

**RICARDO GUIMARÃES ANDRADE**

**ESTIMATIVA DA TEMPERATURA BASE INFERIOR E AVALIAÇÃO  
DOS MODELOS BETA, RCM E GDD EM DIFERENTES  
SUBPERÍODOS DAS CULTURAS DE MILHO, ARROZ E FEIJÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de “Magister Scientiae”

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2004**

**RICARDO GUIMARÃES ANDRADE**

**ESTIMATIVA DA TEMPERATURA BASE INFERIOR E AVALIAÇÃO  
DOS MODELOS BETA, RCM E GDD EM DIFERENTES  
SUBPERÍODOS DAS CULTURAS DE MILHO, ARROZ E FEIJÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de “Magister Scientiae”

APROVADA: 02 de abril de 2004

---

Prof. Sérgio Zolnier  
(Conselheiro)

---

Prof. Luiz Cláudio Costa  
(Conselheiro)

---

Prof<sup>a</sup>. Maria José Hatem de Souza

---

Prof. José Maria Nogueira da Costa

---

Prof. Gilberto Chohaku Sedyama  
(Orientador)

À minha esposa, Cristiana,

Aos meus pais, Benedito (*in memoriam*) e Marly,

Aos meus irmãos,

Aos meus amigos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que está sobre todas as coisas.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade e pelos ensinamentos.

À Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais, Fapemig, pelas bolsas de pesquisa destinadas à elaboração deste trabalho.

À minha esposa Cristiana, que esteve do meu lado nos últimos sete anos, sendo uma companheira paciente, compreensiva e amiga.

À minha família, principalmente aos meus pais, pelo amor e pelo apoio e estímulo constantes.

Ao professor Gilberto C. Sedyama, pela valiosa orientação e pela amizade.

Ao professor Sérgio Zolnier, pelas sugestões.

Ao professor Luiz Cláudio Costa, pelas sugestões e ensinamentos.

Aos demais professores e funcionários do programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola.

Ao amigo Alexandro, pelas orações e apoio nos momentos difíceis.

Ao Catalunha, Sílvia, Cléia, Mônica, Thomaz, Hewlley, Rafael, Evaldo, Rosandro e demais colegas, pela convivência amigável.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

RICARDO GUIMARÃES ANDRADE, filho de Benedito de Oliveira Andrade e Marly Guimarães Andrade, nasceu em 18 de fevereiro de 1976, em Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais.

Em maio de 2002, concluiu o Curso de Graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa - MG.

Em abril de 2002, iniciou o Curso de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

## CONTEÚDO

<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xiv</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
2.1. Influência das condições climáticas no desenvolvimento vegetal.....	4
2.2. Graus-dia .....	5
2.3. Limites térmicos.....	6
2.3.1. Milho ( <i>Zea mays</i> L.).....	6
2.3.2. Arroz ( <i>Oriza sativa</i> L.) .....	7
2.3.3. Feijão ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.) .....	9
2.4. Modelos não-lineares.....	9
2.5. Temperatura base inferior.....	12
2.5.1. Menor desvio-padrão em GDD.....	12
2.5.2. Menor desvio-padrão em dias .....	13
2.5.3. Coeficiente de variação.....	13
2.5.4. Método do coeficiente de regressão .....	14
2.5.4.1. Razão de desenvolvimento .....	16
2.6. Fórmulas matemáticas propostas por Yang e colaboradores.....	16

<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>18</b>
3.1. Dados meteorológicos e fenológicos .....	18
3.1.1. Milho ( <i>Zea mays</i> L.).....	18
3.1.2. Arroz ( <i>Oriza sativa</i> L.) .....	20
3.1.3. Feijão ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.) .....	21
3.2. Cálculo da temperatura base inferior (tb).....	23
3.3. Modelos de estimativa fenológica.....	24
3.4. Parâmetros dos modelos .....	24
3.5. Avaliação dos modelos fenológicos.....	25
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>26</b>
4.1. Determinação da temperatura base inferior.....	26
4.1.1. Metodologia comumente utilizada versus fórmulas de Yang e colaboradores .....	30
4.2. Parâmetros dos modelos fenológicos Beta e RCM .....	32
4.3. Desempenho dos modelos .....	34
4.4. Considerações referentes aos modelos Beta, RCM e GDD .....	40
<b>5. RESUMO E CONCLUSÕES .....</b>	<b>42</b>
<b>6. LITERATURA CITADA .....</b>	<b>44</b>
<b>Apêndice .....</b>	<b>51</b>

## LISTA DE QUADROS

		Página
1	Data de plantio, duração (d) e temperatura média (Tmd) dos subperíodos semeadura-emergência (S-E), semeadura-pendoamento (S-P) e emergência-pendoamento (E-P) do milho, cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515.....	19
2	Local, ano agrícola, duração (d) e temperatura média (Tmd) dos subperíodos semeadura-germinação (S-G), germinação-floração (G-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C) do arroz irrigado, cultivar IAC 4440.....	20
3	Data de plantio, duração e temperatura média dos subperíodos semeadura-floração (S-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C) do feijão, cultivares Negrito 897 e Ricobaio 1014.....	22
4	Valores de temperatura base inferior (Tb) estimados por meio de fórmulas desenvolvidas por Yang et al. (1995) para as culturas de milho, arroz, feijão em diferentes cultivares e subperíodos, pelos métodos do menor-desvio padrão em graus-dia (DPgdd), menor desvio-padrão em dias (DPdia), coeficiente de variação em graus-dia (CVgdd) e coeficiente de regressão (CR).....	27
5	Coeficientes de determinação ( $r^2$ ) e de correlação (r) da relação entre a temperatura média do ar e a duração dos subperíodos das culturas de arroz, feijão e milho.....	29



6	Valores de temperatura base inferior para a cultura do feijão, cultivar Negrito 897, nos subperíodos semeadura-floração (S-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C) estimados por meio das fórmulas propostas por YANG et al. (1995) e da metodologia comumente utilizada.....	30
7	Valores de temperatura base inferior para a cultura do feijão, cultivar Ricobaio 1014, nos subperíodos semeadura-floração (S-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C) estimados por meio das fórmulas propostas por YANG et al. (1995) e da metodologia comumente utilizada.....	31
8	Valores de temperatura base inferior para a cultura do milho, cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515, nos subperíodos semeadura-pendoamento (S-P) e emergência-pendoamento (E-P) estimados por meio das fórmulas propostas por YANG et al. (1995) e da metodologia comumente utilizada.....	31
9	Valores de parâmetros dos modelos Beta e RCM estimados para diversos subperíodos e cultivares das culturas de milho, feijão e arroz.....	33
10	Coeficientes de determinação ( $r^2$ ), da análise de concordância de Willmott (CW) e do erro médio absoluto (EAM, em dias) da predição fenológica com os modelos Beta, RCM e GDD em diferentes subperíodos e cultivares das culturas de arroz, feijão e milho.....	38
11	Coeficientes da equação de regressão e de determinação ( $r^2$ ), da relação entre o desenvolvimento relativo (DR) e a temperatura média do ar (Tmd), e temperatura-base (Tb) para diferentes subperíodos do arroz irrigado, cultivar IAC 4440, obtidos por Alves, em 1995.....	52
12	Temperatura média (Tmd), dias observados e estimados com os modelos: Beta, RCM e GDD nos subperíodos semeadura-emergência (S-E), semeadura-pendoamento (S-P) e emergência-pendoamento (E-P) da cultura do milho, cultivar Phoenix.....	52
13	Temperatura média (Tmd), dias observados e estimados com os modelos: Beta, RCM e GDD nos subperíodos semeadura-emergência (S-E), semeadura-pendoamento (S-P) e emergência-pendoamento (E-P) da cultura do milho, cultivar Mezcla Amarillo.....	53
14	Temperatura média (Tmd), dias observados e estimados com os modelos Beta, RCM e GDD nos subperíodos semeadura-emergência (S-E), semeadura-pendoamento (S-P) e emergência-pendoamento (E-P) da cultura do milho, cultivar Pioneer 515.....	53

15	Temperatura média (Tmd), dias observados e estimados com os modelos Beta, RCM e GDD nos subperíodos semeadura-germinação (S-G), germinação-floração (G-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C) da cultura de arroz irrigado, cultivar IAC 4440.....	54
16	Temperatura média (Tmd), dias observados e estimados com os modelos Beta, RCM e GDD nos subperíodos semeadura-floração (S-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C) da cultura do feijão, cultivar Negroito 897.....	56
17	Temperatura média (Tmd), dias observados e estimados com os modelos Beta, RCM e GDD nos subperíodos semeadura-floração (S-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C) do feijão, cultivar Ricobaio 1014.....	57
18	Graus-dia acumulados para os subperíodos semeadura-germinação (S-G), germinação-floração (G-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C) do arroz irrigado, cultivar IAC 4440, para diferentes locais e anos agrícolas, obtidos por Alves, em 1995.....	57

## LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Dias observados versus estimados com os modelos Beta, RCM e GDD para a cultura do arroz irrigado, cultivar IAC 4440, nos subperíodos semeadura-germinação, germinação-floração, floração-colheita e semeadura-colheita.....	34
2 Dias observados versus estimados com os modelos Beta, RCM e GDD para a cultura do feijão, cultivares Negrito 897 e Ricobaio 1014, nos subperíodos semeadura-floração, floração-colheita e semeadura-colheita.....	35
3 Dias observados versus estimados com os modelos Beta, RCM e GDD para a cultura do milho, cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515, nos subperíodos semeadura-emergência, emergência-pendoamento e semeadura-pendoamento.....	37
4 Determinação da temperatura base inferior do subperíodo semeadura-emergência do milho (Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515) pelos métodos da razão de desenvolvimento e do menor desvio-padrão em dias.....	58
5 Determinação da temperatura base inferior do subperíodo emergência-pendoamento do milho (Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515) pelos métodos da razão de desenvolvimento e do menor desvio-padrão em dias.....	59

6	Determinação da temperatura base inferior do subperíodo semeadura- pendoamento do milho (Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515) pelos métodos da razão de desenvolvimento e do menor desvio-padrão em dias.....	60
7	Determinação da temperatura base inferior do feijão, cultivar Negrito 897, nos subperíodos semeadura-floração, floração-colheita e semeadura-colheita pelos métodos da razão de desenvolvimento e do menor desvio-padrão em dias.....	61
8	Determinação da temperatura base inferior do feijão, cultivar Ricobaio 1014, nos subperíodos semeadura-floração, floração-colheita e semeadura-colheita pelos métodos da razão de desenvolvimento e do menor desvio-padrão em dias.....	62
9	Graus-dia acumulados da semeadura até a emergência, calculados para diferentes temperaturas base inferior e datas de plantio do milho, cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515.....	63
10	Graus-dia acumulados da semeadura até o pendoamento, calculados para diferentes temperaturas base inferior e datas de plantio do milho, cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515.....	64
11	Graus-dia acumulados da emergência até o pendoamento, calculados para diferentes temperaturas base inferior e datas de plantio do milho, cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515.....	65
12	Graus-dia acumulados nos subperíodos semeadura-floração, floração- colheita e semeadura-colheita, calculados para diferentes temperaturas base inferior e datas de plantio do feijão, cultivar Negrito 897.....	66
13	Graus-dia acumulados nos subperíodos semeadura-floração, floração- colheita e semeadura-colheita, calculados para diferentes temperaturas base inferior e datas de plantio do feijão, cultivar Ricobaio 1014.....	67

## RESUMO

ANDRADE, Ricardo Guimarães, M. S., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2004. **Estimativa da temperatura base inferior e avaliação dos modelos BETA, RCM e GDD em diferentes subperíodos das culturas de milho, arroz e feijão.** Orientador: Gilberto Chohaku Sedyama. Conselheiros: Sérgio Zolnier e Luiz Cláudio Costa.

Foram determinadas as temperaturas base inferior, em vários subperíodos, aplicando-se as fórmulas propostas por Yang e Colaboradores, em 1995. Foram estudadas as seguintes culturas e subperíodos, respectivamente: milho (Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515) na semeadura-emergência, emergência-pendoamento e semeadura-pendoamento; arroz (IAC 4440) na semeadura-germinação, germinação-floração, floração-colheita e semeadura-colheita; feijão (Negrito 897 e Ricobaio 1014) na semeadura-floração, floração-colheita e semeadura-colheita. Também foi feita uma comparação entre as fórmulas propostas por Yang e seus colegas, em 1995 e a metodologia comumente utilizada. Desta forma, constatou-se que, em geral, as fórmulas de cálculo da temperatura base inferior foram consistentes. Além disso, verificou-se que houve variação da temperatura base inferior tanto pelo método de cálculo quanto pelo subperíodo analisado, bem como o método do menor desvio-padrão em graus-dia diferiu, consideravelmente, dos demais métodos de estimativa. Os modelos Beta, RCM e

GDD foram avaliados quanto a estimativa dos diversos subperíodos das culturas anteriormente mencionadas. Constatou-se que os modelos Beta e RCM foram idênticos, apresentando a mesma duração dos subperíodos, bem como um melhor desempenho na estimativa dos subperíodos, em comparação com o modelo GDD.

## ABSTRACT

ANDRADE, Ricardo Guimarães, M. S., Universidade Federal de Viçosa, April 2004.  
**Estimating the lower-base temperature and evaluating the models BETA, RCM and GDD at different subperiods of maize, rice and bean crops.**  
Adviser: Gilberto Chohaku Sedyama. Committee members: Sérgio Zolnier and Luiz Cláudio Costa.

The lower-base temperatures were determined for several subperiods, by using the formulas proposed by Yang and colleagues, in 1995. The following crops and subperiods were respectively studied: maize (Phoenix, Mezcla Amarillo and Pioneer 515) at sowing-emergence, emergence-inflorescence and sowing-inflorescence; rice (IAC 4440) at sowing-germination, germination-florescence, florescence-harvesting and sowing-harvesting; and bean (Negrito 897 and Ricobaio 1014) at sowing-florescence, florescence-harvesting and sowing-harvesting. The formulas proposed by Yang and colleagues were compared with the ones usually used. In general, it was found that the calculation formulas of the lower-base temperature were consistent. In addition, a variation of the lower-base temperature occurred either by the calculation method and the analyzed subperiod. Moreover, the lower standard deviation method in degree-day differed considerably from the other estimate methods. The models Beta, RCM and GDD were evaluated in relation to the estimate of the several subperiods of the these crops. It was found that Beta and

RCM models were identical, since they presented the same duration of the subperiods as well as better performance in estimating the subperiods, compared to the GDD model.



## 1. INTRODUÇÃO

Dentre todas as atividades econômicas, a agricultura é a que apresenta maior dependência das condições meteorológicas, sendo estas as principais responsáveis pelas oscilações e frustrações das safras agrícolas. As relações entre os parâmetros climáticos e a produção agrícola são bastante complexas, pois, os fatores ambientais podem afetar o crescimento e o desenvolvimento das plantas nos estádios do ciclo da cultura (MORAES et al., 1998).

Dentre os fatores ambientais, a temperatura afeta praticamente todos os processos fisiológicos nos vegetais, tais como a germinação, respiração, transpiração, atividade fotossintética, atividades enzimáticas, permeabilidades das paredes e membranas celulares, absorção de água e nutrientes, velocidade das reações químicas nos vegetais, influenciando portanto, em todos os processos metabólicos (LUCCHESI et al., 1994). A temperatura considerada ótima, para a maioria das espécies, encontra-se entre 15°C e 30°C; a máxima varia em torno de 35°C e 40°C, enquanto a mínima, para algumas espécies, aproxima-se do ponto de congelamento, principalmente para as espécies nativas de regiões frias (LUCCHESI et al., 1994).

Segundo WANG (1960), os estudos das interações clima-planta foram iniciados por Réaumur, em 1735, sendo este considerado o precursor do sistema de unidades térmicas ou graus-dia, que é comumente utilizado para estimar a duração

dos estádios de desenvolvimento de vegetais e para escolher a melhor época de semeadura. Desde então, vários modelos têm sido sugeridos para caracterizar a duração dos ciclos das culturas.

O conceito de graus-dia (GDD) pressupõe a existência de uma temperatura base inferior ( $T_b$ ), abaixo da qual a planta não se desenvolve e, se o fizer, será em taxas muito reduzidas. Cada espécie vegetal ou cultivar possui uma temperatura base, que pode variar em função do estágio fenológico da planta, sendo comum, no entanto, a adoção de um valor médio único para todo o ciclo da cultura, por ser mais fácil sua aplicação (Camargo, 1984, citado por SENTELHAS et al., 1994). Esta teoria também assume que tanto as temperaturas diurnas como as noturnas afetam o desenvolvimento e crescimento vegetal e que os dados, somente, perdem sua confiabilidade sob condições de extremo ou prolongado estresse hídrico (ROBINSON, 1971).

Com base em observações fenológicas, a temperatura base inferior é, geralmente, determinada por métodos estatísticos, como o coeficiente de variação, menor desvio-padrão em dias e graus-dia, regressão e intersecção das abscissas. Entretanto, deve-se tomar cuidado, pois, além das aproximações contidas nessas formas de cálculo, pode existir diferença entre a temperatura base fisiológica e aquela obtida estatisticamente (ARNOLD, 1959), levando a estimativas discrepantes de temperatura base, de modo que a utilização dos valores determinados deve ser baseada no conhecimento de seu exato significado e dos erros que podem conter (LOZADA & ANGELOCCI, 1999).

A determinação da temperatura base inferior, baseada nos métodos anteriormente mencionados, geralmente é muito trabalhosa. Com o propósito de simplificar os métodos de cálculo, YANG et al. (1995) desenvolveram quatro fórmulas matemáticas, que calculam a temperatura base inferior, requerendo como dados, somente a temperatura média do subperíodo em estudo, o número de plantios, a duração do subperíodo, a temperatura média de todos os plantios do subperíodo em estudo e a diferença entre a temperatura média do subperíodo e a temperatura média de todos os plantios do subperíodo em estudo.

Muitos cientistas têm se esforçado no sentido de melhorar os modelos fenológicos de culturas. GAO et al. (1992), trabalhando com a cultura do arroz, propuseram o "Rice Clock Model" (RCM), um modelo não linear que descreveu, satisfatoriamente, o desenvolvimento da cultura do arroz desde a semeadura até a

floração. Entretanto, o RCM apresenta um problema de descontinuidade em  $T_o$  (temperatura ótima). No intuito de resolver este problema, YIN et al. (1995) introduziram o modelo Beta, que tem uma forma semelhante ao RCM, embora com menos parâmetros e que permite pontos de inflexão em qualquer lado da curva.

Considerando o exposto, o presente trabalho objetivou testar fórmulas matemáticas de cálculo da temperatura base inferior, desenvolvidas por YANG et al. (1995), em diferentes subperíodos, assim como avaliar os modelos Beta, RCM e GDD, comparando o modelo Beta com os demais na predição dos subperíodos das culturas de milho, arroz e feijão.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Influência das condições climáticas no desenvolvimento vegetal**

O desenvolvimento vegetal é, diretamente, afetado pelas condições ambientais. A temperatura é o principal fator, que afeta de vários modos o crescimento e desenvolvimento das plantas (RUIZ-CORRAL et al., 2002; WUTKE et al., 2000; YAN & HUNT, 1999; KETRING & WHELESS, 1989; JOHNSON & THORNLEY, 1985; RAWSON & HINDMARSH, 1982), através do crescimento das raízes, absorção de nutrientes e água do solo necessários à fotossíntese, respiração e translocação de fotossintetizados. Exerce também forte influência na morfologia, desenvolvimento e produção, bem como no tempo necessário para alcançar estádios fenológicos (NARWAL et al., 1986). Conforme RUSSELLE et al. (1984), outros fatores além da temperatura, tais como o fluxo e duração da radiação fotossinteticamente ativa, a disponibilidade de nutrientes e água e a perda de tecidos fotossintéticos, também afetam o crescimento e desenvolvimento das plantas.

Todos os processos fisiológicos e funções da planta respondem dentro de limites térmicos, no ambiente em que elas se desenvolvem, sendo que todas respostas podem ser resumidas em termos de três temperaturas cardeais: temperatura base inferior ou mínima ( $T_b$ ), temperatura ótima ( $T_o$ ) e temperatura base superior ou máxima ( $T_s$ ). As temperaturas entre os pontos cardeais são

importantes para o cálculo da fenologia, adaptação e produção de várias culturas (SHAYKEWICH, 1995; CROSS & ZUBER, 1972). ROBERTS e SUMMERFIELD (1987) descreveram temperaturas entre  $T_b$  e  $T_o$  como subótimas e aquelas entre  $T_o$  e  $T_s$  como supra-ótimas.

## 2.2. Graus-dia

Para completarem cada subperíodo de desenvolvimento, as plantas necessitam, dentre outros fatores, de energia, que pode ser representada por um somatório do tempo térmico. Um método de tempo térmico muito utilizado (McMASTER & WILHELM, 1997; TOLLENAAR et al., 1979) é o de graus-dia (GDD).

O conceito de graus-dia baseia-se no fato que a planta precisa de uma certa quantidade de energia, que é representada pelo somatório da diferença entre uma dada temperatura e o valor mínimo considerado como base, abaixo do qual o desenvolvimento e crescimento da planta é nulo e, no caso de ocorrer, será em quantidade extremamente reduzida (MASSIGNAM et al., 1998; MONTEITH & ELSTON, 1996). Além disso, pressupõe uma relação linear entre a taxa de desenvolvimento (TD) e a temperatura do ar (YAN & HUNT, 1999; YIN et al., 1995; SLAFER & SAVIN, 1991). WANG (1960) comenta que a exigência em graus-dia é constante, somente, para aquela amplitude na qual existe linearidade entre o desenvolvimento relativo e a temperatura. O Autor ressalta que as plantas respondem, diferentemente, ao mesmo fator ambiental durante os subperíodos de desenvolvimento.

Uma observação importante, relativamente ao conceito de graus-dia (modelo linear) refere-se ao fato de este modelo ser conveniente e efetivo, quando a temperatura não se aproxima, ou excede, o ponto de temperatura ótima ( $T_o$ ) (SUMMERFIELD & ROBERTS, 1987). Em condições naturais, entretanto, a temperatura pode aproximar ou exceder, o valor de  $T_o$ , uma situação que altera, intensamente, a aproximação linear (SHAYKEWICH, 1995). Outra questão relacionada ao conceito de graus-dia é o estabelecimento dos limites das temperaturas favoráveis, consideradas como base, para as culturas completarem seus diferentes subperíodos, ou seus estádios de desenvolvimento (INFELD et al., 1998).

Para cada espécie de planta, há uma temperatura base que pode ser variável, em função do estágio fenológico da planta (WUTKE et al., 2000). ARNOLD (1959) demonstra a necessidade de determinar a temperatura base inferior, para minimizar o erro no cálculo dos graus-dia.

O intensivo uso de graus-dia na previsão dos estágios fenológicos, bem como no zoneamento de culturas, pode ser observado em diversas pesquisas (LOZADA & ANGELOCCI, 1999; McMASTER & WILHELM, 1997; McMASTER, 1993; McMASTER & SMIKA, 1988; KLEPPER et al., 1984; RUSSELLE et al., 1984; TOLLENAAR et al., 1979; CROSS & ZUBER, 1972; BROWN, 1970; ARNOLD, 1959; GILMORE & ROGERS, 1958). Apesar do conceito de graus-dia ser atraente devido à sua simplicidade (KINIRY & KEENER, 1982), além de ser um índice bioclimático de grande utilização, principalmente na caracterização dos materiais vegetais quanto à duração dos subperíodos e do ciclo em associação com a temperatura do ar, foi sujeito a muitas críticas durante anos.

## **2.3. Limites térmicos**

### **2.3.1. Milho (*Zea mays* L.)**

CROSS e ZUBER (1972) testaram 22 métodos de cálculo de graus-dia e indicaram, como limites mais eficientes para a cultura do milho, as temperaturas entre 10°C e 30°C. BARBANO et al. (2001), trabalhando com os métodos do menor desvio-padrão em dias e da razão de desenvolvimento para alguns cultivares de milho, no Estado de São Paulo, encontraram  $T_b$  variando de 6,0°C a 9,0°C, no subperíodo semeadura-florescimento masculino, sendo que, neste subperíodo, BRUNINI et al. (1995) obtiveram  $T_b$  em torno de 8,0°C para diversos cultivares de milho.

Jones (1986), citado por ELLIS et al. (1992), indica  $T_b$  entre 8,0°C e 10°C para estimativa do acúmulo térmico no subperíodo semeadura-florescimento masculino. LOZADA e ANGELOCCI (1999) utilizaram  $T_b$  de 2,0°C, 3,0°C e 10°C, que possibilitaram boa estimativa da duração do subperíodo semeadura-floração para um híbrido de milho.

EAGLES e HARDACRE (1979) observaram que determinados híbridos de milho apresentavam baixa germinação e emergência à temperatura constante de

11°C. Segundo LOZADA e ANGELOCCI (1999), no caso do milho, tem sido considerada  $T_b$  de 10°C para o ciclo. Entretanto, OLIVEIRA (1990) relata valores obtidos por diferentes autores, variando de 4,0°C a 10°C para o subperíodo emergência-floração e de 10°C a 12°C para o subperíodo pendramento-maturação. No entanto, para o subperíodo germinação-emergência, a semente do milho exige uma  $T_b$  superior a 10°C, uma  $T_o$  de 26°C a 30°C e tolera uma  $T_s$  de 40°C a 42°C. Valores superiores àquele de  $T_s$  ou abaixo de  $T_b$  impedem a germinação, sendo que, para o subperíodo emergência-floração, a  $T_o$  está na faixa de 25°C a 30°C, enquanto para maturidade fisiológica a  $T_o$  está em torno de 27°C (OLIVEIRA, 1990).

WARRINGTON e KANEMASU (1983) analisaram dois híbridos de milho (XL45 e W346) em ambiente controlado, submetido a 18 combinações de temperaturas dia/noite, que variaram de 16/6 a 38/33°C com fotoperíodo constante de 12 horas. Nessas condições, eles obtiveram  $T_b$  de 9,0°C,  $T_o$  de 30°C e  $T_s$  de 40°C, com um acúmulo de graus-dia de 62,5 para o subperíodo correspondente à germinação e emergência. Para os subperíodos da semeadura à iniciação floral (tassel) e da semeadura à iniciação da antese, obtiveram uma  $T_b$  de 8,0°C e 7,0°C, respectivamente, com uma  $T_o$  de 28°C para ambos, sendo que os graus-dia foram, respectivamente, 208 e 736 para o W346 e 245 e 816 para o XL45.

ELLIS et al. (1992) indicaram que o valor da  $T_s$ , para os cultivares de milho H-32 e Across 8201 foi aproximadamente 37°C, baseado nos resultados experimentais obtidos de que as plantas desses cultivares, crescidos à temperatura constante de 37°C, morreram antes de alcançar a iniciação floral (tassel). Este valor, entretanto, não foi letal a outros três cultivares. BROWN (1970) notou um decréscimo no tempo entre a iniciação da panícula e o florescimento, para a cultura do milho, à medida que a temperatura aumentava de 15°C para 25°C, sendo que uma elevação de 25°C a 30°C não causou diferença. Pascale (1953), mencionado por BRUNINI (1997), concluiu que o cultivo do milho não é possível na época do verão, quando a temperatura do ar média é inferior a 19°C ou a temperatura média noturna do ar é inferior a 13°C.

### **2.3.2. Arroz (*Oriza sativa* L.)**

O arroz é uma cultura cultivada numa ampla faixa de condições climáticas. Do ponto de vista térmico, OLIVEIRA et al. (2000) afirmam que o cultivo de arroz é

muito bem sucedido em regiões, que apresentam temperatura média do ar, durante toda a estação de crescimento, igual ou superior a 22°C.

MOTA (1980) analisou as regiões produtoras de arroz, na América Latina, quanto à temperatura média do ar no mês de janeiro, constatando que não existe nenhuma região produtora de arroz, onde a temperatura média é inferior a 20°C. Segundo GRIST (1975), as exigências térmicas do arroz desde a semeadura até a maturação variam de 16°C a 38°C.

ALVES et al. (2000), utilizando o método da razão de desenvolvimento para o arroz, cultivar IAC 4440, encontraram Tb de 18,8°C; 12,8°C; 12,5°C e 11,8°C para os seguintes subperíodos, respectivamente: semeadura-germinação; germinação-floração; floração-colheita; e semeadura-colheita. YIN et al. (1995) utilizaram, como limites térmicos favoráveis, temperaturas entre 8,0°C e 42°C para o subperíodo semeadura-floração da cultura do arroz.

SUMMERFIELD et al. (1992), trabalhando com 16 cultivares de arroz, em ambiente controlado, encontraram Tb entre 6,6°C e 11,9°C para o subperíodo semeadura até à emergência da panícula. Na pesquisa de SUMMERFIELD et al. (1992), que estudaram 16 cultivares de arroz, foi obtida uma Tb de 10,9°C para a emergência da panícula do cultivar IR36; entretanto, ELLIS et al. (1993) confirmam uma Tb de 8,6°C para este cultivar. Para VERGARA e LILIS (1968), na cultura do arroz, as baixas temperaturas provocam o retardamento da emergência da panícula. OWEN (1971) afirma que a cultura do arroz tem melhor desempenho com temperaturas acima de 20°C e inferiores a 35-40°C. Entretanto, SUMMERFIELD et al. (1992) obtiveram desempenho ótimo, com temperaturas entre 24 e 26°C, na maioria dos 16 cultivares analisados no subperíodo de semeadura até à emergência da panícula.

INFELD e BAPTISTA DA SILVA (1987), baseados na fórmula de MILLS (1964), variaram as temperaturas limitantes ao desenvolvimento do arroz irrigado e encontraram temperaturas favoráveis entre 10°C e 30°C. GAO et al. (1987), estudando modelos de desenvolvimento fenológico do arroz, em latitudes iguais às latitudes das regiões arrozeiras do Rio Grande do Sul, encontraram limites térmicos favoráveis entre 10°C e 28°C para o desenvolvimento de cultivares japoneses, e entre 12°C e 30°C para cultivares índicos, sendo estes os mais cultivados no Estado do Rio Grande do Sul.



### 2.3.3. Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)

Esta espécie é cultivada às temperaturas entre 10°C e 35°C. Do ponto de vista ecológico, entretanto, assume-se a faixa de 15°C a 27°C como sendo ideal para seu desenvolvimento e produção (WUTKE et al., 2000). Além disso, existe uma variabilidade genotípica a ser explorada em estudos de adaptação a condições extremas de temperatura. Em situações de elevada temperatura do ar, superior a 30°C, ocorrem efeitos negativos ao bom desempenho das plantas de feijoeiro (BARBANO et al., 2001).

Segundo MOTA et al. (1977), a  $T_b$  para o feijoeiro, está entre 10°C a 11,7°C. SCARISBRICK et al. (1976) utilizaram, para o cálculo do somatório de graus-dia do feijoeiro, uma  $T_b$  de 10°C. MASSIGNAM et al. (1998) obtiveram uma  $T_b$  de 3,0°C, para o feijão, cultivar Carioca 80, no subperíodo semeadura-floração. WUTKE et al. (2000), trabalhando com os métodos da menor variabilidade e regressão, encontraram  $T_b$  variando de 6,5°C a 10°C para o feijoeiro, cultivares IAC Carioca, Carioca e IAC Una, conforme o cultivar, subperíodo e método de cálculo.

Para NADAL et al. (1986), a cultura do feijão-vagem adapta-se bem em climas amenos ou quentes, com temperaturas variando entre 18°C e 30°C, sendo prejudicada por temperaturas acima de 35°C, ou frio intenso. O calor excessivo causa danos em qualquer subperíodo do feijão-vagem (DICKSON & PETZOLDT, 1987). Os maiores prejuízos ocorrem durante a fase reprodutiva, em que temperaturas variando entre 30 e 40°C ocasionam redução no rendimento, pois provocam abortamento de flores e botões florais (SHONNARD & GEPTS, 1994; AGTUNONG et al., 1992; MONTERROSO & WIEN, 1990).

## 2.4. Modelos não-lineares

Vários modelos não-lineares têm sido propostos para descrever a resposta da temperatura aos processos de desenvolvimento das plantas. Segundo SHARPE e DeMICHELE (1977), um modelo detalhado, baseado na resposta de reações enzimáticas à temperatura, ajustou-se muito bem os dados de LEHENBAUER (1914). Entretanto, quando este modelo foi introduzido para prever o desenvolvimento do milho, no campo, não se mostrou melhor que os métodos de tempo térmicos GDD e BLM (Bilinear Model) (KINIRY & KEENER, 1982). Além

disso, sua utilização em condições de campo foi impedida devido ao grande número de parâmetros (KINIRY & KEENER, 1982; HODGES, 1991).

A maioria das aproximações não-lineares usam equações descritivas (GAO et al., 1992; HORIE & NAKAGAWA, 1990; ANGUS et al., 1981; COLIGADO & BROWN, 1975; ROBERTSON, 1968). No entanto, a maioria dessas equações descritivas não responde pelo declínio, freqüentemente, observado na taxa de desenvolvimento (TD), a temperaturas supra-ótimas. Uma equação quadrática (exemplo, ROBERTSON, 1968) responde por este declínio, porém assume uma resposta simétrica e não permite nenhuma curvatura côncava próxima a  $T_b$  (YIN et al., 1995). Estas limitações foram superadas no “Rice Clock Model” – RCM (GAO et al., 1992) que descreve a resposta de TD à temperatura, como

$$TD = \exp(k) \left( \frac{T - T_b}{T_o - T_b} \right)^\alpha \left( \frac{T_s - T}{T_s - T_o} \right)^\beta \quad (1)$$

em que

$k, \alpha, \beta$  = parâmetros do modelo;

TD = taxa de desenvolvimento para o subperíodo em estudo,  $d^{-1}$ ,  $0 < TD < 1$ ;

T = temperatura média durante o subperíodo, °C;

$T_s$  = temperatura base superior, °C;

$T_b$  = temperatura base inferior, °C;

$T_o$  = temperatura ótima para o desenvolvimento, °C; e

$\exp(k)$  define a máxima TD quando  $T = T_o$ .

Porém, a máxima TD na equação 1, nem sempre ocorre em  $T_o$ . Portanto, para que o modelo tivesse a máxima TD em  $T_o$ , GAO et al. (1992) acrescentaram a seguinte restrição:

$$TD = \exp(k) \text{ se } \left( \frac{T - T_b}{T_o - T_b} \right)^\alpha \left( \frac{T_s - T}{T_s - T_o} \right)^\beta > 1 \quad (2)$$

Por outro lado, esta restrição pode resultar numa relação não-linear descontínua. Para superar o problema do RCM, YIN et al. (1995) introduziram o

modelo Beta que têm uma forma semelhante àquela do RCM (Eq. 1), mas com menos parâmetros permitindo estimativas não-problemáticas de  $T_o$ , com pontos de inflexão em qualquer lado da curva. Assim, para descrever a resposta da TD, para temperaturas entre  $T_b$  e  $T_s$ , a equação pode ser expressa como

$$TD = \exp(\mu)(T - T_b)^\alpha (T_s - T)^\beta \quad (3)$$

em que

$\mu$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  são os parâmetros do modelo.

Quando os valores de  $T_b$  e  $T_s$  são conhecidos, os parâmetros  $\mu$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  podem ser determinados pelo método da regressão dos quadrados mínimos, após aplicar logarítmico na equação 3, assumindo a seguinte forma linear:

$$\ln TD = \mu + \alpha \ln(T - T_b) + \beta \ln(T_s - T) \quad (4)$$

Em contraste com o RCM, a equação 4 não inclui a  $T_o$  nem a máxima TD como seus parâmetros, porém pode prover estimativas de  $T_o$  e máxima TD.

Igualando a zero a derivada de primeira-ordem  $TD'$  da equação 3, tem-se

$$TD' = \exp(\mu)(T - T_b)^\alpha (T_s - T)^\beta \left( \frac{\alpha}{T - T_b} - \frac{\beta}{T_s - T} \right) = 0 \quad (5)$$

Conseqüentemente,

$$T_o = \frac{\alpha T_s + \beta T_b}{\alpha + \beta} \quad (6)$$

Substituindo  $T_o$  na equação 3, resulta a estimativa de  $R_o$ , ou a máxima TD, como se segue:

$$R_o = \exp(\mu) \alpha^\alpha \beta^\beta \left( \frac{T_s - T_b}{\alpha + \beta} \right)^{\alpha + \beta} \quad (7)$$

Assim, o modelo Beta tem um parâmetro a menos que o RCM, porém, distinto do RCM, e pode descrever a relação não-linear, suavemente, entre a TD e temperatura.

## 2.5. Temperatura base inferior

O conceito de temperatura base inferior (Tb) pode ser descrito, fisiologicamente, ou estatisticamente. Fisiologicamente, assume-se que, sob um certo nível de temperatura, cessarão o crescimento e desenvolvimento da cultura (YANG et al. 1995). Entretanto, é difícil determinar a Tb fisiologicamente, pois, cada estágio de desenvolvimento pode ter diferentes valores de Tb.

Estatisticamente, a Tb é aquela que resulta na menor variação em acumulações de GDD (YANG et al. 1995). Na maioria dos casos, a Tb é determinada estatisticamente e não fisiologicamente, devido ao critério empregado para selecionar a Tb, o que pode ser observado ao longo dos anos, nas pesquisas com diversas culturas e cultivares (BARBANO et al., 2001; WUTKE et al., 2000; ALVES et al., 2000; LOZADA & ANGELOCCI, 1999; INFELD et al., 1998; YANG et al., 1995; MASSIGNAM & ANGELOCCI, 1993; FERNANDEZ & CHEN, 1989; GOYNE et al., 1977; ARNOLD, 1959).

Muitos métodos, que determinam a Tb foram informados. Segundo YANG et al. (1995), dentre os mais importantes encontram-se: menor desvio-padrão em dias e graus-dia; coeficiente de variação em dias e graus-dia; e coeficiente de regressão.

### 2.5.1. Menor desvio-padrão em GDD

Neste método, a Tb é selecionada de forma que a variação resultante em GDD, utilizando-se uma série de plantios, seja minimizada. O menor desvio-padrão em GDD é definido, como

$$DP_{gdd} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (GDD_i - MGDD)^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

em que

$DP_{gdd}$  = menor desvio-padrão em GDD;  
 $GDD_i$  = graus-dia de desenvolvimento do i-ésimo plantio;  
 $MGDD$  = GDD médio global de todos os plantios; e  
 $n$  = número de plantios.

Neste método, GDD é calculado, usando-se uma série de  $T_b$  candidatas, sendo que cada uma resultará em um grupo de GDDs e um desvio-padrão. A temperatura que gera GDDs com um menor desvio-padrão, é selecionada como sendo o valor de  $T_b$ .

### 2.5.2. Menor desvio-padrão em dias

ARNOLD (1959) sugeriu que aqueles que usam unidades térmicas como uma ferramenta, não estão interessados no erro na unidade térmica, mas no erro em dias em que o erro na unidade térmica representa. Ele definiu o menor desvio-padrão em dias como

$$DP_{dia} = \frac{DP_{gdd}}{x_t - t_b} \quad (9)$$

em que

$DP_{dia}$  = desvio-padrão em dias;  
 $DP_{gdd}$  = desvio padrão em GDDs;  
 $X_t$  = temperatura média global de todos os plantios, °C; e  
 $t_b$  = temperatura base inferior, °C.

Como no método do menor desvio-padrão em GDD, este procedimento também requer a mesma seleção da  $T_b$  de uma série de temperaturas candidatas. Não há nenhuma melhoria neste método, em termos de procedimentos de cálculo.

### 2.5.3. Coeficiente de variação

Os métodos do menor desvio-padrão em GDD e dias fornecem magnitudes absolutas da variação em GDD e dias, mas não indicam magnitudes relativas da

variação. NUTTONSON (1958) definiu o coeficiente de variação, empregando as equações

$$CV_{dia} = \frac{DP_{dia}}{X_d} \cdot 100\% \quad (10)$$

$$CV_{gdd} = \frac{DP_{gdd}}{MGDD} \cdot 100\% \quad (11)$$

em que

$CV_{dia}$  = coeficiente de variação em dias;

$CV_{gdd}$  = coeficiente de variação em graus-dia;

$DP_{dia}$  = desvio-padrão em dias;

$DP_{gdd}$  = desvio-padrão em graus-dia;

$MGDD$  = graus-dia médio de todos os plantios para um determinado subperíodo de desenvolvimento; e

$X_d$  = número médio de dias requerido para alcançar um determinado subperíodo de desenvolvimento.

Em razão de  $X_d$  ser uma constante para todos os plantios, independente da  $T_b$  selecionada, não há nenhuma diferença entre este método e os métodos abordados nos itens 2.5.1 e 2.5.2, em termos da  $T_b$  selecionada e procedimentos de cálculo.

Os três métodos discutidos para calcular a  $T_b$  são empíricos. Para obter uma  $T_b$  que gere a menor variação em GDD ou dias, uma amplitude de temperaturas candidatas podem ser selecionadas para calcular GDD ou dias, bem como sua associação ao desvio-padrão em GDD ou dias.

#### **2.5.4. Método do coeficiente de regressão**

Para superar negligências dos três métodos discutidos anteriormente, HOOVER (1955) desenvolveu um método de coeficiente de regressão, que calcula a  $T_b$ , com a equação

$$Y_i = a + bT_i, \quad Y_i = (T_i - t_b)d_i \quad (12)$$

em que

$Y_i$  = GDD para o  $i$ -ésimo plantio;

$a$  e  $b$  = parâmetros da equação;

$T_i$  = temperatura média para o  $i$ -ésimo plantio, °C; e

$d_i$  = número de dias requeridos para um subperíodo de desenvolvimento do  $i$ -ésimo plantio.

HOOVER (1955) estudou a relação entre a temperatura média e GDD, aplicando um modelo de regressão linear. Neste modelo, a temperatura média é a variável independente e GDD é a variável dependente. Teoricamente, se a temperatura selecionada for muito alta, o coeficiente de regressão no modelo será positivo; caso contrário, será negativo. Quando o coeficiente de regressão ( $b$ ) é zero, considera-se que a temperatura selecionada é a  $T_b$ . Este método baseia-se na suposição que GDD é constante e independente da temperatura média. HOOVER (1955) localizou pontos no alcance positivo e negativo e encontrou o ponto zero através de interpolação gráfica.

Em estatística, o método de regressão não é muito diferente do método do menor desvio-padrão, pois, não apresenta nenhuma melhoria nos procedimentos de cálculos de GDD (ARNOLD, 1959). Esse método, também requer o cálculo de GDD, empregando-se uma amplitude de temperaturas candidatas para encontrar a  $T_b$ . Além disso, este método de interpolação gráfica não pode fornecer com precisão, uma  $T_b$ , porque é difícil determinar um número, exatamente de um gráfico.

Outro método semelhante e muito usado, para encontrar a  $T_b$  para o método de regressão, é o de intersecção da abscissa ou método da taxa de desenvolvimento (ARNOLD, 1959).

A fórmula geral para este método é

$$\frac{1}{d} = a + bT \quad (13)$$

em que

$d$  = número de dias do subperíodo;

1/d = taxa de desenvolvimento;

a = intercepto;

b = coeficiente de regressão; e

T = temperatura média durante o subperíodo, °C.

Ao fixar 1/d em zero, a Tb é dada por -a/b. Este método é simples e analítico, mas tem uma séria limitação, ou seja, em estatística, não é apropriado extrapolar modelos de regressão (YANG et al., 1995). No método de taxa de desenvolvimento, ao fixar 1/d em zero para encontrar a Tb, está sendo realizada a extrapolação, não sendo, portanto, aceitável. Ao contrário, no método de regressão, ao fixar o coeficiente de regressão (b) em zero, nenhuma extrapolação está envolvida.

Conforme mencionado, os procedimentos associados a estes quatro métodos comumente utilizados, para calcular a Tb para GDD, têm restrições.

#### 2.5.4.1. Razão de desenvolvimento

BRUNINI et al. (1976) adotaram o método de ARNOLD (1959) com uma alteração, ou seja, ao invés da relação 1/d (taxa de desenvolvimento), utilizaram a relação 100/d (desenvolvimento relativo). Com esta mudança na expressão de ARNOLD (1959), o método passou a ser denominado 'razão de desenvolvimento', que relaciona a temperatura média do ar, no período analisado, com o desenvolvimento relativo da cultura, dado pela equação

$$\frac{100}{d} = a + bT \quad (14)$$

## 2.6. Fórmulas matemáticas propostas por Yang e colaboradores

Tendo como base os métodos apresentados nos itens 2.5.1, 2.5.2, 2.5.3 e 2.5.4, YANG et al. (1995) desenvolveram fórmulas matemáticas aplicáveis, para determinação da Tb de qualquer cultura, em qualquer subperíodo de desenvolvimento, conforme os seguintes modelos:

a) Menor desvio-padrão em GDD



$$t_b = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \cdot d_i \sum_{i=1}^n d_i - n \sum_{i=1}^n d_i^2 \cdot T_i}{\left(\sum_{i=1}^n d_i\right)^2 - n \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (15)$$

b) Menor desvio-padrão em dias

$$t_b = T - \frac{\left(\sum_{i=1}^n t_i d_i\right)^2 - n \sum_{i=1}^n t_i^2 d_i^2}{n \sum_{i=1}^n d_i^2 t_i - n \sum_{i=1}^n t_i d_i \sum_{i=1}^n d_i} \quad (16)$$

c) Coeficiente de variação em GDD

$$t_b = \frac{\sum_{i=1}^n T_i d_i^2 \sum_{i=1}^n T_i d_i - \sum_{i=1}^n d_i \sum_{i=1}^n T_i^2 d_i^2}{\sum_{i=1}^n d_i^2 \sum_{i=1}^n T_i d_i - \sum_{i=1}^n d_i \sum_{i=1}^n T_i d_i^2} \quad (17)$$

d) Coeficiente de regressão

$$t_b = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \sum_{i=1}^n d_i T_i - n \sum_{i=1}^n d_i T_i^2}{\sum_{i=1}^n d_i \sum_{i=1}^n T_i - n \sum_{i=1}^n d_i T_i} \quad (18)$$

em que

$t_b$  = temperatura base inferior, °C;

$T_i$  = temperatura média do i-ésimo plantio, °C;

$T$  = temperatura média de todos os plantios, °C;

$t_i$  = diferença entre a temperatura média de todos os plantios e a temperatura média do i-ésimo plantio, °C;

$d_i$  = número de dias requeridos para a planta atingir um determinado subperíodo de desenvolvimento para o i-ésimo plantio; e

$n$  = número de plantios.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Dados meteorológicos e fenológicos

##### 3.1.1. Milho (*Zea mays* L.)

Os dados meteorológicos utilizados para os cultivares de milho Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515 foram obtidos na estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no município de Sete Lagoas, MG (19°28'S; 44°15'W; 732m), sendo que os dados de duração dos subperíodos semeadura-emergência, semeadura-pendoamento e emergência-pendoamento (Quadro 1) para os cultivares anteriormente citados, foram obtidos por SILVA (1989) no Ensaio Ecológico de Milho, realizado no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS-EMBRAPA), nos anos agrícolas de 1976/77, 1977/78.

A data de ocorrência da emergência foi determinada quando 50% das plantas estavam visíveis à superfície do solo, enquanto o pendoamento foi caracterizado, quando 50% das plantas de cada parcela liberavam pólen (SILVA, 1989).

Quadro 1 – Data de plantio, duração (d) e temperatura média (Tmd) dos subperíodos da semeadura-emergência (S-E), semeadura-pendoamento (S-P), emergência-pendoamento (E-P) do milho, cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515

Cultivares	Plantios	S-E		S-P		E-P	
		d (dias)	Tmd (°C)	d (dias)	Tmd (°C)	d (dias)	Tmd (°C)
Phoenix	07/10/76	8	21,0	79	22,5	71	22,7
	20/10/76	8	20,9	75	22,7		
	01/11/76			81	23,0	69	22,9
	16/11/76	6	22,9	78	23,0		
	02/12/76			74	23,2	68	23,1
	15/12/76	6	22,3	73	23,4	67	23,5
	18/01/76	5	23,0	73	24,2		
	16/11/77			71	23,5	67	23,6
	02/12/77	7	25,3	73	23,7	66	23,5
	15/12/77	5	22,6	73	23,4	68	23,5
	18/01/78	4	25,0	69	23,4		
	07/10/78	9	23,1	76	22,9		
Mezcla Amarillo	07/10/76	8	21,0	69	22,5		
	20/10/76	8	20,9	69	22,7		
	01/11/76	12	22,3	75	22,2		
	16/11/76	6	22,9	69	23,0	63	23,0
	02/12/76	6	23,8	66	23,1		
	15/12/76	6	22,3	65	23,3		
	01/11/77					61	23,5
	16/11/77	6	22,1	66	23,4	60	23,5
	02/12/77	6	25,2	67	23,6	61	23,5
	15/12/77	5	22,6	66	23,4	61	23,4
	18/01/78	5	25,2	67	23,4	62	23,3
	07/10/78	9	23,1	68	22,9		
Pioneer 515	07/10/76	8	21,0	68	22,5	60	22,7
	20/10/76	8	20,9	69	22,7	61	22,9
	01/11/76			74	22,2	62	22,1
	16/11/76	6	22,9	68	23,0		
	02/12/76	6	23,8	64	23,1	58	23,0
	15/12/76	6	22,3	64	23,3	58	23,4
	01/11/77			62	23,7	56	23,5
	16/11/77			64	23,3		
	02/12/77	5	24,9	62	23,6	57	23,5
	15/12/77	5	22,6	65	23,4		
	18/01/78	6	25,2	65	23,4	59	23,3
	07/10/78	9	23,1	65	22,9		
20/10/78	5	22,9	63	22,8			

### 3.1.2. Arroz (*Oriza sativa* L.)

Os dados de temperatura média e duração dos subperíodos semeadura-germinação, germinação-floração, floração-colheita e semeadura-colheita, relativos aos anos 1982 a 1992, para o arroz, cultivar IAC 4440 (Quadro 2), foram obtidos por ALVES (1995) de experimentos conduzidos em várzea inundada pela Seção de Arroz e Cereais de Inverno do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), plantios realizados nos municípios de Mococa, SP (21°28'S; 47°01'W; 665m), Pariquera-açu, SP (24°43'S; 47°53'W; 25m) e Pindamonhangaba, SP (22°58'S; 45°27'W; 560m).

Quadro 2 - Local, ano agrícola, duração (d) e temperatura média (Tmd) dos subperíodos semeadura-germinação (S-G), germinação-floração (G-F), floração-colheita (F-C), semeadura-colheita (S-C) do arroz irrigado, cultivar IAC 4440

Local	Ano Agrícola	S-G		G-F		F-C		S-C	
		d (dias)	Tmd (°C)	d (dias)	Tmd (°C)	d (dias)	Tmd (°C)	d (dias)	Tmd (°C)
Mococa	82/83	10	25,3	104	24,1	27	24,0		
	83/84	13	23,4	101	24,8	40	24,9	154	24,7
	84/85	14	24,7	112	24,2	34	24,3	159	24,2
	85/86	13	24,8	116	24,6	32	24,6	161	24,6
	86/87	21	23,5	108	24,4	33	23,4	162	24,1
	87/88	16	24,8	104	24,8	28	24,6	148	24,8
	88/89	13	23,5	104	24,2	34	23,8	152	24,1
	89/90	20	22,9	109	24,5	28	24,3	156	24,3
	90/91	9	26,6	102	24,3	32	23,2		
	91/92	10	23,5	108	24,3	34	23,5	161	24,0
Pariquera-açu	87/88					41	21,2		
	88/89			112	25,4	48	24,0	160	25,0
	89/90	8	24,3	86	26,1			137	25,7
	90/91					41	22,8	154	24,3
	91/92	7	27,3	95	25,8	44	23,0	146	25,0
Pindamonhangaba	82/83					38	23,6	146	25,0
	85/86							155	25,1
	86/87					37	24,8	163	24,2
	88/89					25	25,7	152	24,1
	89/90							166	23,7
	90/91							172	24,1
	91/92					42	24,5	158	25,4

O tratamento consistiu-se de quatro repetições, em cada ano agrícola e em cada localidade, com canteiros de 3 linhas de 5 m de comprimento e espaçamento de 40 cm em Mococa, totalizando uma área de 6 m<sup>2</sup> cada, e com espaçamento de

30 cm entre linhas em Pindamonhangaba e Pariquera-Açu, totalizando, em cada canteiro, uma área de 4,5 m<sup>2</sup> (ALVES, 1995).

### 3.1.3. Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)

Os dados meteorológicos foram obtidos na estação do INMET, localizada no município de Viçosa, MG (20°45'14"S; 42°52'55"W, 648,82m). Os cultivares de feijão utilizados foram Negrito 897 e Ricobaio 1014, sendo que os dados de duração dos subperíodos, apresentados no Quadro 3, foram obtidos por CALIL (1983), SOUZA (1989) e MANTOVANI (1986).

Para a cultura do feijão, cultivar Negrito 897, foram utilizados dados fenológicos provenientes do experimento realizado por CALIL (1983) e instalado na área experimental do Departamento de Fitotecnia, Campus da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. Foram efetuados seis plantios, nas datas 20/11/80, 16/12/80, 12/01/81, 06/02/81, 28/02/81 e 20/03/81, constituindo, respectivamente, seis tratamentos. Cada tratamento ocupou uma área de 6m x 12m = 72m<sup>2</sup>, dividida em partes iguais de 3m x 3m, constituindo, portanto, oito repetições. Preparou-se o terreno por meio de aração e gradagem, antes do primeiro plantio. O feijão preto Negrito 897 foi plantado manualmente em sulcos, no espaçamento de 0,5m entre fileiras, com 15 sementes por metro. O solo foi classificado como Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico, fase terraço.

De acordo com MANTOVANI (1986), os plantios da cultura do feijão, cultivar Negrito 897, foram realizados nas datas 12/03/84 e 09/07/84, sendo feita a semeadura manual, em fileiras espaçadas de 0,50m, colocando-se 15 sementes por metro e deixando, após desbaste, 10 plantas por metro, o que corresponde a 200 mil plantas por hectare. As linhas contínuas de plantio, ocuparam uma área de 660m<sup>2</sup> (30 x 22m). A adubação consistiu em aplicar 120 kg/ha da fórmula NPK na dosagem de 4:14:8 e uma aplicação de 120 kg/ha de sulfato de amônia em cobertura (MANTOVANI, 1986).

Foram também empregados os dados fenológicos do trabalho realizado por SOUZA (1989), no município de Viçosa, com os cultivares: Negrito 897 (plantios em 26/10/78, 19/03/79, 07/03/80, 12/03/81, 19/10/81 e 31/03/82) e Ricobaio 1014 (plantios em 05/10/77, 31/10/77, 20/02/78, 07/03/80, 12/03/81, 19/10/81 e 31/03/82).

Quadro 3 - Data de plantio, duração e temperatura média dos subperíodos semeadura-floração (S-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C) do feijão, cultivares Negroito 897 e Ricobaio 1014

Cultivares	Subperíodos	Plantios	Duração (dias)	Tmédia (°C)
Negrito 897	S-F	26/10/78	44	22,0
		19/03/79	47	20,5
		07/03/80	44	23,2
		20/11/80	34	23,5
		16/12/80	37	23,5
		12/01/81	37	23,4
		06/02/81	38	23,5
		28/02/81	42	22,8
		12/03/81	46	21,2
		20/03/81	42	20,6
	F-C	19/10/81	42	21,8
		31/03/82	54	19,3
		12/03/84	43	21,6
		09/07/84	64	18,0
		26/10/78	46	21,7
		19/03/79	54	18,1
		07/03/80	44	20,1
		28/02/81	45	19,4
		12/03/81	48	18,6
		20/03/81	53	18,3
S-C	19/10/81	39	22,1	
	31/03/82	57	18,0	
	26/10/78	90	21,9	
	19/03/79	101	19,2	
	07/03/80	88	21,6	
	20/11/80	82	23,4	
	16/12/80	80	23,4	
	12/01/81	80	23,2	
	06/02/81	115	21,2	
	28/02/81	87	21,0	
Ricobaio 1014	S-F	12/03/81	94	19,8
		20/03/81	95	19,3
		19/10/81	84	21,9
		31/03/82	111	18,6
		12/03/84	99	20,9
		09/07/84	120	19,5
S-F	05/10/77	45	21,7	
	31/10/77	43	22,5	
	07/03/80	46	23,0	
	12/03/81	47	21,2	
	19/10/81	45	22,0	
		31/03/82	54	19,3

Cultivares	Subperíodos	Plantios	Duração (dias)	Tmédia (°C)
Ricobaio 1014	F-C	05/10/77	40	22,4
		31/10/77	42	22,2
		07/03/80	46	20,0
		12/03/81	47	18,5
		19/10/81	36	21,9
		31/03/82	59	18,0
	S-C	05/10/77	85	22,0
		31/10/77	85	22,4
		20/02/78	93	21,1
		07/03/80	92	21,5
		12/03/81	94	19,8
		19/10/81	81	21,9
		31/03/82	113	18,6

### 3.2. Cálculo da temperatura base inferior (tb)

Determinou-se a Tb para os seguintes subperíodos das culturas:

- a) Milho (semeadura-emergência, semeadura-pendoamento, emergência-pendoamento);
- b) Arroz (semeadura-germinação, germinação-floração, floração-colheita, semeadura-colheita);
- c) Feijão (semeadura-floração, floração-colheita, semeadura-colheita).

A estimativa da Tb foi feita, utilizando-se as fórmulas propostas por YANG et al. (1995) e a metodologia comumente adotada. Em seqüência, realizou-se a comparação da Tb, obtida por meio dessas fórmulas representadas nas equações 15, 16, 17 e 18, com aquela obtida pela metodologia comumente utilizada (equações 8, 9, 11 e 12) para as culturas do feijão (Negrito 897 e Ricobaio 1014) e milho (Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515). Para a cultura do arroz (IAC 4440), a Tb foi calculada somente pelas equações 15, 16, 17 e 18, devido à limitação de dados.

Para determinar a Tb por meio da metodologia comumente utilizada (equações 8, 9, 11 e 12), empregou-se uma série de temperaturas candidatas variando de 1,0°C a 21°C.

### 3.3. Modelos de estimativa fenológica

Foram estudados os modelos não-lineares Beta (YIN et al., 1995) e RCM (GAO et al., 1992), apresentados no item 2.4 e representados pelas equações 1 e 3. Também, foram determinados os graus-dia de desenvolvimento (GDD), proposto por ARNOLD (1959), sendo que, o modelo Beta proposto por YIN et al. (1995) foi comparado com os demais.

O cálculo de graus-dia para cada subperíodo foi determinado por

$$GDD = d_i \left[ \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) - t_b \right] \quad (19)$$

em que

GDD = total de graus-dia necessários para atingir um determinado subperíodo de desenvolvimento;

T<sub>max</sub> = temperatura do ar máxima diária do i-ésimo plantio, °C;

T<sub>min</sub> = temperatura do ar mínima diária do i-ésimo plantio, °C;

d<sub>i</sub> = número de dias requeridos para a planta atingir um determinado subperíodo de desenvolvimento para o i-ésimo plantio; e

t<sub>b</sub> = temperatura base inferior, °C;

### 3.4. Parâmetros dos modelos

Os parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\mu$ ,  $k$  e  $T_s$  dos modelos Beta e RCM foram gerados pelo software "STATISTICA", versão 6.0. Para as culturas de milho e feijão, a  $T_b$  adotada nos modelos foi considerada como sendo a média dos quatro métodos de estimativa descritos pelas fórmulas de YANG et al. (1995), enquanto, para a cultura do arroz, adotaram-se os valores obtidos por ALVES (1995) (Quadro 11 do Apêndice).

A  $T_o$  foi estimada, empregando-se a equação 6 e os parâmetros anteriormente citados.



### 3.5. Avaliação dos modelos fenológicos

Para avaliação dos modelos Beta, RCM e GDD, utilizou-se a análise de concordância de Willmott (CW) e o erro absoluto médio (EAM) (WILLMOTT et al., 1985), representado pelas seguintes expressões:

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{N} \quad (20)$$

$$CW = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \right\} \quad (21)$$

em que

$P_i$  = dias estimados para o subperíodo em estudo;

$O_i$  = dias observados para o subperíodo em estudo;

$O$  = valor médio dos dias observados para o subperíodo em estudo; e

$N$  = número de plantios analisados.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Determinação da temperatura base inferior

O Quadro 4 apresenta os valores de temperatura base inferior, estimados por meio das fórmulas de YANG et al. (1995), para as seguintes culturas e subperíodos, respectivamente: milho (Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515) na semeadura-emergência, emergência-pendoamento e semeadura-pendoamento; arroz (IAC 4440) na semeadura-germinação, germinação-floração, floração-colheita e semeadura-colheita; e feijão (Negrito 897 e Ricobaio 1014) na semeadura-floração, floração-colheita e semeadura-colheita.

Neste quadro, observa-se a oscilação da  $T_b$ , tanto pelo método de cálculo quanto pelo subperíodo analisado. Além disso, os valores de  $T_b$  calculada pelos métodos do menor desvio-padrão em dias (DPdia), coeficiente de variação em graus-dia (CVgdd) e coeficiente de regressão (CR) foram, no geral, bem próximos entre si. Entretanto, o método do menor desvio-padrão em graus-dia (DPgdd) diferiu, consideravelmente, dos demais métodos, superestimando os valores de  $T_b$  com maior discrepância para a cultura do milho, cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515, no subperíodo semeadura-emergência e para a cultura do arroz IAC 4440 em, praticamente, todos os subperíodos estudados.

Quadro 4 - Valores de temperatura base inferior (Tb), estimados por meio de fórmulas desenvolvidas por Yang et al. (1995) para as culturas de milho, arroz, feijão em diferentes cultivares e subperíodos, pelos métodos do menor desvio-padrão em graus-dia (DPgdd), menor desvio-padrão em dias (DPdia), coeficiente de variação em graus-dia (CVgdd) e coeficiente de regressão (CR)

Culturas	Cultivares	*Subperíodos	Métodos				Tb Média
			DPgdd	DPdia	CVgdd	CR	
Milho	Phoenix	S-E	20,6	6,6	5,6	9,1	10,5
		E-P	9,8	6,4	6,4	6,4	7,3
		S-P	16,8	7,2	7,2	7,1	9,6
	Mezcla Amarillo	S-E	20,8	13,2	12,5	12,0	14,6
		E-P	12,5	10,4	10,4	10,5	10,9
		S-P	13,4	10,0	10,0	9,7	10,8
	Pioneer 515	S-E	19,5	10,2	9,7	9,7	12,2
		E-P	10,5	6,6	6,6	6,8	7,6
		S-P	15,6	12,5	12,6	12,3	13,2
Arroz	IAC 4440	S-G	21,9	19,5	19,5	19,3	20,0
		G-F	20,1	11,1	11,1	12,1	13,6
		F-C	21,8	7,7	7,3	10,0	11,7
		S-C	18,1	8,3	8,3	8,6	10,8
Feijão	Negrito 897	S-F	10,9	9,3	9,3	9,2	9,7
		F-C	8,6	4,9	4,9	4,8	5,8
		S-C	12,4	5,6	5,5	5,4	7,2
	Ricobaio 1014	S-F	6,1	2,5	2,5	2,3	3,4
		F-C	10,0	7,3	7,3	6,9	7,9
		S-C	8,8	7,1	7,1	7,0	7,5

\* Semeadura-emergência (S-E), emergência-pendoamento (E-P), semeadura-pendoamento (S-P), semeadura-germinação (S-G), germinação-floração (G-F), semeadura-floração (S-F), floração-colheita (F-C), semeadura-colheita (S-C)

Segundo YANG et al. (1995), a superestimativa do valor de Tb pelo DPgdd é devida ao critério adotado nesse método, em relação aos demais, para a escolha da Tb. Outra explicação para a obtenção de valores discrepantes de Tb pelos métodos estatísticos, principalmente os valores de Tb estimados por meio do método DPgdd, refere-se ao fato de os métodos estatísticos apresentarem em sua estrutura, somente, as variáveis de duração do subperíodo e de temperatura do ar estando fundamentados no sistema linear dos graus-dia (itens 2.5.1 a 2.5.4). Isto leva a crer que a Tb obtida, estatisticamente, será mais precisa ou próxima ao valor fisiológico de Tb, quando mediante a ocorrência de alta correlação entre a temperatura do ar e a duração do subperíodo, ou estágio de desenvolvimento da planta. Um exemplo da influência do baixo coeficiente de correlação da temperatura do ar com a duração do subperíodo, na determinação da Tb, foi observado por MASSIGNAM e ANGELOCCI

(1993), que encontraram  $T_b$  negativa para o subperíodo floração-colheita do girassol.

Devido à baixa correlação da temperatura do ar com a duração do subperíodo semeadura-emergência dos cultivares de milho, a aplicação das fórmulas de YANG et al. (1995) resultou valores absurdos de  $T_b$  pelo método DPgdd (Quadro 4), superestimando consideravelmente a  $T_b$  com valores de 20,6; 20,8 e 19,5°C para os cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515, respectivamente. A influência da baixa correlação da temperatura com a duração do subperíodo semeadura-emergência da cultura do milho, pode ser observada no Quadro 5, em que o coeficiente de correlação ( $r$ ) da relação entre temperatura do ar e duração do subperíodo foi de -0,44; -0,41 e -0,50 para os cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515, respectivamente. Nos demais subperíodos dos cultivares de milho, apresentados no Quadros 4, nota-se que os valores de  $T_b$ , obtidos pelo método DPgdd, não diferiram tanto daqueles dos outros métodos de estimativa, exceto no subperíodo semeadura-pendoamento do cultivar Phoenix, em que o coeficiente de correlação foi -0,62 e a  $T_b$  estimada foi 16,8; 7,2; 7,2 e 7,1°C, respectivamente, obtidos pelos seguintes métodos: DPgdd, DPdia, CVgdd e CR (Quadro 4).

No Quadro 5, nota-se que, para a cultura do arroz IAC 4440 também houve baixa correlação da temperatura do ar com a duração do subperíodo, obtendo-se os coeficientes de correlação -0,63; -0,63; -0,41 e -0,64, respectivamente, nos subperíodos semeadura-germinação, germinação-floração, floração-colheita e semeadura-colheita. O reflexo da baixa correlação entre a temperatura do ar e a duração dos subperíodos da cultura do arroz IAC 4440 é fortemente observado para o método DPgdd (Quadro 4), que apresentou estimativas de  $T_b$  de 21,9; 20,1; 21,8 e 18,1°C, respectivamente, para os subperíodos semeadura-germinação, germinação-floração, floração-colheita e semeadura-colheita. Quando a correlação é alta, como no caso dos subperíodos emergência-pendoamento do cultivar de milho Mezcla Amarillo, semeadura-colheita do cultivar de feijão Ricobaio 1014 e semeadura-floração do cultivar de feijão Negrito 897, em que o coeficiente de correlação foi -0,92 (Quadro 5), os métodos descritos pelas fórmulas de YANG et al. (1995) mostraram-se muito próximos em valores de  $T_b$  estimados, sendo que o método DPgdd ainda continuou apresentando maiores valores de  $T_b$ , em relação aos demais métodos.

Quadro 5 – Coeficientes de determinação ( $r^2$ ) e de correlação ( $r$ ) da relação entre a temperatura média do ar e a duração dos subperíodos das culturas de arroz, feijão e milho

Culturas	Cultivares	*Subperíodos	$r^2$	$r$
Arroz	IAC 4440	S-G	0,40	-0,63
		G-F	0,40	-0,63
		F-C	0,17	-0,41
		S-C	0,41	-0,64
Feijão	Negrito 897	S-F	0,84	-0,92
		F-C	0,72	-0,85
		S-C	0,54	-0,73
	Ricobaio 1014	S-F	0,79	-0,89
		F-C	0,74	-0,86
		S-C	0,85	-0,92
Milho	Phoenix	S-E	0,19	-0,44
		S-P	0,39	-0,62
		E-P	0,79	-0,89
	Mezcla Amarillo	S-E	0,17	-0,41
		S-P	0,71	-0,84
		E-P	0,85	-0,92
Pioneer 515	S-E	0,25	-0,50	
	S-P	0,68	-0,82	
	E-P	0,77	-0,88	

\* Semeadura-emergência (S-E), emergência-pendoamento (E-P), semeadura-pendoamento (S-P), semeadura-germinação (S-G), germinação-floração (G-F), semeadura-floração (S-F), floração-colheita (F-C), semeadura-colheita (S-C)

No Quadro 4, observa-se que o método DPgdd foi muito sensível à baixa correlação da temperatura com a duração dos subperíodos, sendo que, à medida que essa correlação crescia, ocorria a diminuição na diferença dos valores de  $T_b$  entre os métodos de estimativa das fórmulas de YANG et al. (1995). No Quadro 5, nota-se que o método DPgdd forneceu valores absurdos de  $T_b$ , quando o coeficiente de correlação ( $r$ ) da relação temperatura e duração do subperíodo eram inferiores a -0,64, evidenciando, assim, a grande sensibilidade deste método à baixa correlação da temperatura com a duração do subperíodo. Os métodos DPdia, CVgdd e CR proporcionaram, em geral, valores de  $T_b$  bem próximos entre si e registrando uma diferença superior a 1,0°C, somente quando o coeficiente de correlação (Quadro 5) era inferior a -0,44.

Apesar da alta oscilação dos valores de  $T_b$ , estimados por meio das fórmulas de YANG et al. (1995), devido à baixa correlação da temperatura com a duração do subperíodo, observa-se que a  $T_b$  média (Quadro 4) para as culturas de milho, arroz

e feijão esteve próxima aos limites estipulados pela literatura (itens 2.3.1 a 2.3.3), em seus respectivos estádios, exceto para o subperíodo semeadura-germinação do arroz IAC 4440, em que o valor de  $T_b$  média foi muito alto.

#### 4.1.1. Metodologia comumente utilizada versus fórmulas de Yang e colaboradores

Os Quadros 6, 7 e 8 apresentam os valores de  $T_b$ , estimados por meio das fórmulas de YANG et al. (1995) juntamente com aqueles valores estimados pela metodologia comumente utilizada (itens 2.5.1, 2.5.2, 2.5.3 e 2.5.4) para a cultura do feijão (Negrito 897 e Ricobaio 1014), nos subperíodos semeadura-floração, floração-colheita e semeadura-colheita e para a cultura do milho (Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515), nos subperíodos semeadura-pendoamento e emergência-pendoamento.

Quadro 6 - Valores de temperatura base inferior para a cultura do feijão, cultivar Negrito 897, nos subperíodos semeadura-floração (S-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C) estimados por meio das fórmulas propostas por YANG et al. (1995) e da metodologia comumente utilizada

Cultura	Métodos	Subperíodos					
		S-F		F-C		S-C	
		$T_{b_Y}$	$T_{b^*}$	$T_{b_Y}$	$T_{b^*}$	$T_{b_Y}$	$T_{b^*}$
Feijão (Negrito 897)	DPgdd	10,9	14,0	8,6	10,0	12,4	13,0
	DPdia	9,3	13,0	4,9	8,0	5,6	6,0
	CVgdd	9,3	13,0	4,9	8,0	5,5	6,0
	CR	9,2	13,0	4,8	8,0	5,4	6,0
	Média	9,7	13,3	5,8	8,5	7,2	7,8

$T_{b^*}$  temperatura base inferior estimada como base na metodologia comumente utilizada (equações 8, 9, 11 e 12).  $T_{b_Y}$  temperatura base inferior estimada por meio das fórmulas propostas por YANG et al. (1995).

No Quadro 6, observa-se que, para o cultivar Negrito 897, existe certa diferença no valor de  $T_b$  estimado por meio das fórmulas de YANG et al. (1995), em relação aos valores obtidos com base na metodologia comumente utilizada, nos subperíodos semeadura-floração e floração-colheita. Entretanto, no subperíodo semeadura-colheita, as fórmulas de YANG et al. (1995) apresentaram valores de  $T_b$

bem próximos. No Quadro 7, nota-se claramente que a diferença no valor de  $T_b$  é pequena, em todos os subperíodos analisados, para o cultivar Ricobaio 1014.

Quadro 7 - Valores de temperatura base inferior para a cultura do feijão, cultivar Ricobaio 1014, nos subperíodos semeadura-floração (S-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C), estimados por meio das fórmulas propostas por YANG et al. (1995) e da metodologia comumente utilizada

Cultura	Métodos	Subperíodos					
		S-F		F-C		S-C	
		$T_{b_Y}$	$T_{b^*}$	$T_{b_Y}$	$T_{b^*}$	$T_{b_Y}$	$T_{b^*}$
Feijão (Ricobaio 1014)	DPgdd	6,1	6,0	10,0	10,0	8,8	9,0
	DPdia	2,5	2,0	7,3	8,0	7,1	7,0
	CVgdd	2,5	2,0	7,3	7,0	7,1	7,0
	CR	2,3	2,0	6,9	7,0	7,0	7,0
	Média	3,4	3,0	7,9	8,0	7,5	7,5

$T_{b^*}$  temperatura base inferior estimada com base na metodologia comumente utilizada (equações 8, 9, 11 e 12).  $T_{b_Y}$  temperatura base inferior estimada por meio das fórmulas propostas por YANG et al. (1995).

Quadro 8 - Valores de temperatura base inferior para a cultura do milho, cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515, nos subperíodos semeadura-pendoamento (S-P) e emergência-pendoamento (E-P), estimados por meio das fórmulas propostas por YANG et al. (1995) e da metodologia comumente utilizada

Cultura	Subperíodos	Métodos	Cultivares					
			Phoenix		Mezcla Amarillo		Pioneer 515	
			$T_{b_Y}$	$T_{b^*}$	$T_{b_Y}$	$T_{b^*}$	$T_{b_Y}$	$T_{b^*}$
Milho	S-P	DPgdd	16,8	16,0	13,4	13,0	15,6	16,0
		DPdia	7,2	7,0	10,0	10,0	12,5	10,0
		CVgdd	7,2	7,0	10,0	10,0	12,6	10,0
		CR	7,1	7,0	9,7	9,0	12,3	10,0
		Média	9,6	9,3	10,8	10,5	13,2	11,5
	E-P	DPgdd	9,8	10,0	12,5	12,0	10,5	12,0
		DPdia	6,4	7,0	10,4	11,0	6,6	8,0
		CVgdd	6,4	7,0	10,4	11,0	6,6	8,0
		CR	6,4	7,0	10,5	11,0	6,8	8,0
		Média	7,3	7,5	10,9	11,2	7,6	8,7

$T_{b^*}$  temperatura base inferior estimada com base na metodologia comumente utilizada (equações 8, 9, 11 e 12).  $T_{b_Y}$  temperatura base inferior estimada por meio das fórmulas propostas por YANG et al. (1995).

No Quadro 8, observa-se que os valores de  $T_b$  obtidos por meio das fórmulas de YANG et al. (1995) estão bem próximos aos valores obtidos com a metodologia comumente utilizada, para os cultivares Phoenix e Mezcla Amarillo, nos subperíodos

semeadura-pendoamento e emergência-pendoamento. Todavia, analisando o cultivar Pioneer 515 nos subperíodos semeadura-pendoamento e emergência-pendoamento, os valores de  $T_b$  estimados por meio das fórmulas de YANG et al. (1995) apresentaram certa diferença, comparativamente àqueles obtidos com base na metodologia comumente utilizada.

Em geral, os valores da  $T_b$ , estimada por meio das fórmulas de YANG et al. (1995) (Quadro 4), comparativamente àqueles obtidos com base na metodologia comumente utilizada (Quadros 6, 7, 8), foram consistentes, sendo que o método DPgdd, representado pela fórmula de YANG et al. (1995), apresentou valores de  $T_b$  próximos àqueles obtidos por meio da metodologia comumente utilizada; entretanto, ambos diferiram dos demais métodos de estimativa.

Uma das vantagens das fórmulas propostas por YANG et al. (1995), confirmada no presente estudo, é a facilidade de obtenção do valor de  $T_b$ , pois não envolve os incômodos processos de cálculo requeridos na metodologia comumente utilizada. É claro que as fórmulas propostas por YANG et al. (1995) apresentam algumas limitações, que devem ser consideradas em sua utilização, ou seja, estas fórmulas são derivadas de métodos comumente utilizados, que se baseiam no sistema linear (GDD). Assim, a  $T_b$  obtida estatisticamente não coincide, necessariamente, com a  $T_b$  fisiológica, pois, a teoria dos graus-dia assume uma relação linear entre a taxa de desenvolvimento e a temperatura do ar, além de assumir que tanto as temperaturas diurnas como as noturnas afetam, igualmente, o crescimento e desenvolvimento da planta (MASSIGNAM et al., 1998). Portanto, a  $T_b$  será mais precisa, quando a temperatura do ar estiver altamente correlacionada com a duração do subperíodo em estudo.

#### **4.2. Parâmetros dos modelos fenológicos Beta e RCM**

No Quadro 9, são apresentados os parâmetros  $\mu$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $k$ ,  $T_b$ ,  $T_s$  e  $T_o$  dos modelos Beta e RCM, que foram estimados e utilizados na predição fenológica dos subperíodos das culturas de milho (Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515), arroz (IAC 4440) e feijão (Negrito 897 e Ricobaio 1014). Com exceção de  $T_b$  e  $T_o$  (Quadro 9), os demais parâmetros foram obtidos, empregando-se o software STATISTICA 6.0. Para isso, foram adotados valores iniciais dos parâmetros  $\mu$ ,  $\alpha$ ,  $k$  e  $\beta$  próximos aos valores estimados por YIN et al. (1995), sendo que o valor inicial do parâmetro



Ts, adotado em todos os subperíodos das culturas de milho, arroz e feijão, foi 37°C (ELLIS et al., 1992), 42°C (YIN et al., 1995) e 30°C (NADAL et al., 1986; BARBANO et al., 2001) respectivamente. Ao obter os parâmetros  $\mu$ ,  $\alpha$  e  $\beta$ , realizou-se a estimativa da To, empregando a equação 6. No que diz respeito ao valor do parâmetro Tb, apresentado no Quadro 9, considerou-se a média dos valores, estimados por meio das quatro fórmulas propostas por YANG et al. (1995) para as culturas de milho e feijão, sendo que, para a cultura do arroz considerou-se os valores de Tb obtidos por ALVES et al. (1995). Uma constatação importante quanto aos parâmetros Tb e Ts dos modelos Beta e RCM, é que a variação destes parâmetros tem pouca influência no ajuste dos modelos Beta e RCM. Esta observação foi, também, feita por YIN et al. (1995).

Quadro 9 - Valores de parâmetros dos modelos Beta e RCM, estimados para diversos subperíodos e cultivares das culturas de milho, feijão e arroz

Culturas	Cultivares	*Subperíodos	Parâmetros						
			$\mu$	$\alpha$	$\beta$	k	Tb	Ts	To
Milho	Phoenix	S-E	-10,1276	2,1034	1,1496	-1,5770	10,5	37,0	27,7
		E-P	-10,1619	1,6439	0,5497	-4,0492	7,3	35,8	28,7
		S-P	-10,1860	1,5612	0,6915	-4,1426	9,6	36,7	28,4
	Mezcla Amarillo	S-E	-7,9069	1,4255	1,1503	-1,6887	14,6	36,8	26,9
		E-P	-9,7058	1,4966	0,7003	-3,9404	10,9	36,7	28,5
		S-P	-9,7843	1,5295	0,6783	-4,0227	10,8	36,0	28,3
	Pioneer 515	S-E	-9,0098	1,7418	1,1924	-1,6779	12,2	36,1	26,4
		E-P	-9,1949	1,4874	0,4082	-3,8320	7,6	36,1	30,0
		S-P	-9,7865	1,5153	0,8333	-3,9627	13,2	36,1	27,9
Feijão	Negrito 897	S-F	-9,2695	1,6938	0,5925	-3,5951	9,7	30,9	25,4
		F-C	-9,7545	1,6960	0,6003	-3,6728	5,8	30,9	24,3
		S-C	-9,6016	1,5397	0,4466	-4,3622	7,2	31,0	25,7
	Ricobaio 1014	S-F	-9,9398	1,7186	0,4859	-3,7396	3,4	31,6	25,4
		F-C	-8,2694	1,3959	0,4172	-3,5884	7,9	30,6	25,3
		S-C	-10,5546	1,7548	0,6443	-4,3774	7,5	31,0	24,7
**Arroz	IAC 4440	S-G	-10,0508	1,7972	1,6782	-2,0119	18,8	39,0	29,2
		G-F	-10,0903	1,5622	0,5908	-4,3176	12,8	39,1	31,9
		F-C	-9,5796	1,5852	0,8061	-3,2623	12,5	39,0	30,1
		S-C	-9,9235	1,2862	0,6031	-4,8780	11,8	38,8	30,2

\* Semeadura-emergência (S-E), emergência-pendoamento (E-P), semeadura-pendoamento (S-P), semeadura-germinação (S-G), germinação-floração (G-F), semeadura-floração (S-F), floração-colheita (F-C), semeadura-colheita (S-C).

\*\* Os dados de temperatura base inferior para as culturas do arroz foram obtidos por ALVES (1995).

### 4.3. Desempenho dos modelos

Os Quadros 12 a 17 (Apêndice) apresentam os dias observados e estimados pelos modelos Beta, RCM e GDD, para as seguintes culturas e subperíodos respectivamente: milho (Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515) na semeadura-emergência, emergência-pendoamento e semeadura-pendoamento; arroz (IAC 4440) na semeadura-germinação, germinação-floração, floração-colheita e semeadura-colheita; feijão (Negrito 897 e Ricobaio 1014) na semeadura-floração, floração-colheita e semeadura-colheita. Verifica-se nos Quadros 12 a 17 (Apêndice) que a duração estimada pelos modelos Beta e RCM para cada subperíodo foram exatamente a mesma em todos os plantios das culturas analisadas.

As Figuras 1 a 3 mostram a comparação entre dias observados e estimados pelos modelos Beta, RCM e GDD. Já o Quadro 10 mostra os coeficientes de determinação ( $r^2$ ), concordância de Willmott (CW) e o erro médio absoluto (EAM) para análise estatística da previsão dos subperíodos com os modelos Beta, RCM e GDD para as culturas de milho, arroz e feijão nos respectivos subperíodos dos cultivares citados anteriormente.

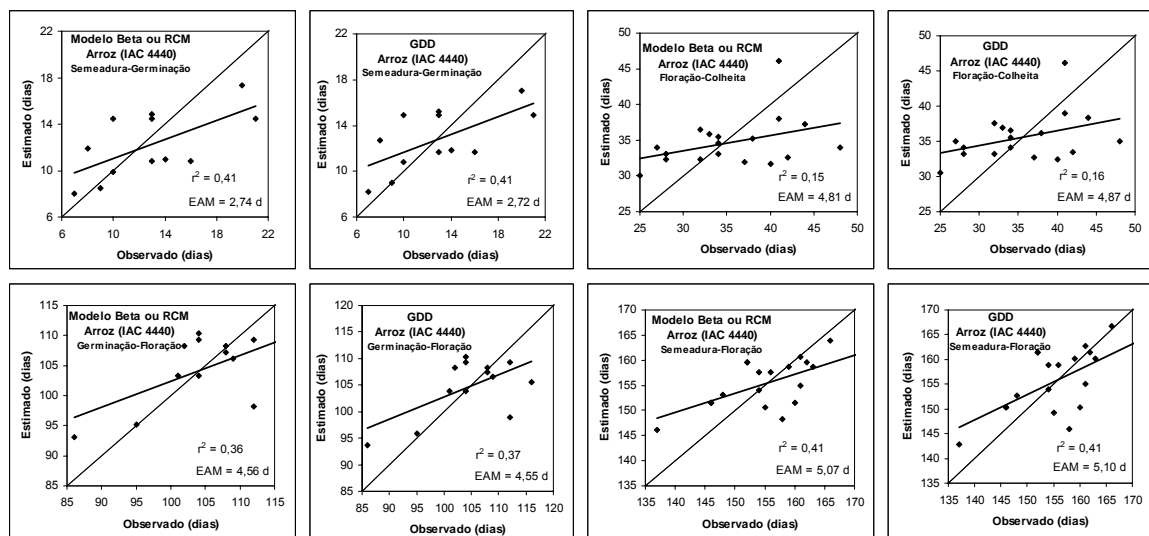


Figura 1 – Dias observados versus estimados com os modelos Beta, RCM e GDD para a cultura do arroz irrigado, cultivar IAC 4440, nos subperíodos semeadura-germinação, germinação-floração, floração-colheita e semeadura-colheita.

Pela Figura 1 e no Quadro 10, verifica-se que a cultura do arroz cultivar IAC 4440 no subperíodo semeadura-germinação apresentou CW = 0,79; EAM = 2,72 e  $r^2$

= 0,41 para o modelo GDD e  $CW = 0,78$ ;  $EAM = 2,74$  e  $r^2 = 0,41$  para os modelos Beta e RCM. No subperíodo germinação-floração, os modelos Beta, RCM e GDD apresentaram a mesma exatidão ( $CW = 0,77$ ), com  $EAM = 4,55$  e  $r^2 = 0,37$  para o modelo GDD, e  $EAM = 4,56$  e  $r^2 = 0,36$  para os modelos Beta e RCM. No subperíodo floração-colheita, o modelo GDD apresentou  $CW = 0,76$ ;  $EAM = 4,87$  e  $r^2 = 0,16$ , enquanto os modelos Beta e RCM apresentaram  $CW = 0,75$ ;  $EAM = 4,81$  e  $r^2 = 0,15$ . No subperíodo semeadura-colheita, o modelo GDD apresentou  $CW = 0,77$ ;  $EAM = 5,10$  e  $r^2 = 0,41$ , enquanto os modelos Beta e RCM apresentaram  $CW = 0,79$ ;  $EAM = 5,07$  e  $r^2 = 0,41$ .

Observa-se que, em todos os subperíodos da cultura do arroz cultivar IAC 4440, os índices de precisão ( $r^2$ ), exatidão ( $CW$ ) e o erro médio absoluto ( $EAM$ ) foram muito próximos, quando os modelos não-lineares (Beta e RCM) são comparados ao modelo linear (GDD). Pode-se dizer que apresentaram, praticamente, o mesmo desempenho para a cultura do arroz cultivar IAC 4440.

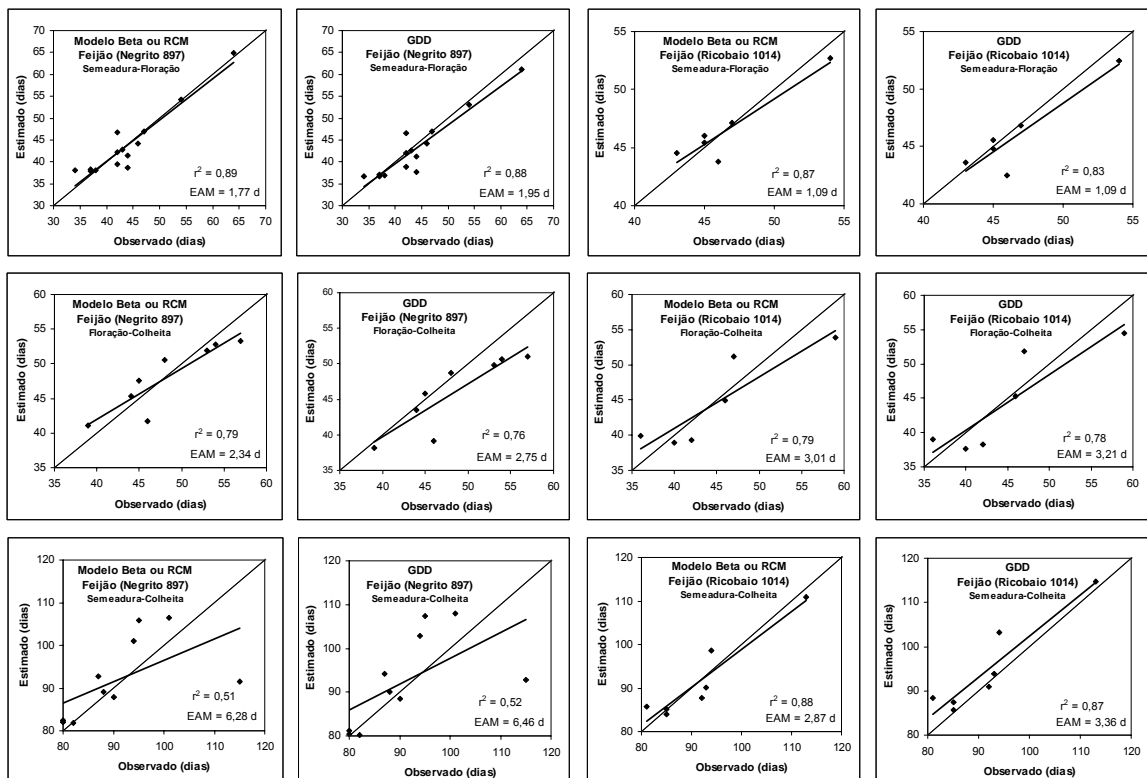


Figura 2 – Dias observados versus estimados com os modelos Beta, RCM e GDD para a cultura do feijão, cultivares Negrito 897 e Ricobaio 1014, nos subperíodos semeadura-floração, floração-colheita e semeadura-colheita.

Ao analisar a cultura do Feijão cultivar Negrito 897 (Figura 2 e Quadro 10), no subperíodo semeadura-floração, verificou-se que  $CW = 0,91$ ;  $EAM = 1,95$  e  $r^2 = 0,88$  para o modelo GDD e que  $CW = 0,92$ ;  $EAM = 1,77$  e  $r^2 = 0,89$  para os modelos Beta e RCM. No subperíodo floração-colheita, o modelo GDD apresentou  $CW = 0,82$ ;  $EAM = 2,75$  e  $r^2 = 0,76$  e os modelos Beta e RCM apresentaram  $CW = 0,89$ ;  $EAM = 2,34$  e  $r^2 = 0,79$ . No subperíodo semeadura-colheita, o modelo GDD apresentou  $CW = 0,80$ ;  $EAM = 6,46$  e  $r^2 = 0,52$  e os modelos Beta e RCM apresentaram  $CW = 0,80$ ;  $EAM = 6,28$  e  $r^2 = 0,51$ .

Para o cultivar Ricobaio 1014 (Figura 2 e Quadro 10), no subperíodo semeadura-floração, o modelo GDD apresentou  $CW = 0,87$ ;  $EAM = 1,09$  e  $r^2 = 0,83$  e os modelos Beta e RCM apresentaram  $CW = 0,92$ ;  $EAM = 1,09$  e  $r^2 = 0,87$ . No subperíodo floração-colheita, o modelo GDD apresentou  $CW = 0,88$ ;  $EAM = 3,21$  e  $r^2 = 0,78$  e os modelos Beta e RCM apresentaram  $CW = 0,89$ ;  $EAM = 3,01$  e  $r^2 = 0,79$ . No subperíodo semeadura-colheita, foram encontrados  $CW = 0,99$ ;  $EAM = 3,36$  e  $r^2 = 0,87$  para o modelo GDD, enquanto  $CW = 0,99$ ;  $EAM = 2,87$  e  $r^2 = 0,88$  foram encontrados para os modelos Beta e RCM.

Nota-se, claramente, que em todos os subperíodos analisados dos cultivares Negrito 897 e Ricobaio 1014, os modelos Beta e RCM apresentaram melhor desempenho, em comparação com o modelo GDD.

No que diz respeito à cultura do milho, observa-se que o cultivar Phoenix (Figura 3 e Quadro 10), no subperíodo semeadura-emergência, apresentou valores  $CW = 0,69$ ;  $EAM = 1,28$  e  $r^2 = 0,22$  para o modelo GDD e os valores  $CW = 0,76$ ;  $EAM = 1,09$  e  $r^2 = 0,24$  para os modelos Beta e RCM. No subperíodo semeadura-pendoamento, o modelo GDD apresentou  $CW = 0,78$ ;  $EAM = 2,07$  e  $r^2 = 0,41$ , enquanto os modelos Beta e RCM apresentaram  $CW = 0,80$ ;  $EAM = 1,90$  e  $r^2 = 0,41$ . No subperíodo emergência-pendoamento, o modelo GDD apresentou  $CW = 0,83$ ;  $EAM = 0,71$  e  $r^2 = 0,80$ , enquanto os modelos Beta e RCM apresentaram  $CW = 0,89$ ;  $EAM = 0,58$  e  $r^2 = 0,80$ .

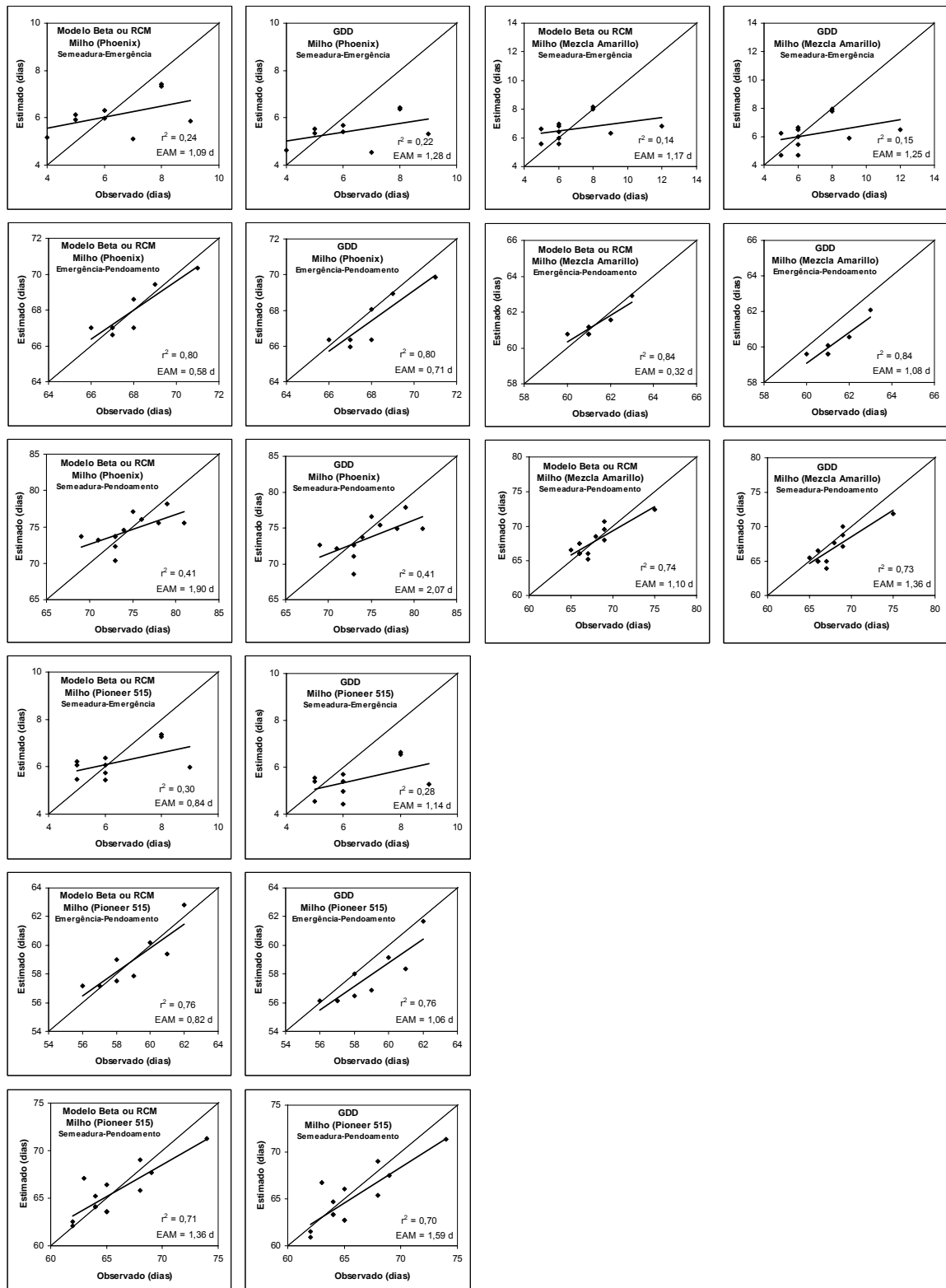


Figura 3 – Dias observados versus estimados com os modelos Beta, RCM e GDD para a cultura do milho, cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515, nos subperíodos semeadura-emergência, emergência-pendoamento e semeadura-pendoamento.

Para o cultivar Mezcla Amarillo (Figura 3 e Quadro 10), no subperíodo semeadura-emergência, obteve os valores CW = 0,73; EAM = 1,25 e  $r^2 = 0,15$ , com a aplicação do modelo GDD; mas CW = 0,76; EAM = 1,17 e  $r^2 = 0,14$  com a aplicação dos modelos Beta e RCM. No subperíodo semeadura-pendoamento, obteve CW = 0,82; EAM = 1,36 e  $r^2 = 0,73$  com a aplicação do modelo GDD, mas CW = 0,88; EAM = 1,10 e  $r^2 = 0,74$  com a aplicação dos modelos Beta e RCM. No subperíodo emergência-pendoamento, obteve CW = 0,64; EAM = 1,08 e  $r^2 = 0,84$  com a aplicação do modelo GDD; e CW = 0,91; EAM = 0,32 e  $r^2 = 0,84$  com a aplicação dos modelos Beta e RCM.

Quadro 10 – Coeficientes de determinação ( $r^2$ ), da análise de concordância de Willmott (CW) e do erro médio absoluto (EAM, em dias) da predição fenológica com os modelos Beta, RCM e GDD, em diferentes subperíodos e cultivares das culturas de arroz, feijão e milho

Culturas	Cultivares	*Subperíodos	CW		EAM		$r^2$	
			GDD	BETA ou RCM	GDD	BETA ou RCM	GDD	BETA ou RCM
Arroz	IAC 4440	S-G	0,79	0,78	2,72	2,74	0,41	0,41
		G-F	0,77	0,77	4,55	4,56	0,37	0,36
		F-C	0,76	0,75	4,87	4,81	0,16	0,15
		S-C	0,77	0,79	5,10	5,07	0,41	0,41
Feijão	Negrito 897	S-F	0,91	0,92	1,95	1,77	0,88	0,89
		F-C	0,82	0,89	2,75	2,34	0,76	0,79
		S-C	0,80	0,80	6,46	6,28	0,52	0,51
	Ricobaio 1014	S-F	0,87	0,92	1,09	1,09	0,83	0,87
		F-C	0,88	0,89	3,21	3,01	0,78	0,79
		S-C	0,99	0,99	3,36	2,87	0,87	0,88
Milho	Phoenix	S-E	0,69	0,76	1,28	1,09	0,22	0,24
		S-P	0,78	0,80	2,07	1,90	0,41	0,41
		E-P	0,83	0,89	0,71	0,58	0,80	0,80
	Mezcla Amarillo	S-E	0,73	0,76	1,25	1,17	0,15	0,14
		S-P	0,82	0,88	1,36	1,10	0,73	0,74
		E-P	0,64	0,91	1,08	0,32	0,84	0,84
	Pioneer 515	S-E	0,70	0,78	1,14	0,84	0,28	0,30
		S-P	0,85	0,86	1,59	1,36	0,70	0,71
		E-P	0,77	0,88	1,06	0,82	0,76	0,76

\* Semeadura-emergência (S-E), emergência-pendoamento (E-P), semeadura-pendoamento (S-P), semeadura-germinação (S-G), germinação-floração (G-F), semeadura-floração (S-F), floração-colheita (F-C), semeadura-colheita (S-C).

Analisando o cultivar Pioneer 515 (Figura 3 e Quadro 10), verifica-se que, no subperíodo semeadura-emergência, o modelo GDD apresentou os valores CW =

0,70; EAM = 1,14 e  $r^2 = 0,28$  e os valores CW = 0,78; EAM = 0,84 e  $r^2 = 0,30$  para os modelos Beta e RCM. No subperíodo semeadura-pendoamento, o modelo GDD apresentou CW = 0,85; EAM = 1,59 e  $r^2 = 0,70$ , enquanto os modelos Beta e RCM apresentaram CW = 0,86; EAM = 1,36 e  $r^2 = 0,71$ . No subperíodo emergência-pendoamento, foram obtidos CW = 0,77; EAM = 1,06 e  $r^2 = 0,76$  para o modelo GDD, mas CW = 0,88; EAM = 0,82 e  $r^2 = 0,76$  para os modelos Beta e RCM.

Os modelos Beta e RCM apresentaram melhores estimativas da duração de cada subperíodo dos cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515 da cultura do milho, quando comparados ao modelo GDD.

Após a análise de todos os coeficientes estatísticos, apresentados no Quadro 10, bem como fazendo uma comparação entre dias observados e estimados com os modelos Beta, RCM e GDD (Figuras 1, 2 e 3), nota-se que assim como ocorreu com o modelo linear (GDD), a predição dos subperíodos das culturas com os modelos não-lineares (Beta e GDD) será mais precisa, quando a temperatura do ar estiver altamente correlacionada à duração dos subperíodos, pois estes modelos são desenvolvidos de forma a descrever a taxa de desenvolvimento como uma função, que varia de acordo com a temperatura do ar.

Na Figura 1 e Quadro 10, observa-se que a baixa correlação da temperatura do ar com a duração dos subperíodos da cultura do arroz irrigado IAC 4440 exerceu forte influência na predição dos subperíodos pelos modelos Beta, RCM e GDD. No subperíodo semeadura-emergência do milho dos cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515 (Figura 3 e no Quadro 10), nota-se também a influência da baixa correlação da temperatura do ar com a duração do subperíodo. Os baixos valores do coeficiente de determinação ( $r^2$ ), no subperíodo semeadura-emergência dos cultivares de milho, pode ser um indicativo de que este subperíodo tenha sido influenciado por outros fatores, além da temperatura do ar, tais como a qualidade da semente, umidade do solo, e temperatura do solo. Entretanto, no caso da cultura do arroz irrigado cultivar IAC 4440 (Figura 1 e Quadro 10), além da qualidade da semente, que pode ser decisiva na germinação, outros fatores como a temperatura da água, a qualidade da água de irrigação e o fotoperíodo são de grande relevância na duração dos subperíodos, sendo também indispensáveis à explicação sobre os baixos valores do coeficiente de determinação, em todos os subperíodos analisados.

#### 4.4. Considerações referentes aos modelos Beta, RCM e GDD

No presente trabalho, as culturas estavam submetidas somente à condição subótima, sendo, portanto, impossível verificar o desempenho dos modelos numa situação de temperatura superior ao ponto ótimo. O modelo GDD é simples e, na maioria dos subperíodos teve um desempenho menor, mas bem próximo àquele dos modelos Beta e RCM. Entretanto, conforme dito anteriormente, é de suma importância observar se a temperatura do ar excede o ponto ótimo. Caso aconteça, é conveniente a adoção de outros modelos como os não-lineares (Beta e RCM), que descrevem muito bem a resposta da temperatura em condições supra-ótimas (Yin et al., 1995).

Uma observação importante refere-se também ao modelo RCM (GAO et al., 1992), que foi desenvolvido para a cultura do arroz. Sua aplicação para as culturas de milho e feijão foi bem aceita.

Quanto ao modelo Beta, foi desenvolvido por YIN et al. (1995) para corrigir problemas do RCM relacionados à predição fenológica próximo ao ponto de temperatura ótima. Este modelo é mais simples que o RCM e, conforme observado, apresentou as mesmas estimativas obtidas pelo RCM. Além disso, quando os valores de  $T_b$  e  $T_s$  são conhecidos, os parâmetros podem ser facilmente determinados, após a linearização da equação 3.

A baixa sensibilidade à variação dos parâmetros  $T_b$  e  $T_s$  é outra observação importante, referente aos modelos não-lineares (Beta e RCM). No entanto, a escolha equivocada de uma  $T_b$  para o modelo linear pode acarretar um acúmulo de graus-dia, que não é representativo da quantidade de energia que a planta precisa para atingir um determinado estágio, ou subperíodo de desenvolvimento. As Figuras 9 a 13 (Apêndice) apresentam a variação no acúmulo de graus-dia, de acordo com a  $T_b$  selecionada para cada subperíodo das culturas de milho e feijão.

Outra consideração relevante refere-se à cultura do arroz irrigado, cultivar IAC 4440, em que foram utilizados os dados de graus-dia acumulados, obtidos por ALVES (1995) e apresentados no Quadro 18 (Apêndice), para comparação com os modelos não-lineares (Beta e RCM) na estimativa dos subperíodos semeadura-germinação, germinação-floração, floração-colheita e semeadura-colheita do cultivar de arroz IAC 4440. Para isso, adotou-se, nos modelos não-lineares (Beta e RCM) os



mesmos valores de temperatura base inferior (Quadro 10 do Apêndice), estimados por ALVES (1995).

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

Foram empregados dados fenológicos provenientes de pesquisas realizadas com as culturas de: milho, cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515; arroz, cultivar IAC 4440; e feijão, cultivares Negrito 897 e Ricobaio 1014. Foram analisadas quatro fórmulas propostas por YANG et al. (1995), que estimam a temperatura base inferior. Essas fórmulas requerem, como dados, somente a duração de cada subperíodo, a temperatura média do subperíodo, a temperatura média de todos os plantios do subperíodo em estudo e a diferença entre a temperatura média do subperíodo e a temperatura média de todos os plantios do subperíodo em estudo. Também foram avaliados os modelos Beta e RCM, que são modelos não-lineares e o modelo GDD com relação à estimativa de cada subperíodo das culturas, anteriormente citadas, sendo que esta avaliação possibilitou determinar, comparativamente, o desempenho dos modelos.

Os resultados obtidos, nas condições analisadas, possibilitaram as seguintes conclusões:

- 1) Houve variação da temperatura base inferior, tanto pelo método de cálculo quanto pelo subperíodo analisado;
- 2) O método do menor desvio-padrão em graus-dia diferiu, consideravelmente, dos demais métodos de estimativa;

- 3) As fórmulas propostas por YANG et al. (1995) forneceram estimativas consistentes da temperatura base inferior, em comparação com a metodologia comumente utilizada;
- 4) Os modelos Beta e RCM foram idênticos, na predição fenológica de cada subperíodo das culturas analisadas;
- 5) De forma geral os modelos Beta e RCM apresentaram melhor desempenho na estimativa de cada subperíodo das culturas analisadas, em comparação com o modelo GDD.

## 6. LITERATURA CITADA

- AGTUNONG, T. P.; REDDEN, R.; MENGGE-NANG, M. A.; SEARLE, C.; FUKAI, S., 1992: Genotypic variation in response to high temperature at flowering in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Australian Journal of Experimental Agriculture**, 32, 1135-1140.
- ALVES, V. C., 1995: **Exigências térmicas e avaliação de modelos de estimativa da produtividade de arroz (*Oriza sativa* L.) irrigado**. Viçosa, UFV, 91p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, 1995.
- ALVES, V. C.; PEDRO JUNIOR, M. J.; SENTELHAS, P. C.; AZZINI, L. E., 2000: Exigências térmicas do arroz irrigado ‘IAC 4440’. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 8, 2, 171-174.
- ANGUS, J. F.; MACKENZIE, D. H.; MORTON, R.; SCHAFER, C. A., 1981: Phasic development in field crops. II. Thermal and photoperiodic responses of spring wheat. **Field Crops Research**, 4, 269-283.
- ARNOLD, C. Y., 1959: The development and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceeding American Society for Horticultural Science**, 74, 430-445.
- BARBANO, M. T.; DUARTE, A. P.; BRUNINI, O.; RECO, P. C.; PATERNIANI, M. E.; KANTHACK, R. A. D., 2001: Temperatura-base e acúmulo térmico no subperíodo semeadura-florescimento masculino em cultivares de milho no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 9, 261-268.
- BROWN, D. M., 1970: Fall Workdays in Ontario. **Ontario Agricultural College Facsheet**, Guelph, 6p.

- BRUNINI, O. et al., 1976: Temperatura base para alface "White Boston", em um sistema de unidades térmicas. **Bragantia**, Campinas, 35, 214-219.
- BRUNINI, O.; BORTOLETO, N.; MARTINS A. L. et al., 1995: Determinação das exigências térmicas e hídricas de cultivares de milho. In: **Seminário sobre a cultura do milho "safrinha"**, Assis, Anais, IAC/CDV, p.141-145.
- BRUNINI, O., 1997: Probabilidade de cultivo do milho "safrinha" no Estado de São Paulo. In: **Seminário sobre a cultura do milho "safrinha"**, 4., Assis, Anais, IAC, p.37-55.
- CALIL, A. C. P., 1983: **Avaliação das populações de pragas do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), em seis épocas de plantio, utilizando a tabela de vida**. Viçosa: UFV, 92p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 1983.
- COLIGADO, M. C.; BROWN, D. M., 1975. A bio-photo-thermal model to predict tassel-initiation time in corn (*Zea mays* L.). **Agricultural Meteorology**, 15, 11-31.
- CROSS, H. Z.; ZUBER, M. S., 1972: Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units. **Agronomy Journal**, 64, 351-355.
- DICKSON, M. H.; PETZOLDT, R., 1987: Inheritance of low temperature tolerance in beans at several growth stages. **Hortscience**, 22, 3, 481-483.
- EAGLES, H. A.; HARDACRE, A. K., 1979: Genetic variation in maize (*Zea mays* L.) for germination and emergence at 10 C. **Euphytica**, 28, 287-295.
- ELLIS, R. H.; SUMMERFIELD, R. J.; EDMEADES, G. O.; ROBERTS, E. H., 1992: Photoperiod, temperature, and the interval from sowing to tassel initiation in diverse cultivars of maize. **Crop Science**, 32, 1225-1232.
- ELLIS, R. H.; SUMMERFIELD, R. J.; ROBERTS, E. H., 1993: Rates of leaf appearance and panicle development in rice (*Oryza sativa* L.). **Agricultural and Forest Meteorology**, 66, 129-138.
- FERNANDEZ, G. C. J.; CHEN, H. K., 1989: Temperature and photoperiod influence reproductive development of reduced-photoperiod-sensitive mungbean genotypes. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, 114, 2, 204-209.
- GAO, L.; JIN, Z. Q.; LI, L., 1987: Photo-thermal models of rice growth duration for various varietal types in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, 39, 205-213.
- GAO, L.; JIN, Z.; HUANG, Y.; ZHANG, L., 1992: Rice clock model a computer model to simulate rice development. **Agricultural and Forest Meteorology**, 60, 1-16.
- GILMORE, E. C.; ROGERS, J. S., 1958: Heat units as method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, 50, 611-615.

- GOYNE, P. F.; WOODRUFF, D. R.; CHURCHETT, F. D., 1977: Prediction of flowering in sunflowers. **Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal**, 17, 475-481.
- GRIST, D. M., 1975: **Rice**, London, Longmans, 601p.
- HODGES, T., 1991: **Temperature and water stress effects on phenology**. In: T. Hodges (Editor), Predicting crop phenology. CRC press, Boca Raton, FL, pp. 7-13.
- HOOVER, M. W., 1955: Some effects of temperature on the growth of southern peas. **Proceeding American Society for Horticultural Science**, 66, 308-312.
- HORIE, T.; NAKAGAWA, H., 1990: Modelling and prediction of development process in rice. I. Structure and method of parameter estimation of a model for simulating development process toward heading. **Japanese Journal Crop Science**, 687-695.
- INFELD, J. A.; BAPTISTA DA SILVA, J.; ASSIS, F. N., 1998: Temperatura-base e graus-dia durante o período vegetativo de três grupos de cultivares de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 6, 187-191.
- INFELD, J. A.; BAPTISTA DA SILVA, J., 1987: Somas térmicas na previsão da duração da fase vegetativa do arroz irrigado (*Oryza sativa* L.). In: **Congresso Brasileiro de agrometeorologia**, Coletânea de Trabalhos Apresentados...Belém: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 518p.
- JOHNSON, I. R.; THORNLEY, J. H. M., 1985: Temperature dependence of plant and crop processes. **Annals of Botany**, 55, 1-24.
- KETRING, D. L.; WHELESS, T. G., 1989: Thermal time requirements for phenological development of peanut. **Agronomy Journal**, 81, 910-917.
- KINIRY, J. R.; KEENER, M. E., 1982: An enzyme kinetic equation to estimate maize development rates. **Agronomy Journal**, 74, 115-119.
- KLEPPER, B.; BELFORD, R. K.; RICKMAN, R. W., 1984: Root and shoot development in winter wheat. **Agronomy Journal**, 76, 117-122.
- LEHENBAUER, P. A., 1914: Growth of maize seedlings in relation to temperature. **Physiology Research**, 1, 247-288.
- LOZADA, B. I.; ANGELOCCI, L. R., 1999: Determinação da temperatura-base e de graus-dia para estimativa da duração do subperíodo da semeadura à floração de um híbrido de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 7, 31-36.
- LUCCHESI, A. A.; GODOI, C. R. de M.; ANÉFALOS, L. C., 1994: Crescimento de plântulas de milho (*Zea mays* L.) influenciado pela temperatura. **Revista de Agricultura**, 69, 83-99.
- MANTOVANI, C. E., 1986: **Determinação do coeficiente de cultura para o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado, em duas épocas de plantio**. Viçosa, UFV,

- 91p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1986.
- MASSIGNAM, A. M.; ANGELOCCI, L. R., 1993: Determinação da temperatura-base e de graus-dia na estimativa da duração dos subperíodos de desenvolvimento de três cultivares de girassol. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 1, 1, 71-79.
- MASSIGNAM, A. M.; VIEIRA, H. J.; FLESCHE, R. D.; HEMP, S., 1998: Ecofisiologia do feijoeiro. III – Influência de variáveis bioclimáticas na duração de sub-períodos fenológicos e determinação de temperatura-base e graus-dia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 6, 47-54.
- McMASTER, G. S.; WILHELM, W. W., 1997: Growing degree-days: one equation, two interpretations. **Agricultural and Forest Meteorology**, 87, 291-300.
- McMASTER, G. S.; SMIKA, D. E., 1988: Estimation and evaluation of winter wheat phenology in the central Great Plains. **Agricultural and Forest Meteorology**, 43, 1-18.
- McMASTER, G. S., 1993: Another wheat (triticum spp.) model? Progress and applications in crop modeling. **Rivista di Agronomia**, 27, 264-272.
- MILLS, W. T., 1964: Heat unit system for predicting optimum peanut-harvesting time. **Transactions of the ASAE**, 7, 307-312.
- MONTEITH, J. L.; ELSTON, J., 1996: Climatic constraints on crop production, In: Fowden, L., Mansfield, T., Stoddart, J. (eds.). **Plant adaptation to environmental stress**. London: Chapman & Hall, p.3-18.
- MONTERROSO, V. A.; WIEN, H. C., 1990: Flower and pod abscission due heat stress in beans. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, 115, 4, 631-634.
- MORAES, A. V. de C.; CAMARGO, M. B. P. de; MASCARENHAS, H. A. A.; MIRANDA, M. A. C. de; PEREIRA, J. C. V. A., 1998: Teste e análise de modelos agrometeorológicos de estimativa de produtividade para a cultura da soja na região de Ribeirão Preto. **Bragantia**, 57, 2, 393-406.
- MOTA, F. S. da., 1980: Meteorological aspects of rice production in Central and South América current and future. In: SYMPOSIUM ON THE AGROMETEOROLOGY OF THE RICE CROP, Filipines, 1980. **Proceedings...**Filipines: WMO/IRRI, 7, 9-17.
- MOTA, F. S. da.; ACOSTA, M. J. C.; ELLIS, J.; VALENÇA, A. Des., 1977: Disponibilidades térmicas para a agricultura nos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro. **Ciência e Cultura**, 29, 9, 1006-1020.
- NADAL, R. de; GUIMARÃES, D. R.; BIASI, J.; PINHEIRO, S. L. J.; CARDOSO, V. T. M., 1986: **Olericultura em Santa Catarina**: aspectos térmicos e econômicos. Florianópolis: EMPASC, p.130-136.

- NARWAL, S. S.; POONIA, S.; SINGH, G.; MALIK, D.S., 1986: Influence of sowing dates on the growing degree days and phenology of winter maize. **Agricultural and Forest Meteorology**, 38, 47-57.
- NUTTONSON, M. Y., 1958: **Wheat-climate relationships and the use of phenology in ascertaining the phenothermal requirements of wheat**. Am. Inst. Crop. Ecol. Washington, DC.
- OLIVEIRA, M. D. X., 1990: **Comportamento da cultura de milho (*Zea mays L.*) em diferentes épocas de semeadura nas regiões centro e norte de Mato Grosso do Sul**. Lavras, ESAL, 90p. (Dissertação de Mestrado).
- OLIVEIRA, A. D. de.; COSTA, J. M. N. da; LEITE, R. de A.; SOARES, P. C.; SOARES, A. A., 2000: Caracterização do período semeadura-floração, de cultivares de arroz de sequeiro no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 8, 1, 63-68.
- OWEN, P. C., 1971: The effect of temperature on the growth and development of rice. **Field Crop Abstracts**, 24, 1-8.
- RAWSON, H. M.; HINDMARSH, J. H., 1982: Effects of temperature on leaf expansion in sunflower. **Australian Journal of Plant Physiology**, 9, 209-219.
- ROBERTS, E. H.; SUMMERFIELD, R. J., 1987: Measurement and prediction of flowering in annual crops. In: J. G. Atherton (Editor), **Manipulation of flowering**, Butterworths, London, pp. 17-50.
- ROBERTSON, G. W., 1968. A biometeorological time scale for a cereal crop involving day and night temperature and photoperiod. **Int. J. Biometeorol.**, 12, 191-223.
- ROBINSON, R. G., 1971: Sunflower phenology-year, variety, and date of planting effects on day and growing degree-day summation. **Crop Science**, 11, 635-638.
- RUIZ-CORRAL, J. A.; FLORES-LÓPEZ, H. E.; RAMÍREZ-DÍAZ, J. L.; GONZÁLEZ-EGUIARTE, D. R., 2002: Temperaturas cardinales y duración del ciclo de madurez del híbrido de maíz H-311 en condiciones de temporal. **Agrociencia**, 36, 569-577.
- RUSSELLE, M. P.; WILHELM, W. W.; OLSON, R. A.; POWER, J. F., 1984: Growth analysis based on degree days. **Crop Science**, 24, 28-32.
- SCARISBRICK, D. H.; CARR, M. K. V.; WILKES, J. M., 1976: The effect of sowing date and season on the development and yield of Navy beans (*Phaseolus vulgaris*) in south-east England. **Journal Agricultural Science**, 86, 65-76.
- SENTELHAS, P. C.; NOGUEIRA, S. dos S. S.; PEDRO JUNIOR, M. J.; SANTOS, R. R. dos, 1994: Temperatura-base e graus-dia para cultivares de girassol. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 2, 43-49.
- SHAYKEWICH, C. F., 1995: An appraisal of cereal crop phenology modeling. **Canadian Journal of Plant Science**, 75, 329-341.



- SHARPE, P. J. H.; DeMICHELE, D. W., 1977: Reaction kinetics of poikilotherm development. **J. Theor. Biol.**, 64, 649-670.
- SHONNARD, G. C.; GEPTS, P., 1994: Genetics of heat tolerance during reproductive development in common bean. **Crop Science**, 34, 1168-1175.
- SILVA, J. A., 1989: **Influência da umidade do solo nas exigências térmicas de três cultivares de milho (*Zea mays L.*)**. Viçosa, UFV, 91p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1989.
- SLAFER, G. A.; SAVIN, R., 1991: Developmental base temperature in different phenological phases of wheat. **Journal of Experimental Botany**, 42, 1077-1082.
- SOUZA, A., 1989: **Avaliação agroclimática de quatro microrregiões do Estado de Minas Gerais para alguns cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*)**. Viçosa, UFV, 91p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1989.
- SUMMERFIELD, R. J.; COLLINSON, S. T.; ELLIS, R. H.; ROBERTS, E. H.; PENNING de VRIES, F. W. T., 1992: Photothermal responses of flowering in rice (*Oryza sativa L.*). **Annals of Botany**, 69, 101-112.
- SUMMERFIELD, R. J.; ROBERTS, E. H., 1987: Effects of illuminance on flowering in long- and short-day grain legumes: a reappraisal and unifying model. In: J. G. Atherton (Editor), **Manipulation of flowering**. London: Butterworths.
- TOLLENAAR, M.; DAYNARD, T. B.; HUNTER, R. B., 1979: Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. **Crop Science**, 19, 363-366.
- VERGARA, B. S.; LILIS, R., 1968: Studies on the response of the rice plant to photoperiod. III. Effect of different photoperiods after panicle initiation on the emergence of the panicle. **Philippines Agriculture**, 52, 61-65.
- WANG, J. Y., 1960: A critique of heat unit approach to plant response studies. **Ecology**, 41, 785-790.
- WARRINGTON, I. J.; KANEMASU, E. T., 1983: Corn growth response to temperature and photoperiod I. Seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. **Agronomy Journal**, 75, 749-754.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M., 1985: Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research-Oceans**, 90, 8995-9005.
- WUTKE, E. B.; BRUNINI, O.; BARBANO, M. T. et al., 2000: Estimativa de temperatura base e graus-dia para o feijoeiro nas diferentes fases fenológicas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 8, 55-61.
- YAN, W.; HUNT, L. A., 1999: An equation for modeling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. **Annals of Botany**, 84, 607-614.

- YANG, S.; LOGAN, J.; COFFEY, D. L., 1995: Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. **Agricultural and Forest Meteorology**, 74, 61-74.
- YIN, X.; KROPFF, M. J.; MCLAREN, G.; VISPERAS, R. M., 1995: A nonlinear model for crop development as a function of temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, 77, 1-16.

## **Apêndice**

Quadro 11 – Coeficientes da equação de regressão e de determinação ( $r^2$ ), da relação entre o desenvolvimento relativo (DR) e a temperatura média do ar (Tmd), e temperatura base inferior (Tb) para diferentes subperíodos do arroz irrigado, cultivar IAC 4440, obtidos por Alves, em 1995

Subperíodos	a	b	$r^2$	Tb (°C)
Semeadura-Germinação	-28,77	1,53	0,48	18,8
Germinação-Floração	-1,02	0,08	0,44	12,8
Floração-Colheita	-3,23	0,26	0,31	12,5
Semeadura-Colheita	-0,6	0,05	0,54	11,8

Quadro 12 Temperatura média (Tmd), dias observados e estimados com os modelos Beta, RCM e GDD nos subperíodos semeadura-emergência (S-E), semeadura-pendoamento (S-P) e emergência-pendoamento (E-P) da cultura do milho, cultivar Phoenix

Cultura	Cultivar	Subperíodos	Tmd (°C)	Observado (d)	Estimado (d)		
					BETA	RCM	GDD
Milho	Phoenix	S-E	25,3	7	5	5	4
			22,6	5	6	6	6
			25,0	4	5	5	4
			23,1	9	6	6	5
			21,0	8	7	7	6
			20,9	8	7	7	7
			22,9	6	6	6	5
			22,3	6	6	6	6
			23,0	5	6	6	5
			23,5	71	73	73	72
		S-P	23,7	73	72	72	71
			23,4	73	74	74	73
			23,4	69	74	74	73
			22,9	76	76	76	75
			22,5	79	78	78	78
			22,7	75	77	77	77
			23,0	81	76	76	75
			23,0	78	76	76	75
			23,2	74	75	75	74
			23,4	73	74	74	73
		24,2	73	70	70	69	
		E-P	23,6	67	67	67	66
			23,5	66	67	67	66
			23,5	68	67	67	66
			22,7	71	70	70	70
			22,9	69	69	69	69
			23,1	68	69	69	68
		23,5	67	67	67	66	

Quadro 13 Temperatura média (Tmd), dias observados e estimados com os modelos Beta, RCM e GDD nos subperíodos semeadura-emergência (S-E), semeadura-pendoamento (S-P) e emergência-pendoamento (E-P) da cultura do milho, cultivar Mezcla Amarillo

Cultura	Cultivar	Subperíodos	Tmd (°C)	Observado (d)	Estimado (d)		
					BETA	RCM	GDD
Milho	Mezcla Amarillo	S-E	22,1	6	7	7	7
			25,2	6	6	6	5
			22,6	5	7	7	6
			25,2	5	6	6	5
			23,1	9	6	6	6
			21,0	8	8	8	8
			20,9	8	8	8	8
			22,3	12	7	7	6
			22,9	6	6	6	6
			23,8	6	6	6	5
			22,3	6	7	7	6
			23,4	66	66	66	65
		23,6	67	65	65	64	
		23,4	66	66	66	65	
		23,4	67	66	66	65	
		22,9	68	68	68	68	
		22,5	69	71	71	70	
		22,7	69	70	70	69	
		22,2	75	72	72	72	
		23,0	69	68	68	67	
		23,1	66	67	67	67	
		23,3	65	67	67	65	
		23,5	60	61	61	60	
		23,5	61	61	61	60	
		23,4	61	61	61	60	
		23,3	62	62	62	61	
		23,0	63	63	63	62	
		23,5	61	61	61	60	
		E-P	23,5	60	61	61	60
			23,5	61	61	61	60
23,4	61		61	61	60		
23,3	62		62	62	61		
23,0	63		63	63	62		
23,5	61		61	61	60		

Quadro 14 - Temperatura média (Tmd), dias observados e estimados com os modelos Beta, RCM e GDD nos subperíodos semeadura-emergência (S-E), semeadura-pendoamento (S-P) e emergência-pendoamento (E-P) da cultura do milho, cultivar Pioneer 515

Cultura	Cultivar	Subperíodos	Tmd (°C)	Observado (d)	Estimado (d)		
					BETA	RCM	GDD
Milho	Pioneer 515	S-E	24,9	5	5	5	4
			22,6	5	6	6	6
			25,2	6	5	5	4
			23,1	9	6	6	5
			22,9	5	6	6	5
			21,0	8	7	7	7
			20,9	8	7	7	7
			22,9	6	6	6	5
			23,8	6	6	6	5
			22,3	6	6	6	6

Cultura	Cultivar	Subperíodos	Tmd (°C)	Observado (d)	Estimado (d)		
					BETA	RCM	GDD
Milho	Pioneer 515	S-P	23,7	62	62	62	61
			23,3	64	64	64	63
			23,6	62	63	63	61
			23,4	65	64	64	63
			23,4	65	64	64	63
			22,9	65	66	66	66
			22,8	63	67	67	67
			22,5	68	69	69	69
			22,7	69	68	68	68
			22,2	74	71	71	71
		23,0	68	66	66	65	
		23,1	64	65	65	65	
		23,3	64	64	64	63	
		23,5	56	57	57	56	
		23,5	57	57	57	56	
		23,3	59	58	58	57	
		22,7	60	60	60	59	
		22,9	61	59	59	58	
		22,1	62	63	63	62	
		23,0	58	59	59	58	
23,4	58	58	58	56			

Quadro 15 - Temperatura média (Tmd), dias observados e estimados com os modelos Beta, RCM e GDD nos subperíodos semeadura-germinação (S-G), germinação-floração (G-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C) da cultura de arroz irrigado, cultivar IAC 4440

Cultura	Cultivar	Subperíodos	Tmd (°C)	Observado (d)	Estimado (d)		
					BETA	RCM	GDD
Arroz	IAC 4440	S-G	25,3	10	10	10	11
			23,4	13	15	15	15
			24,7	14	11	11	12
			24,8	13	11	11	12
			23,5	21	14	14	15
			24,8	16	11	11	12
			23,5	13	14	14	15
			22,9	20	17	17	17
			26,6	9	8	8	9
			23,5	10	14	14	15
			24,3	8	12	12	13
			27,3	7	8	8	8
			24,1	104	110	110	110
			24,8	101	103	103	104
		24,2	112	109	109	109	
		24,6	116	105	105	106	
		24,4	108	107	107	107	
		24,8	104	103	103	104	
		24,2	104	109	109	109	
		24,5	109	106	106	106	
		24,3	102	108	108	108	
		24,3	108	108	108	108	
		25,4	112	98	98	99	
		26,1	86	93	93	94	
		25,8	95	95	95	96	

Cultura	Cultivar	Subperíodos	Tmd (°C)	Observado (d)	Estimado (d)		
					BETA	RCM	GDD
			24,0	27	34	34	35
			24,9	40	32	32	32
			24,3	34	33	33	34
			24,6	32	32	32	33
			23,4	33	36	36	37
			24,6	28	32	32	33
			23,8	34	35	35	36
			24,3	28	33	33	34
		F-C	23,2	32	37	37	38
			23,5	34	35	35	37
			21,2	41	46	46	46
			24,0	48	34	34	35
			22,8	41	38	38	39
			23,0	44	37	37	38
			23,6	38	35	35	36
			24,8	37	32	32	33
			25,7	25	30	30	30
			24,5	42	33	33	34
Arroz	IAC 4440		24,7	154	154	154	154
			24,2	159	159	159	160
			24,6	161	155	155	155
			24,1	162	160	160	161
			24,8	148	153	153	153
			24,1	152	160	160	161
			24,3	156	158	158	159
			24,0	161	161	161	163
			25,0	160	151	151	150
		S-C	25,7	137	146	146	143
			24,3	154	158	158	159
			25,0	146	151	151	150
			25,0	146	151	151	150
			25,1	155	151	151	149
			24,2	163	159	159	160
			24,1	152	160	160	161
			23,7	166	164	164	167
			24,1	172	160	160	161
			25,4	158	148	148	146

Quadro 16 - Temperatura média (Tmd), dias observados e estimados com os modelos Beta, RCM e GDD nos subperíodos semeadura-floração (S-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C) da cultura do feijão, cultivar Negrito 897

Cultura	Cultivar	Subperíodos	Tmd (°C)	Observado (d)	Estimado (d)		
					BETA	RCM	GDD
Feijão	Negrito 897	S-F	22,0	44	41	41	41
			20,5	47	47	47	47
			23,2	44	39	39	38
			21,8	42	42	42	42
			21,2	46	44	44	44
			19,3	54	54	54	53
			21,6	43	43	43	43
			18,0	64	65	65	61
			23,5	34	38	38	37
			23,5	37	38	38	37
			23,4	37	38	38	37
			23,5	38	38	38	37
			22,8	42	39	39	39
			20,6	42	47	47	47
			21,7	46	42	42	39
			18,1	54	53	53	51
		20,1	44	45	45	44	
		22,1	39	41	41	38	
		18,6	48	51	51	49	
		18,0	57	53	53	51	
		19,4	45	48	48	46	
		18,3	53	52	52	50	
		21,9	90	88	88	89	
		19,2	101	107	106	108	
		21,6	88	89	89	90	
		21,9	84	88	88	88	
		19,8	94	101	101	103	
		18,6	111	113	113	114	
		20,9	99	93	93	95	
		19,5	120	104	104	106	
		23,4	82	82	82	80	
		23,4	80	82	82	80	
23,2	80	83	83	81			
21,2	115	91	91	93			
21,0	87	93	93	94			
19,3	95	106	106	107			



Quadro 17 - Temperatura média (Tmd), dias observados e estimados com os modelos Beta, RCM e GDD nos subperíodos semeadura-floração (S-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C) do feijão, cultivar Ricobaio 1014

Cultura	Cultivar	Subperíodos	Tmd (°C)	Observado (d)	Esperado (d)		
					BETA	RCM	GDD
Feijão	Ricobaio 1014	S-F	21,7	45	46	46	46
			22,5	43	45	45	44
			23,0	46	44	44	42
			21,2	47	47	47	47
			22,0	45	45	45	45
			19,3	54	53	53	52
		F-C	22,4	40	39	39	38
			22,2	42	39	39	38
			20,0	46	45	45	45
			18,5	47	51	51	52
			21,9	36	40	40	39
			18,0	59	54	54	54
		S-C	22,0	85	85	85	88
			22,4	85	84	84	86
			21,1	93	90	90	94
			21,5	92	88	88	91
			19,8	94	99	99	103
			21,9	81	86	86	88
			18,6	113	111	111	115

Quadro 18 – Graus-dia acumulados para os subperíodos semeadura-germinação (S-G), germinação-floração (G-F), floração-colheita (F-C) e semeadura-colheita (S-C) do arroz irrigado, cultivar IAC 4440, para diferentes locais e anos agrícolas, obtidos por Alves, em 1995

Local	Ano Agrícola	Graus-dia			
		S-G	G-F	F-C	S-C
Mococa	82/83	65	1175	311	
	83/84	60	1212	496	1987
	84/85	83	1277	401	1972
	85/86	78	1369	387	2061
	86/87	99	1253	360	1993
	87/88	96	1248	339	1924
	88/89	61	1186	384	1870
	89/90	82	1275	330	1950
	90/91	70	1173	342	
	91/92	47	1242	334	1964
Pariquera-Açu	87/88			357	
	88/89		1411	352	2112
	89/90	44	1144	422	1904
	90/91				1925
	91/92	60	1235	462	1927
Pindamonhangaba	82/83			421	1927
	85/86				2061
	86/87			455	2021
	88/89			330	1970
	89/90				1975
	90/91				2116
	91/92			504	1975

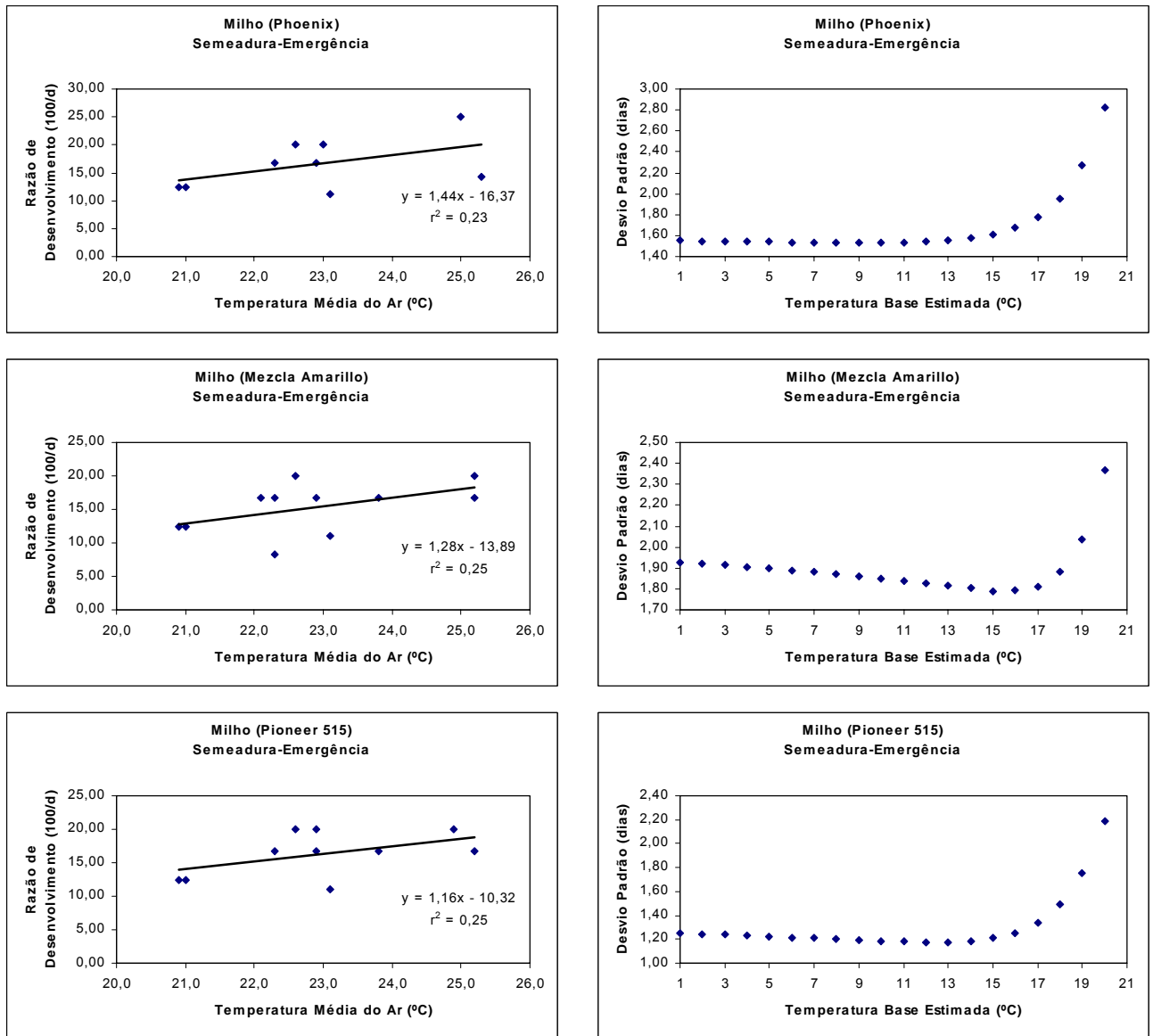


Figura 4 – Determinação da temperatura base inferior do subperíodo semeadura-emergência do milho (Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515) pelos métodos da razão de desenvolvimento e do menor desvio-padrão em dias.

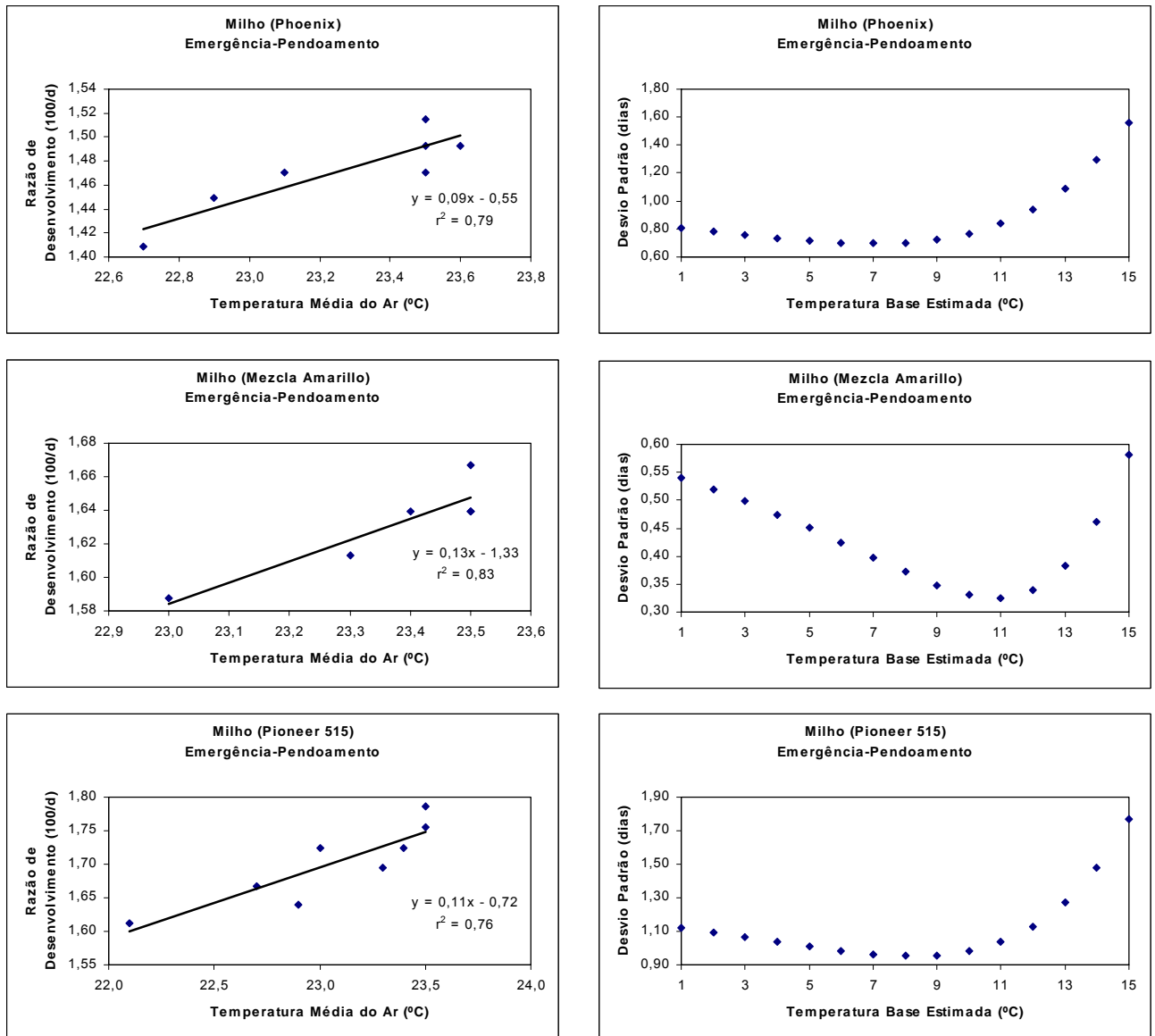


Figura 5 – Determinação da temperatura base inferior do subperíodo emergência-pendoamento do milho (Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515) pelos métodos da razão de desenvolvimento e do menor desvio-padrão em dias.

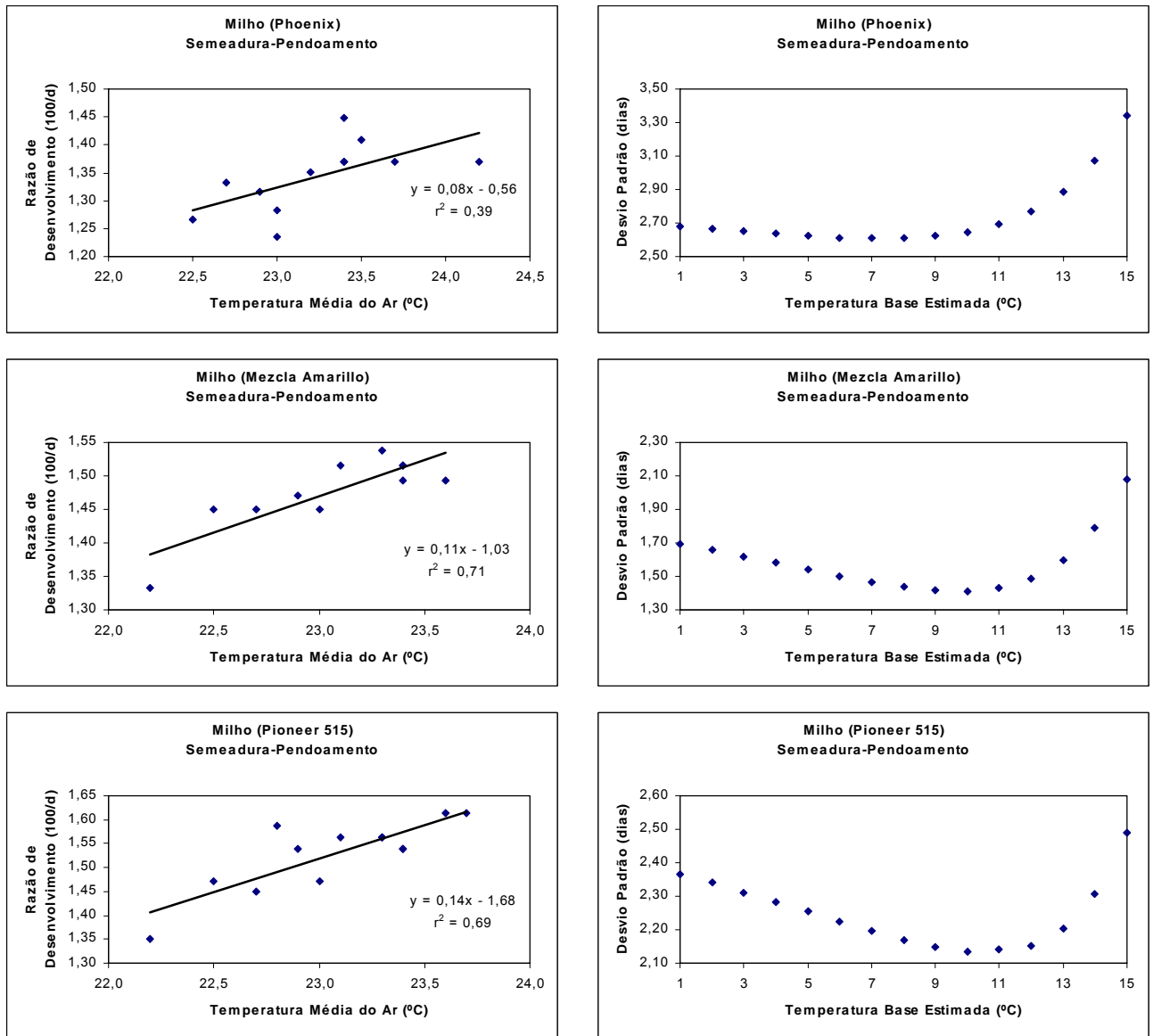


Figura 6 – Determinação da temperatura base inferior do subperíodo semeadura-pendoamento do milho (Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515) pelos métodos da razão de desenvolvimento e do menor desvio-padrão em dias.

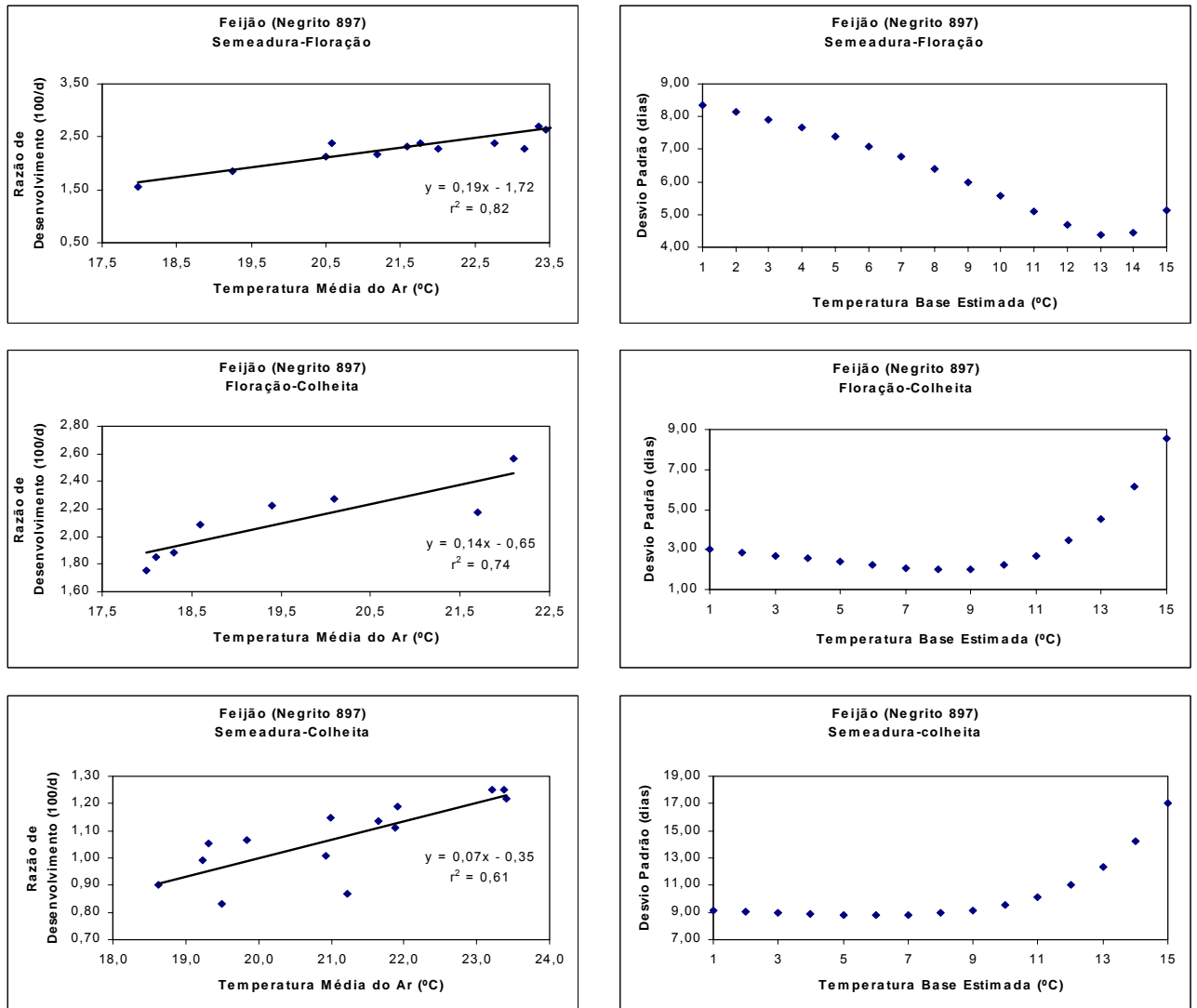


Figura 7 – Determinação da temperatura base inferior do feijão, cultivar Negrito 897, nos subperíodos semeadura-floração, floração-colheita e semeadura-colheita pelos métodos da razão de desenvolvimento e do menor desvio-padrão em dias.

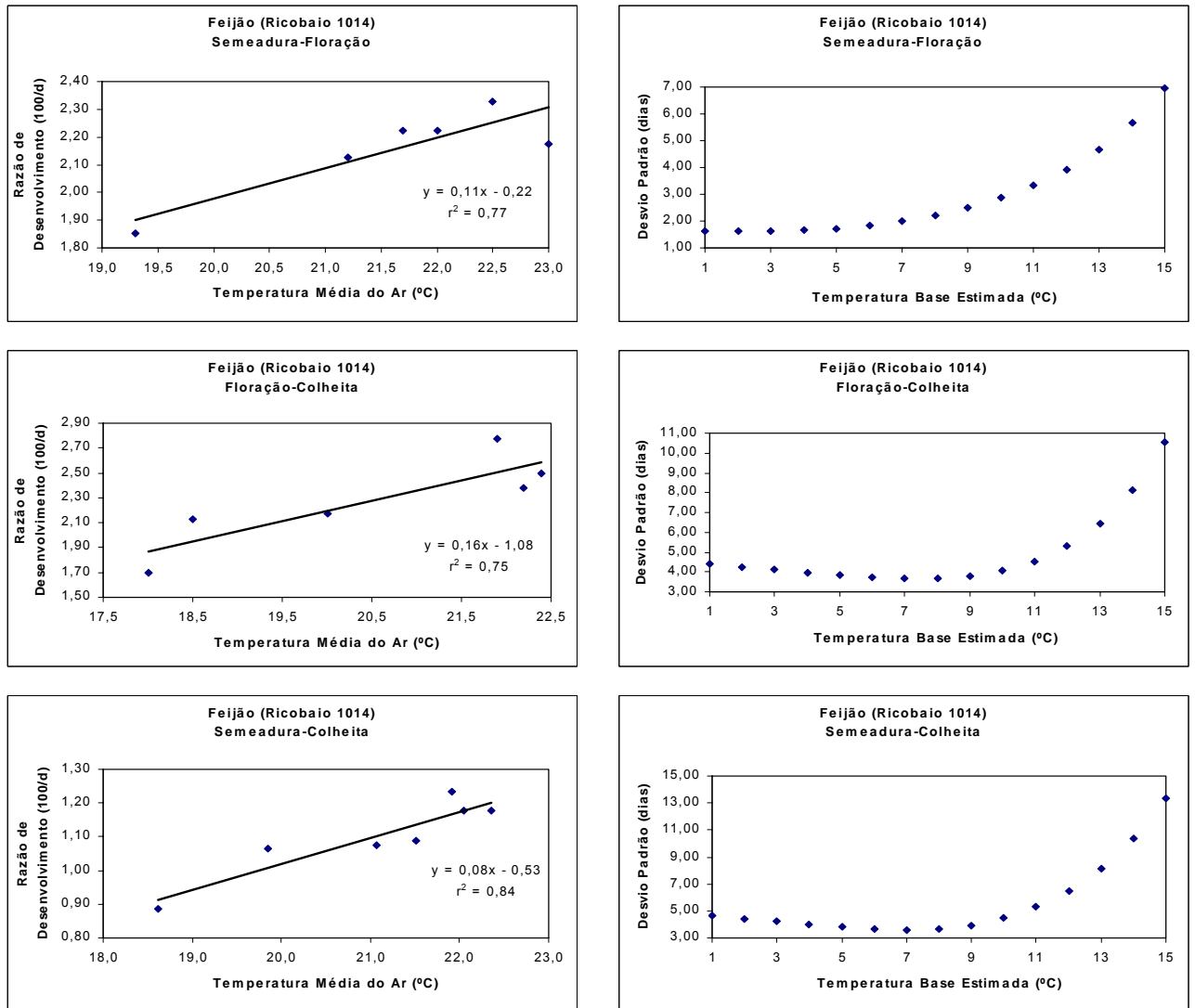


Figura 8 – Determinação da temperatura base inferior do feijão, cultivar Ricobaio 1014, nos subperíodos semeadura-floração, floração-colheita e semeadura-colheita pelos métodos da razão de desenvolvimento e do menor desvio-padrão em dias.

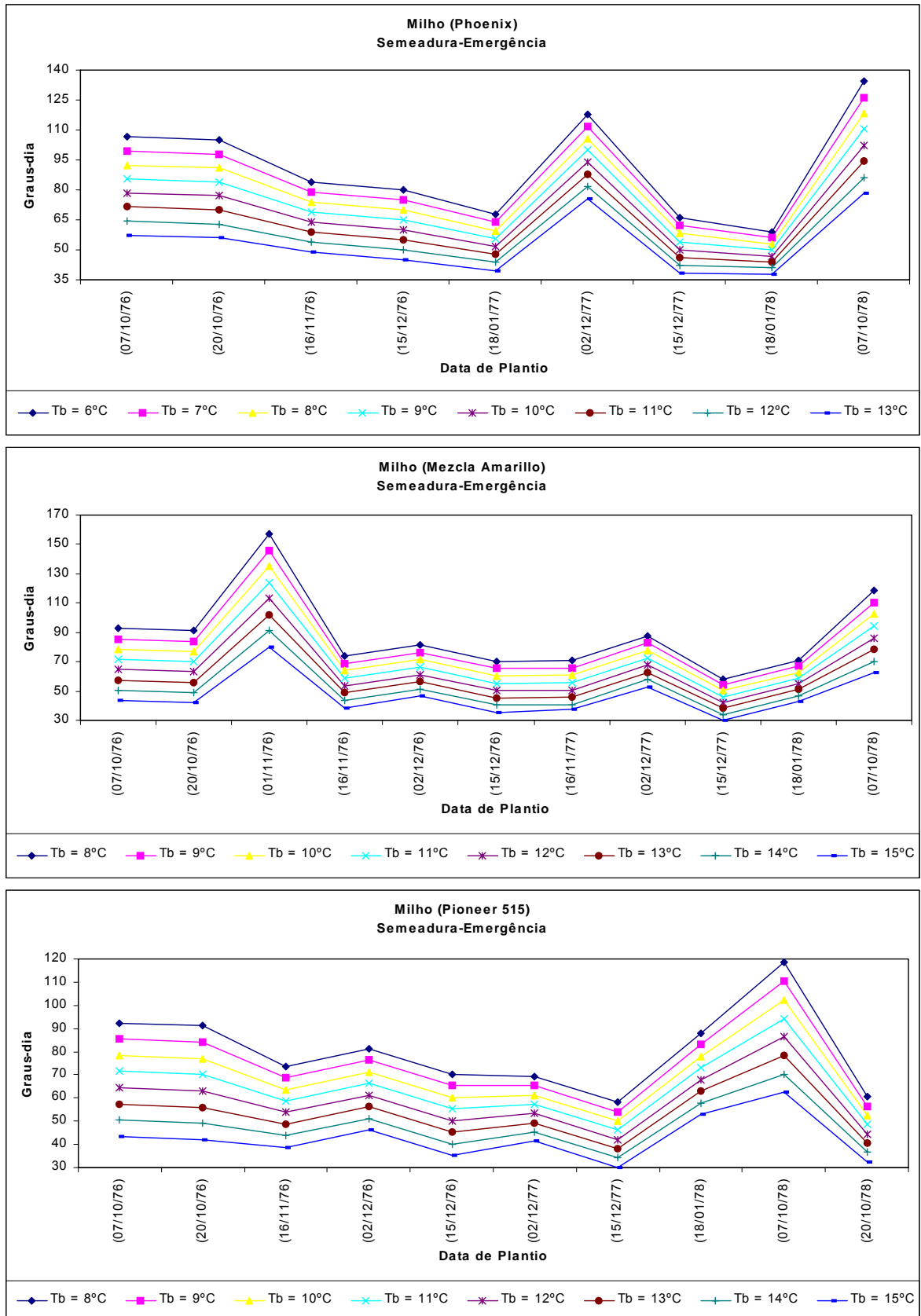


Figura 9 – Graus-dia acumulados da sementeira até a emergência, calculados para diferentes temperaturas base inferior e datas de plantio do milho, cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515.

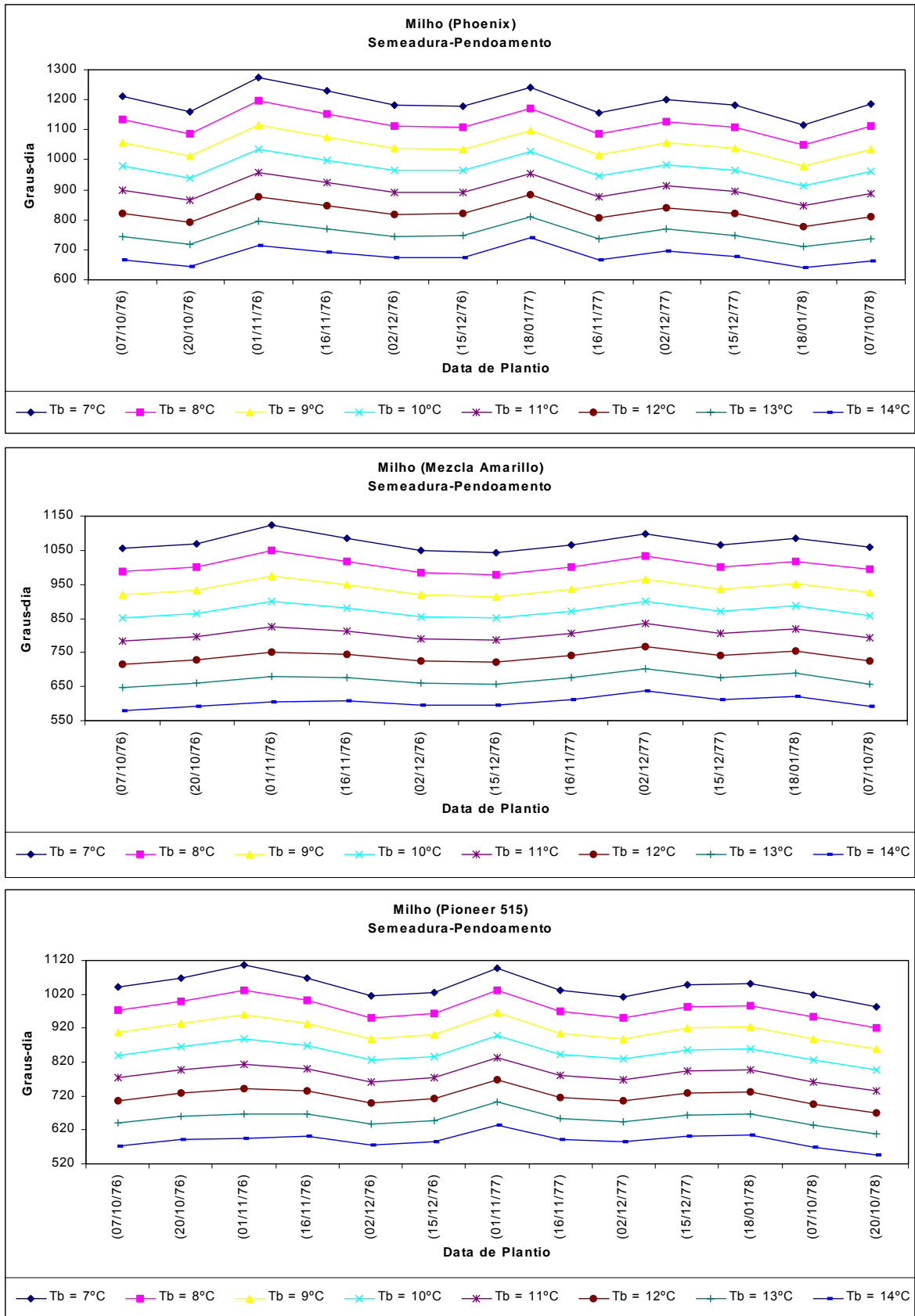


Figura 10 – Graus-dia acumulados da sementeira até o pendoamento calculados para diferentes temperaturas base inferior e datas de plantio do milho cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515.



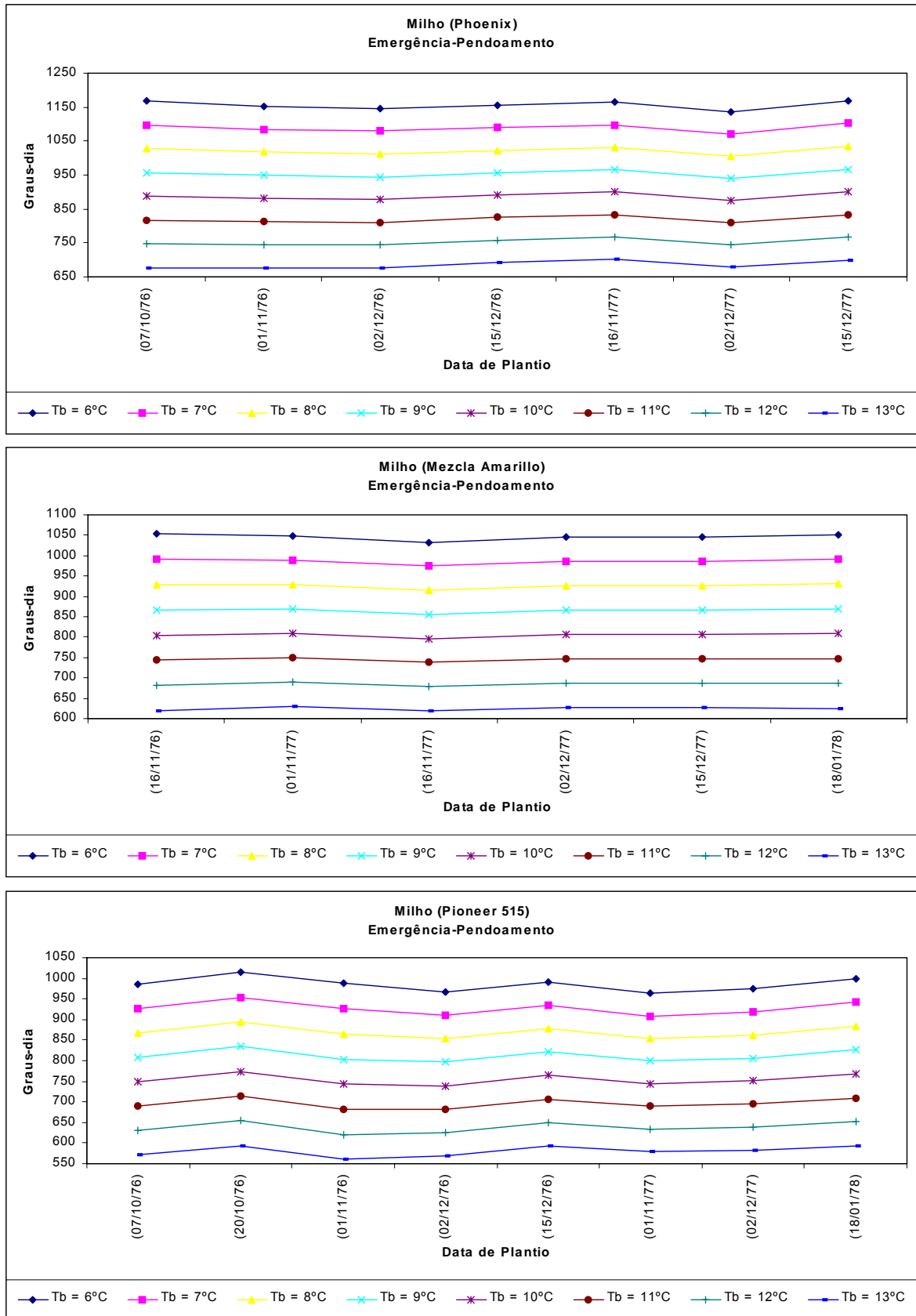


Figura 11 – Graus-dia acumulados da emergência até o pendoamento, calculados para diferentes temperaturas base inferior e datas de plantio do milho, cultivares Phoenix, Mezcla Amarillo e Pioneer 515.

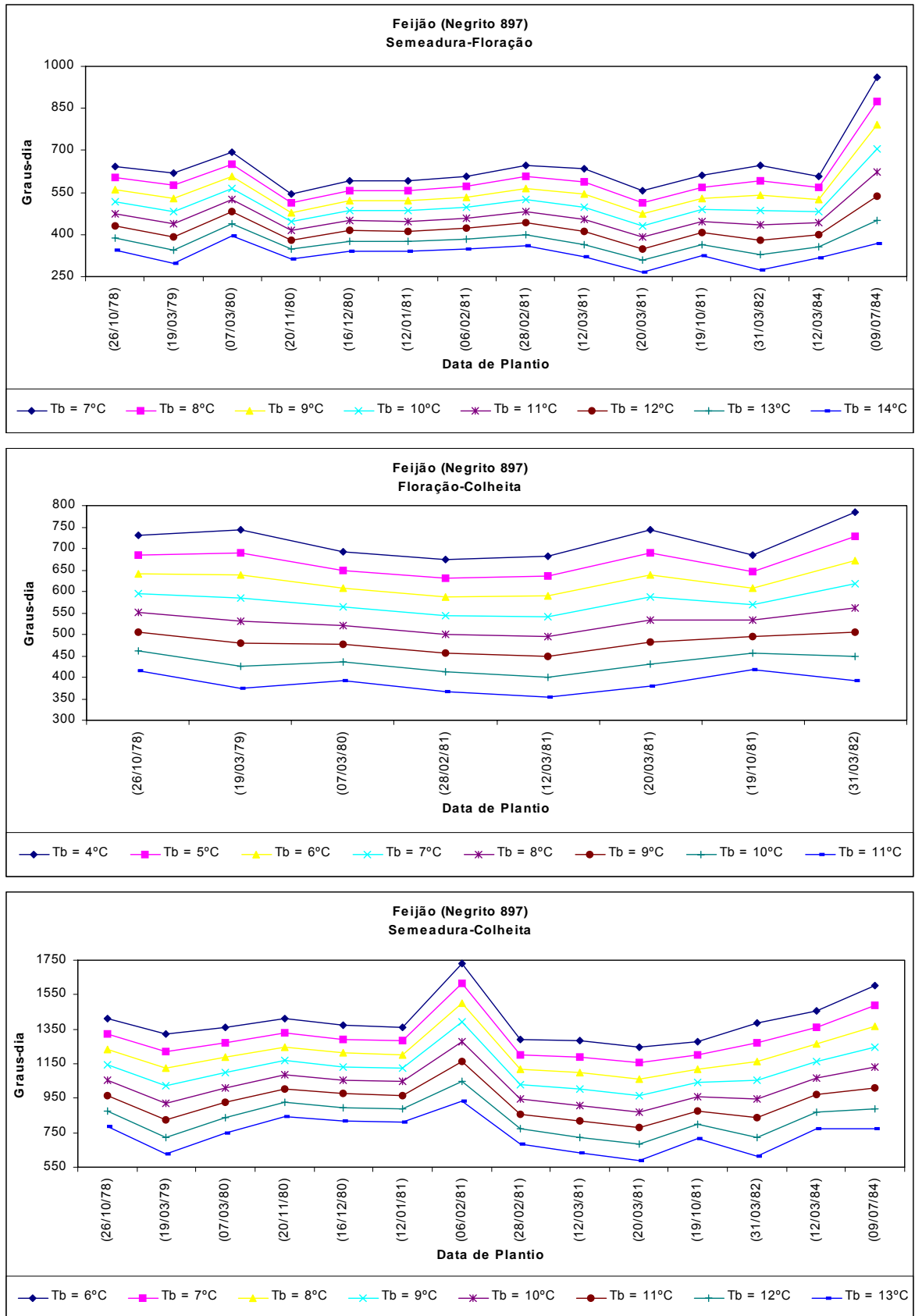


Figura 12 – Graus-dia acumulados nos subperíodos semeadura-floração, floração-colheita e semeadura-colheita, calculados para diferentes temperaturas base inferior e datas de plantio do feijão, cultivar Negrito 897.

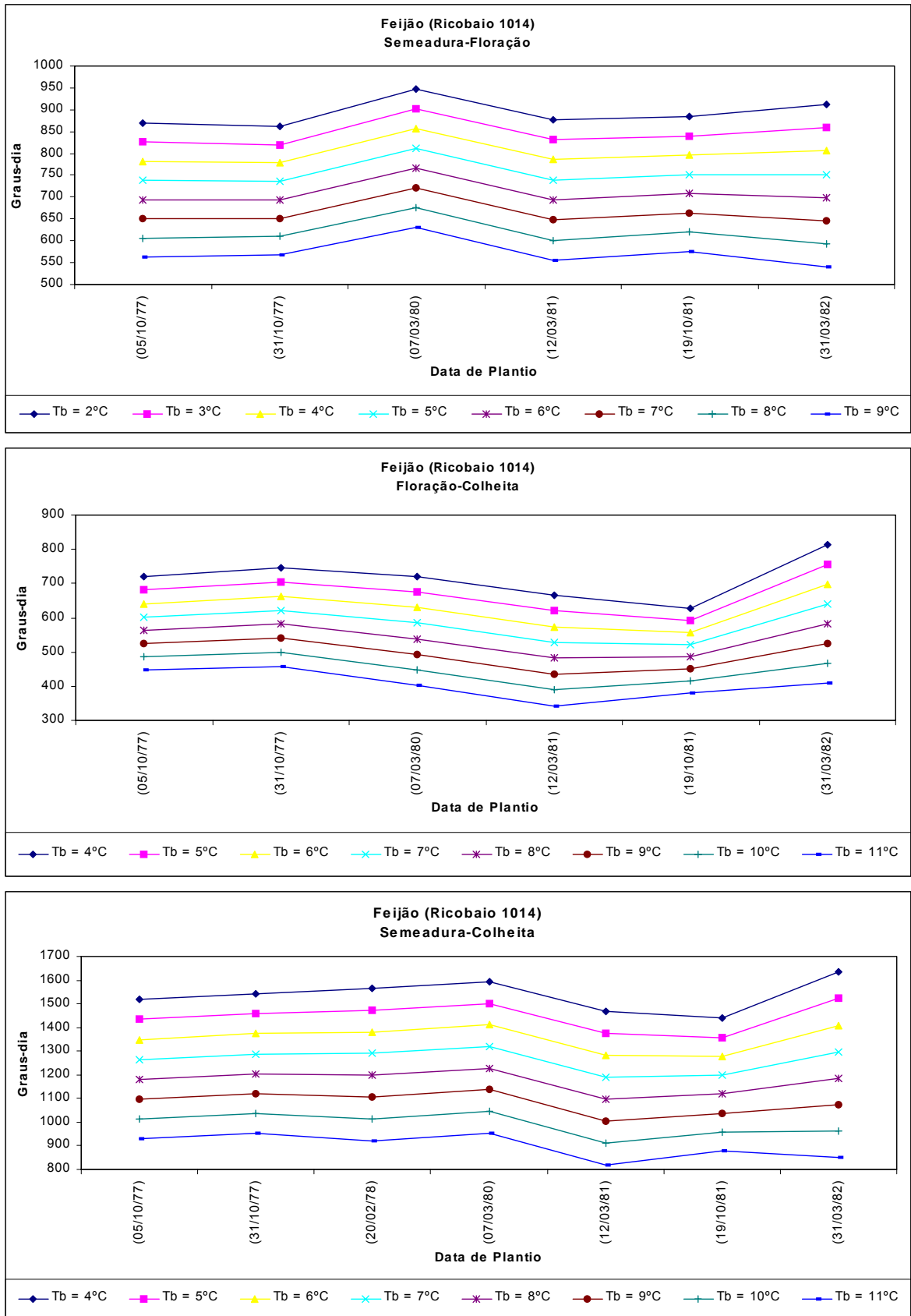


Figura 13 – Graus-dia acumulados nos subperíodos semeadura-floração, floração-colheita e semeadura-colheita, calculados para diferentes temperaturas base inferior e datas de plantio do feijão, cultivar Ricobaio 1014.