

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

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO
DESENVOLVIMENTO FOLIAR EM MANDIOCA A
CAMPO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Flávia Kaufmann Samboranha

**Santa Maria, RS, Brasil
2012**

MODELAGEM MATEMÁTICA DO DESENVOLVIMENTO FOLIAR EM MANDIOCA A CAMPO

por

Flávia Kaufmann Samboranha

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

Orientador: Prof. Nereu Augusto Streck

**Santa Maria, RS, Brasil
2012**

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

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

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO DESENVOLVIMENTO FOLIAR EM
MANDIOCA A CAMPO**

elaborada por
Flávia Kaufmann Samboranha

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

A COMISSÃO EXAMINADORA:

Nereu Augusto Streck, PhD
(Presidente/Orientador)

Luciano Streck, Dr. (IFC- SOMBRIO)

Cleber Maus Alberto, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, 03 fevereiro de 2012.

A todos aqueles que sempre estiveram ao meu lado,
especialmente a minha família.
Dedico...

AGRADECIMENTOS

Agradeço

A todos os trabalhadores do campo e da cidade a oportunidade de realizar este trabalho, pois sei que é a partir dos seus esforços e contribuições que as instituições públicas de ensino, pesquisa e extensão se mantêm. Agradeço em especial aos agricultores por fazerem o seu trabalho e por receberem a ciência transformada em tecnologia aplicada ao seu dia a dia, esse é nosso compromisso enquanto estudantes e pesquisadores;

À Universidade Federal de Santa Maria por proporcionar a formação profissional e iniciação científica, a partir do ensino público, gratuito e de qualidade e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade da realização do mestrado;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de mestrado;

À minha família (os pais, irmãos, tios) pelo apoio, compreensão e admiração. Este esforço também é por vocês;

Aos colegas e amigos do Departamento de Fitotecnia, particularmente o pessoal da sala 02: Alencar, André, Luana, Isabel, Diego, Lilian, Josana, Gizelli, Hamilton, Lidiane e todos os demais não citados aqui, sintam-se lembrados com carinho e muita gratidão pela ajuda prestada até hoje;

Ao pessoal de campo, funcionários do Departamento de Fitotecnia, que na medida do possível colaboraram durante os cinco anos de experimentos de campo;

Ao orientador prof. Nereu Augusto Streck que me recebeu no grupo de pesquisa no início da graduação em agronomia, e possibilitou a realização de diversos trabalhos, incluindo este na pós-graduação. Agradeço pela orientação pelo apoio e confiança depositados e principalmente, a amizade para comigo;

Às amigas de tudo e todas, Tanise, Macarena e Greice, seja pelos momentos de discussão ou de diversão e alegria que compartilhamos;

Ao querido e amado Daniel, por ser este companheiro que nos últimos tempos tem dedicado atenção, carinho e incentivo moral e astral. Obrigada pelo seu amor!

A todos que não mencionei aqui, mas que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação, meu sincero agradecimento.

A lenda da mandioca

Em tempo muito antigo uma tribo da nação Guarani passava por dificuldades em encontrar e produzir alimentos, pois a roça não produzia o suficiente e a caça estava escassa.

O cacique da tribo Guarani tinha uma filha muito bondosa, pois aconteceu que um dia a jovem índia ficou grávida, sem ainda ser casada. Ao saber da notícia o cacique ficou furioso e a todo custo quis saber quem era o pai da criança. A jovem índia por sua vez, insistia em dizer que nunca havia namorado ninguém.

O cacique não acreditando na filha rogou aos deuses que punissem a jovem índia. Sua raiva por essa vergonha era tamanha que ele estava disposto a sacrificar sua filha. Porém, numa noite ao dormir o cacique sonhara com um homem que lhe dizia para acreditar na índia e não a punir.

Após os nove meses da gravidez, a jovem índia deu a luz a uma menina e deu-lhe o nome de Mani. Para espanto da tribo a criança era branca, muito branca e já nascera sabendo falar e andar. Passa o tempo, Mani então, com pouco mais de um ano morre de repente. Todos estranharam o fato, pois ela não havia ficado doente e nada diferente havia acontecido. A menina simplesmente deitou fechou os olhos e morreu. Toda a tribo ficou muito triste.

Mani foi enterrada dentro da própria oca onde sempre morou. Todos os dias sua mãe, a jovem índia regava o local da sepultura de Mani, como era tradição do seu povo.

Após algum tempo, algo estranho aconteceu. No local onde Mani foi enterrada começou a brotar uma planta desconhecida. Todos ficaram admirados com o acontecido. Resolveram, pois, desenterrar Mani, para enterrá-la em outro lugar. Para surpresa da tribo, o corpo da pequena índia não foi encontrado, encontraram somente as grossas raízes da planta desconhecida. A raiz era marrom, por fora, e branca por dentro. Após cozinhar e experimentar a raiz entenderam que se tratava de um presente do Deus Tupã.

A raiz de Mani veio para saciar a fome da tribo. Os índios deram o nome da raiz de Mani e como nasceu dentro de uma oca ficou Manioca, que hoje conhecemos como mandioca.

RESUMO

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

MODELAGEM MATEMÁTICA DO DESENVOLVIMENTO FOLIAR EM MANDIOCA A CAMPO

AUTORA: FLÁVIA KAUFMANN SAMBORANHA

ORIENTADOR: NEREU AUGUSTO STRECK

Data e local da defesa: Santa Maria, 03 de fevereiro de 2012

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma cultura importante em várias regiões do Brasil, por ter desempenho agrônomico satisfatório em solos com baixa fertilidade e baixa disponibilidade hídrica. Modelos matemáticos adaptados e testados em diferentes condições ambientais são ferramentas que permitem descrever as interações entre a planta e o ambiente. Neste estudo objetivou-se simular a emissão do número de folhas (NF) com dois modelos matemáticos, um que considera o efeito linear e outro que considera o efeito não linear da temperatura do ar sobre o aparecimento de folhas nas hastes da mandioca, considerando duas versões de cada modelo, uma versão com a temperatura média diária do ar (T_{med}) e outra com a temperatura mínima e máxima do ar (T_{mm}). O modelo linear é o modelo que utiliza o conceito do filocrono e o não-linear é o modelo de Wang; Engel (WE). Para estimar os coeficientes dos modelos foi usado um conjunto de dados de número de folhas acumuladas, na haste principal e na ramificação simpodial de primeira e segunda ordem (HP, RS1 e RS2) da variedade de mandioca “FEPAGRO RS 13”, coletados em experimentos conduzidos na área experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, RS, nos anos agrícolas 2005/2006 e 2007/2008 (em duas datas de plantio). A avaliação dos modelos foi realizada com dados independentes coletados no mesmo local nos anos agrícolas de 2006/2007, 2008/2009, 2009/2010 e 2010/2011, os quais tiveram distintas disponibilidades de precipitação pluviométrica. O modelo de WE proporcionou melhor estimativa para o número de folhas em mandioca, com valor de raiz do quadrado médio do erro de 3,2 e 3,5 folhas, comparado com o modelo do filocrono com 3,7 e 4,4 folhas para NF geral usando as versões de temperatura T_{med} e T_{mm} , respectivamente. Entre as versões dos dois modelos, por simplicidade pode-se usar a versão que usa a T_{med} , mas em regiões mais quentes sugere-se usar a versão que usa a temperatura mínima e máxima diárias do ar (T_{mm}).

Palavras-chave: *Manihot esculenta*, número de folhas, WE, filocrono, temperatura do ar.

ABSTRACT

Master of Science Dissertation
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

MATHEMATICAL MODELING OF LEAF DEVELOPMENT IN CASSAVA

AUTHOR: FLÁVIA KAUFMANN SAMBORANHA

ADVISOR: NEREU AUGUSTO STRECK

Location and date of presentation: Santa Maria, February 03th, 2012.

Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) is an important crop in several regions of Brazil for having good agronomic performance in soils with low fertility and low water availability. Mathematical models adapted and tested in different environmental conditions are tools to describe the interactions between plant and environment. The objective of this study was to simulate the leaf number (LN) with two mathematical models, one that considers the linear effect and one that considers the nonlinear effect of air temperature on leaf appearance on the stems of cassava. Considering two versions in each model, one version uses the daily mean temperature (T_{mean}) and the other uses the daily minimum and maximum temperature (T_{mm}). The linear model is the model that uses the concept of phyllochron and nonlinear model is the Wang; Engel (WE) model. Model coefficients were estimated from a data set of accumulated number leaves, on the main stem and on the sympodial first and second order branching (HP, RS1 and RS2) of the variety of cassava "Fepagro RS 13", collected in experiments conducted on the field area, Crop Science Department, Federal University of Santa Maria, Santa Maria, RS, Brazil, in the growing seasons 2005/2006 and 2007/2008. The evaluation of the models was performed with independent data collected in the same location in the growing seasons 2006/2007, 2008/2009, 2009/2010 and 2010/2011, with different rainfall availability. The WE model provided the best estimate of leaf number in cassava, with a root mean square error (RMSE) of 3.2 and 3.5 leaves, compared with the phyllochron model with 3.7 and 4.4 leaves for LN general utilizing temperature versions T_{mean} and T_{mm} , respectively. Among the versions of the models, for simplicity the versions that uses T_{mean} can be used, but in warmer regions the version that uses the daily minimum and maximum temperature (T_{mm}) is suggested.

Key words: *Manihot esculenta*, leaf number, WE, phyllochron, air temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de uma planta de mandioca, sendo HP a haste principal, RS1 a primeira ramificação simpodial, RS2 a segunda ramificação simpodial e RS3 a terceira ramificação simpodial.....	19
Figura 2 – Macrozoneamento agroecológico e econômico para o Estado do Rio Grande do Sul.....	20
Figura 3 – Duração, utilizando o método da soma térmica ($^{\circ}\text{C dia}$), das fases de desenvolvimento da mandioca, variedade Fepagro RS13, em quatro datas de plantio em Santa Maria, RS, Brasil.....	27
Figura 4 – Representação gráfica da resposta da emissão de folhas à temperatura do ar em mandioca no modelo linear (filocrono) e do modelo não linear (Wang; Engel) STd é a soma térmica diária ($^{\circ}\text{C dia}$) e f(T) é a função de temperatura do modelo Wang; Engel.....	32
Figura 5 – Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) da variedade de mandioca Fepagro RS13, pelos modelos do filocrono e de Wang; Engel, com duas versões de temperatura do ar (Tmed: A, B, E, F, I e J; Tmm: C, D, G, H, K e L) para os anos agrícolas 2006 a 2011. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.....	44
Figura 6 – Número de folhas (NF) observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) da variedade de mandioca Fepagro RS13, pelos modelos do filocrono e de Wang; Engel com duas versões de temperatura do ar (Tmed: A e B; Tmm: C e D) para os anos agrícolas 2006/2007 a 2010/2011. A linha cheia é a linha 1:1. O resíduo (NF simulado menos observado) versus o NF observado é apresentado nas inserções. Santa Maria, RS, 2012.....	48
Figura 7 – Evolução do número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), ramificação simpodial de primeira (RS1) e segunda ordem (RS2) da variedade de mandioca Fepagro RS13 para o ano agrícola 2009/2010. Santa Maria, RS, 2012. DAE= Dias após a emergência; DARS1= Dias após a ramificação simpodial de primeira ordem; DARS2= Dias após a ramificação simpodial de segunda ordem.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Efeito da temperatura do ar (°C) na planta de mandioca.....	25
Tabela 2 – Critérios para interpretação do desempenho dos modelos do filocrono e Wang; Engel pelo índice de confiança (c).....	37
Tabela 3 – Valores médios mensais de temperatura, mínima média e máxima do ar, radiação solar global e precipitação mensal acumulada e acumulado total durante o período de emissão de folhas na variedade de mandioca Fepagro RS13 nos anos agrícolas 2005/2006 a 2010/2011, em Santa Maria, RS.....	39
Tabela 4 – Valores dos coeficientes FILO (filocrono no modelo linear) e TAF _{max} (taxa máxima de aparecimento de folhas no modelo não linear de Wang; Engel) para a emissão de folhas em diferentes hastes da variedade de mandioca Fepagro RS13, em duas versões de temperatura, determinados com dados de número de folhas nos anos agrícolas de 2005/2006 e 2007/2008, em Santa Maria, RS.....	42
Tabela 5 – Valores do componente Sistemático (s) e Não Sistemático (ns) do QME para avaliar a simulação do número de folhas em diferentes hastes e considerando todas as hastes juntas da variedade de mandioca Fepagro RS13, com os modelos do filocrono e de Wang; Engel (WE) em duas versões de temperatura, usando os dados de número de folhas por haste nos anos agrícolas de 2006/2007 a 2010/2011, em Santa Maria, RS.....	45
Tabela 6 – Estatística E ₁₂ para avaliar a simulação do número de folhas em diferentes hastes e considerando todas as hastes juntas da variedade de mandioca Fepagro RS13, com os modelos do filocrono e de Wang; Engel (WE) em duas versões de temperatura do ar, usando todos os dados de número de folhas por haste nos anos agrícolas de 2006/2007 a 2010/2011, em Santa Maria, RS.....	46

LISTA DE ANEXOS

Anexo A – Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) pelo modelo do filocrono (A, B, C) e WE (D, E, F) na versão Tmed para o ano agrícola 2006/2007. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.....	65
Anexo B – Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) pelo modelo do filocrono (A, B, C) e WE (D, E, F) na versão Tmm para o ano agrícola 2006/2007. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.....	66
Anexo C – Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), pelo modelo do filocrono (A) e WE (B) na versão Tmed para o ano agrícola 2008/2009. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.....	67
Anexo D – Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), pelo modelo do filocrono (A) e WE (B) na versão Tmm para o ano agrícola 2008/2009. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.....	67
Anexo E – Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) pelo modelo do filocrono (A, B, C) e WE (D, E, F) na versão Tmed para o ano agrícola 2009/2010. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.....	68
Anexo F – Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) pelo modelo do filocrono (A, B, C) e WE (D, E, F) na versão Tmm para o ano agrícola 2009/2010. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.....	69
Anexo G – Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) pelo modelo do filocrono (A, B, C) e WE (D, E, F) na versão Tmed para o ano agrícola 2010/2011. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.....	70
Anexo H – Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) pelo modelo do filocrono (A, B, C) e WE (D, E, F) na versão Tmm para o ano agrícola 2010/2011. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABA	Ácido abscísico
c	Índice de confiança
DISME	Distrito de Meteorologia
dw	Índice de concordância
E ₁₂	Estatística E ₁₂
EM	Emergência
FILO	Coefficiente do modelo linear ou modelo do filocrono
[f(T)]	Função de resposta da TAF à temperatura do ar
IAA	Início de acumulação de amido
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
HP	Haste principal
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MAP	Meses após o plantio
NAR	Número de nós em soja
ns	Componente não sistemático
NF	Número de folhas
NFF	Número final de folhas
PL	Plantio
QMEs	Quadrado médio do erro sistemático
QMEns	Quadrado médio do erro não sistemático
r	Coefficiente de correlação
RS1	Primeira ramificação simpodial
RS2	Segunda ramificação simpodial
RS3	Terceira ramificação simpodial
RQME	Raiz do quadrado médio do erro
SAA	Secretaria de Agricultura e Abastecimento
s	Componente sistemático
ST	Soma térmica
STa	Soma térmica acumulada
STd	Soma térmica diária

STdT _N	Soma térmica diária calculada com a temperatura mínima diária do ar
STdT _X	Soma térmica diária calculada com a temperatura máxima diária do ar
T	Temperatura média diária do ar
TAF	Taxa de aparecimento de folhas
TAF _{max}	Taxa diária máxima de aparecimento de folhas
T _b	Temperatura base
T _{med}	Versão com a temperatura média diária do ar
T _{mm}	Versão com a temperatura mínima e máxima diária do ar
T _N	Temperatura mínima do ar
T _{ot}	Temperatura ótima
T _X	Temperatura máxima do ar
WE	Modelo de Wang; Engel

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivo Geral	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 A cultura da mandioca	18
2.1.1 Origem, caracterização botânica e morfológica	18
2.1.2 Zoneamento agroclimático da mandioca	20
2.2 Caracterização do crescimento e desenvolvimento vegetal em mandioca	21
2.3 Elementos meteorológicos que influenciam o crescimento e desenvolvimento da mandioca	22
2.3.1 Efeito da precipitação pluviométrica no crescimento e desenvolvimento da mandioca	23
2.3.2 Efeito da temperatura do ar no crescimento e desenvolvimento da mandioca	23
2.3.3 Efeito da temperatura do ar no crescimento e desenvolvimento da mandioca.....	24
2.4 Simulação do crescimento e desenvolvimento vegetal através de modelos matemáticos	27
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 Experimentos de campo para obtenção do NF em mandioca	29
3.2 Modelos matemáticos de emissão de folhas	31
3.2.1 Modelo do filocrono (linear)	32
3.2.2 Modelo de WE (não linear)	33
3.3 Estimativa dos coeficientes dos modelos do filocrono e de WE	34
3.4 Avaliação dos modelos do filocrono e de WE	35
3.4.1 Estatísticas para avaliação dos modelos do filocrono e de WE	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Resultados	38
4.1.1 Condições meteorológicas durante o período experimental	38
4.1.2 Coeficientes Filo e TAFMAX para a emissão de folhas em mandioca	41
4.1.3 Avaliação dos modelos filocrono e WE	42
4.2 Discussão	51
5. CONCLUSÕES	56
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
7. ANEXOS	65

1. INTRODUÇÃO

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) tem um papel importante na segurança alimentar nas regiões tropicais, sendo considerado um dos alimentos energéticos mais importantes nos trópicos (FAO, 2011). Em Gana, Nigéria, algumas ilhas da Indonésia e no Nordeste brasileiro, mais de 70% das calorias consumidas diariamente pela população são obtidas da mandioca (NASSAR; ORTIZ, 2007). Além da alimentação humana, a mandioca também é utilizada na alimentação animal e como matéria-prima para produtos agroindustrializados (INTERLICHE, 2002). E, devido ao elevado teor de amido nas suas raízes, a mandioca é uma cultura com bom potencial para produção de etanol (FUKUDA; OTSUBO, 2003). A mandioca é uma espécie rústica e tem desempenho agrônômico satisfatório em condições de solos com baixa fertilidade e em diferentes condições climáticas.

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de mandioca, atrás apenas da Nigéria (FAO, 2011). Foram produzidos no Brasil, na safra 2010, 24.354.001 t de raízes numa área de 1.773.300 ha, com uma produtividade média de aproximadamente 14 t ha⁻¹. Na safra de 2011 a previsão de colheita é de mais de 26 milhões de toneladas de raízes numa área de 2.208.733 ha, com uma produtividade média próxima a 15 t ha⁻¹ (IBGE, 2011). Esses valores de produtividade são bem abaixo do potencial produtivo que pode ir de 25 t ha⁻¹ até 60 t ha⁻¹ (COCK, 1990; FAO, 2001). O Estado do Pará é o maior produtor nacional de mandioca, em 2010 produziu 4.506.118 t, seguido pelo Paraná com 4.012.948 t, pela Bahia com 3.211.278 t e pelo Rio Grande do Sul (RS), que na safra de 2010 produziu cerca de 1.314.008 t (IBGE, 2011). No RS, a cultura da mandioca tem maior expressão nas pequenas propriedades rurais da região Norte e Depressão Central do Estado (FEPAGRO, 2005). A produtividade de raízes tuberosas a nível experimental em Santa Maria, Região Central do RS, tem sido de 30 a 36 t ha⁻¹ (SCHONS et al., 2009; FAGUNDES et al., 2010), bem acima da média do RS de 16 t ha⁻¹ em 2010 (IBGE, 2011).

Em mandioca a produção está vinculada ao acúmulo de reservas nas raízes da planta. Para isso, é necessário a emissão de folhas, que é um processo de desenvolvimento vegetal, que afeta a evolução do índice de área foliar da planta, o qual tem relação com a interceptação da radiação solar pelo dossel e com a fotossíntese. O desenvolvimento das plantas, como o acúmulo de folhas em uma haste, é afetado por fatores bióticos e abióticos (STRECK, 2002). Entre os fatores

abióticos, a temperatura do ar é considerada fator de maior influência no desenvolvimento vegetal (HODGES, 1991). O número de folhas acumuladas em uma haste da planta também é uma medida do tempo vegetal e está associado ao momento de ocorrência de estádios de desenvolvimento em várias culturas agrícolas (STRECK et al., 2003a,b; XUE et al., 2004). O cálculo da emissão de folhas é um importante componente em modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade de culturas agrícolas (HODGES, 1991), incluindo a mandioca (MATTHEWS; HUNT, 1994). Os modelos matemáticos são importantes ferramentas para estimar a ocorrência dos estádios de desenvolvimento das culturas, e a influência da temperatura sobre o desenvolvimento vegetal pode ser representada tanto por modelos lineares, como os que usam o conceito da soma térmica, como o modelo do filocrono, quanto por modelos não lineares, como o modelo de Wang; Engel (1998). Portanto, modelos matemáticos adaptados e testados em diferentes condições ambientais são ferramentas que permitem descrever as interações entre a planta e o ambiente, e podem ser usados em estudos de crescimento e desenvolvimento vegetal.

Para atender as considerações acima, este estudo baseia-se na hipótese de que, a resposta do desenvolvimento foliar em mandioca à temperatura é não linear e o uso de temperatura mínima e máxima diária do ar melhora a simulação da emissão de folhas em relação ao uso da temperatura média diária.

1.1 Objetivo geral

Contribuir para aumentar o conhecimento a respeito da dinâmica do desenvolvimento foliar com vistas a melhorar a simulação da emissão de folhas em mandioca.

1.2 Objetivos específicos

Calibrar e avaliar o desempenho do modelo de WE (não linear) e do modelo do filocrono (linear) e determinar qual destes simula mais adequadamente a emissão de folhas em mandioca, em cultivo a campo em ambiente subtropical no Rio Grande do Sul.

Avaliar o desempenho de duas versões dos modelos WE e filocrono, uma versão com a temperatura média diária do ar (Tmed) e outra com a temperatura mínima e máxima diária do ar (Tmm), para simulação da emissão de folhas em mandioca.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da mandioca

2.1.1 Origem, caracterização botânica e morfológica

Originária da América do Sul, mais especificamente da região sul da Amazônia (VAVILOV, 1926; LEOTARD et al., 2009). A mandioca pertence à família Euphorbiaceae (A. L. JUSSIEU), subfamília Crotonoideae, gênero *Manihot*. De acordo com a divisão taxonômica proposta por Allem (1994), a espécie *Manihot esculenta* Crantz pertence à subespécie *esculenta*, sendo as subespécies *flabellifolia* e *grandifolia* compostas por plantas silvestres. Segundo Carvalho (2006), as espécies pertencentes ao gênero *Manihot* são nativas de regiões tropicais, e um dos centros de diversidade concentra-se no Brasil.

A mandioca é uma planta de porte arbustivo, perene, de hábito indeterminado com armazenamento de carboidratos nas raízes. A principal forma de propagação da mandioca é a vegetativa, utilizando-se pedaços do caule denominados estacas ou manivas (CÂMARA; GODOY, 1998). A mandioca possui boa adaptação a solos ácidos, com baixa fertilidade e a regimes pluviométricos diversos com tolerância elevada à seca (EL-SHARKAWY; COCK; PORTO, 1989). As boas respostas agrônômicas obtidas por essa cultura em condições de fertilidade baixa são devido à sua eficiência em absorção de nutrientes, principalmente o fósforo (EMBRAPA, 2003). Apesar de ser uma espécie perene, dependendo do genótipo e das condições de cultivo, as raízes da mandioca podem ser colhidas com seis a 24 meses após o plantio (MAP). Em regiões de clima tropical e equatorial úmido, a colheita pode ser realizada entre seis e sete

MAP. Por outro lado, em regiões sujeitas a períodos prolongados de estiagem ou temperaturas baixas, a colheita normalmente é realizada após 18 a 24 meses (ALVES, 2006).

A planta de mandioca apresenta caule herbáceo nas plantas jovens e sublenhoso nas plantas adultas. No caule estão os nós de onde surgem as folhas lobadas, na axila de cada folha encontra-se uma gema. As gemas são responsáveis pela brotação na propagação vegetativa da espécie. O caule pode ser único (monopodial) ou pode apresentar ramificações (simpodial) em sua porção mediana ou superior. Possui inflorescências formadas por panículas e racemos compostas por flores masculinas e femininas, sendo estas últimas localizadas na parte basal da inflorescência (CARVALHO; FUKUDA, 2006). As plantas de mandioca propagadas vegetativamente possuem número de raízes variável, com origem nas extremidades das manivas, diferente das plantas reproduzidas por via sexuada que desenvolvem raiz primária pivotante (CARVALHO; FUKUDA, 2006).

A estrutura morfológica da planta de mandioca pode diferir de acordo com o genótipo, alguns apresentam o caule ereto (monopodial), enquanto outros possuem caule ramificado (simpodial) (Figura 1). São comuns ramificações dicotômicas (ramificação em dois ramos), tricotômicas (ramificação em três ramos) e tetracotômicas (ramificação em quatro ramos) (PEIXOTO, 1999; CARVALHO; FUKUDA, 2006).

Dependendo das condições ambientais, a planta de mandioca pode passar por um período dormente ou de repouso. As condições ambientais que levam a cultura da mandioca entrar em período de repouso são baixas temperaturas e déficit prolongado de água no solo (CONCEIÇÃO, 1983).

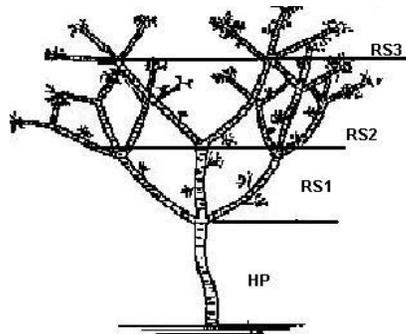


Figura 1. Estrutura de uma planta de mandioca, sendo HP a haste principal, RS1 a primeira ramificação simpodial, RS2 a segunda ramificação simpodial e RS3 a terceira ramificação simpodial.

2.1.2 Zoneamento agroclimático da mandioca

A época de plantio da mandioca varia entre as regiões do Brasil, sendo dependente principalmente, da temperatura e disponibilidade de precipitação pluviométrica. No Rio Grande do Sul recomenda-se o plantio nos meses de setembro a novembro (CARDOSO et al., 2008). De acordo com a Portaria nº130, de 02 de maio de 2011, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático por Unidade da Federação do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), Santa Maria é um dos municípios indicados para o plantio de mandioca no RS. O período recomendado para o plantio em Santa Maria inicia em 11 de setembro e acaba em 30 de novembro (MAPA, 2011). Já no zoneamento agroclimático da Secretária de Agricultura e Abastecimento e Embrapa (SAA-EMBRAPA, 1994), a Depressão Central onde está Santa Maria, é uma das regiões referidas como toleradas para o cultivo da mandioca no RS (Figura 2).

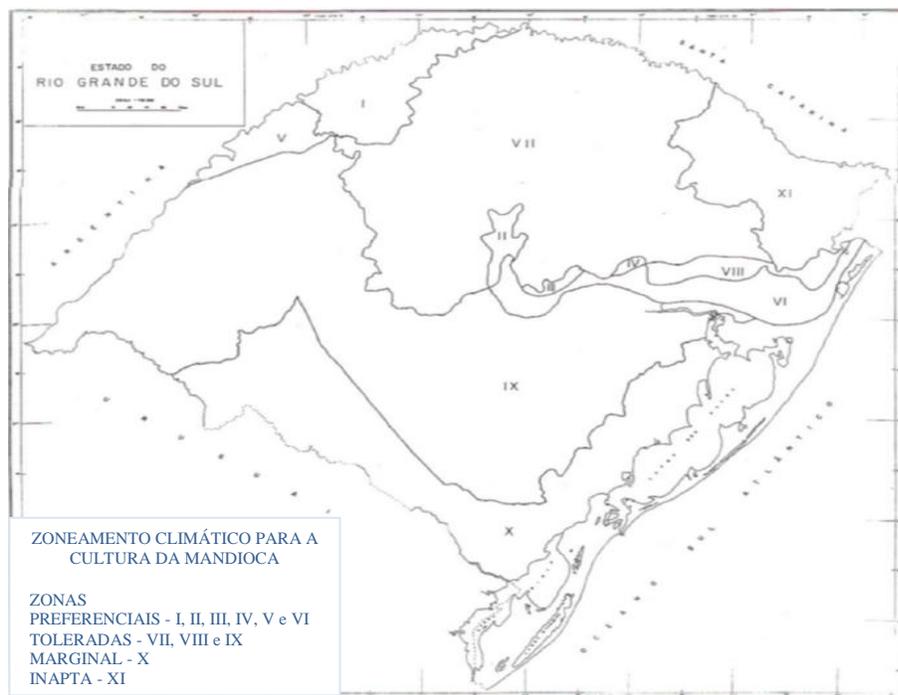


Figura 2. Macrozoneamento agroecológico e econômico da mandioca para o Estado do Rio Grande do Sul.

Fonte: Adaptado de SAA-Embrapa (1994).

2.2 Caracterização do crescimento e desenvolvimento vegetal em mandioca

O crescimento e desenvolvimento vegetal são processos independentes que podem ocorrer simultaneamente ou não, porém não são sinônimos. Enquanto o crescimento envolve aumento irreversível de dimensões físicas de um indivíduo ou órgão com o tempo, como exemplo, massa, área, comprimento, largura, altura ou diâmetro, o desenvolvimento refere-se à diferenciação celular, iniciação de órgãos (organogênese), aparecimento de órgãos (morfogênese) nas plantas durante o seu ciclo de vida (HODGES, 1991; WILHELM; McMASTER, 1995; STRECK et al., 2003b).

Em mandioca a determinação do crescimento vegetal pode ser obtida por variáveis, como altura da planta (a partir do nível do solo até a inserção da última folha da planta), comprimento final da haste principal e das hastes das ramificações simpodiais e através da área expandida de folhas. Em estudo realizado por Schons (2006), em Santa Maria, RS, a evolução da altura na variedade de mandioca Fepagro RS 13, seguiu uma variação sigmoideal, conforme a sucessão das ramificações simpodiais, em que o comprimento foi menor na haste principal (HP) e maior na haste da primeira ramificação simpodial (RS1).

O desenvolvimento vegetal pode ser determinado através da velocidade de emissão de folhas que, ao ser integrada no tempo, fornece o número de folhas visíveis (NF) nas hastes da planta de mandioca, sendo considerada uma variável importante do desenvolvimento vegetal (STRECK et al., 2003b; XUE et al., 2004; SCHONS et al., 2007). Da mesma forma, a variável número final de folhas (NFF) também é um parâmetro importante do desenvolvimento vegetativo em mandioca. Matthews; Hunt (1994) associam o NF com estádios de desenvolvimento nas plantas de mandioca, de modo que o aparecimento da primeira ramificação simpodial ocorre após um determinado NF na haste principal. O NF pode ser medido diretamente na planta, ou estimado através do conceito do filocrono.

O filocrono é uma variável bastante usada em estudos para caracterização do desenvolvimento vegetal, sendo definido como o intervalo de tempo entre o aparecimento de duas folhas sucessivas na haste da planta (KLEPPER; RICKMAN; PETERSON, 1982; WILHELM; McMASTER, 1995; STRECK et al., 2005a; SCHONS et al., 2007). Geralmente a unidade de tempo no filocrono é com base na soma térmica, uma das abordagens mais usadas

para representar o efeito da temperatura sobre o desenvolvimento vegetal e neste caso o filocrono tem como unidade $^{\circ}\text{C dia folha}^{-1}$. O filocrono para a variedade de mandioca FEPAGRO RS 13 varia com a época de plantio da cultura (SCHONS et al., 2007; FAGUNDES et al., 2009). Nesta mesma variedade, que apresenta ramificações (Figura 1), a velocidade de emissão de folhas, NF e o NFF nas hastes podem diminuir à medida que surgem as ramificações simpodiais de primeira ordem (RS1), de segunda ordem (RS2) e de terceira ordem (RS3), já o filocrono aumenta na medida em que novas ramificações são formadas na planta (FAGUNDES et al., 2009).

2.3 Elementos meteorológicos que influenciam o crescimento e desenvolvimento da mandioca.

A planta de mandioca possui capacidade de adaptação em diferentes ambientes, sendo possível ser cultivada em todas as regiões do País. A mandioca é cultivada entre 30 graus de latitudes Norte e Sul, no entanto a cultura tem melhor desempenho agrônômico em baixas latitudes (15° N e 15° S), onde as condições climáticas são mais favoráveis para o cultivo (CONCEIÇÃO, 1983; ALVES, 2006). Dependendo das condições ambientais (baixas temperaturas e déficit prolongado de água no solo), a planta de mandioca pode passar por um período dormente ou de repouso (CONCEIÇÃO, 1983; ALVES, 2006).

A mandioca é cultivada principalmente em áreas consideradas marginais para a agricultura, com uso de pouca tecnologia em solos de baixa fertilidade, em regiões semiáridas e tropicais úmidas (ALVES, 2002; ALVES, 2006). Suporta altitudes que variam desde o nível do mar até cerca de 2300 metros, sendo mais favorável o cultivo em regiões de baixas altitudes ou em altitudes entre 600 a 800 metros (SOUZA; SOUZA, 2000; EMBRAPA, 2003). Assim, a mandioca está sujeita a condições variadas de fotoperíodo, radiação solar, temperatura e disponibilidade hídrica.

2.3.1 Efeito do fotoperíodo e da radiação solar no crescimento e desenvolvimento da mandioca

O fotoperíodo ideal para a mandioca está em torno de 12 horas, o fotoperíodo longo favorece o crescimento da parte aérea e reduz o crescimento das raízes tuberosas, enquanto que, o fotoperíodo curto tem efeito inverso (ALVES, 2006), promove o crescimento das raízes e reduz o crescimento dos ramos. Este elemento tem importância em cultivos na Região Sul do Brasil, onde o fotoperíodo varia entre as estações do ano (FAGUNDES et al. 2009), enquanto que nas Regiões Norte e Nordeste a variação é muito pequena, não afetando a cultura (SOUZA; SOUZA, 2000).

Em mandioca, a competição por luz pode ser verificada entre plantas de uma população e quando ocorre o auto-sombreamento, considerando a posição das folhas na planta (MATTOS, 2006). A planta necessita de alta disponibilidade de radiação solar para o crescimento, desenvolvimento, produção e acumulação de carboidratos nas raízes de reserva (CONCEIÇÃO, 1983; EL-SHARKAWY, 2004). A disponibilidade de radiação solar é fundamental para aumentar a eficiência da fotossíntese, visto que o sombreamento promove uma limitação desse processo, diminuindo o crescimento das raízes de reserva para compensar a produção de parte aérea, já que há uma redução na longevidade das folhas (ALVES, 2006).

2.3.2 Efeito da precipitação pluviométrica no crescimento e desenvolvimento da mandioca

Considera-se que a planta de mandioca apresenta maior tolerância ao baixo teor de água no solo, quando comparada com outras culturas (CONCEIÇÃO, 1983; ALVES, 2006). Durante o seu ciclo de desenvolvimento, a mandioca não possui um período crítico, quando os efeitos do estresse hídrico são mais severos (EL-SHARKAWY; COCK; PORTO, 1989). Porém o suprimento de água para a planta de mandioca é essencial nas fases de enraizamento e tuberização, que vão do primeiro ao quinto mês após o plantio. Precipitações pluviométricas distribuídas num período de seis a oito meses durante o ano são consideradas ideais, principalmente nos primeiros três meses do ciclo (CONCEIÇÃO, 1983). Entretanto, em algumas

condições extremas, a mandioca pode se desenvolver e produzir com precipitações que vão de 500 até 3000 mm anuais (ALVES, 2002; ALVES, 2006).

As precipitações pluviométricas anuais devem estar entre 1000 a 1500 mm com suprimento adequado de água para os primeiros 90 dias do ciclo da cultura, mas em alguns locais pode produzir raízes tuberosas com menos de 600 mm ano⁻¹ (CONCEIÇÃO, 1983; EL-SHARKAWY; COCK; PORTO, 1989; ALVES, 2006). No entanto, a cultura não suporta excesso de umidade no solo em nenhuma fase do ciclo de desenvolvimento (SOUZA; SOUZA, 2000).

Nas plantas em geral, a deficiência hídrica limita a dimensão de folhas individuais, o número de folhas das plantas, e o crescimento dos caules e ramos (TAIZ; ZEIGER, 2004). Em mandioca, a tolerância à deficiência hídrica ocorre por mecanismos de redução da transpiração e da manutenção da condição hídrica na planta, através da redução da área foliar (EL-SHARKAWY; COCK, 1987; EL-SHARKAWY; COCK; PORTO, 1989). Este mecanismo tem influência de hormônios vegetais, pois o aumento da concentração de ácido abscísico (ABA) nas folhas estimula o crescimento radicular, restringe o crescimento de ramos e a expansão foliar (ALVES, 2006), a redução do crescimento foliar e o fechamento estomático estão relacionados à habilidade da mandioca em sintetizar e acumular ABA já no início do período do déficit (ALVES; SETTER, 2000). Ainda, o sistema radicular da mandioca bem desenvolvido e profundo, possibilita a exploração de um grande volume de solo para absorção de água (EL-SHARKAWY; COCK; PORTO, 1989; ALVES; SETTER, 2000).

2.3.3 Efeito da temperatura do ar no crescimento e desenvolvimento da mandioca

O desenvolvimento das plantas é afetado por fatores bióticos e abióticos (STRECK, 2002). Entre os fatores abióticos, a temperatura do ar é o fator que mais influencia o desenvolvimento das plantas (HODGES, 1991). A temperatura do ar afeta o crescimento e o desenvolvimento da cultura da mandioca, as brotações da maniva e o tamanho das folhas. O crescimento é beneficiado quando a temperatura média anual varia de 25°C a 29°C, podendo tolerar temperaturas de 16°C a 38°C (SOUZA; SOUZA, 2000; ALVES, 2006).

Condições adversas de temperatura durante a estação de crescimento levam a planta a ter alterações de ordem fisiológica, como a paralisação do crescimento, como acontece em cultivos em regiões subtropicais, porém há cultivares com maior capacidade de adaptação às baixas temperaturas (SANGOI; KRUSE, 1993). Temperaturas baixas podem atrasar a emergência, reduzir a taxa de aparecimento de folhas, a taxa de crescimento foliar e o peso seco das raízes (Tabela 1) (CONCEIÇÃO, 1983; SOUZA; SOUZA, 2000; ALVES, 2002). Porém, temperaturas superiores a 30°C reduzem a longevidade das folhas (ALVES, 2002). As temperaturas foliares situadas entre 25 a 35°C proporcionam altas taxas fotossintéticas para cultivares de diferentes habitats, sendo máximas com temperaturas foliares entre 32 a 37 °C sob condições de alta radiação solar (EL-SHARKAWY; COCK; PORTO, 1989). Variedades diferentes respondem de maneira diferente a temperatura, podendo algumas apresentar maior produtividade em temperaturas mais elevadas em relação a outras (IRIKURA et al., 1979).

Tabela 1. Efeito da temperatura do ar (°C) na planta de mandioca.

	Efeitos fisiológicos	Referência
Temperatura do ar (°C)		
< 17 ou > 37	Emergência comprometida	(KEATING; EVENSON, 1979)
<17	Redução da taxa de produção de folhas e raiz	(COCK; ROSAS, 1975)
16 a 38	Tolera crescimento	(COCK, 1984)
15 a 24	As folhas permanecem na planta por até 200 dias	(IRIKURA et al., 1979)
>24	Período de vida da folha é de 120 dias	(SPLITTSTOESSER; TUNYA, 1992)
25 a 29	Favorável para crescimento das plantas	(CONCEIÇÃO, 1979)
28,5 a 30	Emergência mais rápida	(KEATING; EVENSON, 1979)
30 a 40	Maiores taxas de fotossíntese no campo	(EL-SHARKAWY et al., 1992)
Temperatura foliar (°C)		
15 a 25	Maiores taxas fotossintéticas	(MAHON et al., 1977)
25 a 35	Mais altas taxas fotossintéticas	(EL-SHARKAWY et al., 1989)
32 a 37	Máxima taxa fotossintética sob condições de alta radiação solar	(EL-SHARKAWY et al., 1989)

Fonte: Adaptada de Alves (2002).

A brotação das gemas é favorecida com temperatura do solo em torno de 28 a 30°C, porém cessa em temperaturas do solo superiores a 37 °C e inferiores de 17°C (EL-SHAKAWY, 2004). Assim, a temperatura do ar afeta o ciclo de desenvolvimento da planta desde o estabelecimento da cultura, a partir da brotação das gemas, visto que a temperatura do solo é uma função da temperatura do ar e das condições atmosféricas atuantes.

O ciclo de desenvolvimento vegetal é composto por diferentes fases. Em mandioca a duração dessas fases é dependente dos genótipos, das condições do ambiente e das práticas culturais (ALVES, 2006). De maneira geral, Conceição (1983) divide o ciclo de desenvolvimento da planta de mandioca em cinco fases, a partir do plantio:

- Primeira fase: duração de aproximadamente 15 dias. Período de brotação das manivas. Em cinco a sete dias após o plantio (DAP) surgem as primeiras raízes na base da maniva. As primeiras folhas surgem a partir do décimo dia do ciclo;
- Segunda fase: duração 70 a 80 dias. Aos 30 DAP tem início a fotossíntese e expansão da área foliar e as raízes absorventes são formadas alcançando maiores profundidades no solo. Aos 60 DAP as raízes passam a acumular reservas;
- Terceira fase: de 90 a 180 DAP. Esta fase caracteriza-se pelo crescimento vegetativo intenso com desenvolvimento da parte aérea, onde as folhas têm duração na planta de 60 a 120 dias;
- Quarta fase: duração aproximada de seis meses (180 a 300 DAP). Fase de enchimento das raízes de reserva. Os ramos tornam-se mais lignificados e há mais translocação de carboidratos das folhas para as raízes. Aumento da senescência e foliar e da taxa de queda das folhas;
- Fase de repouso ou dormência: a partir dos 300 DAP, tem duração variável, conforme a estação seca ou fria, após isso a planta reinicia o ciclo de crescimento. O ciclo completo, com doze meses, pode ser seguido por um novo período de crescimento vegetativo (espécie perene).

As fases de desenvolvimento utilizando a soma térmica para a variedade de mandioca Fepagro RS13, nas condições de Santa Maria, RS, foi proposta por Fagundes (2009) com algumas modificações em relação ao proposto por Conceição (1983) (Figura 3).

Para levar em conta o efeito da temperatura no ciclo de desenvolvimento da mandioca a abordagem da soma térmica tem sido bastante usada. Os primeiros estudos relacionados à soma

térmica são creditados a René A. F. de Réaumur (França, século XVIII) (PEREIRA et al., 2002). A soma térmica tem como unidade graus-dia ($^{\circ}\text{C}$ dia). O conceito de graus-dia como medida do tempo biológico tem sido aplicado a plantas e insetos (ARNOLD, 1960; STRECK, 2002). Como vantagem da soma térmica tem-se a simplicidade de cálculo da maioria dos métodos de determinação dos $^{\circ}\text{C}$ dia, os quais são considerados melhores descritores de tempo biológico do que os dias do calendário civil (GILMORE; ROGERS, 1958; McMASTER; SMIKA, 1988). No entanto, a soma térmica recebe críticas, pois na maioria dos métodos de cálculo é assumida uma resposta linear do desenvolvimento à temperatura, o que não é completamente realístico do ponto de vista biológico (XUE et al., 2004).

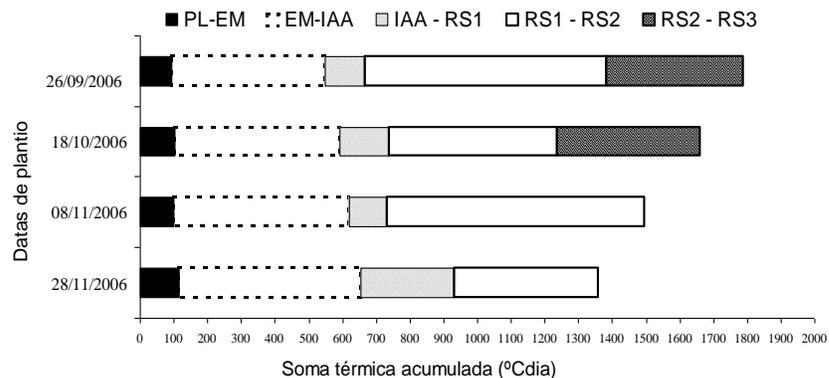


Figura 3. Duração, utilizando o método da soma térmica ($^{\circ}\text{C}$ dia), das fases de desenvolvimento da mandioca, variedade Fepagro RS13, em quatro datas de plantio em Santa Maria, RS, Brasil. PL= Plantio, EM = Emergência, IAA = início de acumulação de amido, RS1 = ramificação simpodial de primeira ordem, RS2 = ramificação simpodial de segunda ordem, RS3 = ramificação simpodial de terceira ordem. Temperatura base utilizada 14°C .

Fonte: Fagundes et al. (2010).

2.4 Simulação do crescimento e desenvolvimento vegetal através de modelos matemáticos.

A produtividade é o resultado do crescimento e desenvolvimento durante o ciclo da cultura. Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade têm sido propostos para várias culturas, inclusive a mandioca (COCK et al., 1979; MATTHEWS; HUNT, 1994; GRAY, 2000). Então, a simulação do desenvolvimento das culturas agrícolas é importante em

modelos de crescimento e rendimento, uma vez que a partição dos fotoassimilados para diferentes órgãos da planta é dependente do estágio de desenvolvimento (STRECK et al., 2003a,b). Modelos de simulação do desenvolvimento também podem ajudar, na seleção de cultivares no melhoramento vegetal e em práticas de manejo das culturas agrícolas, como adubação, controle fitossanitário e a colheita (STRECK et al., 2003a,b).

Modelos matemáticos são uma simplificação da realidade, que descrevem as complexas interações existentes em agroecossistemas e, assim, torna possível o estudo do efeito dos elementos meteorológicos sobre os agroecossistemas. Existem vários modelos de simulação de rendimento das culturas agrícolas disponíveis na literatura, desde os mecanísticos de elevada complexidade e número de coeficientes até modelos empíricos simples.

A resposta de processos biológicos à temperatura é melhor descrita de forma não linear, considerando-se as temperaturas cardinais (mínima, ótima e máxima) de desenvolvimento, sendo linear apenas em uma faixa entre a temperatura mínima e a temperatura ótima (STRECK, 2002; 2003; 2004a). A abordagem da soma térmica tem recebido crítica porque as temperaturas cardinais geralmente são consideradas constantes ao longo do ciclo da cultura, mas, há estudos que comprovam que as temperaturas não são constantes durante o ciclo de desenvolvimento para várias espécies (STRECK et al., 2003a; PAULA et al., 2005). Além disso, a soma térmica tem sido criticada também, pelo fato de que existem vários métodos de cálculo (STRECK et al., 2005a,b). Uma alternativa ao método da soma térmica são os modelos multiplicativos e que empregam funções de resposta não lineares para representar o efeito dos fatores ecológicos (como a temperatura) sobre o desenvolvimento vegetal. Um exemplo destes modelos é o modelo de WANG; ENGEL (1998) (WE).

A emissão de folhas é um processo do desenvolvimento vegetal que afeta a evolução do índice de área foliar da planta, o qual tem relação direta com a interceptação da radiação solar pelo dossel, fotossíntese e o crescimento de diversos órgãos da planta. Ao se integrar a taxa de emissão de folhas tem-se o número de folhas acumulados (NF) em uma haste, considerada uma excelente medida do tempo vegetal (HODGES, 1991; STRECK et al., 2003a,b; XUE et al., 2004). Portanto, o cálculo da emissão de folhas é um importante componente em modelos de simulação do crescimento e produtividade de culturas agrícolas (HODGES, 1991), incluindo mandioca (MATTHEWS; HUNT, 1994).

O NF pode ser estimado por meio da taxa de aparecimento de folhas (TAF). A TAF pode ser estimada através do conceito do filocrono, definido anteriormente (intervalo de tempo para o surgimento de folhas sucessivas em uma haste), o qual tem base na soma térmica. Outra forma de estimar a TAF é através de modelos multiplicativos como o modelo WE. No modelo do filocrono pressupõe-se uma relação linear entre TAF e temperatura do ar (XUE et al., 2004). No modelo de WE, a função de resposta da TAF a temperatura do ar $[f(T)]$ é não linear e descrita por uma função beta (WANG; ENGEL, 1998). A $f(T)$ é multiplicada pela taxa máxima de aparecimento de folhas e por meio dessa multiplicação calcula-se a taxa atual de aparecimento das folhas (XUE et al., 2004).

Estudos indicaram que o modelo de WE (não linear) estima melhor o NF do que o modelo do filocrono (modelo linear) em diversas culturas, como melão (STRECK, 2002), kiwi (STRECK, 2003), trigo (XUE et al., 2004), crisântemo (STRECK, 2004b), batata (STRECK et al., 2007), arroz (STRECK et al., 2008a), milho (STRECK et al., 2008b) e mudas de eucalipto (MARTINS; STRECK, 2007). Em mandioca, o modelo de WE ainda não foi calibrado nem testado e, portanto a comparação com o modelo do filocrono ainda não realizada, o que constituiu a motivação para este estudo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Experimentos de campo para obtenção do NF em mandioca

Os dados de emissão de folhas na cultura da mandioca variedade Fepagro RS13, foram coletados em experimentos de campo conduzidos na área experimental do Departamento de Fitotecnia, Centro de Ciências Rurais, da Universidade Federal de Santa Maria (latitude: 29°43'S; longitude: 53°43'W; altitude: 95m), nas safras agrícolas 2005/2006, 2006/2007, 2008/2009, 2009/2010 e 2010/2011. O solo do local é uma transição entre a Unidade de Mapeamento São Pedro (Argissolo Vermelho distrófico arênico) e a Unidade de Mapeamento Santa Maria (Alissolo Hipocrômico argilúvico típico) (STRECK et al., 2008). Segundo a classificação de Köppen o clima é do tipo Cfa, subtropical úmido com verões quentes e sem

estação seca definida (MORENO, 1961), com temperatura média anual de 18,8 °C e precipitação total anual de 1686,1mm.

No experimento no ano agrícola 2005/2006 o delineamento experimental foi blocos ao acaso com 12 tratamentos e três repetições. O espaçamento de 0,8 m x 0,8 m em fileiras simples totalizou a densidade de 16 mil plantas ha⁻¹. Mais detalhes podem ser obtidos em Schons et al. (2007; 2009).

Em 2006/2007, o experimento consistiu em determinar o filocrono e o número final de folhas na haste principal e nas ramificações simpodiais da mandioca em quatro épocas de plantio (26/09/2006, 18/10/2006, 08/11/2006 e 28/11/2006) no delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (datas de plantio). Mais detalhes em Fagundes et al. (2009).

No ano agrícola 2007/2008 dois experimentos foram conduzidos em duas datas de plantios diferentes. O primeiro experimento com delineamento em blocos ao acaso com dois tratamentos, cultivo de um ciclo e de dois ciclos de crescimento, e quatro repetições. Cada parcela (unidade experimental) teve espaçamento de 0,8 m x 0,8 m, com uma população de 16 mil plantas ha⁻¹. Para este estudo foram utilizados apenas os dados de número de folhas tomados no tratamento de um ciclo de crescimento, em que o plantio foi realizado em 17/09/2007. O segundo experimento foi conduzido em esquema bi-fatorial com delineamento blocos ao acaso, com quatro repetições. O fator A foi número de gemas por maniva, com quatro níveis (4, 7, 10 e 13 gemas), e o fator D foi diâmetro da maniva, com três níveis (classes de 1 a 2 cm, 2 a 3 cm e 3 a 4 cm), no total foram 12 tratamentos repetidos uma vez em cada bloco. O espaçamento usado nas unidades experimentais foi equidistante de 0,8 m x 0,8 m, com a densidade de 16 mil de plantas ha⁻¹. O plantio foi realizado em 03/10/2007.

No ano agrícola 2009/2010, o experimento foi conduzido em blocos ao acaso com cinco blocos e quatro tratamentos (diferentes espaçamentos: 0,8 m x 0,8 m; 1 m x 1 m; 1,2 m x 1,2 m e 1,5 m x 1,5 m). Porém, neste estudo foram utilizados apenas os dados de NF referentes ao espaçamento de 0,8 m x 0,8 m (densidade de 16 mil plantas ha⁻¹). O plantio foi realizado em 24/09/2009.

No experimento de 2010/2011, o plantio foi realizado em 06/10/2010 no delineamento blocos ao acaso com cinco repetições. Os tratamentos foram quatro variedades de mandioca (Cascuda, Estrangeira, Fepagro RS13 e Fepagro RS14). A densidade de plantas foi de 16 mil

plantas ha^{-1} , no espaçamento de 0,8 m x 0,8 m em fileiras simples. Neste estudo foram utilizados apenas os dados de NF da variedade Fepagro RS13.

O preparo do solo em todos os experimentos foi realizado de forma convencional e a adubação seguiu a recomendação técnica para a cultura da mandioca, feita a partir de análise de solo (CQFSRS/SC, 2004) nos diferentes experimentos. Os tratos culturais, como controle de insetos, doenças e plantas invasoras, foram realizados sempre que necessário, de forma a evitar o estresse por estes fatores e assim, tem-se o mesmo manejo realizado nos anos agrícolas anteriores.

Os dados diários de temperatura mínima (TN) e máxima (TX) do ar e de precipitação pluviométrica foram coletados na Estação Climatológica Principal do 8º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (DISME/INMET), localizada no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, a aproximadamente 100m da área experimental.

A metodologia utilizada foi a mesma em todos os anos agrícolas, e consistiu em contar uma vez por semana, o número de folhas acumuladas na HP, na RS1 e RS2 nas plantas marcadas; determinar a data de aparecimento da RS1, RS2 e da RS3 e o número final de folhas na HP e nas ramificações RS1 e RS2 nas plantas marcadas. O NF nas hastes da mandioca foi coletado em todos os experimentos, a partir do critério estabelecido por Schons et al. (2007), em que uma folha foi considerada visível quando as bordas de um dos lóbulos desta folha não mais se tocarem.

3.2 Modelos matemáticos de emissão de folhas

Dois modelos foram utilizados para estimar a emissão de folhas nas hastes (HP, RS1 e RS2) da mandioca, sendo: o modelo do filocrono, que é linear e usa o conceito da soma térmica e ; e o modelo de WE, que é um modelo não linear multiplicativo. A representação gráfica dos dois modelos de emissão de folhas (linear e não linear) está demonstrada na Figura 4. Em cada modelo foram usadas duas versões: uma versão com a temperatura média diária do ar (T) e uma versão com a temperatura mínima (TN) e máxima (TX) diárias do ar.

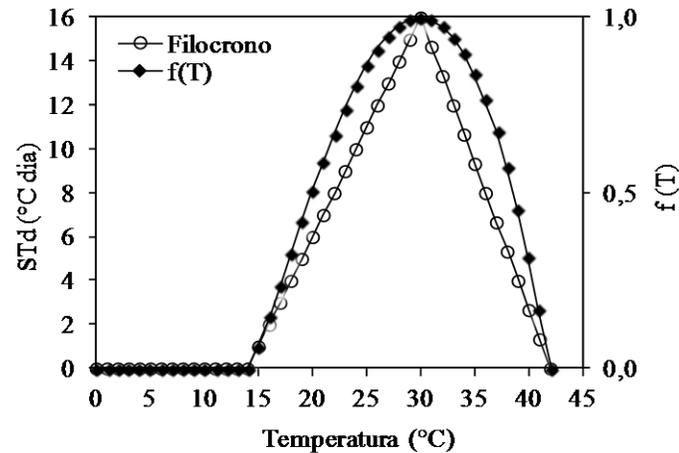


Figura 4- Representação gráfica da resposta da emissão de folhas à temperatura do ar em mandioca no modelo linear (filocrono) e do modelo não linear (Wang; Engel). STd é a soma térmica diária (°C dia) e f(T) é a função de temperatura do modelo WE.

3.2.1 Modelo do filocrono (linear)

Visando facilitar o entendimento, tem-se a descrição usual do modelo linear de emissão de folhas, o modelo do filocrono (FILO) com base no conceito da soma térmica. Em seguida foram descritas as versões de temperatura utilizadas no modelo do filocrono.

A soma térmica diária (STd, °C dia) é calculada por (GILMORE; ROGERS, 1958; ARNOLD, 1960; STRECK et al., 2007; 2008 a,b):

$$STd = (T - T_b) \cdot 1 \text{ dia} \quad \{^{\circ}\text{C dia}\} \quad (1)$$

quando a $T_b < T \leq T_{ot}$ e,

$$STd = (T_{ot} - T_b) \cdot (T_{max} - T) / (T_{max} - T_{ot}) \cdot 1 \text{ dia} \quad \{^{\circ}\text{C dia}\} \quad (2)$$

quando $T_{ot} < T \leq T_{max}$, em que T_b , T_{ot} e T_{max} são as temperaturas cardinais para aparecimento de folhas em mandioca (°C). $T_b = 14$ °C (SCHONS et al., 2007), $T_{ot} = 30$ °C, $T_{max} = 42$ °C (MATTHEWS; HUNT, 1994), e T temperatura média diária do ar (°C).

A soma térmica acumulada (STa) é calculada por:

$$STa = \sum STd \quad \{^{\circ}\text{C dia}\} \quad (3)$$

sendo $\sum STd$, o somatório das somas térmicas diárias.

O filocrono ($^{\circ}\text{C dia folha}^{-1}$) foi estimado como sendo o inverso do coeficiente angular “a” da regressão linear (KLEPPER; RICKMAN; PETERSON, 1982; XUE et al., 2004) entre número de folhas nas hastes da planta de mandioca (NFHP, NFRS1 e NFRS2) e a STa a partir da data da emergência ou a partir das datas de surgimento das ramificações simpodiais na planta.

O número de folhas (NF) é calculado por (STRECK et al., 2007; 2008a):

$$\text{NF} = \text{STa} / \text{FILO} \quad \{\text{folhas}\} \quad (4)$$

As duas versões do modelo do filocrono usadas neste estudo referem-se a maneira como a temperatura do ar (T) foi usada no cálculo da STd nas equações (1) e (2): versão FILOT_{med}, em que T é a temperatura média diária do ar calculada pela média aritmética entre a temperatura mínima (TN) e a temperatura máxima (TX) diária do ar; versão FILOT_{mm}, a STd é calculada com a TMIN (STdT_N) e com a TMAX (STdT_X), em sequência calcula-se a média aritmética entre STdT_N e STdT_X. Após, calculados as STd, a STa e o NF são calculados para cada versão do modelo do filocrono com as equações (3) e (4). Na Figura 4 está a representação gráfica do modelo do filocrono.

3.2.2 Modelo de WE (não linear)

O modelo de WE (WANG; ENGEL; 1998) foi primeiramente proposto para estimar a taxa diária de aparecimento de folhas (TAF) em trigo. O modelo de WE já foi modificado e adaptado para simulação do aparecimento de folhas em outras culturas agrícolas e florestais (STRECK et al., 2007; 2008 a,b; MARTINS; STRECK, 2008). O modelo de WE utiliza uma função de resposta não linear de temperatura [f(T)], multiplicado pela taxa diária máxima de aparecimento de folhas (TAF_{max}). A TAF_{max} ocorre quando a temperatura do ar é igual à temperatura ótima da espécie, para mandioca T_{ot} é 30 $^{\circ}\text{C}$.

A seguir tem-se a descrição usual do modelo não linear, e abaixo são apresentadas as versões de temperatura usadas neste estudo.

O modelo WE tem a forma geral:

$$\text{TAF} = \text{TAF}_{\text{max}} f(\text{T}) \quad (5)$$

em que TAF_{max} é a taxa diária máxima de aparecimento de folhas (folhas dia⁻¹).

A função de resposta à temperatura $f(T)$ é uma função beta que varia de zero a um. Para valor igual a zero não há desenvolvimento, e quanto mais próximo de um maior é a taxa de aparecimento de folhas. A $f(T)$ é definida como (WANG; ENGEL, 1998; STRECK, 2002; 2003).

$$f(T) = [2(T-T_b)^\alpha(T_{ot}-T_b)^\alpha - (T-T_b)2^\alpha] / (T_{ot}-T_b)2^\alpha \quad (6)$$

quando $T_b \leq T \leq T_{max}$

$$f(T) = 0$$

quando $T < T_b$ ou $T > T_{max}$

O coeficiente α é definido como:

$$\alpha = \ln 2 / \ln [(T_{max}-T_b)/(T_{ot}-T_b)] \quad (7)$$

em que T_b , T_{ot} e T_{max} são as temperaturas cardinais para TAF e T é a temperatura média diária do ar. As temperaturas cardinais da mandioca na $f(T)$ do modelo WE são as mesmas do modelo do filocrono, ou seja: $T_b = 14$ °C, $T_{ot} = 30$ °C e $T_{max} = 42,0$ °C. A representação gráfica da $f(T)$ no modelo não linear está na Figura 4.

Para calcular o NF no modelo de WE, somam-se os valores diários de TAF, a partir da data de emergência ou das ramificações simpodiais (RS1 e RS2) da mandioca. O NF é calculado por (WANG; ENGEL, 1998; STRECK et al., 2003b):

$$NF = \sum TAF \quad \{\text{folhas}\} \quad (8)$$

Assim como no modelo do filocrono, consideraram-se duas versões no modelo de WE: a versão WETmed considera a temperatura T usada no cálculo da $f(T)$ nas equações (6) e (7), como a média diária calculada pela média aritmética da T_N e T_X ; e versão WETmm em que a $f(T)$ é calculada com a T_N e com a T_X e após, calculou-se a média aritmética das duas $f(T)$ s.

3.3 Estimativa dos coeficientes dos modelos do filocrono e de WE

Os coeficientes “FILO” (equação 4) e “TAFmax” (equação 5) são dependentes do genótipo e foram estimados com dados de números de folhas acumuladas (NF) na HP e nas ramificações simpodiais RS1 e RS2 da variedade de mandioca Fepagro RS 13, coletados em experimentos realizados área experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, nas safras agrícolas 2005/2006 e 2007/2008 (em duas datas de plantio).

No experimento de 2005/2006 o plantio foi realizado em 27/09/2005 e mais detalhes podem ser obtidos em Schons et al. (2009). No experimento de 2007/2008 a primeira data de plantio foi em 17/09/2007 e a segunda data em 03/10/2007.

Na determinação do “FILO” calculou-se o filocrono para cada conjunto de dados nos anos agrícolas e, fez-se a média aritmética dos valores de filocrono obtidos para cada haste da planta (HP, RS1 e RS2) em duas versões (T_{med} e T_{mm}). Na determinação da “TAF_{max}” das duas versões do modelo de WE, utilizou-se o método dos mínimos quadrados, que procura o melhor ajustamento para um conjunto de dados minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados (resíduos) (STRECK et al., 2007).

A análise estatística constou de análise de variância e teste de Tukey a 5% de probabilidade para testar a diferença de Filo e TAF_{max} entre HP, RS1 e RS2 em cada versão dos modelos (T_{med} e T_{mm}).

3.4 Avaliação dos modelos do filocrono e de WE

Para avaliar o desempenho dos modelos foram utilizados dados independentes de NF coletados em experimentos com a variedade de mandioca Fepagro RS13 conduzidos no mesmo local em quatro datas de plantio no ano 2006/2007 (26/09/06, 18/10/06, 08/11/06 e 28/11/06) em 2008/2009, 2009/2010 e 2010/2011, descritos em 3.1. Em função de um vendaval com granizo ocorrido em 08/02/2009, que danificou as plantas, usou-se apenas o NF da HP no experimento 2008/2009.

3.4.1 Estatísticas para avaliação dos modelos do filocrono e WE

O desempenho dos modelos foi avaliado pelas estatísticas: raiz do quadrado médio do erro (RQME), erro sistemático (QMEs) e não sistemático (QME_{ns}), estatística E_{12} , índice “BIAS”, o coeficiente de correlação (r), índice de concordância (dw) e índice de confiança (c).

O “RQME” expressa o erro médio do modelo (quanto menor o RQME melhor é o modelo). A estatística do “RQME” é calculada como (JANSEEN; HEUBERGER, 1995; STRECK, 2002; STRECK et al., 2008a,b):

$$\text{RQME} = [\sum (S_i - O_i)^2 / n]^{0,5} \quad (9)$$

em que S_i são os valores simulados, O_i são os valores observados e n é o número de observações.

O índice “BIAS” mostra a tendência de um modelo, ou seja, é o desvio médio dos valores estimados em relação aos valores observados (SCHNEIDER, 1998). Quanto mais próximo de zero for o valor, menor é a tendência do modelo e melhor é o modelo. O valor de “BIAS” é obtido pela fórmula geral (LEITE; ANDRADE, 2002):

$$\text{BIAS} = (\sum S_i - \sum O_i) / \sum O_i \quad (10)$$

O índice de concordância (dw) mede o grau com que as simulações do modelo são livres de erro (WILLMOTT, 1981; STRECK et al, 2008b), ou seja, é uma medida da exatidão do modelo. Os valores de “dw” variam de 0 (zero) sem concordância a 1 (um) para concordância perfeita entre os valores observados e simulados. O índice “dw” é calculado como (WILLMOTT, 1981):

$$\text{dw} = 1 - [\sum (S_i - O_i)^2] / [\sum (|S_i - \bar{O}|) + (|O_i - \bar{O}|)]^2 \quad (11)$$

O coeficiente de correlação (r) permite quantificar o grau de associação entre duas ou mais variáveis. O valor de r varia de -1 à +1 e quanto maior o valor absoluto de r (seja positivo ou negativo) maior a adesão entre os valores observados e os valores simulados. O valor de r é dado pela fórmula geral (SCHNEIDER, 1998):

$$r = \sum (O_i - \bar{O}) (S_i - \bar{S}) / \{[\sum (O_i - \bar{O})^2][\sum (S_i - \bar{S})^2]\}^{0,5} \quad (12)$$

onde \bar{O} é a média dos valores observados e \bar{S} é a média dos valores simulados.

O índice de confiança (c) indica o desempenho dos modelos, é calculado da seguinte maneira (CAMARGO; SENTELHAS, 1997):

$$c = r \times \text{dw} \quad (13)$$

em que r é o coeficiente de correlação e dw é o coeficiente de concordância de Willmott (1981).

A interpretação dos valores de c proposto por Camargo; Sentelhas (1997) pode ser verificada na Tabela 2.

Tabela 2. Critérios para interpretação do desempenho dos modelos do filocrono e de Wang; Engel pelo índice de confiança (c).

Valores de “c”	Desempenho do modelo
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: CAMARGO; SENTELHAS (1997).

Os erros, sistemático e não sistemático, também foram calculados para cada modelo de simulação através do QME, isto é, o $(RQME)^2$ foi decomposto em componentes sistemático (QMEs) e não sistemático ou aleatório (QMEns) (sistemático + não sistemático = 100%), segundo Willmott (1981) e Streck et al. (2008a). Um bom modelo tem erro sistemático baixo e não sistemático elevado.

$$QMEs = [\sum (\hat{S}_i - O_i)^2] / n \quad (14)$$

$$QMEns = [\sum (S_i - \hat{S}_i)^2] / n \quad (15)$$

em que \hat{S}_i é igual a $a+bO_i$

A estatística E_{12} avalia a acurácia de um modelo em relação a outro modelo (ALLEN; RAKTOE, 1981; STRECK, 2002; STRECK et al., 2008b):

$$E_{12} = QME_1 / QME_2 \quad (16)$$

em que QME_1 e QME_2 são o quadrado médio do erro de simulações para o modelo 1 e modelo 2, respectivamente.

$$QME_1 = \sum (S_{1i} - O_i)^2 / n \quad (17)$$

$$QME_2 = \sum (S_{2i} - O_i)^2 / n \quad (18)$$

sendo S_{1i} os valores simulados para o modelo 1 e S_{2i} para o modelo 2.

A estatística E_{12} é adimensional varia de 0 a infinito. Um valor de E_{12} entre 0 e 1 indica que o modelo 1 é superior ao modelo 2. E se E_{12} for acima de 1, o modelo 2 será o melhor (STRECK, 2002; STRECK et al., 2008b). Neste estudo, o modelo de WE foi considerado o modelo 1 e o modelo do filocrono será o modelo 2.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados

4.1.1 Condições meteorológicas durante o período experimental

Durante as estações de crescimento da mandioca, nos diferentes anos agrícolas (entre os anos de 2005 a 2011), houve distintas disponibilidades de precipitação pluviométrica. Durante os seis anos de experimento, as plantas de mandioca foram expostas a diferentes condições meteorológicas, o que é altamente desejável em estudos de desenvolvimento vegetal, pois representam uma faixa de condições ambientais para o cultivo da mandioca em regiões subtropicais, as quais resultam em diferenças na duração de fases de desenvolvimento (FAGUNDES et al., 2009). Sob o ponto de vista da modelagem de emissão de folhas, a variação das plantas submetidas a períodos de estiagem até períodos com excesso de precipitação pluviométrica representam um excelente conjunto de dados de NF para calibrar e avaliar os modelos de estimativa da TAF.

Na Tabela 3 estão apresentadas as variáveis meteorológicas (média mensal de temperatura mínima, média e máxima do ar em °C, radiação solar global em MJ m⁻² dia⁻¹ e precipitação mensal acumulada e acumulado total em mm) durante o período de emissão de folhas nos experimentos (2005/2006 a 2010/2011). O ano agrícola 2005/2006 teve uma média de 17,1, 23,0 e 28,9 °C para a temperatura mínima, média e máxima e para a disponibilidade de radiação solar global a média foi de 17,3 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente. No ano agrícola de 2006/2007 os valores médios de temperatura foram de 17,3, 22,7 e 28,2 °C para a mínima, média e máxima e para a radiação solar global foi de 16,0 MJ m⁻² dia⁻¹, em 2007/2008 os valores médios de temperatura do ar mínima, média e máxima foram 17,6, 23,3 e 29,1 °C e para a radiação solar foi de 17,8 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente. Em 2008/2009 os valores médios de temperatura foram 17,1, 22,9 e 28,6 °C, em 2009/2010 os valores foram 18,3, 23,6 e 28,8 °C e em 2010/2011 foram 17,8, 23,4 e 29,0 °C para a mínima, média e máxima, respectivamente.

Tabela 3. Valores médios mensais de temperatura mínima, média e máxima do ar, radiação solar global e precipitação mensal acumulada e acumulado total durante o período de emissão de folhas na variedade de mandioca Fepagro RS13 nos anos agrícolas 2005/2006 a 2010/2011, em Santa Maria, RS.

Ano Agrícola	Mês	Temperatura			Radiação Solar Global (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	Precipitação Acumulada (mm)
		Mín.	Méd.	Máx.		
2005/2006		(°C)				
	Outubro	14,5	18,8	23,1	13	284,0 (+139,0)*
	Novembro	15,7	22,6	29,4	19,4	57,2 (-75,0)
	Dezembro	17,3	23,8	30,3	21,3	101,2 (-31,6)
	Janeiro	20,7	26,3	31,9	19,2	197,7 (+52,6)
	Fevereiro	19,0	25,1	31,2	19,1	45,5 (-84,7)
	Março	18,1	24,2	30,3	16,2	80,2 (-71,5)
	Abril	14,2	20,1	26,0	13,0	68,6 (-66,1)
	Média	17,1	23,0	28,9	17,3	Total 834,4 (-138,2)
2006/2007	Outubro	15,6	21,2	26,9	16,5	208,6 (+63,0)
	Novembro	16,5	21,8	27,1	18,0	134,6 (+2,4)
	Dezembro	19,6	25,9	32,2	20,3	84,2 (-49,3)
	Janeiro	20,5	25,7	30,8	18,9	163,9 (+18,8)
	Fevereiro	19,5	25,1	30,8	18,8	145,2 (+15,0)
	Março	20,4	25,3	30,1	13,7	173,6 (+21,9)
	Abril	16,7	22,2	27,7	12,2	21,4 (-113,3)
	Mai	9,3	14,8	20,1	9,7	102,8 (-26,3)
	Média	17,3	22,7	28,2	16,0	Total 1034,3 (-67,8)
2007/2008	Outubro	16,6	21,4	26,0	12,4	113,2 (-37,2)
	Novembro	14,6	20,9	27,1	18,9	105,0 (-27,2)
	Dezembro	18,3	24,8	31,3	20,4	202,1 (+68,8)
	Janeiro	19,1	24,8	30,4	20,6	95,7 (-49,4)
	Fevereiro	18,7	24,7	30,6	18,0	127,3 (-2,9)
	Março	18,1	23,6	29,1	16,4	106,9 (-44,8)
	Média	17,6	23,3	29,1	17,8	Total 750,3 (-88,3)
2008/2009	Outubro	15,0	19,8	24,6	14,6	255,3 (+109,4)
	Novembro	17,2	23,2	29,2	20,3	43,9 (-88,3)
	Dezembro	18,1	24,5	30,8	21,1	31,7 (-101,8)
	Janeiro	18,1	24,0	29,9	19,7	162,1 (+17,0)
	Média	17,1	22,9	28,6	18,9	Total 493,0 (-63,7)
2009/2010	Outubro	13,5	19,5	25,5	16,7	108,7 (-37,2)
	Novembro	19,2	23,8	28,3	13,6	480,9 (+348,7)
	Dezembro	19,9	24,9	29,8	19,3	305,7 (+172,2)
	Janeiro	20,6	25,4	30,1	17,8	405,9 (+260,8)
	Fevereiro	22,0	26,9	31,8	16,9	124,7 (-5,5)
	Março	19,2	24,6	30,1	15,7	25,1 (-126,6)
	Abril	14,2	20,1	26,1	12,3	116,8 (-17,9)
	Média	18,3	23,6	28,8	16,1	Total 1567,8 (+594,5)
2010/2011	Outubro	12,7	18,6	24,4	16,8	49,3 (-96,6)
	Novembro	14,9	21,3	27,7	19,1	83,0 (-49,2)
	Dezembro	18,4	24,4	30,4	21,2	157,9 (+24,4)
	Janeiro	21,8	27,1	32,5	19,5	127,1 (-18,0)
	Fevereiro	20,9	25,4	30,0	17,3	165,6 (+35,4)
	Março	18,2	23,5	28,9	16,3	54,9 (-96,8)
	Média	17,8	23,4	29,0	18,3	Total 637,8 (-200,8)

*Valores entre parêntesis representam a anomalia de precipitação (valor registrado – valor normal).

Em geral, observou-se que os maiores registros mensais de temperatura do ar são em dezembro e janeiro e os menores registros são no mês de outubro. Entre os anos agrícolas os meses com maiores e menores valores médios mensais de temperatura do ar registrados foram janeiro de 2011 (32,5 °C), dezembro de 2006 (32,2 °C), maio de 2007 (9,3 °C) e outubro de 2010 (12,7 °C). A radiação solar global para os anos agrícolas foi crescente a partir do início das estações de primavera e verão, durante a fase vegetativa da cultura. Um declínio da radiação solar foi verificado nos equinócios de outono no mês de março. O menor valor mensal registrado de densidade de fluxo de radiação foi 9,7 MJ m⁻² dia⁻¹ em maio de 2007 e o maior foi 21,3 MJ m⁻² dia⁻¹ em dezembro de 2005, respectivamente.

A disponibilidade de água para as plantas nos anos agrícolas foi em função da precipitação pluviométrica (Tabela 3). Nos seis anos agrícolas a precipitação pluviométrica variou desde anos de precipitação abaixo (2010/2011) da normal até anos acima (2009/2010) da normal climatológica para Santa Maria, RS (Tabela 3). A partir da precipitação pluviométrica mensal diminuída da normal climatológica mensal (Tabela 3), observou-se que entre os anos agrícolas e dentro de cada ano houveram distintas condições de precipitação pluviométrica. Em geral, as anomalias são atribuídas aos fenômenos El Niño e La Niña (ENOS), que no Rio Grande do Sul causam precipitação acima da normal em anos de El Niño e abaixo da normal em anos de La Niña (FONTANA; BERLATO, 1997). Existem duas épocas de maior influência do ENOS sobre a precipitação pluviométrica no RS, durante a primavera e outono (FONTANA; BERLATO, 1997). É possível identificar essa influência, através das anomalias calculadas nos meses de outubro a dezembro e de março a maio nos anos agrícolas (2006/2007, 2007/2008, 2009/2010 e 2010/2011) de ocorrência do ENOS (Tabela 3).

O ano agrícola de 2005/2006 teve um total de precipitação acumulada de 835,1 mm com déficit de precipitação de 138,2 mm, este ano foi considerado neutro, sem atuação do fenômeno climático ENOS, segundo o índice Oceânico do Niño (GOLDEN GATE WEATHER SERVICES, 2011). Em 2006/2007 o total precipitado foi de 1034,3 mm com déficit calculado de 67,8 mm, neste ano foi registrado o fenômeno El Niño com intensidade fraca e o maior volume mensal precipitado foi em outubro de 2006 (208,6 mm). No ano agrícola de 2007/2008 verificou-se o sinal de La Niña com intensidade moderada. A precipitação registrada no ano agrícola foi abaixo da normal (anomalias negativas), exceto para o mês de dezembro de 2007 (68,8 mm), com déficit calculado de 88,3mm. No ano agrícola 2008/2009 o baixo volume registrado (439,0 mm)

deve-se ao curto período de condução do experimento, ocasionado por um evento de granizo, no qual as plantas de mandioca foram danificadas. Neste ano agrícola o maior volume precipitado foi em outubro de 2008 (255,3mm) e o menor volume foi registrado em dezembro de 2008 (31,7mm). No ano agrícola 2009/2010 o volume acumulado de chuva foi 1567,8mm em decorrência do EL Niño de intensidade moderada. As chuvas foram acima da normal para Santa Maria em novembro e dezembro de 2009 e janeiro de 2010, o maior volume de chuva registrado foi em novembro de 2009 (480,9mm) e o menor foi em março de 2010 (25,1mm), as precipitações acima da normal causam redução na radiação solar global, durante 2009/2010 o valor registrado foi de apenas $16,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Em 2010/2011 o baixo volume de precipitação acumulada 637,8mm, foi em função do fenômeno La Niña com sinal moderado. O déficit de precipitação chegou a 200,8mm para o período de outubro de 2010 a março de 2011.

4.1.2 Coeficientes FILO e TAF_{max} para a emissão de folhas em mandioca

Os coeficientes FILO utilizados no modelo do filocrono, e TAF_{max} utilizados no modelo de WE, são genótipo-dependentes e, para a variedade Fepagro RS13, são apresentados na Tabela 4. Os valores dos coeficientes angulares da regressão linear entre NF e STa nas versões T_{med} e T_{mm}, foram 0,0665 e 0,0806 para HP, 0,0598 e 0,0704 para RS1 e 0,0461 e 0,0531 para RS2, respectivamente, todas altamente significativas ($p < 0,001$) e com elevado ($R^2 > 0,99$). O inverso destes coeficientes é o valor do filocrono. O coeficiente FILO aumentou conforme surgem ramificações na planta, embora as diferenças entre HP e RS1 sejam menores do que em RS2 (Tabela 4), indicando um maior intervalo de tempo entre a emissão de duas folhas sucessivas nas hastes da RS2 do que RS1 e HP. Fagundes et al. (2009) propõem a hipótese do aumento do filocrono, nas hastes das ramificações simpodiais devido ao maior aporte de nutrientes e água dentro da planta, e a cada nova ramificação simpodial novas hastes surgem necessitando de mais água e nutrientes para crescerem e desenvolverem-se.

Os valores do coeficiente TAF_{max}, que representa a velocidade de aparecimento de folhas (taxa máxima) em um dia, foi maior na HP e na RS1 e menor na RS2, confirmando a menor velocidade de aparecimento de folhas na ramificação simpodial de segunda ordem (Tabela 4).

O aumento do número de hastes em crescimento deve ser a causa dessa diferença, pois na RS1 são duas ou três hastes, enquanto que na RS2 o número de hastes por planta é de 8-9. Esse fato confirma a hipótese de que a distribuição de água e nutrientes dentro da planta de mandioca favorece os ramos mais próximos em detrimento daqueles mais distantes das raízes (FAGUNDES et al., 2009). Estatisticamente, os valores dos coeficientes FILO e TAF_{max} entre HP e RS1 não diferiram, mas diferiram de RS2 (Tabela 4). Isto indica que a competição por água e nutrientes dentro da planta causa redução na emissão de folhas apenas quando a planta tem a segunda ramificação simpodial.

Tabela 4. Valores dos coeficientes FILO (filocrono no modelo linear) e TAF_{max} (taxa máxima de aparecimento de folhas no modelo não linear) para a emissão de folhas em diferentes hastes da variedade de mandioca Fepagro RS13, em duas versões de temperatura, determinados com dados de número de folhas nos anos agrícolas de 2005/2006 e 2007/2008, em Santa Maria, RS.

Versão**	Haste*		
	HP	RS1	RS2
	Coeficiente FILO (°C dia folha ⁻¹)		
Tmed	15,07 b	16,76 b	21,82 a
Tmm	12,42 b	14,22 b	18,94 a
	Coeficiente TAF _{max} (folhas dia ⁻¹)		
Tmed	0,81 a	0,82 a	0,54 b
Tmm	0,95 a	0,98 a	0,64 b

*HP= Haste principal; RS1= Primeira ramificação simpodial; RS2= Segunda ramificação simpodial.

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

**Tmed= versão que usa a temperatura média diária do ar e Tmm= versão que usa a temperatura mínima e máxima diária do ar.

4.1.3 Avaliação dos modelos filocrono e WE

O número acumulado de folhas na HP, RS1 e RS2 da planta de mandioca observado e simulado com os modelos do filocrono e de WE, nas versões Tmed e Tmm, e as estatísticas empíricas usadas para avaliar os modelos (índices RQME, BIAS, dw, r e c), considerando todos os anos agrícolas usados como dados independentes estão apresentadas na Figura 5.

A análise visual dos dados simulados versus observados indica que o modelo de WE estimou melhor o NF que o modelo do filocrono na HP e RS2, com valores menores de RQME

da mandioca em ambas versões de temperatura (Figura 5), mas não para a RS1 (Figura 5E, G). Em geral, os valores simulados pelo modelo de WE estão mais próximos da linha 1:1 do que os valores simulados pelo modelo do filocrono. Os valores de RQME para o modelo do filocrono na HP foram 4,4 e 5,2 folhas, na RS1 foram 2,8 e 3,3 folhas e na RS2 foram 2,9 e 3,3 folhas, nas versões Tmed e Tmm (Figura 5A, C, E, G, I, K), enquanto os valores do RQME para o modelo de WE na HP foram 3,7 e 3,9 folhas, na RS1 foram 3,0 e 3,4 folhas e na RS2 os valores foram 2,2 e 2,5 folhas, nas versões Tmed e Tmm, respectivamente (Figura 5B, D, F, H, J, L). O índice RQME mede a magnitude dos erros entre simulado e observado, o valor mais elevado para o modelo de WE, ou seja, o maior erro, foi de 3,9 folhas na HP versão Tmm (Figura 5D), quando comparado ao filocrono, que apresentou um erro maior (RQME=5,2 folhas versão Tmm, Figura 5C).

O índice BIAS indica a tendência do modelo em superestimar ou subestimar os valores de NF (SCHNEIDER, 1998). Quanto mais próximo a zero a estimativa desta estatística, menor é a magnitude do erro sistemático (LEITE; ANDRADE, 2002). Os valores de BIAS para o modelo do filocrono variaram de 0,024 a 0,180, e para WE variaram de 0,027 a 0,105 entre as hastes da planta e versões Tmed e Tmm (Figura 5). Conforme os resultados, os valores de BIAS indicam que os modelos geralmente superestimaram o NF em pequena amplitude de valores, com maior valor assumido para o modelo do filocrono na HP (BIAS=0,180). Portanto, de acordo com esta estatística, verifica-se uma pequena tendência de superestimar o NF nos dois modelos. O desempenho do modelo de WE por este índice também foi melhor do que o modelo do filocrono na HP e RS2 nas duas versões de temperatura, mas não na RS1 (Figura 5), mas a diferença obtida entre os valores de BIAS na RS1 foi pequena (0,022).

O índice de concordância (dw) proporciona a exatidão do modelo, e os valores mais próximos de um são considerados melhores. Na avaliação por hastes, tanto o modelo do filocrono como o WE obtiveram valores elevados de dw (Figura 5), indicando uma boa concordância entre o NF observado e simulado por esses modelos. Dentre as versões, os modelos do filocrono e de WE apresentaram os melhores valores de dw com a versão Tmed, na HP, RS1 e RS2 (Figura 5A, B, E, F, I, J), enquanto que a versão Tmm, teve valores mais elevados quando testada pelo método de WE, quando comparado com o filocrono (Figura 5D, L), exceto para a RS1, quando dw (0,982) foi igual para os dois modelos. Isso pode ser indicativo de que as estimativas de NF a partir da Tmed possuem boa exatidão.

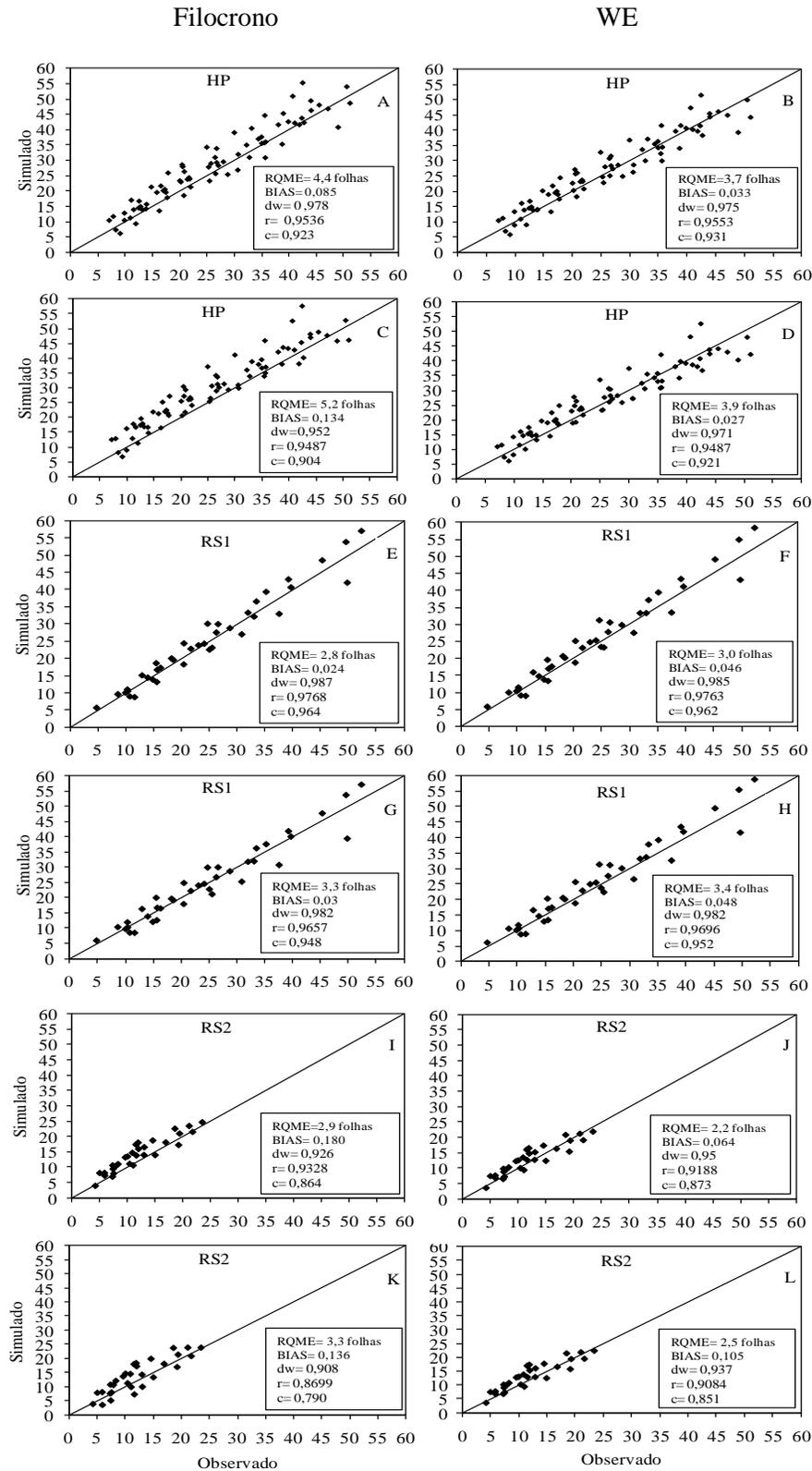


Figura 5. Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) da variedade de mandioca Fepagro RS13, pelos modelos do filocrono e de Wang; Engel, com duas versões de temperatura do ar (T_{med} : A, B, E, F, I e J; T_{mm} : C, D, G, H, K e L) para os anos agrícolas 2006 a 2011. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.

A estatística r quantifica o grau de associação entre duas ou mais variáveis e a estatística c fornece o desempenho dos modelos. Os valores do coeficiente de correlação r foram elevados, sendo que para o modelo de WE variou de 0,9084 a 0,9763, e para o filocrono de 0,8699 a 0,9768 (Figura 5). A avaliação de r indicou melhor associação entre NF observado e simulado, quando a Tmed foi usada para a simulação, independente do modelo e da haste da mandioca (Figura 5). Nessa avaliação é importante ressaltar também, que na versão Tmm o modelo de WE superou o filocrono, obtendo r mais elevado na RS1 e RS2 ($r=0,9696$ e $0,9084$).

Em relação ao índice de confiança c todos os valores indicaram ótimo desempenho para o modelo de WE, nas duas versões de temperatura, segundo os critérios da Tabela 2. Ainda vale destacar que o modelo do filocrono obteve ótimo desempenho a exceção da simulação da RS2. Para essa ramificação o desempenho foi considerado muito bom com a versão Tmm.

Tabela 5. Valores do componente Sistemático (s) e Não Sistemático (ns) do QME para avaliar a simulação do número de folhas em diferentes hastes e considerando todas as hastes juntas da variedade de mandioca Fepagro RS13, com os modelos do filocrono e de Wang; Engel (WE) em duas versões de temperatura, usando os dados de número de folhas por haste nos anos agrícolas de 2006/2007 a 2010/2011, em Santa Maria, RS.

Anos agrícolas	Haste*	Filocrono				WE			
		Tmed**		Tmm		Tmed		Tmm	
		s	ns	s	ns	s	ns	s	ns
		%							
2006/2007	HP	26,7	73,3	47,5	52,5	15,2	84,8	21,3	78,7
a	RS1	5,2	94,8	0,2	99,8	15,3	84,7	13,1	86,9
2010/2011	RS2	43,1	56,9	23,8	76,2	27,3	72,7	33,9	66,1
	Todas hastes	23,1	76,9	25,2	74,8	10,6	89,4	23,1	76,9

*HP= Haste principal; RS1= Primeira ramificação simpodial; RS2= Segunda ramificação simpodial.**Tmed= versão com a temperatura média diária do ar e Tmm= versão com a temperatura mínima e máxima diária do ar.

Decompondo o quadrado médio do erro (QME) em componentes sistemático (QMEs) e não sistemático (QMEns) para a emissão de folhas nas hastes da mandioca, o QMEs foi menor nos modelos do filocrono e WE, em relação ao QMEns (Tabela 5), o que significa bom desempenho dos modelos (WILLMOTT, 1981). Em geral, o QMEs na HP variou de 15,2 a

21,3% com o modelo de WE e 26,7 a 47,5% com o filocrono, na RS1 variou de 13,1 a 15,3% com o WE e 0,2 a 5,2% com o filocrono e na RS2 variou de 27,3 a 33,9% e 23,8 a 43,1% com o WE e filocrono, respectivamente. Com estes resultados pode ser constatado que, de forma similar à RQME (Figura 5), o modelo de WE apresentou melhor desempenho na HP e RS2 (<QMEs), e o modelo do filocrono teve melhor desempenho na RS1 (Tabela 5). Menor QMEs com o modelo de WE comparado com o modelo do filocrono, também foi obtido por Xue et al. (2004) e Streck et al. (2008a) para a previsão de Estágio Haun em trigo de inverno e arroz, respectivamente.

A estatística E_{12} indica a precisão dos modelos e das duas versões em cada modelo. Valores menores que 1 indicam a superioridade de WE em relação ao filocrono. Dentro de cada modelo avaliam-se as versões de temperatura, sendo que valores de E_{12} abaixo de 1 indicam superioridade da versão T_{mm} em relação a T_{med} . Entre as versões, tanto no modelo do filocrono quanto no WE, a estatística E_{12} com valores acima de 1 indica que a versão T_{med} foi melhor que T_{mm} . Na simulação do NF nas hastes da mandioca o modelo de WE foi melhor (teve valores de $E_{12} < 1$), nas versões T_{med} e T_{mm} , na HP e RS2, porém na RS1 ocorreu o contrário (Tabela 6), indicando que nesta haste o modelo do filocrono foi melhor na simulação, confirmando a performance dada pelas outras estatísticas.

Tabela 6. Estatística E_{12} para avaliar a simulação do número de folhas em diferentes hastes e considerando todas as hastes juntas da variedade de mandioca Fepagro RS13, com os modelos do filocrono e de Wang; Engel (WE) em duas versões de temperatura do ar, usando todos os dados de número de folhas por haste nos anos agrícolas de 2006/2007 a 2010/2011, em Santa Maria, RS.

Haste*	Versão**		Modelo	
	T_{med}	T_{mm}	Filo	WE
HP	0,701	0,558	1,425	1,135
RS1	1,169	1,096	1,349	1,263
RS2	0,582	0,575	1,335	1,320
Todas hastes	0,758	0,713	1,402	1,319

*HP= Haste principal; RS1= Primeira ramificação simpodial; RS2= Segunda ramificação simpodial.

** T_{med} = versão com a temperatura média diária do ar e T_{mm} = versão com a temperatura mínima e máxima diária do ar.

Os valores de NF observados em função dos simulados pelos métodos do filocrono e de WE, em duas versões de temperatura, usando todos os dados independentes de NF das hastes da mandioca são apresentados na Figura 6. Pode ser observado pelas estatísticas dw e r que os valores estimados pelo método de WE foram mais próximos da linha 1:1, indicando que este modelo estimou melhor o NF comparado com o modelo do filocrono. Os valores das estatísticas (RQME, BIAS, dw , r , c) confirmaram o bom desempenho do modelo WE, sendo o mais indicado para simular o NF em mandioca. Estes resultados estão de acordo com os obtidos em mudas de eucalipto (MARTINS; STRECK, 2007). A partir do valor do resíduo (valor simulado menos observado) apresentado nas inserções da Figura 6, constatou-se uma superestimação do NF de, aproximadamente, quatro a cinco folhas com os dois modelos. Essa superestimativa ocorreu geralmente no começo das observações quando as hastes possuem menos de 10 folhas (Figura 6). No campo observou-se que, no estabelecimento inicial da cultura, as plantas emitem poucas folhas semanalmente, aumentando a velocidade de emissão, em geral, a partir da décima folha. É possível identificar alguns pontos abaixo da linha do zero, mostrando que em alguns momentos os modelos subestimaram o NF em até quatro folhas no início da emissão, provavelmente estes pontos referem-se às simulações nos anos agrícolas 2006/2007 (época 1) e 2010/2011 (ANEXO A, B, G e H).

Em geral, a nuvem de pontos é ligeiramente mais concentrada próxima a linha do zero nas simulações usando a T_{med} para o filocrono e WE (Figura 6A e B). Entretanto, a partir da vigésima folha, há tanto subestimação quanto superestimação do NF na HP e RS1 pelos dois modelos, e a diferença entre NF simulado e observado é maior na versão T_{mm} , em até 12 folhas (Figura 6C, D). Essa diferença se deve, parcialmente, aos anos agrícolas de 2008/2009 (ANEXO D) com RQME para HP de 9,9 folhas com o filocrono, e 2009/2010 (ANEXO F) com RQME de 11,5 e 7,8 folhas com filocrono e WE, respectivamente.

O RQME geral (considerando todos os experimentos e hastes) foi menor com o modelo de WE em ambas versões (3,2 e 3,5 folhas), comparando com o modelo do filocrono (3,7 e 4,4 folhas) (Figura 6A, B, C, D). No entanto, o menor valor de RQME foi obtido na versão T_{med} , tanto para o WE quanto para o filocrono, confirmando o que foi observado para emissão de folhas nas diferentes hastes da mandioca (Figura 5). Os valores do componente sistemático (QMEs) e não sistemático (QMEns) considerando todos os experimentos e hastes como um

único conjunto de dados (Tabela 5), apresenta o QMEs menor para o modelo de WE em ambas versões (Tmed e Tmm) confirmando o melhor desempenho frente ao modelo do filocrono.

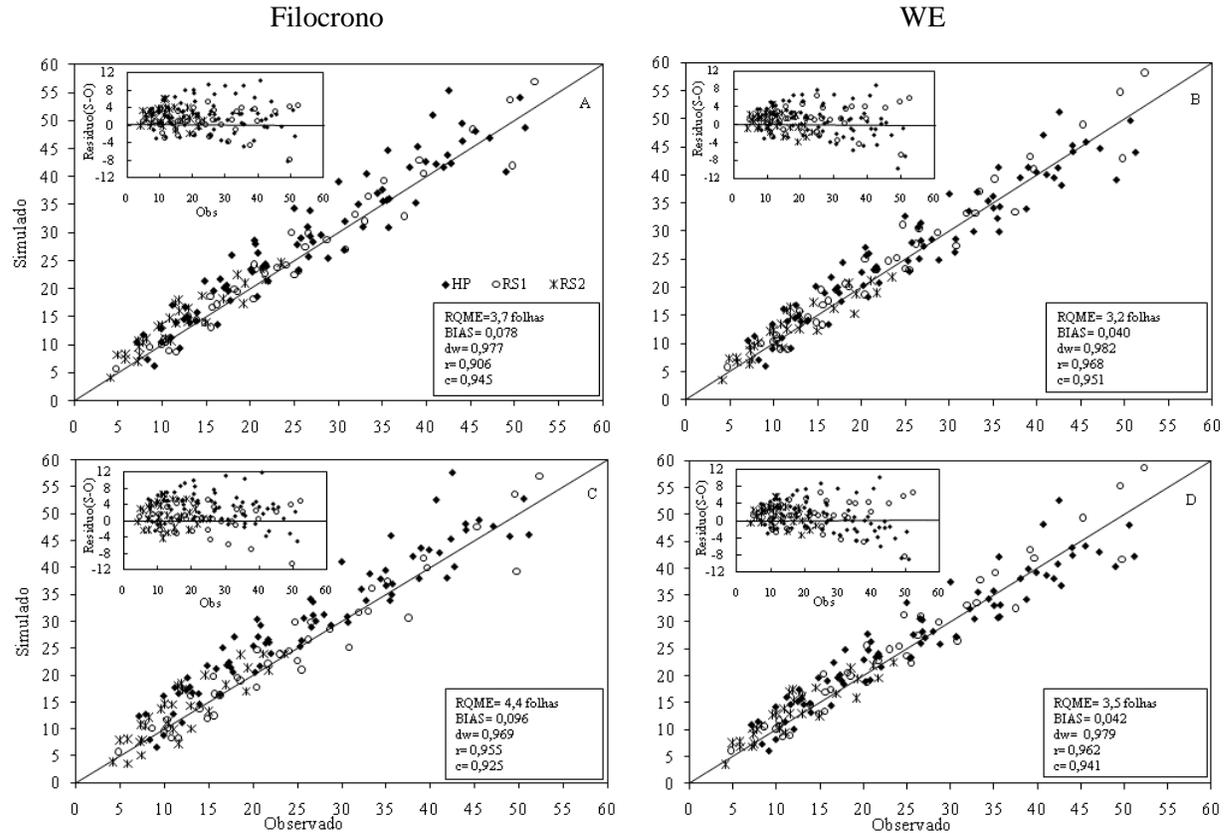


Figura 6. Número de folhas (NF) observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) da variedade de mandioca Fepagro RS13, pelos modelos do filocrono e de Wang; Engel com duas versões de temperatura do ar (Tmed: A e B; Tmm: C e D) para os anos agrícolas 2006/2007 a 2010/2011. A linha cheia é a linha 1:1. O resíduo (NF simulado menos observado) versus o NF observado é apresentado nas inserções. Santa Maria, RS, 2012.

O índice BIAS apresentou menores valores no modelo de WE, variando de 0,040 a 0,042, enquanto no modelo do filocrono variou de 0,078 a 0,096 na Tmed e Tmm, respectivamente. Em geral, os valores positivos dessa estatística demonstram que os modelos superestimam o NF em todas as situações analisadas (Figuras 5 e 6). No entanto, quanto mais próximo de zero o valor de BIAS menor é a tendência do modelo (SCHNEIDER, 1998). Esses valores associados as demais estatísticas confirmam o desempenho superior do modelo de WE em relação ao filocrono. Pelo índice BIAS, a versão Tmed foi melhor que a Tmm, para os dois modelos (Figura 6). No entanto,

como houve pequena diferença entre os valores de BIAS (0,002) para as versões de temperatura, pode-se assumir que o modelo de WE por esta estatística, tem bom desempenho tanto na versão Tmed como na versão Tmm.

Os valores dos índices estatísticos dw (0,979 e 0,982), r (0,962 e 0,968) e c (0,941 e 0,951) foram elevados com o modelo de WE (Figura 6 B e D), indicando maior concordância e maior grau de associação (adesão) entre simulado e observado, respectivamente, que o modelo do filocrono. A estatística c indicou ótimo desempenho para o modelo de WE, considerando os critérios da Tabela 2. A precisão relativa E_{12} para a simulação do NF geral ficou abaixo de 1, quando o modelo não linear foi usado em comparação ao linear, indicando que o modelo de WE teve melhor desempenho. Considerando as duas versões dos modelos, a estatística E_{12} indicou que a versão Tmed foi melhor para simular a emissão de folhas em relação à Tmm (Tabela 6).

Nos ANEXOS A, B, C, D, E, F, G, e H são apresentadas as simulações de NF com dados dos anos agrícolas (2006/2007, 2008/2009, 2009/2010 e 2010/2011) usados para teste dos modelos, desde o primeiro até o último dia de observação para cada ano, separadamente, nas duas versões de temperatura. Semelhante às simulações por hastes e com NF geral (Figuras 5 e 6). O modelo de WE manteve a superioridade em relação ao filocrono ao longo dos anos, pois o RQME de WE foi menor do que o filocrono na maioria das simulações, a exceção da RS1 e do ano agrícola 2010/2011. Entre as versões de temperatura, observa-se que a versão Tmed prevalece com melhor desempenho em relação à Tmm, tanto para WE quanto para filocrono.

Destaque pode ser dado para o fraco desempenho de ambos modelos e versões na estimativa do NF da HP no ano agrícola 2009/2010 (ANEXOS E e F), superestimando bastante (RQME entre 7,0 e 11,5 folhas) o NF durante todo o período de emissão de folhas. Este ano agrícola foi de elevada precipitação devido ao fenômeno El Niño, principalmente nos meses de novembro e dezembro de 2009 e janeiro de 2010 (Tabela 3), meses em que ocorreu a emissão de folhas da HP. A hipótese para este desempenho dos modelos é de que, devido à alta precipitação e muitos dias nublados reduziram a disponibilidade de radiação solar, o que causou redução na fotossíntese a ponto afetar a velocidade de diferenciação de folhas no ápice meristemático. Como os modelos de aparecimento de folhas, tanto o filocrono (eq. 1- 4) como o WE (eq. 5- 8) não levam em conta o efeito da disponibilidade de radiação sobre o processo de diferenciação e emissão de folhas, estes modelos não capturam a radiação solar, diferente do que pode ter acontecido a campo. Neste mesmo ano agrícola, as simulações foram excelentes para a RS1 e

RS2 (ANEXOS E e F), pois em fevereiro, março e abril, quando ocorreu a emissão de folhas nestas hastes, não há registro de excesso de precipitação (Tabela 3) e assim, provavelmente, a radiação solar não foi limitante para a emissão de folhas. Ressalta-se a excelente simulação do número de folhas no final do período da emissão de folhas na RS2 (Figura 7E e 7F), quando, nos últimos quatro dias até o último valor observado (4 a 7 de abril de 2010), ocorreram temperaturas mínimas e máximas diárias do ar variando de 10,8 a 17,6 °C e 21,0 a 24,2 °C, respectivamente, que são temperaturas baixas para emissão de folhas em mandioca, indicando que o modelo de WE capturou a baixa taxa de aparecimento de folhas.

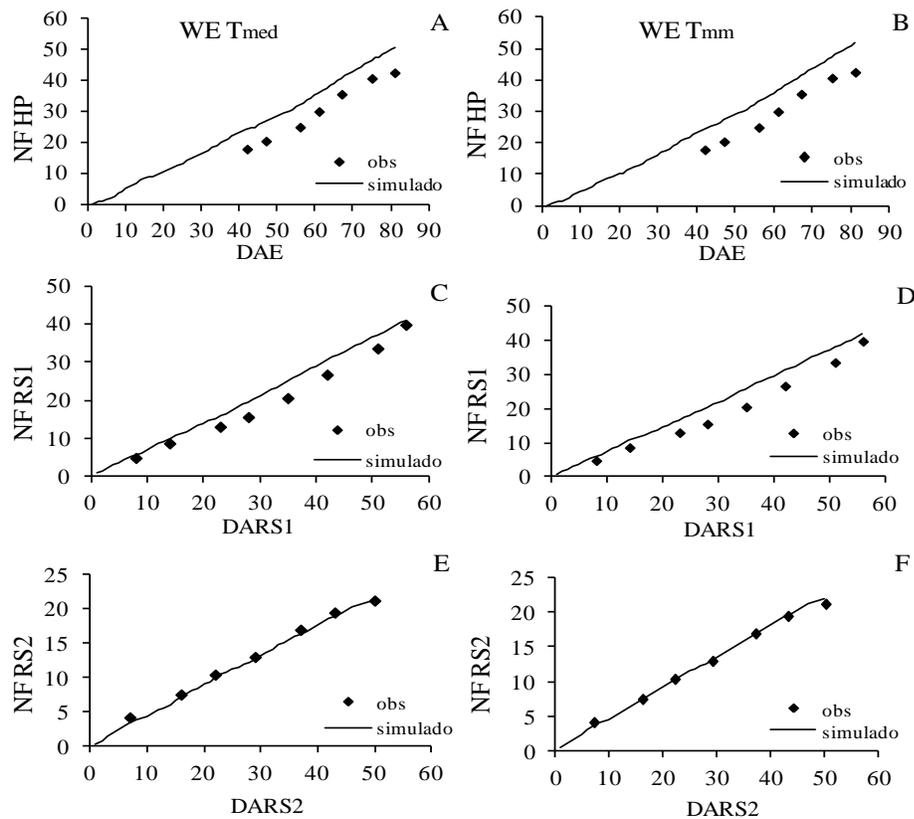


Figura 7. Evolução do número de folhas observado versus simulado pelo modelo de Wang;Engel (WE) com duas versões de temperatura do ar (Tmed: A, C e E Tmm: B, D e F) na haste principal (HP), ramificação simpodial de primeira (RS1) e segunda ordem (RS2) da variedade de mandioca Fepagro RS13 para o ano agrícola 2009/2010. Santa Maria, RS, 2012. DAE= Dias após a emergência; DARS1= Dias após a ramificação simpodial de primeira ordem; DARS2= Dias após a ramificação simpodial de segunda ordem.

4.2 Discussão

As observações (medidas) a campo mostram que, em mandioca, a emissão de folhas nas hastes pode variar de uma até sete folhas em uma semana. Durante a primeira fase do ciclo de desenvolvimento, caracteriza-se o estabelecimento inicial da planta, aos 10 DAP surgem as primeiras folhas (CONCEIÇÃO, 1983) e a velocidade de emissão é lenta. Nesta fase, a campo observou-se o acréscimo de uma a duas folhas na HP por semana. A taxa de emissão de folhas mais lenta foi, certamente, em função das baixas temperaturas ar no mês de outubro, em que a temperatura média do ar variou de 18,6 a 21,4 °C nos diferentes anos agrícolas (Tabela 3), ficando abaixo da T_{ot} para emissão de folhas em mandioca. A partir da segunda fase do ciclo de desenvolvimento da planta, próximo aos 30 DAP (CONCEIÇÃO, 1983), a velocidade de emissão de folhas aumenta e, no campo, a emissão na HP variou de três até sete folhas em uma semana. Na RS1 e RS2, as medidas a campo indicaram que a planta pode emitir, semanalmente, entre duas a seis folhas na primeira ramificação, e até quatro folhas na segunda ramificação. Assim, a velocidade de emissão de folhas tende a diminuir com o avanço das ramificações na planta o que, segundo Fagundes et al. (2009), é devido ao início de acumulação de amido nas raízes tuberosas que marca a translocação dos fotoassimilados para o principal órgão de reserva da espécie, modificando a relação fonte/dreno na planta (MATTHEWS; HUNT, 1994). Embora seja verificada uma diminuição na taxa de emissão, nesta fase a área foliar e o tempo de vida das folhas são maiores, caracterizando a terceira fase do ciclo de desenvolvimento da mandioca, dos 90 aos 180 DAP (CONCEIÇÃO, 1983; ALVES, 2002, 2006), em que ocorre intensa atividade fotossintética.

O erro na estimativa do NF em mandioca pode ser minimizado se for reduzido o intervalo entre medidas do NF, principalmente nos períodos em que a temperatura do ar é mais elevada e conseqüentemente a velocidade de emissão de folhas aumenta. Ao reduzir-se o intervalo de medições é possível aumentar a precisão na determinação do dia do aparecimento de cada folha. Na HP da mandioca teve-se uma diferença de até cinco folhas com o modelo do filocrono versão T_{mm} (Figura 5C). Mas, a diferença foi menor que quatro folhas em todas as simulações com o modelo de WE nas versões T_{med} e T_{mm} na HP, RS1 e RS2 (Figura 5B, D, F, H, J e L). As simulações com NF em todos os anos agrícolas, também tiveram menor erro com o modelo de

WE (Figura 6). Em batata doce, o menor erro obtido na simulação do desenvolvimento foliar da planta foi de aproximadamente seis folhas (SOMASUNDARAM; MITHRA, 2008; MITHRA; SOMASUNDARAM, 2008), e um erro de simulação de três a quatro folhas foi considerado aceitável em mudas de eucalipto (MARTINS; STRECK, 2007). De maneira geral, o erro (RQME) das simulações do NF em mandioca pode ser considerado baixo e aceitável com os modelos do filocrono e WE.

Considerando a TAF em função da temperatura do ar a curva de resposta nos modelos é semelhante, na faixa de temperaturas próximas das temperaturas cardinais (T_{min} , T_{ot} e T_{max}) (Figura 4). No restante da curva, entre T_b e T_{ot} e entre T_{ot} e T_{max} , os modelos apresentam resposta diferente da TAF à temperatura do ar. A função não linear descreve o que é mais aceito em termos de resposta à temperatura do ar em sistemas biológicos (SHAYKEWICH, 1995). No modelo de WE, a primeira parte da curva de resposta é crescente, a partir da T_b até T_{ot} , sendo que em T_b a $f(T)$ é igual a zero. Em temperaturas do ar intermediárias a função de resposta é linear, mas com resposta maior do que no modelo linear, pois a função torna-se curvilínea. Em temperaturas supra-ótimas, o descenso da resposta no modelo não linear é mais suave do que no modelo linear (Figura 4).

Apesar de pequena a diferença (erro) na estimativa do NF com os dois modelos, sugere-se que para estimar o aparecimento de folhas em mandioca deve ser dada preferência ao modelo de WE ao invés do filocrono. O modelo de WE também foi melhor na estimativa do aparecimento de folhas em outras espécies agrícolas como, trigo (XUE et al., 2004), batata (STRECK et al., 2007), mudas de eucalipto (MARTINS; STRECK, 2007) e arroz (STRECK et al., 2008a), comparado com o modelo do filocrono. É importante mencionar, também, que, a função não linear $f(T)$ usada no WE, já foi testada para modelar fases do desenvolvimento vegetal em melão (STRECK, 2002), kiwi (STRECK, 2003), violeta africana (STRECK, 2004a), crisântemo (STRECK, 2004b) e milho (STRECK et al., 2008b), sendo considerada eficiente e recomendável em todos os casos, principalmente quando comparada com o método da soma térmica (STRECK, 2002, 2003; STRECK et al., 2008b). A melhor performance de WE é atribuída à resposta não linear do aparecimento de folhas em função da temperatura do ar usada neste modelo (XUE et al., 2004; STRECK et al., 2007). No modelo do filocrono, a resposta do aparecimento de folhas à temperatura é linear, o que não é totalmente realístico do ponto de vista biológico, pois quando está próxima das temperaturas cardinais (T_b , T_{ot} e T_{max}), a resposta da TAF à temperatura é não

linear (STRECK, 2002, 2003; XUE et al., 2004), sendo linear em apenas uma pequena faixa entre a T_b e a T_{ot} (XUE et al., 2004; STRECK, 2004b), o que, também, é contemplado na $f(T)$ usada no modelo de WE.

A soma térmica, que se constitui o modelo do filocrono, é um método muito utilizado para representar tempo biológico em plantas, por ser um método de cálculo simples e geralmente melhora a predição de datas dos estádios de desenvolvimento, comparado com dias do calendário civil ou dias após a semeadura ou plantio (GILMORE; ROGERS, 1958; McMASTER; SMIKA, 1988). O método pressupõe uma relação linear entre desenvolvimento e temperatura, quando o ciclo da cultura ocorre na época recomendada para o cultivo, geralmente as temperaturas se enquadram na faixa de resposta linear de desenvolvimento (Figura 4), e, neste caso, a soma térmica funciona bem (STRECK et al., 2009a). Essa pode ser a explicação para o que acontece na estimativa da TAF na RS1 (Figura 5E, F, G e H), evidenciada na RS1 dos anos agrícolas 2006/2007, 2009/2010 e 2010/2011 (ANEXO A, E, F, G e H), em que o modelo do filocrono foi melhor que WE. A maior velocidade de emissão na RS1 se deve, provavelmente, ao período de desenvolvimento da haste, as folhas da RS1 são emitidas em final de dezembro, janeiro e metade de fevereiro, quando as temperaturas são elevadas e próximos a T_{ot} , e neste caso ambos modelos simulam bem o aparecimento de folhas. As folhas da HP e RS2 aparecem quando as temperaturas do ar, na maior parte do período de emissões, estão fora da faixa ótima. No campo observou-se que as temperaturas do ar durante a emissão na HP e na RS2 estavam em média 40% e 50% na faixa próxima a T_{ot} da cultura, respectivamente. Apesar da boa predição do NF com o modelo linear, Streck et al. (2005b) argumentam que, quando o cultivo é realizado fora da época recomendada a soma térmica (modelo do filocrono) não é aconselhada, pois, frequentemente, as temperaturas se situam fora da faixa linear de resposta do desenvolvimento vegetal à temperatura do ar. Isto é esperado em cenários climáticos futuros, em que a temperatura do ar é esperada ser acima da atual (IPCC, 2007).

A função não linear de resposta à temperatura é biologicamente mais aceitável para representar a resposta do desenvolvimento vegetal, do que uma função linear, pois os coeficientes do modelo não linear têm significado biológico (WANG; ENGEL, 1998) e definição operacional (STRECK et al., 2008b), como o coeficiente TAF_{max} e os coeficientes da $f(T)$, as temperaturas cardinais (T_b , T_{ot} e T_{max}). Outras funções não lineares são por vezes usadas para descrever a resposta do desenvolvimento das plantas à temperatura, porém, algumas destas funções têm a

desvantagem de serem compostas por coeficientes empíricos, que não apresentam significado biológico, como a função exponencial dupla (STRECK, 2004b), ou ainda, funções não lineares com elevado número de dados de entrada necessários na simulação de culturas (STRECK, 2004a), como o modelo proposto por Faust; Heins (1994) para violeta africana. Segundo Streck (2004a,b), tais desvantagens devem ser evitadas em estudos de modelagem, pois abordagens empíricas resultam em coeficientes que não podem ser usados em diferentes condições ambientais. O modelo de WE não tem esta desvantagem, e ainda, combina os efeitos do ambiente sobre a TAF de forma multiplicativa, o que é biologicamente realístico, uma vez que as interações entre ambiente e desenvolvimento vegetal são geralmente multiplicativas (STRECK et al., 2003a,b) tornando este modelo robusto e de aplicação mais generalizada, pois é mais mecanístico do que o modelo da soma térmica. Portanto, sugere-se dar preferência ao modelo de WE para simular a TAF em mandioca em relação ao modelo do filocrono.

A temperatura do ar é o principal fator abiótico que governa o aparecimento de folhas na variedade de mandioca Fepagro RS13 (SCHONS et al., 2007). Neste estudo, as versões de temperatura utilizadas para estimar a TAF nessa variedade referem-se à maneira de calcular a STd ou a $f(T)$ diária, utilizando os dados diários de temperatura mínima e máxima, para o filocrono e WE, respectivamente. Em relação ao modelo não linear, a temperatura diária do ar é o dado de entrada na $f(T)$ do modelo e, segundo Xue et al. (2004), há várias maneiras de calcular a $f(T)$. A partir disso, Streck et al. (2009a) testaram a TAF em milho e o número de nós (NAR) em soja (2009b) usando as duas abordagens mais usuais para a entrada de dados diários na $f(T)$, em modelos não lineares. A primeira abordagem calcula a $f(T)$ diária com a T_{med} diária (MARTINS; STRECK, 2007; STRECK et al., 2008a,b, 2009a,b). A segunda abordagem calcula uma $f(T)$ para cada valor de T_{min} e T_{max} diária e, após, calcula a média das $f(T)$ s diárias, a T_{mm} (XUE et al., 2004; STRECK et al., 2009a,b).

Na avaliação das duas versões dos modelos testadas neste estudo, observou-se que as estatísticas descritivas indicaram a T_{med} como superior a T_{mm} para estimar a TAF em mandioca, nos dois modelos. Esse resultado difere dos obtidos em trigo de inverno (XUE et al., 2004), milho e soja (STRECK et al., 2009a,b), em que a versão T_{mm} foi melhor que a versão T_{med} . Para os autores a abordagem da T_{mm} responde melhor quando as temperaturas do ar estão próximas as temperaturas cardinais da cultura, e neste caso, as temperaturas para TAF em milho e NAR em soja são $T_b=8$ e $7,6^{\circ}C$, $T_{ot}=31^{\circ}C$ para ambos e $T_{max}=41$ e $40^{\circ}C$, respectivamente. Apesar das

temperaturas serem próximas as temperaturas cardinais da mandioca, a resposta da planta sugere que a versão T_{med} seja usada para estimar o NF na HP, RS1 e RS2, e não a T_{mm} , não confirmando a hipótese inicial deste trabalho. Esse fato evidencia que a abordagem mais simples a partir da T_{med} , poderá ser usada para estimar o NF da planta de mandioca.

Embora, tenha ocorrido uma melhor simulação da TAF usando a versão T_{med} , não se deve abrir mão do uso de T_{mm} , uma vez que a diferença de RQME entre as versões, no modelo WE, é muito pequena ($<0,5$ folhas) (Figura 5B, D, F, H, J, L e 6B, D). A hipótese para explicar o desempenho das versões pode estar na época de cultivo da mandioca. A planta é perene e nativa de ambiente tropical, e em condições subtropicais o cultivo é sazonal e quando realizado dentro da época recomendada, a temperatura do ar, em geral, situa-se na faixa intermediária entre a temperatura base e a ótima (Tabela 3), faixa em que a resposta da planta à temperatura é linear (XUE et al., 2004; STRECK, 2004b), e nestas condições os resultados de ambas versões do modelo de WE funcionam bem. Em regiões mais quentes ou em cenários climáticos futuros (em que a temperatura poderá ser maior que a atual), espera-se que a planta de mandioca seja exposta à temperaturas do ar na faixa não linear de resposta (Figura 4) com mais frequência, e assim nestas regiões e condições futuras, indica-se usar a versão T_{mm} para simular a emissão de folhas em plantas de mandioca. A calibração e teste do modelo de WE para simular a TAF em mandioca, incorporando a T_{MIN} e T_{MAX} na $f(T)$ aumenta a possibilidade de aplicações do modelo, como em estudos utilizando cenários de mudança climática para a cultura, onde se espera aumento, tanto de T_{MIN} quanto de T_{MAX} (WEISS; HAYS; WON, 2003). Uma característica desse aumento preconiza o uso da versão T_{mm} nos cenários, pois em alguns locais esse aumento é assimétrico, com maiores aumentos na T_{MIN} do que na T_{MAX} , incluindo o Sul do Brasil (MARENGO; CAMARGO, 2008).

5. CONCLUSÕES

O uso de um modelo matemático não linear (modelo de WE) é preferível para simular o desenvolvimento foliar em mandioca, em cultivo de campo em ambiente subtropical no Rio Grande do Sul, pois o valor da raiz do quadrado médio do erro para número de folhas geral foi menor com o modelo de WE.

Dentre as versões dos modelos, a versão que usa a temperatura média do ar (T_{med}) tem melhor desempenho do que a versão que usa a temperatura mínima e máxima do ar (T_{mm}), porém no modelo de WE a diferença entre as versões foi pequena.

Sugere-se usar a versão com a temperatura mínima e máxima (T_{mm}), especialmente se o modelo for usado em regiões mais quentes ou em cenários de Aquecimento Global.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEM, A. C. The origin of *Manihot esculenta* Crantz (Euphorbiaceae). **Genetic Resources and Crops Evolution**. Netherlands, v. 41, p. 133-150, 1994.

ALLEN, O. B.; RAKTOE, B. L. Accuracy analysis with special reference to the predictions of grassland yield. **Biometry Journal**, Washington, v. 23, n. 4, p. 371-388, 1981.

ALVES, A. A. C. Cassava botany and physiology. In: HILLOCKS, R. J.; THRESH, J. M.; BELLOTTI, A. C. **Cassava: Biology, Production and Utilization**. Oxon, UK: CABI Publishing, 2002. p. 67-89. Disponível em: <http://www.ciat.cgiar.org/downloads/pdf/cabi_content.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2011.

ALVES, A. A. C. Fisiologia da mandioca. In: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical. **Aspectos socioeconômicos e agrônômicos da mandioca**. Cruz das Almas, BA; EMBRAPA, 2006. Cap. 7, p. 138-169.

ALVES, A. A. C; SETTER, T. L. Response of cassava to water deficit: leaf area growth and abscisic acid. **Crop Science**, Madison, v. 40, n. 1, p. 131-137, 2000.

ARNOLD, C.Y. Maximum-minimum temperatures as a basis for computing heat units. **Proceedings of the American Society for Horticultural Sciences**, Boston, v. 76, p. 682-692, 1960.

CÂMARA, G.M.S. ; GODOY, O.P. Desempenho vegetativo e produtivo de cultivares de mandioca (*manihot esculenta* Crantz) a partir de manivas com diferentes diâmetros. **Scientia agrícola**, v. 55, n. 2, p. 326-33, 1998.

CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARDOSO, C. E. L. et al. Produção e produtividade agrícola da cultura da mandioca no Brasil. In: ALBUQUERQUE, C. S.; SILVA, A. G. da. **Agricultura Tropical – Quatro Décadas**. V. 1. Produção e Produtividade Agrícola, Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 1337 p.

CARVALHO, P. C. L. de. Biosistemática de *Manihot*. In: EMBRAPA Mandioca e Fruticultura Tropical. **Aspectos socioeconômicos e agronômicos da mandioca**. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2006. Cap.5, p.112-125.

CARVALHO, J. E.; FUKUDA, W. M. G. Estrutura da planta e morfologia. In: EMBRAPA Mandioca e Fruticultura Tropical. **Aspectos socioeconômicos e agronômicos da mandioca**. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2006. Cap.6, p. 126-137.

COCK, J. H. **La yuca**: nuevo potencial para un cultivo tradicional. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1990. 240 p.

COCK, J. H. et al. The ideal cassava plant for maximum yield. **Crop Science**, Madison, v.19, p.271-279, 1979.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFSRS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre, 2004. 400p.

CONCEIÇÃO, A. J. da. **A mandioca**. São Paulo: Nobel, 1983. p. 382.

EL-SHARKAWY, M. A. Cassava biology and physiology. **Plant Molecular Biology**, n. 56, p. 481-501, 2004.

EL-SHARKAWY, M. A.; COCK, J. H. Response of cassava to water stress. **Plant and Soil**, Hague, v.100, p. 345-360, 1987.

EL-SHARKAWY, M. A.; COCK, J. H.; PORTO, M. C. M. Características fotossintéticas da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v. 1, n. 2, p. 143-154, 1989.

EMBRAPA. **Cultura da mandioca**. EMBRAPA MANDIOCA E FRUTICULTURA. Sistemas de Produção, 2003. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mandioca/mandioca_amapa/semes.htm>. Acesso em: 4 abr. 2008.

FAGUNDES, L.K. **Desenvolvimento, crescimento e produtividade da mandioca em função de datas de plantio**. 2009. 63 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

FAGUNDES, L.K. et al. Desenvolvimento vegetativo em diferentes hastas da planta de mandioca em função da época de plantio. **Ciência Rural**, v. 39, n. 3, p. 657-663, 2009.

_____. Desenvolvimento, crescimento e produtividade de mandioca em diferentes datas de plantio em região subtropical. **Ciência Rural**, v.40, p. 2460-2466, 2010.

FAUST, J.E.; HEINS, R.D. Modeling leaf development of the African violet (*Saintpaulia ionantha* Wendl.). **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v.118, n. 6, p.747-751, 1993.

FEPAGRO. Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária. **Novas cultivares de mandioca para o Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO - Centro de Pesquisa de Fruticultura de Taquari, 2005. 4p. (Boletim Informativo s/n).

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS- FAO
FAOSTAT. Production, crops. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>.
Acesso em: 30 mar. 2011.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira Agrometeorologia**, v.5, p. 127-132, 1997.

FUKUDA, C.; OTSUBO, A. A. **Cultivo da mandioca na região centro sul do Brasil**.
EMBRAPA MANDIOCA E FRUTICULTURA: Sistemas de Produção, Jan., 2003. Disponível em:<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mandioca/mandioca_centrosul/index.htm>. Acesso em: 20 abr. 2011.

GILMORE, E. C. Jr.; ROGERS, J. S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, Madson, v. 50, n. 10, p. 611-615, 1958.

GOLDEN GATE WEATHER SERVICES. ENSO Years based on Oceanic Niño Index (ONI). Disponível em: <<http://ggweather.com/enso/oni.htm>>. Acessado em 18 de novembro de 2011.
GRAY, V. M. A comparison of two approaches for modeling cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) crop growth. **Annals of Botany**, Oxford, v. 85, p. 77-90, 2000.

HODGES, T. **Predicting crop phenology**. CRC, 1991. 233p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Rio de Janeiro, v.22, n.04, p.1-80, abr., 2010. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/prevsaf/default.asp?t=1&z=t&o=26&u2=1&u3=1&u4=1&u1=1>>. Acesso em: 27 dez. 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE- IPCC, 2007. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.

INTERLICHE, P. H. **Mandioca: a raiz do sucesso**. São Paulo: CATI, 2002. 18p.

IRIKURA, Y.; COCK, J. H.; KAWANO, K. The physiological basis of genotype-temperature interactions in cassava. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 2, p. 227-239, 1979.

JANSSEN, P.H.M., HEUBERGER, P. S. C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 83, n. 1, p. 55-56, 1995.

KLEPPER, B.; RICKMAN R. W.; PETERSON C. W. Quantitative characterization of vegetative development in small cereals. **Agronomy Journal**, Madison, v.74, n.5, p. 789-792, 1982.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. de. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, p. 321-328, 2002.

MARENGO, J. A.; CAMARGO, C. C. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960-2002. **International Journal of Climatology**, v.28, p.893-904, 2008.

MARTINS, F. B.; STRECK, N. A. Aparecimento de folhas em mudas de eucalipto estimado por dois modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.1091-1100, 2007.

MATTHEWS, R. B.; HUNT, L. A. GUMCAS: a model describing the growth of cassava (*Manihot esculenta* L. Crantz). **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 36, p. 69-84, 1994.

MATTOS, P.L.P. de. Implantação da cultura. In: EMBRAPA Mandioca e Fruticultura Tropical. **Aspectos socioeconômicos e agrônômicos da mandioca**. Cruz das Almas, BA: EMBRAPA, 2006. Cap.17, p. 492-517.

McMASTER, G. S., SMIKA, D. E. Estimation and evaluation of winter wheat phenology in the central Great Plains. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 43, n. 1, p. 1-18, 1988.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. Portaria nº 50 de 04 de março de 2010. Aprova o Zoneamento Agrícola para a cultura da mandioca no Estado do Rio Grande do Sul. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2010.

MITHRA, V. S. S.; SOMASUNDARAM, K. A Model to Simulate Sweet Potato Growth. **World Journal of Agricultural Sciences**, Dubai, v.4, n.4, p. 568-577, 2008.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 46 p.

NASSAR, N. M. A; ORTIZ, R. Cassava improvement: challenges and impacts. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, V. 145, p. 163–171, 2007.

PAULA, F. L. M. et al. Soma térmica de algumas fases do ciclo de desenvolvimento da batata (*Solanum tuberosum* L.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 5, p. 1034-1042, 2005.

PEIXOTO, C. P. Mandioca. In: CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A. **Ecofisiologia de cultivos anuais**: trigo, milho, soja, arroz e mandioca. São Paulo: Nobel, 1999. p. 109-126.

PEREIRA, A. R. et al. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Agropecuária, Guaíba, 2002. 478p.

SANGOI, L.; KRUSE, N. D. Acúmulo e distribuição de matéria seca em diferentes frações da planta de mandioca no Planalto Catarinense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, n.10, p. 1151-1164, 1993.

SCHNEIDER, P. R. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. 2.ed. Santa Maria: Ed. UFSM/CEPEF, 1998. 236p.

SCHONS, A. **Crescimento e desenvolvimento da mandioca e do milho em cultivo solteiro e consorciado**. 2006. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

SCHONS, A. et al. Emissão de folhas e início da acumulação de amido em raízes de uma variedade de mandioca em função da época de plantio. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.6, p. 1586-1592, 2007.

_____. Arranjos de plantas de mandioca e de milho em cultivo solteiro e consorciado: Crescimento, desenvolvimento e produtividade. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.1, p. 155-167, 2009.

SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO. Macrozoneamento Agroecológico e Econômico para o Estado do Rio Grande do Sul. SAA-EMBRAPA, 1994, p. 257-258.

SHAYKEWICH, C. F. An appraisal of cereal crop phenology model. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 75, n. 2, p. 329-341. 1995.

SOMASUNDARAM, K.; MITHRA, V. S. S. Madhuram: A Simulation Model for Sweet Potato Growth. **World Journal of Agricultural Sciences**, Dubai, v.4, n.2, p. 241-254, 2008.

SOUZA, L. D; SOUZA, L. S. Clima e solo. In: MATTOS, P. L. P.; GOMES, J. C. **O cultivo da mandioca**. Cruz das Almas – BA: EMBRAPA Mandioca e Fruticultura, 2000. p. 11-13. (Circular Técnica, 37).

STRECK, N.A. A generalized nonlinear air temperature response function for node appearance rate in muskmelon (*Cucumis melo* L.). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 105-111, 2002.

_____. A generalized nonlinear temperature response function for some growth and developmental parameters in kiwifruit (*Actinidia deliciosa* (A. Chev.) C. F. Liang & A. R. Ferguson). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 255-262, 2003.

_____. A temperature response function for modeling leaf growth and development of the African violet (*Saintpaulia ionantha* Wendl.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 1, p. 55-62, 2004a.

_____. A temperature response function for development of the chrysanthemum (*Chrysanthemum x morifolium* Ramat.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 49-54, 2004b.

STRECK, N. A. et al. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 115, p. 139-150, 2003a.

_____. Incorporating a chronology response function into the prediction of leaf appearance rate in winter wheat. **Annals of Botany**, Oxford, v. 92, n. 2, p. 181-190, 2003b.

_____. Estimativa do filocrono em cultivares de trigo de primavera. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 3, p. 423-429, 2005a.

_____. Estimativa do plastocrono em meloeiro (*Cucumis melo* L.) cultivado em estufa plástica em diferentes épocas do ano. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 6, p. 1275-1280, 2005b.

_____. Improving predictions of leaf appearance in field grown potato. **Scientia Agricola**, v. 64, p. 12-18, 2007.

_____. Simulating leaf appearance in rice. **Agronomy Journal**, Madson, v. 100, n. 3, p. 490-501, 2008a.

_____. Simulating maize phenology as a function of air temperature with a linear and a non linear model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 4, p. 449-455, 2008b.

_____. Comparing two versions of a non-linear model for simulating leaf number and developmental stages in maize based on air temperature. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 3, p. 642-648, 2009a.

_____. Improving node number simulation in soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 7, p. 661-668, 2009b.

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

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 3^a ed. 2004. 719p.

VAVILOV, N.I. **Studies on the origin of cultivated plants**. Leningrad. 1926.

WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, v. 58, n. 1, p. 1-24, 1998.

WEISS, A.; HAYS, C. J.; WON, J. Assessing winter wheat response to climate change scenarios: a simulation study in the U.S. Great Plains. **Climatic Change**, Wageningen, v. 58, p. 119-147, 2003.

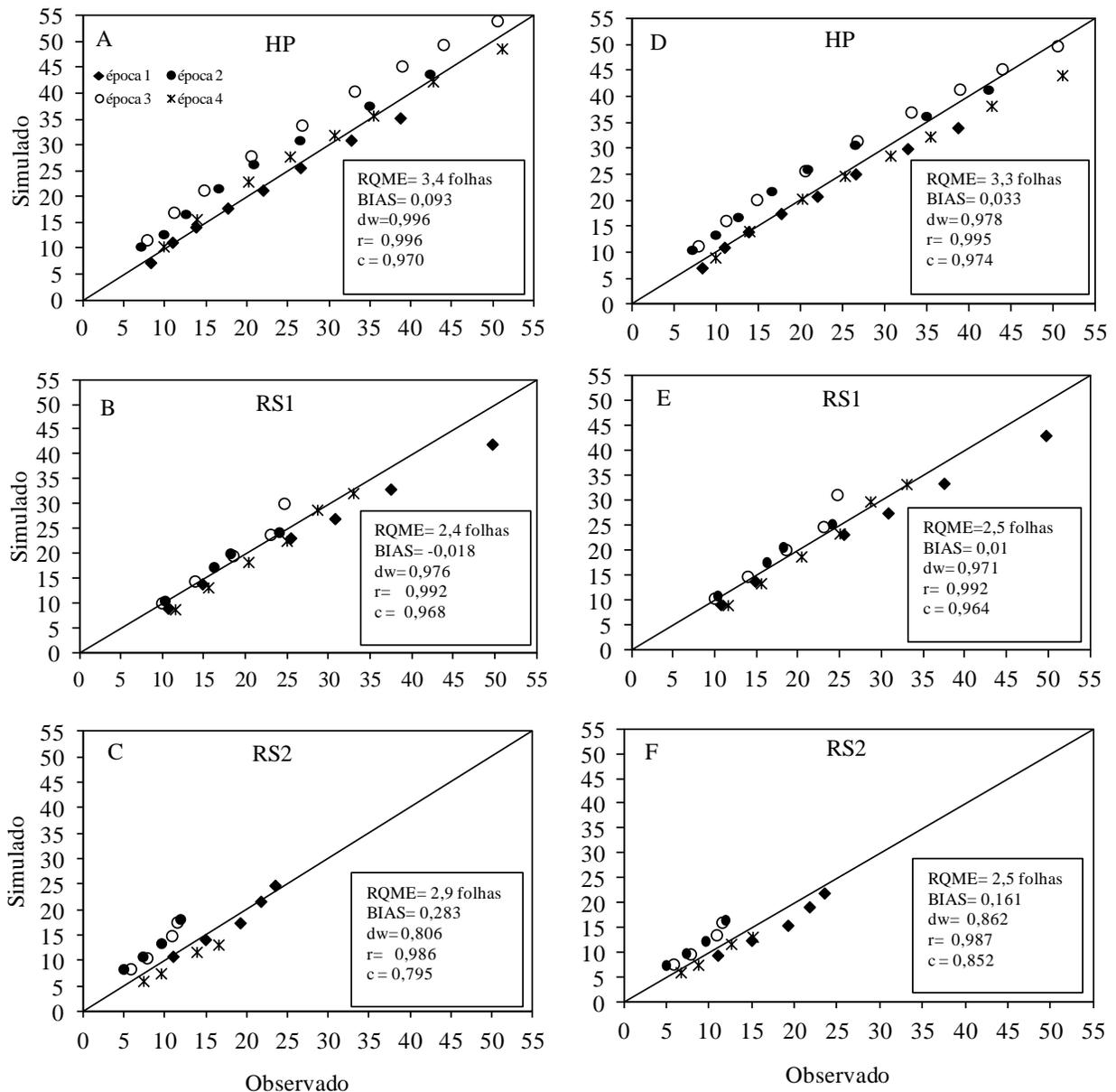
WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Silver Spring, v. 2, n. 1, p. 184-194, 1981.

WILHELM, W. W.; McMASTER, G. S. Importance of the phyllochron in studying development and growth in grasses. **Crop Science**, Madison, v. 35, n. 1, p. 1-3, 1995.

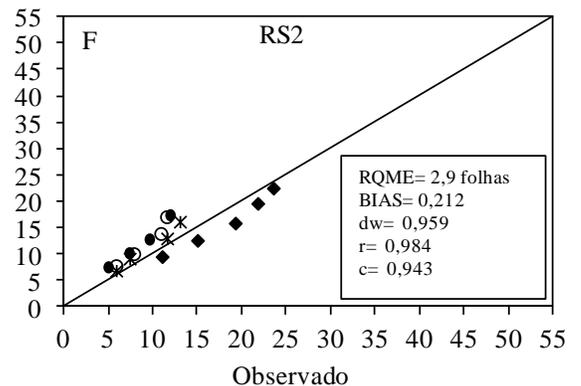
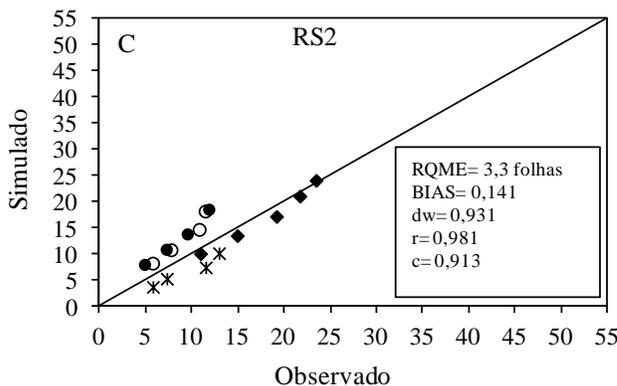
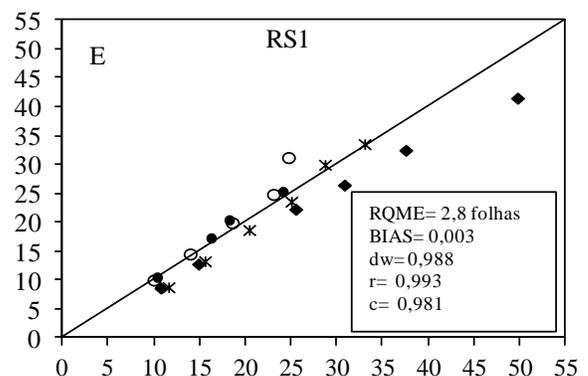
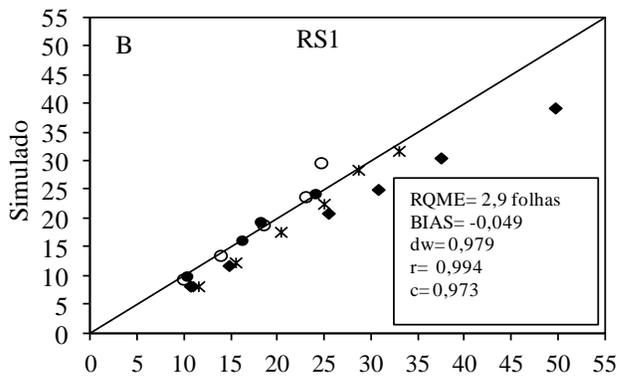
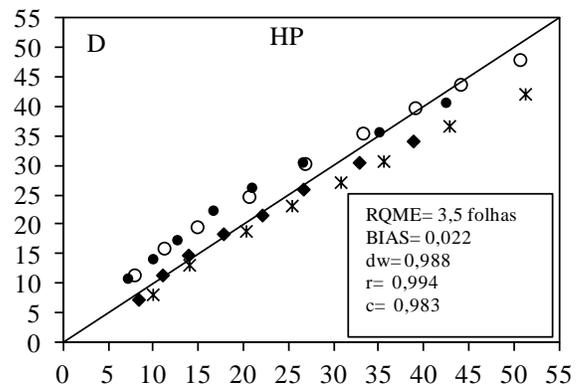
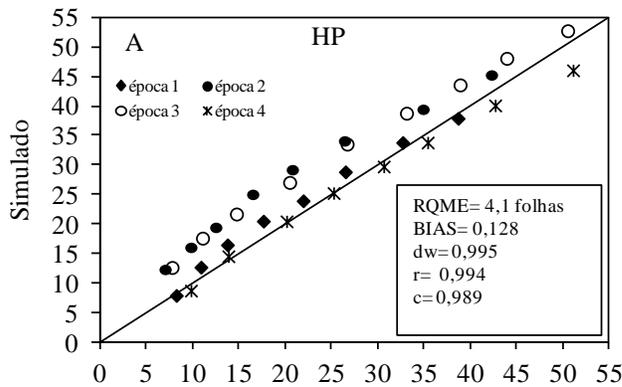
XUE, Q.; WEISS, A.; BAENZIGER, P. S. Predicting leaf appearance in field-grown winter wheat: evaluating linear and non-linear models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 175, p. 261-270, 2004.

7. ANEXOS

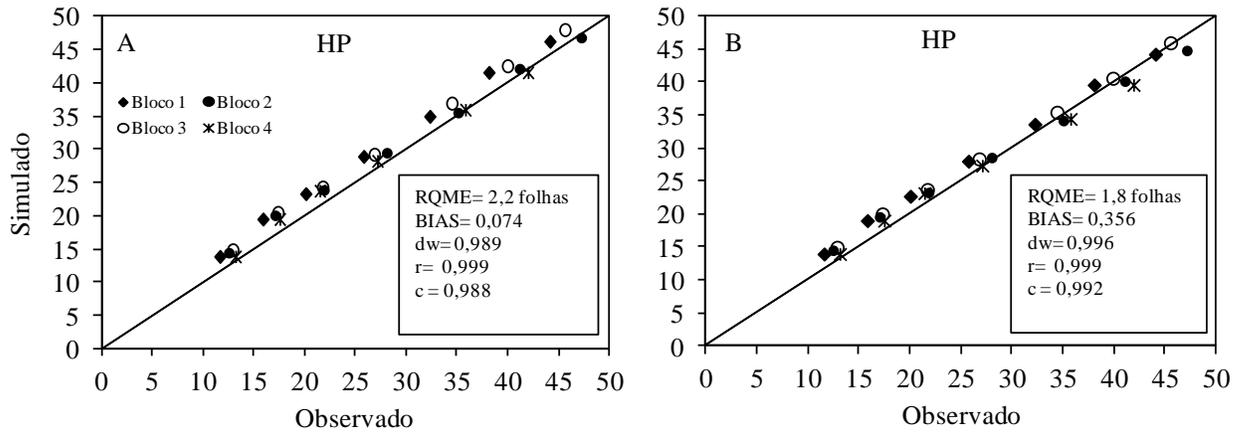
ANEXO A - Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) da variedade de mandioca Fepagro RS13, pelo modelo do filocrono (A, B, C) e WE (D, E, F) na versão Tmed para o ano agrícola 2006/2007. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.



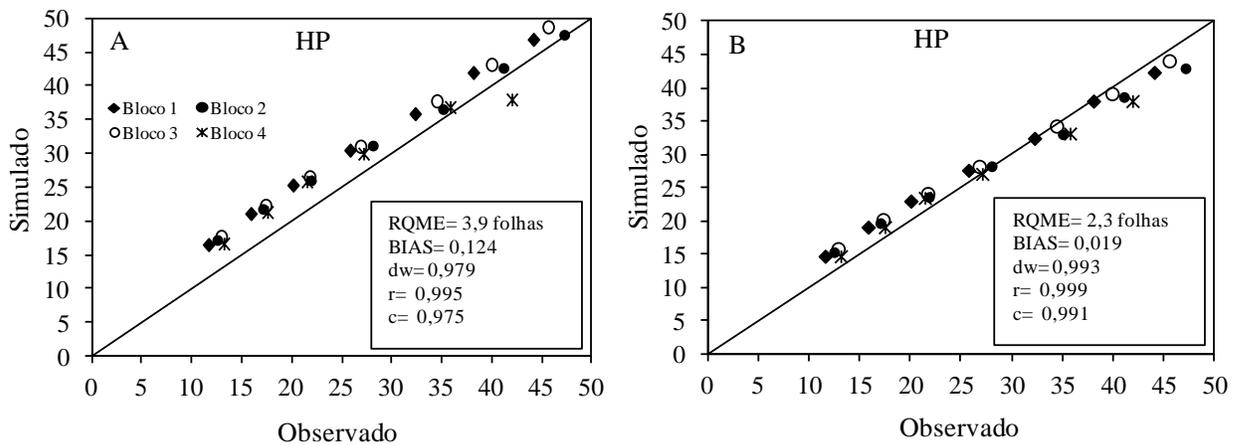
ANEXO B - Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) da variedade de mandioca Fepagro RS13, pelo modelo do filocrono (A, B, C) e WE (D, E, F) na versão Tmm para o ano agrícola 2006/2007. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.



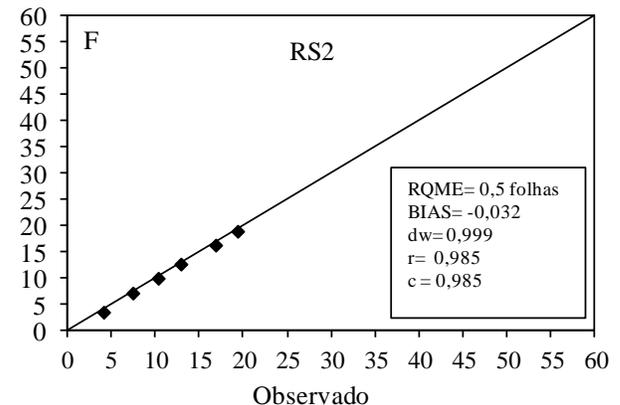
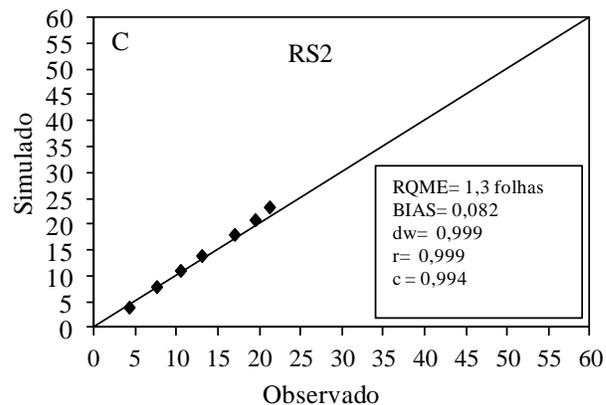
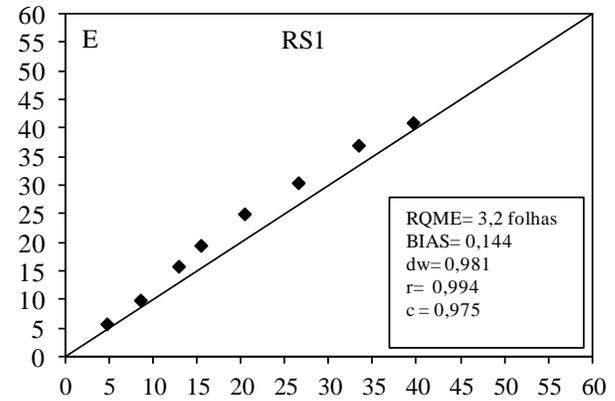
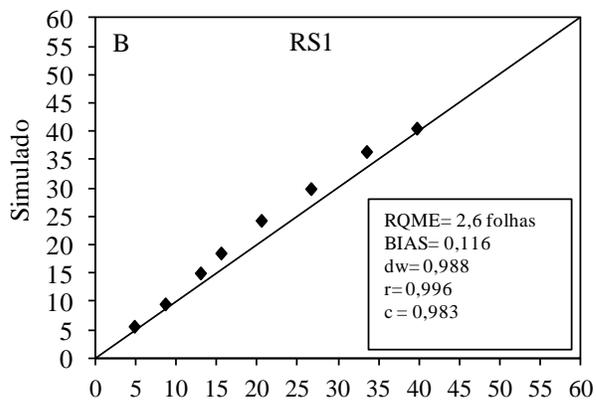
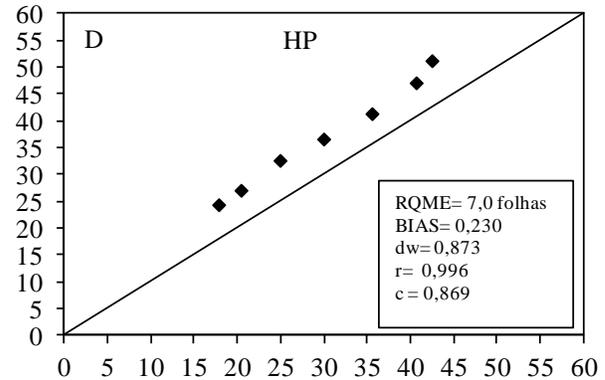
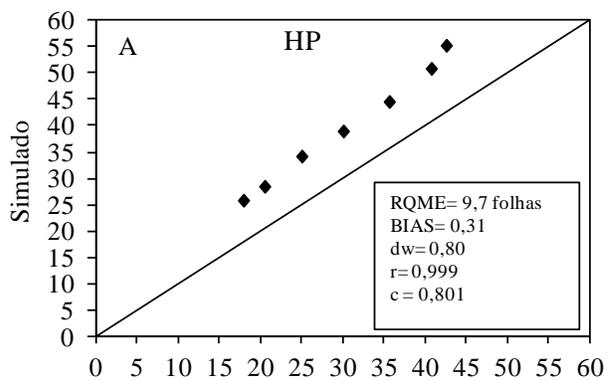
ANEXO C - Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), da variedade de mandioca Fepagro RS13, pelo modelo do filocrono (A) e WE (B) na versão Tmed para o ano agrícola 2008/2009. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.



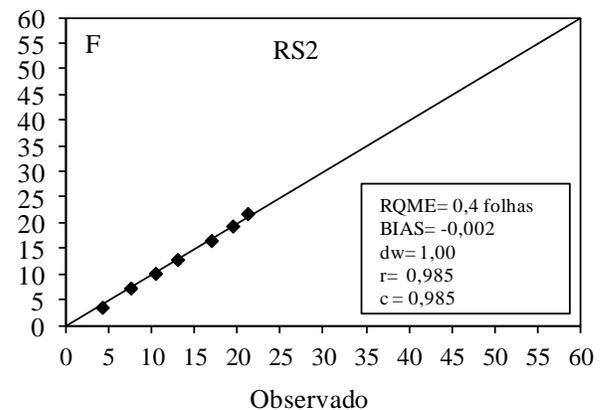
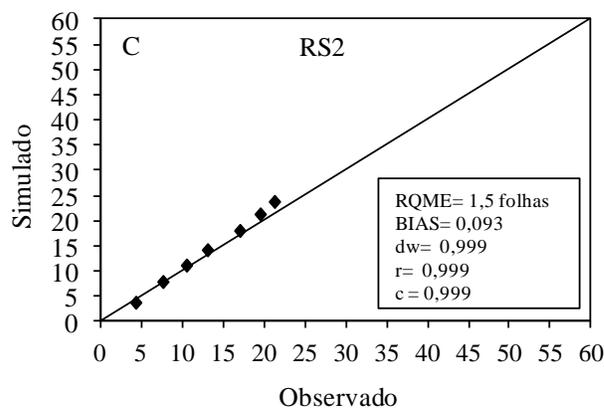
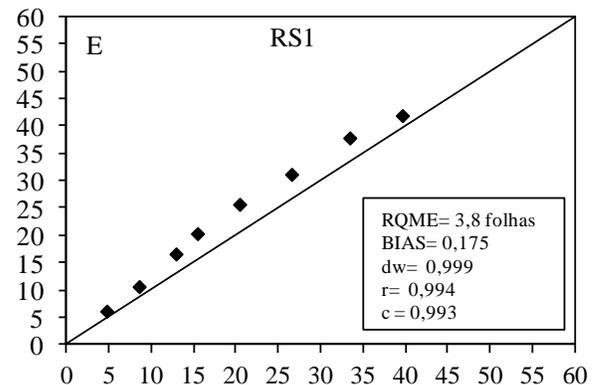
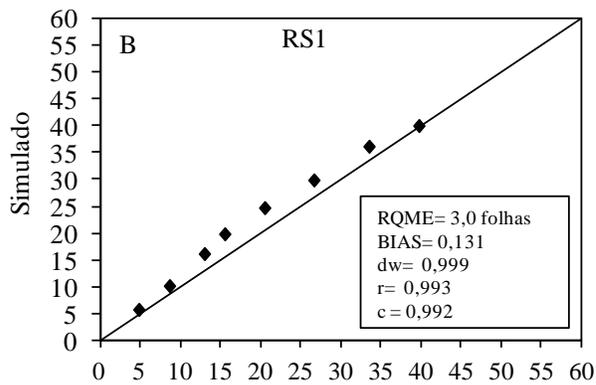
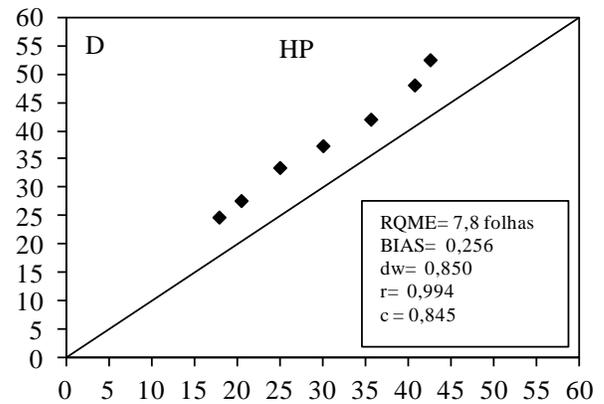
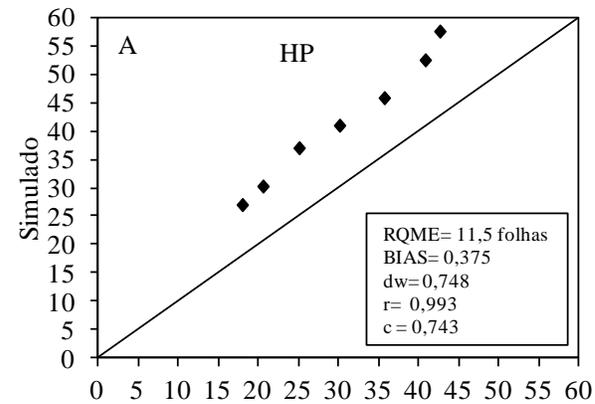
ANEXO D - Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), da variedade de mandioca Fepagro RS13, pelo modelo do filocrono (A) e WE (B) na versão Tmm para o ano agrícola 2008/2009. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.



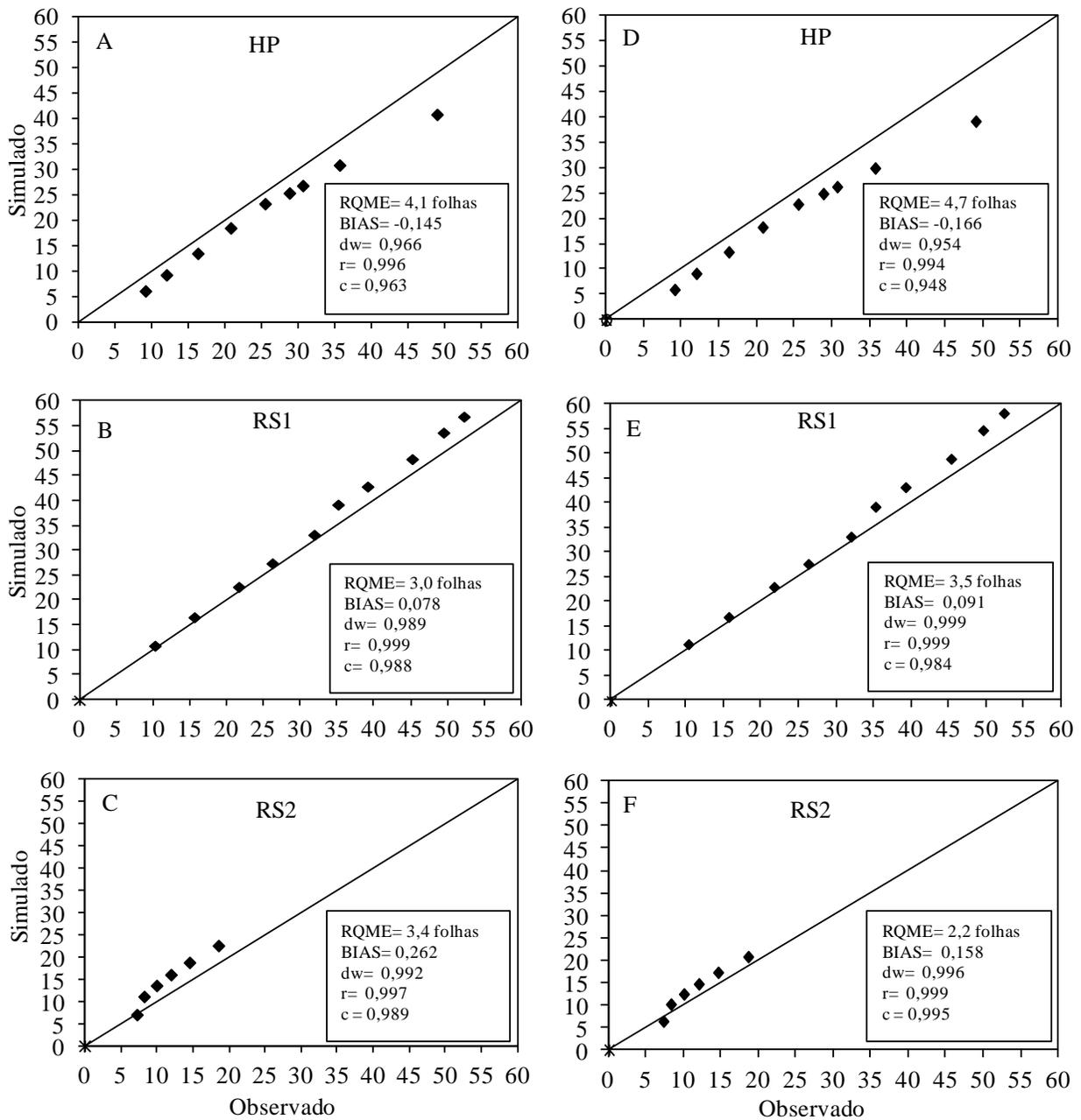
ANEXO E - Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) da variedade de mandioca Fepagro RS13, pelo modelo do filocrono (A, B, C) e WE (D, E, F) na versão Tmed para o ano agrícola 2009/2010. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.



ANEXO F - Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) da variedade de mandioca Fepagro RS13, pelo modelo do filocrono (A, B, C) e WE (D, E, F) na versão Tmm para o ano agrícola 2009/2010. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.



ANEXO G - Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) da variedade de mandioca Fepagro RS13, pelo modelo do filocrono (A, B, C) e WE (D, E, F) na versão Tmed para o ano agrícola 2010/2011. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.



ANEXO H - Número de folhas observado versus simulado na haste principal (HP), na primeira e segunda ramificação simpodial (RS1 e RS2) da variedade de mandioca Fepagro RS13, pelo modelo do filocrono (A, B, C) e WE (D, E, F) na versão Tmm para o ano agrícola 2010/2011. A linha cheia é a linha 1:1. Santa Maria, RS, 2012.

