

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

**EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO DO
SISTEMA RADICULAR E PRODUÇÃO DE
FITOMASSA DE ALFACE HIDROPÔNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Elis Borcioni

Santa Maria, RS, Brasil

2008

**EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO DO SISTEMA
RADICULAR E PRODUÇÃO DE FITOMASSA DE ALFACE
HIDROPÔNICA**

por

Elis Borcioni

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós -
Graduação em Agronomia, Área de concentração Produção Vegetal, da
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM - RS), como requisito
parcial para obtenção do grau de
Mestre em Agronomia

Orientador: Prof^o. Dr. Paulo Augusto Manfron

Santa Maria, RS, Brasil

2008

Borcioni, Elis

B726e

Equações de estimativa do crescimento do sistema radicular e produção de fitomassa de alface hidropônica / por Elis Borcioni ; orientador Paulo Augusto Manfron. – Santa Maria, 2008.

72 f. ; il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, RS, 2008.

1. Agronomia 2. Cultivo protegido 3. *Lactuca sativa* L. 4. Modelagem I. Manfron, Paulo Augusto, orient. II. Título

CDU: 635.52-158.9

Ficha catalográfica elaborada por
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação Em Agronomia**

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

**EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO DO SISTEMA
RADICULAR E PRODUÇÃO DE FITOMASSA DE ALFACE
HIDROPÔNICA**

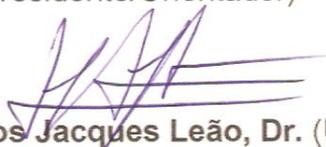
elaborada por
Elis Borcioni

como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Agronomia

COMISSÃO EXAMINADORA



Paulo Augusto Manfron, Dr.
(Presidente/Orientador)



José Domingos Jacques Leão, Dr. (UNICRUZ)
(Examinador)



Sandro Luis Petter Medeiros, Dr.(UFSM)
(Examinador)

Santa Maria, 21 de fevereiro de 2008.

**“As plantas e suas flores são como as pessoas. Tem defeitos e virtudes.
Respeita-lás e conviver com elas, faz parte de nossa vida.”**

Hermes Moreira de Souza

Dedico este trabalho a minha família, em especial aos meus
queridos pais, Edecir e Inedina,
pelo amor, carinho e incentivo durante todo este período.

Minha eterna admiração e respeito.

AGRADECIMENTOS

Á DEUS luz que ilumina nossas vidas por ter sempre mostrado o caminho certo a seguir.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Centro de Ciências Rurais pelos conhecimentos adquiridos no decorrer de minha formação acadêmica e no curso de Pós-Graduação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia e a CAPES pela concessão da bolsa de estudos e concretização de um objetivo o curso de mestrado.

Ao Prof. Paulo Augusto Manfron pelo incentivo e presença amiga.

Ao Prof. Sandro Luis Petter Medeiros pela disponibilidade e grande colaboração na realização deste trabalho.

Aos meus queridos e estimados pais Edecir e Inedina Borcioni que sempre me apoiaram e acreditaram que este dia chegaria, permanecendo sempre ao meu lado nesta caminhada. A vocês meu eterno obrigado.

As minhas irmãs Cheila e Verli e cunhados Adair e Clodoaldo que durante essa fase de minha vida sempre tiveram uma palavra de apoio e incentivo e participaram diretamente dos meus planos de vida. A vocês minha gratidão.

Aos meus pequenos Leduan e Estela que devido à distância não pude muito conviver, mas que muitas vezes foram minha alegria e fizeram com que eu não desistisse diante dos problemas. A vocês meu amor.

Aos colegas e bolsistas do Núcleo de Pesquisa em Ecofisiologia (NUPEC), pela amizade, convívio, colaboração na execução dos experimentos e nos momentos de descontração: Alan, Andrieli, Carla, Cinei, Cleber, Dalva Paulus, Douglas, Eliseu Fabrin, Evandro Fagan, Fábio, Fernanda, Gean, Getúlio, Hércules Nogueira Filho, Jones Simom, Katiule, Lenise, Lineu, Liziany, Luís Jasiewicz, Mike, Nadiesca, Tician, Vinicius. E a todos que por ventura não citei.

Um agradecimento especial a Denise Schimidt e Braulio Otomar Caron por terem sido os primeiros a acreditarem no meu trabalho. Ao Prof. Sandro Luis Petter

Medeiros e Liziany Müller Medeiros que se tornaram muito mais do que mestres, mas sim grandes amigos. A vocês minha amizade e admiração.

Aos amigos Alexandre, Alfredo, Aline, Carina, Cleiton, Darciana, Delmar, Edenir, Eliziane, Elsbeth, Fernanda, Gustavo, Ivonete, Juliana, Leosane, Luciano, Otávio, Rita, Roberto, Rodrigo Godoi, Rodrigo Pizzani, Teresinha, Vanderson, pelas palavras de apoio, pelas críticas necessárias, muito obrigada.

A todos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho meu sincero agradecimento.

RESUMO

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

EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO DO SISTEMA RADICULAR E PRODUÇÃO DE FITOMASSA DE ALFACE HIDROPÔNICA

AUTORA: Elis Borcioni

ORIENTADOR: Paulo Augusto Manfron

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 21 fevereiro de 2008.

A modelagem é uma técnica que pode ser utilizada para compreender as interações entre a planta e o ambiente, como por exemplo, a dinâmica do crescimento em hidroponia. O objetivo do trabalho foi ajustar modelos para a estimativa de crescimento de alface hidropônica, com ênfase ao sistema radicular, em plantas conduzidas sob diferentes intervalos entre irrigações. Também foi verificada a dinâmica da interação entre o crescimento radicular e a retenção da solução nutritiva para fins de manejo da irrigação. Foram conduzidos seis experimentos, de setembro de 2006 a setembro de 2007, em uma estufa plástica de 250m² localizada no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria – RS. A cultivar utilizada foi Regina, pertencente ao grupo das soltas lisas, que apresenta alta resistência ao pendoamento precoce. As análises de crescimento foram realizadas a cada cinco dias, sendo também quantificado a retenção da solução nutritiva, bem como, o comprimento e volume radicular. Os modelos foram ajustados com as variáveis dias após o transplante (DAT), graus dia (GD) e graus dia efetivo (GDE). A avaliação do desempenho dos modelos foi realizada através do índice de confiança. Independente da época do ano e da variável utilizada os modelos lineares mostraram desempenho muito bom na estimativa da fitomassa seca da parte aérea. Modelos mais complexos, com maior número de coeficientes apresentaram desempenho similar aos modelos lineares. Os modelos lineares também mostraram melhor desempenho para a estimativa do comprimento radicular. Porém, a aplicação das variáveis GD e GDE melhorou as estimativas de comprimento e volume de raízes. Os resultados evidenciaram que o incremento no volume radicular aumentou a retenção da solução nutritiva, comprovando que o sistema radicular age como uma barreira ao escoamento da solução nutritiva.

Palavras-chave: cultivo protegido; *Lactuca sativa* L.; modelagem.

ABSTRACT

Master of Science Dissertation
Graduate Program in Agronomy
Federal University of Santa Maria

EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO DO SISTEMA RADICULAR E PRODUÇÃO DE FITOMASSA DE ALFACE HIDROPÔNICA

AUTHOR: Elis Borcioni

ADVISER: Paulo Augusto Manfron

Local and date of defense: Santa Maria, February 21st, 2008.

Modelling is a technique that can be used to understand interactions between plant and environment, such as hydroponic growth dynamics. The study objective was to adjust models to estimate hydroponic lettuce growth, with emphasis on root system, the plants were produced under different irrigations intervals. It was also verified the dynamics of interaction between root growth and nutrient solution retention for a better handling of irrigation management. Six experiments were carried out from September 2006 to September 2007 in plastic greenhouse, with an area of 250 m² located at Fitotecnia Department of Federal University of Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil. The cultivar used was Regina belonging to the group of loose smooth leaves which presents high resistance to early bolting. Growth analyses were performed on a five days interval where nutrient solution retention, root length and volume were all measured. The models were fitted using days after transplant (DAT), degree day (GD) and effective thermal index (GDE) variables. The model performance evaluation was carried out using confidence index. Regardless of the time of the year and the used variable, linear models showed very good performance in estimating dry phytomass. More complex models with a large number of coefficients showed similar performance to the linear ones. Linear models also showed better performance for estimating root length. However, the application of GD and GDE variables improved estimates of roots length and volume. Results showed that increase in root volume increase nutrient solution retention, proving that the root system acts as a barrier to the proper flow of the nutrient solution.

Key Words: greenhouse; *Lactuca sativa* L.; modeling.

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - Variação diária das temperaturas máximas, mínimas e médias do ar da cultivar Regina cultivada sob sistema hidropônico. Experimento de primavera (a); Experimento de verão 1 (b); Experimento de verão 2 (c); Experimento de outono (d); Experimento de inverno 1 (e); e Experimento de inverno 2 (f). Santa Maria – RS. 2008.38
- FIGURA 2 - Variação diária da radiação solar incidente (RG) em MJ. M² dia⁻¹ no interior da estufa durante o período experimental de Primavera - verão (a) e outono - inverno (b). Santa Maria – RS. 2008.39
- FIGURA 3 – Valores de retenção da solução nutritiva retida pelas raízes de alface conduzidas em sistema hidropônico em quatro épocas de cultivo, primavera, verão, outono e inverno respectivamente, nas coletas (zero, 10 e 15 minutos após desligar o sistema). UFSM, Santa Maria – RS, 2008.....60
- FIGURA 4 - Valores de volume radicular nas épocas de primavera verão (a), outono (b) e inverno (c) aos 5,10 dias após o transplântio e final do experimento. UFSM, Santa Maria – RS, 2008.61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Período experimental com as datas de semeadura, emergência, transplante para o berçário, transplante para local definitivo e data de colheita. Santa Maria, RS. 2008.	28
TABELA 2 – Intervalos de valores do Índice de confiança “c” utilizados para a interpretação do desempenho dos modelos de estimativa da fitomassa seca total da alface, em cultivo hidropônico em Santa Maria. RS. 2008.....	36
TABELA 3 - Valores de fitomassa seca aérea (g m^{-2}), fitomassa seca radicular (g m^{-2}), fitomassa seca total (g m^{-2}) e duração do período experimental do cultivo de alface em sistema hidropônico em seis épocas primavera, verão 1, verão 2, outono, inverno 1 e inverno 2. UFSM, Santa Maria – RS, 2008.	41
TABELA 4 - Modelos de regressão para estimativa da fitomassa seca aérea da alface cultivada em hidroponia no período de primavera verão a partir de dias após o transplantio (DAT). Santa Maria, RS. 2008.	42
TABELA 5 - Modelos de regressão para estimativa da fitomassa seca parte aérea da alface cultivada em hidroponia no período de primavera verão a partir de graus - dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.	42
TABELA 6 - Modelos de regressão para estimativa da fitomassa seca aérea da alface cultivada em hidroponia no período de primavera verão a partir de graus - dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.	43
TABELA 7 - Modelos de regressão para estimativa da fitomassa seca aérea da alface cultivada em hidroponia no período de outono inverno a partir de dia após o transplantio (DAT). Santa Maria, RS. 2008.	44
TABELA 8 - Modelos de regressão para estimativa da fitomassa seca aérea da alface cultivada em hidroponia no período de outono inverno a partir de graus dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.	44
TABELA 9 - Modelos de regressão para estimativa da fitomassa seca aérea da alface cultivada em hidroponia no período de outono inverno a partir de grau dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.	45
TABELA 10 – Desempenho dos modelos para a estimativa da fitomassa seca da parte aérea da planta de alface conduzida em hidroponia no período de primavera verão a partir de dias após o transplantio (DAT). Santa Maria, RS. 2008.....	47
TABELA 11 - Desempenho dos modelos para a estimativa da fitomassa seca da parte aérea da planta de alface conduzida em hidroponia no período de primavera verão a partir de graus dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.....	48
TABELA 12 - Desempenho dos modelos para a estimativa da fitomassa seca da parte aérea da planta de alface conduzida em hidroponia no período de primavera verão a partir de graus dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.	48

TABELA 13 - Desempenho dos modelos para a estimativa da fitomassa seca da parte aérea da planta de alface conduzida em hidroponia no período de outono inverno a partir de dias após o transplântio (DAT). Santa Maria, RS. 2008.	49
TABELA 14 - Desempenho dos modelos para a estimativa da fitomassa seca da parte aérea da planta de alface conduzida em hidroponia no período de outono inverno a partir de graus dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.	49
TABELA 15 - Desempenho dos modelos para a estimativa da fitomassa parte aérea da planta de alface conduzida em hidroponia no período de outono inverno a partir de graus dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.	50
TABELA 16 - Modelos de regressão para estimativa do comprimento radicular da alface cultivada em hidroponia a partir de dias após o transplântio (DAT). Santa Maria, RS. 2008.	50
TABELA 17 - Modelos de regressão para estimativa do comprimento radicular da alface cultivada em hidroponia a partir de graus - dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.	51
TABELA 18 - Modelos de regressão para estimativa do comprimento radicular da alface cultivada em hidroponia a partir de graus - dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.	51
TABELA 19 - Desempenho dos modelos para a estimativa do comprimento radicular da planta de alface conduzida em hidroponia a partir de dias após o transplântio (DAT). Santa Maria, RS. 2008.	52
TABELA 20 - Desempenho dos modelos para a estimativa do comprimento radicular da planta de alface conduzida em hidroponia a partir de graus dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.	53
TABELA 21 - Desempenho dos modelos para a estimativa do comprimento radicular da planta de alface conduzida em hidroponia a partir de graus dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.	53
TABELA 22 - Modelos de regressão para estimativa do volume radicular da alface cultivada em hidroponia a partir de dias após o transplântio (DAT). Santa Maria, RS. 2008.	54
TABELA 23 - Modelos de regressão para estimativa do volume radicular da alface cultivada em hidroponia a partir de graus - dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.	54
TABELA 24 - Modelos de regressão para estimativa do volume radicular da alface cultivada em hidroponia a partir de graus dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.	55
TABELA 25 - Desempenho dos modelos para a estimativa do comprimento radicular da planta de alface conduzida em hidroponia a partir de dias após o transplântio (DAT). Santa Maria, RS. 2008.	56
TABELA 26 - Desempenho dos modelos para a estimativa do comprimento radicular da planta de alface conduzida em hidroponia a partir de graus - dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.	56
TABELA 27 - Desempenho dos modelos para a estimativa do comprimento radicular da planta de alface conduzida em hidroponia a partir de graus – dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.	57

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Variável	Descrição	Unidade
Variáveis meteorológicas medidas no interior da estufa		
Rg	Radiação solar global incidente	MJ m ⁻² dia ⁻¹
Tm	Temperatura média do ar	°C
Tmín	Temperatura mínima do ar	°C
Tmáx	Temperatura máxima do ar	°C
Variáveis estimadas		
Tb	Temperatura base da cultura	°C
RFA	Integral da Radiação fotossinteticamente ativa	MJ m ⁻² dia
<i>f</i>	Constante da importância relativa da RFA	
X	Variável independente	DAT, GD ou GDE
DAT	Dias após o transplântio	dias
GD	Graus - dia	°C.dia
GDE	Graus - dia efetivo	°C.dia
d	Coeficiente de exatidão ou de concordância	d
c	Coeficiente de confiança	c
r	Coeficiente de correlação	r

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A - Caracterização da variável climática temperatura mínimas ($T_{mín}$), máximas ($T_{máx}$) e médias ($T_{média}$), radiação global incidente (R_g interna) e fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da estufa durante o experimento de primavera da cultura de alface no período de 17 de outubro a 02 de novembro de 2006. Santa Maria, RS. 2008.	69
APÊNDICE B - Caracterização da variável climática temperatura mínimas ($T_{mín}$), máximas ($T_{máx}$) e médias ($T_{média}$), radiação global incidente (R_g interna) e fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da estufa durante o experimento de verão 1 da cultura de alface no período de 06 de fevereiro a 22 de fevereiro de 2007. Santa Maria, RS. 2008.	69
APÊNDICE C - Caracterização da variável climática temperatura mínimas ($T_{mín}$), máximas ($T_{máx}$) e médias ($T_{média}$), radiação global incidente (R_g interna) e fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da estufa durante o experimento de verão 2 da cultura de alface no período de 14 de março a 02 de abril de 2007. Santa Maria, RS. 2008.	70
APÊNDICE D - Caracterização da variável climática temperatura mínimas ($T_{mín}$), máximas ($T_{máx}$) e médias ($T_{média}$), radiação global incidente (R_g interna) e fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da estufa durante o experimento de outono da cultura de alface no período de 23 de abril a 17 de maio de 2007. Santa Maria, RS. 2008.	70
APÊNDICE E - Caracterização da variável climática temperatura mínimas ($T_{mín}$), máximas ($T_{máx}$) e médias ($T_{média}$) radiação global incidente (R_g interna) e fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da estufa durante o experimento de inverno 1 da cultura de alface no período de 19 de julho a 17 de agosto de 2007. Santa Maria, RS. 2008.	71
APÊNDICE F - Caracterização das variáveis climáticas temperaturas mínimas ($T_{mín}$), máximas ($T_{máx}$) e médias ($T_{média}$), radiação global incidente (R_g) e fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da estufa durante o experimento de inverno 2 da cultura de alface no período de 21 de agosto a 20 de setembro de 2007. Santa Maria, RS. 2008.	72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Cultura da alface	17
2.2 Produção de alface em hidroponia	19
2.3 Técnica da modelagem utilizada na agricultura	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Caracterização do local e genótipo	27
3.2 Condução da cultura	29
3.2.1 Produção das mudas de alface	29
3.2.2 Produção final de alface	30
3.3 Tratamentos	31
3.4 Avaliações fenométricas	32
3.5 Modelagem da alface	33
3.6 Parâmetros estatísticos e avaliação dos modelos	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 Variáveis meteorológicas	37
4.2 Modelos propostos para a estimativa da fitomassa seca da parte aérea	41
4.2.1 Avaliação dos modelos para a estimativa da fitomassa seca parte aérea	45
4.3 Estimativa da variável comprimento radicular	50
4.3.1 Avaliação dos modelos de estimativa da variável comprimento radicular	52
4.4 Estimativa da variável volume radicular	54
4.4.1 Avaliação dos modelos de estimativa da variável volume radicular	55
4.5 Estimativa da retenção da solução nutritiva	57
5 CONCLUSÕES	62
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
APÊNDICES	69

1 INTRODUÇÃO

Estima - se que a produção anual de hortaliças no Brasil seja superior a 11 milhões de toneladas, com um valor aproximado de 2,5 bilhões de dólares (NASCIMENTO, 2007). Nos últimos anos é crescente a demanda por produtos de melhor qualidade, fator que interfere diretamente na forma de produção e comercialização dos produtos hortícolas.

Os produtores de hortaliças estão investindo em novas tecnologias, buscando atender um mercado consumidor cada vez mais exigente, utilizando para isso técnicas como o cultivo protegido e a hidroponia. Essas técnicas exigem do produtor um conhecimento prévio sobre o manejo da cultura nestes sistemas, além de ser fundamental escalonar a produção para que a oferta do produto seja constante durante o ano tornando a atividade viável economicamente, uma vez que, os custos iniciais de instalação do sistema são elevados.

No Brasil o cultivo comercial de hortaliças em hidroponia é uma técnica de cultivo que vem crescendo de forma rápida. O cultivo sob estufas plásticas utilizando a hidroponia possibilita um melhor controle do ambiente às plantas. O cultivo protegido serve para proporcionar redução da sazonalidade, aumentar a qualidade e agregar valor ao produto, aspectos que podem ser o diferencial em uma olericultura lucrativa.

A hidroponia apresenta como vantagens a racionalização no uso dos insumos, menor uso de fertilizantes, menor incidência de pragas e doenças, menor consumo de água, maior densidade de plantas, obtenção de produtos de melhor qualidade fisiológica e sanitária, com maior precocidade, é um produto diferenciado obtendo-se maior produtividade e melhor preço de venda.

A alface (*Lactuca sativa* L.) é a folhosa mais consumida no país, sendo esta cultura a pioneira no cultivo hidropônico embora atualmente, continue sendo a hortaliça mais cultivada provavelmente devido ao seu manejo fácil, ciclo rápido (45 – 60dias), alta produtividade e rápido retorno do capital investido. A maioria dos cultivos hidropônicos de alface no país é feito utilizando a técnica do Fluxo Laminar de Nutrientes (NFT), onde a planta absorve os nutrientes diretamente de um fluxo de água que passa pelas raízes.

No Rio Grande do Sul, o cultivo dessa hortaliça pode ser feito durante todo o ano embora tenha dois períodos desfavoráveis. No verão, há maior probabilidade de ocorrer pendoamento precoce dada às condições meteorológicas como alta temperatura do ar e radiação solar elevada. Já no inverno, devido à ocorrência de menor disponibilidade térmica, radiação solar mínima (próximo ao limite trófico) e precipitações prolongadas que podem causar danos ou retardar o crescimento das plantas. Na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul, em estufas plásticas, manejadas adequadamente, são obtidas condições favoráveis ao cultivo de hortaliças durante todo o ano.

No cultivo hidropônico de alface, observa-se que no início do ciclo, a frequência de irrigação deve ser maior mesmo que a demanda hídrica seja baixa. Isto é necessário, pois o sistema radicular não possui ainda um volume adequado para atuar como uma barreira efetiva ao fluxo da solução nutritiva. Com o decorrer do ciclo, o sistema radicular cresce favorecendo o efeito de barreira e assim, a retenção da solução. Desta forma concomitantemente com o aumento da demanda da cultura ocorreria aumento na retenção da solução nutritiva pelas raízes, podendo - se modificar o regime de irrigação (frequência e tempo de irrigação).

Nos cultivos hidropônicos, o crescimento do sistema radicular ocorre dentro de um ambiente restrito delimitado pelo canal de cultivo. Como, os canais de cultivo estão em declive, existe a tendência de o sistema radicular crescer no sentido do escoamento da solução. Assim, as raízes crescem dispostas longitudinalmente ao longo canal, até atingirem seu comprimento máximo. Possivelmente, além da superfície e do volume, também o comprimento do sistema seria um fator que afetaria o escoamento da solução nutritiva.

Os cultivos em hidroponia possuem gastos fixos decorrentes da utilização de solução nutritiva e do sistema de irrigação, o qual necessita da energia elétrica para a moto bomba usada na circulação da solução nutritiva. Geralmente, utilizam-se intervalos entre irrigações de 15 minutos de irrigação com intervalos de 15 minutos sem irrigação. Mas os trabalhos de Pilau et. al, (2002) e Fagan et al, (2005), evidenciaram que intervalos maiores entre irrigações proporcionam a mesma produção para a cultura da alface e meloeiro hidropônico, respectivamente. Entretanto, não foram realizadas pesquisas para elucidar a interação entre o crescimento radicular e a retenção da solução nutritiva.

O uso de modelos para expressar o crescimento das plantas é uma ferramenta muito útil na tentativa de compreender os diferentes processos fisiológicos que ocorrem nas plantas. Segundo Dourado Neto et al, (1998a) um modelo de crescimento e desenvolvimento das plantas busca informações sobre as interações planta x ambiente objetivando maximizar os recursos naturais do local ou de determinada cultura. De acordo com Fante e Reichardt (1994), a avaliação da distribuição do sistema radicular de uma cultura é fundamental para o desenvolvimento de práticas racionais de manejo agrícola que visam à otimização da produtividade.

A tendência da agricultura atual é desenvolver modelos para simular o crescimento, objetivando identificar quais os fatores que limitam o crescimento, e que influenciam diretamente na produção das culturas (LOPES et al. 2004). Apesar dos trabalhos de modelagem propostos para a alface ainda há carência de informações sobre a dinâmica do crescimento radicular e retenção da solução nutritiva, o que proporcionaria refinar o manejo da irrigação da alface hidropônica. Desta forma, a compreensão e modelagem dos processos que envolvem o crescimento radicular e a consequente retenção da solução nutritiva em um sistema hidropônico podem-se tornar uma ferramenta útil no manejo da irrigação.

Nesse contexto foi conduzido um trabalho na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria – RS, tendo como objetivos:

- i - ajustar modelos de crescimento para a planta de alface, com ênfase ao sistema radicular, conduzida em diferentes intervalos entre irrigações ao longo do ano e
- ii - verificar a dinâmica da interação entre a retenção da solução nutritiva e o crescimento radicular a fim de maximizar o manejo da irrigação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultura da alface

A alface (*Lactuca sativa* L.), pertencente à família Asteraceae, da subfamília Cichoriaceae, tem como centro de origem a região do Mediterrâneo. Ao redor do ano 4.500 a.C. já era conhecida no antigo Egito e chegou ao Brasil no século XVI, através dos portugueses, conforme citado por (SANTOS, 2000).

É uma hortaliça mundialmente conhecida e consumida em forma de saladas, é fonte de vitaminas A, B1, B2 e C, e sais minerais como cálcio e ferro. É a principal hortaliça folhosa comercializada e consumida pela população brasileira pela facilidade de aquisição e por ser produzida durante o ano inteiro (OLIVEIRA et al., 2004). A produção de alface tem aumentado consideravelmente, devido ao melhor aspecto visual, à sua maior durabilidade e à facilidade na limpeza, (OHSE, 2001).

A alface é cultivada em todo o território nacional e compõe uma parcela importante dos vegetais da dieta da população, tanto pelo sabor e qualidade nutritiva, quanto pelo baixo custo. Seu consumo, normalmente é feito *in natura* (FAQUIN et al., 1996). O consumo dessa hortaliça tem aumentado significativamente não só pelo aumento da população, mas pela tendência de mudança no hábito alimentar das pessoas, incluindo na sua dieta hortaliças de qualidade e em maior quantidade quando comparado a períodos anteriores.

No mercado nacional a alface crespa representa cerca de 70% da produção enquanto a alface lisa representa apenas 10% da produção. A preferência do brasileiro por alface tipo crespa é um fato único na alfacultura mundial (SALA, 2005).

É uma planta herbácea, com caule diminuto, não ramificado, ao qual se prendem as folhas, que são relativamente grandes, podendo ser do tipo lisa ou crespa, fechando - se ou não em uma cabeça. De coloração variada de verde amarelado a verde escura, sendo encontrada também cultivares que possuem bordas arroxeadas ou são totalmente arroxeadas. As raízes são do tipo pivotante, podendo atingir cerca de 0,60m de profundidade quando cultivados em solo, apresentando ramificações curtas e finas (FILGUEIRA, 2000).

A alface quando cultivada em estufas ou túneis, possui um período decorrente entre o transplante e colheita de aproximadamente 30 dias, podendo ser um pouco maior no período de inverno (50 dias) e mais curto nos meses de temperatura amena (45 dias). No cultivo a campo, esse período de desenvolvimento pode chegar até a 80 dias (SGANZERLA, 1997; FILGUEIRA, 2000).

O ponto de colheita da alface ocorre normalmente quando as folhas externas estão bem abertas (“cabeça” formada quando for do tipo), ou baseando-se no número de dias após o plantio. As cultivares do tipo lisa e crespa têm o seu ciclo mais curto, entre 7 e 10 dias após o transplante, em média. Alface do tipo americana quando cultivadas em ambiente protegido, possuem ciclo mais longo, necessitando entre 7 e 14 dias a mais para serem colhidas (GOTO; TIVELLI, 1998).

A temperatura do ar é o principal elemento meteorológico que pode afetar o crescimento e desenvolvimento das plantas. Existe uma faixa de temperatura do ar adequada para o crescimento e desenvolvimento das culturas que são chamadas de temperaturas cardeais, abaixo desse valor ou excedendo o valor máximo, o perfeito desenvolvimento das plantas é afetado.

Para a cultura de alface verifica-se divergência entre os autores em relação às temperaturas cardeais. Brunini (1976) cita a faixa de temperatura de 10°C a 22°C. Já Scaife (1987) cita o valor de 3,5°C como temperatura mínima. Para Silva (1999), essa faixa está entre 4,4°C a 21,1°C; enquanto para Filgueira (2000) seria o valor de 30°C como a temperatura máxima.

A alface prefere temperaturas amenas para o seu desenvolvimento vegetativo. Sendo de origem européia e asiática, a cultura é melhor cultivada com temperaturas noturnas inferiores a 15°C, mas não abaixo de 7°C. Temperaturas acima de 25°C aceleram o ciclo da cultura, resultando em plantas menores, com início de pendoamento, ou seja, passando para fase reprodutiva (FILGUEIRA, 1982). Atualmente o melhoramento genético dessa espécie possibilita cultivos em ambiente protegido, onde as temperaturas atingem valores maiores que as indicadas acima. Trabalhos realizados por Schmidt e Santos (2000), no Núcleo de Pesquisa em Ecofisiologia e Hidroponia da Universidade Federal de Santa Maria tiveram como objetivo identificar e recomendar a utilização de cultivares de alface para o cultivo hidropônico. Obtiveram como resultados a indicação das seguintes cultivares: Livia e Regina (tipo lisa); Mimosa e Verônica (tipo crespa) para o cultivo

na primavera outono. E as cultivares Aurora e Regina (tipo lisa); Deyse e Mimosa (tipo crespa) para o cultivo no inverno.

A alface floresce sob dias longos e temperaturas elevadas. Dias curtos e temperatura amenas ou baixas, geralmente, favorecem a fase vegetativa do ciclo da maioria das cultivares. A planta resiste, inclusive, às baixas temperaturas e geadas leves. Contrariamente, a floração que se inicia com o pendoamento, é favorecida por dias longos e temperaturas elevadas (FILGUEIRA, 2000).

A utilização de ambiente protegido como túneis e estufas permite um ganho térmico, o que propicia uma maior regularidade na produção no sul do Brasil. Para o cultivo no verão, já existem cultivares adaptadas tolerantes ao calor desenvolvidas pelo melhoramento genético.

A escolha de cultivares é extremamente importante quando se pretende cultivar alface em ambiente protegido, tanto no solo (canteiros) quanto em hidroponia, pois, o cultivo neste ambiente protegido é uma atividade que exige especialização e domínio das técnicas de manejo por parte do produtor. Estes sistemas tecnológicos, ambiente protegido, se diferem muito do efetuado em campo aberto, principalmente quanto à infra-estrutura utilizada e aos tratamentos culturais (controle de doenças e pragas, irrigação e adubação).

2.2 Produção de alface em hidroponia

O Brasil possui uma área de mais de 13 mil ha em cultivo protegido, esse valor ainda é pequeno dado às potencialidades do país (BLISKA, 2007). O cultivo hidropônico é uma atividade que deve ser desenvolvida em ambiente protegido (estufa ou túnel alto), para que ocorra um maior controle sobre o crescimento das plantas e da solução nutritiva.

O aumento das áreas de cultivo protegido poderia representar uma redução em 30% na área plantada com significativa melhoria nos produtos. Isso reduziria em 40% o desperdício de água e aplicação de agrotóxicos, interferindo de forma positiva na conservação do solo e meio ambiente. O cultivo hidropônico vem aumentando consideravelmente, pois representa uma técnica de cultivo que possibilita maior produção em menor tempo, além da proteção contra intempéries climáticas que comprometem o cultivo de hortaliças a campo, (BLISKA, 2007).

De acordo com Segovia et al. (1997) o volume produzido de alface varia ao longo do ano em função das condições climáticas adversas em cada região. No Sul do Brasil, o seu cultivo passa por períodos com condições pouco favoráveis, nos meses de inverno com temperaturas baixas e precipitações pluviométricas prolongadas, retardando o crescimento e danificando as plantas; no verão com temperaturas elevadas e intensidade da radiação solar favorecem o pendoamento precoce. Sendo que o uso de ambiente protegido (estufas, túneis) são uma alternativa para amenizar os efeitos climáticos.

A hidroponia é uma técnica alternativa na qual o solo é substituído por uma solução aquosa, contendo apenas os elementos minerais necessários aos vegetais. O cultivo hidropônico tem vantagens e desvantagens em relação ao cultivo tradicional à campo e cultivo protegido no solo. Como vantagens podem-se citar o uso de pequenas áreas próximas aos centros urbanos, obtenção de alta produtividade, possibilidade de ter um produto de boa qualidade durante todo o ano, redução no uso de defensivos agrícolas, uso eficiente e econômico da água e fertilizantes, menor risco de contaminação por patógenos, além de, dispensar a rotação de culturas e controle de plantas daninhas. Como desvantagens podem-se mencionar o alto custo de implantação, acompanhamento permanente do sistema, dependência de energia elétrica, fácil disseminação de patógenos pelo sistema e pela própria solução nutritiva (FAQUIN et al. 1999).

Entre os sistemas hidropônicos um dos mais utilizados é o Nutrient Film Technique (NFT) criado por Allen Cooper que consiste na circulação de um fluxo de solução nutritiva dentro de canais com 2 a 4% de declividade, no qual a planta desenvolve seu sistema radicular parcialmente submerso em um fluxo de água reciclada onde estão diluídos todos os elementos que a planta necessita. É um sistema fechado o que possibilita reaproveitar a solução nutritiva. A desvantagem deste sistema é a necessidade de oxigenação da solução e alto consumo de energia elétrica (MARTINEZ 2004).

A alface é a planta cultivada em maior escala pela Técnica do NFT. Isso se deve à sua fácil adaptação ao sistema, no qual tem revelado alto rendimento e reduções de ciclo em relação ao cultivo no solo. O sistema NFT permite produzir alface durante todo o ano, no entanto, dependem de variedades apropriadas, acompanhamento técnico especializado, manejo, estruturas e equipamentos adequados para minimizar as perdas.

Para a instalação de um sistema NFT para cultivo de hortaliças folhosas são necessários uma estufa contendo bancada para produção de mudas, berçário e para produção final; canais de cultivo apoiados na bancada; reservatório para solução nutritiva; conjunto motobomba; temporizador (timer); encanamentos e registros para distribuição e retorno de solução nutritiva (FURLANI, 1998).

O sistema hidráulico de um conjunto hidropônico NFT é fechado, ou seja, a solução nutritiva é bombeada de um reservatório, passa pelas raízes das plantas que se encontram nos canais e volta por gravidade para o mesmo reservatório.

As bancadas de cultivo no sistema NFT, segundo FAQUIN et al. (1999) devem ser montadas a 1,0 m de altura da superfície do solo, com largura entre 1,5 a 2,0 m; e possuindo comprimento que pode variar entre 12 e 30 m. Os canais por onde circula a solução nutritiva por gravidade e se desenvolvem as raízes da alface devem ter uma declividade entre 2 a 4%. Os canais podem ser constituídos por telhas de cimento amianto forradas com filme plástico, tubos de PVC (50, 75 ou 100 mm) e canais com perfil fabricado especialmente para hidroponia.

O depósito para armazenar a solução nutritiva deve ser dimensionado em função do número de plantas cultivadas. Recomenda-se também que o mesmo deve situar-se em local protegido da radiação solar para evitar aquecimento e desenvolvimento de algas, de preferência enterrado no solo, para manter a temperatura e facilitar o retorno por gravidade da solução conforme FURLANI (1998). Segundo Santos (2000), a capacidade do reservatório depende da cultura, do número de plantas e da relação volume/ planta, sendo que para a cultura da alface não deve ultrapassar 1 a 2 litros/planta.

A solução nutritiva é tida como um dos componentes mais importantes de todo o sistema hidropônico, pois o uso inadequado dessa solução pode acarretar sérios prejuízos às plantas. Não existe uma solução nutritiva ideal para todas as culturas, segundo FAQUIN et al. (1999) a solução nutritiva varia com uma série de fatores, tais como: a espécie e variedade de plantas cultivadas, a idade das plantas, a época do ano, fatores ambientais (umidade relativa do ar, temperatura do ambiente e da solução) e a parte da planta colhida.

Para o cultivo de alface são recomendadas as soluções nutritivas de Castellane & Araújo (1995), Furlani (1995) citados por Schimidt et al. (2001). Além dessas, outras soluções como a de Hoagland & Amon (1950); Jensen & Collins

(1985); Furlani & Furlani (1988); Ueda (1990) e Castellane & Araújo modificada são recomendadas por SANTOS (1998).

Independentemente da solução nutritiva, a qualidade da água a ser usada é um fator relevante para uma boa formulação da solução nutritiva, assim como a escolha dos fertilizantes. A água deve estar disponível com relativa abundância; ser de ótima qualidade (potável) e ter uma composição química (baixo teor de sais < 20 - 25%). Os fertilizantes utilizados devem ter alta solubilidade, pois, o uso de nutrientes de baixa solubilidade leva a formação de precipitados, podendo provocar carência nutricional de alguns elementos e sempre que possível optar por nutrientes com baixo custo.

O monitoramento da solução nutritiva deverá considerar alguns aspectos, como o pH e a condutividade elétrica. O pH deverá estar na faixa de 5,8 a 6,0 para a maioria das espécies, pois, este influencia direta ou indiretamente a vida das plantas MALAVOLTA, (1980). Valores de pH menores que 4,0 provocam danos às membranas celulares, perdas de nutrientes anteriormente absorvidos. E valores superiores a 7,0 restringem a disponibilidade de micronutrientes e de fósforo. A Condutividade Elétrica (CE) determina a quantidade de nutrientes que há na solução. Os níveis ideais são variáveis com a espécie na faixa de 1,5 – 4,0 mS/cm. A solução nutritiva Castellane& Araújo apresenta CE de 2,6 a 2,8 mS/cm.

A alface é uma hortaliça exigente em água, onde a quantidade e qualidade da mesma influem na produtividade (Dantas 1997) e (Filgueira 2000). As plantas mais suculentas, com abundância de folhas, no caso a alface, requerem uma irrigação mais freqüente, pois perdem água rapidamente através da transpiração. Quanto maior for a área foliar, maior o consumo de água. Em ambientes protegidos sob condições de alta intensidade luminosa, geralmente acompanhada de temperaturas elevadas, especialmente durante os meses de verão, a transpiração das plantas tem elevado incremento, resultando em maior absorção de água.

A freqüência dos ciclos de irrigação depende da natureza das plantas, do estágio de desenvolvimento das mesmas, das condições meteorológicas particularmente radiação solar e temperatura do ar – e do tipo de meio de cultivo. Segundo Resh (1997), a freqüência dos ciclos tem que ser suficiente para impedir qualquer déficit de água nas plantas entre os ciclos, porém estes têm que ser

suficientemente espaçados para proporcionar adequada drenagem do meio, de forma que haja apropriada oxigenação das raízes das plantas.

O desenvolvimento de técnicas para tentar reduzir os custos com energia elétrica dos cultivos hidropônicos é de fundamental importância, pois isso diminuirá significativamente o custo de produção. Resh (1997) recomenda intervalos de irrigação alternados de 15 min com irrigação e 15 minutos sem irrigação durante o dia. No período noturno dependendo do clima, pode-se deixar o sistema desligado ou programar para funcionar 2-3 vezes em intervalos espaçados. Recomendação similar encontra-se em Bliska Jr. e Honório (1996), Faquin e Furlani (1999) e Faquin et al. (1999) os quais citam que de maneira geral, a circulação da solução nutritiva pelos canais das bancadas é intermitente, utilizando-se períodos de 15 a 20 minutos de circulação e de 10 a 15 minutos de descanso, desde o raiar do sol até o anoitecer. À noite, recomenda-se a circulação por 10 a 15 minutos a intervalos de 2 a 4 horas. Já foram realizados trabalhos a fim de verificar o efeito do regime de irrigações na produção de culturas em hidroponia, Pilau et al. (2002) propuseram o aumento do intervalo entre irrigações de 15 min para 30 min. Observaram que a produção de fitomassa seca e fresca da alface foi similar nos intervalos entre irrigações. Sendo que o intervalo 15 minutos de irrigação espaçados de 30 minutos sem irrigação promoveu uma redução de 28,3% no consumo de energia elétrica, proporcionando maior retorno ao produtor.

2.3 Técnica da modelagem utilizada na agricultura

A ação de modelar o funcionamento de uma cultura significa realizar uma síntese dos mecanismos de crescimento e desenvolvimento, representando-os por meio de funções matemáticas (MEDEIROS, 2000). Nesse sentido, Bonhomme e Ruget (1991) citam que a modelagem do funcionamento de uma cultura consiste em fazer uma síntese dos mecanismos de produção e de representá-los através de leis matemáticas. Dentro de um modelo estas leis matemáticas são agrupadas em módulos que tem por objetivos simular os processos biológicos que se seguem ao longo do ciclo de uma cultura. Entretanto, estes autores também mencionam que é ilusório querer imitar perfeitamente os sistemas biológicos, assim a modelagem é

orientada a questões precisas como previsão do rendimento, potenciais de produção de diferentes variedades, gestão da irrigação, entre outros.

No Brasil, o aparecimento dos primeiros modelos de simulação na agricultura data do início da década de 70. O uso de modelos matemáticos para expressar o crescimento e seus parâmetros derivados, como taxa de crescimento relativo e outros são atualmente utilizados para fornecer subsídio para melhor compreensão dos processos fisiológicos envolvidos na morfogênese da planta, (DANTAS, 1998).

A técnica de modelagem em agricultura pode ser útil para definir as prioridades de pesquisa, bem como para melhor entender as interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera. O modelo pode ser utilizado para estimar a importância e o efeito de certos parâmetros no intuito de definir os fatores a serem considerados (DOURADO NETO et al. 1998a). Os modelos matemáticos na agricultura são utilizados na previsão de resposta da planta submetidas a certas condições climáticas ou de manejo como o exemplificado pelos trabalhos com cana de açúcar (TERUEL, 1995) e feijão (PIMENTA et al., 1999).

Os modelos representam o melhor mecanismo de sintetizar conhecimento sobre diferentes componentes do sistema, arquivando dados de forma sintética, e transferindo resultados de pesquisa para os usuários (DOURADO NETO et al. 1998a). Lopes et al. (2004) relatam que modelos de crescimento e desenvolvimento são úteis na obtenção de informações básicas das interações planta-ambiente, maximizando o uso de recursos em ambiente protegido, bem como, para definir a melhor forma de manejo da cultura.

A nível mundial, a maioria dos modelos de simulação do rendimento de culturas refere-se principalmente as grandes culturas como soja, arroz, milho, etc. Dentre estes, destacam-se os modelos da “família” CERES, os quais são largamente estudados, testados e modificados, (MEDEIROS, 1997).

Na modelagem de olerícolas destaca-se principalmente a cultura do tomateiro, para o qual já foram propostos modelos como: TOMGRO de JONES et al. (1991), TOMSIM de KONING (1994) e TOMPOUSSE de ESPANET (1995). Para a cultura da alface citam-se os modelos de SWEENEY et al. (1981), TEI et al. (1996) e LYRA et al. (2003) e LOPES et al. (2002) utilizados para a simulação do crescimento e o modelo de GALLARDO et al. (1996) proposto principalmente para a determinação da evapotranspiração máxima da cultura. Na análise dos modelos

propostos para olerícolas constatou-se que maioria tem como objetivo a simulação da parte aérea, seja ela total ou parcial.

Modelos com a cultura de alface são encontrados em trabalhos como o proposto Lyra et al. (2003) avaliaram o ajuste dos modelos exponencial, logístico e Gompertz ao acúmulo de matéria seca após o transplântio, para três cultivares de alface cultivadas em sistema hidropônico utilizando-se três variáveis independentes, denominadas dias após transplântio (DAT), graus-dias (GD) e graus-dias efetivo (GDE). Lopes et al (2004) objetivaram estimar a variação temporal da fitomassa seca de alface. Em um estudo realizado por Caron et al. (2007), também buscou – se estimar a fitomassa seca de alface no decorrer do ano em dois ambientes de cultivo (externo e interno).

Devido à dificuldade de observação, quantificação e interpretação de sistemas radiculares, o estado da arte do conhecimento científico nesta área está aquém do desejável. Estas dificuldades tornam a análise e a interpretação da arquitetura de sistemas radiculares praticamente impossíveis de serem realizadas pela estatística tradicional, fazendo com que a modelagem matemática seja uma abordagem atrativa. A maioria dos trabalhos de pesquisa sobre a estrutura e funcionamento de sistemas radiculares de culturas comerciais tem sido realizada com um pequeno número de espécies, com ênfase nas monocotiledôneas, sendo muito poucos aqueles com dicotiledôneas herbáceas e espécies arbóreas (TERUEL et al. 2000).

De acordo com Dourado-Neto et al. (1998c), os primeiros modelos que contemplaram a variação espacial e temporal de sistemas radiculares foram apresentados na década de 70. A complexa arquitetura dos sistemas radiculares; a ampla faixa de variação no tamanho e no diâmetro, bem como no rápido crescimento e decomposição de raízes finas; as diferentes atividades fisiológicas das raízes de diferentes idades; os complexos processos microbiológicos que ocorrem na interface raiz-solo; as relações simbióticas na rizosfera; as variações químicas, físicas e biológicas que ocorrem no solo (local onde as raízes se desenvolvem) são os desafios da quantificação do crescimento radicular. Os primeiros modelos tornaram possível a simulação do número e comprimento do diferentes componentes do sistema radicular, porém não contemplavam a distribuição espacial dos componentes.

Especificamente, no Brasil, os trabalhos de modelagem na agricultura têm-se concentrado no grupo liderado por Dourado-Neto. Destacam-se os trabalhos de: Teruel et al. (2000) que buscou a modelagem do crescimento e a arquitetura de sistemas radiculares, com ênfase a soja, Oliveira et al. (2000) propuseram trabalho com o objetivo de determinar o fator de forma (F) da curva de crescimento do sistema radicular da cultura de milho sob irrigação em condições de campo e Manfron et al., (2003) que desenvolveram um método computacional prático para estimar a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura do milho em função dos graus-dia acumulados ao longo do período de cultivo.

A avaliação da distribuição radicular de uma cultura é fundamental para o desenvolvimento de práticas racionais de manejo agrícola que visam à otimização da produtividade (FANTE E REICHARDT, 1994).

A modelagem da cultura de alface considerando-se a parte aérea já foi estudada por alguns autores, mas, há carência de informações em relação ao sistema radicular. Apesar da sua importância na fixação e absorção, o compartimento raízes tem sido pouco explorado na modelagem quando comparado aos outros compartimentos da planta. A maioria dos modelos desenvolvidos, para grandes culturas e olerícolas, têm como objetivo a estimativa da parte aérea (folhas, frutos ou grãos), sendo exceção o caso da mandioca e da batata, visto que são as frações comercializáveis. Apesar de sua importância geralmente, observa-se que as raízes tomam um plano secundário na modelagem.

Portanto, verifica-se uma escassez de informações em relação ao crescimento, distribuição do sistema radicular e retenção da solução nutritiva em culturas conduzidas, principalmente em hidroponia. Essas informações poderiam contribuir a fim de subsidiar o manejo adequado da irrigação e assim proporcionar maior retorno ao produtor, através da diminuição dos gastos com energia elétrica e nutriente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local e genótipo

Os experimentos foram conduzidos no Núcleo de Pesquisa em Ecofisiologia (NUPEC), no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria – RS. As coordenadas geográficas do local são: latitude 29°43'S, longitude 53°43'W e altitude de 95m. O clima da região é do tipo Cfa, subtropical úmido com verões quentes, conforme a classificação de Koppen (MORENO 1961).

As temperaturas médias normais do ar variam de 12,9°C no mês de junho a 24,6°C no mês de janeiro (MORENO 1961). A disponibilidade de radiação solar, geralmente é superior a 16,7 MJ m⁻²dia⁻¹ nos meses de verão (BURIOL et al., 1991), e nos meses de junho e julho, em média é inferior a 8,4 MJ m⁻² dia⁻¹ (ESTEFANEL et al., 1998).

Os experimentos foram conduzidos em estufa plástica com piso de concreto, tipo arco pampeano coberta com filme plástico de baixa densidade polietileno aditivado, com as seguintes dimensões 10 X 25m e 3,0m pé direito. No interior da estufa a 1,5m da superfície do solo instalou - se um termohigrógrafo para o registro de temperatura (C°) e a umidade relativa do ar (%) e um piranômetro acoplado a um armazenador de dados de radiação solar global incidente (MJ. m². dia). Foram conduzidos seis experimentos, durante o período de setembro de 2006 a setembro de 2007 (Tabela 1).

TABELA 1 - Período experimental com as datas de semeadura, emergência, transplante para o berçário, transplante para local definitivo e data de colheita. Santa Maria, RS. 2008.

Experimento	Primavera	Verão		Outono	Inverno	
		1	2		1	2
Semeadura	11/09/06	08/01/07	12/02/07	28/03/07	28/05/07	02/07/07
Emergência	14/09/06	10/01/07	14/02/07	30/03/07	01/06/07	05/07/07
Transplante berçário	30/09/06	27/01/07	05/03/07	13/04/07	02/07/07	07/08/07
Transplante local def.	17/10/06	06/02/07	15/03/07	23/04/07	19/07/07	21/08/07
Data da colheita	02/11/06	22/02/07	02/04/07	17/05/07	17/08/07	20/09/07

O manejo da estufa (abertura e fechamento) durante o período experimental foi realizado manualmente de acordo com as condições meteorológicas do dia. Em dias ensolarados a abertura das cortinas laterais foi realizada às 8 horas para evitar que a temperatura do ar se elevasse demasiadamente o que poderia prejudicar as plantas. O fechamento foi realizado próximo às 16 horas no período de inverno e no verão depois das 18 horas. Nos dias chuvosos e sem insolação, durante todo o dia, a estufa permaneceu fechada.

A cultivar de alface utilizada foi Regina. Pertencente ao grupo das soltas lisas, sendo indicada para plantio durante todo o ano, principalmente no período de verão. As folhas são lisas, soltas, de coloração verde clara, com tamanho grande. Apresenta alta resistência ao pendoamento precoce e ao ataque do vírus do mosaico da alface. É uma das cultivares mais plantada no Brasil devido sua alta rusticidade de cultivo e resistência ao transporte pós - colheita (SCHMIDT et al., 2000).

3.2 Condução da cultura

A técnica de cultivo utilizada foi o Sistema NFT, em todas as etapas de condução. A solução nutritiva utilizada foi à proposta por Castellane & Araújo (1995) tendo concentração variável com a etapa de produção da cultura.

O controle do pH e da condutividade elétrica foi realizado nas fases de produção da muda, berçário e bancada de produção final. Para isso efetuou se a leitura de pH e condutividade elétrica três vezes por semana. O pH foi mantido próximo de $6,0 \pm 0,2$ conforme a recomendação da Fao (1990), utilizando hidróxido de sódio (NaOH 1M) ou ácido sulfúrico diluído a (H₂SO₄ 10%) para elevar ou reduzir respectivamente o pH. A leitura da condutividade elétrica da solução nutritiva objetivou verificar a necessidade de reposição de nutrientes caso o valor da condutividade elétrica da solução nutritiva atingisse 50% da concentração inicial. No período experimental não foram necessárias reposições. A reposição de água foi efetuada diariamente às 18 horas até completar o volume de 850 litros de solução nutritiva.

Durante todo o período experimental não ocorreram problemas fitossanitários (pragas e doenças).

3.2.1 Produção das mudas de alface

A produção de mudas foi realizada de forma individualizada em placas de espuma fenólica com dimensões de 2cm x 2cm x 2cm. A espuma fenólica é um substrato estéril, com boa capacidade de retenção de água, de fácil manuseio e que oferece ótima sustentação para as plântulas, reduzindo sensivelmente os danos durante a operação de transplante.

As espumas foram lavadas em água corrente antes de se proceder a semeadura, pois a eventual presença de resíduos químicos presentes poderia causar prejuízos no processo de germinação. Cada cubo de espuma fenólica foi perfurado em toda sua dimensão para facilitar a emergência das plântulas e a saída das raízes para o exterior.

Após a semeadura, as espumas foram colocadas em bancadas de germinação constituída por uma telha de fibra de vidro, com dimensões de 1 x 3m, com canais de 3 cm de profundidade e declinação de 2 a 3%. A solução nutritiva utilizada na produção das mudas foi à recomendada por Castellane & Araújo (1995), diluída para 25% de sua concentração. Nesta etapa as irrigações foram realizadas conforme as condições climáticas do dia, em dias nublados o número de irrigações realizadas foram de três a quatro e em dias ensolarados o número de irrigações foi de oito a dez.

Quando as mudas atingiram quatro a cinco folhas definitivas, foram transplantadas para o berçário, constituído de perfis hidropônicos com canais de 3 cm de profundidade, espaçados de 5 cm, com distância de 10 cm entre plantas nos canais. A solução nutritiva foi preparada e diluída para 50% de sua concentração em reservatório de fibra de vidro, contendo 400 litros de solução.

Na etapa de berçário, a solução permaneceu circulando durante 15 minutos a cada intervalo de 15 minutos das 8 às 19 horas, para que ocorresse a oxigenação das raízes. As plantas permaneceram no berçário até o momento em que atingissem maior crescimento de raízes para sustentação e adaptação ao sistema NFT, sendo então transplantadas para as bancada de produção final.

3.2.2 Produção final de alface

As bancadas de produção final foram constituídas de perfis hidropônicos com 6m de comprimento, 0,10m de largura e 0,05m de profundidade. O espaçamento entre plantas foi 0,25m no canal e de 0,20m entre as plantas de canais distintos com declividade de 2 a 4%.

Cada conjunto hidropônico na bancada de produção final foi constituído de uma caixa d'água (1000L), uma moto – bomba, um programador horário e dezesseis canais de cultivo por tratamento. A distribuição da solução nutritiva nos canais foi realizada através de um conjunto moto - bomba (de 0,5 HP), que foi acionado pelo programador horário, de acordo com as frequências das irrigações pré – determinadas. A solução nutritiva foi recolhida no final da bancada de produção final através de canos coletores, localizados nas extremidades das

bancadas, retornado ao reservatório para ser novamente bombeada aos canais (sistema NFT).

A solução nutritiva proposta por Castellane & Araújo (1995) com 100% da concentração recomendada, foi preparada em reservatórios com capacidade de 1000L. Foram preparados 850 litros de solução em cada caixa, estando situada logo abaixo de uma das duas bancadas que constituíam cada tratamento. A relação volume de solução nutritiva por planta foi de $2,3 \text{ l/planta}^{-1}$, valor esse, próximo ao recomendado por Santos et al. (2000).

3.3 Tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso com três repetições, sendo que cada tratamento constituiu-se de duas bancadas de produção final, utilizando - se oito canais de cultivo por bancada e 23 plantas por canal totalizando 368 plantas por tratamento. Os tratamentos foram aplicados durante o período diurno (06h às 19 horas). Durante a noite, a irrigação utilizada foi de 15 minutos de irrigação a cada duas horas, para todos os tratamentos.

Os experimentos foram realizados no período de setembro de 2006 a setembro de 2007. Os quatro tratamentos foram constituídos de quatro intervalos entre irrigações aplicados na etapa de produção final do cultivo hidropônico da alface, os quais foram:

Testemunha (T₁₅): - período de irrigação de 15 minutos a cada intervalo de 15 minutos.

Tratamento (T₃₀): - período de irrigação de 15 minutos a cada intervalo de 30 minutos.

Tratamento (T₄₅): - período de irrigação de 15 minutos a cada intervalo de 45 minutos.

Tratamento (T₆₀): - período de irrigação de 15 minutos a cada intervalo de 60 minutos.

Os dados obtidos foram submetidos à análise da variância, sendo as irrigações avaliadas por análise de regressão e as épocas comparadas pelo teste F a 5% de probabilidade. A análise estatística foi realizada para verificar se houve

diferença ou não entre tratamentos e épocas para então proceder a geração de modelos.

3.4 Avaliações fenométricas

A avaliação fenométrica foi realizada a cada cinco dias, iniciando no dia do transplante das mudas para a bancada de produção final até a data da colheita. Coletaram-se três plantas por bloco, para cada avaliação da análise de crescimento, a qual foi realizada conforme BENICASA (1988).

As plantas coletadas tiveram seus órgãos separados, determinando-se a fitomassa seca de caule, folhas, raízes e restos de todas as amostras. Para a determinação da fitomassa de folha foram consideradas as folhas com comprimento maior que cinco centímetros ou com mais de 50% de área foliar verde. Na fração de restos foram consideradas as folhas menores que cinco centímetros, ou folhas com mais de 50% da área foliar senescentes.

Posteriormente, cada fração da planta foi colocada em sacos de papel individualizado e identificado, levados a uma estufa de secagem de ventilação forçada de ar a 65°C, até peso constante para determinação da fitomassa seca. As pesagens foram realizadas em balança digital com precisão de 0,001gramas.

Para a determinação do comprimento e volume do sistema radicular, foi seccionado o caule, rente à espuma, logo abaixo da inserção das primeiras folhas. Posteriormente as raízes foram colocadas em recipientes, em forma de funil, para que a água escoasse do sistema radicular. A determinação do comprimento radicular foi realizada com o auxílio de uma régua. Em hidroponia, o sistema radicular da planta tem um espaço limitado para o seu crescimento, assim, para a determinação da extensão horizontal do sistema radicular foram consideradas as raízes de uma ponta a outra, para então verificar a extensão máxima radicular. O volume radicular foi determinado através da imersão das raízes em uma proveta graduada com volume conhecido. O volume radicular correspondeu ao aumento do volume do líquido no interior da proveta. Para as análises estatísticas foram consideradas as medidas de comprimento e volume da 1ª, 2ª e última análise de todos os experimentos.

Para a quantificação da retenção da solução nutritiva foram marcadas plantas dentro do mesmo canal. Desse canal não foram retiradas amostras de plantas, para a análise de crescimento. As medidas de retenção foram determinadas no mesmo dia das análises de crescimento, ou seja, a cada cinco dias. A determinação da retenção da solução nutritiva foi realizada através da retirada de uma planta por bloco, no momento em que foi desligado o sistema e posteriormente aos 10 e 15 minutos, em cada intervalo de irrigação. A planta retirada permanecia sobre um funil, para que a quantidade de água retida no sistema radicular escoasse. As medidas de retenção da solução nutritiva corresponderam ao volume de líquido coletado ao final de 20 minutos, feitas com o auxílio de uma proveta graduada.

A colheita foi realizada quando as plantas atingissem 200 gramas de parte aérea, ou passados trinta dias desde o transplante para o local definitivo. Este ponto de colheita correspondeu à formação de uma “cabeça” de alface adequada à comercialização.

3.5 Modelagem da alface

Os modelos de crescimento da planta de alface foram ajustados de acordo com a variável independente, podendo ser dias após o transplante (DAT), (GD) e graus - dia efetivo (GDE).

A variável DAT foi determinada pelos dias decorridos desde o transplante ao local definitivo até o momento da colheita.

Para determinação dos graus - dia (GD) e graus - dia efetivo (GDE) foram utilizadas as seguintes expressões:

$$GD = T_m - T_b \quad (1)$$

$$GDE^{-1} = GD^{-1} + fRFA^{-1} \quad (2)$$

Onde:

T_m é a temperatura do ar média diária (°C);

T_b é a temperatura base da cultura (°C);

RFA é a integral da radiação fotossinteticamente ativa ($\text{MJ. m}^{-2} \text{ dia}$) sendo igual a 0,45 da radiação solar global; e

f é a constante que define a importância relativa da RFA e da temperatura do ar ($\text{GD m}^2 \text{ MJ}^{-1}$).

As variáveis T_b e f possuem valores de 10°C e $0,09 \text{ GD m}^2 \text{ MJ}^{-1}$, respectivamente, segundo Scaife, (1972); Tei, (1996) e Lyra, (2003) para o cálculo do GD e GDE para a cultura da alface.

A determinação da temperatura média diária do ar em C° foi calculada pela seguinte expressão:

$$T_m = (T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}) / 2 \quad (3)$$

Onde:

T_m : temperatura média diária do ar (C°);

$T_{\text{máx}}$: temperatura máxima diária do ar (C°);

$T_{\text{mín}}$: temperatura mínima diária do ar (C°).

Os modelos matemáticos para estimar a fitomassa seca aérea (FSA, em $\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), comprimento e volume radicular da planta foram ajustados através do programa computacional Table Curve 2D v.2.03 (Jandel Scientific). Para a geração dos modelos para estimar a fitomassa seca aérea foram utilizados os dados do experimento da primavera/verão 1 e outono/inverno 1. A reunião de dados de primavera e verão foi possível, pois, não houve diferença estatística entre os tratamentos e épocas. O mesmo ocorreu nos experimentos de outono e inverno, os quais formam outro conjunto de dados. Para estimar comprimento e volume radicular os dados foram agrupados pois não houve diferença entre as épocas e tratamentos.

A pré - seleção dos modelos foi realizada com base no valor do coeficiente de determinação (R^2) obtidos, o qual deveria ser superior $R^2 \geq 0,70$ que representa um alto valor de coeficiente de correlação (r), próximo a 0,84, mostrando uma baixa dispersão dos dados. Além da forma da curva, que deveria ser crescente, seguindo a forma sigmóide, ou seja, no início do crescimento, a fitomassa seca das plantas individuais aumenta em uma proporção quase constante por dia, evoluindo

para um crescimento exponencial, (BENICASA, 1988). Depois do fechamento do dossel a taxa de crescimento continua constante e a fitomassa da planta aumenta linearmente até certo ponto de inflexão a partir do qual a taxa de crescimento começa a diminuir. Uma vez que, o período de cultivo da alface foi rápido não foi possível verificar esse ponto onde inicia o decréscimo do crescimento. Assim, foram selecionados os modelos que apresentavam maior R^2 nas épocas (Primavera – Verão e Outono - Inverno) para geração dos modelos. Para a fase de validação destes modelos foram utilizados os dados de verão 2 e inverno 2. A fase de validação dos modelos para estimar comprimento e volume radicular foi utilizado a época da primavera.

3.6 Parâmetros estatísticos e avaliação dos modelos

Para efetuar a avaliação do desempenho da capacidade de estimativa dos modelos foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos o coeficiente de correlação (r), o índice de concordância (d), conforme Willmott (1985), e de confiança, “ c ” CAMARGO & SENTELHAS, (1997).

O coeficiente de correlação ou índice de precisão, representado pela letra r , foi utilizado como indicativo do grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média através da equação:

$$r = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (O_t - \bar{O})(E_t - \bar{E}) \div (\sigma_o \sigma_E) \quad (4)$$

Em que:

$$\left(\sigma_o = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (O_t - \bar{O})^2 \right)^{0,5} \quad (5)$$

$$\sigma_E = \left(\frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (E_t - \bar{E})^2 \right)^{0,5} \quad (6)$$

Sendo σ_o e σ_E os desvios padrões dos valores observados e estimados, respectivamente.

O coeficiente de exatidão ou de concordância (d) também denominado de índice de Willmott (1985) foi utilizado para quantificar matematicamente o afastamento dos valores de fitomassa estimados em relação aos observados. Os

valores do coeficiente de exatidão variam de zero, para nenhuma concordância, até um para concordância perfeita entre os valores observados e estimados. O coeficiente de concordância é obtido através da equação:

$$d = \left[\frac{\sum_{t=1}^T (E_t - O_t)^2}{\sum_{t=1}^T (|E_t - \bar{O}| + |E_t - O_t| |O_t - \bar{O}|)^2} \right] \quad (7)$$

O coeficiente de confiança c proposto por Camargo & Sentelhas (1997), reúne os valores das estatísticas do coeficiente de correlação (r) e coeficiente de concordância (d), através da equação:

$$c = rd \quad (8)$$

Para a interpretação dos valores do coeficiente de confiança foram utilizados os critérios propostos por Camargo & Sentelhas (1997), descritos na Tabela 2.

TABELA 2 – Intervalos de valores do Índice de confiança “ c ” utilizados para a interpretação do desempenho dos modelos de estimativa da fitomassa seca total da alface, em cultivo hidropônico em Santa Maria. RS. 2008.

Valor de “ c ”	Desempenho
> 0,85	Ótimo (O)
0,76 a 0,85	Muito bom (MB)
0,66 a 0,75	Bom (B)
0,61 a 0,65	Mediano (ME)
0,51 a 0,60	Sofrível (SO)
0,41 a 0,50	Mau (M)
< 0,40	Péssimo (PE)

Fonte: CAMARGO & SENTELHAS (1997). Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.5, n.3, p.89-97.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variáveis meteorológicas

Durante o período experimental, os valores de temperaturas do ar no período da primavera, verão 1 e verão 2 foram superiores a média ótima, ou seja, acima 30°C (Figura 1a, 1b e 1c). No inverno 1 as temperaturas mínimas registradas foram inferiores a temperatura base (10°C) da cultura (Figura 1e) em grande parte do período experimental.

No período de outono/inverno 2, as temperaturas máximas ideais ao cultivo de alface, ocorreram com maior frequência que no período de primavera/verão, o que sugere em termos de temperatura do ar que no período de outono/inverno ocorreram as melhores condições para o crescimento e desenvolvimento da planta. Resultados semelhantes foram encontrados por Lopes et al., 2004 em pesquisa realizada com alface hidropônica cultivar Vera.

O aumento da temperatura do ar acelera o desenvolvimento da planta, reduzindo o seu ciclo. Isso explica a diferença na duração do ciclo das culturas, neste caso específico a cultura de alface, em dias para cultivos ao longo do ano. Sendo assim o cultivo de primavera e verão tiveram um período desde o transplante até a colheita relativamente curto (16 dias) em relação aos experimentos de inverno, onde foram necessários 30 dias desde o transplante até a colheita (Tabela 3).

A ocorrência de elevadas temperaturas associados há dias mais longos influenciam diretamente na duração do ciclo e podem estimular, em alguns casos, o florescimento precoce. Isso pode ser observado no experimento de verão 2 onde as plantas sofreram estresse devido a ocorrência de altas temperaturas o que provocou uma tendência das mesmas ao pendoamento precoce, sendo então colhidas antecipadamente.

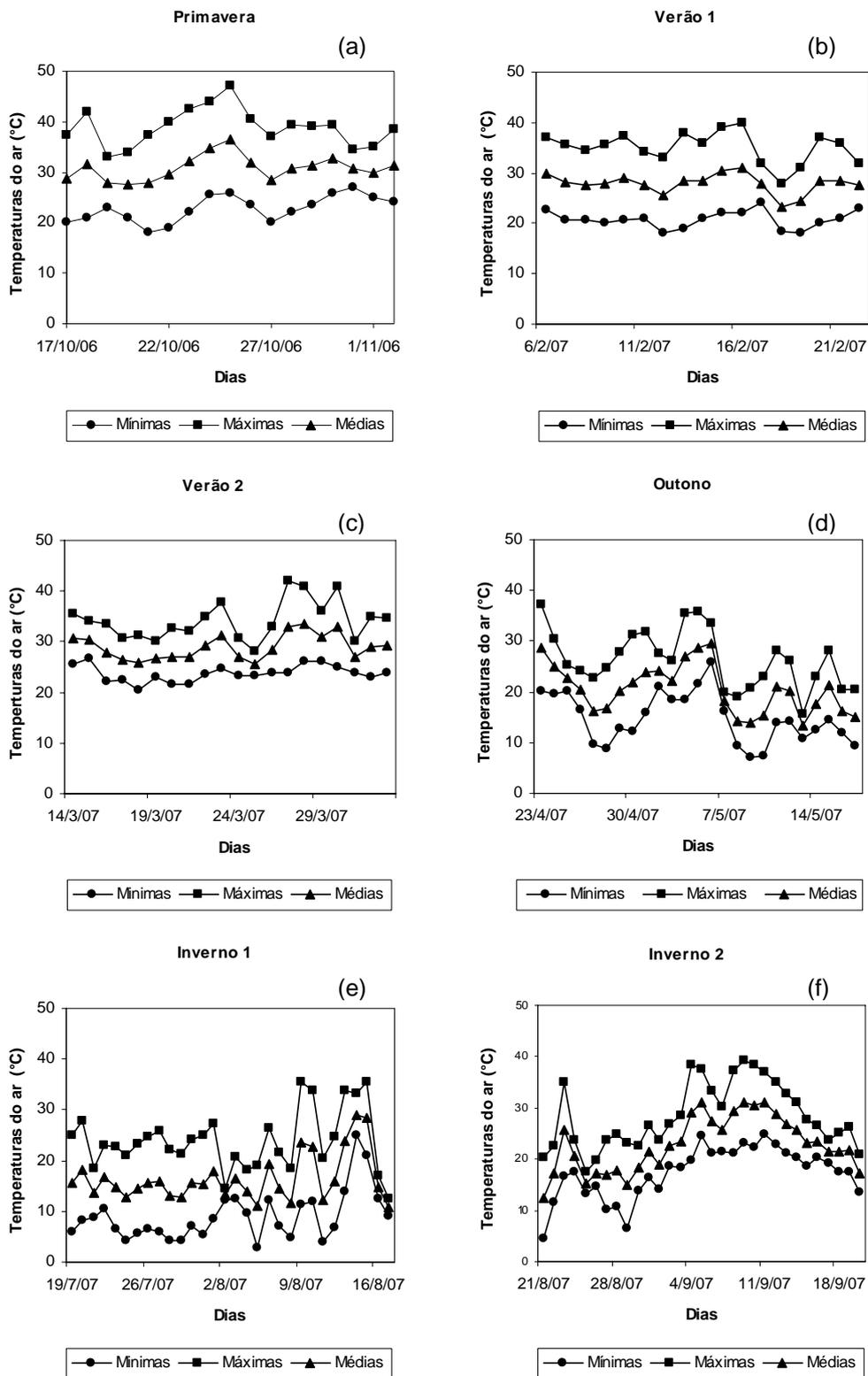


FIGURA 1 - Variação diária das temperaturas máximas, mínimas e médias do ar da cultivar Regina cultivada sob sistema hidropônico. Experimento de primavera (a); Experimento de verão 1 (b); Experimento de verão 2 (c); Experimento de outono (d); Experimento de inverno 1 (e); e Experimento de inverno 2 (f). Santa Maria – RS. 2008.

Em relação à disponibilidade de radiação solar global observou-se que no experimento de primavera – verão (Figura 2a) houve maior incidência de radiação solar global do que no experimento de outono – inverno (Figura 2b), período no qual ocorreram valores de radiação solar global incidente inferiores ao limite trófico ($8,4 \text{ MJ. M}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), citado por Fao (1990 apud LOPES 2002). A menor intensidade de radiação solar no período de outono inverno deve-se principalmente em função de dias nublados e ou chuvosos.

O valor médio observado de radiação solar incidente na primavera foi de $11,33 \text{ MJ. M}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. No verão 1 atingiu o valor de $14,57 \text{ MJ. M}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, enquanto que no verão 2 esse valor foi menor de $9,50 \text{ MJ. M}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. No período experimental do outono, inverno 1e inverno 2 os valores de radiação solar incidente foram de $6,55 \text{ MJ. M}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, $5,1 \text{ MJ. M}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, $7,4 \text{ MJ. M}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ respectivamente. Esses valores estão de acordo com os resultados encontrados por Lopes, (2002) que observou essa mesma tendência de valores maiores no período de primavera - verão e valores de radiação solar incidente insuficientes no período mais frio do ano, ou seja, outono – inverno.

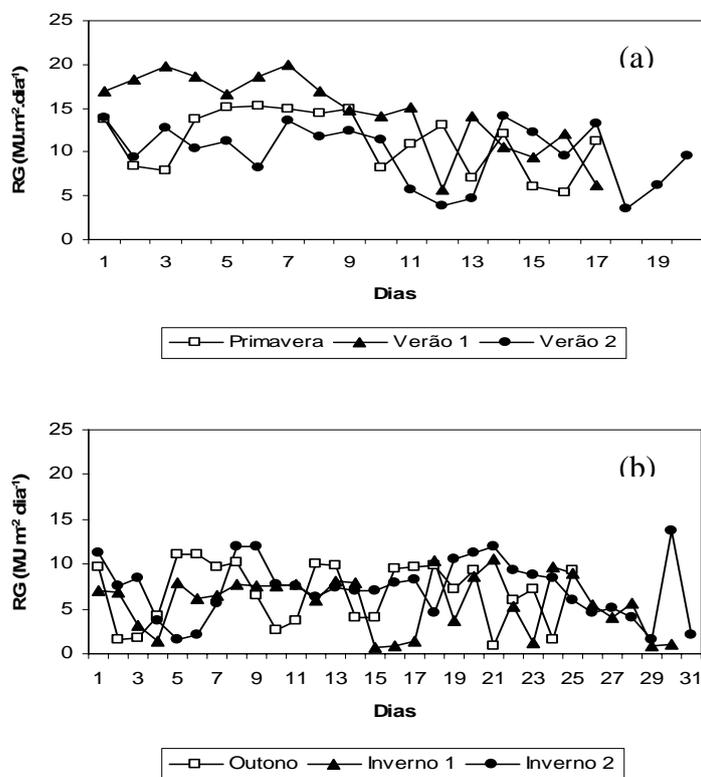


FIGURA 2 - Variação diária da radiação solar incidente (RG) em $\text{MJ. M}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ no interior da estufa durante o período experimental de Primavera - verão (a) e outono - inverno (b). Santa Maria – RS. 2008.

As condições de crescimento das plantas de alface em hidroponia são mais adequadas do que a campo, em relação à disponibilidade de água e nutrientes, menor incidência de pragas e doenças sendo que a variação na produção pode ser atribuída à genética da cultivar estudada e a variação das condições meteorológicas (temperatura do ar e radiação solar global) ao longo das estações do ano. A não ocorrência de condições meteorológicas adversas como geadas, chuvas intensas, granizo e ventos fortes contribuem para o ganho em produtividade e qualidade.

Observou-se que as condições meteorológicas ocorridas durante todo o período experimental não foram limitantes ao crescimento da cultura. Isso pode ser observado nos dados de fitomassa seca encontrados, os quais são similares aos de outras bibliografias.

Trabalho realizado por Luz et al. (2006) com o objetivo de pesquisar a produtividade da alface cultivar Regina sob efeito do silício no outono cita valores médios de fitomassa seca da parte aérea e da raiz de 174 e 26,6 g/m² respectivamente. Esses dados são semelhantes aos valores médios encontrados neste trabalho que foram de 162 e 22 g/m² para o outono. Já o trabalho realizado por Feltrim et al. (2005), utilizando cultivares de alface, entre estas a cultivar Regina, no período de inverno, apresentou valores de fitomassa seca aérea de 196,8 g/m², sendo esse valor maior que o encontrado nesse trabalho para a mesma época, cabe ressaltar que o experimento realizado pelo autor foi em uma região onde as temperaturas ocorridas são mais amenas que as registradas para o estado do Rio Grande do Sul.

No período de primavera verão a fitomassa seca acumulada foi maior tanto para parte aérea como para raízes e fitomassa seca total (Tabela 3). Quando comparadas às médias de fitomassa entre as épocas observa-se que a fitomassa seca aérea variou pouco, porém, a fitomassa seca radicular praticamente dobrou. Isso permite inferir que a fitomassa seca radicular sofre maior influência das condições climáticas ocorridas no período do que as folhas (parte aérea). Acredita-se que o compartimento parte aérea deve possuir um meio de compensação que no sistema radicular não está presente. As plantas no período de inverno tiveram média um pouco menor devido à condição imposta de término do experimento, ou seja, aos 30 dias após o transplante o que pode ser visualizado na tabela 3.

TABELA 3 - Valores de fitomassa seca aérea (g m^{-2}), fitomassa seca radicular (g m^{-2}), fitomassa seca total (g m^{-2}) e duração do período experimental do cultivo de alface em sistema hidropônico em seis épocas primavera, verão 1, verão 2, outono, inverno 1 e inverno 2. UFSM, Santa Maria – RS, 2008.

Épocas	Fitomassa seca aérea g/m^2	Fitomassa seca radicular g/m^2	Fitomassa seca total g/m^2	Período Experimental (dias)
Primavera	189	43	232	52
Verão 1	196	48	244	44
Verão 2	175	28	203	49
Outono	162	22	182	50
Inverno 1	144	26	170	81
Inverno 2	169	28	189	80

4.2 Modelos propostos para a estimativa da fitomassa seca da parte aérea

A análise da fitomassa seca da parte aérea evidenciou diferenças significativas ($P < 0,05$) entre as épocas de primavera – verão com as épocas de outono - inverno. Logo, foi proposto um conjunto de equações para a estimativa da fitomassa seca da parte aérea para as épocas primavera – verão e outro conjunto para outono – inverno.

A partir do critério utilizado para a escolha dos modelos de estimativa, ou seja, valor de R^2 superior a 0,70 observou-se que o número de equações ajustadas oscilou de acordo com a variável de entrada (Tabela 4 a 9). Foram obtidas 16 equações quando foram utilizadas a variável DAT (Tabela 4), 15 equações quando foi utilizada a variável GD (Tabela 5) e 16 equações quando foi utilizada a variável GDE (Tabela 6). Observou-se que os valores máximos de R^2 foram iguais a 0,9 o que pressupõe um ajuste adequado da finalidade preditiva da fitomassa seca aérea dos modelos para o período de primavera verão.

Já na época de outono inverno o número de equações ajustadas foram de 13 para a variável DAT (Tabela 7), 9 equações para a variável GD (Tabela 8) e 13 equações para a variável GDE (Tabela 9). Os valores máximos de R^2 tiveram valores de 0,82 para a época de outono - inverno respectivamente.

Contata-se nas tabelas 4 a 9, que as equações propostas variam desde a linear até equações polinomiais de segunda ordem. Entretanto, todas as

equações obedecem ao pressuposto do aumento da fitomassa com o decorrer do período experimental.

TABELA 4 - Modelos de regressão para estimativa da fitomassa seca aérea da alface cultivada em hidroponia no período de primavera verão a partir de dias após o transplântio (DAT). Santa Maria, RS. 2008.

N°	Modelos	R ²
1	$y = -127,9 + 324,74 / (1 + ((x - 17,3) / 15,92)^2)$	0,89
2	$y = -63,55 + 4.262,74 \cdot n / (1+n)^2$	0,89
3	$y = 20,58 + 7,18x + 1,36x^2 - 0,28x^{2,5}$	0,89
4	$y = 20,58 + 2,15x^2 - 0,41x^{2,5} + 10,4x^{0,5}$	0,89
5	$y = 20,6 + 0,64 \cdot x^{2,5} - 0,134x^3 + 15,65x^{0,5}$	0,89
6	$y = -33,88 + 270,6 / (1 + \exp(-(x-7,02)/5,1))$	0,89
7	$y = 18,1 + 16,43x^{0,5} \ln x$	0,89
8	$y = 20,21 + 11,47x$	0,89
9	$y^{0,5} = 3,43 + 2,66x^{0,5}$	0,88
10	$y^2 = 6,88 + 559x^{1,5}$	0,87
11	$y = 40,49 + 3,84x \ln x$	0,87
12	$y = 42,3 + 2,67x^{1,5}$	0,86
13	$y = 49 \exp(-x/-10,8)$	0,84
14	$y = (36,8 + 4,46x) / (1 - 0,03x)$	0,83
15	$y^2 = (113,95 + 124,23x^2) / (1 - 0,001x^2)$	0,83
16	$y = 56,50 + 0,63x^2$	0,81

TABELA 5 - Modelos de regressão para estimativa da fitomassa seca parte aérea da alface cultivada em hidroponia no período de primavera verão a partir de graus - dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.

N°	Modelos	R ²
1	$y = 19,6 + 1,23x - 0,000058x^{2,5} - 6,5x^{0,5}$	0,89
2	$y = 19,3 - 0,34x + 0,134x^{1,5} - 0,004x^2$	0,89
3	$y = 19,2 - 0,02x + 0,06x^{1,5} - 0,0001x^{2,5}$	0,89
4	$y = 18,9 + 0,361x + 0,002x^2 - 0,000005x^3$	0,89
5	$y = 21,11 + 0,054x^{1,5} - 0,0000043x^3$	0,89
6	$y = -60,5 + 4.254,2n / (1+n)^2$	0,89
7	$y = -128,7 + 322,6 / (1 + ((x-342,1) / 313,8)^2)$	0,89
8	$y = 206 / (1 + \exp(-(x-145,4) / 70,8))$	0,89
9	$y = 12,3 + 0,66x - 0,000001x^3$	0,89

10	$y = 12,7 + 0,71x - 0,00045x^2$	0,88
11	$y = 21,75 + 0,54x$	0,88
12	$y = 10,47 + 3,28x/\ln x$	0,87
13	$y^{0.5} = 3,6 + 0,58x^{0.5}$	0,87
14	$y^{0.5} = 6,83 + 0,02x$	0,84
15	$y = 52,92 \exp(-x/-241,2)$	0,80

TABELA 6 - Modelos de regressão para estimativa da fitomassa seca aérea da alface cultivada em hidroponia no período de primavera verão a partir de graus - dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.

N°	Modelos	R ²
1	$y = 19,77 + 0,33x + 0,002x^2 - 0,0000051x^3$	0,89
2	$y = -118 + 312,1 / (1 + ((x - 350,8) / 312,25)^2)$	0,89
3	$y = 20,10 + 0,0034x^2 - 0,0000066x^3 + 2,32x^{0.5}$	0,89
4	$y = -19,02 + 234,5 / (1 + \exp(-(x - 141,88) / 86,88))$	0,89
5	$y = 207,85 / (1 + \exp(-(x - 151,72) / 74,14))$	0,89
6	$y^{0.5} = 4,61 + 0,046x - 0,000056x^2$	0,89
7	$y = 13,12 + 0,64x - 0,00000087x^3$	0,89
8	$y = 29,53 + 0,0044x^2 - 0,0000089cx^3$	0,89
9	$y = 13,63 + 0,67x - 0,00037x^2$	0,88
10	$y = 21,45 + 0,53x$	0,88
11	$y^{0.5} = 0,0018 + 0,114x - 0,00035x^2 + 0,00000041x^3$	0,88
12	$y^2 = 50,62 + 20,54x + 0,277x^2$	0,87
13	$y = 14,03 + 0,00065x^2 + 6,14x^{0.5}$	0,87
14	$y^2 = 96,85 + 0,35x^2$	0,85
15	$y^{0.5} = 6,75 + 0,022x$	0,84
16	$y = -6,40 + 10,17x^{0.5}$	0,81

TABELA 7 - Modelos de regressão para estimativa da fitomassa seca aérea da alface cultivada em hidroponia no período de outono inverno a partir de dia após o transplântio (DAT). Santa Maria, RS. 2008.

Nº	Modelos	R ²
1	$y = -28,37 + 174,21 / (1 + ((x - 25,62) / 12,51)^2)$	0,83
2	$y = 10,75 - 2,91x + 0,75x^2 - 0,017x^3$	0,82
3	$y^{0.5} = 0,289 + 0,97x - 0,057x^2 + 0,0028x^3 - 0,000054x^4$	0,82
4	$y = 8,79 + 0,60x^2 - 0,014x^3 - 4,34x^{0.5}$	0,82
5	$y^{0.5} = 3,30 + 0,031x + 0,038x^2 - 0,0010x^3$	0,82
6	$y = 6,88 + 143,45 / (1 + \exp(-(x - 15,25) / 4))$	0,82
7	$y = 149,27 / (1 + ((x - 25,22) / 9,37)^2)$	0,82
8	$y = 1,94 + 0,54x^2 - 0,012x^3$	0,82
9	$y = 153,29 / (1 + \exp(-(x - 14,9) / 4,52))$	0,82
10	$y^{0.5} = -0,041 + 0,844x + 0,0146x^2$	0,81
11	$y = -13,08 + 6,43x - 0,00085x^3$	0,79
12	$y = -10 + 6,06x - 0,010x^2$	0,79
13	$y = -8,36 + 5,74x$	0,79

TABELA 8 - Modelos de regressão para estimativa da fitomassa seca aérea da alface cultivada em hidroponia no período de outono inverno a partir de graus dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.

Nº	Modelos	R ²
1	$y = 4,99 + 1,13x - 0,001x^2 - 4,28x^{0.5}$	0,81
2	$y = 4,17 + 0,88x - 0,0000019x^3 - 2,61x^{0.5}$	0,81
3	$y = -119,24 + 351,58 / (1 + \exp(-(x - 88,59) / 130,68))$	0,81
4	$y = -1,22 + 0,63x + 0,0003x^2 + 0,0000016x^3$	0,81
5	$y = -2,05 + 0,673x + 0,00000078x^3$	0,81
6	$y = -2,55 + 0,700x - 0,00029x^2$	0,80
7	$y = 1,3 + 0,626x - 0,086x^{0.5}$	0,80
8	$y = 0,96 + 0,62x$	0,80
9	$y = -739,36 + 945,4 / (1 + ((x - 535,4) / 942,35)^2)$	0,80

TABELA 9 - Modelos de regressão para estimativa da fitomassa seca aérea da alface cultivada em hidroponia no período de outono inverno a partir de grau dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.

N°	Modelos	R ²
1	$y = 5,15 + 1,12x - 0,00102x^2 - 4,51x^{0,5}$	0,82
2	$y = 4,40 + 0,878x - 0,0000017x^3 - 2,92x^{0,5}$	0,81
3	$y = -94,20 + -316,80 / (1 + \exp(-(x-103,99)/119,65))$	0,81
4	$y = -0,80 + 0,575x + 0,00070x^2 + 0,0000023x^3$	0,81
5	$y = -498,5 + 716,95 / (1 + ((x-483,95)/726,36)^2)$	0,81
6	$y = -2,6 + 0,65x - 0,00000061x^3$	0,81
7	$y = -2,82 + 0,67x - 0,00022x^2$	0,81
8	$y = -0,015 + 0,61x$	0,81
9	$y = 0,75 + 0,0037x^2 - 0,0000084x^3 + 2,95x^{0,5}$	0,81
10	$y^{0,5} = 5,21 + 0,029x$	0,77
11	$y = 31,54 + 0,0020x^2$	0,75
12	$y = -38,02 + 11,10x^{0,5}$	0,74
13	$y^2 = 15,62 + 0,0014x^3$	0,72

4.2.1 Avaliação dos modelos para a estimativa da fitomassa seca parte aérea

O desempenho dos modelos foi avaliado para as três variáveis independentes (DAT, GD e GDE). Os resultados evidenciaram que as melhores estimativas foram obtidas, quando utilizou – se a variável GDE, com os modelos 12; 10 e 13 (Tabela 12) para o período de primavera verão. Esses modelos correspondem a equações desde lineares até polinomiais (Tabela 6). De acordo com Silva et al. (1999) a utilização do tempo fotérmico Graus - dia (GD) ou Graus - dia Efetivo (GDE) é um fator de grande utilidade uma vez que independe da época e do local de plantio, sendo mais eficaz do que a utilização de dias após o transplante (DAT) na simulação de acúmulo de massa seca.

No período de primavera verão os valores de R² obtidos nos testes foram superiores aos valores de R² dos modelos de origem (geração). Os valores de coeficiente de correlação atingiram valores superiores a 0,95 para as três variáveis testadas (DAT, GD e GDE). Para o índice de concordância os valores também foram elevados sendo maiores para GDE.

Já no período de outono inverno as melhores estimativas foram obtidas, quando utilizou – se a variável DAT, com os modelos 13; 12; 6; 9; 11; 4 e 8 (Tabela 13). Esses modelos correspondem a equações lineares, exponenciais e polinomiais (Tabela 7). Ressalta-se neste caso, que a importância da temperatura do ar e da radiação solar é variável no decorrer do ciclo da cultura. Na fase inicial a temperatura do ar tem maior importância que a radiação solar incidente no crescimento e desenvolvimento das plantas. Após as plantas estarem mais desenvolvidas e cobrirem o espaço entre elas a luz torna-se o fator mais importante.

Os valores de R^2 tiveram a mesma tendência do ocorrido na primavera, ou seja, R^2 obtido nos testes foi superior ao valor de R^2 dos modelos de origem. Os valores de coeficiente de correlação oscilaram entre 0,95 e 0,80 enquanto, que os valores do índice de concordância tiveram variação desde 0,96 a 0,55.

A temperatura do ar é uma das variáveis independentes mais utilizadas nos modelos que tentam simular o acúmulo de massa seca em diversas culturas inclusive da alface. Isso provavelmente se deve ao fato da facilidade de obtenção dos dados e a sua relação com a radiação solar global incidente, conseqüentemente radiação solar fotossinteticamente ativa (PAR) necessário para o adequado crescimento da planta. Segundo Scaife (1973) existe uma relação direta entre a variação na fitomassa seca total da planta da alface e a temperatura do ar.

Resultados deste trabalho demonstram que não foram obtidas diferenças entre os modelos independente das variáveis testadas (DAT, GD e GDE). Sendo este resultado similar ao trabalho realizado por Lyra et al. (2003) onde também não houve diferença quando utilizada uma ou outra variável independente. Isso provavelmente tenha ocorrido devido, ao período de cultivo ter sido curto e as condições meteorológicas (temperatura e radiação solar global) não terem sido fatores limitantes ao crescimento da planta, simulando de forma adequada a produção de fitomassa da cultura de alface.

Além disso, os valores de R^2 quando utilizado modelos mais complexos comparado a modelos simples como, por exemplo, os lineares praticamente apresentaram mesmo comportamento, isso permite inferir que a utilização de modelos simples possui eficiência semelhante na simulação do crescimento, menor complexidade e conseqüentemente maior compreensão quando comparado a modelos complexos com maior número de coeficientes.

De maneira geral, independente da época, observou-se que a equação linear apresenta um desempenho muito bom na estimativa da fitomassa seca da parte aérea. Resultado similar foi obtido por Caron et al. (2007) utilizando a cultivar Regina, o qual verificou que independentemente da época do ano, as equações de regressão simples, apresentaram melhor desempenho na estimativa da fitomassa seca aérea. Sendo que as equações de regressão múltipla, apesar de englobarem mais variáveis, apresentaram um pequeno acréscimo no valor do R^2 .

A variável que melhor estimou a fitomassa para a época primavera verão foi GDE. Lopes et al. (2004) também obtiveram um melhor ajuste quando se utilizou a variável graus - dia efetivo caracterizando a maior importância da temperatura do ar na fase vegetativa e da radiação solar na fase reprodutiva. Para a época de outono inverno a variável que melhor estimou a fitomassa foi DAT.

TABELA 10 – Desempenho dos modelos para a estimativa da fitomassa seca da parte aérea da planta de alface conduzida em hidroponia no período de primavera verão a partir de dias após o transplante (DAT). Santa Maria, RS. 2008.

Modelo*	R^2	r	d	c	Desempenho
14	0,95	0,97	0,87	0,84	MB
9	0,94	0,96	0,86	0,83	MB
8	0,89	0,94	0,86	0,81	MB
13	0,95	0,97	0,84	0,81	MB
11	0,95	0,97	0,81	0,79	MB
3	0,90	0,94	0,83	0,78	MB
4	0,89	0,94	0,83	0,78	MB
5	0,87	0,93	0,84	0,78	MB
6	0,90	0,94	0,83	0,78	MB
1	0,86	0,92	0,83	0,77	MB
2	0,87	0,93	0,83	0,77	MB
15	0,95	0,97	0,79	0,77	MB
12	0,90	0,94	0,81	0,76	MB
16	0,78	0,88	0,81	0,71	B
7	0,93	0,84	0,83	0,70	B
10	0,93	0,87	0,72	0,63	B

R^2 - coeficiente de determinação; r - coeficiente de correlação; d - índice de concordância; c - índice de confiança e desempenho do modelo.

* Conforme tabela 4.

TABELA 11 - Desempenho dos modelos para a estimativa da fitomassa seca da parte aérea da planta de alface conduzida em hidroponia no período de primavera verão a partir de graus dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.

Modelo*	R ²	r	d	c	Desempenho
9	1,00	1,16	0,74	0,86	O
3	0,98	1,15	0,74	0,85	MB
4	0,99	1,15	0,74	0,85	MB
5	0,99	1,15	0,73	0,85	MB
2	0,98	1,15	0,73	0,84	MB
6	0,97	1,15	0,73	0,84	MB
8	1,00	1,16	0,72	0,84	MB
15	0,97	1,15	0,73	0,84	MB
1	0,97	1,15	0,72	0,83	MB
10	1,00	1,15	0,71	0,82	MB
7	0,95	1,14	0,71	0,81	MB
12	0,95	1,13	0,71	0,81	MB
11	0,99	1,11	0,68	0,75	B
14	0,97	1,15	0,62	0,72	B
13	0,94	1,13	0,55	0,62	ME

R² - coeficiente de determinação; r - coeficiente de correlação; d - índice de concordância; c - índice de confiança e desempenho do modelo.

* Conforme tabela 5.

TABELA 12 - Desempenho dos modelos para a estimativa da fitomassa seca da parte aérea da planta de alface conduzida em hidroponia no período de primavera verão a partir de graus dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.

Modelo*	R ²	r	d	c	Desempenho
12	0,93	0,96	0,92	0,89	O
10	0,94	0,96	0,90	0,87	O
13	0,93	0,96	0,89	0,86	O
1	0,86	0,92	0,92	0,85	MB
4	0,91	0,94	0,90	0,85	MB
6	0,91	0,94	0,90	0,85	MB
7	0,91	0,95	0,89	0,85	MB
9	0,92	0,95	0,89	0,85	MB
15	0,96	0,97	0,88	0,85	MB
2	0,90	0,94	0,89	0,84	MB
3	0,91	0,94	0,89	0,84	MB
5	0,90	0,94	0,89	0,84	MB
8	0,89	0,94	0,90	0,84	MB
11	0,89	0,94	0,88	0,82	MB
16	0,80	0,89	0,86	0,77	B

R² - coeficiente de determinação; r - coeficiente de correlação; d - índice de concordância; c - índice de confiança e desempenho do modelo.

* Conforme tabela 6.

TABELA 13 - Desempenho dos modelos para a estimativa da fitomassa seca da parte aérea da planta de alface conduzida em hidroponia no período de outono inverno a partir de dias após o transplântio (DAT). Santa Maria, RS. 2008.

Modelo*	R ²	r	d	c	Desempenho
13	0,91	0,95	0,95	0,91	O
12	0,90	0,95	0,95	0,90	O
6	0,89	0,94	0,95	0,89	O
9	0,88	0,94	0,95	0,89	O
11	0,88	0,94	0,94	0,89	O
4	0,87	0,93	0,94	0,88	O
8	0,89	0,94	0,94	0,88	O
10	0,84	0,91	0,92	0,84	MB
1	0,80	0,90	0,92	0,83	MB
5	0,79	0,89	0,91	0,81	MB
7	0,77	0,88	0,90	0,79	MB
2	0,73	0,87	0,87	0,76	MB
3	0,65	0,81	0,87	0,70	B

R² - coeficiente de determinação; r - coeficiente de correlação; d - índice de concordância; c - índice de confiança e desempenho do modelo.

* Conforme tabela 7.

TABELA 14 - Desempenho dos modelos para a estimativa da fitomassa seca da parte aérea da planta de alface conduzida em hidroponia no período de outono inverno a partir de graus dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.

Modelo*	R ²	r	d	c	Desempenho
9	0,93	0,97	0,96	0,93	O
3	0,91	0,96	0,88	0,84	MB
1	0,92	0,96	0,87	0,83	MB
2	0,88	0,94	0,88	0,83	MB
6	0,94	0,97	0,86	0,83	MB
7	0,96	0,98	0,84	0,82	MB
8	0,96	0,98	0,84	0,82	MB
5	0,97	0,98	0,74	0,73	B
4	0,97	0,98	0,63	0,61	Me

R² - coeficiente de determinação; r - coeficiente de correlação; d - índice de concordância; c - índice de confiança e desempenho do modelo.

* Conforme tabela 8.

TABELA 15 - Desempenho dos modelos para a estimativa da fitomassa parte aérea da planta de alface conduzida em hidroponia no período de outono inverno a partir de graus dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.

Modelo*	R ²	r	d	c	Desempenho
1	0,91	0,96	0,88	0,84	MB
3	0,91	0,95	0,88	0,84	MB
4	0,90	0,95	0,88	0,84	MB
5	0,92	0,96	0,87	0,84	MB
6	0,93	0,97	0,87	0,84	MB
2	0,89	0,95	0,88	0,83	MB
7	0,94	0,97	0,86	0,83	MB
8	0,96	0,98	0,84	0,82	MB
12	0,83	0,92	0,88	0,80	MB
13	0,97	0,98	0,82	0,80	MB
10	0,97	0,98	0,77	0,75	B
9	0,61	0,80	0,84	0,67	B
11	0,96	1,10	0,55	0,60	SO

R² - coeficiente de determinação; r - coeficiente de correlação; d - índice de concordância; c - índice de confiança e desempenho do modelo.

* Conforme tabela 9.

4.3 Estimativa da variável comprimento radicular

A variável comprimento radicular não apresentou diferença significativa ($P < 0,05$) entre as épocas. A partir do critério o valor de R² superior a 0,70, foram obtidas 10 equações quando utilizada a variável DAT (Tabela 16) e 11 equações quando foi utilizada a variável GD e GDE (Tabela 17 e 18) respectivamente. Os valores máximos de R² foram iguais a 0,8. Constatou-se que as equações propostas para a estimativa do comprimento radicular variam desde a linear até polinomiais de segunda ordem. Entretanto, todas as equações obedecem ao pressuposto do aumento do comprimento com o decorrer do período experimental.

TABELA 16 - Modelos de regressão para estimativa do comprimento radicular da alface cultivada em hidroponia a partir de dias após o transplante (DAT). Santa Maria, RS. 2008.

Nº	Modelos	R ²
1	$y = 17,5 - 1,68x + 0,29x^2 - 0,006x^3$	0,76
2	$y = 4,1 + 4,46,68.n / (1+n)^2$	0,76
3	$y = -10,3 + 60,93 / (1 + ((x-24,8)/16,7)^2)$	0,75
4	$y = 49,2 \cdot \exp((-0,5 \cdot ((x-25,48)/12,99)^2)$	0,75
5	$y = 51,8 / (1 + ((x-24,56)/13,13)^2)$	0,75

6	$y = 50,1/(1+\exp(-(x-10,2)/5,54))$	0,74
7	$y^{0,5} = 3,22 + 0,13 \cdot x + 0,0077x^2 - 0,000027x^3$	0,74
8	$y = 0,96 + 2,86x - 0,042x^2$	0,73
9	$y^{0,5} = 2,41 + 0,39x - 0,0062x^2$	0,73
10	$y = 9,28 + 1,43 \cdot x$	0,70

TABELA 17 - Modelos de regressão para estimativa do comprimento radicular da alface cultivada em hidroponia a partir de graus - dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.

Nº	Modelos	R ²
1	$y = 12,4 + 39,1/(1+\exp(-(x-186,9)/53,4))$	0,81
2	$y = 8,21 + 43,1 \cdot \exp((-0,5 \cdot ((x-373)/168,1)^2)$	0,81
3	$y = 4 \cdot 51,43 \cdot n/(1+n)^2$	0,81
4	$Y = 58,5/(1+\exp(-(x-165,6)/103,9))$	0,81
5	$y = 51,8/(1+((x-354,4)/201,4)^2)$	0,80
6	$y = 7,7 + 0,14x - 0,000057 \cdot x^2$	0,80
7	$y^{0,5} = 3,21 + 0,017x - 0,0000158x^2$	0,80
8	$y = 9,2 + 0,11x$	0,80
9	$y^{0,5} = 2,17 + 0,26x^{0,5}$	0,79
10	$y = -6,55 + 2,91x^{0,5}$	0,78
11	$y = 17,4 + 0,00027x^2$	0,73

TABELA 18 - Modelos de regressão para estimativa do comprimento radicular da alface cultivada em hidroponia a partir de graus - dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.

Nº	Modelos	R ²
1	$y = 14,9 - 0,04x + 0,0009x^2 - 0,0000016x^3$	0,81
2	$y = 12,44 + 39,19/(1+\exp(-(x-193,1)/55,1))$	0,81
3	$y = 8,35 + 42,97 \cdot \exp((-0,5 \cdot ((x-383,6)/172,1)^2)$	0,81
4	$y = 58,8/(1+\exp(-(X-172,1)/107,7))$	0,81
5	$y = 4 \cdot 51,48 \cdot n/(1+n)^2$	0,81
6	$y = 7,8 + 0,13x + 0,000049x^2$	0,80
7	$y^{0,5} = 3,21 + 0,016x - 0,000014x^2$	0,80
8	$y = 9,12 + 0,11x$	0,80
9	$y^{0,5} = 2,15 + 0,26x^{0,5}$	0,78
10	$y = 14,5 + 0,0054x^{1,5}$	0,78
11	$y = 17,3 + 0,00026x^2$	0,73

4.3.1 Avaliação dos modelos de estimativa da variável comprimento radicular

Os resultados evidenciaram que as melhores estimativas foram obtidas, quando utilizaram – se as variáveis GD e GDE para a estimativa do sistema radicular. Segundo a metodologia de Camargo & Sentelhas, (1997), o desempenho obtido para maioria dos modelos foram classificados como muito bom (Tabela 20 e 21). Esses modelos corresponderam a equações desde lineares até polinomiais (Tabela 17 e 18).

Os valores de coeficiente de correlação (r) e do índice de concordância (d) foram elevados mostrando que os dados apresentam uma boa relação entre os valores observados e estimados (Tabela 20 e 21).

TABELA 19 - Desempenho dos modelos para a estimativa do comprimento radicular da planta de alface conduzida em hidroponia a partir de dias após o transplante (DAT). Santa Maria, RS. 2008.

Modelo*	R ²	r	d	c	Desempenho
9	0,76	0,86	0,90	0,78	MB
7	0,74	0,85	0,90	0,77	MB
1	0,74	0,85	0,84	0,71	B
4	0,76	0,86	0,80	0,69	B
6	0,76	0,86	0,80	0,69	B
8	0,76	0,86	0,79	0,69	B
2	0,75	0,86	0,79	0,68	B
3	0,76	0,86	0,79	0,68	B
5	0,75	0,86	0,75	0,65	ME
10	0,76	0,86	0,63	0,55	SO

R² - coeficiente de determinação; r - coeficiente de correlação; d - índice de concordância; c - índice de confiança e desempenho do modelo.

*Conforme tabela 16.

TABELA 20 - Desempenho dos modelos para a estimativa do comprimento radicular da planta de alface conduzida em hidroponia a partir de graus dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.

Modelo*	R ²	r	d	c	Desempenho
8	0,76	0,86	0,90	0,78	MB
11	0,75	0,86	0,90	0,77	MB
6	0,76	0,86	0,85	0,74	MB
1	0,74	0,85	0,83	0,71	MB
2	0,76	0,86	0,83	0,72	MB
3	0,76	0,86	0,83	0,72	MB
4	0,75	0,86	0,84	0,72	MB
9	0,76	0,86	0,83	0,72	MB
10	0,75	0,86	0,84	0,72	MB
5	0,76	0,86	0,83	0,71	MB
7	0,76	0,86	0,77	0,67	MB

R² - coeficiente de determinação; r - coeficiente de correlação; d - índice de concordância; c - índice de confiança e desempenho do modelo.

*Conforme tabela 17.

TABELA 21 - Desempenho dos modelos para a estimativa do comprimento radicular da planta de alface conduzida em hidroponia a partir de graus dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.

Modelo*	R ²	r	d	c	Desempenho
1	0,74	0,85	0,92	0,79	MB
8	0,76	0,86	0,89	0,77	MB
11	0,75	0,86	0,90	0,77	MB
10	0,76	0,86	0,88	0,76	MB
4	0,75	0,86	0,84	0,73	MB
3	0,76	0,86	0,83	0,72	MB
5	0,76	0,86	0,84	0,72	MB
2	0,74	0,85	0,84	0,71	MB
9	0,76	0,86	0,82	0,71	MB
7	0,76	0,86	0,81	0,70	MB
6	0,76	0,86	0,68	0,59	SO

R² - coeficiente de determinação; r - coeficiente de correlação; d - índice de concordância; c - índice de confiança e desempenho do modelo.

*Conforme tabela 18.

4.4 Estimativa da variável volume radicular

A variável volume radicular não apresentou diferenças significativas ($P < 0,05$) entre as épocas. Logo, foi proposto um conjunto de equações para estimar o volume radicular que pode ser aplicado independente da época considerada.

Os valores de R^2 situaram-se na faixa de 0,43 e 0,68 quando utilizado a variável de entrada DAT e GD ou GDE (Tabela 22 a 24), respectivamente. Observou-se que o número de equações ajustadas oscilou de acordo com a variável de entrada, sendo que foram obtidas 7 equações quando utilizada a variável DAT (Tabela 22) e 10 equações quando utilizada a variável GD e GDE (Tabela 23 e 24), respectivamente.

TABELA 22 - Modelos de regressão para estimativa do volume radicular da alface cultivada em hidroponia a partir de dias após o transplântio (DAT). Santa Maria, RS. 2008.

N°	Modelos	R ²
1	$y = 42,38 \cdot \exp(-0,5 \cdot ((x-21,05)/10,14)^2)$	0,43
2	$y = 4 \cdot 43,15 \cdot n / (1+n)^2$	0,43
3	$y = 0,33 + 0,98 \cdot X + 0,29 \cdot x^2 - 0,017 \cdot x^3 + 0,00025 \cdot x^4$	0,42
4	$Y = 2,06 + 1,65 \cdot x + 0,09 \cdot x^2 - 0,0038 \cdot x^3$	0,42
5	$y = -7,27 + 4,2 \cdot x - 0,097 \cdot x^2$	0,41
6	$y = 37,34 / (1 + \exp(-(x-7,97)/3,96))$	0,39
7	$y = 38,73 + 0,029 \cdot x - 134,54/x$	0,35

TABELA 23 - Modelos de regressão para estimativa do volume radicular da alface cultivada em hidroponia a partir de graus - dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.

N°	Modelos	R ²
1	$y = 46,45 / (1 + ((x-278,6)/132,65)^2)$	0,68
2	$y = -4,34 + 49,39 / (1 + ((x-278,42)/151,7)^2)$	0,68
3	$y = 4,48 + 4 \cdot 40,68 \cdot n / (1+n)^2$	0,68
4	$y = 7,68 + 37,08 \cdot \exp((-0,5 \cdot ((x-278,46)/103,64)^2)$	0,68
5	$y = 9,54 - 0,047x + 0,0015x^2 - 0,0000032x^3$	0,67
6	$y = -3,82 + 0,29x - 0,0005 \cdot x^2$	0,63
7	$y^{0,5} = 1,38 + 0,039x - 0,00007 \cdot x^2$	0,63
8	$y^2 = -0,011 - 0,459x + 0,04x^2 - 0,000083x^3$	0,56

9	$y = -5,45 + 2,47x^{0,5}$	0,53
10	$y = 8,87 + 0,093x$	0,48

TABELA 24 - Modelos de regressão para estimativa do volume radicular da alface cultivada em hidroponia a partir de graus dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.

Nº	Modelos	R ²
1	$y = -3,7 + 49,29 / (1 + ((x - 285,92) / 152,47)^2)$	0,68
2	$y = 4,8 + 4,40,3.n / (1+n)^2$	0,68
3	$y = 7,9 + 36,83 \cdot \exp((-0,5 \cdot ((x - 285,95) / 105,06)^2)$	0,68
4	$y = 46,3 / (1 + ((x - 286,07) / 135,56)^2)$	0,68
5	$y = 42,81 \cdot \exp((-0,5 \cdot ((x - 286,1) / 135,65)^2)$	0,67
6	$y^{0,5} = 1,36 + 0,037x - 0,000067x^2$	0,63
7	$y = -3,91 + 0,29x - 0,00048x^2$	0,62
8	$y^{0,5} = 0,001 + 0,056x - 0,00013x^2 + 0,000000844x^3$	0,60
9	$y^2 = -0,011 - 0,49x + 0,038x^2 - 0,000077x^3$	0,57
10	$y = 17,8 + 0,065X - 437,74/x$	0,51

4.4.1 Avaliação dos modelos de estimativa da variável volume radicular

O desempenho estatístico dos modelos de estimativa do volume radicular foram avaliados para as três variáveis independentes DAT (Tabela 25), GD (Tabela 26) e GDE (Tabela 25). Os resultados evidenciaram que as melhores estimativas foram obtidas, quando utilizou – se a variável GD, com 7 equações e de GDE, com 8 equações (Tabela 26 e 27).

Os modelos não mostram um bom desempenho na estimativa do volume radicular, quando foi utilizada a variável independente DAT, pois segundo a metodologia de Camargo & Sentelhas, (1997), os modelos de estimativa foram classificados como péssimos (Tabela 25). Além disso, verifica-se que o valor do índice de concordância (d) também apresentou valores baixos, significando que ocorreu um afastamento dos valores observados e estimados. Como o índice de confiança é uma relação entre o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância (d), o seu valor também foi baixo.

Os valores de R² testados quando utilizada a variável DAT foram superiores se comparados aos modelos gerados, onde o valor de R² foi de 0,43

(Tabela 23). Para as variáveis GD e GDE os valores de R^2 foram semelhantes aos da geração dos modelos (Tabela 24 e 25).

TABELA 25 - Desempenho dos modelos para a estimativa do comprimento radicular da planta de alface conduzida em hidroponia a partir de dias após o transplântio (DAT). Santa Maria, RS. 2008.

Modelo*	R^2	r	d	c	Desempenho
3	0,70	0,83	0,49	0,40	PE
1	0,68	0,81	0,45	0,36	PE
5	0,70	0,83	0,43	0,36	PE
2	0,67	0,81	0,43	0,35	PE
4	0,69	0,82	0,40	0,33	PE
6	0,70	0,83	0,28	0,23	PE
7	0,70	0,83	0,26	0,22	PE

R^2 - coeficiente de determinação; r - coeficiente de correlação; d - índice de concordância; c - índice de confiança e desempenho do modelo.

*Conforme tabela 22.

TABELA 26 - Desempenho dos modelos para a estimativa do comprimento radicular da planta de alface conduzida em hidroponia a partir de graus - dia (GD). Santa Maria, RS. 2008.

Modelo*	R^2	r	d	c	Desempenho
5	0,68	0,81	0,85	0,69	B
7	0,62	0,78	0,86	0,68	B
1	0,62	0,78	0,82	0,64	ME
3	0,62	0,78	0,82	0,64	ME
4	0,62	0,78	0,82	0,64	ME
2	0,62	0,78	0,81	0,63	ME
9	0,70	0,83	0,72	0,60	SO
10	0,69	0,82	0,71	0,58	SO
6	0,65	0,80	0,71	0,57	SO
8	0,69	0,82	0,58	0,48	M

R^2 - coeficiente de determinação; r - coeficiente de correlação; d - índice de concordância; c - índice de confiança e desempenho do modelo.

*Conforme tabela 23.

TABELA 27 - Desempenho dos modelos para a estimativa do comprimento radicular da planta de alface conduzida em hidroponia a partir de graus – dia efetivo (GDE). Santa Maria, RS. 2008.

Modelo*	R ²	r	d	c	Desempenho
8	0,67	0,81	0,87	0,71	B
1	0,62	0,78	0,82	0,65	ME
2	0,63	0,78	0,82	0,65	ME
3	0,63	0,78	0,83	0,65	ME
4	0,63	0,78	0,82	0,64	ME
5	0,63	0,78	0,81	0,64	ME
7	0,66	0,81	0,77	0,62	ME
6	0,58	0,76	0,77	0,58	SO
10	0,69	0,83	0,68	0,56	SO
9	0,69	0,82	0,57	0,47	M

R² - coeficiente de determinação; r - coeficiente de correlação; d - índice de concordância; c - índice de confiança e desempenho do modelo.

*Conforme tabela 24.

As equações de estimativa do comprimento radicular apresentaram parâmetros estatísticos de desempenho melhores do que aquelas da estimativa volume radicular. Mesmo em hidroponia verificam-se problemas na avaliação do sistema radicular. Sabe-se que o cultivo hidropônico permite que o sistema radicular cresça em um ambiente restrito, ou seja, o canal de cultivo, sendo que muitas vezes as raízes de plantas vizinhas se entrelaçam não permitindo uma medida exata do comprimento do sistema radicular e também do volume. Em vista, disso o trabalho buscou mensurar o comprimento e também o volume radicular das plantas de alface na tentativa de melhor caracterizar o crescimento do sistema radicular.

4.5 Estimativa da retenção da solução nutritiva

As medidas de retenção radicular não evidenciaram diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os tratamentos. Assim, os dados podem ser agrupados em um conjunto em cada época.

As medidas de retenção de solução nutritiva seguiram a tendência esperada, ou seja, as raízes tiveram um volume retido maior no momento em que o sistema foi desligado (tempo 0), seguido pelas medidas no tempo de 10 e 15 minutos (Figura 3a e 3c). Os valores de R² evidenciaram dispersão dos dados

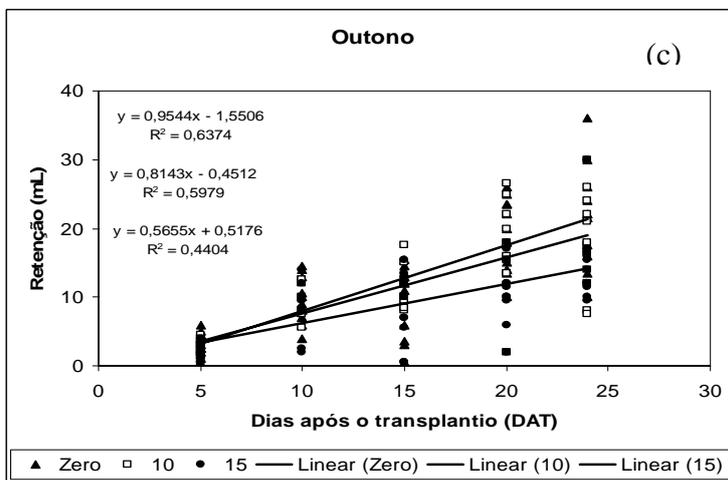
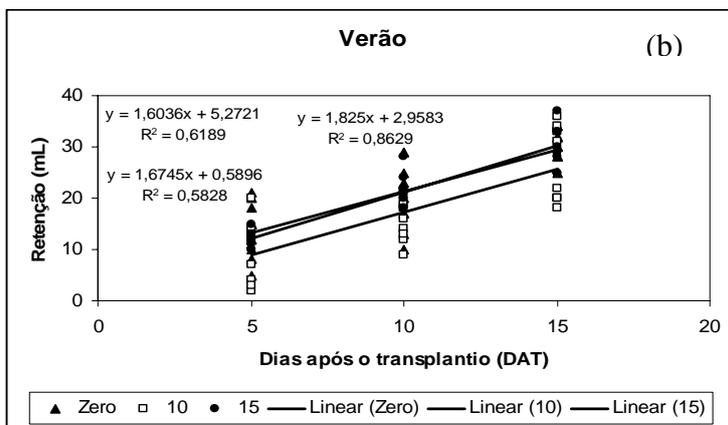
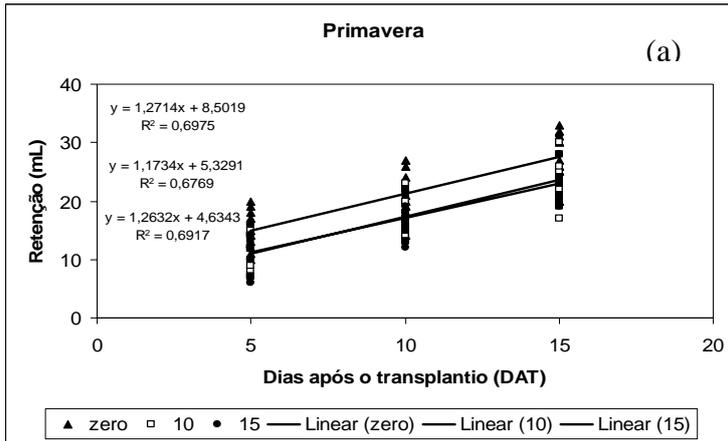
amostrais da retenção da solução nutritiva, denotando que mesmo em hidroponia verificam-se diferenças no sistema radicular entre as plantas.

As medidas de retenção foram crescentes nas épocas, comprovando a hipótese inicial que com o passar do ciclo as plantas desenvolvem o sistema radicular de forma a contribuir positivamente na retenção da solução nutritiva. O sistema radicular age como uma barreira, sendo que no período de inverno as plantas retêm menores quantidades de solução nutritiva uma vez que seus gastos com transpiração são baixos.

O aumento da retenção da solução nutritiva decorrente do acréscimo do volume radicular (Figura 4a, 4b e 4c) seria um fator que possibilitaria aumentar o intervalo entre irrigações sem ocorrência de déficit hídrico da cultura.

Verifica-se uma escassez de estudos sobre o sistema radicular, o qual pode ser atribuído ao fato de a metodologia ser bastante trabalhosa. Inicialmente, acreditava-se que o cultivo em meio hidropônico da cultura de alface possibilitaria maior facilidade na aquisição de dados do sistema radicular, uma vez que, proporciona a retirada total do sistema radicular. Entretanto, verificou-se que como o decorrer do ciclo acentua-se a dificuldade da coleta do sistema radicular pois ocorre um entrelaçamento das raízes, o que pode ocasionar variações nas medidas que envolvem esses órgãos.

O crescimento e a arquitetura radicular variam amplamente devido à interação dinâmica com um grande número de fatores físicos, químicos e biológicos no solo, fatores estes também variáveis no espaço e no tempo (LYNCH, 1997). Os resultados obtidos neste trabalho, embora em cultivo hidropônico, ressaltam a dificuldade de trabalhar com o sistema radicular e obter respostas satisfatórias. Faz-se necessários maiores pesquisas, e a elaboração de novas metodologias que possibilitem a aquisição de informações a cerca da complexa estrutura do sistema radicular.



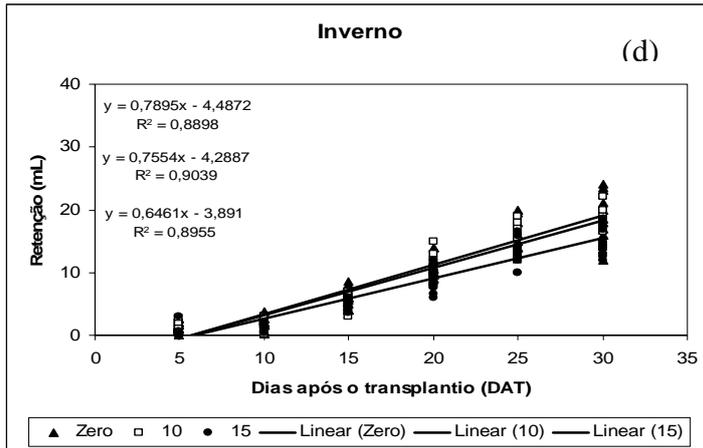
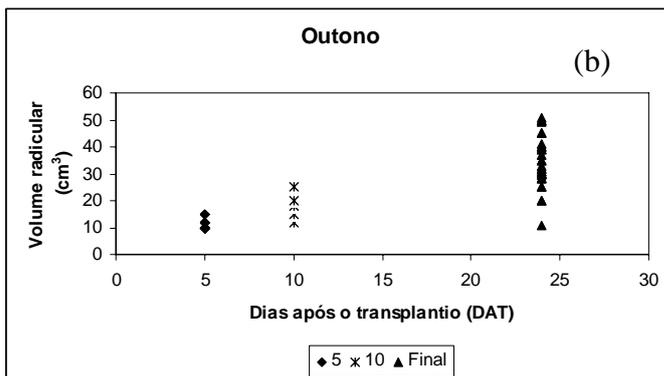
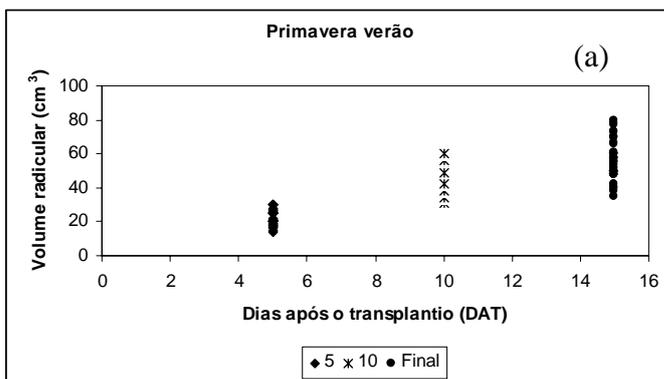


FIGURA 3 – Valores de retenção da solução nutritiva retida pelas raízes de alface conduzidas em sistema hidropônico em quatro épocas de cultivo, primavera, verão, outono e inverno respectivamente, nas coletas (zero, 10 e 15 minutos após desligar o sistema). UFSM, Santa Maria – RS, 2008.



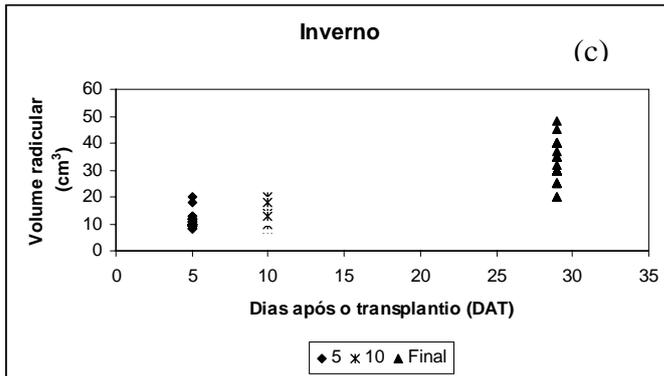


FIGURA 4 - Valores de volume radicular nas épocas de primavera verão (a), outono (b) e inverno (c) aos 5,10 dias após o transplante e final do experimento. UFSM, Santa Maria – RS, 2008.

5 CONCLUSÕES

O ajuste de modelos de crescimento para estimar a fitomassa seca da parte aérea de alface, comprimento e volume radicular obtiveram melhor desempenho, geralmente, quando utilizou – se a variável GDE. No inverno, para estimar a fitomassa seca da parte aérea, o melhor desempenho foi obtido quando utilizou – se a variável DAT.

Independente da época considerada, a utilização de modelos lineares ou modelos complexos apresentaram desempenho semelhante na simulação do crescimento, sendo então recomendado os modelos lineares, mais simples, visto a sua simplicidade e facilidade de compreensão.

A retenção de solução nutritiva comprovou a hipótese de que o sistema radicular age como uma barreira, uma vez que houve incremento na retenção da solução nutritiva decorrente do aumento do volume radicular, independente do tratamento utilizado. Como não houve diferenças estatísticas entre tratamentos dentro das épocas, pode-se inferir que seria possível aumentar o intervalo entre irrigações sem causar prejuízos na produção de fitomassa da alface.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENICASA, M. M. P. **Análise do crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal: FUNEP, 1988. 44 p.

BLISKA, Jr. A.; HONÓRIO, S. L. **Hidroponia**. Campinas: UNICAMP, 1996. 50 p (Cartilha Tecnológica).

BLISKA, Jr. A.; Plasticultura: Carência de informações inibe utilização. **REVISTA PLASTICULTURA – A proteção para o agronegócio**. Campinas, v. 1, n. 6, p 5-13, Jun., 2007.

BONHOMME, R. O; RUGET, F. **Modélisation do fonctionnement d'une culture de maïs: cas de CORNGRO et CERES-Maize**. In: "Physiologie et production du maïs", Picard D. (ed.). Paris: INRA, 1991. 501 p.

BRUNINI, O. Temperatura – base para alface cultivar “White-boston”, em um sistema de unidades térmicas. **Bragantia**, Campinas. v. 35, n. 19, p.213-219, jul., 1976.

BURIOL, G. A. et al. Insolação e radiação solar na região de Santa Maria, RS. II – Disponibilidade e Variabilidade. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p.205-223, fev., 1991.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria. v. 5, n. 3, p.89-97, mai., 1997.

CASTELLANE, P. D.; ARAÚJO, J. A. C. de **Cultivo sem solo – Hidroponia**, 4 ed. Jaboticabal: FUNEP. 1995. 43 p.

CARON, B. O. et al. Equações de estimativa da fitomassa da parte aérea da alface. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p.1248-1254, set./out., 2007.

DANTAS, R. T. **Parâmetros agrometeorológicos e análise de crescimento de alface (*Lactuca sativa* L.) em ambientes natural e protegido**.1997. 109 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

DANTAS, R. T.; ESCOBEDO, J.F. Índices morfo-fisiológicos e rendimento da alface (*Lactuca sativa* L.) em ambientes natural e protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p.27-31, jan./abr., 1998.

DOURADO NETO, D. et al. Principles of crop modeling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55. n. especial, p.46-50, ago., 1998a.

DOURADO NETO, D. et al. Principles of crop modeling and simulation: III. Modeling of root growth and other belowground processes, limitations of the models, and the future of modeling in agriculture. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55. n. especial, p.58-61, ago., 1998c.

ESPANET, R. **Un modèle simple de prévision des rendements de tomates sous serre verre: comparaison de deux regions de productions**. Memoire de Fin d'Etudes. Ecole Nationale d'Ingénieurs des Travaux de l'Horticulture et du Paysage. 67 p, 1995.

ESTEFANEL, V. et al. Insolação e radiação solar de Santa Maria, RS: I – Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. **Revista Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 20, n. 3-4, p.203-218, mar./abr., 1990.

FAGAN, E. B. et al. Influência de intervalos entre irrigações na fisiologia e produção de meloeiro sob sistema hidropônico. **Revista Brasileira Agrociência**, Pelotas, v. 11, n. 4, p.429-436, out/dez, 2005.

FANTE JR, L., REICHARDT, K. Distribuição do sistema radicular do milho em terra roxa estruturada latossólica. I Comparação de metodologias. **Scientia agrícola**, Piracicaba, v. 51, n. 3, p.13-518, set./dez., 1994.

FAO PROTECTED CULTIVATION IN THE MEDITERRANEAN CLIMATE. Rome, v. 1, 1990. 313 p.

FAQUIN, V.; FURTINI, A. E. N.; VILELE, L. A. **A produção de alface em hidroponia**. Lavras: UFLA, 1996. 50 p.

FAQUIN, V.; FURLANI, P.R. Cultivo de hortaliças de folhas em hidroponia em ambiente protegido. **Informe agropecuário**, Belo Horizonte, v. 20, n. 200/201, p.99-104, set./dez., 1999.

FELTRIM, A. L. et al. Produção de alface americana em solo e em hidroponia, no inverno e verão, em Jaboticabal, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p.505-509, out./dez., 2005.

FILGUEIRA, F. A. R. **Manual de olericultura: cultura e comercialização de hortaliças**. 2. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1982. 587 p.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa: UFV, 2000. 402 p.

FURLANI, P. R. **Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica hidroponia – NFT**. Campinas: Instituto Agronômico, 1998. 30 p. (Boletim técnico 168).

GALLARDO, M. et al. Crop Growth and water use model for lettuce. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 122, n. 6, p.354-359, jun., 1996.

GOTO, R.; TIVELLI, S. W. **Produção de hortaliças em ambiente protegido: Condições Subtropicais**. São Paulo: UNESP, 1998. 319 p.

LOPES, S. J. **Modelos referentes à produção de sementes de alface sob hidroponia**. 2002, 129 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

LOPES, S. J. et al. Models to estimate dry matter accumulation on hydroponic lettuce. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 4, p. 392-400, jul./ago., 2004.

LUZ, J. M. Q.; GUIMARAES, S. T. M. R.; KORNDORFER, G. H. Produção hidropônica de alface em solução nutritiva com e sem silício. **Horticultura Brasileira**, Campinas, v. 24, n. 3, p.295-300, jul./set., 2006.

LYRA, G. B. et al. Modelos de Crescimento para a Alface (*Lactuca sativa* L.) Cultivada em Sistema Hidropônico sob Condições de Casa-de-Vegetação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 69-77, jan., 2003.

LYNCH, J. P. et al. SimRoot: modelling and visualization of root systems. **Plant and Soil**, Netherlands, v.188, n. 1, p.139-151, jan., 1997.

JONES, J. W. et al. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Wageningen, v. 34, n. 2, p. 663-672, fev., 1991.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MARTINEZ, H. E. P.; SILVA FILHO, J. B. **Introdução ao cultivo hidropônico de plantas**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2004. 111 p.

MEDEIROS, S. L. P. **Modifications et developpement d'un nouveau module de contrainte hydrique dans le modèle CERES-Sorghum sucrier**. Paris: INA-PG, 1997. 154 p. Thèse (Doctorat de l' Institut National Agronomique Paris-Gignon). Institut National de la Recherche Agronomique.

MEDEIROS, S. L. P. et al. Ajuste do módulo de produção da matéria seca no modelo CERES-Sorghum para simulação da cultura do sorgo sacarino. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 223-229, dez. 2000.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização, Secção de Geografia, 1961. 46 p.

NASCIMENTO, W. M. In: EMBRAPA HORTALIÇAS – Novos rumos na produção de hortaliças. Disponível em: <http://www.cnph.embrapa.br/>. Acesso em 31 out. 2007.

OLIVEIRA, O. J. de. et al. Modelo co-senoidal referente à curva de crescimento do sistema radicular da cultura de milho (*Zea mays* L.) sob irrigação em condições de campo. **Ciência Agrotécnica**. Lavras, v. 24. n. Especial, p.197-204, dez., 2000.

OLIVEIRA, A. C. B. et al. Divergência genética e descarte de variáveis em alface cultivada sob sistema hidropônico. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 26, n. 2, p.211-217, 2004.

OHSE, S. et al. Qualidade de cultivares de alface produzida em hidroponia. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 1, p.181-185, Jan./Mar., 2001.

PILAU, F. G. **Intervalos entre irrigações na produção de alface hidropônica**. 2002. 88 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

PIMENTA, H. S., FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Modelo matemático para estimar o acúmulo de matéria seca e prever as épocas do florescimento e do ponto de maturidade fisiológica da cultura de feijão. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p.915-920, out./dez., 1999.

RESH, H. M. **Cultivos hidropónicos: nuevas técnicas de producción**. 4. ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1997. 509 p.

SALA, F. C.; COSTA, C. P. da. 'Pira roxa': Cultivar de alface crespa de cor vermelha intensa. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 1, p.158-159, jan./mar., 2005.

SANTOS, O. et al. **Cultivo hidropônico da alface. Teste preliminar de soluções nutritivas**. Santa Maria: UFSM, 1998. 7 p. (Informativo Técnico 02/98).

SANTOS, O. S. (Ed.) **Hidroponia da alface**. Santa Maria: Imprensa Universitária, 2000. Cap. 7, p.72-79.

SCAIFE, A.; COX, E. F.; MORRIS, G. E. L. The relationship between shoot weight, plant density and time during the propagation of four vegetable species. **Annals of Botany**, London, v. 59, n. 3, p.325-334, out., 1987.

SCHIMIDT, D.; SANTOS, O. S. Cultivares de alface. In: SANTOS, **Hidroponia da alface**. Santa Maria: Imprensa Universitária, 2000. p.72-79.

SCHIMIDT, D. et al. Desempenho de soluções nutritivas e cultivares de alface em hidroponia. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 2, p.122-126, Jul., 2001.

SEGOVIA, J. F. O. et al. Comparação do crescimento e desenvolvimento da alface (*Lactuca sativa* L.) no interior e no exterior de uma estufa de polietileno em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p.37-41, jan./mar., 1997.

SGANZERLA, E. **Nova agricultura; a fascinante arte de cultivar com os plásticos**. 2. ed. Porto Alegre: Petroquímico Triunfo, 1997. 303 p.

SILVA, E. L.; MARTINEZ, L. F.; YITAYEW, M. Relação entre coeficientes de cultura e graus-dia de desenvolvimento da alface. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 2, p.134-142, jul., 1999.

SWEENEY, D. G. et al. **Modelling the growth of winter lettuce**. In: ROSE, D.A., CHARLES-EDWARDS, D.A. eds. *Mathematics and plant physiology*. New York: Academic Press, p. 217-229, 1981.

TEI, F.; SCAIFE, A.; AIKMAN, D. P. Growth of lettuce, onion and red beet. 1. Growth Analysis, Light Interception, and Radiation use Efficiency. **Annals of Botany**, London, v. 78, n. 5, p.633-643. nov., 1996.

TERUEL, D. A. **Modelagem do índice de área foliar da cana-de-açúcar em diferentes regimes hídricos**. 1995. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luís de Queiroz", Universidade de São Paulo Piracicaba.

TERUEL, D. A. et al. Modelagem matemática como metodologia de análise do crescimento e arquitetura de sistemas radiculares. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p.683-691, out/dez., 2000.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Caracterização da variável climática temperatura mínimas (T_{mín}), máximas (T_{máx}) e médias (T_{média}), radiação global incidente (R_g interna) e fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da estufa durante o experimento de primavera da cultura de alface no período de 17 de outubro a 02 de novembro de 2006. Santa Maria, RS. 2008.

Dia Juliano	Data	TMín °C	Tmáx °C	Tmédia °C	Rg interna MJ/m ² /dia	PAR MJ/m ² /dia
290	17/10/06	20,00	37,50	28,75	13,78	6,20
291	18/10/06	21,00	42,00	31,5	8,37	3,76
292	19/10/06	23,00	33,00	28	7,85	3,53
293	20/10/06	21,00	34,00	27,5	13,82	6,22
294	21/10/06	18,00	37,50	27,75	15,15	6,82
295	22/10/06	19,00	40,00	29,5	15,29	6,89
296	23/10/06	22,00	42,50	32,25	14,87	6,69
297	24/10/06	25,50	44,00	34,75	14,36	6,46
298	25/10/06	26,00	47,00	36,5	14,96	6,73
299	26/10/06	23,50	40,50	32	8,23	3,71
300	27/10/06	20,00	37,00	28,5	10,96	4,93
301	28/10/06	22,00	39,50	30,75	13,13	5,91
302	29/10/06	23,50	39,00	31,25	7,10	3,20
303	30/10/06	26,00	39,50	32,75	12,08	5,44
304	31/10/06	27,00	34,50	30,75	6,12	2,75
305	1/11/06	25,00	35,00	30	5,30	2,39
306	2/11/06	24,00	38,50	31,25	11,30	5,08

APÊNDICE B - Caracterização da variável climática temperatura mínimas (T_{mín}), máximas (T_{máx}) e médias (T_{média}), radiação global incidente (R_g interna) e fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da estufa durante o experimento de verão 1 da cultura de alface no período de 06 de fevereiro a 22 de fevereiro de 2007. Santa Maria, RS. 2008.

Dia Juliano	Data	TMín °C	Tmáx °C	Tmédia °C	Rg interna MJ/m ² /dia	PAR MJ/m ² /dia
37	6/2/07	23	37	29,88	16,98	7,64
38	7/2/07	21	36	28,28	18,28	8,22
39	8/2/07	21	34	27,48	19,77	8,90
40	9/2/07	20	36	27,88	18,61	8,37
41	10/2/07	21	37	29,08	16,62	7,48
42	11/2/07	21	34	27,58	18,61	8,37
43	12/2/07	18	33	25,50	20,00	9,00
44	13/2/07	19	38	28,50	16,97	7,64
45	14/2/07	21	36	28,50	14,71	6,62
46	15/2/07	22	39	30,50	14,05	6,32
47	16/2/07	22	40	31,00	15,05	6,77
48	17/2/07	24	32	28,00	5,74	2,58
49	18/2/07	19	28	23,25	14,17	6,38
50	19/2/07	18	31	24,50	10,58	4,76
51	20/2/07	20	37	28,50	9,36	4,21
52	21/2/07	21	36	28,50	12,16	5,477
53	22/2/07	23	32	27,50	6,17	2,777

APÊNDICE C - Caracterização da variável climática temperatura mínimas (T_{mín}), máximas (T_{máx}) e médias (T_{média}), radiação global incidente (R_g interna) e fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da estufa durante o experimento de verão 2 da cultura de alface no período de 14 de março a 02 de abril de 2007. Santa Maria, RS. 2008

Dia Juliano	Data	T_{mín} °C	T_{máx} °C	T_{média} °C	R_g interna MJ/m²/dia	PAR MJ/m²/dia
73	14/3/07	26	36	30,66	14,00	6,30
74	15/3/07	27	34	30,46	9,41	4,23
75	16/3/07	22	33	27,86	12,72	5,73
76	17/3/07	22	31	26,51	10,40	4,68
77	18/3/07	20	31	25,86	11,24	5,06
78	19/3/07	23	30	26,66	8,29	3,73
79	20/3/07	21	33	27,06	13,66	6,15
80	21/3/07	22	32	26,86	11,80	5,31
81	22/3/07	23	35	29,26	12,35	5,56
82	23/3/07	25	38	31,26	11,38	5,12
83	24/3/07	23	31	27,10	5,73	2,58
84	25/3/07	23	28	25,60	3,79	1,71
85	26/3/07	24	33	28,50	4,63	2,08
86	27/3/07	24	42	33,00	14,03	6,31
87	28/3/07	26	41	33,50	12,20	5,49
88	29/3/07	26	36	31,00	9,55	4,30
89	30/3/07	25	41	33,00	13,24	5,96
90	31/3/07	24	30	27,00	3,46	1,56
91	1/4/07	23	35	29,00	6,25	2,81
92	2/4/07	24	34,6	29,30	9,52	4,28

APÊNDICE D - Caracterização da variável climática temperatura mínimas (T_{mín}), máximas (T_{máx}) e médias (T_{média}), radiação global incidente (R_g interna) e fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da estufa durante o experimento de outono da cultura de alface no período de 23 de abril a 17 de maio de 2007. Santa Maria, RS. 2008.

Dia Juliano	Data	T_{mín} °C	T_{máx} °C	T_{média} °C	R_g interna MJ/m²/dia	PAR MJ/m²/dia
113	23/4/07	20,10	37,2	28,65	9,63	4,33
114	24/4/07	19,70	30,5	25,1	1,58	0,71
115	25/4/07	20,20	25,2	22,7	1,77	0,80
116	26/4/07	16,60	24,1	20,35	4,31	1,94
117	27/4/07	9,70	22,8	16,25	11,16	5,02
118	28/4/07	8,70	24,8	16,75	11,08	4,98
119	29/4/07	12,70	27,7	20,2	9,68	4,35
120	30/4/07	12,20	31,3	21,75	10,25	4,61
121	1/5/07	15,90	31,9	23,9	6,58	2,96
122	2/5/07	21,00	27,5	24,25	2,66	1,20
123	3/5/07	18,50	26,1	22,3	3,63	1,63
124	4/5/07	18,40	35,4	26,9	10,07	4,53
125	5/5/07	21,50	35,8	28,65	9,84	4,43
126	6/5/07	25,90	33,4	29,65	3,97	1,79
127	7/5/07	16,20	20	18,1	4,00	1,80

128	8/5/07	9,30	19,1	14,2	9,44	4,25
129	9/5/07	7,00	20,6	13,8	9,71	4,37
130	10/5/07	7,40	23	15,2	9,83	4,42
131	11/5/07	14,00	28,2	21,1	7,25	3,26
132	12/5/07	14,20	26	20,1	9,38	4,22
133	13/5/07	10,80	15,7	13,25	0,90	0,40
134	14/5/07	12,40	23,1	17,75	6,06	2,73
135	15/5/07	14,40	28	21,2	7,20	3,24
136	16/5/07	11,90	20,4	16,15	1,55	0,70
137	17/5/07	9,40	20,5	14,95	9,35	4,21

APÊNDICE E - Caracterização da variável climática temperatura mínimas (Tmín), máximas (Tmáx) e médias (Tmédia) radiação global incidente (Rg interna) e fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da estufa durante o experimento de inverno 1 da cultura de alface no período de 19 de julho a 17 de agosto de 2007. Santa Maria, RS. 2008.

Dia Juliano	Data	TMín °C	TMáx °C	Tmédia °C	Rg interna. MJ/m²/dia	PAR MJ/m²/dia
200	19/7/2007	10,00	23,00	16,5	7,10	3,19
201	20/7/2007	6,00	26,00	16	6,89	3,10
202	21/7/2007	6,00	16,00	11	3,11	1,40
203	22/7/2007	11,00	20,00	15,5	1,40	0,60
204	23/7/2007	6,00	20,00	13	7,90	3,55
205	24/7/2007	2,00	19,00	10,5	6,17	2,77
206	25/7/2007	4,00	19,00	11,5	6,58	2,94
207	26/7/2007	5,00	22,00	13,5	7,82	3,52
208	27/7/2007	4,00	22,00	13	7,55	3,40
209	28/7/2007	2,00	19,00	10,5	7,55	3,40
210	29/7/2007	0,00	18,00	9	7,73	3,48
211	30/7/2007	7,80	17,30	12,55	5,96	2,68
212	31/7/2007	4,00	23,00	13,5	8,16	3,67
213	1/8/2007	7,00	26,00	16,5	7,90	3,55
214	2/8/2007	10,00	12,00	11	0,69	0,31
215	3/8/2007	10,00	14,00	12	0,85	0,38
216	4/8/2007	8,00	12,00	10	1,37	0,62
217	5/8/2007	3,00	20,00	11,5	10,47	4,71
218	6/8/2007	10,00	23,70	16,85	3,72	1,68
219	7/8/2007	7,20	16,20	11,7	8,65	3,89
220	8/8/2007	7,20	19,00	13,1	10,49	4,72
221	9/8/2007	11,00	31,00	21	5,20	2,34
222	10/8/2007	9,00	22,00	15,5	1,32	0,59
223	11/8/2007	6,00	23,00	14,5	9,68	4,35
224	12/8/2007	5,00	23,00	14	8,96	4,03
225	13/8/2007	12,00	30,00	21	5,40	2,43
226	14/8/2007	20,00	29,00	24,5	4,01	1,81
227	15/8/2007	16,00	32,00	24	5,56	2,50
228	16/8/2007	10,00	16,00	13	0,93	0,42
229	17/8/2007	7,00	11,00	9	0,98	0,44

APÊNDICE F - Caracterização das variáveis climáticas temperaturas mínimas (T_{mín}), máximas (T_{máx}) e médias (T_{média}), radiação global incidente (R_g) e fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da estufa durante o experimento de inverno 2 da cultura de alface no período de 21 de agosto a 20 de setembro de 2007. Santa Maria, RS. 2008.

Dia Juliano	Data	T_{mín} °C	T_{máx} °C	T_{média} °C	R_g interna. MJ/m²/dia	PAR MJ/m²/dia
233	21/8/2007	0,00	14,00	7	11,29	5,08
234	22/8/2007	3,00	13,00	8	7,65	3,44
235	23/8/2007	7,00	27,00	17	8,46	3,81
236	24/8/2007	11,00	17,00	14	3,73	1,68
237	25/8/2007	7,00	10,00	8,5	1,50	0,68
238	26/8/2007	8,00	12,00	10	2,12	0,95
239	27/8/2007	4,00	14,00	9	5,55	2,50
240	28/8/2007	0,00	20,00	10	12,03	5,42
241	29/8/2007	0,00	15,00	7,5	12,06	5,43
242	30/8/2007	5,00	20,00	12,5	7,80	3,51
243	31/8/2007	8,00	23,00	15,5	7,59	3,42
244	1/9/2007	7,00	17,00	12	6,36	2,86
245	2/9/2007	10,00	18,00	14	7,35	3,31
246	3/9/2007	10,00	21,00	15,5	6,96	3,13
247	4/9/2007	10,00	28,00	19	6,96	3,13
248	5/9/2007	14,00	29,00	21,5	7,87	3,54
249	6/9/2007	13,00	27,00	20	8,21	3,69
250	7/9/2007	13,00	20,00	16,5	4,52	2,03
251	8/9/2007	12,00	28,00	20	10,57	4,76
252	9/9/2007	13,00	31,00	22	11,30	5,08
253	10/9/2007	14,00	31,00	22,5	11,95	5,38
254	11/9/2007	14,00	29,00	21,5	9,41	4,23
255	12/9/2007	14,00	27,00	20,5	8,85	3,98
256	13/9/2007	13,00	25,00	19	8,52	3,83
257	14/9/2007	12,00	24,00	18	5,98	2,69
258	15/9/2007	11,00	22,00	16,5	4,55	2,04
259	16/9/2007	12,00	19,00	15,5	5,14	2,31
260	17/9/2007	11,00	18,00	14,5	3,97	1,79
261	18/9/2007	10,00	15,00	12,5	1,65	0,743
262	19/9/2007	9,00	22,00	15,5	13,72	6,17
263	20/9/2007	8,00	15,00	11,5	2,14	0,96