturação (%)	
							Al	Bases
----- cmol <sub>c</sub> DM <sup>-3</sup> -----								
0,0-0,10 m	5,5	5,5	2,5	0,0	3,5	8,7	0,0	71,7
0,1-0,20 m	4,7	3,1	1,4	1,2	4,9	5,9	20,3	48,8
Camada	Índice SMP	%MO	% Argila	Textura	P-Mehlich mg dm <sup>-3</sup>	K	CTC pH 7	K
		m/v						
0,0-0,10 m	6,2	3,0	19,0	4,0	42,0	0,685	12,2	268,0
0,1-0,20m	5,9	2,3	22,0	3,0	6,0	0,194	9,6	76,0

Analisando os resultados apresentados na tabela 2, observa-se que a camada de 0,0-0,10 m de profundidade apresenta pH em água de 5,5; alta saturação de bases e baixa saturação de Al, a qual não necessita de correção de calcário baseado na recomendação da CQFS - RS/SC (2004). O manejo de correção do solo foi realizado no ano de 2009, e está descrito em Martins (2010), que seguiu o critério da saturação de bases, buscando elevar esse valor para 75%. A camada de 0,0-0,10 m de profundidade apresentou teores médios (3%) de matéria orgânica, alto teor de fósforo e muito alto para potássio. A camada de 0,10-0,20 m de profundidade apresentou teores considerados baixos para a matéria orgânica, muito baixo e alto para fósforo e potássio, respectivamente, com capacidade de troca de cátions (CTC) apresentou teores médios para ambas as camadas.

### 3.3 Implantação e manejo da cultura do sorgo

A cultura do sorgo foi semeada no dia 20 de outubro de 2012, manualmente, com abertura das linhas de semeaduras, espaçadas em 0,50 m, e deposição de 15 sementes por metro linear, totalizando 300.000 sementes ha<sup>-1</sup>. Utilizou-se a variedade de sorgo A 9735 R (Nidera), que se caracteriza por apresentar ciclo precoce, grão vermelho e utilizada como duplo propósito (produção de grãos ou silagem). Após a semeadura foi realizada uma irrigação de 5 mm, à fim de proporcionar condições de umidade no solo necessária para a germinação das sementes. A emergência ocorreu no dia 25 de outubro de 2012, cinco dias

após a semeadura, quando mais de 50% das plântulas estavam visíveis sobre a superfície do solo. Aos 10 dias após a emergência (DAE), foi realizado o desbaste das plantas, adequando a densidade populacional para 190.000 plantas ha<sup>-1</sup>.

A fertilização do solo foi realizada com base na análise química, seguindo a recomendação da CQFS-RS/SC (2004), com expectativa de produção de 7.000 kg ha<sup>-1</sup>. A adubação de base foi constituída de 20 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio (N) na forma de uréia (45% N) e 95 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) na forma de superfosfato simples (18% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Em função dos níveis de potássio, na camada de 0,0-0,10 m, serem considerados como muito alto (Tabela 2), não foi realizada a fertilização de reposição desse elemento. A adubação de cobertura foi realizada com a aplicação de 80 kg ha<sup>-1</sup> de N quando as plantas apresentavam cinco folhas completamente expandidas.

Durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo foi realizado o manejo fitossanitário para o controle de pragas, com utilização de três aplicações de inseticida sistêmico (ação de contato e ingestão), a base de Tiametoxam (neonicotinóide) e Lambda-cialotrina (piretróide), dosagem de 200 ml ha<sup>-1</sup>. A aplicação do inseticida foi realizada aos 19, 29 e 40 DAE, com pulverizador tipo costal, com bico cone e jato dirigido sobre a linha de cultivo.

### **3.4 Manejo da irrigação**

O sistema de irrigação utilizado consistiu de tubos gotejadores auto compensantes de 17 mm de diâmetro, com espaçamento de 0,2 m entre gotejadores e 0,5 m entre linhas, com pressão de serviço no tubo gotejador de 1 bar e vazão do gotejador de 1,3 L h<sup>-1</sup>, resultando em uma taxa de aplicação de 13 mm h<sup>-1</sup>. As datas de realização das irrigações são apresentadas na tabela 3.

As primeiras quatro aplicações apresentadas na tabela 3 referem-se às irrigações realizadas com lâmina de 10 mm (acumulado de 40 mm) em todas as unidades experimentais, através de aspersão, com a finalidade de manter condições de umidade do solo adequada para o estabelecimento inicial das plantas da cultura do sorgo.

Tabela 3 - Calendário de irrigações, em dias após a emergência (DAE), para os diferentes manejos de irrigação da cultura do sorgo. Santa Maria, RS, 2013.

Eventos	100% $ET_c K_c$ dual	Reposição da $ET_c K_c$ simples			
		100%	75%	50%	25%
DAE					
1 <sup>#</sup>	0	0	0	0	0
2 <sup>#</sup>	2	2	2	2	2
3 <sup>#</sup>	8	8	8	8	8
4 <sup>#</sup>	12	12	12	12	12
5	33	23	26	30	44
6	43	30	35	44	66
7	51	37	44	55	91
8	57	44	52	66	-
9	70	49	59	79	-
10	77	55	66	91	-
11	83	61	74	-	-
12	87	66	82	-	-
13	-	72	91	-	-
14	-	79	-	-	-
15	-	84	-	-	-
16	-	91	-	-	-

<sup>#</sup> irrigações de 10 mm em todas as parcelas experimentais

Contabilizando as irrigações a partir dos 12 DAE, foram acumuladas lâminas de 240, 360, 270, 180 e 90 mm nas irrigações realizadas nos tratamentos mantidos com 100% da  $ET_c K_c$  dual, 100, 75, 50 e 25% da  $ET_c K_c$  simples, respectivamente.

### 3.5 Determinações do conteúdo de água no solo

A determinação do conteúdo de água no solo foi realizada através de um conjunto de sensores WCR (*water content reflectometer*), modelo CS 616 (*Campbell Scientific, Inc.*, 1996), conectadas a multiplexadores AM16/32 e, as informações armazenadas em um *datalogger* CR1000 (*Campbell Scientific Inc.*). A medida direta de umidade volumétrica do solo foi realizada em intervalos de 15 minutos, totalizando 96 registros diários. Em cada unidade experimental, as leituras foram realizadas por um conjunto de seis sensores, sendo dois sensores por camada (0,0-0,10; 0,10-0,25 e 0,25-0,55 m), totalizando 90 sensores. A



metodologia da disposição, a implantação e calibração dos sensores foi descrita por Knies (2010) e Martins (2010).

A partir dos valores diários de umidade do solo, determinou-se a lâmina de água armazenada nas camadas do perfil do solo, pelo produto do conteúdo volumétrico de água ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e a espessura de cada camada do perfil do solo (mm).

A última leitura do dia, realizada às 24 horas, foi assumida como a lâmina da água armazenada naquele dia. A fração de água disponível às plantas (FAD) foi determinada pela razão entre o conteúdo atual de água disponível ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e a quantidade máxima de água disponível no solo (CAD), sendo esta determinada pela diferença entre o LS e o LI de disponibilidade de água às plantas (CARLESSO, 1995).

As perdas diárias de água do solo foram determinadas pela diferença entre o primeiro valor da umidade volumétrica do solo medida no dia e o menor valor da umidade volumétrica do solo observado no dia. A partir desses resultados foram calculadas as perdas acumuladas de água.

### **3.6 Determinações das características morfológicas das plantas**

As características morfológicas das plantas avaliadas foram: área foliar e a altura das plantas. Para isso, aos 10 DAE, foram selecionadas duas plantas em cada unidade experimental, que fossem representativas, uniformes e dispostas nas linhas centrais das parcelas. A determinação da altura das plantas foi realizada ao longo do ciclo de desenvolvimento das plantas: aos 19, 22, 25, 29, 33, 35, 39, 44, 49, 53, 57, 63, 74 e 80 DAE, determinando a distância vertical entre o colo da planta e a bainha da última folha expandida. A área foliar foi quantificada aos 19, 22, 25, 29, 35, 39, 44, 49, 53, 60, 74 e 87 DAE, utilizando o equipamento LI-3000C, que determina a área foliar da planta de forma direta e não destrutiva. O índice de área foliar (IAF) das plantas foi obtido pela razão entre a área foliar fotossinteticamente ativa e a área superficial de solo ocupada pela planta.

### 3.7 Determinações do índice de cobertura vegetal da superfície do solo

A determinação do índice de cobertura vegetal da superfície do solo foi realizada através do método da contagem de pontos quadrados (MANNERING; MEYER, 1963), utilizando grade quadriculada, composta por 100 pontos de intersecção, sendo cada quadrícula correspondente a  $0,0025 \text{ m}^2$ . Esta grade foi colocada de modo que a linha de cultivo dividisse a grade ao meio, sendo posicionada na altura do dossel da cultura (Figura 2). O índice de cobertura vegetal da superfície do solo foi estimado pela diferença entre os pontos da malha que interceptavam o dossel vegetativo (solo coberto), em relação aos pontos que não interceptavam o dossel (solo descoberto). As avaliações da cobertura vegetal foram realizadas aos 13, 15, 19, 22, 26, 29, 32, 35, 43, 49 DAE, quando a cultura do sorgo apresentou cobertura do solo pelo dossel vegetativo superior a 90%, considerado como valor máximo.



Figura 2 - Detalhe da grade quadriculada posicionada sobre a linha de cultivo para a avaliação do índice de cobertura vegetal da superfície do solo pelo dossel vegetativo da cultura do sorgo. Santa Maria, RS. 2013.

### 3.8 Determinações das características fisiológicas das plantas

As características fisiológicas das plantas de sorgo avaliadas foram: taxa fotossintética, taxa de transpiração e a condutância estomática. Para estas avaliações, foram selecionadas duas plantas representativas e uniformes por unidade experimental, nas linhas centrais, aos 10 DAE. As determinações foram realizadas aos 22, 27, 32, 39, 46, 53, 59, 60, 71 e 84 DAE, utilizando um analisador de gás infravermelho, IRGA (*Infra Red Gas Analyser*), modelo LI-6400 XT, onde as leituras foram obtidas por diferença de concentrações de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O de referência (emitido pelo aparelho e concentração conhecida) e as concentrações emitidas pela folha (concentrações variáveis).

A eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) foi obtida pela razão entre a taxa fotossintética e a condutância estomática. A taxa fotossintética total foi obtida pela multiplicação da taxa fotossintética obtida na leitura pela área foliar total das plantas. Para efeitos de calibração do equipamento, fixaram-se os valores de referência para o equipamento, utilizando uma relação estomática de 0,7 (TURNER; BEGG, 1973), taxa de fluxo na célula de amostragem de 500  $\mu\text{mol s}^{-1}$  e área foliar de amostragem de 6  $\text{cm}^2$ . As determinações foram realizadas em horário próximo ao meio dia solar, em dias que se apresentavam com ausência de nebulosidade, no terço médio da última folha completamente expandida.

### 3.9 Produção e qualidade da forragem das plantas de sorgo

O corte das plantas para obtenção de massa pré ensilada de sorgo foi realizado no dia 17 de janeiro (84 DAE), quando as plantas estavam no estágio fenológico grão massa dura, de forma manual, em uma área superficial de 1  $\text{m}^2$ , e altura de corte de 0,10 m acima do nível dos solo, nas quatro linhas centrais de cada unidade experimental. As plantas foram picadas utilizando um triturador forrageiro, formando partículas de tamanho médio teórico de dois a três centímetros (forragem pré ensilada). Após a homogeneização do material, foi retirada uma amostra e a mesma foi submetida à pré secagem em estufa de circulação forçada a 55°C até peso constante. Posteriormente, as amostras foram moídas em um moinho tipo “Wiley” em peneira com malha de 1 mm.

Essas amostras foram também utilizadas para a determinação do teor de matéria seca (MS), depois de secagem em estufa, a 105 °C, durante um período superior a 8 horas e a matéria mineral (MM), por queima em mufla, a 600 °C, durante 4 horas. O nitrogênio total (N) foi determinado pelo método Kjeldahl (Método 984.13; AOAC, 1997). Para a conversão dos valores de N em proteína bruta (PB) utilizou-se o fator de correção de 6,25. A análise de fibra em detergente neutro (FDN) foi baseada nos procedimentos descritos por Mertens (2002) com uso de  $\alpha$ -amilase termoestável, exceto que as amostras foram pesadas dentro de sacos filtro de poliéster (porosidade de 16  $\mu$ m) e tratadas com detergente neutro em autoclave a 110 °C por 40 minutos (SENGER et al., 2008).

As concentrações de fibra em detergente ácido (FDA) foram analisadas de acordo com o método 973.18 da AOAC (1997), exceto que as amostras foram pesadas dentro de sacos filtro de poliéster (porosidade de 16  $\mu$ m) e tratadas com detergente ácido em autoclave a 110°C por 40 minutos (SENGER et al., 2008).

Duas plantas foram selecionadas aleatoriamente por unidade experimental para a determinação da contribuição dos componentes estruturais das plantas de sorgo na massa pré-seca. Os componentes estruturais das plantas foram separados em folhas, colmo e panícula.

### **3.10 Rendimento de grãos da cultura do sorgo**

A colheita de grãos foi realizada no dia 31 de janeiro, aos 98 DAE, após a maturação fisiológica das plantas, em uma área útil de 4 m<sup>2</sup>, sendo colhidas as duas linhas centrais de cada unidade experimental, descartando-se 0,5 m de cada extremidade. O rendimento de grãos da cultura (kg ha<sup>-1</sup>) foi ajustado para 13% de umidade. Os componentes de rendimento: comprimento da panícula, número de panícula e massa de 100 grãos foram determinados no momento da colheita. A massa de grãos por panícula foi calculada pela razão entre o peso de grãos da parcela pelo número de panículas, e a massa de 100 grãos foi obtida através da contagem de três repetições de 100 grãos.

### 3.11 Produtividade da água

A produtividade da água (WP) e produtividade de água irrigada (WPI) obtida com a produção de forragem e com a produção de grãos da cultura de sorgo foram obtidas usando as equações 1 e 2, descritas por Rodrigues e Pereira (2009):

$$WP = Y_a / TWU \quad (1)$$

onde,  $Y_a$  é a produtividade de forragem (massa verde e seca) ou de grãos e;  $TWU$  é o total de água utilizada pela cultura até o momento da determinação:

$$WPI = Y_a / IWU \quad (2)$$

onde,  $Y_a$  é a produtividade de forragem (massa verde e seca) ou grãos e;  $IWU$  é o total de água aplicada através das irrigação até o momento da determinação.

### 3.12 Análise econômica da produção de grãos

Neste trabalho foi utilizado somente o custo relacionado com a aplicação de água com a irrigação, assumido como sendo o custo resultante dos gastos de energia elétrica. O sistema de bombeamento é o componente que apresenta maior custo com o investimento da irrigação (MARQUES et al., 2006) e a tarifa de energia elétrica é considerada a variável mais importantes no custo final da irrigação (TURCO et al., 2009). O custo de energia elétrica foi obtida através da equação 3 descrita por Lima et al. (2009):

$$CE = E_{de} \cdot t \cdot C_{me} \quad (3)$$

onde,  $CE$  é o custo específico de energia, em  $R\$ \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ;  $E_{de}$  é a energia dissipada específica no sistema de irrigação, em  $\text{kWh mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ;  $t$  é o número de horas de funcionamento do equipamento de irrigação e;  $C_{me}$  é o custo médio da energia elétrica, em  $R\$ \text{ kW h}^{-1}$ .

Os cálculos da análise econômica foram baseados em dados técnicos de um pivô com área de 108 hectares, motor com 300 cv, vazão de  $0,104 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , a lâmina bruta de  $7,2 \text{ mm dia}^{-1}$ , aplicadas em 21 horas de funcionamento diário e consumo de energia dissipada específica de  $6,6 \text{ kWh mm}^{-1}$ , descrito por Lima et al. (2009). A partir destes dados técnicos foi determinada a quantidade de horas de funcionamento do sistema de irrigação para aplicação da lâmina de irrigação total de cada tratamento. O custo médio da energia elétrica considerado foi de  $0,145 \text{ R\$ kW h}^{-1}$ , para tarifa horo-sazonal verde, durante o período seco, fora do horário de ponta, cobrado pela empresa AES Sul, no ano de 2012 (ANEEL, 2012).

A receita da cultura do sorgo foi obtida através do rendimento de grãos e valor de comercialização. O valor de comercialização considerado foi de R\$ 22,43 por saca de 60 kg ( $\text{R\$ } 0,37 \text{ kg}^{-1}$ ), valor equivalente à média do preço pago ao produtor agrícola no mês de janeiro de 2013 (EMATER, 2013). O lucro obtido com os manejos de irrigação da cultura do sorgo correspondem a receita subtraída do custo com a irrigação (neste caso somente o custo da energia elétrica consumida na aplicação da água). O retorno econômico obtido com a irrigação compreende a relação entre o lucro e o custo com a irrigação.

### 3.13 Análise estatística

A análise estatística foi realizada de duas maneiras: (i) os resultados das variáveis avaliadas para os tratamentos quantitativos (100, 75, 50, 25%  $\text{ET}_c \text{ K}_c$  simples) foram submetidas à análise de variância (Teste F,  $p < 0,05$ ) e, quando significativo, as médias foram comparadas através de análise de regressão, a 5% de probabilidade de erro, utilizando o software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011). Os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) das equações foram obtidos pela razão entre a soma dos quadrados do modelo e a soma dos quadrados dos tratamentos, e; (ii) os resultados das variáveis avaliadas para os tratamentos 100%  $\text{ET}_c \text{ K}_c$  dual e 100%  $\text{ET}_c \text{ K}_c$  simples foram submetidos à análise de variância (Teste F,  $p < 0,05$ ) e, quando significativo, as médias foram comparadas pelo teste t (LSD), a 5% de probabilidade de erro, utilizando o software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desse trabalho são apresentados em três partes: (i) condições meteorológicas e fração de água disponível às plantas observadas durante a condução do trabalho; (ii) comparação dos resultados dos tratamentos com diferentes níveis de irrigação deficitária (100, 75, 50 e 25% da  $ET_c K_c$  simples) e; (iii) comparação dos resultados obtidos com os tratamentos 100%  $ET_c K_c$  dual e 100%  $ET_c K_c$  simples.

### 4.1 Condições meteorológicas e fração de água disponível

Os valores de temperatura média do ar, velocidade do vento, radiação solar, umidade relativa do ar, evapotranspiração de referência e precipitação pluvial, observadas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo, de 25 de outubro a 31 de janeiro, estão apresentadas na figura 3.

A temperatura média do ar, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo, foi de 23,5 °C. A temperatura máxima do ar foi de 33,2 °C aos 61 DAE, enquanto a temperatura mínima foi de 17,04 °C, observada aos 63 DAE. A velocidade do vento apresentou variação entre 1,2 e 4,3  $m s^{-2}$  e velocidade média durante o período de condução da cultura do sorgo de 2,14  $m s^{-2}$ . A umidade relativa média do ar foi de 71%. O valor médio da radiação solar foi de 482  $W m^{-2} dia^{-1}$ , com valores variando entre 57,1 a 693,9  $W m^{-2}$  (Figura 3). Menores valores de radiação solar ocorreram devido à presença de nuvens e precipitações pluviais.

A  $ET_o$  variou entre 0,83 e 9,06  $mm dia^{-1}$ , (Figura 3), valores estes verificados aos 48 e 61 DAE, respectivamente. Durante o período de condução do experimento, a  $ET_o$  acumulada foi de 488,7 mm. A precipitação pluvial mensal acumulada foi de 22; 83,8; 382 e 111,6 mm, para os meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro, respectivamente, totalizando 600,2 mm durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo. Importante mencionar que as precipitações pluviais eram evitadas na área experimental, pois a área experimental era protegida das precipitações pluviais com o uso de uma cobertura móvel.

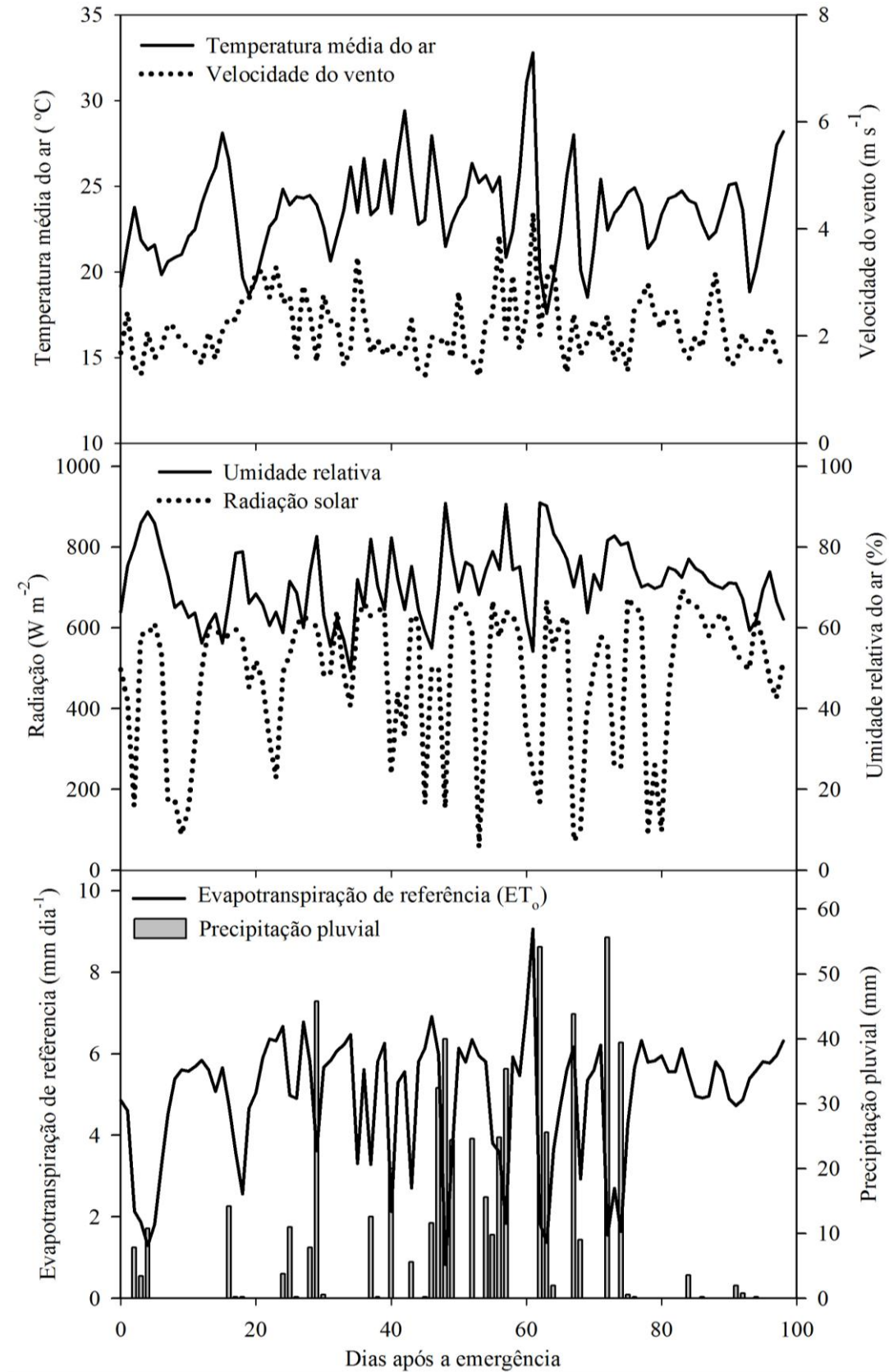


Figura 3 - Condições meteorológicas observadas ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo. Santa Maria, RS, 2013.



A precipitação pluvial acumulada para o mês de dezembro foi 300% superior a média histórica para a cidade de Santa Maria-RS, que é de 133,7 mm (HELDWEIN et al., 2009). Nos demais meses (Outubro, Novembro e Janeiro), foram verificadas precipitações pluviométricas acumuladas próximas das médias históricas. A ocorrência dessas precipitações pluviométricas estão sendo descritas, pois as mesmas direta e indiretamente interferem na dinâmica da água na área experimental ou no entorno dela.

Os resultados da fração de água disponível (FAD) às plantas de sorgo observados ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, para os diferentes manejos de irrigação, são apresentados na figura 4.

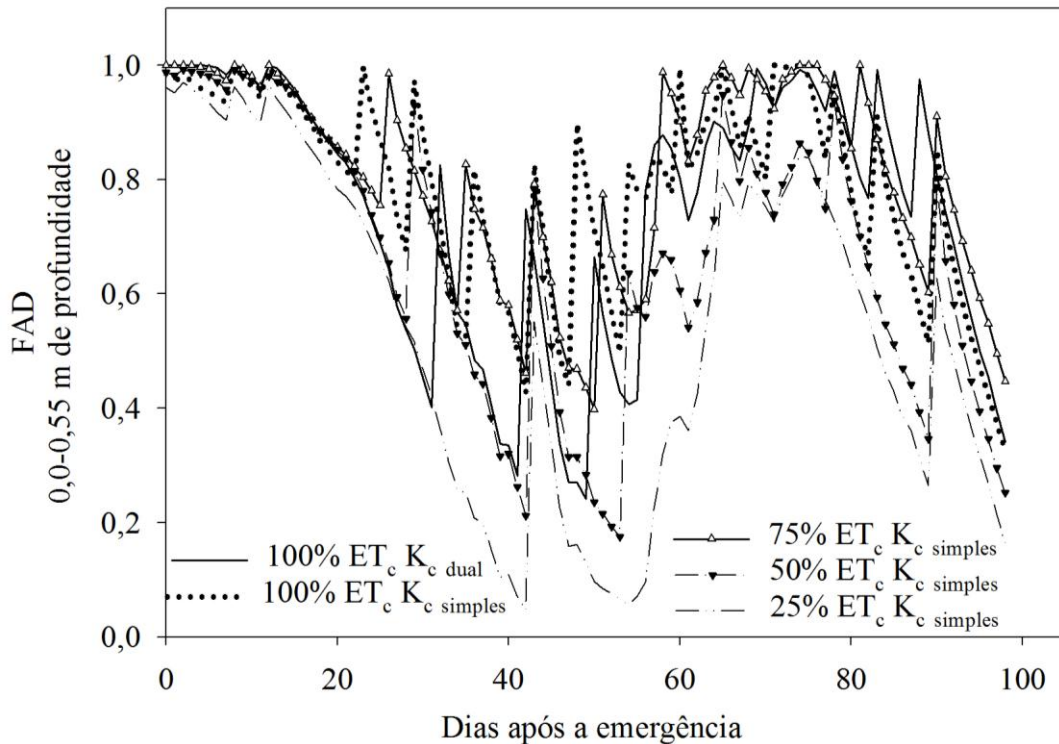


Figura 4 - Fração de água disponível (FAD) na camada de 0-0,55 m de profundidade do solo, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura sorgo submetido a diferentes manejos de irrigação. Santa Maria, RS. 2013.

Na emergência das plantas, o perfil do solo das unidades experimentais apresentava valor de FAD próximos de 1,0, evidenciando que a quantidade de água disponível armazenada no solo era próxima da capacidade máxima do perfil do solo. No entanto, diferenças significativas foram observadas ( $p < 0,05$ ) nos valores de FAD durante o período da

emergência da cultura até os 13 DAE (Apêndice A). Isso ocorreu devido aos valores de lâmina de água armazenada na camada de 0,10-0,25m, (Figura 5 B), onde se observa médias das lâminas de água armazenadas no solo para os tratamentos mantidos com 100 e 25% da  $ET_c K_c \text{ simples}$  inferiores às médias observadas nos demais tratamentos. Evidentemente, no período inicial de desenvolvimento da cultura, a maior concentração do sistema radicular das plantas encontra-se nas camadas superficiais. Os resultados da lâmina de água armazenada na camada de 0,0-0,10 m (Figura 5A) foi similar entre os tratamentos da emergência até os 22 DAE (Apêndice B). Assim, embora a diferença observada nos valores de FAD, não houve efeito da disponibilidade de água no desenvolvimento inicial da cultura, pois a FAD permaneceu superior a 0,9. Segundo Carlesso et al. (1997), a manutenção da FAD acima de 0,6 na profundidade do sistema radicular, não ocasiona alterações no crescimento e desenvolvimento das plantas, pois não ocorrem problemas de deficiência hídrica.

No período entre os 13 e 23 DAE, os valores de FAD foram similares entre os tratamentos ( $p < 0,05$ ), apresentando, na camada de 0,0-0,55 m, variação na FAD de 0,97 a 0,79. Nesse período, compreendido entre a última irrigação de 10 mm (aplicada em todos os tratamentos) até a primeira irrigação de 30 mm, realizada no tratamento mantido com 100%  $ET_c K_c \text{ simples}$ . A irrigação de 10 mm foi responsável por elevar a lâmina de água armazenada na camada de 0,1-0,25 m, mantendo todos os tratamentos com lâminas semelhantes de água armazenada.

No período de 23 aos 98 DAE, os valores obtidos de FAD apresentaram diferenças significativas ( $p < 0,05$ ), ocasionadas pelos diferentes manejos da água de irrigação (Apêndice A). O tratamento mantidos com 25% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ , obteve os menores valores de FAD na camada 0,0-0,55 m. O valor de FAD apresentado pelo tratamento mantidos com 25% da  $ET_c K_c \text{ simples}$  foi de 0,04, e indica que, para a camada de 0,0-0,55 m, a cultura do sorgo utilizou praticamente toda água disponível armazenada no solo.

A FAD é um índice que esta relacionado com fatores que influenciam o armazenamento de água no solo (densidade, quantidade de argila e porosidade do solo, cobertura do solo por resíduos vegetais) e da planta (IAF das plantas, tipo de cultura) e responde diretamente em relação às irrigações aplicadas. Em 90% dos dias compreendido entre a emergência das plantas até a colheita do sorgo, na camada de 0,0-0,55 m, a FAD foi superior a 0,45 para os tratamentos mantidos com 100 e 75% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ . Os períodos de FAD abaixo de 0,45 foram de 41 e 42, 46 e 47, 53, e 95 a 98 DAE para os tratamentos mantidos com 100% de  $ET_c K_c \text{ simples}$  e 42, 47 aos 50, 97 e 98 DAE o tratamentos mantido com 75% de  $ET_c K_c \text{ simples}$ .

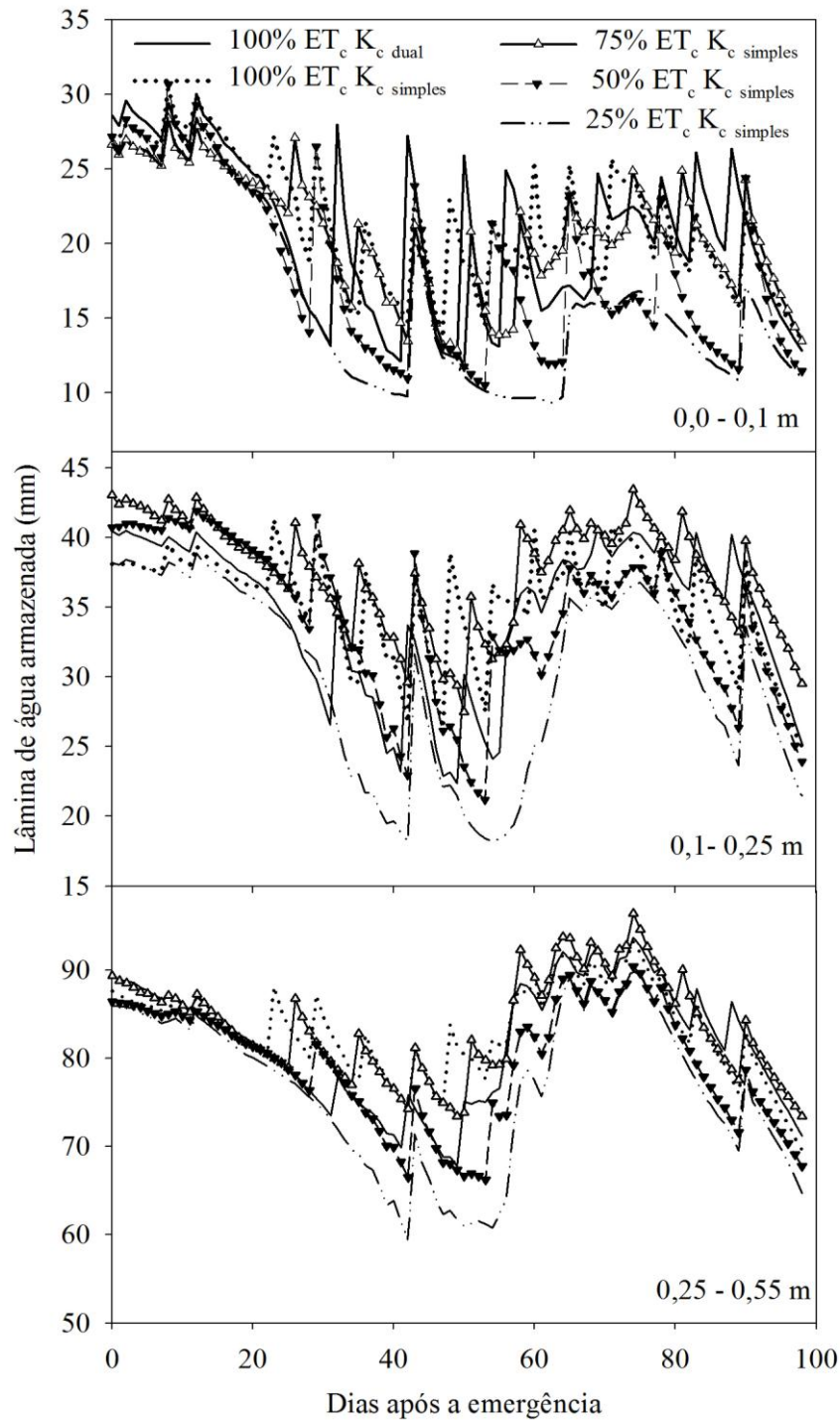


Figura 5 - Variação da lâmina de água armazenada nas camadas de 0,0-0,10 m, 0,10-0,25 m e 0,25-0,55 m de profundidade do solo durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo. Santa Maria, RS. 2013.

Os tratamentos mantidos com 50 e 25% da ET<sub>c</sub> K<sub>c</sub> simples apresentaram valores de FAD superior a 0,45, em 77% e 57% do período, respectivamente. Valores de FAD abaixo de 0,45

ocorreram entre os 36 aos 42, 46 aos 53, 86 aos 89, 94 aos 98 DAE e no período de 29 aos 43, 45 aos 63, 84 aos 89, 92 aos 98 DAE, respectivamente, para os tratamentos mantidos com 50% e 25% da  $ET_c K_c$  simples. O tratamento mantido com 100%  $ET_c K_c$  dual, apresentou mais de 80% dos dias com valores de FAD acima de 0,45 no período entre 30 e 31, 36 aos 41, 45 aos 49, 52 aos 55, 96 aos 98 DAE.

A cultura do sorgo pode ser submetida ao nível de esgotamento (extração) de 0,55 da FAD para que a cultura seja negativamente afetada pela deficiência hídrica, portanto, somente valores de FAD abaixo de 0,45 causariam modificações deletérias nas plantas (ALLEN et al., 1998). Ritchie et al. (1972) sugerem que valores de FAD menores de 0,25 tornam-se críticos, causando severas reduções na área foliar de plantas de sorgo. Porém, Rosenthal et al. (1987) descrevem que expressivas reduções no crescimento, desenvolvimento, taxa fotossintética e produtividade de grãos são ocasionadas quando a FAD apresenta valores inferiores a 0,50. Peiter e Carlesso (1996) relatam que, o manejo de irrigação, mantendo a FAD acima de 0,65, na profundidade efetiva do sistema radicular, ocasiona mudanças no crescimento e desenvolvimento e reduz o desempenho produtivo das plantas de sorgo granífero.

Durante o mês de dezembro (dos 37 aos 67 DAE), foram registrados 16 dias com ocorrência de precipitação pluvial, com lâmina acumulada de 382 mm (Figura 3). Devido a elevada quantidade de precipitações pluviais, o solo do entorno da cobertura móvel, externo às unidades experimentais, permaneceu saturado por vários dias. A diferença de potencial entre o solo das unidades experimentais (que não receberam incidência de precipitações pluviais) e o solo saturado, possivelmente resultou em fluxo lateral subsuperficial e redistribuição interna de água no solo, o qual ocasionou incremento na lâmina de água armazenada no perfil do solo (Figura 5), resultando em aumento nos valores de FAD no período de 37 aos 67 DAE (Figura 4). Este fluxo de água no solo também foi observado e relatado no trabalho conduzido no mesmo local por Martins (2010), quando ocorreu a ascensão capilar devido à elevação do lençol freático.

Os tratamentos mantidos com 50 e 25% da  $ET_c K_c$  simples apresentaram maior elevação na lâmina de água armazenada no perfil do solo (Figura 5C), a qual provavelmente foi ocasionada pelo menor potencial matricial observada no solo nesses tratamentos, ocorrendo maior redistribuição e elevação de água no perfil do solo. O incremento na lâmina de água armazenada no solo foi identificado nas camadas de 0,1-0,25m e 0,25-0,55 m do perfil de solo, provavelmente devido à ascensão capilar (Figura 5). Na camada de 0,0-0,10 m verificou-se um pequeno incremento na lâmina de água armazenada em função da ascensão capilar, nas

determinações realizadas aos 61, 62 e 76 DAE, portanto, nesta camada, os eventos de irrigação ocasionaram as principais variações na lâmina de água armazenada no solo.

#### 4.2 Respostas das plantas de sorgo submetidas a diferentes níveis de irrigação deficitária (100, 75, 50 e 25% da $ET_c K_c$ simples)

##### 4.2.1 Características morfológicas das plantas de sorgo

Os resultados apresentados nas figuras 6, 7 e 8 mostram as respostas morfológicas das plantas de sorgo para os tratamentos mantidos com 100, 75, 50 e 25% de  $ET_c K_c$  simples. A altura das plantas de sorgo foi similar entre os tratamentos até os 25 DAE (Apêndice E). No período entre os 29 aos 80 DAE, a altura de plantas de sorgo aumentou linearmente com o incremento de 25% para 100% na reposição da  $ET_c K_c$  simples (Figura 6).

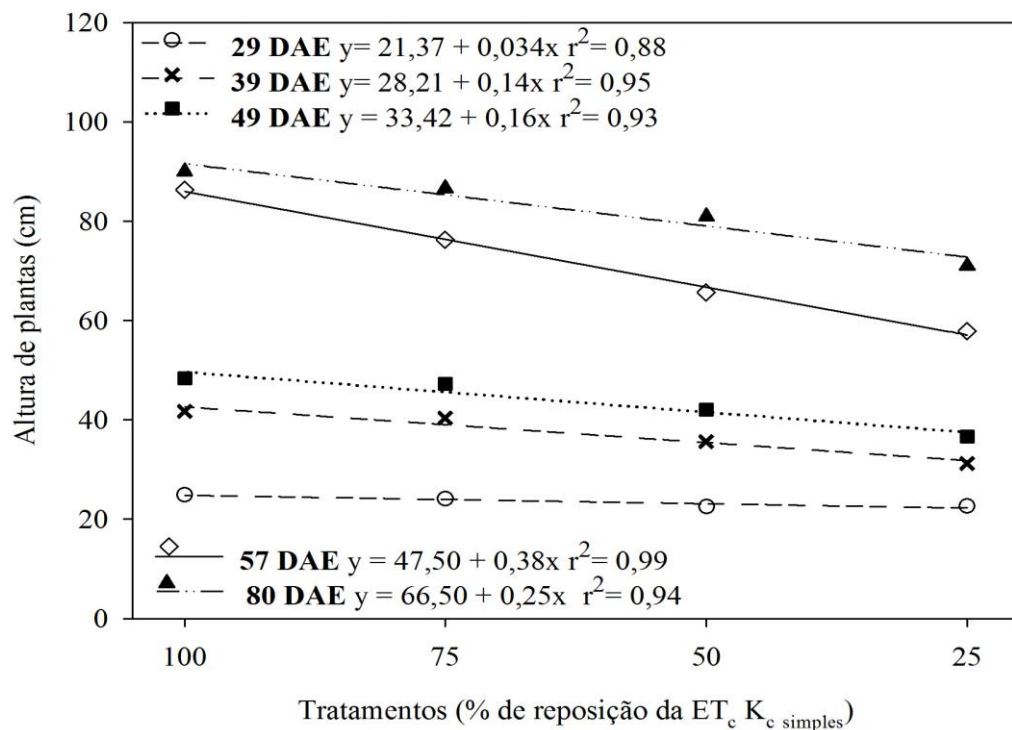


Figura 6 - Altura de plantas da cultura do sorgo aos 29, 39, 49, 57 e 80 dias após a emergência, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da  $ET_c K_c$  simples. Santa Maria, RS, 2013.

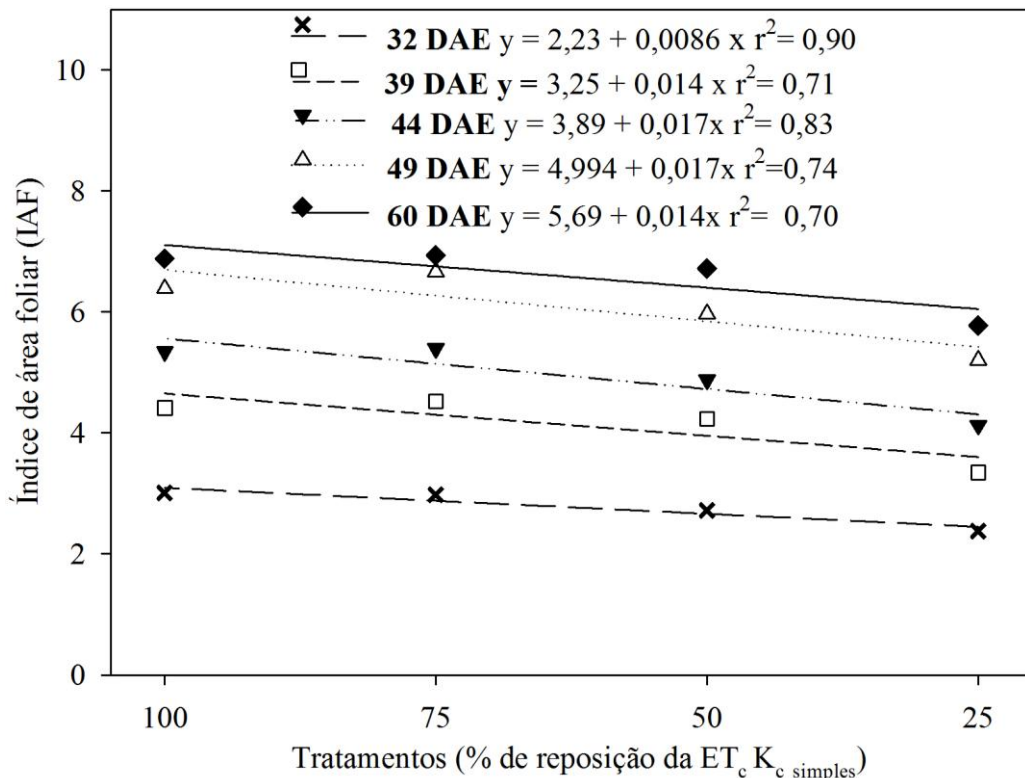


Figura 7 – Resultados do índice de área foliar (IAF) das plantas de sorgo determinado aos 32, 39, 44, 49 e 60 dias após a emergência, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da  $ET_c K_c$  simples. Santa Maria, RS. 2013.

A maior altura de plantas de sorgo foi observada aos 80 DAE. Neste dia, as plantas do tratamento mantido com 100% da  $ET_c K_c$  simples apresentaram altura de 91,5 cm, enquanto as plantas submetidas ao tratamento mantido com 25% de  $ET_c K_c$  simples apresentaram altura de 71,75 cm. A redução de 25% na aplicação da água provocou redução de 6,5 cm (7%) na altura das plantas de sorgo. Os resultados de altura de plantas de sorgo observados nesse experimento são similares aos encontrados para a cultura do sorgo sacarino por Moreira (2011). De acordo com Carlesso et al. (1997), a ocorrência de déficit hídrico, a partir da fase desenvolvimento vegetativo da cultura do sorgo granífero, favorece reduções no comprimento do entre nó do sorgo, e este efeito ocasiona plantas com menor altura.

O IAF das plantas de sorgo foi semelhante para todos os tratamentos até os 29 DAE (Apêndice E). A influência dos manejos de irrigação deficitária no IAF das plantas de sorgo foi observada 20 dias após o início dos diferentes manejos de irrigação deficitária. Em trabalho conduzido com a cultura do sorgo granífero, Peiter e Carlesso (1996) observaram diferenças para o IAF das plantas 10 dias após manutenção da FAD a 0,65.

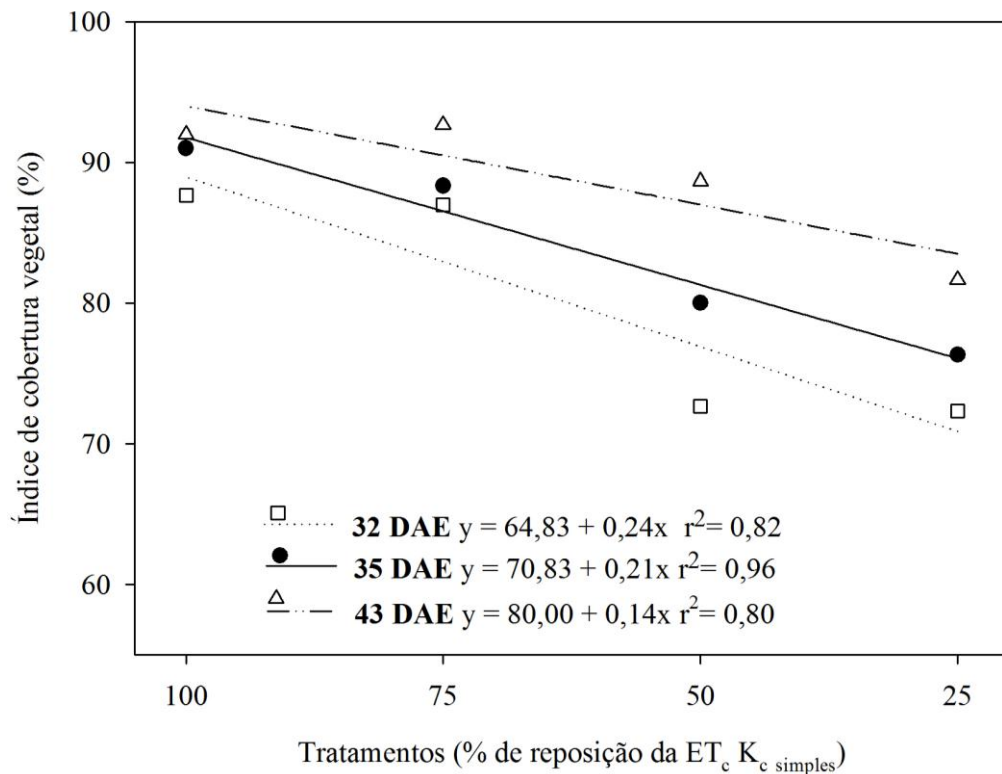


Figura 8 – Resultados do índice de cobertura vegetal do solo pelo dossel vegetativo da cultura do sorgo aos 32, 35 e 43 dias após a emergência (DAE) para os tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ . Santa Maria, RS. 2013.

O máximo IAF das plantas de sorgo foi observado aos 60 DAE. Neste dia, as plantas de sorgo do tratamento mantido com 100% da  $ET_c K_c \text{ simples}$  apresentaram IAF de 7,96, enquanto que as plantas submetidas ao tratamento mantido com 25%  $ET_c K_c \text{ simples}$  apresentaram 6,04 (Figura 7). A utilização da irrigação deficitária, reduzindo de 100% para 25% a reposição de  $ET_c K_c \text{ simples}$ , reduziu em 15% o IAF de plantas de sorgo. Uma redução da área foliar das plantas é a resposta da maioria das culturas em função da desidratação das células, ocasionada pelo déficit hídrico (MORGAN, 1984).

No período de 74 a 80 DAE, com exceção do tratamento mantido com 25% de  $ET_c K_c \text{ simples}$ , os demais tratamentos apresentaram um expressivo decréscimo nos valores de área foliar das plantas, ocasionando um IAF das plantas similar entre os tratamentos. Essa redução mais acentuada para os tratamentos mais irrigados pode ser atribuída aos elevados valores de IAF das plantas observados nesses tratamentos (100%, 75% e 50% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ ) e baixa incidência da radiação solar no extrato inferior do dossel vegetativo. Comportamento similar também foi observado em trabalho realizado por

Peiter e Carlesso (1996), onde não houve efeito do déficit hídrico sobre a senescência de folhas, sendo a mesma atribuída à baixa incidência de radiação fotossinteticamente ativa nas folhas inferiores.

No período de 13 a 29 DAE, os valores do índice de cobertura do solo pelo dossel vegetativo da cultura do sorgo foram similares entre os tratamentos (Apêndice E). Aos 13 DAE, a média do índice de cobertura do solo pelo dossel vegetativo da cultura do sorgo, para todos os tratamentos, foi de 14%, compreendendo assim o estágio de crescimento rápido, que vai desde os 10 aos 80% de solo coberto pelo dossel vegetativo (ALLEN et al. 1998).

No período de 32 a 43 DAE, o índice de cobertura do solo pelo dossel vegetativo da cultura do sorgo reduziu linearmente com a redução na reposição da  $ET_c K_c \text{ simples}$  (Figura 8). Para a redução em 25% na aplicação de água, passando de 100 para 75% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ , houve uma redução no índice de cobertura vegetal do solo pelo dossel vegetativo da cultura do sorgo de 6, 5,3 e 3,5%, aos 32, 35 e 43 DAE, respectivamente (Figura 8). Aos 49 DAE, as plantas de todos os tratamentos já apresentaram o máximo índice de cobertura vegetal do solo pelo dossel vegetativo da cultura do sorgo (90%).

#### 4.2.2 Características fisiológicas das plantas de sorgo

A condutância estomática das plantas de sorgo não foi influenciada pelos manejos de irrigação, até os 32 DAE (Apêndice F), porém, apresentou resposta linear negativa com o decréscimo nos valores de  $ET_c K_c \text{ simples}$  (Figura 9), nas determinações realizadas aos 39, 46, 53, 60 e 84 DAE. Situações de baixa disponibilidade de água no solo favorecem a diminuição da condutância estomática das plantas, reduzindo, assim, as perdas de água (FREITAS et al., 2011). Paiva et al. (2005) observaram redução na condutância estomática em plantas de feijão submetidas a déficit hídrico do solo.

A utilização da irrigação deficitária, reduzindo a aplicação de água de 100% para 25% na reposição da  $ET_c K_c \text{ simples}$ , reduziu 0,625, 0,24, 0,675, 0,375 e 0,225  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  na condutância estomática das plantas de sorgo, nas determinações realizadas aos 39, 46, 53, 60 e 84 DAE, respectivamente (Figura 9). Os resultados de condutância estomática obtidos neste trabalho foram similares aos relatados por Kakani et al. (2011), que observaram que, plantas de sorgo sem déficit hídrico, mantidas com umidade volumétrica do solo próximo de 30%,



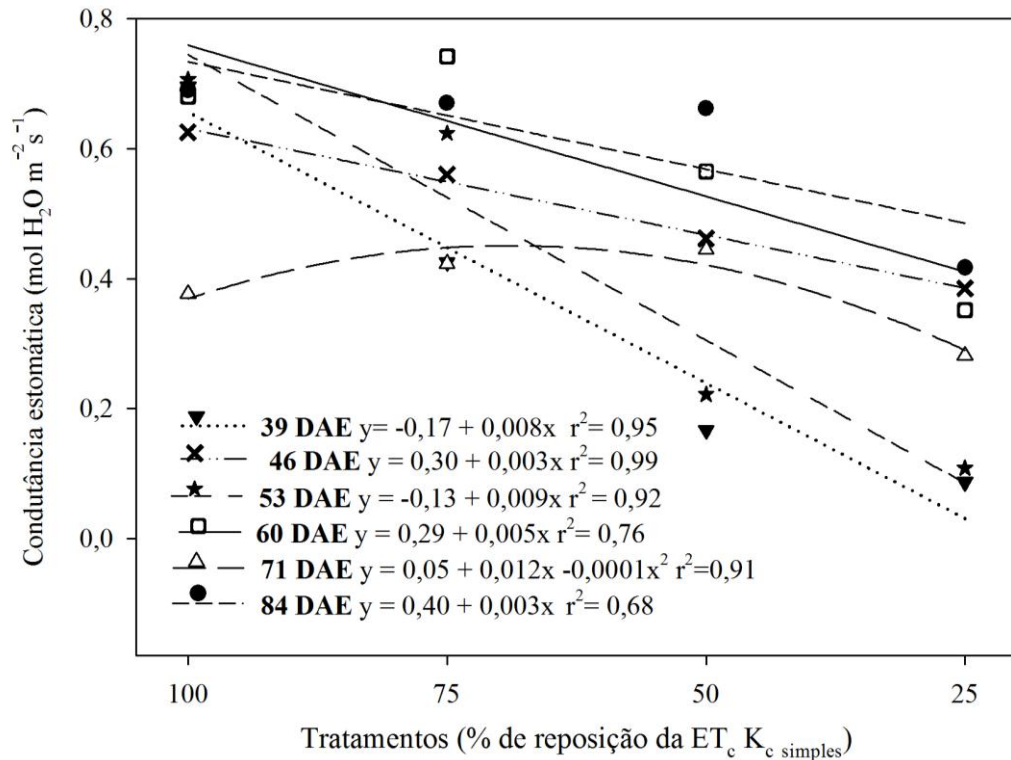


Figura 9 – Resultados da condutância estomática das plantas de sorgo aos 39, 46, 53, 60, 71 e 84 dias após a emergência, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da  $ET_c K_{c \text{ simples}}$ . Santa Maria, RS. 2013.

apresentaram condutância estomática de  $0,4 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , enquanto que plantas submetidas a déficit hídrico, com umidade volumétrica do solo abaixo de 10%, apresentaram valores de condutância estomática inferiores a  $0,1 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . O mecanismo de fechamento dos estômatos, no intuito de restringir a perda de água por transpiração, pode ser considerado uma estratégia adaptativa utilizada por diferentes espécies, visando limitar a perda de água e superar o período de deficiência hídrica (FREITAS et al., 2011). Segundo Carlesso (1995), para a maioria das culturas, durante um período de déficit hídrico, a condutância estomática é ajustada para manter em equilíbrio o balanço de água na planta.

Após uma primeira situação de déficit hídrico, verificado pelos baixos valores da FAD (Figura 4), as plantas dos tratamentos mantidos com reposição menor que 100% da  $ET_c K_{c \text{ simples}}$  podem ter recebido estímulos que resultaram em adaptações morfofisiológicas das plantas, com o objetivo de minimizar os efeitos do déficit hídrico. Isto pode ser evidenciado pelos elevados valores na condutância estomática observados nas plantas com reposições menores que 100% de  $ET_c$ . De acordo com Santos e Carlesso (1998), as plantas

apresentam maior facilidade de adaptação a situações de déficit hídrico, se este ocorrer de forma gradual ou durante o início do ciclo de desenvolvimento.

A taxa fotossintética das plantas de sorgo não foi influenciada pelos manejos de irrigação deficitária, até os 32 DAE (Apêndice F). A taxa fotossintética das plantas apresentou uma resposta linear negativa em relação à redução na reposição de 100% para 25% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ . Reduzindo em 75% a aplicação de água na reposição da  $ET_c$  observou-se redução na taxa fotossintética de 34, 9, 43,5, 17, 8 e 13  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , aos 39, 46, 53, 60, 71 e 84 DAE, respectivamente (Figura 10).

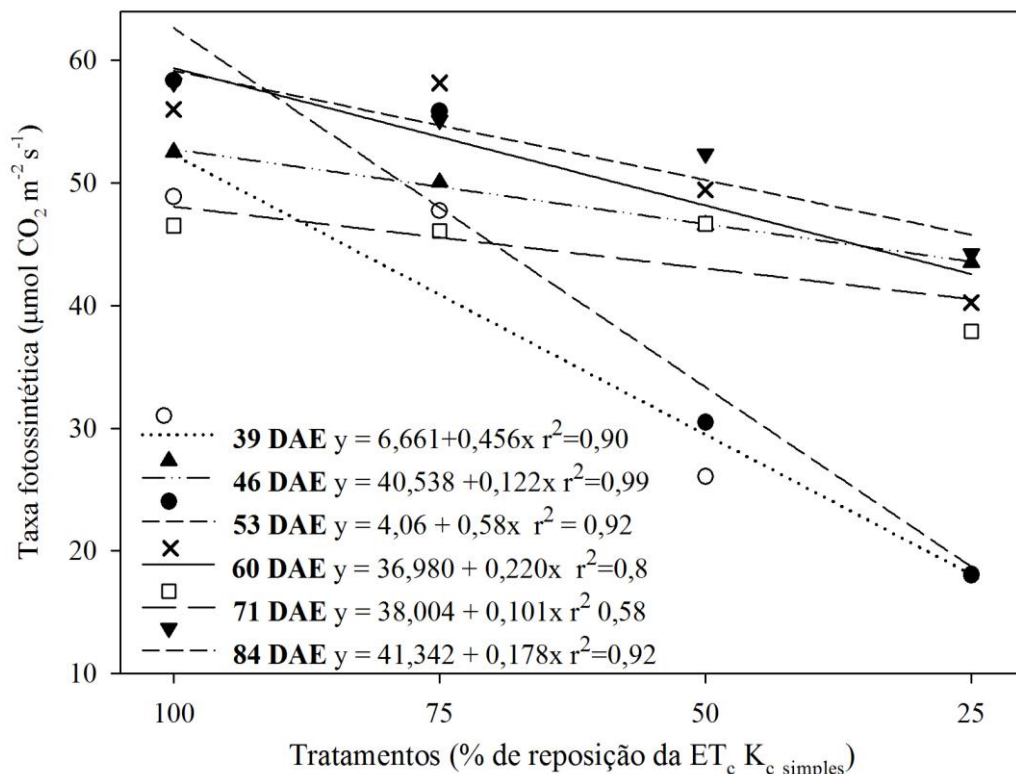


Figura 10 – Resultados da taxa fotossintética das plantas de sorgo aos 39, 46, 53, 60, 71 e 84 dias após a emergência, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ . Santa Maria, RS. 2013.

Estes resultados são similares aos relatados por François (2012) que, trabalhando com irrigação deficitária na cultura do feijão, observou redução linear da taxa fotossintética em relação a redução da reposição da  $ET_c$ . Kidambi et al. (1990) verificaram redução na taxa fotossintética de plantas de sorgo granífero em situação de déficit hídrico. Segundo

Magalhães Filho et al. (2008), o déficit hídrico diminui a capacidade fotossintética das plantas de laranja devido à redução na condutância estomática. Neste trabalho, foi observada resposta semelhante para as plantas de sorgo.

A taxa fotossintética das plantas de sorgo no tratamento mantido com 100% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ , variou de 48,1 a 60,1  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Esse resultado é similar ao relatado por Balota et al. (2008) que, avaliando 26 linhagens de sorgo, observaram variação na taxa fotossintética de 43,3 a 56,8  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-1}\text{s}^{-1}$ .

As reduções mais acentuadas na taxa fotossintética das plantas foram verificadas nas avaliações realizadas aos 39 e 53 DAE (Figura 10), quando a taxa fotossintética obtida para a reposição de 100% da  $ET_c$  foi de 52,3 e 62,06  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-1}\text{s}^{-1}$ , respectivamente. A redução em 25% na aplicação de água na reposição da  $ET_c$  resultou na redução de 11,4 e 14,5  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-1}\text{s}^{-1}$  na taxa fotossintética aos 39 e 53 DAE, respectivamente. Essa resposta da taxa fotossintética pode ter sido ocasionada pela redução na condutância estomática (0,208 e 0,225  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) apresentada pelas plantas quando submetidas a uma redução de 25% na aplicação de água (Figura 9). Carmo (2009) afirma que a redução na fotossíntese foi verificada em função da diminuição na absorção e fixação de  $\text{CO}_2$ , devido ao fechamento dos estômatos, para evitar perda excessiva de água, absorvida de maneira limitada pelas raízes. De acordo com Flexas et al. (2006), a restrição da atividade fotossintética é resultado da redução na condutância estomática da planta sob condições de elevado déficit hídrico. Os dados observados da taxa fotossintética das plantas de sorgo aos 39 e 53 DAE concordam com Mariano et al. (2009), os quais afirmaram que a redução da disponibilidade de água no solo causa diminuições nos valores de condutância estomática e taxa de transpiração, em função do fechamento estomático, causando redução na taxa fotossintética.

Aos 46 DAE, a redução na taxa fotossintética, em função da redução de 100% para 25% de reposição da  $ET_c K_c \text{ simples}$ , foi menos acentuada do que a observada aos 39 DAE. Possivelmente, isso ocorreu devido à aplicação de irrigação, aos 44 DAE, nos quatro tratamentos (100%, 75%, 50% e 25% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ ) (Tabela 3). Estas irrigações resultaram em aumento nos valores da FAD no solo em todos os tratamentos, na camada de 0,0-0,55 m, atenuando o efeito do déficit hídrico provocado pelas irrigações deficitárias.

A ocorrência da ascensão capilar, observada na variação da lâmina armazenada (Figura 5), resultou em valores de FAD acima de 0,45, o que atenuou o efeito do déficit hídrico sobre a cultura. Isso pode ser evidenciado pela menor redução na taxa fotossintética das plantas de sorgo, observada em função da redução de 100 para 25% de reposição da  $ET_c$ ,

nas avaliações realizadas aos 60, 71 e 84 DAE. Tatagiba et al. (2008) verificaram que a aplicação de água de irrigação, após um período de 45 dias sem ocorrência de irrigação, ocasionou condições para que clones de eucalipto recuperassem sua capacidade fotossintética, alcançando uma taxa fotossintética semelhante às verificadas para clones que não haviam sido submetidos a déficit hídrico.

A fotossíntese total das plantas de sorgo apresentou resposta similar entre os tratamentos, até os 32 DAE (Apêndice F) e, a partir dos 32 DAE, apresentou resposta linear negativa em relação ao decréscimo nos valores de 100% para 25%  $ET_c K_c$  simples (Figura 11). A utilização da irrigação deficitária, reduzindo de 100% para 25% a reposição da  $ET_c K_c$  simples causou reduções de 0,86, 8,4, 5,8, 4,3 e 4,2  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ planta}^{-1} \text{ s}^{-1}$  na fotossíntese total das plantas de sorgo aos 32, 46, 60, 71 e 84 DAE, respectivamente (Figura 11).

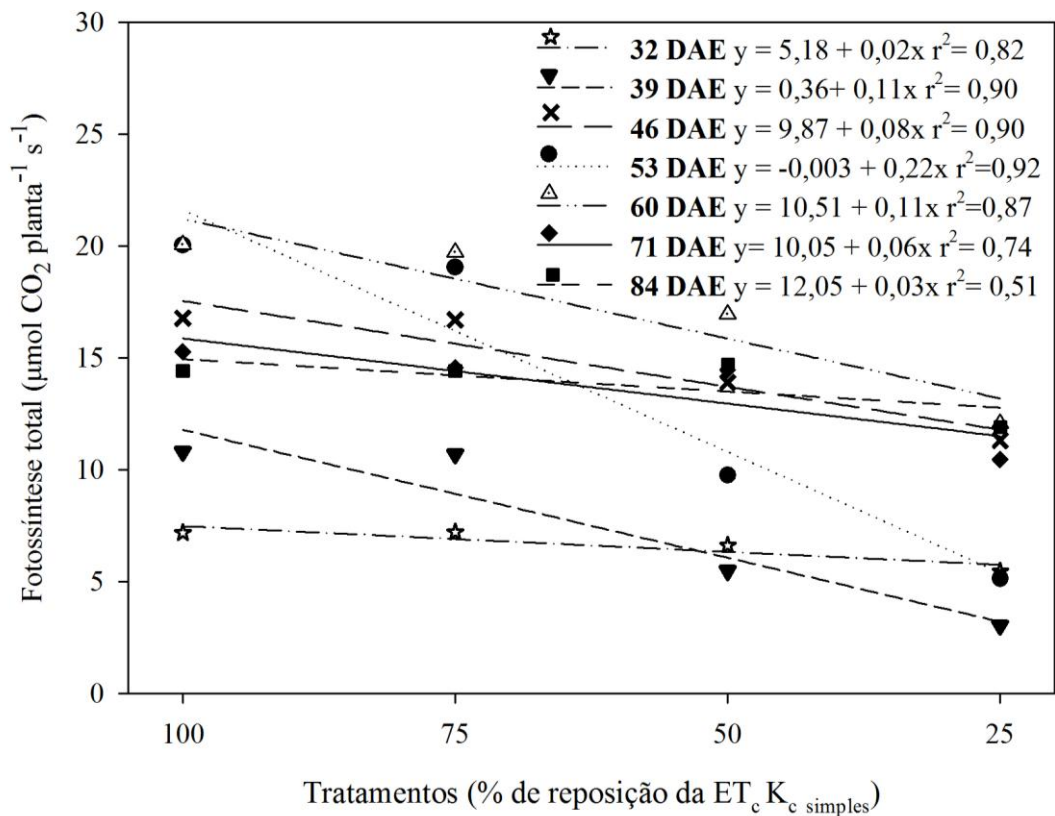


Figura 11 – Resultados de fotossíntese total das plantas de sorgo determinados aos 32, 39, 46, 53, 60, 71 e 84 dias após a emergência, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da  $ET_c K_c$  simples. Santa Maria, RS. 2013.

A redução mais expressiva para a fotossíntese total foi verificada aos 53 DAE (Figura 11), quando houve uma redução de  $16,2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ planta}^{-1} \text{ s}^{-1}$  em função da utilização da irrigação deficitária, reduzindo a reposição de 100% para 25% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ . Fernandez (2008) observou redução da fotossíntese total por planta, em batata submetida a déficit hídrico, quando comparada com plantas sem déficit hídrico.

A fotossíntese total da planta de sorgo pode avaliar melhor os efeitos do déficit hídrico nas plantas, pois considera a condição morfológica (área foliar) e fisiológica (taxa fotossintética), podendo, desta forma, avaliar também a influência das irrigações deficitárias na produção total de fotoassimilados pela planta. Fernandez (2008), trabalhando com a cultura da batata, relata que a fotossíntese total das plantas quantifica melhor as adaptações morfofisiológicas das plantas ao déficit hídrico, apresentando relação direta com o rendimento da cultura. De acordo com Nogueira e Nagai (1988) a redução na fotossíntese ocasionada pelo déficit hídrico, afeta negativamente a produção de grãos. Segundo os autores, a fotossíntese ocorrida durante o ciclo de desenvolvimento é a que melhor se correlaciona à produção. Sausen (2007) apresenta que a fotossíntese é um dos principais determinantes para a produtividade e sobrevivência das plantas

A taxa de transpiração das plantas de sorgo não foi influenciada pelos manejos de irrigação deficitária, até os 39 DAE (Apêndice F), porém, apresentou uma resposta linear negativa em relação ao decréscimo na reposição de água baseado nos valores de  $ET_c K_c \text{ simples}$ . Nas determinações realizadas aos 39, 53, 60 e 84 DAE a utilização da irrigação deficitária, reduzindo de 100% para 25% a reposição da  $ET_c K_c \text{ simples}$ , causou reduções de 5,7, 8,25, 3 e  $4,3 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente, na taxa de transpiração (Figura 12). Kapanigowda et al. (2012) verificaram que plantas de sorgo submetidas a um manejo de irrigação com a manutenção de 80% da capacidade de campo apresentavam maior taxa de transpiração do que as plantas que estavam submetidas a 40% da capacidade de campo. Estes autores observaram variabilidade genética entre os genótipos de sorgo, e esta variabilidade ocasiona influência na resposta das plantas de sorgo submetidas a situação de déficit hídrico. Kakani et al. (2011) verificaram que plantas de sorgo submetidas a déficit hídrico apresentaram redução nos valores de transpiração de água. Situação semelhante foi verificada para a taxa fotossintética e transpiração em plantas de gergelim, mamona e amendoim, em experimento conduzido por Pinto (2006).

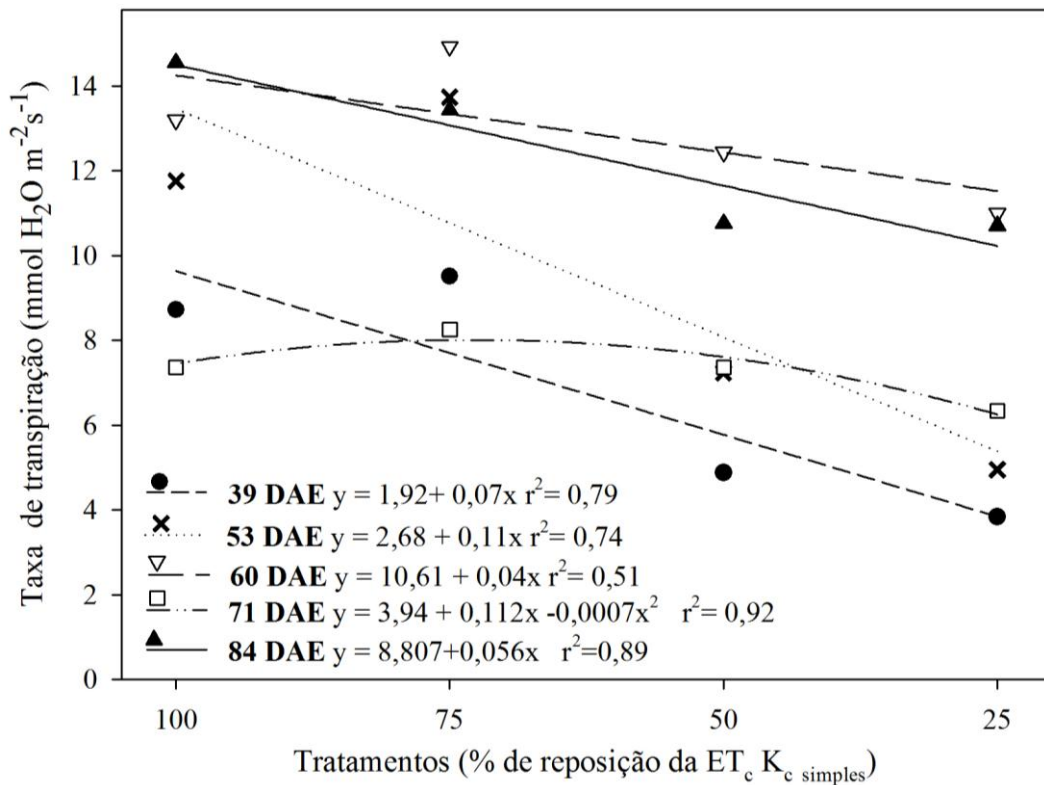


Figura 12 – Resultados da taxa de transpiração das plantas de sorgo aos 39, 53, 60, 71 e 84 dias após a emergência (DAE), nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ . Santa Maria, RS. 2013.

Os resultados da EIUA, nas avaliações realizadas aos 27 e 32 DAE, foram semelhantes entre os tratamentos (Apêndice G). Nas avaliações da EIUA realizadas aos 22, 39, 46 e 53 DAE, observou-se uma resposta linear positiva em função da redução de 100% para 25% na reposição da  $ET_c K_c \text{ simples}$  (Figura 13). A utilização da irrigação deficitária, reduzindo 100% para 25% a reposição de  $ET_c K_c \text{ simples}$ , incrementou a EIUA em 13, 127, 27 e 92  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ , aos 22, 39, 46 e 53 DAE, respectivamente (Figura 13). Kidambi et al. (1990) também verificaram resposta linear positiva entre taxa fotossintética e condutância estomática em plantas de sorgo. Segundo Chaves et al. (2003), em situações de déficit hídrico, algumas plantas podem apresentar aumento na EIUA. Essa resposta, de aumento na EIUA, pode ser explicada pela acentuada redução da condutância estomática das plantas de sorgo, porém, nesses casos, observou-se menor redução na taxa fotossintética das plantas de sorgo. Carvalho (2010) também atribuiu maiores valores de EIUA em mamona, decorrente da maior redução nos valores de condutância estomática em relação à redução da taxa fotossintética.

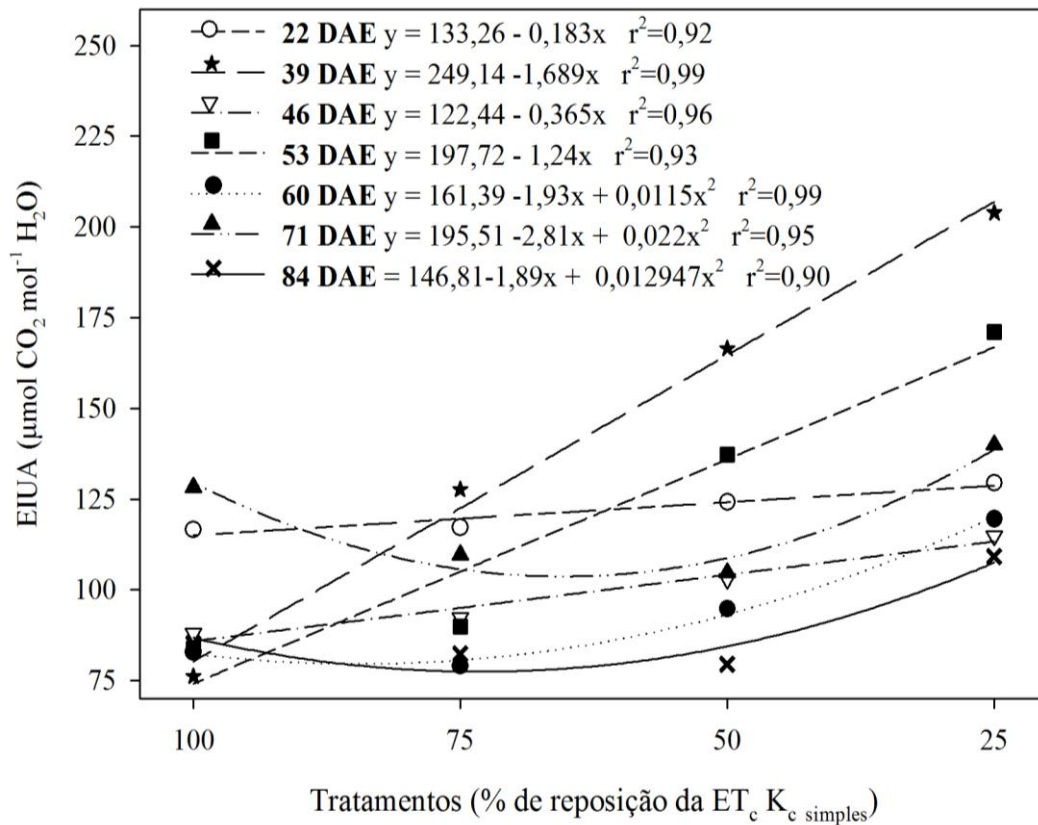


Figura 13 – Resultados da eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) em plantas de sorgo aos 22, 39, 46, 53, 60, 71 e 84 dias após a emergência (DAE), nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ . Santa Maria, RS. 2013.

O rápido decréscimo na condutância estomática indica o fechamento estomático, o que contribui para otimização do uso da água nas plantas sob efeito de déficit hídrico. Resultados em que ocorre aumento na EIUA, em plantas submetidas a déficit hídrico, foram observados também em outras culturas, como milho (MAGALHÃES et al., 2009), coqueiro-anão (PASSOS et al. 2005) e feijoeiro (FRANÇOIS, 2012). Nas avaliações da EIUA realizadas aos 60, 71 e 84 DAE, observou-se um comportamento quadrático em relação às irrigações deficitárias mantidas entre 25 e 100 % da  $ET_c K_c \text{ simples}$ , sendo que, os menores valores para a EIUA foram de 79,8, 103,5 e 77  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ , encontrados com reposição de 84, 65 e 77%  $ET_c K_c \text{ simples}$ , respectivamente.



#### 4.2.3 Perda acumulada de água da cultura do sorgo

A perda acumulada de água do solo, até aos 28 DAE, foi semelhante entre todos os tratamentos (Apêndice H). A partir de 28 DAE, a perda de água acumulada reduziu linearmente, em relação ao decréscimo nos valores de 100% para 25% de  $ET_c K_c \text{ simples}$  (Figura 14). A utilização da irrigação deficitária, reduzindo de 100% para 25% a reposição da  $ET_c K_c \text{ simples}$ , causou reduções de 23, 31, 40, 71, 86, 98 mm na perda acumulada de água do solo, aos 38, 48, 58, 78, 88 e 98 DAE, respectivamente.

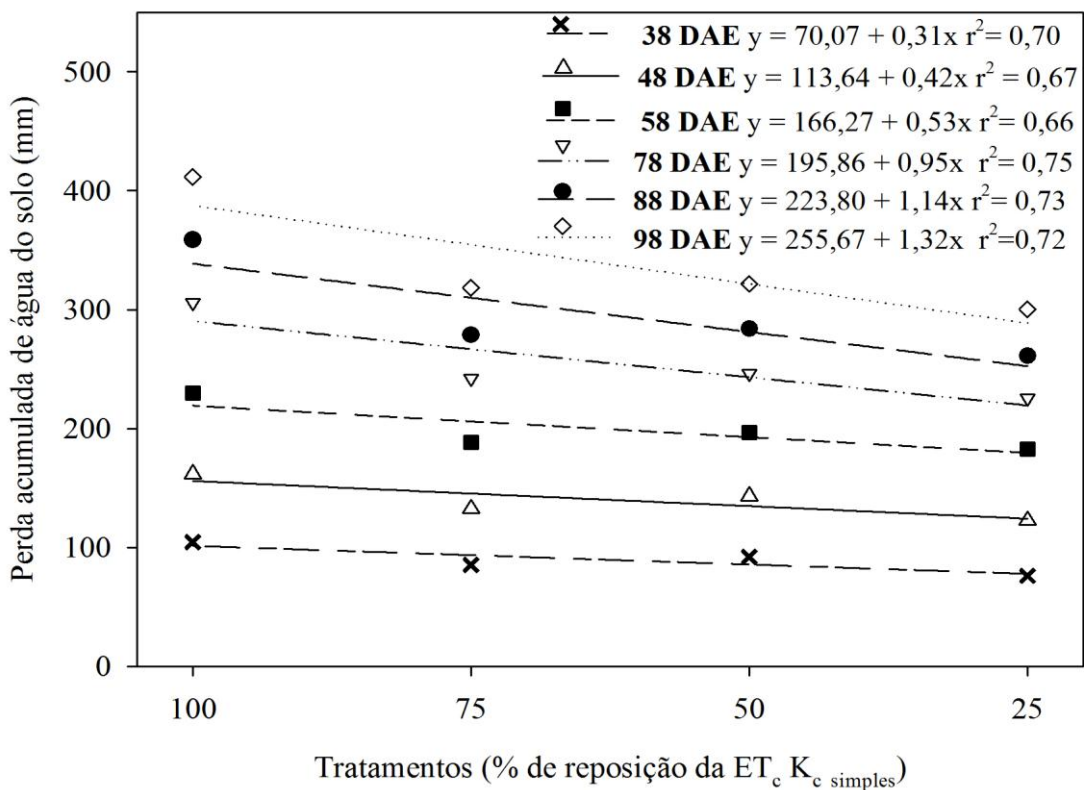


Figura 14 - Perda acumulada de água do solo aos 38, 48, 58, 78, 88 e 98 dias após a emergência (DAE) da cultura do sorgo, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ . Santa Maria, RS. 2013.

O índice de cobertura vegetal máximo foi obtido no tratamento mantido com 100% de  $ET_c K_c \text{ simples}$ , aos 35 DAE, entretanto, no tratamento mantido com 25% de  $ET_c K_c \text{ simples}$ , este índice somente foi alcançado aos 49 DAE (Apêndice E). O tratamento mantido com 25% de



$ET_c K_c$  simples apresentou menor consumo de água, mesmo apresentando solo sem cobertura vegetal. Esta menor perda foi influenciada pela ausência de umidade na superfície do solo, corroborando o exposto por Allen et al. (1998), os quais afirmam que perdas mais significativas por evaporação da água do solo ocorrem quando a superfície do solo está umedecida pelas precipitações pluviais ou irrigação.

A perda acumulada de água do solo ao final do ciclo da cultura foi de 388, 354, 321, e 288 mm para os tratamentos mantidos com 100, 75, 50 e 25% de  $ET_c K_c$  simples, respectivamente. A diferença na perda acumulada de água do solo foi observada depois que as plantas apresentaram diferentes IAF e índice de cobertura vegetal, indicando que essas variáveis afetam diretamente as perdas de água do solo. Nas plantas de sorgo do tratamento mantido com 25% de  $ET_c K_c$  simples, observou-se menores valores de IAF, e menor perda acumulada de água do solo, enquanto que os tratamentos com maior IAF apresentaram maiores valores para a perda acumulada de água do solo (Figura 7). Estes resultados concordam com Petry (2000), onde foi observado que a redução do IAF de plantas de sorgo granífero provocaram menores extrações de água do solo. O IAF das plantas interfere na extração da água do solo, determinando maior ou menor velocidade no processo, de acordo com o aumento no IAF das plantas (DALMAGO, 2004). Petry et al. (2007) verificaram que o IAF das plantas de milho está diretamente relacionado à extração de água do solo. Segundo Ball et al. (1994), plantas com menor área foliar transpiram menos, reduzindo assim, a extração de água do solo, e conservando a água no solo por um período mais prolongado.

#### 4.2.4 Produção e qualidade de forragem de plantas de sorgo

Resultados da PMV e PMS das plantas de sorgo apresentaram resposta linear negativa em função da redução da reposição de 100% para 25% da  $ET_c K_c$  simples (Figura 15). A utilização da irrigação deficitária, passando de 100% para 25% na reposição da  $ET_c K_c$  simples, apresentou redução de 22242 kg ha<sup>-1</sup> na PMV (45%) e 6507 kg ha<sup>-1</sup> na PMS (47%). Melo (2006) observou redução de 57,9% na PMS em plantas de sorgo, provocada pela redução na reposição de água de 100% para 25% da capacidade de campo. Santos (2009) verificou que, através do incremento da lâmina total irrigada, houve maior PMS de *Hemárrhia* ao final de 180 dias.

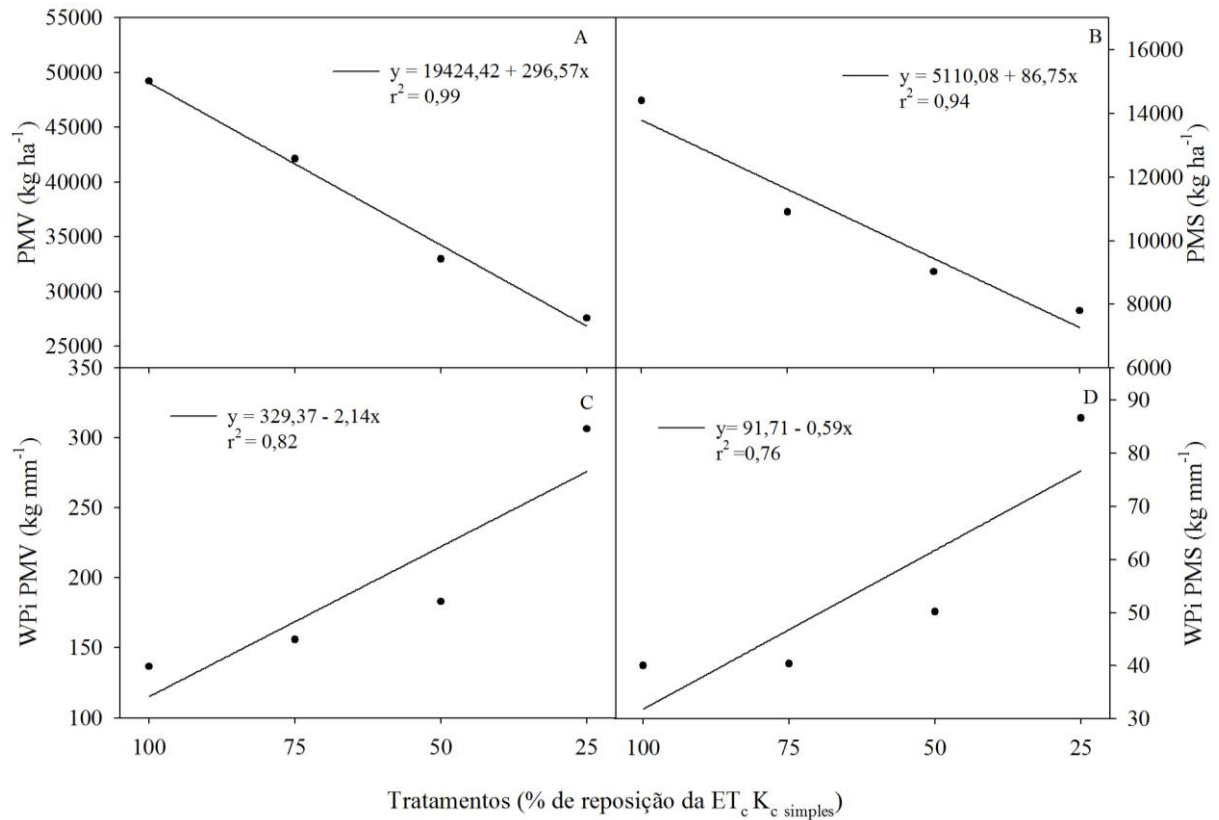


Figura 15 – Resultados de produção de massa verde de forragem (A) e produção de massa seca de forragem (B), produtividade da água irrigada na produção de massa verde (C) e produtividade da água irrigada na produção de massa seca (D) da cultura do sorgo, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da  $ET_c K_c$  simples. Santa Maria, RS. 2013.

A maior PMV e PMS das plantas de sorgo foi encontrada no tratamento mantido com 100% da  $ET_c K_c$  simples, onde foi observado  $49081 \text{ kg ha}^{-1}$  de PMV e  $13785 \text{ kg ha}^{-1}$  de PMS. Os resultados de PMS são semelhantes aos encontrados por Skonieski et al. (2010), que, trabalhando com sorgo duplo propósito, observaram PMS de  $13006 \text{ kg ha}^{-1}$ .

A WP na PMV e PMS apresentou resultados semelhantes entre os tratamentos (Apêndice I), sendo que o valor médio da WP na PMV foi de  $119,97 \text{ kg mm}^{-1}$  e da WP na PMS foi de  $33,26 \text{ kg mm}^{-1}$ . A WPi na PMV e WPi na PMS apresentaram resposta linear positiva em função da redução de 100% para 25% na reposição da  $ET_c K_c$  simples (Figura 15). A redução de 75% na aplicação de água, passando de 100 para 25% da  $ET_c K_c$  simples, ocasiona incremento de  $160,50 \text{ kg mm}^{-1}$  para a WPi PMV (Figura 15 C) e  $44,26 \text{ kg mm}^{-1}$  WPi PMS (Figura 15 D). Esses resultados demonstram que melhores índices produtivos para o uso da água irrigada, WPi, podem ser obtidos através da adoção de técnicas de irrigação deficitária. Resposta semelhante foi verificada por Martins et al. (2012), em material pré ensilado de

milho submetido a irrigações deficitárias. Melo (2006) verificou que a WP aumentou com o incremento do déficit hídrico em sorgo.

Os resultados da MM, FDN e FDA presente na forragem das plantas de sorgo submetidos à irrigação deficitária com diferentes níveis de reposição da  $ET_c K_c$  simples são apresentados na figura 16.

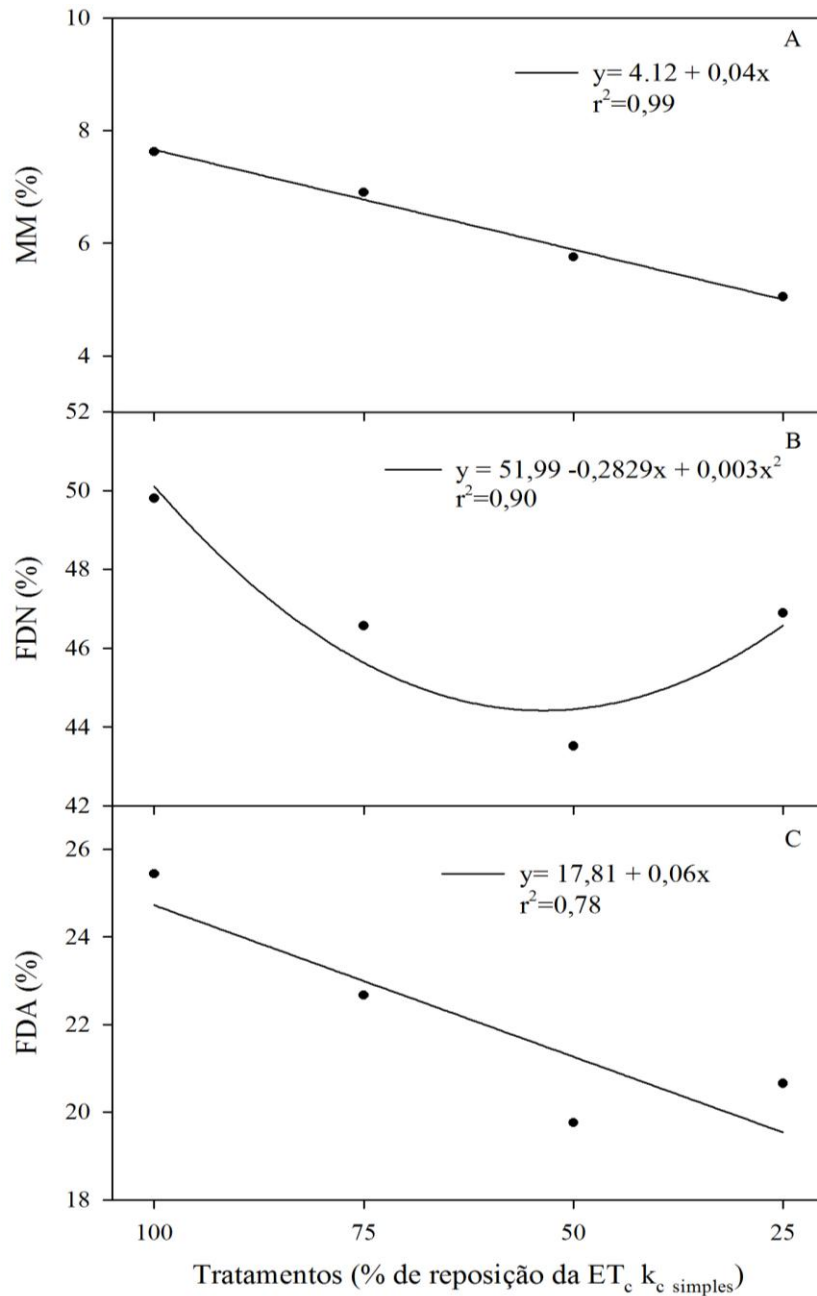


Figura 16 – Resultado do teor de matéria mineral (A), fibra em detergente neutro (B) e fibra em detergente ácido (C) apresentadas na forragem pré-ensilada de plantas de sorgo, nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da  $ET_c K_c$  simples. Santa Maria, RS. 2013.

O teor de MM e FDA da forragem de plantas de sorgo apresentaram resposta linear negativa em função da redução nos níveis de reposição da  $ET_c K_c \text{ simples}$ . A utilização da irrigação deficitária, com redução de 100% para 25% na reposição da  $ET_c K_c \text{ simples}$  diminuiu o teor de MM em 3% (Figura 16 A) e em 4,5% o teor de FDA da forragem de sorgo (Figura 16 C). Estes resultados de FDA concordam com Melo (2006), avaliando forragem de sorgo submetida à restrição hídrica, onde foi verificada redução linear do teor de FDA em função do aumento da restrição hídrica. De acordo com Carciofi et al. (2009), quanto maior a participação de MM, normalmente verifica-se uma menor digestibilidade do material. O teor de FDN apresentou resposta quadrática em relação aos tratamentos mantidos entre 25 e 100 % da  $ET_c K_c \text{ simples}$ . O menor teor de FDN (47%) foi observado na forragem das plantas com reposição de 45% da  $ET_c K_c \text{ simples}$  (Figura 16 B).

A MS e o teor PB da forragem pré ensilada de sorgo apresentaram resposta semelhante entre os tratamentos (Apêndice I). A forragem pré-ensilada de sorgo apresentou média de MS de 27,71%, enquanto a média obtida para o teor de PB foi de 10,26%, valor superior aos encontrados por Skonieski et al. (2010), em silagem de sorgo de duplo propósito. Os resultados do teor de PB encontrados nesse trabalho foram superiores aos encontrados por Martins et al. (2012), em material pré ensilado de milho submetido a dois manejos de irrigação (irrigações plena e irrigação deficitária). De acordo com Von Pinho et al. (2007), a silagem de plantas de sorgo de duplo propósito pode apresentar maior teor de PB, devido à maior contribuição de panículas no material ensilado.

#### 4.2.5 Rendimento de grãos das plantas de sorgo

O rendimento de grãos das plantas de sorgo diferiu estatisticamente entre os tratamentos (Anexo J), apresentando resposta linear negativa ( $y = 1831,46 + 44,54x$ ), com a redução na reposição da  $ET_c$  (Figura 17A). O maior rendimento de grãos ( $6285,46 \text{ kg ha}^{-1}$ ) foi obtido com plantas mantidas com reposição de 100% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ . A redução em 25% na aplicação de água na reposição da  $ET_c$  resultou em redução de  $1113 \text{ kg ha}^{-1}$  no rendimento de grãos das plantas de sorgo. FARRÉ e FACI (2006) também verificaram, em experimento conduzido no norte da Espanha, que a utilização da irrigação deficitária em plantas de sorgo provocou reduções na produtividade de grãos, reduzindo de  $8540 \text{ kg ha}^{-1}$  obtido com reposição de 100% para  $640 \text{ kg ha}^{-1}$  obtido com reposição de 50% da  $ET_c$ .

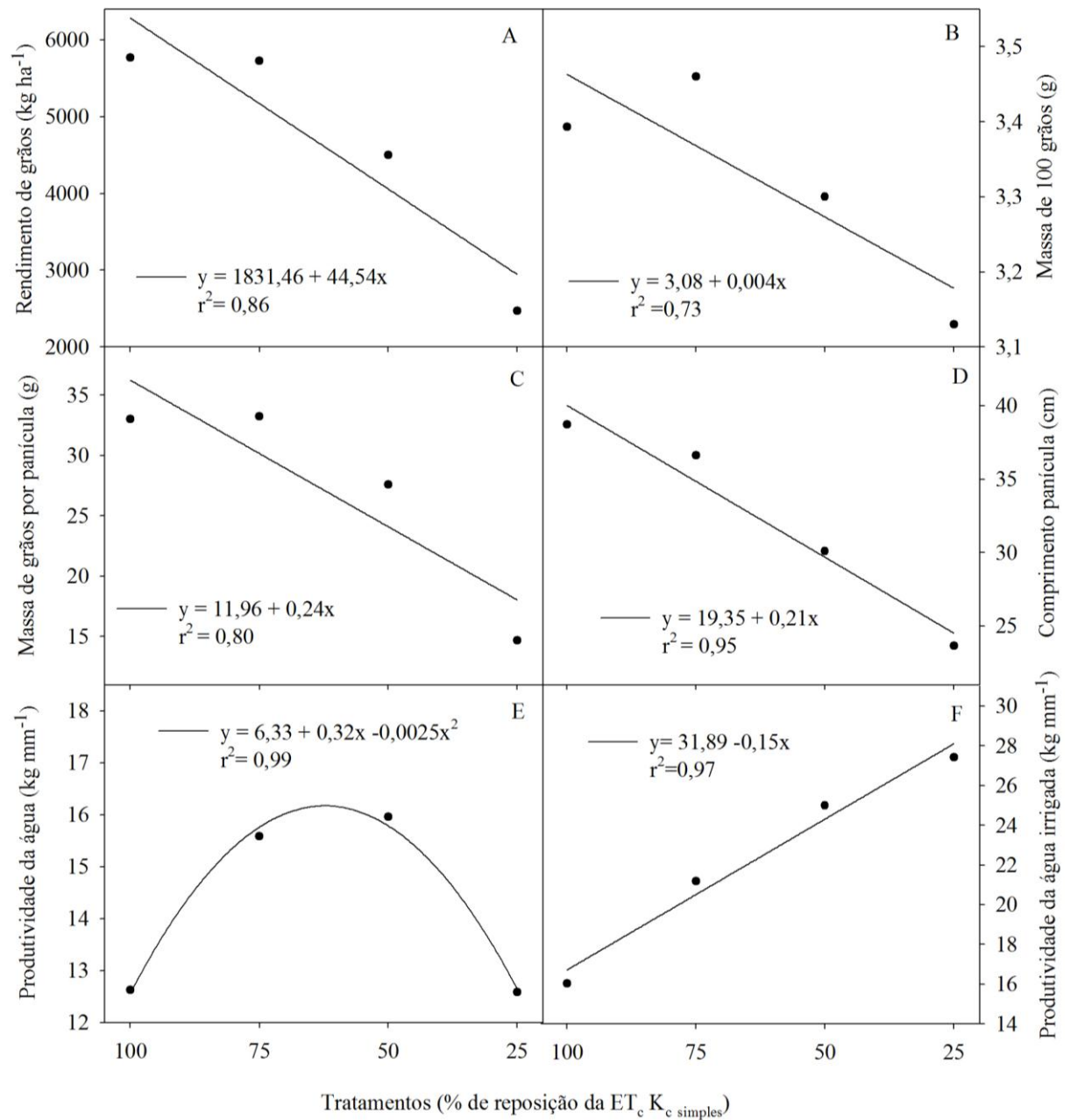


Figura 17 - Produtividade (A), massa de 100 grãos (B), massa de grãos por panícula (C), comprimento das panículas (D) produtividade da água (E) e produtividade da água irrigada (F), nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ . Santa Maria, RS. 2013.

Este resultado encontrado para o rendimento de grãos da cultura do sorgo submetido a diferentes níveis de irrigação deficitária concorda com outros trabalhos avaliando a cultura do sorgo, onde o déficit hídrico resulta em redução na produtividade de grãos da cultura do sorgo (CHAUDHURI; KANEMASU, 1982; PEITER; CARLESSO, 1996 TOLK; HOWELL, 2008).

A massa de 100 grãos e massa de grãos por panícula das plantas de sorgo apresentaram resposta linear negativa, com a redução na reposição da  $ET_c K_c \text{ simples}$  (Figura 17 B e 17 C). A redução em 25% na aplicação de água na reposição da  $ET_c$  impacta na redução de 0,13 gramas na massa de 100 grãos (Figura 17 B). Essa diferença, aparentemente, pode parecer baixa, porém a análise dos efeitos desta redução de 25% na aplicação da água indicou uma redução de 18 gramas na massa de grãos por panícula (Figura 17 C). Albuquerque et al. (1992) observaram que a massa de 1000 grãos, número e peso de grãos de trigo apresentaram incrementos em função do aumento da lâmina de água.

O comprimento da panícula apresentou resposta linear negativa em função da redução da reposição de 100% para 25% da  $ET_c K_c \text{ simples}$  (Figura 17 D). A utilização da irrigação deficitária, reduzindo a reposição de 100% para 25%  $ET_c K_c \text{ simples}$  reduziu em 15,75 cm o comprimento médio das panículas (Figura 17 D).

O resultado da análise de variância (Apêndice P) indicou que a WP e WPi na produção de grãos da cultura do sorgo apresentaram diferença significativa entre os tratamentos. A WP apresentou uma resposta quadrática em relação às irrigações deficitárias mantidas entre 25 e 100% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ . A máxima eficiência técnica para WP na produção de grãos de sorgo foi de  $16,57 \text{ kg mm}^{-1}$ , observada com reposição de 64% da  $ET_c K_c \text{ simples}$  (Figura 17 E). De acordo com esse resultado, reduções na reposição abaixo de 64% da  $ET_c K_c \text{ simples}$  não se apresentam viáveis, devido à baixa produtividade encontrada por unidade de água aplicada. Colaizzi et al. (2004) encontraram que maiores valores para a WP na cultura do sorgo foram obtidos entre 50% e 75% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ .

A WPi para grãos de sorgo apresentou uma resposta linear positiva em função da função da redução de 100% para 25% na reposição da  $ET_c K_c \text{ simples}$  (Figura 17 F). A utilização da irrigação deficitária, reduzindo de 100% para 25% a reposição da  $ET_c$  incrementou em  $10,9 \text{ kg mm}^{-1}$  a WPi na produção de grãos de sorgo. Estes resultados mostram que as irrigações deficitárias podem ser utilizadas com o fim de melhorar a WPi na produção de grãos da cultura do sorgo. Tolk e Howell (2003) verificaram resposta semelhante às encontradas para o sorgo, onde as WP diminuíram com o aumento nas irrigações. Esses resultados ainda demonstram que a redução da lâmina irrigada, aliada à menor frequência de irrigação, apresentou-se como uma ferramenta útil para o aumento da WPi na produção de grãos. Ali e Talukder (2008) afirmam que uma forma de aumentar a WP pode ser realizada através da redução ou reposição de parte da lâmina de água necessária e da redução nas frequências de irrigação. Araya et al. (2011) descrevem que a WP irrigada pode ser utilizada para definir a quantidade suplementar de irrigação que seria necessário aplicar em relação a

uma irrigação plena ou precipitação, a fim de assegurar um rendimento elevado em uma área total. Os resultados obtidos com a WPI podem servir para recomendações de manejos de irrigação, quando o produtor irrigante possuir baixo volume de água armazenada, possibilitando assim a aplicação de uma lâmina mínima de irrigação à cultura.

#### 4.2.6 Análise econômica da produção de grãos da cultura do sorgo

Os resultados para a receita, o lucro e o retorno econômico obtidos com os grãos da cultura do sorgo são apresentados na figura 18. O custo com a aplicação de água na irrigação foi de R\$ 991,08, R\$ 743,31, R\$ 495,54 e R\$ 247,77, nos tratamentos com reposição de 100, 75, 50 e 25% da  $ET_c K_c \text{ simples.}$ , respectivamente. A receita obtida pela cultura do sorgo apresentou resposta linear negativa ( $y = 648,66 + 16,65x$ ), com a redução na reposição da  $ET_c$  (Figura 18 A). A maior receita obtida foi de R\$ 2349,66, com a reposição de 100% da  $ET_c K_c \text{ simples.}$  A redução de 25% na aplicação de água resulta na redução de R\$ 416,25 no valor da receita.

A simulação de lucro obtido com a produtividade de grãos das plantas de sorgo apresentou resposta quadrática em relação às irrigações deficitárias mantidas entre 25 e 100% da  $ET_c K_c \text{ simples.}$ , podendo ser definida por  $y = -243,01 + 43,85x - 0,297x^2$  (Figura 18 B). A máxima eficiência econômica foi de R\$ 1375,00, observada com reposição de 75% da  $ET_c K_c \text{ simples.}$  Através deste resultado, da máxima eficiência econômica, observa-se que, mesmo com reduções na produção de grãos com este nível de reposição de  $ET_c$ , o lucro é mais elevado, devido ao menor custo com a aplicação da água nas plantas mantidas a 75% da  $ET_c K_c \text{ simples.}$  A máxima eficiência econômica representa o maior ganho monetário da cultura. Esse parâmetro pode ser levado em consideração na recomendação do manejo de irrigação quando a quantidade de água não for limitante. RODRIGUES et al. (2013) comparando o retorno econômico com a utilização de irrigação plena e irrigação deficitária cultura do milho para áreas de cultivo de 5 e 32 hectares utilizando sistemas de irrigação por gotejamento e aspersão (pivô central e aspersor setorial) verificaram que a viabilidade das estratégias de irrigação deficitária são extremamente dependentes dos preços de comercialização da produção, sendo assim, com preços baixos todos os manejos de irrigação, área de cultivo e sistema de irrigação apresentaram rendimento econômico negativo, já com preços de comercialização mais elevados os cenários passaram a apresentar respostas positivas.

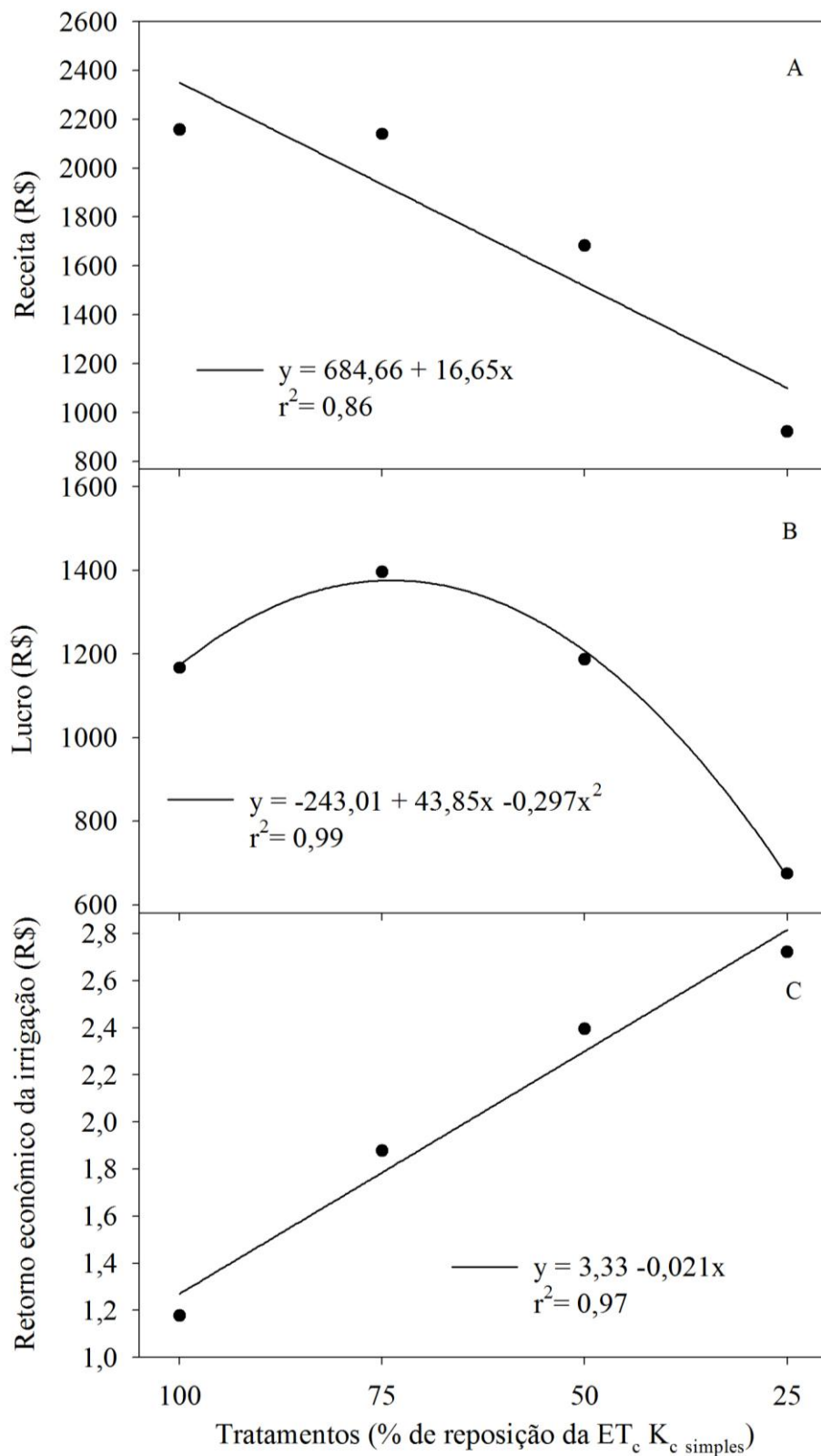


Figura 18 – Resultado da receita (A), lucro (B) e retorno econômico da irrigação (C) da cultura do sorgo nos tratamentos mantidos com 100%, 75%, 50% e 25% da ET<sub>c</sub> K<sub>c</sub> simples. Santa Maria, RS. 2013.



O retorno econômico sobre o custo com a aplicação da água aumentou linearmente com a redução de 100% para 25% da  $ET_c K_c$  simples (Figura 18 C). Em plantas mantidas com 25% da  $ET_c K_c$  simples, a cada R\$ 1,00 investido com a aplicação da água, foi obtido um retorno de R\$ 2,80, apresentando-se como o manejo mais rentável. Porém, observa-se que, mantendo 25% de reposição da  $ET_c$ , o lucro obtido foi menor que o obtido nos demais tratamentos, resultado da baixa produtividade de grãos apresentada pelas plantas no tratamento mantido com 25% da  $ET_c K_c$  simples. Em regiões onde a quantidade de água não é o fator limitante para a produtividade da cultura, o manejo de irrigação deve ser recomendado visando a máxima eficiência econômica. Para utilização deste critério, o manejo da cultura poderá ser realizado com a  $ET_c$  mantida em 75%, o qual proporcionaria um retorno econômico de R\$ 1,75 para cada R\$ 1,00 investido com a aplicação de água. Em trabalho realizado por Martins et al. (2012) com silagem de plantas de milho com reposição de 100, 75 e 50% da  $ET_c$ , verificaram que o retorno econômico alcançado com as irrigações deficitárias foi maior que o encontrado com a irrigação plena. O aumento do retorno econômico da irrigação representa as vantagens alcançadas com a utilização da irrigação deficitária. Indica que a irrigação deficitária favorece aumentos na  $WPI$ , além de incrementos no retorno econômico, possibilitando assim uma utilização racional de água.

### **4.3 Respostas da cultura do sorgo submetidas a diferentes manejos de irrigação**

Os resultados apresentados nas figuras 19 e 20 e tabela 4 mostram as respostas obtidas para a perda acumulada de água, características morfológicas, produção de massa verde e seca, rendimento de grãos,  $WP$  e  $WPI$  na produção de grãos das plantas de sorgo mantidas com 100%  $ET_c K_c$  dual e 100% da  $ET_c K_c$  simples. A  $ET_c$  acumulada estimada através do  $K_c$  simples apresentou valores inferiores aos estimados utilizando o  $K_c$  dual (Figura 19 A) durante o período inicial de desenvolvimento da cultura, dos 0 aos 99 mm de  $ET_o$  acumulada. As freqüentes irrigações realizadas no período inicial (0 aos 12 DAE) permitiram alta umidade na superfície do solo, proporcionando elevada perda de água por evaporação. O  $K_e$  pode assumir valores elevados após o umedecimento do solo, com redução à medida que o solo seca, podendo chegar à zero no momento em que não houver mais água disponível para a evaporação (ALLEN, et al. 1998; ANDRADE, 2008).

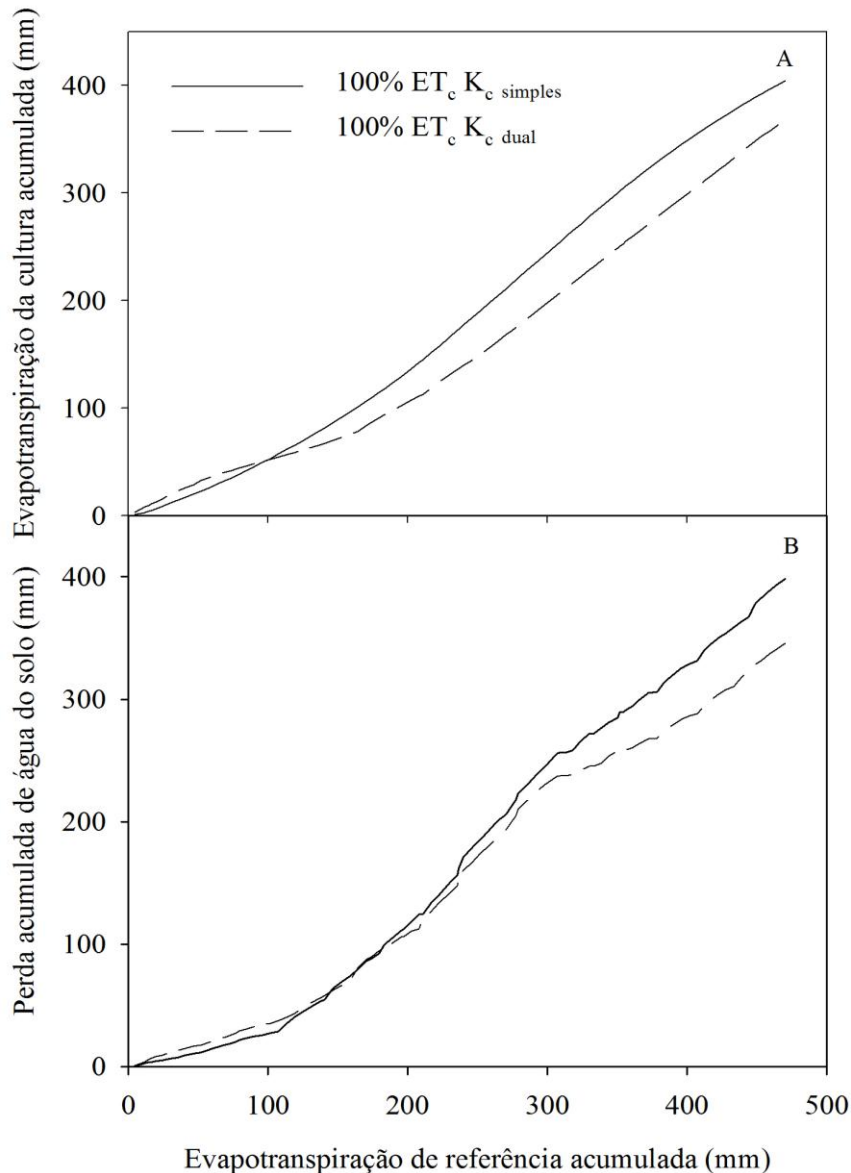


Figura 19 – Evapotranspiração da cultura acumulada (A), e perda acumulada de água do solo (B) na cultura do sorgo. Santa Maria, RS, 2013.

No período entre os 100 e os 488 mm da  $ET_0$  acumulada, verificou-se que a  $ET_c$  acumulada estimada através do  $K_c$  simples foi superior à  $ET_c$  acumulada estimada com o  $K_c$  dual (Figura 19 A). Esse resultado pode ser explicado pelos valores mais elevados de  $K_c$  utilizados no  $K_c$  simples (1,2) no período intermediário de desenvolvimento da cultura, o que pode ter superestimado a evapotranspiração em comparação a  $ET_c K_c$  dual (0,9). Esse menor valor do  $K_c$  dual pode ser resultado dos menores valores de  $k_e$ , ocasionados pelo máximo índice de cobertura vegetal do solo pelo dossel vegetativo da cultura do sorgo, reduzindo desta forma a evaporação direta de água do solo.

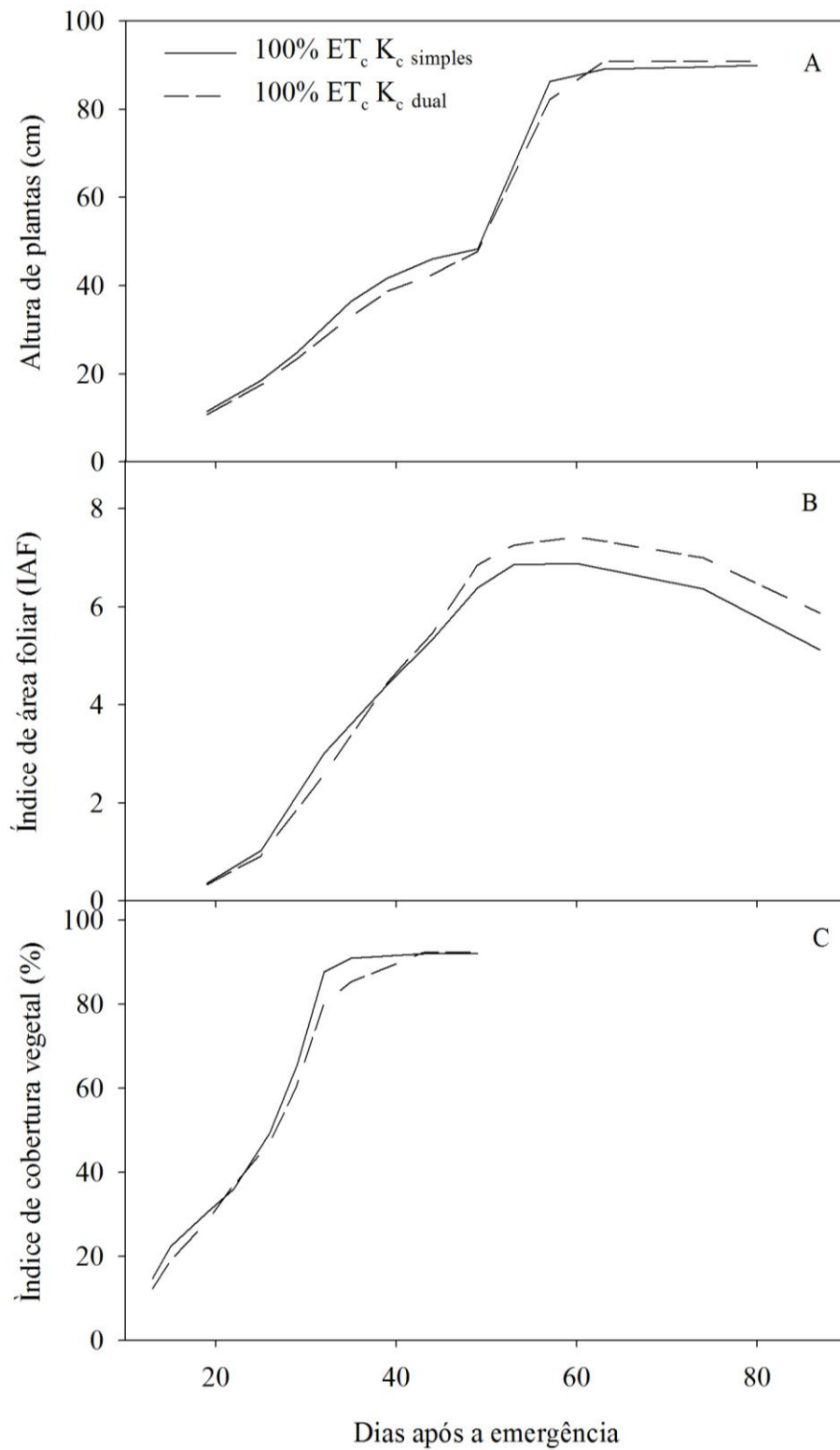


Figura 20 - Altura de plantas (A), Índice de área foliar (IAF) das plantas (B), Índice de cobertura vegetal (C) das plantas de sorgo. Santa Maria, RS, 2013.

Tabela 4 - Produção de massa verde (PMV), produção de massa seca (PMS), rendimento de grãos, produtividade da água (WP) e produtividade da água irrigada (WPi) na produção de grãos da cultura do sorgo. Santa Maria, RS, 2013.

Trat.	PMV (kg ha <sup>-1</sup> )	PMS (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimento de grãos (kg ha <sup>-1</sup> )	WP (kg mm <sup>-1</sup> )	WPi (kg mm <sup>-1</sup> )
100% ET <sub>c</sub> K <sub>c</sub> dual	42816,53 a	11309,87 a	5419,39 a	15,89 a	22,58 a
100% ET <sub>c</sub> K <sub>c</sub> simples	49216,73 a	14400,47 a	5771,29 a	12,63b	16,03 b
DMS	20150,22	6935,15	846,97	2,07	2,78

As perdas acumuladas de água do solo (Figura 19 B) apresentaram resposta semelhante à verificada para a ET<sub>c</sub> acumulada (Figura 19 A). O tratamento 100% ET<sub>c</sub> K<sub>c</sub> simples apresentou menor perda acumulada de água quando comparado ao tratamento 100% da ET<sub>c</sub> K<sub>c</sub> dual, até os 180 mm de ET<sub>o</sub> acumulado. Durante o período de 180 a 488 mm de ET<sub>o</sub> acumulada, as perdas acumuladas de água do tratamento 100% da ET<sub>c</sub> K<sub>c</sub> simples foram superiores às do tratamento 100% de ET<sub>c</sub> K<sub>c</sub> dual. Essa resposta pode ser resultado de maiores perdas por evaporação de água do solo, em razão de irrigações mais frequentes (Tabela 3). Também podem ter ocorrido perdas de água por percolação profunda. A redução na umidade do solo nas camadas superficiais causa reduções das perdas de água por evaporação em função de ocorrerem restrições do fluxo de água para a atmosfera (LEVIEN, 1999). As perdas acumuladas de água do solo verificadas aos 98 DAE (488 mm ET<sub>o</sub> acumulada), foram de 358 e 411 mm, para os tratamentos mantidos com 100% da ET<sub>c</sub> K<sub>c</sub> dual e 100% da ET<sub>c</sub> K<sub>c</sub> simples, respectivamente.

A utilização do K<sub>c</sub> dual, sugerido pela FAO (ALLEN, et al. 1998), considerando as características físico-hídricas do solo e também as características morfofisiológicas das plantas, resultou em redução de 120 mm na quantidade de água repostada via irrigação, em comparação à recomendação de irrigação para o tratamento 100% da ET<sub>c</sub> K<sub>c</sub> simples, apresentando-se como uma boa alternativa para economia de água na irrigação.

Os resultados para a altura, IAF das plantas e o índice de cobertura vegetal da cultura do sorgo submetido a dois manejos de irrigação são apresentados na figura 20. A altura de plantas de sorgo do tratamento mantido com 100% da ET<sub>c</sub> K<sub>c</sub> simples foi similar às plantas mantidas com 100% de ET<sub>c</sub> K<sub>c</sub> dual. A maior altura das plantas de sorgo foi de 90 cm, observada a partir dos 60 DAE.

A resposta do IAF das plantas de sorgo foi semelhante à resposta verificada para a altura de plantas, onde não foram verificados efeitos dos manejos de irrigação. O maior

resultado para o IAF das plantas de sorgo foi observado no período próximo aos 55 DAE, coincidindo com o estágio fenológico de floração do sorgo. No período de 74 a 80 DAE, observou-se um expressivo decréscimo no IAF das plantas. Essa resposta é atribuída ao elevado IAF das plantas, o que ocasiona baixa incidência de radiação solar, principalmente no extrato inferior do dossel vegetativo das plantas, ocasionando a senescência das mesmas.

O índice de cobertura vegetal do solo pelo dossel vegetativo da cultura do sorgo foi semelhante entre os tratamentos. Aos 13 DAE, a média da cobertura do solo pelo dossel vegetativo da cultura do sorgo, para todos os tratamentos, foi de 14%, compreendendo assim, o estágio de crescimento rápido, que vai desde os 10 aos 80% de solo coberto pelo dossel vegetativo (ALLEN et al. 1998). O índice de cobertura máximo foi alcançado aos 43 DAE, quando o índice de cobertura vegetal foi superior a 90%.

Os resultados da PMV, PMS, rendimento de grãos, WP e WPi na produção de grãos da cultura do sorgo são apresentados na tabela 4. A análise de variância não indicou diferença significativa para a PMV, PMS e rendimento de grãos das plantas de sorgo entre os tratamentos 100% da  $ET_c K_c$  dual e 100% da  $ET_c K_c$  simples. As características morfológicas (IAF e altura das plantas) apresentam influencia direta sobre a acumulação de massa verde e seca pelas plantas. Dessa forma, a semelhança entre os resultados para a produção de massa seca e rendimento de grãos das plantas de sorgo podem ser explicadas, devido a semelhança verificada nas características morfológicas das plantas, para os tratamentos 100% da  $ET_c K_c$  dual e 100% da  $ET_c K_c$  simples. As médias da PMV e PMS e rendimento de grãos foram de 46016, 12855 e 5595 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

As plantas do tratamento mantido com 100% da  $ET_c K_c$  dual, receberam, durante o período vegetativo, a aplicação de 90 mm de água inferior às plantas mantidas com 100% da  $ET_c K_c$  simples, porém, essa redução no volume de água aplicada não resultou em respostas positiva na capacidade produtiva das plantas. De acordo com Solaimalai et al. (2001) as plantas de sorgo geralmente são afetadas pelo déficit hídrico quando este ocorrer na fase reprodutiva, ao passo que um eventual déficit hídrico leve, durante a estágio vegetativo de desenvolvimento da cultura, não acarretaria em redução significativa no rendimento da cultura. Bergonci et al. (2001) verificaram que o déficit hídrico ocorrido durante o período vegetativo da cultura do milho interfere pouco no rendimento de grãos. Segundo Allen et al., (1998) a cultura do sorgo apresenta-se em deficiência hídrica quando o conteúdo de umidade do solo atingir valores inferiores a 45% da FAD. O manejo de irrigação com 100% da  $ET_c K_c$  dual possibilitou condições de umidade superiores à condição de deficiência hídrica (Figura 4), mesmo com aplicação de 120 mm de água a menos que a aplicada no

tratamento 100% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ , devido as realização das irrigações ocorrer sempre quando a umidade do solo se apresentava próximo ao valor de deficiência (FAD de 0,45).

A análise de variância indicou diferença significativa para a WP e WPI na produção de grãos da cultura do sorgo (Apêndice ). A WP na produção de grãos das plantas de sorgo do tratamento mantido com 100% da  $ET_c K_c \text{ dual}$  foi de  $15,89 \text{ kg mm}^{-1}$ , maior que a encontrada nas plantas dos tratamentos mantidos com 100% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ , que foi de  $12,63 \text{ kg mm}^{-1}$ . A WPI na produção de grãos das plantas de sorgo do tratamento mantido com 100% da  $ET_c K_c \text{ dual}$  foi de  $22,58 \text{ kg mm}^{-1}$ , também superior à encontrada nas plantas dos tratamentos mantidos com 100% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ , que foi de  $12,63 \text{ kg mm}^{-1}$ . As plantas do tratamento mantido com 100% da  $ET_c K_c \text{ dual}$ , devido ao menor consumo e quantidade de água aplicada, obtiveram melhor WP e WPI na produção de grãos quando comparadas às plantas do tratamento mantido com 100% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ . Portanto, a redução da lâmina irrigada, aliada à menor frequência de irrigação, apresentou-se como uma ferramenta útil para o aumento da WP e WPI na produção de grãos da cultura do sorgo. Araya et al. (2011), descrevem que a WPI pode ser utilizada para definir a quantidade suplementar de irrigação que se necessita aplicar em relação a uma irrigação plena ou precipitação, a fim de assegurar um rendimento elevado em uma área total. De acordo com Tabosa et al. (2002), a WPI é um importante subsídio para a seleção de novos materiais de sorgo forrageiro, por estar associada à produção.

Os resultados deste trabalho demonstraram que a estimativa da  $ET_c$  através da utilização do  $K_c \text{ dual}$ , sugerido pela FAO (ALLEN et al., 1998) para a cultura do sorgo cultivado em Argissolo Vermelho Distrófico arênico, foram eficientes no manejo de irrigação da cultura, onde não foram observados efeitos negativos nas características morfológicas e rendimento de grãos, apresentando ainda melhores Wp e WPI na produção de grãos quando comparados ao manejo de irrigação tradicional (100% da  $ET_c K_c \text{ simples}$ ).

## 5 CONCLUSÕES

A utilização da irrigação deficitária, reduzindo a aplicação da água de 100% para 25% de reposição da  $ET_c K_c$  simples, provocou redução linear na altura, índice de área foliar, taxa fotossintética, condutância estomática, produção de massa verde e rendimento de grãos das plantas de sorgo, cultivadas em um Argissolo Vermelho Distrófico arênico. A cada decréscimo de 25% na reposição da  $ET_c$ , ocasionou redução de 7% na altura, 5% no índice de área foliar, 21% na taxa fotossintética, 31% na condutância estomática, 15% na produção de massa verde e de 17% no rendimento de grãos das plantas de sorgo.

A máxima eficiência técnica para produtividade de grãos das plantas de sorgo, cultivadas em um Argissolo Vermelho Distrófico arênico, submetidas à irrigação deficitária passando de 100% para 25% de reposição da  $ET_c K_c$  simples foi de  $5893,77 \text{ kg ha}^{-1}$ , obtida com a reposição de 91% da  $ET_c$ .

A utilização da irrigação deficitária, reduzindo a aplicação da água de 100% para 25% de reposição da  $ET_c K_c$  simples, provocou um incremento linear na produtividade da água irrigada. A redução de 25% na reposição da  $ET_c$  incrementou em 14% a produtividade da água.

A utilização da irrigação com reposição de 100% da  $ET_c K_c$  dual, comparado a irrigação com reposição de 100% da  $ET_c K_c$  simples, reduziu a lâmina total de água aplicada em 120 mm, não apresentando influência sobre o índice de área foliar e altura de plantas, produção de massa verde e rendimento de grãos das plantas de sorgo. A produtividade da água irrigada na produção de grãos das plantas de sorgo cultivadas em um Argissolo Vermelho Distrófico arênico e mantidas com 100% da  $ET_c K_c$  dual foi maior que a obtida nas plantas mantidas com 100% da  $ET_c K_c$  simples.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, S. H. et al., Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Yield and water productivity, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.97 p.1923–1930, 2010.

AISHAH H. S. et al., Photosynthetic responses of forage sorghums to salinity and irrigation frequency, **Journal of Food, Agriculture & Environment**, Finland, v.9, n.1 p. 566-569, Jan, 2011.

ALBUQUERQUE, P. E. P.; BRITO, R. A. L.; OLIVEIRA, A. C.. Irrigação de trigo em solo sob vegetação de cerrado em Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, n.6, p.935-948, jun. 1992.

ALI, M. A. et al. Morpho-physiological criteria for drought tolerance in sorghum (*Sorghum bicolor*) at seedling and post-anthesis stages, **International Journal of Agriculture & Biology**, Faisalabad, v.11, n.6, p. 74–680, 2009.

ALI, M. H.; TALUKDER, M. S. U. Increasing water productivity in crop production—A synthesis, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.95n.11, p. 1201–1213, Nov. 2008.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 56. Rome, Italy, 1998.

ALLEN, R. G. et al. FAO-56 Dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. ASCE, v.131, n.1, p. 1-13, Feb. 2005.

ALMEIDA, C. C. M. **Análise da produtividade física e económica da água. Aplicação do modelo SEDAM no perímetro de rega de Huinong, bacia do Rio Amarelo**. 2008, 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente – Gestão Ambiental), Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

ANDRADE, J. G. **Perdas de água por evaporação de um solo cultivado com milho nos sistemas de plantio direto e convencional**. 2008, 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria, 2008.



ANEEL -AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA –RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA Nº 1.280, DE 17 DE ABRIL DE 2012. Homologa as tarifas de fornecimento de energia elétrica e as Tarifas de Uso dos Sistemas de Distribuição, **Diário oficial da união, Brasília, DF, 20 de abr. 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/pubreh20121280.pdf>>**. Acesso em 27 fev. 2013.

ARAYA, A. et al. Crop coefficient, yield response to water stress and water productivity of teff (*Eragrostis tef* (Zucc.), **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.98, n. 5, p.775-783, Mar. 2011.

ASSEFA, Y.; STAGGENBORG ,S.A.; PRASAD, P.V.V. Grain sorghum water requirement and responses to drought stress: A review. **CROP MANAGEMENT**, Minnesota, Nov. 2010 Disponível em: < <http://www.plantmanagementnetwork.org/pub/cm/review/2010/water/>> Acesso em 10 de Fev. 2013.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official Methods of Analysis**, 16<sup>th</sup>, 3. ed. AOAC INTERNATIONAL, Gaithersburg, MD. 1997.

AWIKA, J. M.; ROONEY, L.W. Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health, **Phytochemistry**, v. 65 p.1199–1221; may. 2004.

BALL, R.A.; OOSTERHUIS,D. M.; MAUROMOUSTAKOS, A. Growth Dynamics of the Cotton Plant during Water-Deficit Stress, **Agronomy Journal**, v.86, p.788-795, sep/oct, 1994

BALOTA, M. et al. Gas Exchange and Transpiration Ratio in Sorghum, **Crop Science**, Madison, v. 48, n.6, p. 2361-2371, Nov. 2008.

BARROS, R. C. et al. Viabilidade econômica da substituição da silagem de sorgo por cana-de-açúcar ou bagaço de cana amonizado com ureia no confinamento de bovinos, **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, Salvador, v.11, n.3, p.555-569. jul/set, 2010.

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

BERGAMASCHI, H. et al. Maize yield and rainfall on different spatial and temporal scales in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.5, p.603-613, mai. 2007.

BERGONCI, J. I. et al.. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.7. p.949-956, jul. 2001.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; BEZERRA, J. R. C., BRANDÃO, Z. N. Evapotranspiração real obtida através da relação entre o coeficiente dual de cultura da FAO-56 e o NDVI, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, 404 – 414, set. 2010.

BLUM, A.; Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive?, **Australian Journal of Agricultural Research**, oxford v.56, p.1159–1168, Nov. 2005.

BOYER, J. S. Plant productivity and environment. **Science** v.218, p.443 - 448. Oct. 1982 .

BUSO, W. H. D. et al., Utilização do sorgo forrageiro na alimentação animal. **PUBVET**, Londrina, V. 5, N. 23, p. 1-29. 2011.

CABELGUENNE, M.; DEBAEKE, P. Experimental determination and modeling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soybean, sorghum and wheat. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.202, n.2, p.175-192, 1998.

CAMACHO, R. et al. Vegetative growth of grain sorghum in response to phosphorus nutrition. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v.59, n.4. p.771-776, Oct./Dec. 2002.

CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. CS615 Water Content Reflectometer Instruction Manual. Version 8221-07. Logan, UT: Campbell Scientific, Inc, 1996.

CARCIOFI, A. C. Qualidade e digestibilidade de alimentos comerciais de diferentes segmentos de mercado para cães adultos, **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, Salvador, v.10, n.2, p. 489-500, abr/jun. 2009.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.25, n.1, p.183-188, 1995.

CARLESSO, R. et al. Resposta do sorgo granífero a déficits hídricos aplicados durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, **Ciência Rural**, Santa Maria v.27, n.2, Apr./Jun. 1997.

CARMO, G. A. **Crescimento, nutrição e produção de cucurbitáceas cultivadas sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e doses de adubação nitrogenada**, 2009. 182f. Tese (Doutorado em agronomia: fitotecnia,) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido – Mossoró, 2009.

CARVALHO, M. **Variações morfofisiológicas e eficiência do uso da água em *Ricinus communis* l. submetida ao déficit hídrico regulado**, 2010. 106f. Tese (doutorado em Produção Vegetal)- Universidade Estadual de Santa Cruz – Ilhéus, 2010.

CECHIN, I. Photosynthesis and Chlorophyll Fluorescence in Two Hybrids of Sorghum under Different Nitrogen and Water Regimes, **Photosynthetica**, v.35, n.2, p.233-240, 1998.

CHAUDHURI, U. N.; KANEMASU, E. T.; Effect of water gradient on sorghum growth, water relations and yield. **Canadian Journal of Plant Science**. Ottawa, v.62, p.599 – 607, jul. 1982.

CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought from the genes to the whole plant. **Functional Plant Biology** Oxford, v.30, n.3 p. 239-264, 2003.

CHRISTOFIDIS, D. Água na produção de alimentos: o papel da academia e da indústria no alcance do desenvolvimento sustentável, **Revista ciências exatas**, Taubaté, v. 12, n. 1, p. 37-46, 2006.

COLAIZZI, P. D. et al. Comparison of Sdi, Lapa, and Spray irrigation performance for grain sorghum, **Transactions of the ASAE**, Michigan, v.47 n.5 p.1477–1492, sep/oct. 2004.

Conab - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Indicadores da agropecuária**, novembro 2012 / Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab, 2012.

CQFS-RS/SC - COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

DALMAGO, G. A. **Dinâmica da água no solo em cultivos de milho sob plantio direto e preparo convencional**. 2004. 245 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto alegre 2004.

DIWARA, B. **Effect of planting date on growth, development, and yield of grain sorghum hybrids** 2012. 75f. Thesis (Master of science), Kansas State University - Manhattan, 2012.

DUARTE, J. O. **CULTIVO DO SORGO: MERCADO E COMERCIALIZAÇÃO**. Sete Lagoas, Embrapa Milho e Sorgo, 2009. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Sorgo/CultivodoSorgo/mercado.htm>> Acesso em: 17 set. 2012.

EMATER/ASCAR - ASSOCIAÇÃO RIOGRANDENSE DE EMPREENDIMENTOS DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL -EMATER/RS.. **BOLETIM INFORMATIVO Nº1741, ACOMPANHAMENTO DE PREÇOS RECEBIDOS PELOS PRODUTORES DO RIO GRANDE DO SUL**, Emater-RS, 2013. Disponível em: <[https://intranet.emater.tche.br/intranet/sistemas/sispreco/php/relatorios/relatorio\\_precos\\_sem\\_anais\\_recebidos2.php](https://intranet.emater.tche.br/intranet/sistemas/sispreco/php/relatorios/relatorio_precos_sem_anais_recebidos2.php)> Acesso em: 20 de fev. 2013.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.

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

ENGLISH, M.; RAJA; S.N.; Perspectives on deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.32, n.1, p.1-14, Nov. 1996.

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, **The ETo Calculator, Evapotranspiration from a reference surface**, Reference Manual, Version 3.1 January, 2009. 38p.

FARAH, S. M. et al. Grain sorghum response to supplementary irrigations under post-rainy season conditions, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.33 p.31-41. 1997.

FARRE, I.; FACI, J.M. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.83, p.135–143, May. 2006.

FEPAGRO; **Indicações técnicas para o cultivo do milho e do sorgo no Rio Grande do Sul: Safras 2011/2012 e 2012/2013**. / Organizado por Lia Rosane Rodrigues e Paulo Regis Ferreira da Silva. – Porto Alegre: FEPAGRO, 2011. 140 p.

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

FERNANDEZ, S. C.. **Morfofisiologia da cultura de batata submetida a diferentes regimes hídricos**, 2008, 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, 2008.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, Nov./Dec. 2011.

FLEXAS, J. et al. Keeping a positive carbon balance under adverse conditions: responses of photosynthesis and respiration to water stress. **Physiologia Plantarum**, Kobenhavn, v.127, n.3, p. 343-352, Jul. 2006.

FRANÇOIS, T. **Relações hídricas e trocas gasosas em plantas de feijão submetidas à irrigação deficitária**, 2012, 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria 2012.

FREITAS, C. A. S. et al. Produção de matéria seca e trocas gasosas em cultivares de mamoneira sob níveis de irrigação, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.11, p.1168–1174, Nov. 2011.

FRIZZONE, J. A. Planejamento da irrigação com uso de técnicas de otimização. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 1, n. 1, p. 24–49, dez. 2007.

GEERTS, S.; RAES, D.; Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.96 n.9, p.1275–1284, Sep. 2009.

GUBIANI, P. I; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo - exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v 36, n.2, p.664-668, mar./abr. 2006.

HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; STRECK, N. A. O clima de Santa Maria, **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v.1, n.38, p.43-58, jan./jun. 2009.

HOWELL T. A. et al. Evapotranspiration of Deficit Irrigated Sorghum, in: **World Environmental and Water Resources Congress, 2007**: Disponível em: [https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:QosTUP9jvDgJ:www.cprl.ars.usda.gov/wmru/pdfs/Howell%2520et%2520al%2520EWRI%25202007%252040927-2591.pdf+&hl=pt-BR&gl=br&pid=bl&srcid=ADGEEShe214lzo8ys6CBDG0zthfBP9RZaKQJkie-pELkm0wHJsYsG5QMhkCJWM0grfUosloVrM9nKY\\_5wjAN1oFo-4Eki3sGr4ukHkcT87url2eJLMRBaeYNTNkMTgLkcuQ2MIDS9H0m&sig=AHIEtbSxHTuATqvs9UJI7YuniXuDvE9z4w](https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:QosTUP9jvDgJ:www.cprl.ars.usda.gov/wmru/pdfs/Howell%2520et%2520al%2520EWRI%25202007%252040927-2591.pdf+&hl=pt-BR&gl=br&pid=bl&srcid=ADGEEShe214lzo8ys6CBDG0zthfBP9RZaKQJkie-pELkm0wHJsYsG5QMhkCJWM0grfUosloVrM9nKY_5wjAN1oFo-4Eki3sGr4ukHkcT87url2eJLMRBaeYNTNkMTgLkcuQ2MIDS9H0m&sig=AHIEtbSxHTuATqvs9UJI7YuniXuDvE9z4w). Acesso em: 20 de fev de 2013.

KAKANI, V. G. et al. Leaf photosynthesis and carbohydrates of CO<sub>2</sub>-enriched maize and grain sorghum exposed to a short period of soil water deficit during vegetative development, **Journal of Plant Physiology**, v.168 n.18, p.2169– 2176, Dec. 2011.

KANG, S. et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.55, n.3, p.203-216. Jun 2002.

KANG, S.; SHI, W.; ZHANG, J. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. **Field Crops Research**, v.67, n.3, p.207–214, Aug. 2000.

KAPANIGOWDA, M. H. et al. Transpiration Ratio in Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] for Increased Water-use Efficiency and Drought Tolerance, **Journal of Arid Land Studies**, v.22, n.1, p.175 -178, 2012.

KIDAMBI, S. P.; KRIEG, D. R.; ROSENOW, D. T.; Genetic Variation for Gas Exchange Rates in Grain Sorghum, **Plant Physiology**. v.92, n.4, 1211-1214, Apr. 1990.

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.

KLEIN, V. A. et al. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro, **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40 n.7, p.1550-1556, jul. 2010.

KNIES A. E. **Temperatura e umidade de um solo franco arenoso cultivado com milho**. 2010. 104p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria, 2010.

LEÃO, D. A. S.; FREIRE, A. L. O. MIRANDA, J. R. P. Estado nutricional de sorgo cultivado sob estresse hídrico e adubação fosfatada, **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 74-79, jan./mar. 2011.

LEITE, P. R. S. C. et al. Desempenho de frangos de corte e digestibilidade de rações com sorgo ou milho e complexo enzimático, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.3, p.280-286, mar. 2011.

LEVIEN, R. **Condições de cobertura e métodos de preparo do solo para a implantação da cultura de milho (*Zea mays* L.)**. 1999. 305 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

LIMA, A. J.; GUIMARÃES J. R, S. C.; FIETZ, C. R.; CAMACHO. J. R. Avaliação e análise da eficiência energética na irrigação em sistemas pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.499–505, Jul./Ago. 2009.

LIMA, N. R. C. B.; SANTOS, P. M.; MENDONÇA, F. C. ARAUJO, L.C. Critical periods of sorghum and palisadegrass in intercropped cultivation for climatic risk zoning, **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.40, n.7, p.1452-1457, jul. 2011.

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.

MAGALHAES FILHO, J. R. et al. Deficiência hídrica, trocas gasosas e crescimento de raízes em laranjeira Valência' sobre dois tipos de porta-enxertos. **Bragantia**. Campinas, v.67, n.1, p.75-82, 2008.

MAGALHÃES, P. C. et al. Caracterização ecofisiológica de linhagens de milho submetidas a baixa disponibilidade hídrica durante o florescimento, **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.8, n.3, p. 223-232, 2009.

MAGALHAES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; **Ecofisiologia da Produção de Sorgo**. Sete Lagoas, Embrapa Milho e Sorgo, 2003, 4p. (Embrapa Milho e Sorgo, Circular Técnica 87).

MANNERING, J. V.; MEYER, L. D. The effect of various rates of surface mulch on infiltration and erosion. **Soil Science Society of American Proceeding**, Madison, v.27, n.1, p.84-86, 1963.

MARIANO, K. R. et al. Fotossíntese e tolerância protoplasmática foliar em *Myracrodruon urundeuva* Fr. All. submetida ao déficit hídrico. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 1, p. 72-77, 2009.

MARQUES, P. A. A.; MARQUES, T. A.; FRIZZONE, J. A. Viabilidade econômica sob condições de risco para a irrigação da cana-de-açúcar na região de Piracicaba- SP, **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 1, p. 55-65, jan./mar. 2006.

MARTINS, J. D. et al. Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho, **Revista Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p.192 - 205, 2012.

MARTINS, J. D. **Modificações morfofisiológicas em plantas de milho submetidas a déficit hídrico**, 2010, 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, 2010.

MASTORILLI, M.; KATERJI, N. RANA, G. Water efficiency and stress on grain sorghum at different reproductive stages, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.28, n.1, p.23-34, Aug. 1995.

MELO, D. J. **Avaliação de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench,) e milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R, BROWN) sob diferentes níveis de água no solo**, 2006. 48f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia / Sistemas Agrossilvipastoris no Semi-Árido) Universidade Federal de Campina Grande – Patos, 2006.

MENDES, R. S. **Determinação da evapotranspiração por métodos direto e indiretos e dos coeficientes de cultura para a soja no Distrito Federal**. 2006. 58p. Dissertação (Mestrado. em Ciências Agrárias) Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Universidade de Brasília - Brasília, 2006.

MERTENS, D. R. Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fibre in feeds with refluxing beakers or crucibles: collaborative study, **Journal of AOAC International**, v.85, p.1217-1240, 2002.

MOLDEN, D. et al. A Water-productivity Framework for Understanding and Action. **In:**

KIJNE, J.W.; BARKER R.; MOLDEN D. (EDS), **Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement**, CAB International. Sri Lanka, p. 1-11. 2003.

MOREIRA, L. R. **Caracterização morfofisiológica de cultivares de sorgo sacarino em estresse hídrico**, 2011, 89f. Tese (Doutorado em fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa –Viçosa, 2011.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre-RS: Secretaria de Agricultura, 1961. 42p.



MORGAN, J. M. Osmoregulation and water stress in higher plants. **Annual review of plant physiology**, New York, v.35, p.299-319, Jun. 1984.

NASCIMENTO, R. Crescimento de plantas de sorgo sob diferentes disponibilidades de água no solo **Revista Educação Agrícola Superior** v.23, n.1, p.53-54, 2008.

NEUMANN, M. et al. Avaliação do Valor Nutritivo da Planta e da Silagem de Diferentes Híbridos de Sorgo (*Sorghum bicolor*, L. Moench), **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.31, n.1, p. 293-301, 2002.

NOGUEIRA, S. S. S.; NAGAI, V. Deficiência hídrica simulada nos diferentes estádios de desenvolvimento de um cultivar precoce de soja, **Bragantia**, Campinas, v.47. n.1, p. 9-14, 1988.

OLIVEIRA, E. C. A. et al.. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.6, p.617-625, jun. 2011.

PAIVA, A. S. et al. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.1, p. 161-169, jan./apr. 2005.

PASSOS, C. D.; PASSOS, E. E. M.; PRADO, C. H. B. A. **Comportamento sazonal do potencial hídrico e das trocas gasosas de quatro variedades de coqueiro-anão**. Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v.27, n.2, p.248-254, ago. 2005.

PAYERO, J.O. et al. 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**, Campina Grande, v.4, n.3, p.465-473, set./dez. 2000.

PEITER, M. X.; CARLESSO, R. Comportamento do sorgo granífero em função de diferentes frações da água disponível no solo, **Ciência Rural**, v.26, n1, P.51-55, 1996.

PEREIRA, L. S. Uso sustentável da água e convivência com a escassez: revisitando conceitos e indicadores, **Ingenieria dela água**, v.14, n.3, p. 237-252, 2007.

PETRY, M. T. et al. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.3, p.531-539, 2007.

PETRY, M. T., **Interação solo-planta e disponibilidade de água no solo as plantas de sorgo e soja**. 2000. 127 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, 2000.

PINTO, C. M. **Respostas morfológicas e fisiológicas do amendoim, gergelim e mamona a ciclos de deficiência hídrica**, Dissertação (Mestrado em Fitotecnia/Agronomia) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.

RITCHIE, J. T.; BURNETT, E. & HENDERSON, R.C. Dryland evaporative flux in a subhumid climate. 3. Soil water influences. **Agronomy Journal**, Madison, v. 64, p.168-173, 1972.

RODRIGUES, G. et al. Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modelling: Ranking for water saving vs. farm economic returns, **Agricultural Water Management** Amsterdam, v. 126, p.85–96, Aug. 2013.

RODRIGUES, G. C.; PEREIRA, L.S. Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs, **Biosystems engineering**, v.103, n.4, p. 536–551, Aug. 2009 .

ROSA, R. D. et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software: 2. Model testing. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 103 p.62– 77, jan. 2012.

ROSENTHAL, W. D.; ARKIN, G. F. & SHOUSE, P. L. Water deficit effects on transpiration and leaf growth. **Agronomy Journal**, Madison, v.79, p.1019- 1026, 1987.

SAGE, R. F.; ZHU, X. G. Exploiting the engine of C4 photosynthesis, **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v.62, n. 9, p. 2989–3000, 2011.

SALDANHA, G. S. **Evaporação de água do solo na fase inicial de desenvolvimento das culturas do milho e soja**, 2009, 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria, 2009.

SANTOS R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.3, p.287-294, set./dez. 1998.

SANTOS, F. G. **Cultivares de Sorgo**, Sete Lagoas, MG Embrapa Milho e Sorgo, 2003, 3p. (Embrapa Milho e Sorgo, Comunicado Técnico 77).

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SANTOS, K. L. **Influência de lâminas de irrigação e intervalos de corte sobre a produtividade da rebrota de *Hemarthria altíssima***, 2009. 99 f . Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria, 2009.

SAUSEN, T. L. **Respostas fisiológicas de *Ricinus communis* à redução na disponibilidade de água no solo**, 2007 87p. Dissertação (Mestrado em fitotecnia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul- porto alegre, 2007.

SCHEUERMANN, N. G. **Utilização do sorgo em rações para frangos de corte**, Concórdia, SC. Embrapa Suínos e Aves, 1998, 3p. (Embrapa Suínos e Aves, Comunicado Técnico 09).

SECKLER, D.; MOLDEN, D.; SAKTHIVADIEL, R. The Concept of Efficiency in Water Resource Management and Policy. Intern. **Water Management Institute**, Colombo, Sri Lanka. p.37-51, 1998.

SENGER, C, et al, Evaluation of autoclave procedures for fibre analysis in forage and concentrate feedstuffs, **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdam, v. 146, n. 12, p. 169-174, 2008.

SHARMA, P.N, NETO, E. water production function of sorghum for northeast brazil, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.11, n.2, p.169-180, 1986.

SILVA, C. A. S.; PARFITT, J. M. B. **Irrigação por inundação intermitente para culturas em rotação ao arroz em áreas de várzea do Rio Grande do Sul**, Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005,12p. (Embrapa Clima Temperado. Circular Técnica, 46).

SILVA, J. D. T. et al. Uso de sorgo com baixo teor em taninos na alimentação de frangos de corte, **Nucleus Animalium**, Ituverava, v.1, n.2, p.39-52,n. 2009.

SKONIESKI et al. Produção, caracterização nutricional e fermentativa de silagens de sorgo forrageiro e sorgo duplo propósito, **Acta Scientiarum, Animal Sciences**, Maringá, v.32, n. 1, p. 27-32, 2010.

SOLAIMALAI, A. ; RAVISANKAR, N. ; CHANDRASEKARAN, B. Water management to sorghum - A review, **Agricultural Reviews**, v.22, n.2, p.115 - 120, 2001.

SOUSA, V. F. et al. Eficiência do uso da água pelo meloeiro sob diferentes frequências de irrigação, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.2, p.183-188, Mai./Ago. 2000.

STEDUTO, P. Water use efficiency. In: **Sustainability of Irrigated Agriculture** (PEREIRA, L. S; FEDDES, R.A; GILLEY, J. R.; LESAFFRE, B. Eds), p.193–209. 1996.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. **Irrigation Science**, v.25, n.3, p.189–207, mar. 2007.

TABOSA, J. N.; REIS, O. V.; BRITO, A. R. M. B. Comportamento de cultivares de sorgo forrageiro em diferentes ambientes agroecológicos dos estados de Pernambuco e Alagoas, **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.1, n.2, p.47-58, 2002.

TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, E. F., Relações hídricas e trocas gasosas na seleção precoce de clones de eucalipto para ambientes com diferenciada disponibilidade de água no solo, **FLORESTA**, Curitiba, PR, v.38, n.2, abr./jun. 2008.

TENNAKOON, S.B.; MILROY, S.P.; Crop water use and water use efficiency on irrigated cotton farms in Australia, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.61, p.179–194, 2003.

TOLK , J. A.; HOWELL, T. A.; Field water supply: yield relationships of grain sorghum grown in three USA Southern Great Plains soils, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.95, p.1303 – 1313, 2008.

TOLK, J. A., HOWELL, T. A. Measured and simulated evapotranspiration of grain sorghum with full and limited irrigation in three high plain soils. **Transactions of the ASAE**, Michigan, v.44, n.6, p.1553–1558, 2001.

TOLK, J. A.; EVETT, S. R.; Lower Limits of Crop Water Use in Three Soil Textural Classes, **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.76: n.2, p. 607-616, Mar./apr. 2012.

TOLK, J. A.; HOWELL, T. A. Water use efficiencies of grain sorghum grown in three USA southern great plains soils, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.59, n.12, p.97-111, Mar. 2003.

TURCO, J. E. P.; RIZZATTI, G. S.; PAVANI, L. C. Custo de energia elétrica em cultura do feijoeiro irrigado por pivô central, afetado pelo manejo da irrigação e sistemas de cultivo, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29 n.2 Apr./Jun. 2009.

TURNER, N.C; BEEGG, J. E. Stomatal Behavior and Water Status of Maize, Sorghum, and Tobacco under Field Conditions, **Plant Physiology**, Rockville, v.51, n.1. p.31-36, jan. 1973.

USDA- Soil Conservation Service. Soil Survey Investigations report n.1. Whashington, 1972. 63p.

VALENTE, J. O. **Manejo cultural do sorgo para forragem**. Sete Lagoas, MG Embrapa Milho e Sorgo, 1992. p.5-7. (Embrapa Milho e Sorgo, Circular Técnica,17).

VIEIRA JUNIOR, P. A. et al. Relações entre o potencial e a temperatura da folha de plantas de milho e sorgo submetidas a estresse hídrico. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringa, v. 29, n.4, p.555-561, 2007.

VON PINHO, R. G.; et al. Produtividade e qualidade da silagem de milho e sorgo em função da época de semeadura, **Bragantia**, v. 66, n. 2, p. 235-245, 2007.

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.

## **APÊNDICES**

Apêndice A - Resultado do quadrado médio da análise de variância para fração de água disponível no solo para os diferentes manejos de irrigação durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo, Santa Maria, RS, 2013.

ET <sub>o</sub>	DAE	Quadrado médio		CV (%)	DMS	ET <sub>o</sub>	DAE	Quadrado médio		CV (%)	DMS
		Tratamento	Erro					Tratamento	Erro		
4,86	0	0,0014*	0,0003	1,88	0,0279	246,23	50	0,4288*	0,0067	19,49	0,1236
9,46	1	0,0025*	0,0005	2,29	0,0339	252,02	51	0,5183*	0,0055	16,27	0,1122
11,6	2	0,0009*	0,0002	1,67	0,0250	258,37	52	0,3831*	0,0042	16,43	0,0986
13,47	3	0,0018*	0,0003	1,90	0,0283	264,32	53	0,3128*	0,0040	17,90	0,0956
14,76	4	0,0033*	0,0004	2,24	0,0330	270,13	54	0,5037*	0,0036	12,10	0,0908
16,58	5	0,0044*	0,0005	2,38	0,0349	273,94	55	0,4190*	0,0034	12,19	0,0887
19,84	6	0,0063*	0,0007	2,84	0,0412	277,52	56	0,4643*	0,0043	11,77	0,0990
24,36	7	0,0057*	0,0008	3,03	0,0434	279,36	57	0,3994*	0,0049	10,69	0,1055
29,74	8	0,0015*	0,0001	1,38	0,0207	285,29	58	0,4035*	0,0044	9,00	0,0998
35,35	9	0,0028*	0,0006	2,56	0,0378	290,75	59	0,2933*	0,0044	9,24	0,1004
40,92	10	0,0044*	0,0009	3,13	0,0455	297,86	60	0,3569*	0,0044	9,03	0,1002
46,6	11	0,0042*	0,0011	3,60	0,0512	306,92	61	0,2445*	0,0052	11,07	0,1093
52,44	12	0,0013*	0,0002	1,71	0,0255	308,77	62	0,2193*	0,0049	10,02	0,1061
58,05	13	0,0026*	0,0008	2,96	0,0434	310,14	63	0,1839*	0,0053	9,34	0,1105
63,12	14	0,0026	0,0012	3,73	0,0538	313,79	64	0,1230*	0,0058	9,17	0,1148
68,78	15	0,0038	0,0018	4,55	0,0644	318,46	65	0,0446*	0,0031	6,03	0,0841
73,54	16	0,0035	0,0022	5,12	0,0644	324,07	66	0,0388*	0,0033	6,54	0,0866
77,12	17	0,0033	0,0026	5,70	0,0768	330,24	67	0,0382*	0,0044	7,98	0,1003
79,68	18	0,0032	0,0022	5,49	0,0719	333,17	68	0,0317*	0,0035	6,69	0,0898
84,34	19	0,0047	0,0025	5,96	0,0765	338,52	69	0,0582*	0,0022	5,32	0,0708
89,38	20	0,0051	0,0026	6,19	0,0776	344,11	70	0,0617*	0,0026	6,02	0,0771
95,27	21	0,0052	0,0034	7,20	0,0890	350,33	71	0,0902*	0,0027	6,02	0,0783
101,63	22	0,0043	0,0033	7,26	0,0872	351,88	72	0,0699*	0,0023	5,41	0,0733
107,95	23	0,0674*	0,0020	5,59	0,0687	354,58	73	0,0539*	0,0020	4,87	0,0673
114,62	24	0,0486*	0,0025	6,57	0,0764	356,22	74	0,0377*	0,0019	4,67	0,0662
119,6	25	0,0412*	0,0030	7,57	0,0837	360,49	75	0,0389*	0,0018	4,58	0,0642
124,51	26	0,1443*	0,0030	7,43	0,0833	366,17	76	0,0488*	0,0023	5,40	0,0727
131,29	27	0,1220*	0,0034	8,73	0,0890	372,5	77	0,0569*	0,0027	6,22	0,0795
137,1	28	0,1109*	0,0033	9,18	0,0876	378,29	78	0,0671*	0,0022	5,20	0,0716
140,72	29	0,3011*	0,0031	7,51	0,0844	384,12	79	0,0530*	0,0033	6,81	0,0867
146,38	30	0,2444*	0,0038	9,15	0,0936	390,07	80	0,0461*	0,0032	7,33	0,0862
152,21	31	0,2192*	0,0041	10,42	0,0971	395,63	81	0,1353*	0,0028	6,99	0,0803
158,28	32	0,1777*	0,0038	9,54	0,0937	401,19	82	0,1204*	0,0030	7,78	0,0838
164,5	33	0,1271*	0,0037	10,88	0,0926	407,32	83	0,2661*	0,0030	7,13	0,0832
170,97	34	0,1069*	0,0036	12,28	0,0913	412,84	84	0,2180*	0,0029	7,63	0,0811
174,27	35	0,2505*	0,0036	11,28	0,0904	417,8	85	0,1924*	0,0029	8,28	0,0822
179,89	36	0,3576*	0,0047	12,62	0,1034	422,72	86	0,1737*	0,0031	9,24	0,0845
183,17	37	0,2938*	0,0034	11,44	0,0882	427,68	87	0,1626*	0,0032	9,95	0,0859
188,98	38	0,2778*	0,0035	13,17	0,0900	433,49	88	0,4001*	0,0038	10,62	0,0928
195,24	39	0,2481*	0,0034	15,24	0,0885	439,05	89	0,3509*	0,0034	11,31	0,0889
197,37	40	0,2316*	0,0033	14,98	0,0865	443,96	90	0,0676*	0,0034	7,39	0,0887
202,66	41	0,2083*	0,003	16,74	0,0827	448,69	91	0,0605*	0,0028	7,68	0,0802
208,22	42	0,4259*	0,0029	14,31	0,0818	453,56	92	0,0615*	0,0029	8,70	0,0824
210,93	43	0,0768*	0,0043	9,11	0,0993	458,96	93	0,0648*	0,0032	10,07	0,0858
216,74	44	0,0746*	0,0029	8,94	0,0818	464,54	94	0,0666*	0,0038	12,28	0,0938
222,87	45	0,0821*	0,0031	11,13	0,0842	470,35	95	0,0672*	0,0043	14,58	0,0998
229,79	46	0,0859*	0,0034	14,90	0,0881	476,12	96	0,0685*	0,0048	16,98	0,1044
235,77	47	0,0956*	0,0041	19,51	0,0972	482,08	97	0,0690*	0,0054	20,76	0,1108
236,6	48	0,4959*	0,0038	14,58	0,0930	488,4	98	0,0667*	0,0061	25,42	0,1176
240,09	49	0,4094*	0,0043	17,45	0,0995						

\* Significativo em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F.

Apêndice B - Resultado da análise de variância para a lâmina de água no solo acumulada na camada de 0,0-0,10m para os diferentes manejos de irrigação durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo, Santa Maria, RS, 2013.

DAE	Quadrado médio		CV (%)	DMS	DAE	Quadrado médio		CV (%)	DMS
	Tratamento	Erro				Tratamento	Erro		
0	4,357	3,608	6,93	2,859	50	264,634*	1,502	7,59	1,844
1	4,720	2,273	5,64	2,269	51	156,421*	4,013	12,23	3,015
2	6,905	2,975	6,13	2,596	52	73,210*	2,272	10,52	2,269
3	6,032	2,360	5,56	2,312	53	39,288*	1,586	9,64	1,896
4	5,496	2,187	5,42	2,226	54	194,470*	4,613	13,12	3,233
5	4,628	2,031	5,28	2,145	55	151,027*	2,347	9,79	2,306
6	4,581	1,898	5,19	2,074	56	216,462*	2,772	9,42	2,506
7	4,723	1,744	5,07	1,988	57	184,829*	2,249	8,66	2,257
8	10,416	4,079	6,81	3,040	58	152,157*	4,147	11,56	3,065
9	6,077	2,508	5,71	2,384	59	115,282*	3,039	10,70	2,624
10	4,734	1,888	5,08	2,068	60	247,260*	3,412	10,75	2,780
11	5,506	2,020	5,35	2,139	61	109,488*	2,194	9,85	2,230
12	6,606	3,244	6,17	2,711	62	115,275*	2,816	11,15	2,526
13	7,563*	2,527	5,70	2,393	63	123,550*	3,583	12,37	2,849
14	7,308*	2,611	5,90	2,432	64	118,124*	4,256	13,29	3,105
15	6,312	2,694	6,10	2,470	65	112,306*	8,106	13,65	4,285
16	6,081	2,965	6,61	2,592	66	48,375*	5,623	12,24	3,569
17	5,155	3,163	6,96	2,677	67	30,055*	5,400	12,82	3,498
18	3,681	2,698	6,57	2,472	68	28,083*	6,669	13,98	3,887
19	3,172	2,563	6,50	2,410	69	74,948*	6,818	13,53	3,930
20	2,183	2,582	6,66	2,419	70	59,878*	5,151	12,29	3,416
21	2,051	2,805	7,03	2,521	71	136,016*	4,867	11,12	3,320
22	1,875	2,884	7,35	2,556	72	98,888*	5,155	11,47	3,417
23	44,331*	4,551	9,10	3,211	73	85,083*	5,406	11,61	3,500
24	34,473*	4,661	9,79	3,250	74	100,909*	6,595	12,27	3,865
25	33,388*	4,567	10,25	3,216	75	76,347*	5,786	11,83	3,620
26	104,421*	3,682	9,30	2,888	76	59,541*	5,079	11,74	3,392
27	74,453*	4,012	10,94	3,015	77	49,994*	4,695	11,95	3,261
28	75,705*	3,745	11,21	2,913	78	85,734*	4,703	10,00	3,264
29	206,451*	6,027	11,62	3,695	79	50,310*	3,872	9,89	2,962
30	132,588*	3,802	10,20	2,935	80	34,601*	3,488	10,12	2,811
31	96,083*	3,517	10,68	2,823	81	98,106*	4,362	11,26	3,143
32	190,764*	3,544	9,86	2,834	82	73,783*	3,611	10,87	2,860
33	87,107*	3,633	11,46	2,869	83	190,277*	6,657	13,26	3,883
34	45,703*	3,138	11,89	2,666	84	142,821*	3,766	10,73	2,921
35	96,268*	3,685	12,29	2,889	85	116,149*	3,006	10,02	2,610
36	121,786*	4,601	13,28	3,228	86	91,970*	2,369	9,40	2,317
37	99,865*	4,156	13,08	3,068	87	80,512*	2,122	9,19	2,192
38	72,912*	2,938	11,78	2,580	88	219,850*	2,401	9,29	2,332
39	45,652*	2,160	10,94	2,212	89	156,728*	1,493	7,83	1,839
40	47,077*	2,219	11,25	2,242	90	52,704*	12,936	16,36	5,413
41	31,516*	1,870	10,82	2,058	91	25,971*	6,609	13,00	3,870
42	295,140*	1,804	8,88	2,022	92	19,746*	4,349	11,42	3,139
43	17,308	6,441	11,22	3,820	93	18,995*	3,004	10,33	2,609
44	5,006	3,040	8,69	2,624	94	18,060*	2,191	9,49	2,228
45	2,896	2,473	9,19	2,367	95	16,294*	1,648	8,77	1,932
46	2,736	1,640	8,88	1,928	96	14,054*	1,278	8,15	1,702
47	6,628*	2,264	11,36	2,265	97	10,850*	0,928	7,36	1,450
48	192,071*	2,296	9,98	2,281	98	8,265*	0,696	6,70	1,256
49	142,392*	1,480	8,38	1,831					

\* Significativo em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F.



Apêndice C - Resultado da análise de variância para a lâmina de água no solo acumulada na camada de 0,10-0,25m para os diferentes manejos de irrigação durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo, Santa Maria, RS, 2013.

DAE	Quadrado médio		CV (%)	DMS	DAE	Quadrado médio		CV (%)	DMS
	Tratamento	Erro				Tratamento	Erro		
0	25,364*	1,398	2,948	1,779	50	172,966*	6,114	9,146	3,722
1	21,147*	1,320	2,881	1,729	51	271,400*	4,721	7,872	3,270
2	21,676*	1,340	2,883	1,742	52	213,648*	4,717	8,321	3,269
3	20,080*	1,262	2,808	1,691	53	177,453*	5,176	9,115	3,424
4	21,165*	1,199	2,753	1,648	54	329,127*	5,614	8,271	3,566
5	20,032*	1,079	2,621	1,563	55	286,615*	4,335	7,318	3,134
6	19,078*	1,138	2,708	1,605	56	256,830*	5,001	7,413	3,366
7	18,266*	1,127	2,707	1,598	57	266,998*	6,024	7,905	3,694
8	18,088*	1,414	2,945	1,790	58	342,342*	10,571	9,837	4,894
9	16,730*	1,122	2,655	1,595	59	230,708*	11,011	9,950	4,994
10	17,480*	1,101	2,657	1,580	60	232,995*	10,669	9,491	4,916
11	16,266*	1,064	2,637	1,552	61	144,858*	11,817	10,533	5,174
12	16,715*	2,265	3,698	2,265	62	118,620*	10,799	9,730	4,946
13	16,424*	1,642	3,199	1,929	63	98,813	11,757	9,692	5,161
14	15,368*	1,532	3,125	1,863	64	65,871*	12,166	9,549	5,250
15	14,787*	1,371	2,986	1,762	65	35,131*	8,402	7,473	4,363
16	13,344*	1,379	3,030	1,768	66	23,698*	7,951	7,495	4,244
17	13,107*	1,356	3,031	1,752	67	24,561	8,914	8,093	4,494
18	13,984*	1,261	2,960	1,690	68	24,174*	7,517	7,217	4,127
19	14,072*	1,378	3,111	1,767	69	39,647*	6,993	6,981	3,980
20	13,476*	1,450	3,222	1,812	70	34,742*	7,113	7,171	4,014
21	11,746*	1,886	3,692	2,067	71	38,619*	6,589	6,769	3,864
22	11,176*	1,985	3,828	2,121	72	27,728*	6,221	6,502	3,754
23	39,239*	2,904	4,559	2,565	73	23,242*	6,018	6,312	3,692
24	24,046*	2,824	4,615	2,529	74	40,995*	5,626	5,982	3,570
25	18,744*	2,918	4,786	2,571	75	28,272*	5,810	6,143	3,628
26	65,600*	3,874	5,484	2,962	76	27,366*	6,634	6,726	3,877
27	52,412*	5,085	6,568	3,394	77	30,754*	7,276	7,215	4,060
28	46,961*	5,436	6,954	3,509	78	27,128*	6,634	6,653	3,877
29	166,885*	6,276	6,956	3,771	79	23,534*	7,092	7,147	4,008
30	138,598*	7,144	7,829	4,023	80	25,691*	7,569	7,629	4,141
31	144,449*	7,849	8,547	4,217	81	83,617*	7,859	7,816	4,219
32	96,025*	5,008	6,683	3,368	82	68,228**	7,967	8,093	4,248
33	90,883*	5,200	7,285	3,432	83	117,599*	7,332	7,477	4,076
34	88,581*	5,628	8,066	3,571	84	97,909*	7,695	8,028	4,175
35	174,695*	5,590	7,717	3,559	85	92,021*	7,652	8,232	4,163
36	243,556*	6,866	8,477	3,944	86	94,679*	8,047	8,760	4,270
37	199,837*	5,881	7,997	3,650	87	91,334*	7,882	8,845	4,226
38	194,552*	5,725	8,340	3,601	88	210,768*	8,068	9,000	4,275
39	175,046*	5,296	8,596	3,464	89	194,005*	8,019	9,416	4,262
40	167,573*	5,082	8,340	3,393	90	32,265*	7,436	7,369	4,104
41	145,615*	4,859	8,695	3,318	91	32,013*	7,051	7,710	3,997
42	214,172*	3,932	7,549	2,985	92	36,215*	7,352	8,215	4,081
43	62,939*	5,683	6,692	3,588	93	40,527*	8,013	8,970	4,261
44	47,658*	3,902	6,045	2,973	94	44,064*	8,823	9,849	4,471
45	53,376*	4,613	7,127	3,233	95	48,156*	8,926	10,362	4,497
46	56,509*	5,430	8,547	3,507	96	50,992*	8,929	10,798	4,497
47	56,885*	4,548	8,374	3,210	97	52,361*	8,994	11,433	4,514
48	272,596*	4,771	7,749	3,288	98	51,147*	8,673	11,763	4,433
49	215,766*	4,324	7,706	3,130					

\* Significativo em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F.

Apêndice D - Resultado da análise de variância para a lâmina de água no solo acumulada na camada de 0,25-0,55 m para os diferentes manejos de irrigação durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do sorgo, Santa Maria, RS, 2013.

DAE	Quadrado médio		CV (%)	DMS	DAE	Quadrado médio		CV (%)	DMS
	Tratamento	Erro				Tratamento	Erro		
0	15,596*	4,717	2,475	3,269	50	348,931*	15,420	5,499	5,910
1	11,920	4,922	2,537	3,339	51	464,258*	13,153	4,964	5,459
2	11,088	5,065	2,581	3,388	52	396,759*	11,906	4,755	5,194
3	9,901	5,020	2,577	3,372	53	378,306*	11,811	4,773	5,173
4	8,665	5,060	2,600	3,386	54	409,812*	11,519	4,544	5,108
5	9,158	5,052	2,606	3,383	55	338,529*	11,255	4,494	5,050
6	8,077	5,266	2,674	3,454	56	333,743*	12,674	4,674	5,358
7	7,861	5,412	2,722	3,501	57	247,165*	14,336	4,605	5,699
8	9,125	4,783	2,547	3,292	58	197,021*	8,563	3,410	4,404
9	6,008	4,955	2,592	3,350	59	129,819*	7,269	3,148	4,058
10	5,100	5,196	2,675	3,431	60	153,036*	6,713	3,044	3,900
11	4,677	5,515	2,777	3,535	61	135,759*	7,209	3,239	4,041
12	6,749	5,590	2,745	3,559	62	114,492*	7,380	3,200	4,089
13	5,043	5,975	2,862	3,679	63	78,768*	6,560	2,884	3,855
14	4,107	6,081	2,911	3,711	64	38,442*	7,414	2,998	4,098
15	3,578	6,276	2,980	3,771	65	19,916*	6,079	2,709	3,711
16	3,526	6,645	3,089	3,880	66	19,100*	6,496	2,861	3,836
17	2,913	6,989	3,196	3,979	67	24,477*	8,854	3,385	4,479
18	2,594	7,067	3,237	4,001	68	24,584*	6,610	2,839	3,870
19	3,018	7,268	3,304	4,058	69	38,621*	5,732	2,662	3,604
20	2,613	7,505	3,374	4,123	70	24,338*	6,043	2,779	3,700
21	2,796	7,733	3,445	4,186	71	33,653*	5,319	2,632	3,471
22	2,547	7,633	3,442	4,158	72	33,806*	6,265	2,785	3,767
23	87,222*	6,097	3,034	3,717	73	24,946*	5,704	2,642	3,595
24	50,178*	6,429	3,152	3,816	74	42,346*	5,535	2,537	3,541
25	33,136*	7,585	3,462	4,145	75	28,574*	5,620	2,586	3,568
26	100,422*	8,380	3,594	4,357	76	25,758*	5,815	2,679	3,630
27	75,496*	7,814	3,522	4,207	77	24,195*	5,556	2,666	3,548
28	60,468*	7,997	3,611	4,256	78	25,392*	5,660	2,689	3,581
29	154,970*	6,925	3,280	3,961	79	20,628*	5,859	2,804	3,643
30	119,945*	7,268	3,416	4,058	80	19,463*	6,046	2,910	3,701
31	107,681*	7,645	3,557	4,162	81	81,698*	5,826	2,873	3,633
32	72,311*	8,903	3,840	4,491	82	56,651*	6,327	3,054	3,786
33	70,328*	8,311	3,769	4,339	83	126,710*	5,061	2,703	3,386
34	68,264*	8,256	3,816	4,325	84	101,681*	6,189	3,059	3,744
35	144,800*	8,673	3,878	4,433	85	91,800*	6,922	3,293	3,960
36	211,757*	8,723	3,891	4,445	86	87,584*	7,122	3,398	4,017
37	172,201*	8,428	3,876	4,370	87	80,652*	7,464	3,529	4,112
38	185,876*	8,572	3,979	4,407	88	213,663*	7,409	3,516	4,097
39	204,352*	9,132	4,199	4,548	89	196,218*	7,522	3,618	4,128
40	172,263*	8,895	4,157	4,489	90	45,515*	9,453	3,780	4,628
41	203,655*	9,385	4,369	4,611	91	52,227**	8,464	3,690	4,379
42	288,746*	11,082	4,753	5,011	92	50,726*	8,315	3,721	4,340
43	110,480*	12,957	4,678	5,418	93	48,356*	8,579	3,848	4,409
44	127,992*	8,908	4,005	4,492	94	48,001*	8,550	3,911	4,401
45	129,165*	8,811	4,070	4,468	95	46,820*	9,140	4,114	4,551
46	135,048*	8,691	4,150	4,437	96	52,212*	9,814	4,339	4,715
47	164,688*	10,714	4,690	4,927	97	58,047*	10,870	4,660	4,962
48	381,716*	10,024	4,424	4,765	98	66,500*	12,567	5,111	5,336
49	329,939*	10,292	4,562	4,829					

\* Significativo em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F.

Apêndice E - Resultados do quadrado médio da análise de variância para a altura de plantas de sorgo, índice de área foliar (IAF) e índice de cobertura do solo pelo dossel vegetativo da cultura do sorgo submetida a diferentes níveis de reposição da  $ET_c$ . Santa Maria, RS. 2013.

D A E	Quadrado médio				Cv (%)	Equação	$r^2$
	Tratamento	Linear	Quadrático	Resíduo			
Altura de plantas							
19	1,84	4,64	0,33	1,16	9,92	y = 10,858 cm	--
22	0,40	0,47	0,26	1,10	7,76	y = 13,521 cm	--
25	1,95	4,60	1,26	1,64	7,53	y = 17,021 cm	--
29	8,37*	22,10*	1,26	1,96	5,95	y = 21,375 + 0,034x	0,88
33	9,40*	24,30*	3,38	2,39	5,45	y = 26,125 + 0,036x	0,86
35	57,68*	135,47*	10,01	5,70	7,40	y = 26,960 + 0,085x	0,78
39	135,57*	388,80*	13,50	7,39	7,30	y = 28,208 + 0,144x	0,96
44	229,26*	648,68*	12,04	12,36	8,74	y = 28,583 + 0,186x	0,94
49	175,01*	492,08*	28,17	12,22	8,03	y = 33,417 + 0,162x	0,94
53	461,15 *	1380,41*	0,04	24,53	9,86	y = 33,250 + 0,271x	0,99
57	928,38*	2774,41*	7,04	107,44	14,49	y = 47,500 + 0,385x	0,99
63	375,61 *	1056,13*	48,17	40,48	7,83	y = 66,417 + 0,237x	0,93
74	393,96*	1116,30*	57,04	35,70	7,31	y = 06,458 + 0,244x	0,94
80	415,33*	1178,13*	66,67	35,77	7,28	y = 66,500 + 0,251x	0,94
IAF							
19	0,0013	0,0003	0,0018	0,0019	12,48	y=0,3538	--
22	0,0091	0,0001	0,0228	0,0075	14,09	y=0,6167	--
25	0,0135	0,0270	0,0033	0,0133	10,93	y=1,0558	--
29	0,0139	0,0041	0,0294	0,0622	12,39	y=2,0125	--
32	0,5109*	1,3889*	0,1365	0,0807	10,26	y = 2,233+0,009x	0,90
35	0,8121 *	2,2936*	0,1365*	0,1519	11,94	y = 2,573+ 0,011x	0,94
39	1,7158*	3,6715*	1,4652*	0,2366	11,79	y = 3,25 + 0,014x	0,71
44	2,0761 *	5,2292*	0,9640	0,2504	10,14	y = 3,891 + 0,017x	0,83
49	2,4165*	5,4103*	1,6016	0,3784	10,16	y = 4,994 + 0,017x	0,74
53	2,2974*	5,9363*	0,9560	0,4498	10,49	y = 5,282 + 0,018x	0,86
60	1,7586*	3,7277*	1,4850	0,5590	11,37	y = 5,696 + 0,014x	0,70
74	0,9139	1,5481	1,0965	0,5218	11,61	y = 6,2230	--
87	0,2473	0,2421	0,3876	0,4266	12,20	y = 5,3529	--
Índice de cobertura do solo pelo dossel vegetativo							
13	1,89	1,07	1,33	9,25	20,50	y= 14,833 %	--
15	8,53	22,82	0,75	21,17	22,53	y= 20,417 %	--
19	20,56	32,27	27,00	12,50	13,18	y= 26,833%	--
22	13,56	32,27	0,33	30,75	16,15	y= 34,333%	--
26	48,31	104,02*	4,08	13,75	8,13	y= 45,583%	--
29	81,89	141,07	8,33	51,17	11,63	y= 61,500%	--
32	220,31*	546,02*	0,08	17,25	5,20	y = 64,830 + 0,241 x	0,82
35	142,53*	410,82*	0,75	6,67	3,08	y = 70,833 + 0,209x	0,96
43	76,08*	183,75*	44,08*	7,00	2,98	y = 80,00 + 0,14x	0,80
49	13,42	8,82	24,08	12,08	3,78	y= 91,917%	--

\* significativo ( $p \leq 0,05$ );

Apêndice F - Resultado do quadrado médio da análise de variância para a taxa fotossintética e taxa fotossintética total, condutância estomática e taxa de transpiração das plantas de sorgo submetida a diferentes níveis de reposição da ET<sub>c</sub>. Santa Maria, RS. 2013.

D	Quadrado médio				cv	Equação ajustada	r <sup>2</sup>
A	Tratamento	Linear	Quadrático	Resíduo	(%)		
E	Taxa fotossintética						
22	33,77	1,48	96,92	28,68	13,75	$y = 38,95 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	--
27	42,11	49,96	50,43	48,99	16,42	$y = 42,61 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	--
32	10,12	8,23	20,91	21,93	9,83	$y = 47,62 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	--
39	1442,31*	3905,64*	70,73	43,04	18,65	$y = 6,661 + 0,456x$	0,90
46	93,69*	279,96*	0,54	24,28	10,23	$y = 40,538 + 0,122x$	0,99
53	2321,91*	6434,72*	149,05*	25,69	12,46	$y = 4,06 + 0,58x$	0,92
60	388,44*	940,74*	192,04	56,37	14,73	$y = 36,980 + 0,220x$	0,80
71	108,68*	190,54*	103,29	28,31	12,01	$y = 38,004 + 0,101x$	0,58
84	214,80*	595,59*	39,07	20,28	8,58	$y = 41,342 + 0,178x$	0,92
Taxa fotossintética total							
22	0,005	0,004	0,0003	0,074	22,64	$y = 1,2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ planta}^{-1} \text{ s}^{-1}$	--
27	0,089	0,001	0,262	0,218	20,79	$y = 2,25 \mu\text{mol CO}_2 \text{ planta}^{-1} \text{ s}^{-1}$	--
32	4,010*	9,919*	2,112	1,043	15,43	$y = 5,18 + 0,02x$	0,82
39	90,280*	244,474*	8,167	2,444	20,85	$y = 0,36 + 0,11x$	0,90
46	40,828*	110,342*	9,588	4,436	14,36	$y = 9,87 + 0,08x$	0,90
53	314,922*	874,476*	19,693	5,623	17,57	$y = -0,003 + 0,22x$	0,92
60	81,751*	214,374*	30,849	11,215	19,47	$y = 10,51 + 0,11x$	0,87
71	28,557*	63,394*	16,137	4,551	15,59	$y = 10,05 + 0,06x$	0,74
84	10,157*	15,588*	11,634	2,940	12,39	$y = 12,05 + 0,03x$	0,51
Condutância estomática							
22	0,004	0,0025	0,0100	0,0034	18,15	$y = 0,322 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	--
27	0,011	0,0249	0,0003	0,0107	29,36	$y = 0,354 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	--
32	0,0156	0,0411*	0,0032	0,0070	19,21	$y = 0,436 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	--
39	0,4549*	1,3021*	0,054	0,0192	40,39	$y = -0,177 + 0,008x$	0,95
46	0,0673*	0,2009*	0,0002	0,0118	21,46	$y = 0,303 + 0,003x$	0,99
53	0,5198*	1,4476*	0,0014	0,0046	16,33	$y = -0,134 + 0,009x$	0,92
60	0,1768*	0,4048*	0,1134	0,0146	20,69	$y = 0,29 + 0,005x$	0,76
71	0,0315*	0,0208*	0,0661*	0,0047	18,05	$y = 0,053 + 0,012x - 0,0001x^2$	0,91
84	0,1000*	0,2058*	0,0759*	0,0063	13,06	$y = 0,40 + 0,003x$	0,68
Taxa de transpiração							
22	3,27	0,21	3,32	1,37	14,93	$y = 7,837 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	--
27	4,09	0,003	0,08	1,15	14,25	$y = 7,543 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	--
32	1,81	0,11	2,02	0,73	11,50	$y = 7,467 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	--
39	47,04*	111,68	5,03	1,49	18,17	$y = 1,9158 + 0,07718x$	0,79
46	7,20*	2,27	2,75	1,53	9,64	$y = 12,863 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	--
53	97,73*	217,67*	27,17*	1,61	13,50	$y = 2,68 + 0,11x$	0,74
60	16,06*	24,81*	15,07*	2,95	13,33	$y = 10,61 + 0,04x$	0,51
71	3,71*	4,788*	5,50*	0,65	11,04	$y = 3,94 + 0,11173x - 0,0007x^2$	0,92
84	22,56	60,71	1,71	1,88	11,11	$y = 8,807 + 0,056x$	0,89

\* significativo ( $P \leq 0,05$ );

Apêndice G - Resultado do quadrado médio da análise de variância para a eficiência intrínseca do uso da água em plantas de sorgo submetida a diferentes níveis de reposição da ET<sub>c</sub>. Santa Maria, RS. 2013.

D A E	Quadrado médio				cv (%)	Equação ajustada	r <sup>2</sup>
	Tratamento	Linear	Quadrático	Resíduo			
22	224,97*	624,53*	31,19	61,15	6,42	y = 133,26 - 0,183x	0,92
27	307,39	285,48	213,42	993,38	24,77	y = 127,27 μmol CO <sub>2</sub> mol <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O	-
32	720,62	1913,92*	31,46	416,70	18,06	y = 113,03 μmol CO <sub>2</sub> mol <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O	-
39	17943,02*	53490,63*	299,98	1444,71	26,47	y = 249,14 - 1,689x	0,99
46	867,36*	2509,75*	85,01	295,16	17,25	y = 122,44 - 0,365x	0,96
53	10231,47*	28629,77*	1159,95*	72,63	7,07	y = 197,72 - 1,24x	0,93
60	2007,57*	4755,87*	1232,23*	251,77	16,86	y = 161,39 - 1,93x + 0,0115x <sup>2</sup>	0,99
71	1609,65*	275,18	4342,73*	362,68	15,78	y = 195,51 - 2,81x + 0,022x <sup>2</sup>	0,95
84	1105,54*	1430,50*	1571,40*	111,25	11,84	y = 146,81 - 1,89x + 0,0129x <sup>2</sup>	0,90

\* significativo (P ≤ 0,05);

Apêndice H - Resultado do quadrado médio da análise de variância para perda de água acumulada na cultura do sorgo submetida a diferentes níveis de reposição da ET<sub>c</sub>. Santa Maria, RS. 2013.

D A E	Quadrado médio				cv (%)	Equação ajustada	r <sup>2</sup>
	Tratamento	Linear	Quadrático	Resíduo			
08	8,67	5,76	8,16	3,38	22,47	y = 8,19 mm	-
18	48,94	18,62	101,27	31,00	21,67	y = 25,69 mm	-
28	56,11	148,63	11,71	67,37	16,37	y = 50,12 mm	-
38	867,97*	1835,82*	17,99	194,53	15,56	y = 70,07 + 0,31x	0,70
48	1669,96*	3359,67*	119,03	468,16	15,44	y = 113,64 + 0,42	0,67
58	2644,77*	5262,63*	1105,95	1470,27	19,23	y = 166,27 + 0,52x	0,66
68	4809,47	10191,79	1906,38	1927,40	18,99	y = 231,13 mm	-
78	7355,90*	2179,33	16759,10*	2799,57	18,31	y = 195,86 + 0,94x	0,75
88	11179,11	24739,98	4911,76	2668,62	17,48	y = 223,80 + 1,14x	0,73
98	14891,01	32583,26	7718,14	3174,62	16,67	y = 255,67 + 1,32x	0,72

\* significativo (P ≤ 0,05);

Apêndice I - Resultado do quadrado médio da análise de variância para produção de forragem e produtividade da água e qualidade da forragem de sorgo submetida a diferentes níveis de reposição da ET<sub>c</sub>. Santa Maria, RS. 2013.

	Tratamento	Quadrado médio			cv (%)	Equação ajustada	r <sup>2</sup>
		Linear	Quadrático	Resíduo			
Produção de forragem e produtividade da água							
PMV	277298926*	824560614*	2198636	28965391	14,18	y=19424,42+296,57x	0,99
PMS	24852623,18*	70561192,41*	3860646,80	4203388,14	19,47	y= 5110,08+86,75x	0,94
WP MV	613,52	1524,297607	209,501633	207,23	12,00	y= 119,97 kg mm <sup>-1</sup>	--
WPi MV	17429,68*	43021,53*	8096,40*	459,14	10,96	y= 329,37 - 2,14x	0,82
WP MS	59,81	110,24	68,88	23,98	14,73	y=33,25 kg mm <sup>-1</sup>	-
WPi MS	1461,70*	3360,76*	978,67*	44,29	12,26	y= 91,71 - 0,59x	0,76
Qualidade da forragem							
MS	5,93	0,18	13,35	8,39	10,46	y = 27,71%	--
MM	3,95	11,76	0,00	0,47	10,8	y = 4,12 + 0,04x	0,99
PB	0,028	0,01	0,07	0,69	8,15	y = 10,26%	--
FDN	19,77*	20,83*	32,67*	4,27	4,43	y = 51,99 -0,28x + 0,002x <sup>2</sup>	0,90
FDA	19,07*	44,80*	10,06	2,83	7,61	y = 17,80-0,07x	0,78

\* significativo (p ≤ 0,05);

Apêndice J - Resultado do quadrado médio da análise de variância para rendimento de grãos, massa de 100 grãos, massa de grãos por espigas, comprimento da panícula, produtividade da água (WP) e produtividade da água irrigada (WPi), Receita, Lucro e Retorno econômico da cultura do sorgo submetido a diferentes níveis de reposição da ET<sub>c</sub>. Santa Maria, RS. 2013.

	Tratamento	Quadrado médio			cv (%)	Equação ajustada	r <sup>2</sup>
		Linear	Quadrático	Resíduo			
Rendimento de grãos	7191642,71*	18599625,65*	2955774,20*	84806,13	6,31	y = 1831,46 + 44,54x	0,86
Massa de 100 grãos	0,062*	0,135*	0,042*	0,005	2,04	y = 3,08 + 0,004x	0,73
Massa de grãos por panícula	237,08*	499,85*	195,21*	13,13	12,99	y = 11,96 + 0,24x	0,80
Comprimento da panícula	139,29*	400,77*	14,14	3,80	6,04	y = 19,35 + 0,21x	0,95
WP	10,10*	0,009	30,11*	0,81	6,37	y = 6,33 + 0,32x - 0,0025x <sup>2</sup>	0,99
WPi	73,92*	216,06*	5,71	2,36	6,87	y = 31,89 -0,15x	0,97
Receita	1005039,35*	2599310,59*	413078,83*	11851,59	6,31	y = 648,66 + 16,65x	0,86
Lucro	841730,03*	425925,87*	413075,12*	11851,89	9,84	y=-243,01+43,85x - 0,29x <sup>2</sup>	0,99
Retorno econômico	1,36*	3,97*	0,10*	0,04	10,28	y= 3,33- 0,021x	0,97

\* significativo (p ≤ 0,05);

Apêndice K - Resultado do quadrado médio da análise de variância para a altura de plantas, índice de área foliar, e cobertura do solo pelo dossel vegetativo das plantas de sorgo submetidas a diferentes manejos de irrigação, Santa Maria, RS, 2013.

DAE	Quadrado médio		CV (%)	DMS
	Tratamento	Erro		
Altura de plantas				
19	0,853	1,11	9,49	1,35
25	0,083	0,433	4,85	0,85
29	2,52	4,02	11,11	2,58
35	6,02	2,82	6,94	2,16
39	5,33	3,74	6,73	2,48
44	38,52	6,42	7,28	3,25
49	27,00	5,86	6,03	3,11
57	30,08	11,78	7,73	4,41
63	0,75	21,71	9,69	5,99
73	30,08	29,88	9,28	7,03
80	8,33	51,76	7,99	9,25
Índice de área foliar				
19	0,002	0,0007	7,93	0,035
25	0,032	0,005	7,74	0,097
32	0,59	0,22	17,17	0,61
39	0,003	0,29	12,28	0,69
44	0,044	0,30	10,29	0,71
49	0,64	0,34	8,86	0,75
53	0,47	0,21	6,63	0,60
60	0,86	0,17	5,92	0,54
74	1,17	0,34	8,83	0,75
87	0,53	0,40	11,29	0,82
Cobertura do solo pelo dossel vegetativo				
13	8,16	5,33	17,11	5,23
15	16,66	22,16	22,78	10,67
19	6,00	3,83	6,67	4,43
22	1,50	29,00	14,75	12,20
26	8,16	2,66	3,39	3,70
29	37,50	26,33	8,12	11,63
32	80,66	15,33	4,66	8,87
35	48,16	9,66	3,53	7,05
43	0,16	9,16	3,28	6,86
49	0,16	9,16	3,28	6,86

\* Significativo em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F.

Apêndice L - Resultado do quadrado médio da análise de variância para a produção de massa verde (PMV), produção de massa seca (PMS), rendimento de grãos, produtividade da água (WP) e produtividade da água irrigada (WPI) na produção de grãos da cultura do sorgo submetido a diferentes manejos de irrigação. Santa Maria, RS. 2013.

Variável	Quadrado médio		CV (%)	DMS
	Tratamento	Erro		
PMV	61443840	79005987	19,32	20150
PMS	14327774	9358632	23,80	6935
Rendimento de grãos	185750	139586	6,68	846,97
WP	15,97	0,84	6,43	2,07
WPI	64,35	1,51	6,37	2,78

\* Significativo em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F.