

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

**Thiago Schmitz Marques da Rocha**

**DESEMPENHO DA SOJA CULTIVADA EM SOLO HIDROMORFICO E  
NÃO HIDROMORFICO COM E SEM IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR**

Santa Maria, RS  
2016

**Thiago Schmitz Marques da Rocha**

**DESEMPENHO DA SOJA CULTIVADA EM SOLO HIDROMORFICO E NÃO  
HIDROMORFICO COM E SEM IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. PhD. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS, Brasil  
2016

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

Schmitz Marques da Rocha, Thiago  
DESEMPENHO DA SOJA CULTIVADA EM SOLO HIDROMORFICO E  
NÃO HIDROMORFICO COM E SEM IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR /  
Thiago Schmitz Marques da Rocha.-2016.  
78 p.; 30cm

Orientador: Nereu Augusto Streck  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2016

1. Glycine max (L.) Merrill. 2. Irrigação. 3. Trocas  
gasosas. 4. Terras baixas. I. Streck, Nereu Augusto II.  
Titulo.

---

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Thiago Schmitz Marques da Rocha. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante citação da fonte.

Endereço: Rua Duque de Caxias, n.698, Centro, Santa Maria, RS. CEP: 97010-200

Fone: (055) 99516272; E-mail: [thiagosmr@msn.com](mailto:thiagosmr@msn.com)

**Thiago Schmitz Marques da Rocha**

**DESEMPENHO DA SOJA CULTIVADA EM SOLO HIDROMORFICO E NÃO  
HIDROMORFICO COM E SEM IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

**Aprovado em 19 de fevereiro de 2016:**

---

**Nereu Augusto Streck, PhD.**  
(Presidente/Orientador)

---

**Gizelli Moiano de Paula, Dra. (UFSM)**

---

**Genei Antonio Dalmago, Dr. (EMBRAPA)**

Santa Maria, RS  
2016

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família pelo apoio e incentivo que sempre demonstraram.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do trabalho de mestrado.

Ao professor Nereu pela oportunidade, orientação, amizade e todos os ensinamentos transmitidos durante o período de iniciação científica e mestrado.

Ao Instituto Rio Grandense do Arroz, em especial aos Pesquisadores Alencar Junior Zanon e Elio Marcolin, pelo auxílio, ensinamentos e esforços dedicados para viabilizar a condução deste trabalho.

À professora Mirta pelo auxílio com as coletas e resultados de solo.

Aos membros da banca avaliadora pela disponibilidade, sugestões e contribuições para melhoria do trabalho.

À Maritiele, minha namorada, por me mostrar o ideal de companheirismo.

Em especial aos colegas do Grupo de Agrometeorologia da UFSM, principalmente aos que fizeram parte do “Projeto Soja”.

À todos aqueles não listados e que de alguma maneira contribuíram para a realização do trabalho, o meu Muito Obrigado!

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

(Eclesiastes 4:1)

## RESUMO

### DESEMPENHO DA SOJA CULTIVADA EM SOLO HIDROMORFICO E NÃO HIDROMORFICO COM E SEM IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR

AUTOR: Thiago Schmitz Marques da Rocha

ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

A soja (*Glycinemax* (L.) Merrill) é a principal leguminosa cultivada no mundo. O Rio Grande do Sul é um importante produtor nacional do grão e no estado vem ocorrendo a expansão da cultura para áreas de terras baixas com solos hidromórficos em que são tradicionalmente utilizadas no cultivo do arroz irrigado. Nessas áreas o déficit e excesso hídrico são mais comuns em função de características físicas do solo. O objetivo nesta dissertação é caracterizar o crescimento e o desenvolvimento e quantificar as trocas gasosas a nível foliar e a produtividade de grãos em duas cultivares de soja com tipo de crescimento determinado e indeterminado em solo não hidromórfico e em solo hidromórfico, com e sem irrigação suplementar. No ano agrícola de 2014/2015 foram conduzidos experimentos em Santa Maria, RS, e em Cachoeirinha, RS, com duas cultivares de soja, com tipo de crescimento determinado (Nidera NA 6411 RG) e indeterminado (TEC IRGA 6070 RR). Em Santa Maria o experimento foi conduzido com e sem irrigação suplementar. A irrigação foi realizada por gotejamento e calculada com base no balanço hídrico do solo. Em Cachoeirinha o experimento foi conduzido em área sistematizada para o cultivo de arroz irrigado, a irrigação foi realizada por meio de “banhos” de acordo com as tensões de água no solo e fase do desenvolvimento da cultura. Foram realizadas avaliações de desenvolvimento, crescimento, componentes de rendimento, trocas gasosas e de matéria seca. A capacidade de água disponível para a cultura em áreas de rotação com arroz irrigado é limitada principalmente pela camada compactada próxima a superfície do solo. A principal diferença no desenvolvimento que possibilita a maior estabilidade produtiva de cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado é o maior período de floração. Pequenos estresses hídricos, por déficit ou excesso, que comumente ocorrem em áreas de soja cultivada em solo hidromórfico não afetaram o particionamento de matéria seca mas afetaram as trocas gasosas e IAF. Essas reduções nas trocas gasosas não afetaram a produção de grãos, mas ativam os mecanismos de defesa da planta, como a redução da condutância estomática, taxa fotossintética e evolução da área foliar.

**Palavras-chaves:** *Glycine max* (L.) Merrill. Irrigação. Trocas gasosas. Terras baixas.

## ABSTRACT

### PERFORMANCE OF SOYBEAN IN HYDROMORPHIC AND NO HYDROMORPHIC SOIL UNDER IRRIGATED AND RAINFED CONDITIONS

AUTHOR: Thiago Schmitz Marques da Rocha

ADVISOR: Nereu Augusto Streck

Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) is the major legume crop in the world. Rio Grande do Sul State is an important national grain producer, and the area grown with soybean has been expanded to areas of lowlands traditionally used to grow rice. In lowland areas the deficit and water surplus is more common due to physical properties of the soil. The objective of this dissertation is to characterize growth and development, and to quantify gas exchange at the leaf level and grain yield of two soybean cultivars with indeterminate and determinate stem termination in a hydromorphic soil and in a non-hydromorphic, with and without irrigation. Field experiments were conducted during the 2014/2015 growing season in Santa Maria, RS and Cachoeirinha, RS with two soybean cultivars, with determinate (Nidera NA 6411 RG) and indeterminate (TECIRGA 6070 RR) stem termination. In Santa Maria, the experiment was conducted with and without irrigation. Irrigation was performed by dripping and based on soil water balance. In Cachoeirinha, the experiment was conducted in a paddy field for rice cultivation, and irrigation was performed by flooding according to the water tension in the soil and stage of development of culture. Evaluations of development growth, yield components, gas exchange and dry matter were performed. The available water capacity for the crop in rotation with rice is limited mainly by the compacted layer of the soil near the surface. The main feature that ensures the highest yield stability of cultivars with indeterminate stem termination is the longest duration of the flowering period. Small water stress, either by deficit or surplus, that often take place in hydromorphic soil grown with soybean did not affect dry matter partitioning but did affect gas exchange and leaf area, which in turn did not affect grain yield. Defense mechanisms to water stress were activated, such as reduced stomatal conductance, photosynthetic rate and leaf area.

**Keywords:** *Glycine max* (L.) Merril. Irrigation. Gas exchange. Low lands.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Mapa do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, com os locais onde foram conduzidos os experimentos de soja durante o ano agrícola 2014/2015 em Santa Maria e Cachoeirinha, RS, Brasil.....25
Figura 2	Croqui da área com os blocos e respectivos tratamentos, onde as áreas em cinza representam as parcelas que foram irrigadas no experimento realizado no ano agrícola 2014/2015, em Santa Maria, RS, Brasil .....26
Figura 3	Croqui da área experimental com os blocos e respectivos tratamentos. As áreas em cinza representam os diferentes manejos de irrigação suplementar no experimento que será realizado no ano agrícola 2014/2015, em Cachoeirinha, RS, Brasil.....27
Figura 4	Irrigação realizada por gotejamento no experimento de Santa Maria, RS, 2016.....28
Figura 5	Microcamalhoneira semeadora-adubadora utilizada na semeadura do experimento em Cachoeirinha, RS, no ano agrícola 2014/2015, Brasil, 2016..29
Figura 6	Irrigação por sulco realizada no experimento de Cachoeirinha, RS, Brasil.....29
Figura 7	Densidade de fluxo de radiação solar global incidente (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> ) e fotoperíodo (A, B), temperaturas mínimas (TMIN) e máximas (TMAX) diárias do ar (C, D), lâmina de água (mm) oriunda de precipitações e irrigações (E, F), durante o período experimental desde a semeadura até o final do ciclo das plantas de soja em Santa Maria (A, C, E) e em Cachoeirinha (B, D, F), RS, Brasil, 2014/ 2015.....37
Figura 8	Aprofundamento do sistema radicular em dias após a semeadura (DAS) nos experimentos de Santa Maria (A) e Cachoeirinha (B) – RS, 2014/ 2015. Os pontos vazados representam datas das observações.....38
Figura 9	Evolução da matéria seca de Raiz (MS RAÍZ) em dias após a semeadura (DAS) para as duas cultivares, com e sem irrigação suplementar em Cachoeirinha, RS, 2014/ 2015.....39
Figura 10	Curvas de retenção de água no solo na área experimental de Santa Maria, na camada de 0-15 cm (A), 15-30 cm (C), 30-50 cm (E) e em Cachoeirinha, na camada de 0-13 cm (B), 13-20 cm (D) e 20-50 cm (F).....41
Figura 11	Evolução do coeficiente de cultura (Kc) (A, D, G e J), evapotranspiração real da cultura (ETR) (B, E, H e K), e disponibilidade hídrica (C, F, I e L), onde a deficiência (Def) ocorre quando a ETR é menor que ETc e o excedente (Exc) quando a precipitação supera a CAD máx para as duas cultivares com e sem irrigação suplementar durante o período de condução do experimento em Santa Maria, RS, 2014-2015. As setas indicam a data de ocorrência do R1 (seta sólida) e o R5 (seta vazada).....42
Figura 12	Evolução do coeficiente de cultura (Kc) (A, D, G e J), evapotranspiração real da cultura (ETR) (B, E, H e K), e disponibilidade hídrica (C, F, I e L), onde a deficiência (Def) ocorre quando a ETR é menor que a ETc e o excedente (Exc) quando a precipitação supera a CAD máx para as duas cultivares com e sem irrigação suplementar em Cachoeirinha durante o período de condução do experimento, RS, 2014-2015. As setas indicam a data de ocorrência do R1 (seta sólida) e o R5 (seta vazada).....43
Figura 13	Duração das fases de desenvolvimento segundo a escala de Fehr e Caviness (1977) das cultivares de soja TEC IRGA 6070 RR (A e C) e Nidera NA 6411 RG (B e D) com e sem irrigação suplementar, em dias (A e B) e em °C dia (C e

	D), em Santa Maria (A e C) e Cachoeirinha (B e D), no ano agrícola 2014/2015.....44
Figura 14	Duração total de períodos críticos para a cultura da soja da cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B) e da cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) em dias após a semeadura (DAS) em Santa Maria, RS, 2014/2015. Período vegetativo = V0 - Vn, Florescimento = R1 – última flor aberta na planta Enchimento de grãos = primeiro legume na planta com grão apresentando 2mm – R7, segundo Fehr e Caviness (1977).....46
Figura 15	Duração total de períodos críticos para a cultura da soja da cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B) e da cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) em dias após a semeadura (DAS) em Cachoeirinha, RS, 2014/2015. Período vegetativo = V0 - Vn, Florescimento = R1 – última flor aberta na planta, Enchimento de grãos = primeiro legume na planta com grão apresentando 2mm – R7, segundo Fehr e Caviness (1977).....47
Figura 16	Evolução do índice de área foliar (IAF) na haste principal e nas ramificações, da cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B), da cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) e IAF total das duas cultivares nas diferentes disponibilidades em dias após a semeadura (DAS) em Santa Maria, RS, 2014/ 2015.....49
Figura 17	Evolução do índice de área foliar (IAF) na haste principal e nas ramificações, da cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B), da cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) e IAF total das duas cultivares nas diferentes disponibilidades em dias após a semeadura (DAS) em Cachoeirinha, RS, 2014/ 2015.....50
Figura 18	Área foliar máxima das ramificações e das folhas associadas a cada nó da haste principal da cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B), da cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) em Santa Maria, RS, 2014/2015.....51
Figura 19	Área foliar máxima das folhas das ramificações e das folhas associadas a cada nó da haste principal da cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B), da cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) em Cachoeirinha, RS, 2014/ 2015.....52
Figura 20	Número de legumes médio produzidos em cada nó da haste principal e em ramificação associada ao respectivo nó para a cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B) e para a cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) em Santa Maria, RS, 2014/2015.....56
Figura 21	Número de legumes médio produzidos em cada nó da haste principal e em ramificação associada ao respectivo nó para a cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B) e para a cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) em Cachoeirinha, RS, 2014/2015.....57
Figura 22	Particionamento da matéria seca da parte aérea das cultivares de soja TEC IRGA 6070 RR (A) e Nidera NA 6411 RG (B) e das cultivares com irrigação

	suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) em dias após a semeadura (DAS) em Cachoeirinha, RS, Brasil, 2014/2015.....	60
Figura 23	Evolução da matéria seca total da parte aérea (MS PA) em dias após a semeadura (DAS) para as duas cultivares (A) com e sem irrigação suplementar (B) em Cachoeirinha, RS, 2014/ 2015.....	61
Figura 24	Evolução da matéria seca (MS) de folhas, legumes e grãos, pecíolo, legumes, caule e grãos em dias após a semeadura (DAS) para as duas cultivares, com e sem irrigação suplementar em Cachoeirinha, RS, 2014/ 2015.....	68
Figura 25	Evolução da Matéria Seca (MS) de folhas, pecíolo, haste, grãos, legumes, grãos e legumes para as duas cultivares e duas disponibilidades hídricas, em Cachoeirinha, RS, Brasil, 2014/2015.....	69
Figura 26	Relações entre a área foliar estimada pela medida das dimensões de comprimento e largura do folíolo central e estimadas pela matéria seca de folhas e área foliar específica (AFE) no experimento de Cachoeirinha, RS, Brasil 2014/2015.....	70
Figura 27	Área medida de folhas individuais (AF Observada) versus o produto das dimensões lineares de comprimento e largura (C x L) do folíolo central da cultivar de TEC IRGA 6070 RR (A) e Nidera NA 6411 RG (B), com as respectivas equações.....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Cultivares de soja e sua descrição quanto ao grupo de maturação, ciclo e tipo de crescimento utilizadas nos experimentos de campo. ....	25
Tabela 2	Conteúdo de água à 10 kPa ( $\Theta_{10}$ kPa), à 1500 kPa ( $\Theta_{1500}$ kPa), CAD potencial, porcentagem de areia, silte e argila, porosidade total, macro e micro porosidade e densidade do solo (Ds) de cada camada de solo em Santa Maria e Cachoeirinha – RS, 2015.. ....	40
Tabela 3	Componentes de rendimento e características que afetam a colheita das cultivares de soja TEC IRGA 6070 RR e Nidera NA 6411 RG com e sem irrigação suplementar, nos experimentos de Santa Maria e Cachoeirinha no ano agrícola de 2014/ 2015. ....	53
Tabela 4	Componentes de rendimento e características que afetam a colheita das cultivares de soja TEC IRGA 6070 RR e Nidera NA 6411 RR com e sem irrigação suplementar, nos experimentos de Santa Maria e Cachoeirinha no ano agrícola de 2014/ 2015. ....	54
Tabela 5	Eficiência do uso da água (EUA) em $\text{Kg m}^{-3}$ das cultivares de soja TEC IRGA 6070 RR e Nidera NA 6411 RR com e sem irrigação suplementar, nos experimentos de Santa Maria e Cachoeirinha no ano agrícola de 2014/ 2015.....	55
Tabela 6	Valores médios de taxa fotossintética (A), condutância estomática (Gs), radiação fotossinteticamente disponível (P.A.R.) e temperatura foliar (Tl) para as duas cultivares de soja e dois manejos de irrigação utilizados nos experimentos de Santa Maria e Cachoeirinha no ano agrícola de 2014/2015 .....	58
Tabela 7	Valores médios de taxa fotossintética (A) e condutância estomática (Gs) para as duas cultivares de soja em condição sem estresse hídrico no solo ( $ET_c = ETR$ ) e deficiência (Def.), quando $ET_c > ETR$ , das avaliações em Santa Maria e Cachoeirinha no ano agrícola de 2014/2015. ....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALT	Alteração no armazenamento
ARM	Armazenamento
C	Comprimento
CAD	Capacidade de água disponível
cc	Capacidade de campo
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DAS	Dias após a semeadura
Def	Deficiência hídrica
Ds	Densidade do solo
EAA-IRGA	Estação Experimental do Arroz - Instituto Rio Grandense do Arroz
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
es	Pressão de saturação de vapor no ar
ETc	Evapotranspiração da cultura
ETo	Evapotranspiração potencial
ETR	Evapotranspiração real
EUA	Eficiência do uso da água
EXC	Excedente hídrico
G	Fluxo de calor no solo
GM	Grupo de maturação
Gs	Condutância estomática
IAF	Índice de área foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IRGA	Instituto Rio Grandense do Arroz
Kc	Coefficiente da cultura
Ko	Radiação solar incidente no topo da atmosfera
L	Largura do folíolo central de cada folha
L*	Saldo de radiação de ondas longas usando a razão de radiação solar
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MS	Matéria seca
MS PA	Matéria seca total da parte aérea
NegAc	Negativo acumulado
NFN	Número final de nós
NN	Número de nós visíveis
P.A.R.	Radiação fotossinteticamente ativa
PIB	Produto Interno Bruto
pmp	Ponto de murcha permanente
R1	Primeira flor aberta na haste principal/ início do florescimento
R3	Legume com 0,5 cm em um dos quatro últimos nós da haste principal
R3,5	Legume com 1,0 cm em um dos quatro últimos nós da haste principal
R4	Legume com 2,0 cm em um dos quatro últimos nós da haste principal
R5	Grão com 2,0 mm em um dos legumes dos quatro últimos nós da haste principal
R6	Grãos ocupando toda a cavidade de um legume dos quatro últimos nós da haste principal
R7	Primeiro legume em ponto de colheita na haste principal/ maturação fisiológica
R8	95% dos legumes em ponto de colheita
Rg	Radiação solar global incidente

Rn	Saldo de radiação
RS	Rio Grande do Sul
STa	Soma térmica acumulada
STd	Soma térmica diária
T	Temperatura média diária do ar
Tb	Temperatura base
TB	Temperatura máxima para o desenvolvimento da soja
TEC IRGA	TEC IRGA 6070 RR
Tl	Temperatura foliar
TMAX	Temperatura máxima
Tmed	Média aritmética da TMAX e TMIN diária
TMIN	Temperatura mínima
Topt	Temperatura ótima
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
UR	Umidade relativa média do ar

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	18
2.1 OBJETIVO GERAL.....	18
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	18
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	19
3.1 VARIABILIDADE INTERANUAL DE PRODUTIVIDADE DE SOJA NO RIO GRANDE DO SUL .....	19
3.2 VARIABILIDADE GENÉTICA E TROCAS GASOSAS A NÍVEL FOLIAR EM SOJA .....	19
3.3 TRANSLOCAÇÃO DE CARBOIDRATOS NA PLANTA DE SOJA .....	20
3.4 TOLERÂNCIA DA SOJA AO ESTRESSE HÍDRICO NO SOLO .....	21
3.5 SOJA EM ROTAÇÃO COM O ARROZ IRRIGADO NO RIO GRANDE DO SUL .....	22
3.6 TIPO DE CRESCIMENTO DETERMINADO E INDETERMINADO EM SOJA.....	22
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	24
4.1 EXPERIMENTOS DE CAMPO .....	24
4.2 IRRIGAÇÃO E BALANÇO HÍDRICO DO SOLO .....	27
4.3 CARACTERIZAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO, TROCAS GASOSAS E COMPONENTES DO RENDIMENTO DE GRÃOS. ....	33
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	36
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	62
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	63
<b>APÊNDICE A</b> .....	69
<b>APÊNDICE B</b> .....	70
<b>APÊNDICE C</b> .....	71
<b>APÊNDICE D</b> .....	71
<b>ANEXOS A</b> .....	72

## 1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma leguminosa que possui seu centro de origem no oeste da China onde sofreu domesticação por volta do século XI A.C. No Brasil, o cultivo da soja até a década de 1960 se restringia a pequenas áreas dos estados da região Sul onde era utilizada principalmente como espécie forrageira. Porém com a elevação do preço internacional do grão e aumento na produção de óleo vegetal, diversos produtores dos estados do Sul do Brasil adotaram o cultivo da leguminosa. Na década de 70 com a expansão das fronteiras agrícolas para a região Centro Oeste e a descoberta de genes de juvenilidade que possibilitaram o cultivo da soja em latitudes mais baixas, houve uma grande expansão da área cultivada acompanhada de aumentos de produtividade (FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009).

Na safra de 2014/2015 foram produzidas aproximadamente 96,2 milhões de toneladas de soja no Brasil em uma área de aproximadamente 32 milhões de hectares. O estado do Rio Grande do Sul foi responsável pela produção de 14,881 milhões de toneladas em uma área semeada de 5,2 milhões de hectares (CONAB, 2015). A cultura representou, nesta safra, 46% do total de grãos produzidos no país sendo responsável pelo maior volume das exportações nacionais, sendo assim a soja é de fundamental importância para manter certa estabilidade na balança comercial brasileira.

A região do Planalto do estado do Rio Grande do Sul é a principal região produtora desta oleaginosa (IBGE, 2015). No entanto, em função da alta cotação do produto no mercado e da necessidade de uma cultura que possibilite rotação de cultura com o arroz irrigado, a cultura da soja vem sendo cultivada em uma área expressiva de terras baixas no estado (SARTORI et al., 2016).

Nesse contexto buscam-se novas informações, visando otimizar seu cultivo e reduzir os riscos de perdas. Dentre os fatores que afetam a produção agrícola, as condições meteorológicas são determinantes por reduzir a produtividade da soja devido principalmente à deficiência hídrica (PAULA et al., 2006), porém em áreas de terras baixas com solos hidromórficos, também ocorre frequentemente excessos hídricos que prejudicam a cultura.

O déficit hídrico é o principal responsável pelas maiores quebras de produção de grãos em todo o mundo. No estado do Rio Grande do Sul é comum a ocorrência de deficiência hídrica em períodos críticos da cultura da soja. Por exemplo, o acréscimo de 74,5% na produtividade, da safra 2012/2013, em relação à safra 2011/2012 se deve principalmente ao déficit hídrico que ocorreu na safra 2011/2012 (CONAB, 2013). Como a produção agrícola é



responsável pela maior parcela do PIB gaúcho, qualquer quebra na produção de soja, pode gerar uma série de problemas econômicos e sociais ao Estado.

Como em algumas regiões é difícil prever quando a planta sofrerá com o déficit hídrico ou excesso hídrico, principalmente em estágios mais críticos do desenvolvimento, cultivares de soja com tolerância são altamente desejáveis (OYA et al., 2004). Conhecer a resposta de diferentes genótipos ao estresse hídrico, ou adaptação, é um fator crucial para a seleção e recomendações de cultivares mais adaptados (TREWAVAS, 2003).

A capacidade fotossintética de folhas individuais, área foliar disponível para capturar a radiação fotossinteticamente ativa e a eficiência do uso da radiação solar estão diretamente ligadas a produção de grãos (SINCLAIR; HORIE, 1989). Práticas agronômicas, como seleção de cultivares e, condições ambientais favoráveis, como adequada disponibilidade hídricas, que aumentem a taxa fotossintética durante a fase de florescimento até o final do enchimento de grãos acarretam em maiores rendimentos na produção de grãos de soja (BRUIN et al., 2010).

A proposta de cultivo de soja em terras baixas do Rio Grande do Sul não é nova, nos anos 70 e 80 já houve estudos (BERNARDES, 1945), mas as cultivares de soja atualmente disponíveis são diferentes das daquela época. Assim, há a necessidade de se conhecer mais sobre o desempenho de genótipos atuais para essas situações de diferentes disponibilidades hídrica nas condições de solos hidromórficos, o que constituiu a motivação para realizar este estudo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Contribuir para o melhor entendimento das relações fonte dreno em cultivares com tipo de crescimento determinado e indeterminado em condições de solos hidromórficos.

### **2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO**

Caracterizar o crescimento e o desenvolvimento e quantificar as trocas gasosas a nível foliar e a produtividade de grãos em duas cultivares de soja com tipo de crescimento determinado e indeterminado em solo não hidromórfico e em solo hidromórfico, com e sem irrigação suplementar.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 VARIABILIDADE INTERANUAL DE PRODUTIVIDADE DE SOJA NO RIO GRANDE DO SUL

O Rio Grande do Sul é o estado da região Sul que mais tem perdas na produção de grãos por conta de períodos de déficit hídrico durante o ciclo das culturas de verão. Diversos são os exemplos de quebras de produção desde os anos 70, como por exemplo, em 1990/1991 a quebra foi próxima a 70%, caindo de um rendimento médio de grãos de 2.000 kg/ha (em 1989/1990) para 750 kg/ha (em 1990/1991) (FARIAS et al., 2001).

A safra gaúcha de 2014/2015, em contrapartida, teve recorde de produção e produtividade de soja (2,84 kg ha<sup>-1</sup>) no Rio Grande do Sul, devido a inovações tecnológicas, práticas de manejo e principalmente pelas precipitações pluviais abundantes e bem distribuídas ocorridas durante a estação de cultivo. Porém, recentemente a safra de 2011/2012 foi marcada, também, pela seca e conseqüentemente baixa produtividade (1.555 kg ha<sup>-1</sup>) (CONAB, 2013). Assim, apesar do constante crescimento de produção e produtividade de soja, no estado do Rio Grande do Sul, ao longo das últimas três décadas, algumas safras são marcadas por eventos de estiagens que repercutem negativamente em diversos indicadores econômicos no campo e nas cidades.

A distribuição uniforme das chuvas é o fator que mais contribui para altos rendimentos de grãos de soja em lavouras não irrigadas, principalmente durante as fases de maior demanda de água (floração) e mais críticas a ocorrência de déficits hídricos (enchimento de grãos) (FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009). Perdas causadas por fatores abióticos, principalmente a deficiência hídrica causam em média mais de 50% das perdas mundiais, enquanto que prejuízos causados por estresses bióticos reduzem em média de 10 a 20% da produtividade das culturas (BRAY, 2004).

#### 3.2 VARIABILIDADE GENÉTICA E TROCAS GASOSAS A NÍVEL FOLIAR EM SOJA

Em diversas regiões do Brasil vem sendo obtidas altas produtividades de soja, superiores a 3000 kg ha<sup>-1</sup>. Essa elevada produtividade é consequência do esforço de técnicos e de produtores na utilização de novas tecnologias que são desenvolvidas para a agricultura,

incluindo novos cultivares genéticos produzidos por diversos programas de melhoramento (SEDIYAMA et al., 2005).

A produção de matéria seca pela planta de soja está ligada à capacidade fotossintética, área foliar disponível para capturar a radiação fotossinteticamente ativa e à eficiência no uso da radiação (SINCLAIR; HORIE, 1989). A produção de matéria seca durante o período do florescimento até o enchimento de grãos é crítica para determinar a produtividade final (EGLI; ZHEN-WEN, 1991).

Medições biofísicas de taxas de trocas gasosas em cultivares de soja tem sido bem relacionadas com fatores abióticos como o fotoperíodo, radiação solar (SINCLAIR, 1980; BRUIN et al., 2010) e déficit hídrico (BOYER et al., 1980; FARIAS; NEUMAIER, 1995a; FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 1995b; SALINET, 2009). Os diferentes estágios de desenvolvimento da planta apresentam uma grande variação nas taxas fotossintéticas com maiores valores durante o período reprodutivo (BRUIN et al., 2010).

No decorrer do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja ocorrem variações nas taxas de fotossíntese e respiração. Alterações na relação fonte-dreno, estrutura foliar e arquitetura de planta são responsáveis por acréscimos nas taxas fotossintéticas ao avançar da fase vegetativa para a fase reprodutiva. No período de enchimento de grãos a planta atinge os valores máximos de taxa fotossintética chegando a  $40 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (PEREIRA, 2002).

Diferentes cultivares quando submetidas a condições de déficit hídrico apresentam respostas diferentes. Algumas tendem a resistir por mais tempo ao estresse hídrico, mantendo por mais tempo alta atividade fotossintética, porém podem responder de forma abrupta com a acentuação do déficit hídrico (PAULA et al., 2006).

### 3.3 TRANSLOCAÇÃO DE CARBOIDRATOS NA PLANTA DE SOJA

As partes vegetativas (folhas, hastes e pecíolos) da planta de soja servem como reservas de nutrientes e carboidratos durante o crescimento vegetativo e estas reservas são translocadas via floema para os grãos durante o período de enchimento (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). A perda de matéria seca (MS) pelas partes vegetativas das plantas se dá, não só pela queda de folhas, mas também pela translocação de MS para os grãos e legumes na fase de rápido acúmulo de MS nos grãos (PISSAIA et al., 1982). Glier et al. (2015) observaram que a falta de folhas diminui o fornecimento de carboidratos e que tanto as hastes como os pecíolos são incapazes de suprir a sua demanda para os legumes e grãos em desenvolvimento.

A força de demanda de fotossintatos é determinada pelo estágio de desenvolvimento da cultura (flores>legumes>grãos>raízes>folhas) e o padrão de translocação é determinado pela proximidade entre os órgãos de fonte e os órgãos da demanda (CASAROLI et al., 2007). A competição entre as partes vegetativas e reprodutivas são prejudiciais pelo desvio contínuo de reservas e assimilados às estruturas vegetativas, em detrimento das reprodutivas (TAIZ; ZEIGER., 2013).

### 3.4 TOLERÂNCIA DA SOJA AO ESTRESSE HÍDRICO NO SOLO

A água está presente em praticamente todos os processos fisiológicos e bioquímicos e constitui aproximadamente 90% do peso da planta de soja. Atua como regulador térmico, solvente e transportador de minerais, gases e outros solutos (FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009). A deficiência hídrica é, portanto, o principal fator que limita as elevadas produtividades de soja, sendo que a intensidade de redução do rendimento de grãos depende da fase do desenvolvimento da cultura que ocorre e da duração do estresse hídrico. Na cultura da soja, os períodos mais sensíveis a deficiência são: germinação - emergência e floração - enchimento de grãos (MARCHEZAN, 1982; FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009).

As plantas possuem alguns mecanismos fisiológicos que possibilitam retardar e/ou tolerar a desidratação. Conforme ocorre a perda de água excessiva, esses mecanismos entram em ação. Os mecanismos que causam a diminuição da transpiração são: fechamento estomático, enrolamento das folhas, desenvolvimento de tricomas, redução da área foliar pela senescência de folhas mais velhas (fazendo com que diminua a superfície exposta à luz solar) e regulação osmótica (STRECK, 2004; TAIZ; ZAIGER, 2013).

Apesar de existirem programas de melhoramento visando a seleção de genótipos tolerantes a estresses abióticos, não há no mercado grande oferta de cultivares com essas características. Diferentes genótipos respondem diferentemente quando submetidos ao estresse hídrico. Diferenças qualitativas e quantitativas em expressão gênica são a origem dessas variações sendo possível selecionar genótipos com capacidade superior de tolerar o estresse hídrico (CASAGRANDE et al., 2001).

Em diferentes cultivares de soja submetidas a níveis variáveis de disponibilidade hídrica, foi constatado redução da taxa fotossintética, teor de clorofila e teor relativo de água

de acordo com o aumento do déficit hídrico, além do conseqüente aumento na resistência estomatal (NEPOMUCENO et al., 1993).

### 3.5 SOJA EM ROTAÇÃO COM O ARROZ IRRIGADO NO RIO GRANDE DO SUL

Mesmo com propostas antigas de cultivo de soja em terras baixas no estado do Rio Grande do Sul (BERNARDES, 1945), foi só nos últimos anos que ocorreu a ampliação significativa na área com o cultivo, onde na safra 2014/2015 foram semeados 284 mil hectares nessas condições (IRGA, 2015). A maior limitação encontrada para cultivos de sequeiro, como é o caso da soja, nessas áreas orizícolas é a característica de hidromorfismo e a camada compacta presente principalmente em planossolos e gleissolos onde o arroz irrigado vem sendo cultivado ao longo dos anos (BORGES et al., 2004; STRECK et al., 2008).

A camada compactada é caracterizada pela alta densidade, baixa macroporosidade e resistência a penetração (MENTGES et al., 2013), além dessa camada compactada, a primeira camada onde ocorre a exploração do sistema radicular também apresenta limitações físicas como a desestruturação de agregados e porosidade reduzida. Esses fatores favorecem tanto a ocorrência de déficit, quanto o excesso hídrico (MARCHEZAN et al., 2001).

Uma alternativa para minimizar o estresse por déficit hídrico nessas áreas é a utilização de irrigações por “banhos”, aproveitando toda a estrutura de irrigação (barragens, canais de irrigação, bombas e operadores) existente do cultivo do arroz irrigado. Esses banhos são mais eficientes se a área apresenta algum gradiente de declividade auxiliando com que toda a área seja irrigada e não ocorram acúmulos que possam vir a causar estresse por excesso hídrico à cultura (MARCOLIN et al., 2011).

### 3.6 TIPO DE CRESCIMENTO DETERMINADO E INDETERMINADO EM SOJA

O tipo de crescimento determinado e indeterminado em soja é caracterizado pelo período vegetativo se estender ou não após a planta entrar no período reprodutivo. Em cultivares com tipo de crescimento determinado a planta cessa a emissão de novas folhas e nós na haste principal após ocorrer o início da floração, enquanto nos cultivares com crescimento indeterminado o desenvolvimento vegetativo é caracterizado por uma maior sobreposição (SETIYONO et al., 2007; BASTIDAS et al., 2008). Essa sobreposição entre período vegetativo e reprodutivo pode variar de acordo com o ambiente em que as plantas são expostas (HEATHERLY; SMITH, 2004).

No Brasil, até os anos 2000 houve predomínio de cultivares com tipo de crescimento determinado, mas nos últimos anos o número de registros de cultivares com tipo de crescimento indeterminado vem superando o número de cultivares com crescimento determinado. A maior capacidade da planta em recuperar a área foliar em períodos curtos de estresse, como a ausência de chuvas, excesso hídrico no solo ou temperaturas atmosféricas elevadas e a maior plasticidade em adaptar-se em condições de fotoperíodos curtos, típicas de semeaduras fora de época, podem ser apontadas como causas da preferência por essas cultivares (ZANON et al., 2015b).

Cultivares com tipo de crescimento indeterminado continuam crescendo vegetativamente até próximo ao início do enchimento de grãos (BASTIDAS et al., 2008), evidenciando uma divisão na destinação de fotoassimilados, onde parte é destinada às estruturas vegetativas e parte às estruturas reprodutivas. Quando plantas de soja com crescimento determinado entram no período reprodutivo, os fotoassimilados que estão sendo produzidos e os armazenados são realocados prioritariamente para as estruturas reprodutivas. A ocorrência de competição pode ser prejudicial para a produtividade em condições potenciais (TAIZ; ZEIGER, 2013).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 EXPERIMENTOS DE CAMPO

No ano agrícola de 2014/2015 foram conduzidos dois experimentos de campo com a cultura da soja, um deles na área experimental do Departamento de Fitotecnia, Centro de Ciências Rurais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em Santa Maria, RS, Brasil (29°43'S, 53°43'W, 95 m) e o outro na Estação Experimental do Arroz - Instituto Rio Grandense do Arroz (EEA-IRGA), em Cachoeirinha, RS, Brasil (29°56'S, 51° 7'W; 10m) (Figura 1).

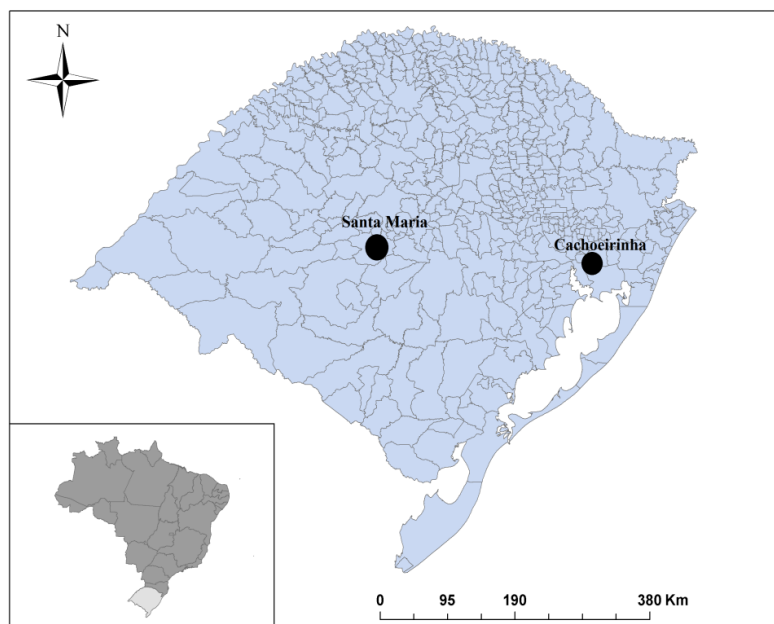
O solo da área experimental em Santa Maria é uma transição entre a Unidade de Mapeamento São Pedro (Argissolo Vermelho distrófico arênico) e a Unidade de Mapeamento Santa Maria (Alissolo Hipocrômico argilúvico típico), com as seguintes características (0-20 cm): pH, 5,8; P, 21,8 mg dm<sup>-3</sup>; K, 25 mg dm<sup>-3</sup>; MO, 2,5% ; CTC pH7, 14,4 cmolc dm<sup>-3</sup>. No período anterior ao experimento, a área havia sido cultivada com aveia preta durante o período invernal. A área apresenta declividade de 7% e boas condições de drenagem e representativa de terras altas de cultivo de soja no Rio Grande do Sul.

Na área experimental em Cachoeirinha, o solo é um Gleissolo Háptico Ta distrófico típico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 1999; STRECK et al., 2008), com as seguintes características (0-20 cm): pH, 5,6; P, 29,5 mg dm<sup>-3</sup>; K, 30 mg dm<sup>-3</sup>; MO, 1,4% ; CTC pH7, 3,9 cmolc dm<sup>-3</sup>. A área experimental é representante de áreas sistematizada orizícolas de terras baixas (solos hidromórficos) no Rio Grande do Sul e com cultivo sucessivo de arroz irrigado.

Segundo a classificação de Köppen, o clima nos dois locais é do tipo Cfa, subtropical úmido com verões quentes e sem estação seca definida (KUINCHTNER; BURIOL, 2001). O controle de plantas daninhas foi realizado através de capinas e com herbicidas pós e pré-emergentes. O manejo de doenças foi realizado com aplicações preventivas de fungicidas. O controle de insetos ocorreu assim que as pragas eram detectadas e identificadas de forma que causassem o mínimo de dano à cultura. A adubação de base, a inoculação e o tratamento das sementes com fungicida e inseticida, foram realizados de acordo com as indicações técnicas da cultura para obtenção de altas produtividades.



**Figura 1** – Mapa do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, com os locais onde foram conduzidos os experimentos de soja durante o ano agrícola 2014/2015 em Santa Maria e Cachoeirinha, RS, Brasil.



Fonte: Autor.

Foram utilizadas duas cultivares de soja (Tabela 1) e as semeaduras foram realizadas no dia 24/10/2014, dentro do período indicado pelo Zoneamento Agroclimático da Soja que é de 1/10 a 31/12 (MAPA, 2015). As cultivares escolhidas são cultivares de ciclo precoce, que encontram-se disponíveis no mercado e que apresentam duração de ciclo muito semelhante (GM 6,3 e 6,2), mas com diferentes tipos de crescimento (determinado e indeterminado). A cultivar TEC IRGA 6070 RR foi desenvolvida visando estabilidade de produtividade, rusticidade e principalmente maior tolerância a períodos de excesso hídrico no solo, para cultivo na região orizícola do Rio Grande do Sul.

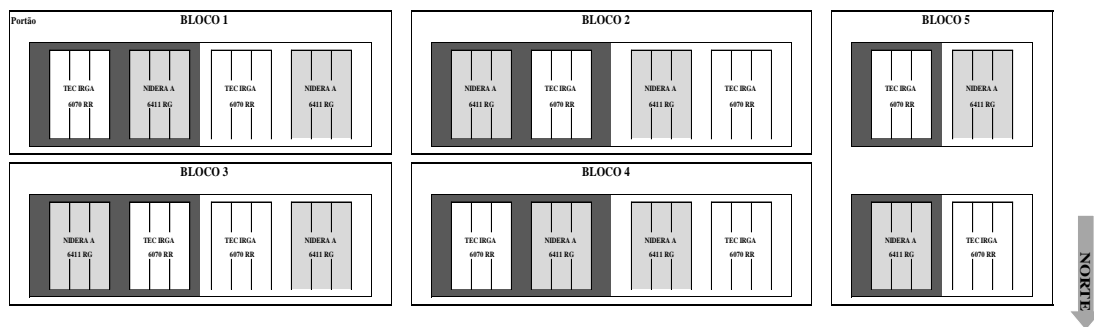
**Tabela 1** – Cultivares de soja e sua descrição quanto ao grupo de maturação, ciclo e tipo de crescimento utilizadas nos experimentos de campo em Santa Maria e Cachoeirinha, RS, Brasil, 2014/2015.

Cultivares	Grupo de Maturação	Ciclo	Tipo de crescimento
TEC IRGA 6070 RR	6,3	Precoce	Indeterminado
Nidera NA 6411 RG	6,2	Precoce	Determinado

Fonte: Autor.

Em Santa Maria, o delineamento experimental foi blocos ao acaso com cinco repetições, em esquema bifatorial de parcelas subdivididas. As disponibilidades hídricas constituíram as parcelas principais (com e sem irrigação suplementar) e as cultivares (TEC IRGA 6070 RR e Nidera NA 6411 RG) as sub-parcelas. A Unidade Experimental foi quatro linhas de plantas com 3 m de comprimento e espaçamento de 0,5 m entre linhas, na densidade de 30 plantas m<sup>-2</sup> e profundidade de sementeira de 0,05 m (Figura 2). A sementeira foi realizada de forma manual.

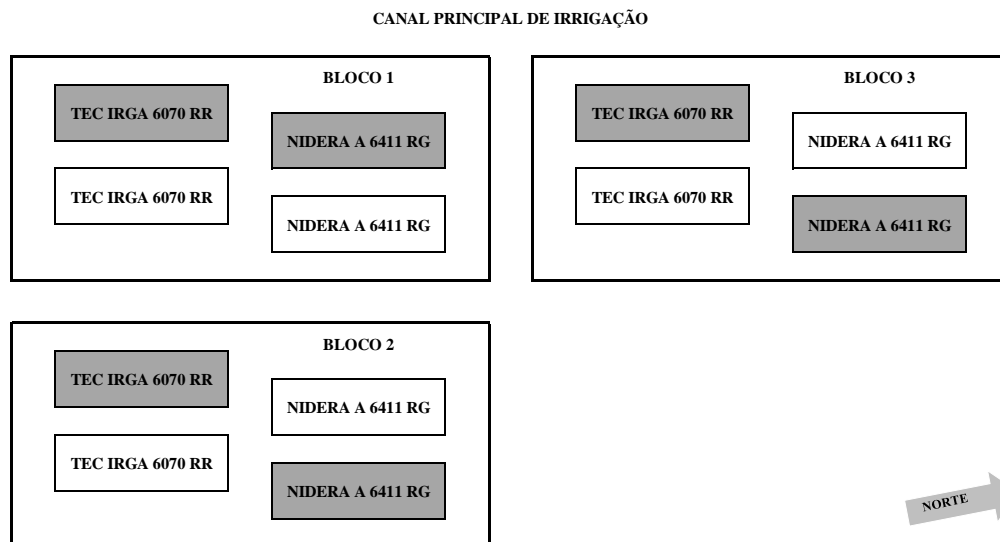
**Figura 2** – Croqui da área experimental com os tratamentos, os blocos e as unidades experimentais. As áreas em cinza representam as parcelas que foram irrigadas no experimento realizado no ano agrícola 2014/2015, em Santa Maria, RS, Brasil.



Fonte: Autor.

Em Cachoeirinha, o delineamento experimental foi blocos ao acaso com três repetições, em esquema bifatorial de parcelas subdivididas, sendo a parcela principal constituída pelas cultivares (TEC IRGA 6070 RR e Nidera A 6411) e as sub-parcelas as disponibilidades hídricas (com e sem irrigação suplementar). A unidade experimental foi 26 linhas de plantas, com 10 m de comprimento, onde as duas linhas da extremidade de cada parcela foram consideradas como bordadura assim como 1m de cada lado (Figura 3). Cada unidade experimental foi entaipada, para a realização posterior dos tratamentos de irrigação.

**Figura 3** - Croqui da área experimental com os tratamentos, os blocos e as unidades experimentais. As áreas em cinza representam os manejos de irrigação suplementar no experimento realizado no ano agrícola 2014/2015, em Cachoeirinha, RS, Brasil.



Fonte: Autor.

## 4.2 IRRIGAÇÃO E BALANÇO HÍDRICO DO SOLO

Em Santa Maria, nos tratamentos com irrigação, as lâminas de irrigação foram calculadas com base no cálculo do balanço hídrico do solo e em Cachoeirinha com base potencial matricial da água no solo.

Em Santa Maria, a Capacidade de Água Disponível (CAD) nos tratamentos com irrigação foi mantida entre 60-100% considerando-se a profundidade do sistema radicular ao longo da estação de crescimento. A irrigação foi realizada por sistema de gotejamento (Figura 4). O volume de água aplicada foi medido com um hidrômetro no início da área experimental.

**Figura 4** – Irrigação realizada por gotejamento no experimento de Santa Maria, RS, durante o ano agrícola 2014/2015.



Fonte: Autor.

Em Cachoeirinha, ocorreu o monitoramento do potencial da água em sub-superfície a partir de 8/12/2014, quando as primeiras plantas entraram no período reprodutivo, fase na qual ocorre aumento da demanda hídrica e a produtividade é mais afetada por estresse hídricos (BOERMA; ASHLEY, 1982; KORTE et al., 1983b). Antes de 8/12/2014, o conteúdo de água no solo foi monitorado pelo cálculo do balanço hídrico.

Para observar o potencial da água foram utilizados tensiômetros de cápsula porosa instalados a 10 cm de profundidade, em que ao atingir -40 kPa era realizada a irrigação. O volume de água utilizada na irrigação também foi medido com hidrômetro. A irrigação foi pelos sulcos do microcamalhão (Figura 5), na forma de “banhos”, que é o manejo de irrigação mais usado pelos agricultores que cultivam soja em áreas de terras baixas no RS (Figura 6). Esta irrigação é realizada pelo princípio da irrigação deficitária visando a máxima eficiência do uso da água e não necessariamente atende a toda a demanda hídrica da cultura, ou seja, as plantas podem sofrer algum estresse hídrico (FRIZZONE, 2007).

**Figura 5** – Microcamalhoneira semeadora-adubadora utilizada na semeadura do experimento em Cachoeirinha, RS, no ano agrícola 2014/2015.



Fonte: Autor.

**Figura 6** – Irrigação por sulco realizada no experimento de Cachoeirinha, RS, Brasil, durante o ano agrícola 2014/2015.



Fonte: Autor.

Em Santa Maria, os dados diários de precipitação pluvial, temperatura mínima (TMIN) e máxima (TMAX) do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ), umidade relativa

média do ar (%), velocidade média do vento a 10 m (m/s) durante o experimento foram coletados na estação meteorológica automática pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia, localizada a aproximadamente 100m da área do experimento. Em Cachoeirinha, os mesmos dados foram coletados em uma estação meteorológica automática localizada a cerca de 200m da área experimental.

Foi utilizado o modelo de balanço hídrico diário sequencial de Thornthwaite e Mather (1955) para calcular o balanço hídrico no solo com base na CAD, evapotranspiração potencial (ET<sub>o</sub>), evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) e precipitação pluvial, e a partir disso calcula-se o Negativo Acumulado (NegAc), o Armazenamento (ARM), a Alteração no armazenamento (ALT), a Evapotranspiração Real (ETR), a deficiência hídrica (Def.) e o excedente hídrico (EXC).

Para estimativa da evapotranspiração potencial (ET<sub>o</sub>) foi utilizado o método de Penman-Monteith (ALLEN, 1998):

$$ET_o = (0,408 * S (R_n - G) + (y * 900 * u_2 (e_s - e) / (T + 273))) / (S + y (1 + 0,34 * u_2)) \quad (1)$$

no qual S é a Tangente à curva de saturação do vapor d'água para a temperatura média diária do ar (kPa °C<sup>-1</sup>), R<sub>n</sub> = saldo de radiação (MJ m<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup>), G é o fluxo de calor no solo (5% do R<sub>n</sub>), y é constante psicrométrica (0,0662 kPa °C<sup>-1</sup>), u<sub>2</sub> = velocidade média de vento (m s<sup>-1</sup>) a 2 metros de altura; e<sub>s</sub> = pressão de saturação de vapor no ar (kPa), e = pressão parcial de vapor no ar (kPa), T = temperatura média diária do ar (°C).

A tangente à curva de saturação do vapor d'água para a temperatura média diária do ar (kPa °C<sup>-1</sup>) foi obtida por:

$$S = 4098 * e_s / (T_m + 237,3)^2 \quad (2)$$

O saldo de radiação (R<sub>n</sub>) em MJ m<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup> foi calculado por:

$$R_n = R_g (1 - r) + L^* \quad (3)$$

no qual R<sub>g</sub> é a radiação solar global incidente (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), (1-r) refere-se à radiação solar no topo da cultura de referência menos a radiação solar perdida por albedo médio (1-0,23) e L\* é o saldo de radiação de ondas longas.

$$L^* = -4,65785 * 10^{-9} * T^4 * (0,56 - 0,0779 * e^{0,5}) * [(1,225 * R_g) / (0,75 * K_o) - 0,2614] \quad (4)$$

se a razão de radiação solar (R<sub>g</sub>/0,75\*K<sub>o</sub>) for menor que 0,3 iguala-se a 0,3, e se for maior que 1,0 iguala-se a 1,0. K<sub>o</sub> é a radiação solar incidente no topo da atmosfera (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>).

O saldo de radiação é dado pela equação abaixo representada:

$$Q^* = 0,77 * R_g - [0,95 * 4,90 * 10^{-9} * (T + 273)^4 * (0,56 - 0,0791 * (e^{0,5})) * (0,1 + 0,9 * R_g / K_o \downarrow)] \quad (5)$$

em que:  $R_g$  é a radiação solar global incidente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ); 0,77 refere-se à radiação solar no topo da cultura de referência menos a energia solar perdida por albedo médio (1-0,23); 0,95 = Emissividade ( $\epsilon$ );  $4,9 \cdot 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1} \text{ K}^{-4}$  = Constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma$ );  $T$  = temperatura média diária do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $e$  = pressão parcial de vapor (hPa);  $K_{o\downarrow}$  = radiação solar no topo da troposfera. Da equação original, a razão de insolação será substituída pela relação  $R_g/K_{o\downarrow}$ .

A pressão de saturação de vapor no ar ( $e_s$ ) em kPa é calculada por:

$$e_s = 0,6108 * \exp ((17,27 * T) / (T + 237,3)) \quad (6)$$

A pressão parcial de vapor no ar ( $e$ ) em kPa é calculada por:

$$e = e_s * UR / 100 \quad (7)$$

no qual UR é a umidade relativa média do ar (%).

A velocidade média de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) a 2 metros de altura ( $u_2$ ) é calculada por:

$$u_2 = u_{10} * ((2 / 10)^{0.142857}) \quad (8)$$

no qual  $u_{10}$  é a velocidade média do vento a 10 m (m/s).

Em três datas foram abertas trincheiras para acompanhar o aprofundamento do sistema radicular até que se identificou-se a estabilização do aprofundamento e a região onde ocorreu a maior concentração de raízes, bem como acompanhar a viabilidade dos nódulos fixadores de nitrogênio através de avaliações visuais.

A determinação das variáveis de solo utilizadas no modelo de balanço hídrico foi realizada na área experimental de Santa Maria por Tironi (2016). Em Cachoeirinha as coletas de amostra de solo ocorreram dia 22/11/2014. Em ambos os locais foram realizadas coletas de amostras de solo com quatro repetições mantendo-se a estrutura preservada em anéis volumétricos.

Nos dois locais o solo foi dividido em três camadas. Em Santa Maria as camadas foram 0-15 cm, 15-30 cm (limite com o horizonte B textural) e 30-50 cm. Em Cachoeirinha, 0-13 cm (limite com a camada compactada), 12-20 cm e 20-50 cm.

Para as tensões de 500 e 1500 kPa, o conteúdo gravimétrico de água foi quantificado com amostras deformadas, cujo potencial matricial foi medido em um psicrômetro de ponto de orvalho WP4. As amostras foram selecionadas para representar pontos com diferenças de granulometria. O  $\theta$  nas tensões de 500 e 1500 kPa foi obtido multiplicando-se o conteúdo gravimétrico de água pela densidade do solo ( $D_s$ ) de cada ponto de coleta.

As amostras dos anéis volumétricos foram levadas para o laboratório, realizado o “toalete” e colocadas para saturar por 24 horas. Após saturadas, as amostras foram pesadas

(para cálculo do conteúdo de água na porosidade total) e colocadas na mesa de tensão à 10, 60 e 100cm de coluna d'água, na panela de pressão a 330 e 1000 cm de coluna d'água, que junto com os valores de conteúdo de água medidos no WP4 foram os dados observados utilizados para construção da curva de retenção de água.

A capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) foi considerada como sendo o conteúdo de água na capacidade de campo (cc) menos o conteúdo de água no ponto de murcha permanente multiplicado pela profundidade do aprofundamento do sistema radicular). Os conteúdos de água em 10 kPa e a 1500 kPa foram estimados para determinar o conteúdo de água na cc e no ponto de murcha permanente (pmp).

No modelo de balanço hídrico diário sequencial de Thornthwaite e Mather (1955), o cálculo da ETc foi dado por:

$$ETc = ETo * Kc \quad (9)$$

onde ETo é a evapotranspiração potencial e Kc o coeficiente da cultura. Os valores de Kc ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura foram calculados por interpolação linear entre os valores relatados por Berlato et al. (1986).

Se a diferença entre precipitação pluvial e evapotranspiração potencial da cultura (P-ETc) for negativa (significa que no dia a precipitação pluvial foi menor que a evapotranspiração potencial da cultura) soma-se essa diferença no negativo acumulado (NegAc). Se esta diferença for maior que zero, é calculada uma reposição pela seguinte equação:

$$NegAc = CAD * Ln ARM / CAD \quad (10)$$

no qual ARM é o armazenamento em mm.

Se P-ETc do dia for maior que 0, e o ARM do dia anterior mais a P-ETc for maior que a CAD, limita-se no valor da CAD, senão soma-se ao ARM do dia anterior a P-ETc do dia. Se P-ETc for menor que 0, então o ARM foi calculado pela equação abaixo:

$$ARM = CAD * \exp^{-|NegAc/CAD|} \quad (11)$$

Para o primeiro dia de simulação assumiu-se ARM igual a 80% da CAD, e NegAc igual a 20% da CAD (CAD – (CAD\*0,8)).

A ALT é a diferença entre o ARM do dia menos o ARM do dia anterior. A Evapotranspiração Real da cultura (ETR) é calculada da seguinte maneira: se a P-ETc for maior que 0, ou seja, se choveu mais que a demanda de evapotranspiração potencial da cultura, a ETR nesse dia vai ser igual a ETc. Se a P-ETc for menor que 0, a ETR será a precipitação pluvial do dia somado ao valor em módulo da alteração.



A Def é a diferença entre ETc e ETR, sendo assim haverá Def quando a evapotranspiração real da cultura for menor que a evapotranspiração máxima. Se o ARM for menor que a CAD, o excedente hídrico (EXC) será zero. Se o ARM for maior que a CAD, o excedente hídrico (EXC) será o que precipitou a mais que a ETc menos a ALT.

O conteúdo de água atual diário resulta do conteúdo de água do ARM convertido em base volumétrica (dividindo pela profundidade), somado ao limite inferior da CAD (conteúdo de água no ponto de murcha permanente).

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO, TROCAS GASOSAS E COMPONENTES DO RENDIMENTO DE GRÃOS.

Em ambos locais, a data de emergência (VE) foi considerada quando 50% do total de plantas apresentaram os cotilédones acima do solo. Foram identificadas 10 plantas aleatoriamente, em duas linhas centrais das parcelas, logo após a emissão do primeiro par de folhas unifoliadas. Nas plantas identificadas foi contado, duas vezes por semana, o número de nós visíveis (NN). Foi considerado um nó visível quando o trifólio acima deste não apresentou mais os bordos dos folíolos se tocando (SETIYONO et al., 2007). O número final de nós (NFN) na haste principal das plantas marcadas foi considerado quando a haste principal não emitiu mais nós mantendo o NN constante.

Foram realizadas avaliações a cada dois dias para identificar os estágios R1; R3; R3,5; R4; R5; R6; R7 e R8, segundo a escala de Fehr e Caviness (1977). Em todas as avaliações foi avaliado a presença ou ausência de flores e/ou legumes em fase de enchimento de grão na planta, para analisar o período de duração total da floração e de enchimento de grãos.

A soma térmica diária (STd, °C dia) foi calculada pelo método (ARNOLD, 1960):

$$STd = Tmed - Tb * 1dia \quad (12)$$

{quando  $Tb \leq Tmed \leq Topt$ }

e

$$STd = (Tot - Tb) * (TMAX - Tmed / TMAX - Topt) \quad (13)$$

{quando  $Topt < Tmed \leq TMAX$ , se  $Tmed < Tb$  então  $Tmed = Tb$  e se  $Tmed > TMAX$  então  $Tmed = TMAX$ }

em que Tmed é a media aritmética da TMAX e TMIN diária, Tb é a temperatura base, Topt é a temperatura ótima e TB é a temperatura máxima para o desenvolvimento da soja. Foi utilizado  $Tb = 7,6$  °C,  $Top = 31$  °C e  $TB = 40$  °C para o cálculo da soma térmica da fase da

Semeadura até início da fase reprodutiva (R1), e  $T_b = 0,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{opt} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $T_{MAX} = 38,7^\circ\text{C}$  para o cálculo da soma térmica da fase reprodutiva (R1-R8) (SETIYONO et al., 2007).

A soma térmica diária foi acumulada a partir da semeadura, resultando na soma térmica acumulada (STa), ou seja:

$$STa = \sum STd \quad (14)$$

A área foliar foi calculada de forma não destrutiva com base na metodologia descrita por Richter et al. (2014), onde previamente foram coletadas 30 folhas de cada cultivar para a determinação do coeficiente de forma para estimar a área foliar a partir do comprimento (C) e (L) largura do folíolo central de cada folha. As 30 folhas foram digitalizadas e com a utilização do software Quant 1.0.1 foi realizada a determinação da área foliar em  $\text{cm}^2$ . Nessas mesmas folhas foi realizada a medição do C e a maior largura (L) de cada folíolo central dos trifólios. A partir da relação entre área da folha e as dimensões lineares do folíolo central foi ajustado um modelo linear para cada cultivar, com o coeficiente linear sendo forçado a zero e o coeficiente angular é o coeficiente de forma (Apêndice A).

Com a utilização de um medidor de trocas gasosas (LCi-SD Portable Photosynthesis System), foram obtidos valores de condutância estomática (Gs) ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), A ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), radiação fotossinteticamente ativa (P.A.R) e temperatura foliar (Tl) ( $^\circ\text{C}$ ). A forma de obtenção e estimativa dos valores fornecidos pelo equipamento estão descritos no Anexo A. As avaliações de trocas gasosas foram realizadas em diferentes momentos do ciclo entre as 10:00 e as 14:00h quando não houve nebulosidade, obtendo-se assim as trocas gasosas sob máxima radiação solar. As medidas de trocas gasosas foram realizadas na última folha com o trifólio completamente expandido na haste principal.

Coletas de plantas para determinação da massa de matéria seca ocorreram somente em Cachoeirinha, onde 2m na linha de plantas eram cortados rente ao solo para avaliar a distribuição de matéria seca na parte aérea no decorrer do ciclo. As coletas ocorreram quinzenalmente, sendo as amostras separadas em limbo foliar, pecíolo, caule, legumes e grãos. A secagem ocorreu em estufa de ventilação forçada a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  na EEA-IRGA e no Departamento de Fitotecnia da UFSM.

Na data da colheita foram determinadas as variáveis altura da planta, altura e nó de inserção do primeiro legume, número de legumes por planta, número de legumes por nó, número de ramificações, número de legumes por ramo. Foi considerado como ramificação a estrutura desenvolvida a partir de qualquer nó da haste principal e que possuía no mínimo um nó, caracterizado pela presença de folha trifoliolada (MARCHESAN, 1982).

A produtividade de grãos ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ) foi calculada a partir da coleta de duas linhas no centro das parcelas com 2m, cada. Os grãos de soja foram colocados em estufa de ventilação forçada a  $60^\circ\text{C}$  até massa constante, para determinação da massa seca (MS) de 1000 grãos e para a determinação da produtividade foi considerado 13% de umidade. Os demais componentes do rendimento de grãos e características que afetam a colheita foram obtidos a partir de avaliações nas plantas marcadas. A nota de acamamento (0-5) foi obtida por avaliação visual em toda a parcela e considerou-se como “0” a planta completamente ereta e 5 a planta completamente deitada.

A eficiência do uso da água (EUA) é a relação entre a produtividade e volume de água utilizado (MARCOLIN, 2011). Para determinar a EUA foi utilizada a produtividade de cada parcela e o volume de água das precipitações pluviais e irrigações menos os valores de excedentes (EXC) para o período da semeadura até o ponto de maturação fisiológica (R7).

Foi realizada análise de variância segundo o modelo bifatorial com parcelas subdivididas para testar a significância dos fatores e da interação cultivares versus disponibilidade hídrica. As análises foram realizadas com o pacote estatístico SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2010).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

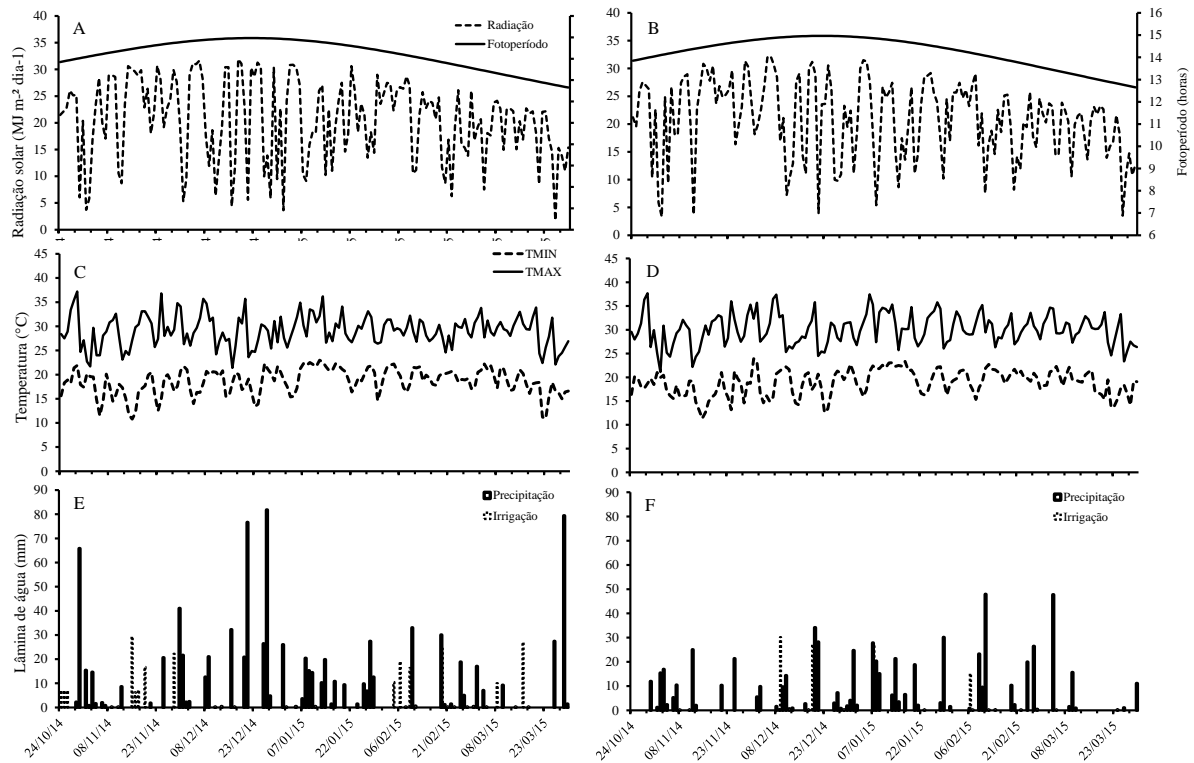
O ano agrícola de 2014/2015 no Rio Grande do Sul foi caracterizado pela ocorrência de chuvas abundantes e bem distribuídas ocorridas no período, condições que proporcionaram adequada disponibilidade hídrica para a cultura da soja na maior parte do estado do Rio Grande do Sul, contribuindo para possibilitar recorde de produção e produtividade no estado (CONAB, 2015).

O principal fator que regula o desenvolvimento da cultura da soja é o fotoperíodo (SETIYONO et al., 2007) e em função dos experimentos de Santa Maria e Cachoeirinha localizarem-se praticamente na mesma latitude ( $29^{\circ}43'S$  e  $29^{\circ}56'S$ , respectivamente) e terem sido semeados no mesmo dia, o comprimento do dia praticamente foi o mesmo nos dois locais (Figura 7A e 7B).

A TMAX e TMIN do ar em nenhum momento do ciclo de desenvolvimento das plantas de soja atingiram os valores cardinais ( $T_b$  e  $T_B$ ) considerados por Setiyono et al. (2007). O período foi caracterizado por temperaturas amenas, influenciadas pelas chuvas frequentes (Figura 7).

Em Santa Maria, todas as parcelas receberam irrigação de 7 mm no dia da semeadura e nos dois dias seguintes para garantir a umidade do solo necessária para a germinação das sementes (Figura 7E), após esse período a irrigação foi cessada nas parcelas que não receberam irrigação suplementar. Nos tratamentos com irrigação suplementar foi aplicada lâmina d'água mais 11 vezes conforme era necessário totalizando 240mm de irrigação. As precipitações chegaram a 814 mm para as últimas parcelas que entraram no estágio de maturidade fisiológica de R7 segundo a escala de Fehr e Caviness (1977).

**Figura 7** – Densidade de fluxo de radiação solar global incidente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e fotoperíodo (A, B), temperaturas mínimas (TMIN) e máximas (TMAX) diárias do ar (C, D), lâmina de água (mm) oriunda de precipitações e irrigações (E, F), durante o período experimental desde a semeadura até o final do ciclo das plantas de soja em Santa Maria (A, C, E) e em Cachoeirinha (B, D, F), RS, Brasil, 2014/ 2015.

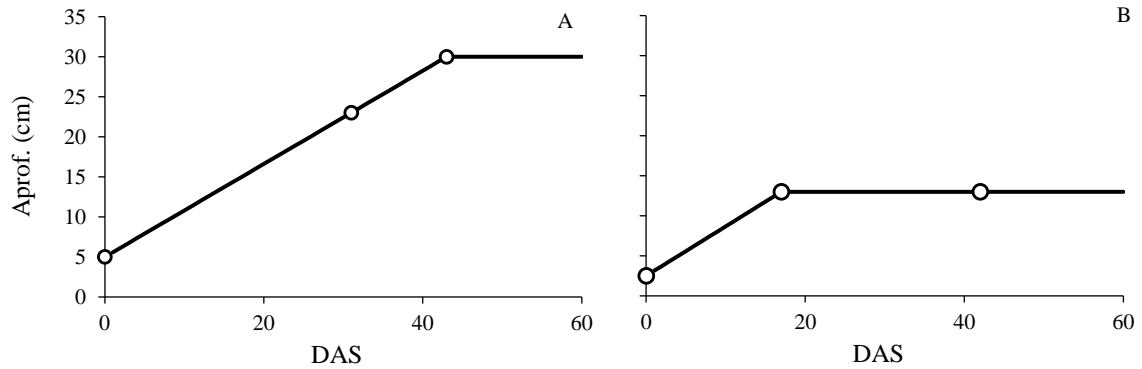


Fonte: Autor.

Em Cachoeirinha, a umidade inicial do solo encontrava-se acima de 60% da CAD no momento da semeadura e foram realizadas quatro irrigações ao longo do ciclo totalizando 101 mm. As precipitações pluviárias totalizaram 637 mm até o momento em que a última parcela chegou a maturidade fisiológica.

No início do ciclo de desenvolvimento da cultura o aprofundamento do sistema radicular (Ze), considerado onde se concentram a maior parte das raízes, foi muito semelhante entre as cultivares e entre as parcelas com e sem irrigação suplementar, portanto para cada local de estudo foi considerado um aprofundamento único (Figura 8). Essa resposta pode ser observada na evolução inicial de matéria seca de raiz no experimento de Cachoeirinha (Figura 9) e pode ser atribuído como uma característica que não apresenta variabilidade entre cultivares e grupo de maturação semelhante.

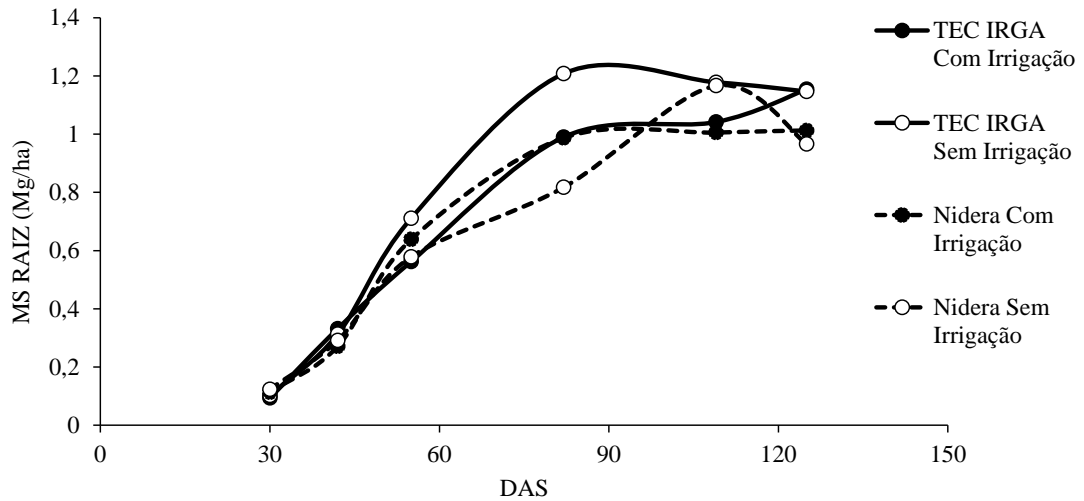
**Figura 8** – Aprofundamento do sistema radicular em dias após a semeadura (DAS) nos experimentos de Santa Maria (A) e Cachoeirinha (B) – RS, 2014/ 2015. Os pontos vazados representam datas das observações.



Fonte: Autor.

Em Santa Maria, foi observado o aprofundamento do sistema radicular até os 43 dias após a semeadura (DAS) e Cachoeirinha em 17 DAS. A variação na evolução de matéria seca do sistema radicular em Cachoeirinha entre as cultivares e disponibilidades hídricas começou a apresentar variação apenas quando as disponibilidades de água no solo foram alteradas, principalmente em função do início da irrigação aos 47 DAS.

**Figura 9** – Evolução da matéria seca de Raiz (MS RAÍZ) em dias após a semeadura (DAS) para as duas cultivares, com e sem irrigação suplementar em Cachoeirinha, RS, 2014/ 2015.



Fonte: Autor.

Os conteúdos de água no solo no potencial de 1500 kPa e 10 kPa foram considerados como o ponto de murcha permanente (pmp) e a cc em cada uma das profundidades avaliadas (Tabela 2). Em Santa Maria como a maior parte do sistema radicular localizou-se a até 30 cm de profundidade considerou-se como o pmp 0,16 e 0,338 como cc, já que são valores médios das camadas 0 - 15 e 15 - 30 cm (TIRONI, 2016). Em Cachoeirinha, como a camada de impedimento ao aprofundamento do sistema radicular encontra-se em 13 cm de profundidade utilizou-se os valores determinados especificamente para essa primeira camada do solo. As demais camadas são caracterizadas pela elevada  $D_s$ , típica de áreas orizícolas (SARTORI et al., 2016).

**Tabela 2** – Conteúdo de água à 10 kPa ( $\Theta_{10}$  kPa), à 1500 kPa ( $\Theta_{1500}$  kPa), CAD potencial, porcentagem de areia, silte e argila, porosidade total, macro e micro porosidade e densidade do solo (Ds) de cada camada de solo em Santa Maria e Cachoeirinha – RS, Brasil.

	Camada	$\Theta_{10\text{kPa}}$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\Theta_{1500\text{kPa}}$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	CAD (mm)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Porosidade (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )			Ds (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
								Total	Macro	Micro	
Santa Maria	1 (0-15 cm)	0,310	0,163	22,2	35	42	22	0,402	0,081	0,321	1,597
	2 (15-30 cm)	0,365	0,157	31,2	35	39	25	0,440	0,060	0,380	1,403
	3 (30-50 cm)	0,369	0,200	33,8	28	37	35	0,493	0,106	0,386	1,261
Cachoeirinha	1 (0-13 cm)	0,373	0,095	36,2	55	30	15	0,425	0,338	0,087	1,60
	2 (13-20 cm)	0,325	0,094	16,1	52	32	16	0,370	0,294	0,076	1,75
	3 (20-50 cm)	0,329	0,103	67,7	55	28	17	0,369	0,297	0,072	1,79

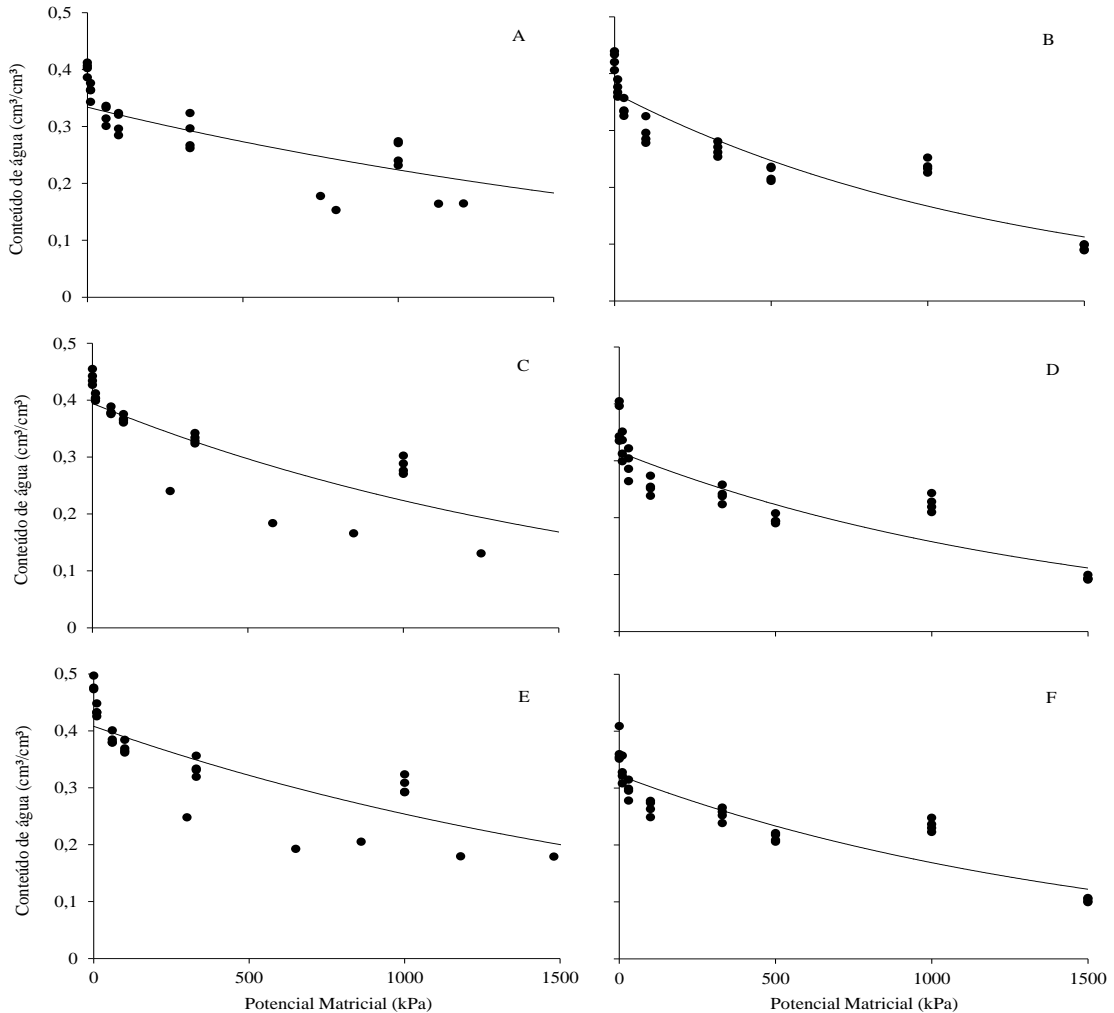
Fonte: Autor.

Existe uma relação inversa de macroporosidade e microporosidade do solo nos solos de Cachoeirinha e Santa Maria (Tabela 2). Os pequenos valores de microporosidade em Cachoeirinha indicam uma baixa capacidade de armazenamento de água e aliado a elevada densidade caracterizam a desestruturação física típica das áreas onde é cultivado arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul (MENTGES et al., 2013), além de aumentar a resistência a penetração no solo (ORTIGARA et al., 2014).

Por se tratar de um solo mais arenoso, conforme se aumenta o potencial matricial, o conteúdo de água no solo diminui de forma mais acentuada em Cachoeirinha em relação a Santa Maria (Figura 10).



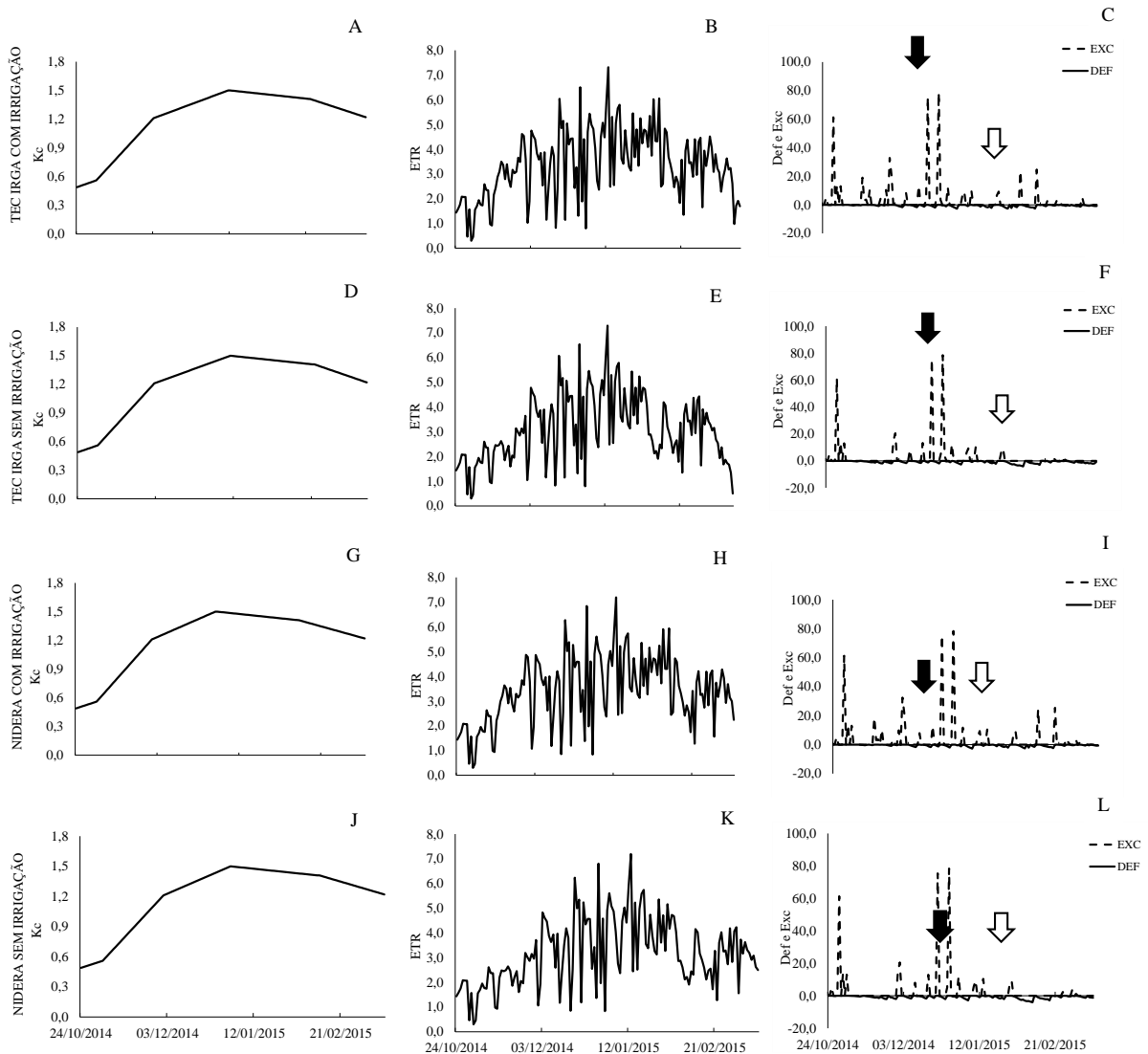
**Figura 10** – Curvas de retenção de água no solo na área experimental de Santa Maria, na camada de 0-15 cm (A), 15-30 cm (C), 30-50 cm (E) e em Cachoeirinha, na camada de 0-13 cm (B), 13-20 cm (D) e 20-50 cm (F).



Fonte: Autor.

Nos dois locais de condução de experimentos os valores de  $K_c$  foram semelhantes em função da similaridade no desenvolvimento das cultivares nas diferentes disponibilidades hídricas (Figura 11 e 12). Os dias de ocorrência de deficiência hídrica em Santa Maria foram muito pouco frequentes e quando ocorreram são caracterizados como deficiências de baixa magnitude (Figura 11C, 11F, 11I, 11L). Em Cachoeirinha a ocorrência das deficiências é muito mais frequente em função do reduzido armazenamento de água no solo, mas em função das frequentes precipitações nenhum período longo de deficiência foi registrado (Figura 12C, 12F, 12I, 12L).

**Figura 11** – Evolução do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) (A, D, G e J), evapotranspiração real da cultura (ETR) (B, E, H e K), e disponibilidade hídrica (C, F, I e L), onde a deficiência (Def) ocorre quando a ETR é menor que  $ET_c$  e o excedente (Exc) quando a precipitação supera a CAD máx para as duas cultivares com e sem irrigação suplementar durante o período de condução do experimento em Santa Maria, RS, 2014-2015. As setas indicam a data de ocorrência do R1 (seta sólida) e o R5 (seta vazada).

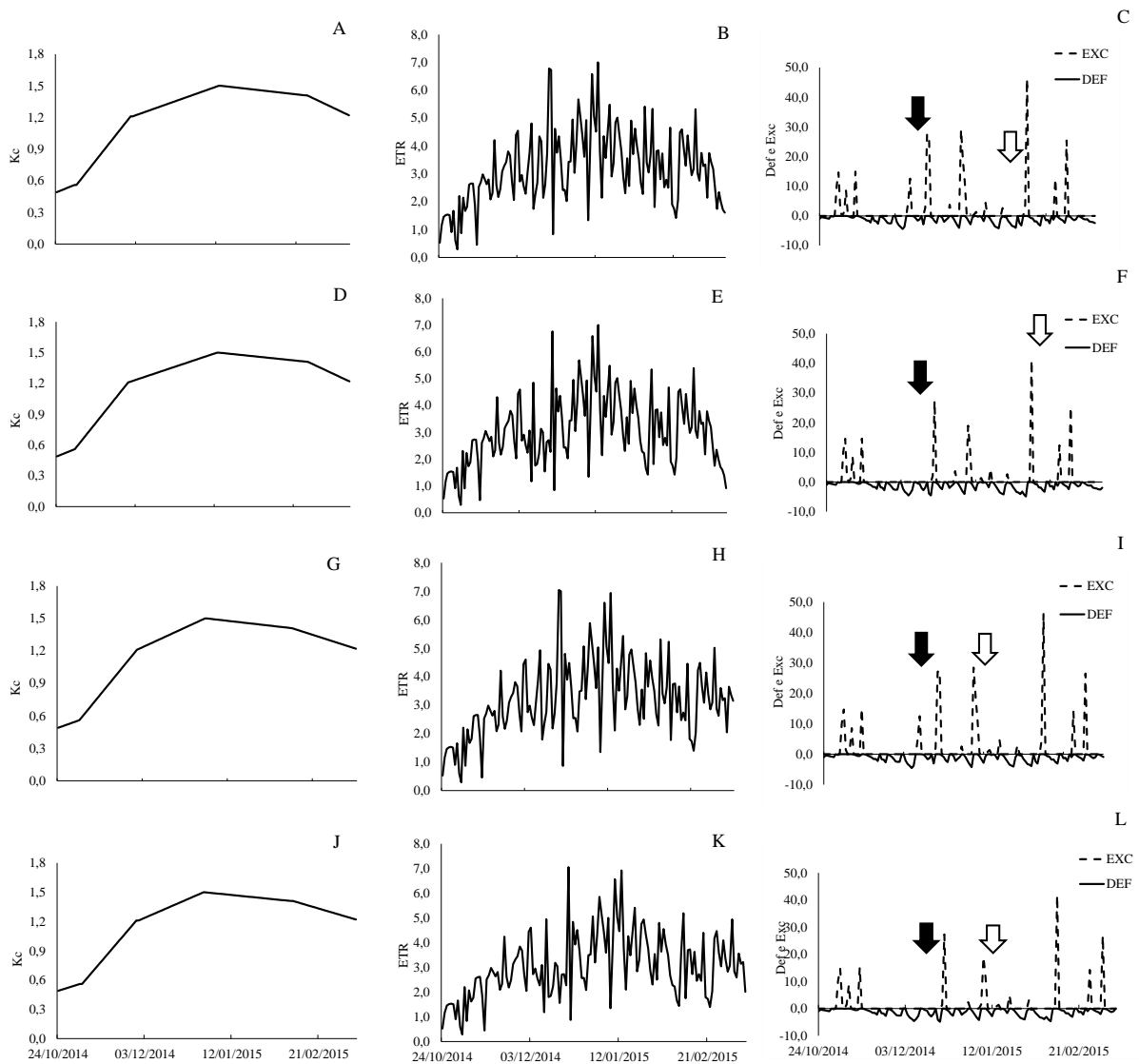


Fonte: Autor.

A limitação ao aprofundamento do sistema radicular em 13 cm de profundidade é o principal responsável pela pequena CAD em Cachoeirinha (36,2mm). A presença desta camada compactada típica de solos onde ocorre o cultivo do arroz irrigado é o fator limitante ao aprofundamento (MENTGES et al., 2013). Alternativas para romper essa limitação em alguns pontos são a utilização do sistema de preparo do solo com escarificação e utilização de haste sulcadora na semeadora (SARTORI et al., 2016). A utilização dessas práticas permitem

o aprofundamento do sistema radicular possibilitando a absorção da água que encontra-se em camadas mais profundas.

**Figura 12** – Evolução do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) (A, D, G e J), evapotranspiração real da cultura (ETR) (B, E, H e K), e disponibilidade hídrica (C, F, I e L), onde a deficiência (Def) ocorre quando a ETR é menor que a  $ET_c$  e o excedente (Exc) quando a precipitação supera a CAD máx para as duas cultivares com e sem irrigação suplementar em Cachoeirinha durante o período de condução do experimento, RS, 2014-2015. As setas indicam a data de ocorrência do R1 (seta sólida) e o R5 (seta vazada).

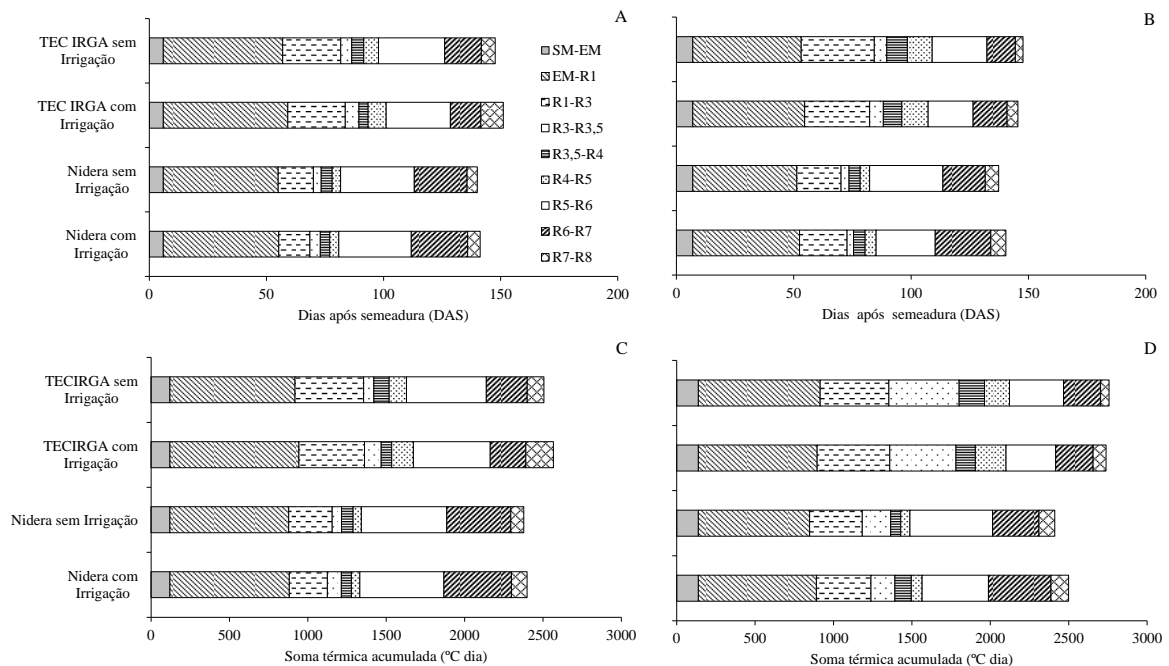


Fonte: Autor.

Nos dois locais de cultivo a cultivar TEC IRGA 7060 RR apresentou maior duração total do ciclo em DAS, variando de um máximo de 151 dias em Santa Maria e o mínimo de

146 dias em Cachoeirinha (Figura 13A e 13B). A cultivar Nidera NA 6411 RG variou o ciclo entre 141 e 137 dias para Santa Maria e Cachoeirinha, respectivamente. Com exceção da cultivar TEC IRGA 7060 RR em Cachoeirinha a irrigação suplementar influenciou o aumento do ciclo nas duas cultivares e nos dois locais de estudo.

**Figura 13** – Duração das fases de desenvolvimento segundo a escala de Fehr e Caviness (1977) das cultivares de soja TEC IRGA 6070 RR (A e C) e Nidera NA 6411 RG (B e D) com e sem irrigação suplementar, em dias (A e B) e em °C dia (C e D), em Santa Maria (A e C) e Cachoeirinha (B e D), no ano agrícola 2014/ 2015.



Fonte: Autor.

Segundo Korte et al. (1983a), a ocorrência de períodos com deficiência hídrica e altas temperaturas do ar aceleram o ciclo da soja a partir da metade final do período reprodutivo, enquanto que a suplementação de água durante esse período faz com que o ciclo tenha a duração normal da cultivar. A pequena variação no ciclo total para as duas cultivares entre a condição com e sem irrigação suplementar indica que não ocorreu deficiência hídrica severa nos experimentos.

A maior soma térmica acumulada (STa) observada para as cultivares em Cachoeirinha indicam que de forma geral a temperatura do ar foi mais alta do que em Santa Maria, mas mantendo-se abaixo da temperatura máxima para o desenvolvimento (TB) da cultura (Figura 13C e 13D). A similaridade de STa para o período da semeadura até R1 se deve a influência

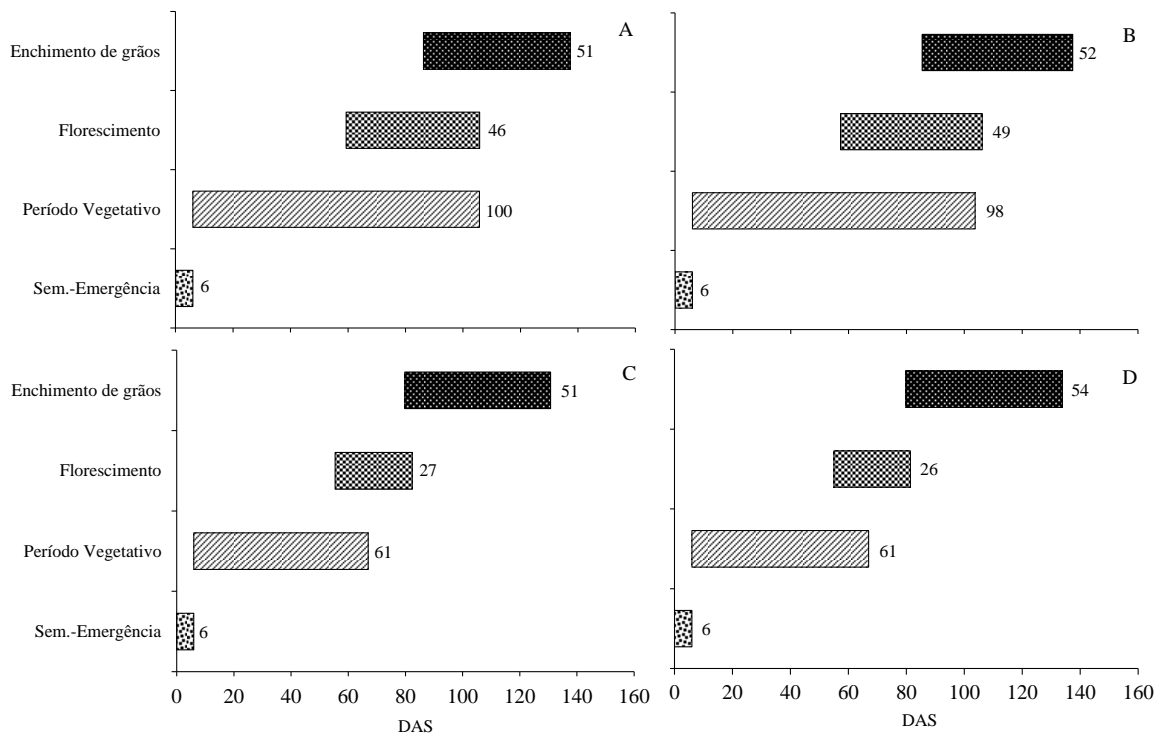
da temperatura do ar nesse período inicial , enquanto que no período reprodutivo o principal fator que afeta a taxa de desenvolvimento é o fotoperíodo (SETIYONO et al., 2007; KANTOLIC, 2008).

Apesar de possuírem grupos de maturação (GM) muito semelhantes (6.2 e 6.3), a diferença de ciclo desde a sementeira até o ponto de colheita (R8), entre as cultivares, foi em média de 10 dias em cada local de cultivo. A diferença de  $\pm 0.1$  no GM indica uma variação de aproximadamente dois dias no ciclo quando a cultivar é utilizada dentro do zoneamento e local indicado (PENARIOL, 2000). Variações de até seis dias entre cultivares de mesmo GM estão em uma margem de erro que pode ocorrer em função dos locais e condições ambientais em que os GM foram determinados (ZANON, 2016). Outro fator que possivelmente contribuiu com o aumento da diferença de ciclo é o fato das cultivares terem sido semeadas no início da janela de sementeira determinadas pelo zoneamento agroclimático da cultura (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2015), podendo apresentar diferentes taxas de desenvolvimento nos materiais.

A similaridade na duração das fases e do ciclo de desenvolvimento das cultivares de soja, observadas em diferentes condições edafoclimáticas de terras altas e terras baixas do estado do Rio Grande do Sul permite que as práticas de manejo associadas ao desenvolvimento da soja podem ser realizadas de forma muito similar nos dois ambientes, como é o caso das áreas deste estudo (ZANON et al., 2015b).

Os períodos da sementeira-emergência, floração e enchimentos de grãos, considerados mais críticos para a definição da produtividade da cultura (MARCHESAN, 1982; FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009) e a duração do período vegetativo que determina a capacidade de adaptar-se a condições adversas de cultivo, como antecipação ou atraso da data de sementeira, foram semelhantes para as diferentes disponibilidades hídricas nos dois locais de cultivo (Figura 14 e 15).

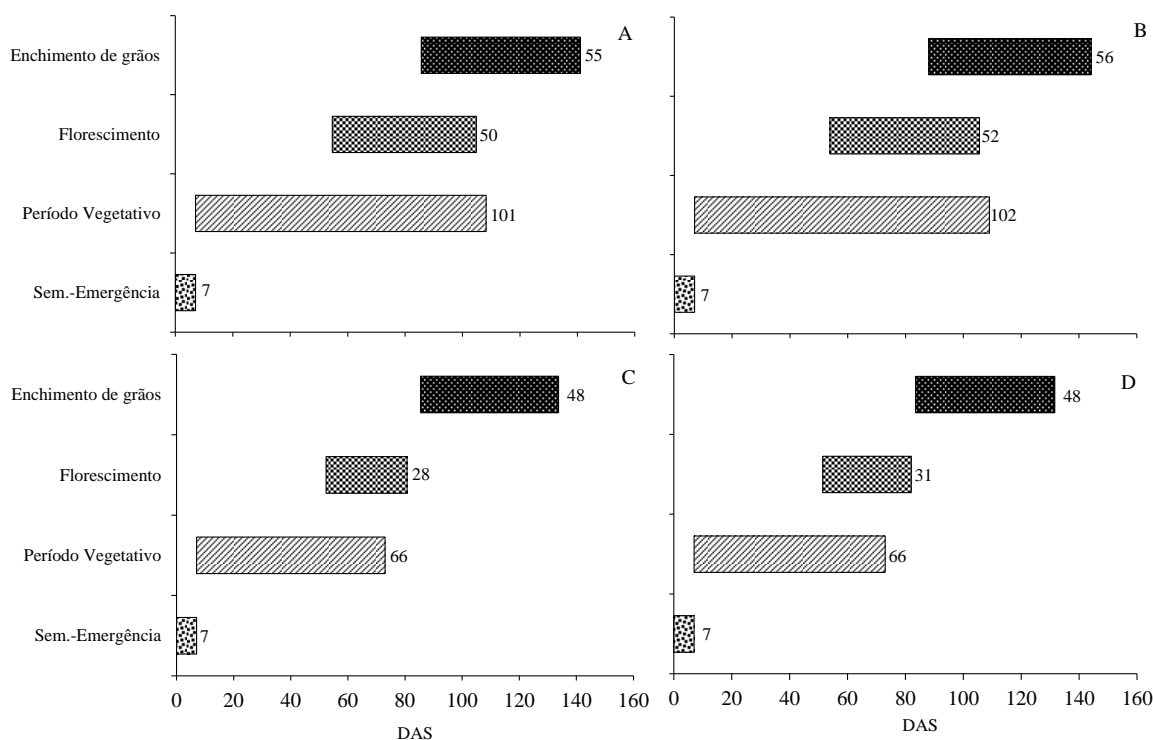
**Figura 14** – Duração total de períodos críticos para a cultura da soja da cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B) e da cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) em dias após a semeadura (DAS) em Santa Maria, RS, 2014/2015. Período vegetativo = V0 - Vn, Florescimento = R1 – última flor aberta na planta Enchimento de grãos = primeiro legume na planta com grão apresentando 2mm – R7, segundo Fehr e Caviness (1977).



Fonte: Autor.

A maior diferença entre as cultivares avaliadas foi observada na duração do período vegetativo. A cultivar TEC IRGA 6070 RR prolongou a emissão de folhas e nós por mais tempo após o início do florescimento, como é característica de cultivares com tipo de crescimento indeterminado (SETIYONO et al., 2007; BASTIDAS et al., 2008). As durações dos períodos de semeadura-emergência foram muito semelhantes nos dois locais de estudo, e iguais para as cultivares em cada local.

**Figura 15** – Duração total de períodos críticos para a cultura da soja da cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B) e da cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) em dias após a semeadura (DAS) em Cachoeirinha, RS, 2014/2015. Período vegetativo = V0 - Vn, Florescimento = R1 – última flor aberta na planta, Enchimento de grãos = primeiro legume na planta com grão apresentando 2mm – R7, segundo Fehr e Caviness (1977).



Fonte: Autor.

A deficiência hídrica durante a floração causa a redução deste período e o abortamento de flores (SIONIT; KRAMER, 1977). A semelhança entre os períodos de floração para cada cultivar indicam que não houve estresse hídrico capaz de causar esta diferença entre as parcelas com e sem irrigação suplementar, porém a variação entre as cultivares existiu, sendo 40% superior para a o material com crescimento indeterminado. Esse período prolongado pode ser apontado como uma das principais características que garantem aos cultivares com crescimento indeterminado a maior estabilidade produtiva, já que se ocorrerem déficits curtos nesse período, a maior duração pode minimizar eventuais perdas.

O período de enchimento de grãos foi muito semelhante entre cultivares e disponibilidades hídricas para as duas cultivares em Santa Maria. Em Cachoeirinha ocorreu redução de uma semana na cultivar Nidera NA 6411 RG em relação a cultivar TEC IRGA 6070 RR.

No decorrer do ciclo da cultura, simultaneamente às mudanças de estágio de desenvolvimento, ocorrem mudanças fisiológicas e de distribuição de fotoassimilados (TAIZ; ZEIGER, 2013). A produtividade da soja é determinada pela capacidade das plantas interceptarem radiação solar pela área foliar e converterem esta radiação em matéria seca pela fotossíntese. O índice de área foliar (IAF) é a relação entre a área foliar e a área de solo ocupada pelo cultivo (HEIFFIG et al., 2006).

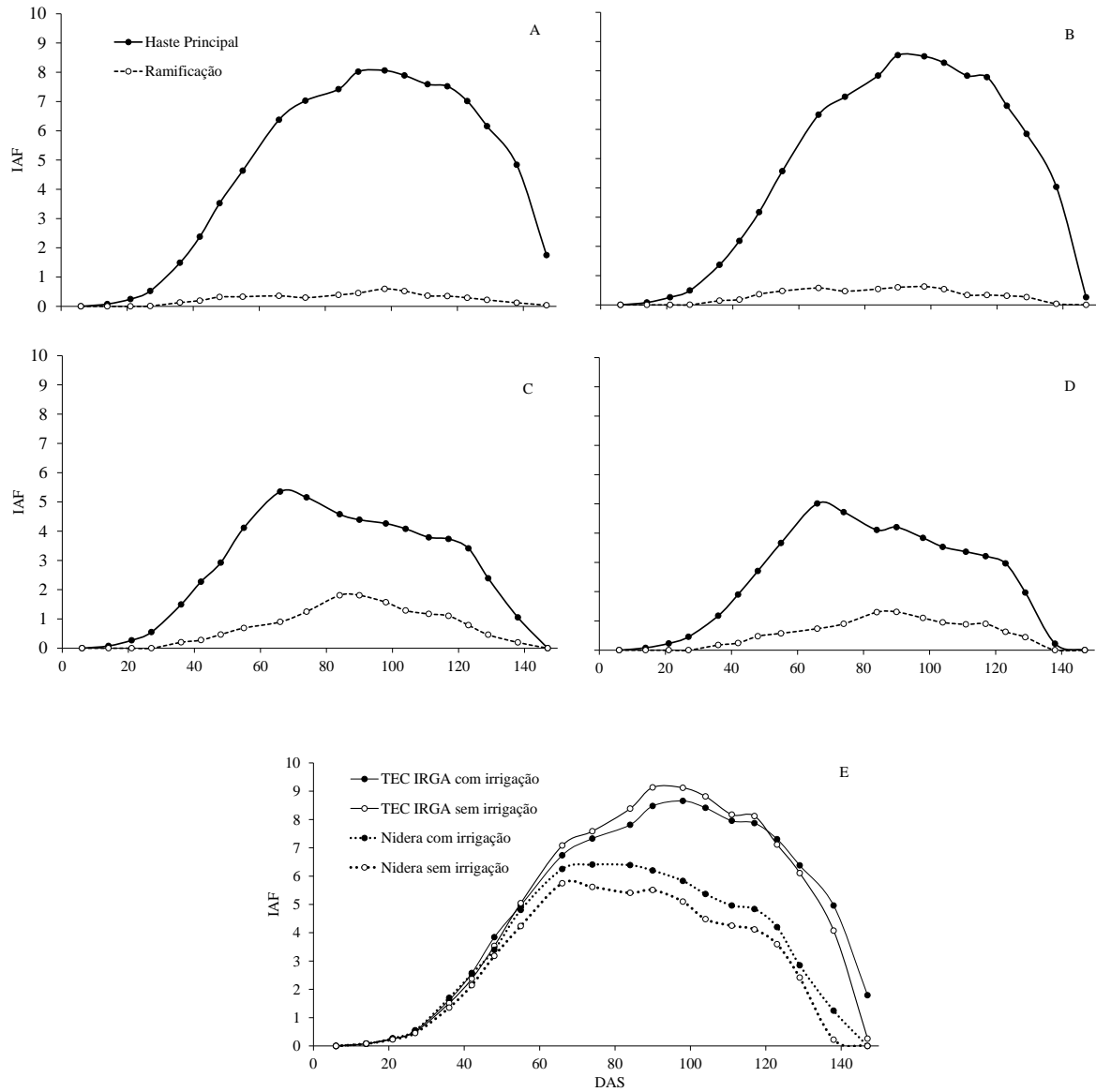
Um IAF entre 3,5 a 4 é necessário para se alcançar 95% da interceptação de luz, o que é suficiente para otimização da produtividade (ZHOU; CHEN; OUYANG, 2011). Em Santa Maria o índice de área foliar (IAF) foi maior na cultivar TEC IRGA 6070 RR, onde os maiores valores foram observados quando não ocorreu irrigação suplementar, isso pode ser atribuído ao crescimento excessivo da variedade quando a disponibilidade hídrica foi maior e assim ocorreu acamamento favorecendo a senescência precoce de algumas folhas.

A cultivar Nidera 6411 RR apresentou maior IAF, em Santa Maria, quando ocorreu irrigação suplementar (Figura 16E), nesta cultivar não foi tão pronunciado o acamamento e a consequente redução do IAF por senescência de folhas que não mais interceptavam radiação solar (EGLI; CRAFTS-BRANDNER, 1996).

Em Cachoeirinha, ocorreu maior contribuição no IAF das ramificações em relação à Santa Maria para todas as cultivares, com e sem irrigação suplementar. Essa relativa contribuição pode ser atribuída a menor densidade de plantas  $m^{-2}$  e também ao fato do crescimento não ter sido tão excessivo na haste principal, estimulando o desenvolvimento das ramificações (Figura 17).

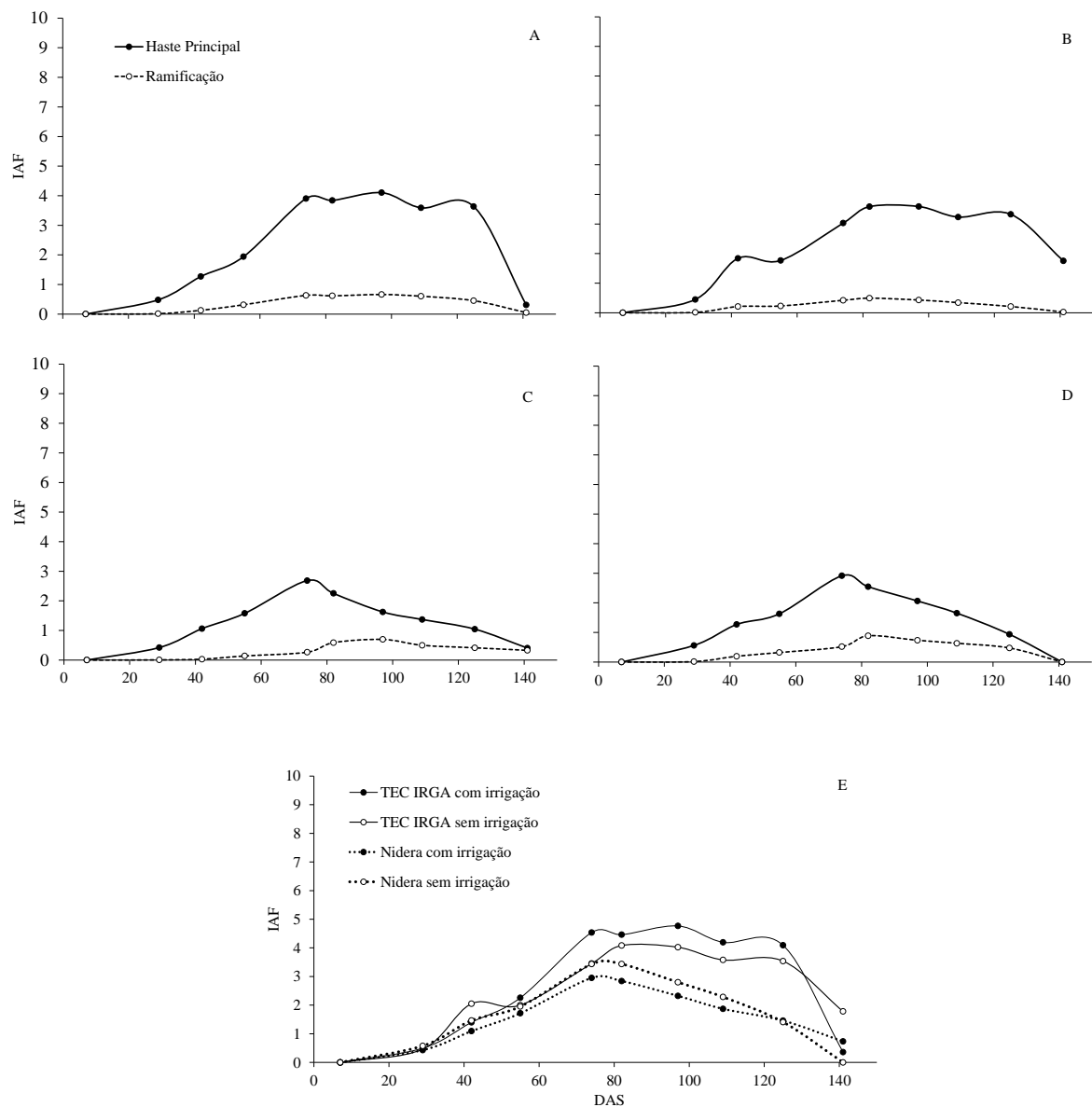


**Figura 16** – Evolução do índice de área foliar (IAF) na haste principal e nas ramificações, da cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B), da cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) e IAF total das duas cultivares nas diferentes disponibilidades em dias após a semeadura (DAS) em Santa Maria, RS, 2014/2015.



Fonte: Autor.

**Figura 17** – Evolução do índice de área foliar (IAF) na haste principal e nas ramificações, da cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B), da cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) e IAF total das duas cultivares nas diferentes disponibilidades em dias após a semeadura (DAS) em Cachoeirinha, RS, 2014/2015.



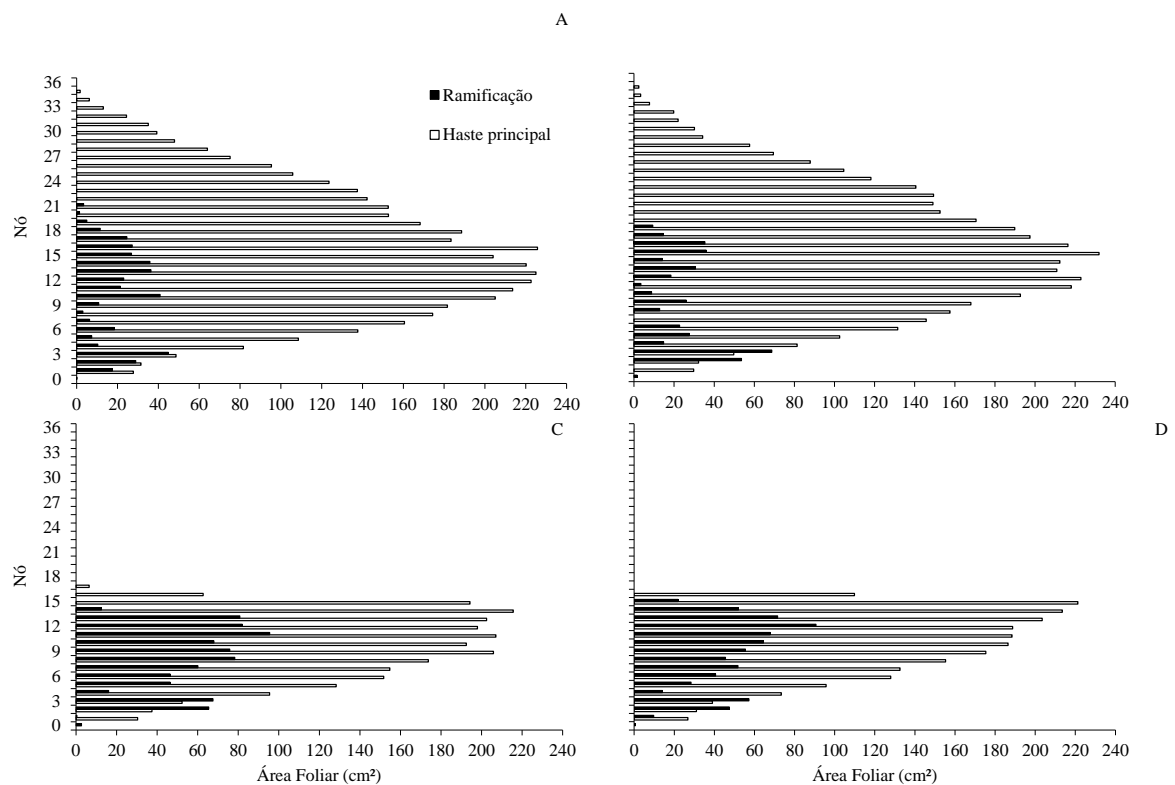
Fonte: Autor.

A resposta contrária do IAF total em Cachoeirinha comparado a Santa Maria, dentro de cada cultivar para as diferentes disponibilidades hídricas (Figura 16E, 17E) indica que a cultivar TEC IRGA 6070 RR apresentou maior IAF quando ocorreu irrigação suplementar e a Nidera NA 6411 RG apresentou valores mais altos quando não ocorreu irrigação suplementar.

Essa diferença é atribuída ao efeito de alguns dias de excesso hídrico ocorridos no período de desenvolvimento, já que a cultivar TEC IRGA 6070 RR foi desenvolvida com o objetivo de tolerar o excesso hídrico no solo.

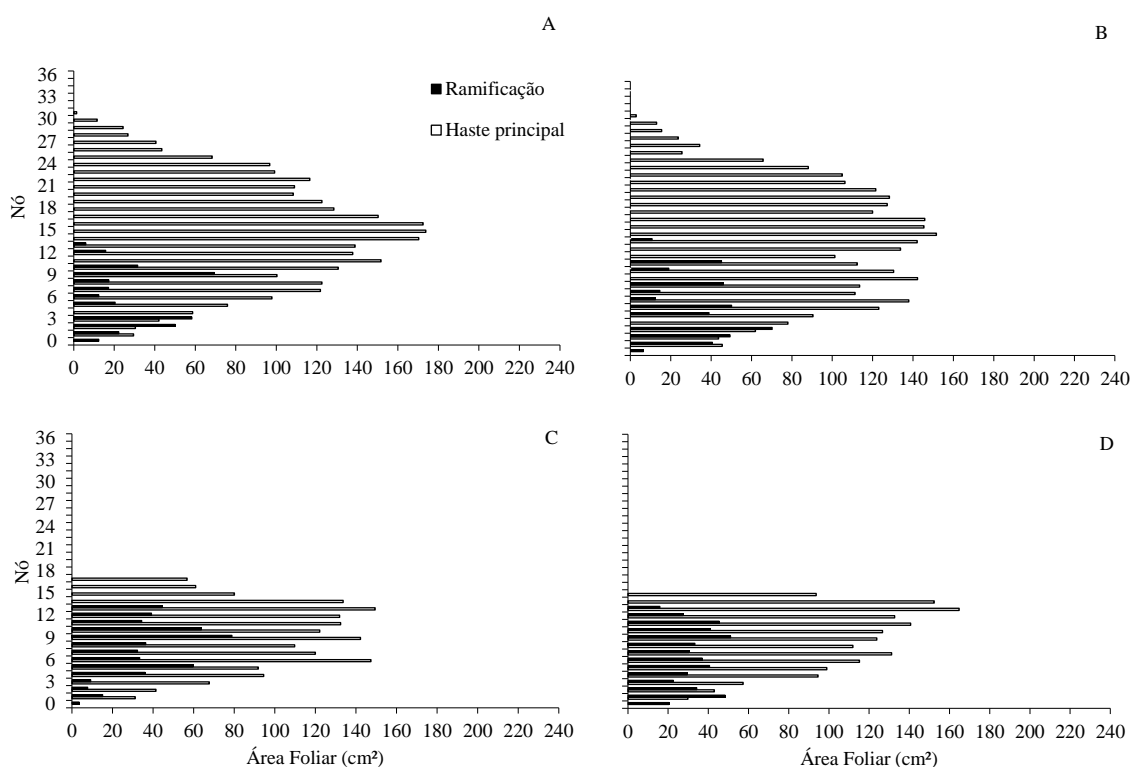
As maiores folhas associadas à haste principal da cultivar com tipo de crescimento indeterminado ocorrem no terço médio da planta diminuindo para as extremidades (Figura 18A e 18B, Figura 19A e 19B), enquanto a cultivar com crescimento determinado possui as maiores folhas associadas aos últimos nós (Figura 18C e 18D, Figura 19C e 19D). Apesar de apresentar essa arquitetura “piramidal”, não ocorreu a maior penetração de luz e melhor aplicação de defensivos agrícolas nos terços médios e inferiores na cultivar indeterminada, pois pelo excessivo crescimento vegetativo ocorreu justamente o oposto.

**Figura 18** – Área foliar máxima das ramificações e das folhas associadas a cada nó da haste principal da cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B), da cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) em Santa Maria, RS, 2014/2015.



Fonte: Autor.

**Figura 19** – Área foliar máxima das folhas das ramificações e das folhas associadas a cada nó da haste principal da cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B), da cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) em Cachoeirinha, RS, 2014/ 2015.



Fonte: Autor.

A área foliar da haste principal, das ramificações, total e máximas associadas a cada nó para ambas as cultivares e disponibilidades hídricas foram maiores no experimento de Santa Maria. Essa diferença evidencia que a expansão foliar foi afetada nesse ambiente de solo hidromórfico e a provável causa é a maior restrição ao sistema radicular e consequente menor área de absorção de água e nutrientes pelas raízes (STRECK, 2004).

O excessivo crescimento vegetativo, principalmente em estatura, causou o acamamento de plantas em ambos locais de estudo apresentando diferença significativa na cultivar TEC IRGA 6070 RR em Cachoeirinha e nas parcelas com irrigação suplementar em Santa Maria. A maior parte dos componentes de rendimento de grãos e características que afetam a colheita não apresentaram interação entre cultivar x disponibilidade hídrica (Tabela 3).

**Tabela 3** – Componentes de rendimento e características que afetam a colheita das cultivares de soja TEC IRGA 6070 RR e Nidera NA 6411 RG com e sem irrigação suplementar, nos experimentos de Santa Maria e Cachoeirinha no ano agrícola de 2014/ 2015.

Váriavel	Cultivar		Irrigação Suplementar		CV% 1	CV% 2
	TEC IRGA	NIDERA	Com	Sem		
Santa Maria						
Estatura (cm)	164,0 a	82,9 b	127,9 a	119,1 a	4,9	7,5
Número de hastes secundárias (por planta)	3,6 b	9,3 a	6,3 a	6,6 a	17,5	9,4
Peso de mil grãos (g)	148,1 b	173,8 a	162 a	159 b	6,4	7,2
Acamamento (nota 0-5)	3,2 a	1,7 a	2,8 a	2,1 b	20,2	20,2
Densidade final de plantas (pl/m <sup>2</sup> )	22,5 b	26,0 a	25,0 a	23,5 a	7,7	10,4
Produtividade a 13% (Kg/ha)	5146,4 a	5378,0 a	5280,7 a	5243,7 a	27,4	11,8
Cachoeirinha						
Estatura (cm)	127,0 a	72,8 b	99,5 a	100,3 a	7,0	4,1
Número de hastes secundárias (por planta)	5,3 b	8,3 a	6,5 a	7,2 a	19,8	12,7
Peso de mil grãos (g)	145,4 b	171,2 a	149,2 a	142,6 a	6,2	8,1
Altura do dossel (cm)	92,5 a	72,5 a	84,5 a	80,5 a	11,2	16,5
Acamamento (nota 0-5)	3,8 a	1,0 b	2,5 a	2,3 a	12,0	12,0
Densidade final de plantas (pl/m <sup>2</sup> )	18,75 a	20,5 a	18,9 a	20,4 a	7,0	5,5
Produtividade a 13% (Kg/ha)	4643,6 a	4487,9 a	4335,1 a	4796,5 a	8,8	9,3

Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. ns. = Não significativo. CV 1 = Coeficiente de variação do fator A. CV 2 = Coeficiente de variação fator B.

Fonte: Autor.

O peso de mil grãos é uma variável muito sensível a ocorrência de estresse hídrico no período de enchimento de grãos (SALINAS et al., 1996) e a irrigação neste período beneficia o aumento no peso de grãos (THOMAS; COSTA, 1994). Em Cachoeirinha a irrigação não surtiu efeito nessa variável, mas em Santa Maria foi constatado o maior peso de mil grãos quando houve irrigação suplementar. Em ambos os locais a cultivar Nidera NA 6411 apresentou maior peso de mil grãos, sendo esta uma característica da cultivar.

O maior número de hastes secundárias para a cultivar TEC IRGA 6070 RR e nas duas disponibilidades hídricas no experimento de Cachoeirinha, em relação ao de Santa Maria, pode ser atribuído a menor densidade de plantas, que pode ter estimulada a ramificação (ZANON et al., 2015a). A cultivar TEC IRGA 6070 RR, comparada com a Nidera NA 6411 RG, em Santa Maria, apresentou um baixo número de ramificação por planta, pois o acentuado crescimento da haste principal pode ter inibido a brotação das gemas laterais.

Nos dois locais, apenas a altura da haste principal e o nó de inserção do primeiro legume na haste principal apresentaram interação significativa entre cultivar x disponibilidade

hídrica, além de altura do dossel que em Santa Maria também apresentou interação (Tabela 4).

**Tabela 4** – Componentes de rendimento e características que afetam a colheita das cultivares de soja TEC IRGA 6070 RR e Nidera NA 6411 RR com e sem irrigação suplementar, nos experimentos de Santa Maria e Cachoeirinha no ano agrícola de 2014/ 2015.

Irrigação suplementar	Cultivar		CV%
	TEC IRGA	NIDERA	
Santa Maria			
Posição do primeiro legume na haste principal (Nó)			
Com	6,4 Ab	6,9 Ba	18,1
Sem	9,8 Aa	7,3 Ba	16,4
CV %	13,5	10,2	
Altura de inserção do 1º legume (cm)			
Com	21,6 Bb	25,0 Aa	18,8
Sem	33,3 Aa	25,2 Ba	19,2
CV %	13,0	11,3	
Altura do dossel (cm)			
Com	91,2 Ab	77,7 Ba	15,1
Sem	132,0 Aa	82,4 Ba	16,3
CV %	11,4	13,0	
Cachoeirinha			
Posição do primeiro legume na haste principal (Nó)			
Com	11,0 Aa	6,0 Ba	9,4
Sem	9,0 Ab	6,6 Ba	10,0
CV %	9,4	8,2	
Altura de inserção do 1º legume (cm)			
Com	32,3 Aa	19,0 Ba	10,5
Sem	27,3 Aa	24,0 Aa	11,2
CV %	15,9	12,3	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e minúscula na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autor.

As produtividades não apresentaram interação significativa entre cultivar x disponibilidade hídrica e não apresentaram diferença significativa dentro de cada fator, nos dois locais. Em Santa Maria as produtividades ficaram acima dos 5100 kg ha<sup>-1</sup> enquanto que em Cachoeirinha o maior valor observado foi de aproximadamente 4800 kg ha<sup>-1</sup> para aquelas parcelas que não tiveram irrigação suplementar. Esses resultados evidenciam mais uma vez que os déficits hídricos não causaram prejuízos significativos para a produtividade e que em

Cachoeirinha, apesar de não ter ocorrido diferença estatística significativa, a irrigação suplementar causou a redução de 400 Kg ha<sup>-1</sup>, sendo um indicativo de que em função das irrigações seguidas de chuvas, os excessos hídricos podem ter causado algum estresse mesmo que as irrigações tenham sido abaixo de 30 mm.

As produtividades dos experimentos entre 4300 e 5400 Kg ha<sup>-1</sup> estão de acordo com resultados encontrados para a cultura em ambientes de terras altas e terras baixas (ZANON, 2015b; SARTORI et al., 2016).

A EUA foi maior no experimento de Santa Maria de forma geral em função das produtividades mais elevadas. Ocorreu diferença na EUA apenas em Cachoeirinha, onde a maior eficiência ocorreu quando não ocorreu irrigação suplementar (Tabela 5). Essa resposta mais uma vez pode ser atribuída as chuvas que ocorreram logo após as irrigações e da consequente produtividade inferior das parcelas com irrigação suplementar em relação as sem irrigação.

**Tabela 5** – Eficiência do uso da água (EUA) em Kg m<sup>-3</sup> das cultivares de soja TEC IRGA 6070 RR e Nidera NA 6411 RR com e sem irrigação suplementar, nos experimentos de Santa Maria e Cachoeirinha no ano agrícola de 2014/ 2015.

	Santa Maria	Cachoeirinha
TEC IRGA 6070 RR	1,15 a	1,05 a
Nidera 6411 RR	1,19 a	1,07 a
Irigada	1,10 a	0,98 b
Não irrigada	1,24 a	1,14 a
Cultivar x Irrigação	ns.	ns.
CV 1 %	30,08	9,33
CV 2 %	15,62	8,04

Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. ns. = Não significativo. CV 1 = Coeficiente de variação do fator A. CV 2 = Coeficiente de variação do fator B.

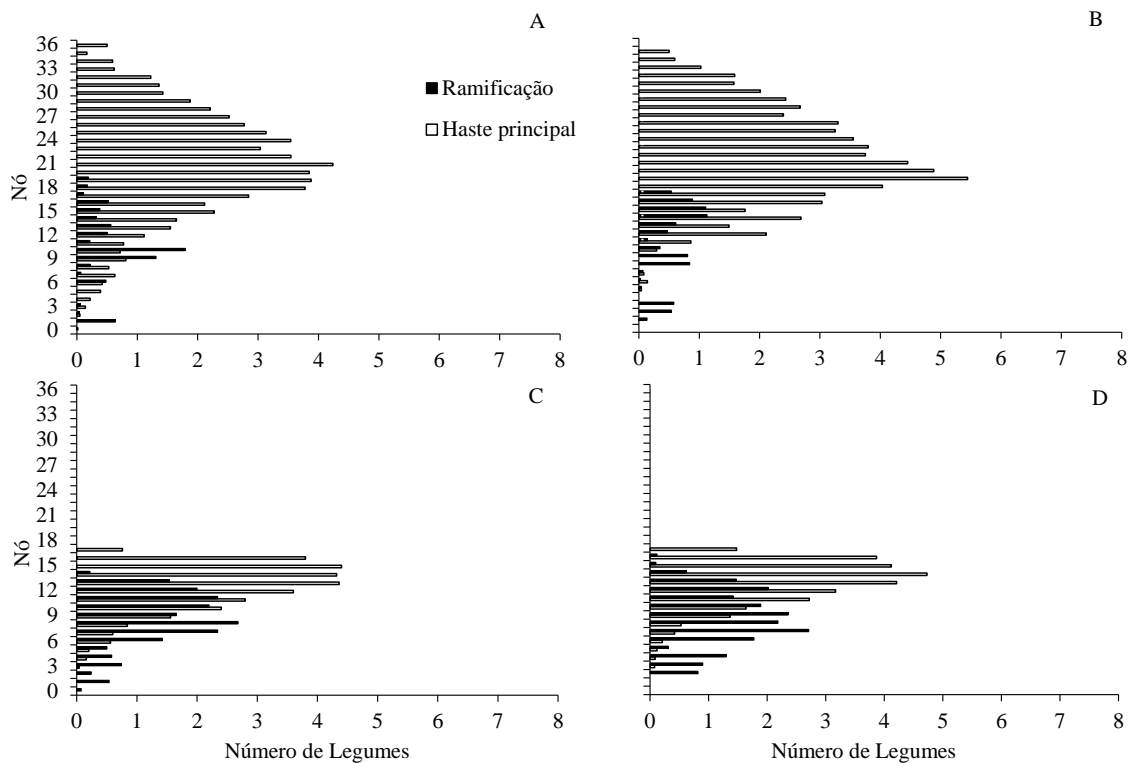
Fonte: Autor.

A distribuição de legumes na planta foi muito semelhante as máximas áreas foliares associadas a cada nó e suas respectivas ramificações (Figura 20 e 21). A fixação dos legumes produtivos ocorreu onde as folhas tinham maior área foliar na HP. Evidenciando que

a translocação possui alta relação pela proximidade dos órgãos de fonte e demanda (CASAROLI et al., 2007).

A cultivar NA 6411 RG apresenta maior concentração de legumes nas ramificações em função do crescimento excessivo causado pela alta disponibilidade hídrica e tipo de crescimento indeterminado, a cultivar TEC IRGA 6070 RR apresentou um número baixo de legumes na parte inferior da planta, onde penetrava pouca radiação solar. O elevado número de legumes nos últimos nós da cultivar NA 6411 RG pode ser atribuído a presença de ramificações na parte superior e também a presença de racemo terminal na haste principal, característica de cultivares de crescimento determinado.

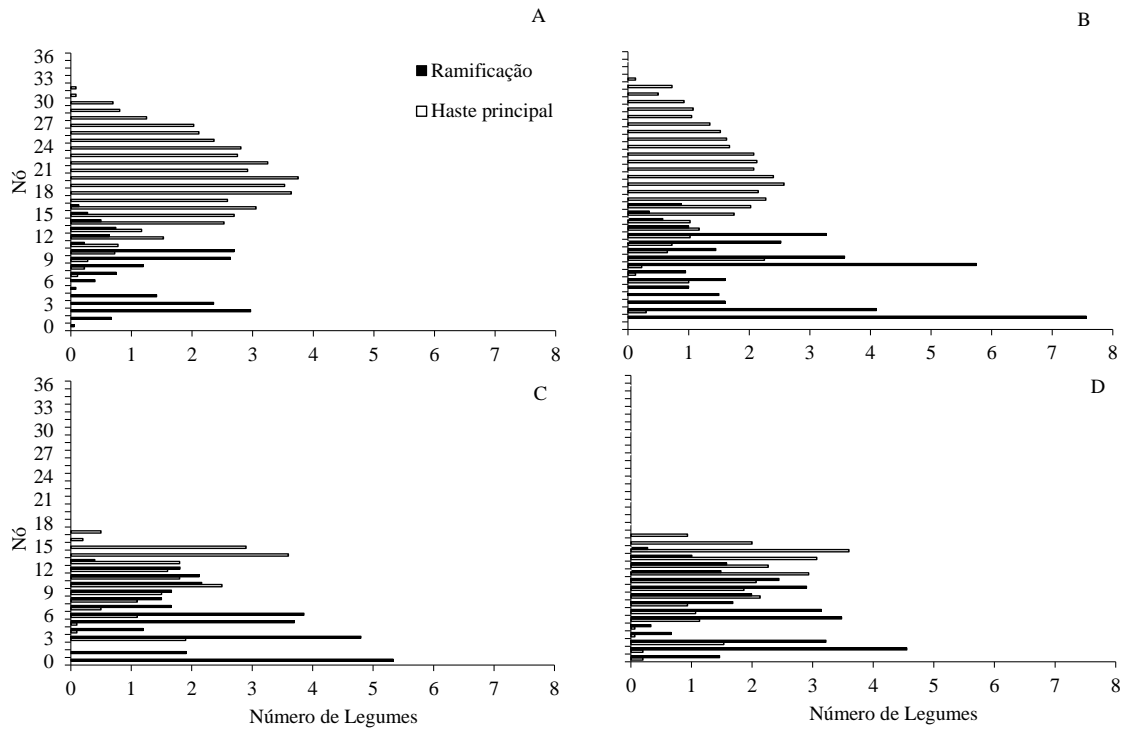
**Figura 20** – Número de legumes médio produzidos em cada nó da haste principal e em ramificação associada ao respectivo nó para a cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B) e para a cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) em Santa Maria, RS, 2014/2015.



Fonte: Autor.



**Figura 21** – Número de legumes médio produzidos em cada nó da haste principal e em ramificação associada ao respectivo nó para a cultivar TEC IRGA 6070 RR com irrigação suplementar (A), sem irrigação suplementar (B) e para a cultivar Nidera NA 6411 RG com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) em Cachoeirinha, RS, 2014/2015.



Fonte: Autor.

Em função da necessidade de realizar as avaliações de trocas gasosas entre as 10:00 – 14:00 P.M. e sem nebulosidade, foi possível realizar sete avaliações de trocas gasosas ao longo do período experimental em Santa Maria e quatro em Cachoeirinha.

Os valores de radiação fotossinteticamente disponível (P.A.R.) e temperatura foliar (Tl) muito semelhante entre os dois locais indicam condições semelhantes de ambiente aéreo para as plantas nos momentos das avaliações, ou seja, podemos considerar que as demais diferenças são oriundas das disponibilidades hídricas no solo e/ou variações genéticas entre cultivares (Tabela 6).

**Tabela 6** – Valores médios de taxa fotossintética (A), condutância estomática (Gs), radiação fotossinteticamente disponível (P.A.R.) e temperatura foliar (Tl) para as duas cultivares de soja e dois manejos de irrigação utilizados nos experimentos de Santa Maria e Cachoeirinha, RS, Brasil no ano agrícola de 2014/2015.

	Santa Maria				Cachoeirinha			
	A	Gs	P.A.R.	Tl	A	Gs	P.A.R.	Tl
	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$^{\circ}\text{C}$	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$^{\circ}\text{C}$
TEC IRGA 6070 RR	20,60 a	0,41 b	2133,53 a	41,55 a	16,14 a	0,27 a	2106,63 a	41,46 a
Nidera 6411 RR	20,48 a	0,44 a	2153,67 a	41,65 a	14,25 b	0,25 a	2079,42 a	41,79 a
Com irrigação	21,29 a	0,44 a	2148,97 a	41,38 a	15,81 a	0,25 a	2081,33 a	41,08 b
Sem irrigação	19,78 b	0,42 a	2138,23 a	41,82 a	14,58 a	0,26 a	2104,70 a	41,85 a
Cultivar x Disp. Hídrica	ns.	ns.	ns.	ns.	ns.	ns.	ns.	ns.
CV 1 %	4,06	3,93	0,78	1,07	18,63	14,88	1,62	0,56
CV 2 %	3,96	4,75	1,69	1,26	1,37	4,06	1,72	0,65

Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. ns. Não significativo. CV 1 = Coeficiente de variação do fator A. CV 2 = Coeficiente de variação fator B.

Fonte: Autor.

Ocorreu diferença de taxa fotossintética apenas para a disponibilidade hídrica em Santa Maria, onde A para irrigação suplementar foi superior. Adequadas disponibilidades hídricas, aumentam A durante a fase de florescimento até o final do enchimento de grãos, acarretando em maiores rendimentos de grãos (KANTOLIC et al., 2007).

Ao analisar separadamente as parcelas com e sem irrigação suplementar e considerando um esquema bifatorial onde um fator é a cultivar e o outro são dias em que as avaliações de trocas gasosas ocorreram sem estresse hídrico no solo ( $ET_c = ETR$ ) e condição de deficiência (Def.), quando  $ET_c > ETR$ , ocorreu que em Santa Maria também não houve estresse capaz de alterar A e Gs (Tabela 7).

**Tabela 7** – Valores médios de taxa fotossintética (A) e condutância estomática (Gs) para as duas cultivares de soja em condição sem estresse hídrico no solo (ETc = ETR) e deficiência (Def.), quando ETc > ETR, das avaliações em Santa Maria e Cachoeirinha, RS, Brasil no ano agrícola de 2014/2015. Santa Maria.

	Com Irrigação				Sem Irrigação			
	Santa Maria		Cachoeirinha		Santa Maria		Cachoeirinha	
	A	Gs	A	Gs	A	Gs	A	Gs
	$\mu\text{mol CO}_2$	$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\mu\text{mol CO}_2$	$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$	$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\mu\text{mol CO}_2$	$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$
TEC IRGA 6070 RR	21,20 a	0,41 a	16,16 a	0,28 a	19,71 a	0,40 b	16,95 a	0,28 a
Nidera 6411 RR	21,96 a	0,48 a	15,89 a	0,33 a	20,18 a	0,46 a	15,44 a	0,27 a
Sem Stress	22,50 a	0,46 a	18,29 a	0,39 a	20,86 a	0,47 a	17,62 a	0,33 a
Def.	20,66 a	0,43 a	13,77 b	0,22 b	19,02 b	0,40 b	14,78 b	0,22 b
Cultivar x Disp. Hídrica	ns.	ns.	ns.	ns.	ns.	ns.	ns.	ns.
CV 1 %	5,29	17,69	26,59	22,74	8,93	8,39	19,84	26,41
CV 2 %	8,91	9,01	11,49	16,78	6,46	8,53	9,6	13,11

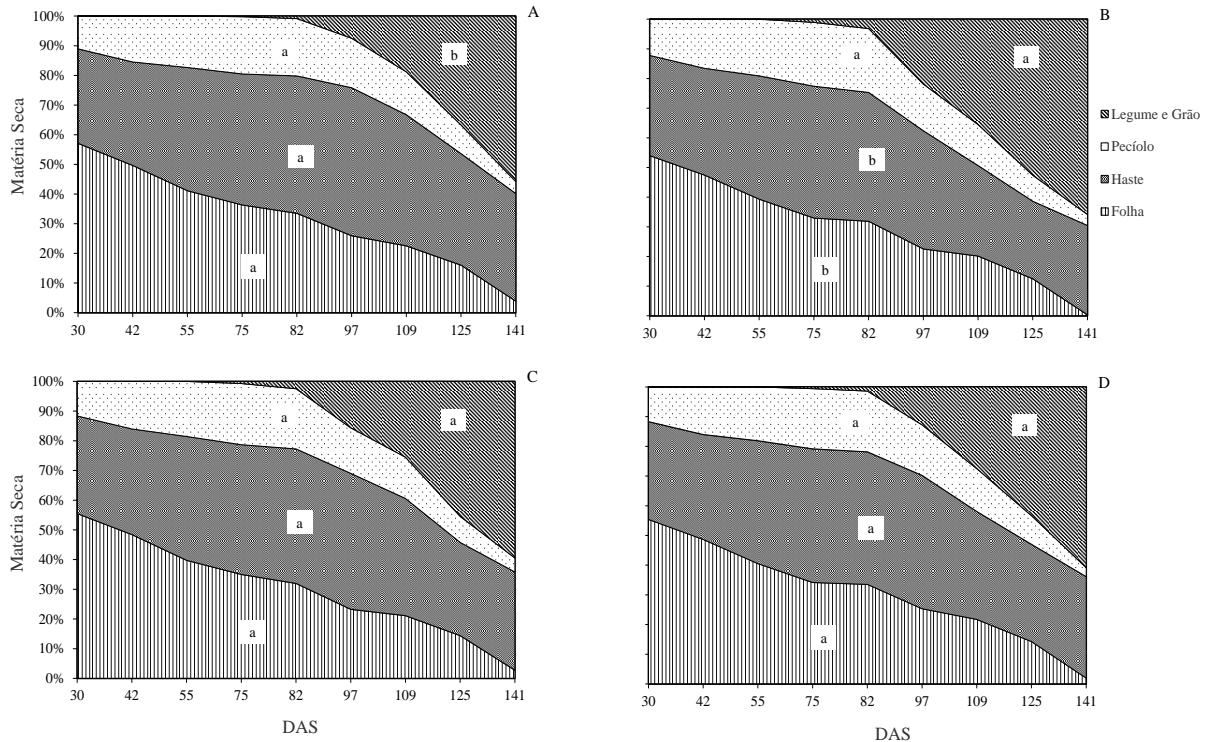
Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. ns. = Não significativo. CV 1 = Coeficiente de variação do fator A. CV 2 = Coeficiente de variação fator B.

Fonte: Autor.

Em Cachoeirinha as avaliações em condição de Def. apresentaram diferença em relação aos dias sem estresse. Evidenciando que a irrigação em Santa Maria foi eficiente em não causar diminuição na Gs e A e que em Cachoeirinha a irrigação deficitária ativou esses mecanismos iniciais de resposta ao déficit hídrico no solo (STRECK, 2004). Resposta semelhante e com diferenças de maior magnitude ocorreram nos dois locais quando se compara as parcelas onde não ocorreu irrigação complementar.

De forma geral, os valores de taxa fotossintética e condutância estomática (Tabela 6 e 7) inferiores em Cachoeirinha indicam que no ambiente de várzea as plantas sofrem mais com o estresse hídrico. As diferenças observadas nos níveis de estresse hídrico ocorridos em Cachoeirinha não alteraram o particionamento de matéria seca (MS) (Figura 22C e 22D). A produção de MS pela planta de soja está ligada à capacidade fotossintética, área foliar disponível para capturar a radiação fotossinteticamente ativa e à eficiência no uso da radiação (SINCLAIR et al., 2005).

**Figura 22** – Particionamento da matéria seca da parte aérea das cultivares de soja TEC IRGA 6070 RR (A) e Nidera NA 6411 RG (B) e das cultivares com irrigação suplementar (C) e sem irrigação suplementar (D) em dias após a semeadura (DAS) em Cachoeirinha, RS, Brasil, 2014/2015.



Áreas seguidas pela mesma letra entre os gráficos na horizontal não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro.

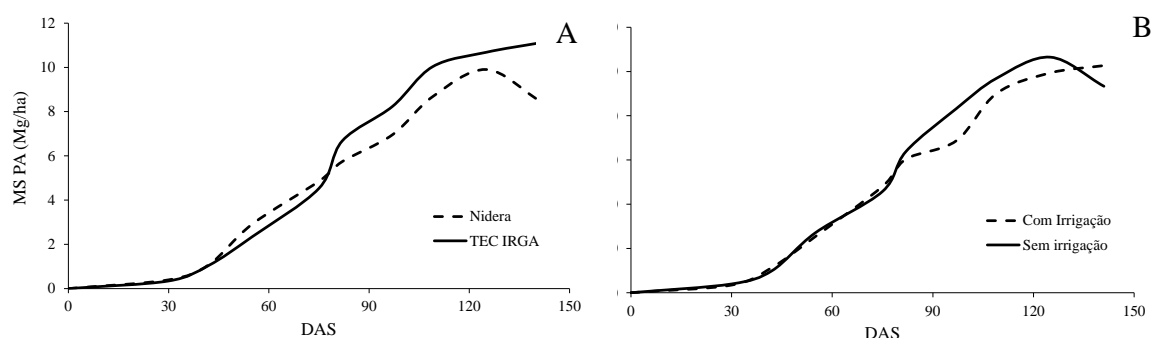
Fonte: Autor.

Entre as cultivares, a massa de grãos da cultivar indeterminada (TEC IRGA 6070 RR) apresentou uma evolução abrupta de grãos no final no ciclo (Figura 22A), enquanto a cultivar com tipo de crescimento determinado (Nidera NA 6411 RG) apresentou uma evolução constante no particionamento de grãos (Figura 22B). A fração de folhas e principalmente de haste apresentam resposta inverso ao enchimento de grãos para as duas cultivares, indicando servir como importante fonte de reserva que está suprindo o enchimento de grãos (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). A cultivar determinada apresentou um índice de colheita (fração de grãos/fração da parte aérea) 8% superior em relação a cultivar indeterminada.

A evolução abrupta no enchimento de grãos da cultivar indeterminada aponta para a necessidade em garantir que cultivares com essa característica recebam mais cuidados para garantir que cheguem até o final do ciclo de desenvolvimento possibilitando que as reservas sejam translocadas aos grãos no período final de desenvolvimento.

A evolução da matéria seca total da parte aérea (MS PA) foi semelhante para as duas cultivares e duas disponibilidades hídricas (Figura 23). A diferença que começa a ser perceptível aos 70 DAS pode ser atribuída a resposta da irrigação na evolução da MS PA.

**Figura 23** – Evolução da matéria seca total da parte aérea (MS PA) em dias após a semeadura (DAS) para as duas cultivares (A) com e sem irrigação suplementar (B) em Cachoeirinha, RS, 2014/ 2015.



Fonte: Autor.

A cultivar TEC IRGA 6070 RR, desenvolvida para tolerar períodos maiores de excesso hídrico em relação aos demais cultivares que existem no mercado, apresentou uma pequena vantagem no acúmulo de MS PA. As parcelas sem irrigação complementar também indicaram essa tendência sendo um indicativo da resposta ao excesso hídrico causado pelas irrigações seguidas de chuvas.

Os indicativos de ocorrência de excesso hídrico causados pela irrigação seguidas de precipitações pluviais salientam a necessidade de que mesmo com a utilização da irrigação deficitária nessas áreas de terras baixas é necessário garantir a rápida drenagem e evitar realizar irrigações quando existe a possibilidade de ocorrência de chuvas.

## 6 CONCLUSÕES

- 1- A principal diferença no desenvolvimento que possibilita a maior estabilidade produtiva de cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado é o maior período de floração.
- 2- Pequenos estresses hídricos, por déficit ou excesso, que comumente ocorrem em áreas de soja cultivada em solo hidromórfico não afetam o particionamento de matéria seca, mas afetam as trocas gasosas e IAF. Essas reduções nas trocas gasosas não afetam a produção de grãos, mas ativam os mecanismos de defesa da planta, como a redução da condutância estomática, taxa fotossintética e evolução da área foliar.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrig. and Drain. Paper, n. 56).
- ARNOLD, C. Y. Maximum-minimum temperature as a basis for computing heat units. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**. v. 76, p. 682-692. 1960.
- BASTIDAS, A. M., et al. Soybean sowing date: the vegetative, reproductive, and agronomic impacts. **Crop Science**. v. 48, p. 727-740. 2008.
- BERLATO, M. A. et al. Evapotranspiração máxima da soja, relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação de tanque classe “A” e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**. Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 243-259. 1986.
- BERNARDES, B. C. **Exigências de rotações, soja, feijão miúdo**. In: Melhoria da rizicultura do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Secretária da Agricultura, Indústria e Comércio, 1945. p. 93-185.
- BOERMA, H. R.; ASHLEY, D. A. Irrigation, row spacing, and genotype effects on late and ultralate planted soybeans. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, n. 6, p. 995-999. 1982.
- BORGES, J. R. et al. Resistência à penetração de um gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**. v.10, n.1, p.83-86, 2004.
- BOYER, J. S. et al. Afternoon water deficit and grain yields in old and new soybean cultivars. **Agronomy Journal**. Madison, v. 72, p. 981-986. 1980.
- BRAY, E. A. Genes commonly regulated by water-deficit stress in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, v.55, p. 2331-2341. 2004.
- BRUIN, J. L. et al. Soybean photosynthetic rate and carbon fixation at early and late planting dates. **Crop Science**. v. 50, p. 2516-2524. 2010.
- CASAGRANDE, E. C. et al. Expressão gênica diferencial durante déficit hídrico em soja. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**. v. 13, p. 168-184. 2001.
- CASAROLI, D. et al. Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura da soja. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**. Uruguaiana, v.14, n.2, p. 102-120. 2007.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, décimo segundo levantamento, set/2015**. 2015, 139p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2012/13**. 12º levantamento de grãos safra. 2013. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 23 Out. 2013.

EGLI, D. B.; CRAFTS-BRANDNER, S. J. Soybean. In: **Photoassimilate distribution in plants and crops**. New York, Marcel Dekker: Source-Sink Relationships, 1996. p. 595-623.

EGLI, D. B.; ZHEN-WEN, Y. Crop growth rate and seeds per unit area in soybean. **Crop Science**. v. 31, p. 439-442. 1991.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. p. 412, 1999.

FARIAS, J. R. B. et al. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v. 9, n. 3, (Especial: Zoneamento Agrícola), p. 415-421. 2001.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N. Capacidade de recuperação fisiológica da soja após períodos de seca. In: IX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 1995, Campina Grande. **Anais...** 1995. p.83-84. (a)

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Efeito da variação diária da umidade do solo sobre a fotossíntese e resistência estomática da soja. In: IX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 1995, Campina Grande. **Anais...** 1995. p.68-70. (b)

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. et al. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, p.109-130. 2009.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 15p. (Special Report, 80).

FERREIRA, D. F. **Programa Sisvar.exe**: Sistema de análise de variância. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2010.

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. 2007.

GLIER, C. A. S. et al. Defoliation percentage in two soybean cultivars at different growth stages. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, UAEA/UFC., v.19, n.6, p.567-573. 2015.

HEATHERLY, L. G.; SMITH, J. R. Effect of soybean stem growth habit on height and node number after beginning bloom in the midsouthern USA. **Crop Science**. v. 44, p. 1855-1859. 2004.

HEIFFIG, L. S. et al. Fechamento e índice de área foliar da cultura da soja em diferentes arranjos espaciais. **Bragantia**. v. 65, p. 285-295. 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Agricultural Production**. Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. 2015. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp?o=18&i=P>>. Acesso em: jan. de 2016.



INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. IRGA. **Levantamento de área semeada com soja em terras baixas no Rio Grande do Sul**. 2015. Porto Alegre: IRGA. Recuperado em 13 de agosto de 2015, de <http://www.irga.rs.gov.br>.

KANTOLIC, A. G. Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja: impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genótipos. **Revista da Facultad de Agronomía**. UBA, v. 28, p. 63-88. 2008.

KANTOLIC, A. G. et al. Simulated yield advantages of extending post-flowering development at the expense of a shorter pre-flowering development in soybean. **Field Crops Research**. v. 101, p. 321-330. 2007.

KORTE, L. L. et al. Irrigation of soybean genotypes during reproductive ontogeny II: yield component responses. **Crop Science**. Madison, v. 23, n. 3, p. 528-533, 1983a.

KORTE, L. L.; WILLIAMS, J. H.; SPECHT, J. E.; SORENSEN, R. C. Irrigation of soybean genotypes during reproductive ontogeny I: agronomic responses. **Crop Science**. Madison, v. 23, n. 3, p. 521-527, 1983b.

KUINCHTNER, A; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**. v. 2, p. 171-182. 2001.

MINISTERIO DA AGRICULTURA PECUARIA E ABASTECIMENTO. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul, ano-safra 2014/2015**. Online. MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. p.5, 2015. Acessado em: 8 set, 2015. Disponível em: < <http://extranet.agricultura.gov.br/> >.

MARCHEZAN, E. **Produção e fixação de flores e legumes, pornó do caule e dos ramos, em três cultivares de soja**. 1982. 105 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1982.

MARCHEZAN, E. et al. Adubação foliar com micronutrientes em arroz irrigado, em área sistematizada. **Ciência Rural**. v. 31, n. 6, p. 941-945. 2001.

MARCOLIN, et al. Produtividade e eficiência de uso de água em função de sistemas de manejo da irrigação em arroz irrigado In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 7, 2011, Balneário Camboriú, SC. **Anais...** Itajaí: Epagri/Sosbai, 2011. p. 335-338.

MENTGES, M. I. et al. Alterações estruturais e mecânicas de solo de várzea cultivado com arroz irrigado por inundação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.37, n.1, p. 221-231. 2013.

MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **Soja**: Fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos. Porto Alegre: Departamento de Plantas de Lavoura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Evangraf, 2005. 31 p.

NEPOMUCENO, A. L. et al. Respostas fisiológicas de cultivares de soja a disponibilidade hídrica no solo. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**. São Carlos, v. 5, n. 1, p. 57-65. 1993.

ORTIGARA, C. et al. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 38, p. 619-626. 2014.

OYA, T. et al. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars – Evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivar in the field. **Plant Production Science**, Tokyo, v.7, p. 129-137, 2004.

PAULA, H. R. B. et al. Avaliação fisiológica de cultivares de soja submetidas a diferentes condições hídricas do solo. In: II JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA. **Anais...** Londrina/PR: Embrapa Soja, 2006. p. 220-223.

PENARIOL, A. Soja: cultivares no lugar certo. **Cultivar**. Pelotas, n. 16, p.31-32. 2000.

PEREIRA, C. R. **Análise do crescimento edesenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientais**. 2002. 282 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

PISSAIA, A.; COLASANTE, L. O.; COSTA, J. A. Efeitos de desfolhamentos artificiais sobre a produção e acúmulo de matéria seca em duas cultivares de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.17, n.6, p.873-881. 1982.

RICHTER, G. L. et al. Estimating leaf area of modern soybean cultivars by a non-destructive method. **Bragantia**. Campinas, v. 73, n. 4, p. 416-425, 2014.

SALINAS, A. R. et al. Respuestas fisiológicas que caracterizan el comportamiento de diferentes cultivares de soja a la deficiencia hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 5, p. 331-338. 1996.

SALINET, L. H. **Avaliação fisiológica e agronomica de soja geneticamente modificada para maior tolerancia a seca**. 2009. 76 f. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2009.

SARTORI, G. M. S. et al. Sistemas de preparo do solo e de semeadura no rendimento de grãos de soja em área de várzea. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 46, n. 3, p. 492-498. 2016.

SEDIYAMA, T. et al. Melhoramento da soja. In: BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. 2. ed. UFV, Viçosa, p. 969 2005.

SETIYONO, T. D. et al. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**. v.100, p. 257-271. 2007.

SINCLAIR, T. R. et al. Comparison of vegetative development in soybean cultivars for low latitude environments. **Field Crops Research**. v. 92, p. 53-59. 2005.

SINCLAIR, T. R. Leaf CER from post-flowering to senescence of field-grown soybean cultivars. **Crop Science**. v. 20, p. 196–200. 1980.

SINCLAIR, T. R.; HORIE, T.. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: A review. **Crop Science**. v. 29 p. 90–98. 1989.

SIONIT, N.; KRAMER, P. J. Effects of water stress during different stages of growth of soybean. **Agronomy Journal**. Madison, v. 69, n. 2, p. 274-278. 1977.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. EMATER/RS; UFRGS. p. 126. 2008.

STRECK, N. A. Do we know how plants sense a drying soil? **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 581-584. 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

THOMAS, A. L.; COSTA, J. A. Influência do deficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 9, p. 1389-1396, set. 1994.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. Thewaterbalance. **Publications in Climatology**. v. 3, p. 1-104. 1955.

TIRONI, L. F. **Simanhot**: Um modelo de simulação da cultura da mandioca e sua aplicação em clima futuro no Rio Grande do Sul. 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

TREWAVAS, A. Aspects of plant intelligence. **Annals of Botany**, Oxford, v. 92, p. 1-20. 2003.

ZANON, A. J. et al. Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja. **Bragantia**. Campinas, v. 74, n. 3, p. 279-290. 2015a.

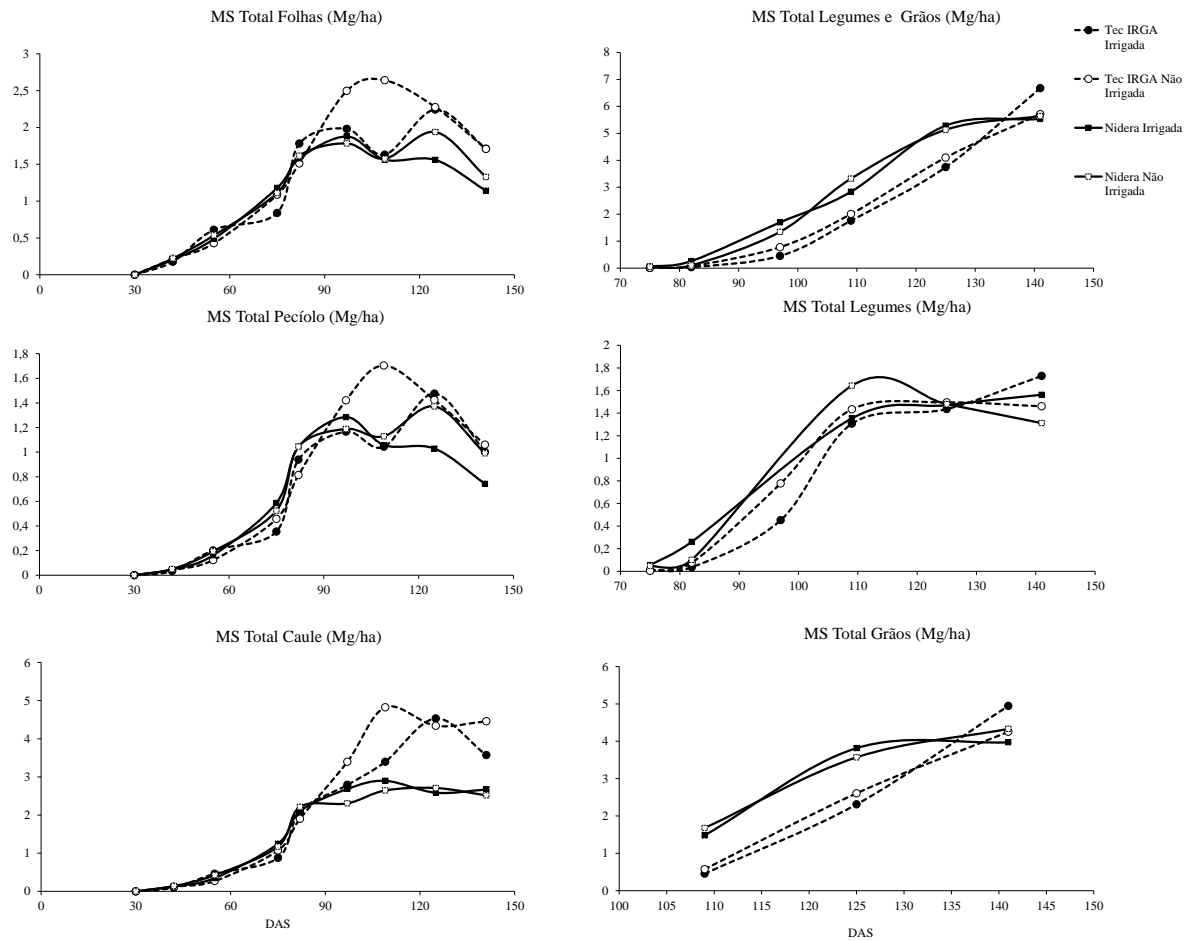
ZANON, A. J. et al. Desenvolvimento de cultivares de soja em função do grupo de maturação e tipo de crescimento em terras altas e terras baixas. **Bragantia**. v. 74, n. 4, p. 400-411. 2015b.

ZANON, A. J. **Variáveis meteorológicas e de manejo que influenciam índice de área foliar, desenvolvimento e rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

ZHOU, X. B.; CHEN, Y. H.; OUYANG, Z. Row spacing effect on leaf area development, light interception, crop growth and grain yield of summer soybean crops in Northern China. **African Journal of Agricultural Research**. Lagos, v. 6, n. 6, p. 1430-1437. 2011.

## APÊNDICE A

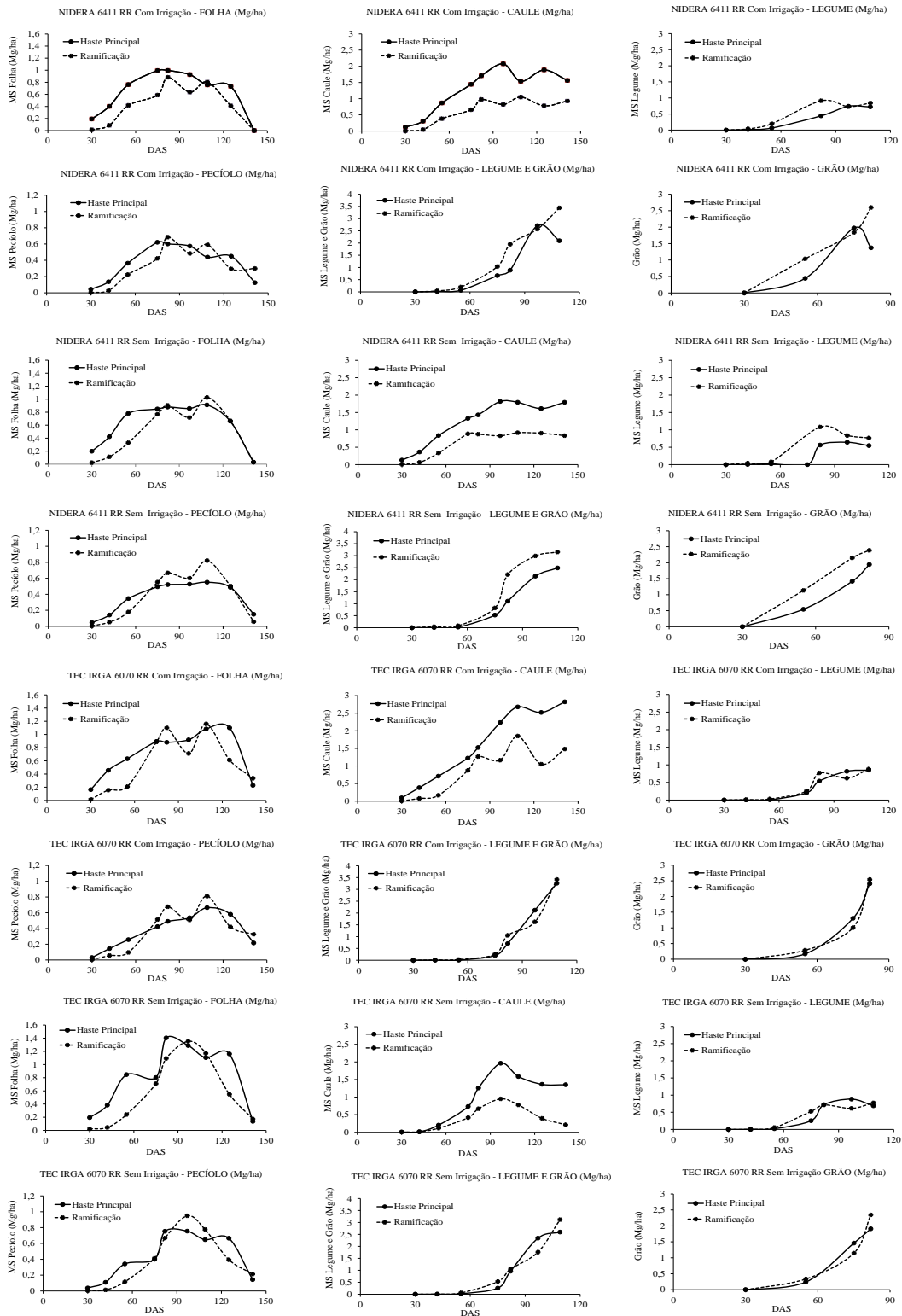
**Figura 24** – Evolução da matéria seca (MS) de folhas, legumes e grãos, pecíolo, legumes, caule e grãos em dias após a semeadura (DAS) para as duas cultivares, com e sem irrigação suplementar em Cachoeirinha, RS, 2014/ 2015.



Fonte: Autor.

## APÊNDICE B

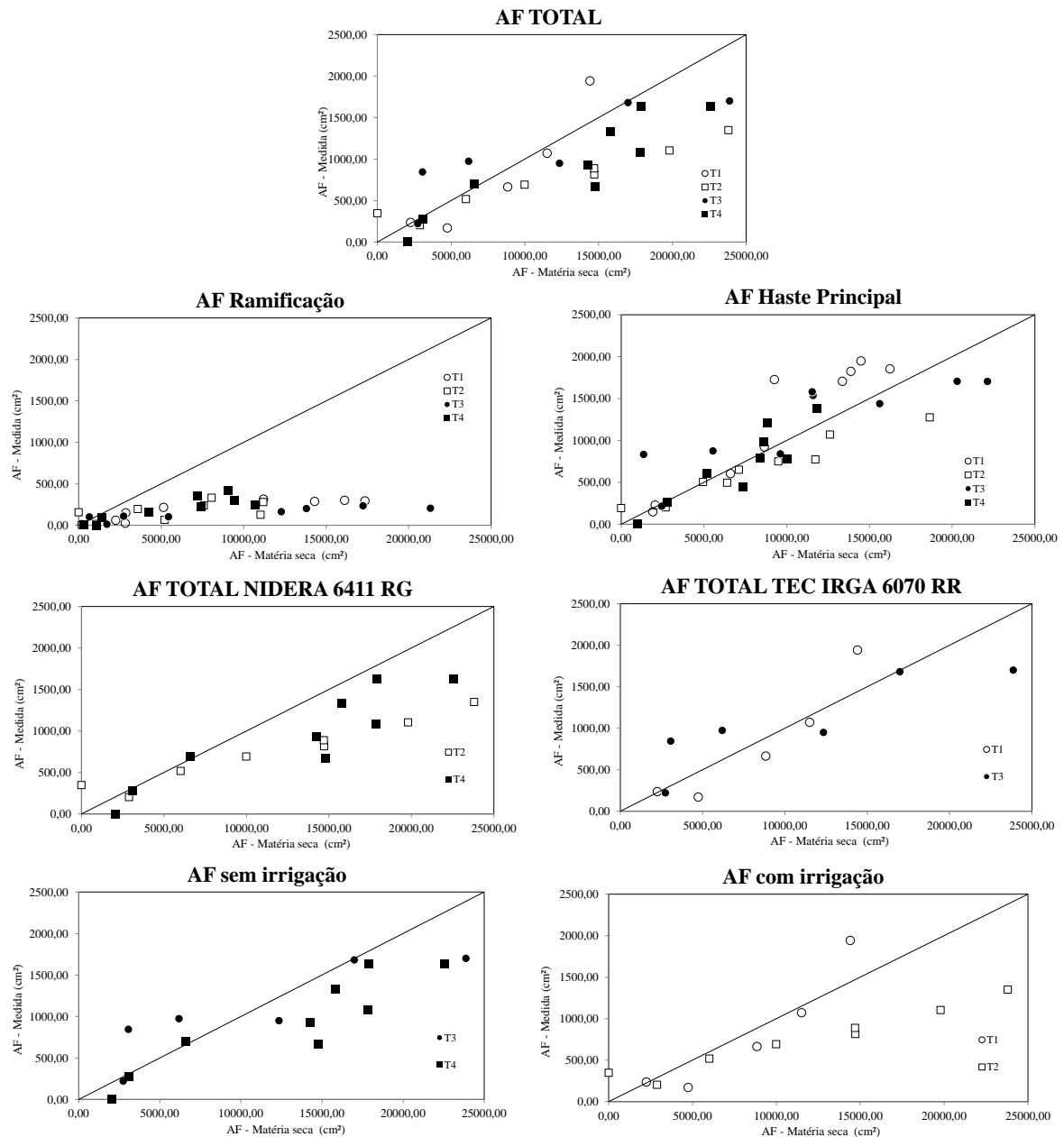
**Figura 25** – Evolução da Matéria Seca (MS) de folhas, pecíolo, haste, grãos, legumes, grãos e legumes para as duas cultivares e duas disponibilidades hídricas, em Cachoeirinha, RS, Brasil, 2014/2015.



Fonte: Autor

## APÊNDICE C

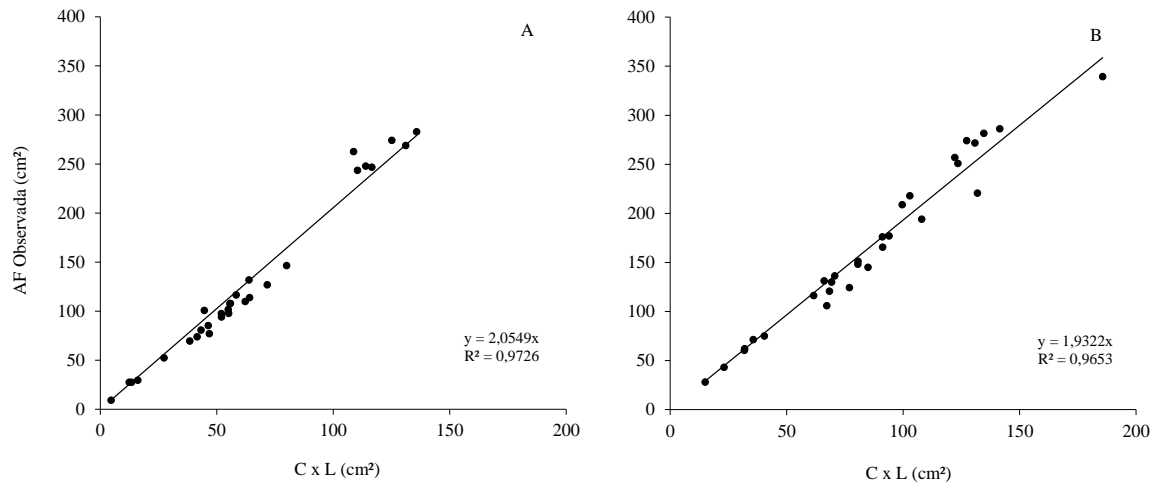
**Figura 26** – Relações entre a área foliar estimada pela medida das dimensões de comprimento e largura do folíolo central e estimadas pela matéria seca de folhas e área foliar específica (AFE) no experimento de Cachoeirinha, RS, Brasil 2014/2015.



Fonte: Autor.

## APÊNDICE D

**Figura 27** – Área medida de folhas individuais (AF Observada) versus o produto das dimensões lineares de comprimento e largura (C x L) do folíolo central da cultivar de TEC IRGA 6070 RR (A) e Nidera NA 6411 RG (B), com as respectivas equações.



Fonte: Autor.

## ANEXOS A

Cálculos dos parâmetros estimados pelo medidor de trocas gasosas LCi-SD Portable  
Photosynthesis System.

### CO<sub>2</sub> Concentration

The IRGA measures the absorption of infra-red due to the presence of CO<sub>2</sub>. This value must be scaled and linearised to get the actual concentration. The processing is done in several steps as shown below for the analysis channel, the reference channel is treated the same, substituting subscript 'r'.

$$[c_{ab}]_a = \frac{z_a - r_a}{z_a}$$

Where  $[c_{ab}]_a$  absorption due (mainly) to CO<sub>2</sub>  
 $z_a$  detector signal at zero  
 $r_a$  detector signal at current reading

the calibration set during span adjustment:

$$c_{an} = L_c([c_{ab}]_a s)$$

Where  $L_c$  linearisation function for CO<sub>2</sub>  
 $[c_{ab}]_a$  absorption of infra-red due to CO<sub>2</sub>  
 $s$  span factor; determined during calibration (span adjustment)

The reading is now compensated for changes in atmospheric pressure. The LCi-SD leaf chamber and IRGA cell are very close to ambient pressure.

$$c_{an}' = c_{an} \left( 1 + \frac{(p_{ref} - p) a}{p_{ref}} \right)$$

Where  $c_{an}'$  pressure corrected CO<sub>2</sub> value  
 $p_{ref}$  ambient pressure at last span adjustment, mbar  
 $p$  ambient pressure, mbar  
 $a$  pressure compensation factor (1.4)

The IRGA CO<sub>2</sub> reading is slightly influenced by the presence of water vapour (pressure broadening). The water vapour readings are used to compensate the measured readings:

$$C_{an}'' = C_{an}' + (C_{an}' w_{m_{an}})$$

Where  $C_{an}''$  reading compensated for the presence of H<sub>2</sub>O  
 $w_{m_{an}}$  H<sub>2</sub>O concentration, as a molar fraction

Finally, leaf transpiration causes the net volume of air leaving the leaf chamber to be higher than that entering. This volume increase tends to dilute the CO<sub>2</sub> concentration, causing  $c_{an}$  and  $w_{an}$  to be lower. Dilution compensation removes this effect, so that the  $\Delta c$   $\Delta e$  value reflects the differences due to absorption by the leaf, not transpiration. This compensation is only applied to the analysis reading.

$$c_{and} = C_{an}'' \left( \frac{1 - w_{m_{ref}}}{1 - w_{m_{an}}} \right)$$

Where  $c_{and}$  Final, compensated reading, as displayed  
 $w_{m_{ref}}$  Reference water vapour concentration, as molar fraction  
 $w_{m_{an}}$  Analysis water vapour concentration, as molar fraction



**Molar flow of air per m<sup>2</sup> of leaf surface**symbol:  $u_s$  (mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

$$u_s = \frac{u}{area}$$

Where  $u$  molar air flow in mol s<sup>-1</sup>  
 $area$  projected leaf area in m<sup>2</sup>

**Difference in CO<sub>2</sub> concentration**symbol:  $\Delta C$ , vpm( $\equiv \mu\text{mol mol}^{-1}$ )

$$\Delta C = C_{ref} - C'_{an}$$

where  $C_{ref}$  CO<sub>2</sub> flowing into leaf chamber,  $\mu\text{mol mol}^{-1}$   
 $C'_{an}$  CO<sub>2</sub> flowing out from leaf chamber,  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  , dilution corrected

**Photosynthetic Rate (Rate of CO<sub>2</sub> exchange in the leaf chamber)**symbol:  $A$  ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

$$A = u_s \Delta C$$

where  $u_s$  mass flow of air per m<sup>2</sup> of leaf area, mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>  
 $\Delta C$  difference in CO<sub>2</sub> concentration through chamber, dilution corrected,  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ .

**Water vapour pressure in and out of leaf chamber**

The calculation for reference is show for illustration. Substitute  $e'_{an}$  and  $rh_{an}$  for the analysis calculation.

symbol  $e_{ref}$  into leaf chamber (mbar)  
 $e_{an}$  out of leaf chamber

$$e_{ref} = \frac{rh_{ref}}{100} e_s$$

where  $rh_{ref}$  water vapour concentration as %rh (as measured)  
 $e_s$  saturated vapour pressure, mbar (see later)

### Calculation of molar concentration of water vapour in and out of leaf chamber

The calculation for reference water vapour is shown for illustration.

symbol  $wm_{ref}$  into leaf chamber (ratio)  
 $wm_{an}$  out of leaf chamber

$$wm_{ref} = \frac{e_{ref}}{p_{amb}}$$

where  $e_{ref}$  water vapour pressure into chamber, mbar  
 $p_{amb}$  ambient pressure, mbar

### Difference in water vapour pressure

Note that  $\Delta w$  and  $\Delta RH$  are calculated in exactly the same way. The dilution corrected analysis value is used.

symbol  $\Delta e$  (mbar)

$$\Delta e = e'_{an} - e_{ref}$$

where  $e_{ref}$  water vapour pressure into leaf chamber, mbar  
 $e'_{an}$  water vapour pressure out of leaf chamber, mbar, dilution corrected

### Transpiration rate

symbol:  $E$  ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

$$E = \frac{\Delta e u_s}{p}$$

where  $\Delta e$  differential water vapour concentration, mbar, dilution corrected  
 $u_s$  mass flow of air into leaf chamber per square metre of leaf area,  
 $\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$   
 $p$  atmospheric pressure, mBar

### Leaf surface temperature

Where calculated. This value may also be measured or given.

symbol:  $T_{leaf}$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

$$T_{leaf} = T_{ch} + \left( \frac{(Q \times H_{factor}) - \lambda E}{\left( \frac{0.93 M_a C_p}{r_b} \right) + 4\sigma (T_{ch} + 273.16)^3} \right) *$$

where	$T_{ch}$	leaf chamber temperature, $^{\circ}\text{C}$
	$Q$	photon flux density incident on leaf chamber window, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
	$H_{factor}$	energy conversion factor (was TRANS on LCA-3) $\text{J}/\mu\text{mol}$
	$\lambda$	latent heat of vaporisation of water, $\text{J mol}^{-1}$
	$E$	Transpiration rate, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
	$M_a$	molecular weight of air
	$C_p$	specific heat at constant pressure, $\text{J g}^{-1} \text{K}$
	$r_b$	boundary layer resistance to vapour transfer, $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{mol}^{-1}$ (0.93 is conversion factor for above to give boundary layer resistance to heat)
	$\sigma$	is Boltzmann's constant, $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

### Stomatal resistance to water vapour

symbol:  $r_s$  ( $\text{m}^2 \text{s mol}^{-1}$ )

$$r_s = \frac{(w_{leaf} - wm_{an})}{\left( \frac{\Delta e u_s}{p} \right)} - r_b$$

where  $w_{leaf}$  saturated water vapour concentration at leaf temperature,  $\text{mol mol}^{-1}$ , thus:-

$$w_{leaf} = \frac{e_s}{p}$$

$e_s$	saturated vapour pressure at leaf surface temp, mBar
$p$	atmospheric pressure, mBar
$\Delta e$	differential water vapour concentration, mbar, dilution corrected
$wm_{an}$	water vapour concentration out of leaf chamber, $\text{mol mol}^{-1}$
$r_b$	boundary layer resistance to water vapour, $\text{m}^2 \text{s mol}^{-1}$
$u_s$	mass flow of air per $\text{m}^2$ of leaf area, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

---

\* Energy balance equation for calculating Leaf temperature PARKINSON, K.J. (1983) Porometry in S.E.B. Symposium of Instrumentation for Environmental Physiology, Cambridge University Press

**Sub-stomatal cavity CO<sub>2</sub> concentration**symbol:  $c_i$  ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )

$$C_i = \frac{\left(g_c - \frac{E}{2}\right) c'_{am} - A}{g_c + \frac{E}{2}} \quad \dagger$$

where

$$g_c = \frac{1}{1.6 r_s + 1.37 r_b}$$

$c'_{am}$	CO <sub>2</sub> flowing out from leaf chamber, $\mu\text{mol mol}^{-1}$ , dilution corrected.
$E$	Transpiration rate, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$A$	photosynthetic rate of CO <sub>2</sub> exchange in the leaf chamber, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$r_b$	boundary layer resistance to water vapour, $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{mol}^{-1}$
$r_s$	stomatal resistance to water vapour, $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{mol}^{-1}$

**Saturated vapour pressure of water at leaf surface temperature**symbol:  $e_s$  (bar)For  $T_{\text{leaf}} \geq 0$ 

$$e_s = 6.13753 \cdot 10^{-3} e^{\left( \frac{T_{\text{leaf}} \left( \frac{18.564 \cdot T_{\text{leaf}}}{254.4} \right)}{T_{\text{leaf}} + 253.57} \right)}$$

For  $T_{\text{leaf}} < 0$ , above water

$$e_s = 6.13753 \times 10^{-3} e^{\left( \frac{17.966 T_{\text{leaf}}}{T_{\text{leaf}} + 247.15} \right)}$$

(Arden L Buck, Journal Appl. Meteorology vol 20 1981 pp1527-1532)

where  $T_{\text{leaf}}$  leaf surface temperature,  $^{\circ}\text{C}$ 


---

<sup>†</sup> Calculation for  $C_i$ , Substomatal CO<sub>2</sub> von CAEMMERER, S. and FARQUHAR, G.H. (1981)  
Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. Planta 153:376-387

**Stomatal conductance of water vapour**

symbol:  $g_s$  units:  $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

$$g_s = \frac{1}{r_s}$$

where  $r_s$  stomatal resistance to water vapour,  $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{mol}^{-1}$

**P.A.R. incident on leaf surface**

symbol:  $Q_{leaf}$  units:  $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$

$$Q_{leaf} = Q \times Tr_w$$

where  $Q$  Photon flux density incident on leaf chamber window,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$   
 $Tr_w$  Leaf chamber window transmission factor to P.A.R. (given)

**Soil Respiration (Net Molar Flow of CO<sub>2</sub> in/out of the Soil)**

symbol:  $C_e$  ( $\mu\text{mol s}^{-1}$ )

$$C_e = u (-\Delta c)$$

where  $u$  molar air flow in  $\text{mol s}^{-1}$   
 $\Delta c$  difference in CO<sub>2</sub> concentration through soil pot, dilution corrected,  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ .

**Net CO<sub>2</sub> Exchange Rate ( $C_e$  per unit area)**

symbol:  $NCER$  ( $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ )

$$NCER = u_s (-\Delta c)$$

where  $u_s$  molar flow of air per square meter of soil,  $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$   
 $\Delta c$  difference in CO<sub>2</sub> concentration through soil pot, dilution corrected,  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ .

*Note: This is equivalent to -A*

**Net H<sub>2</sub>O Exchange Rate (Soil Flux)**

symbol:  $W_{flux}$  (m mol s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>)

$$W_{flux} = \frac{\Delta e u_s}{p}$$

where  $u_s$  molar flow of air per square meter of soil, mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>  
 $\Delta e$  differential water vapour concentration, mbar, dilution corrected  
 $p$  atmospheric pressure, mBar

*Note: This is equivalent to E*

**Volume of 1 micro-mole of air at 20°C and 1 Bar (Vm<sub>20c</sub>)**

Value used is 2.4387x10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>.

**Latent heat of vaporisation of water ( $\lambda$ )**

Value used is 45064.3 - (t<sub>ch</sub> x 42.9) Joule mol<sup>-1</sup>

**Boltzmann's constant ( $\sigma$ )**

Value used is 5.7 x 10<sup>-8</sup> W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>.

**Molecular weight of air (M<sub>a</sub>)**

Value used is 28.97

**Specific heat at constant pressure (C<sub>p</sub>)**

Value used is 1.012 J g<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Fonte: LCI-SD SD user guide, ADC BioScientific, 2011