

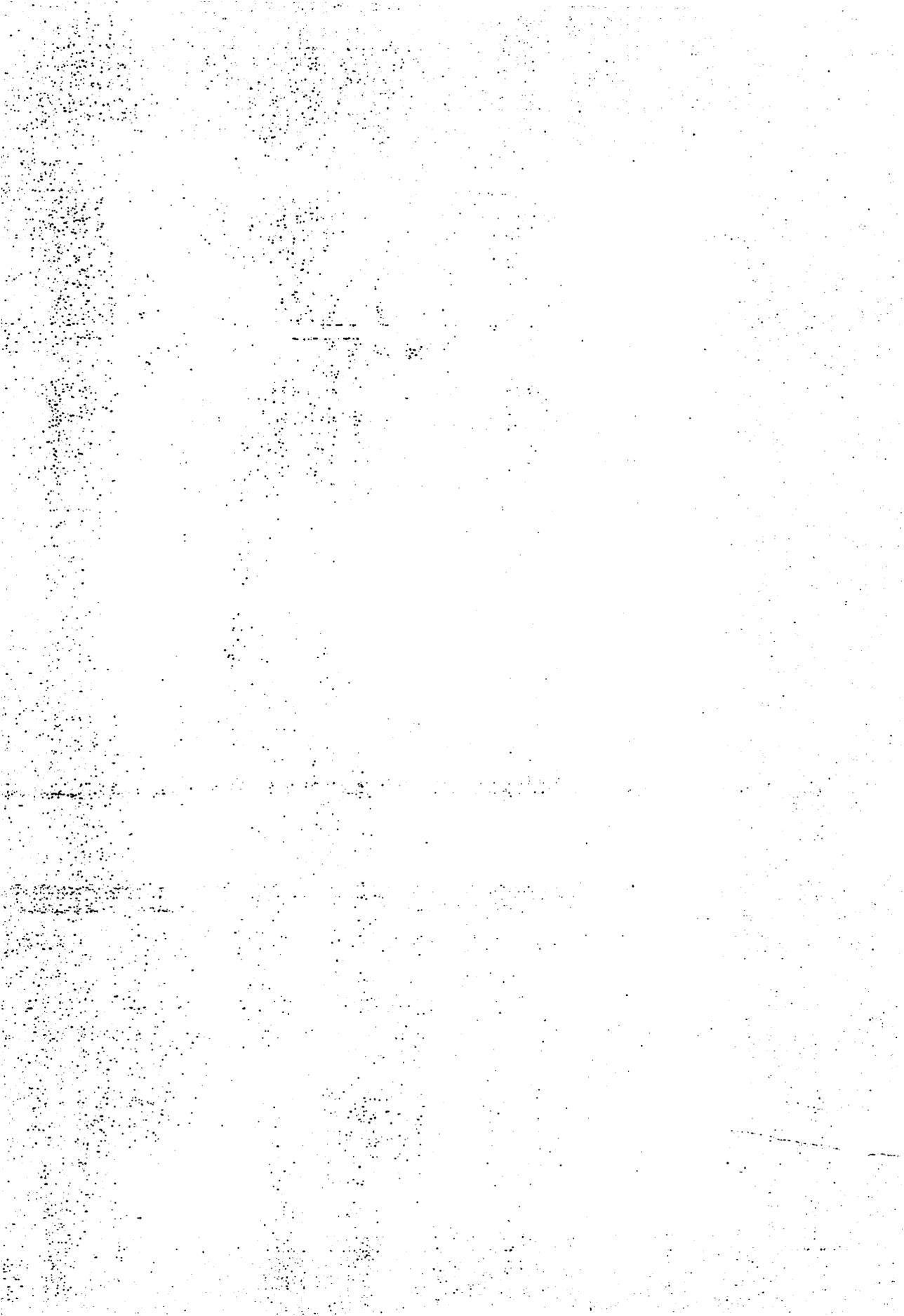


UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

**COEFICIENTE DE CULTURA ( $K_c$ ) E  
DESENVOLVIMENTO INICIAL DE DUAS  
VARIEDADES DE CAFEIRO (*Coffea arabica* L.)  
ASSOCIADOS A GRAUS-DIA**

**MÁRCIO RONALDO COELHO**

**2004**



MÁRCIO RONALDO COELHO

**COEFICIENTE DE CULTURA ( $K_C$ ) E DESENVOLVIMENTO  
INICIAL DE DUAS VARIEDADES DE CAFEIEIRO  
(*Coffea arabica* L.) ASSOCIADOS A GRAUS-DIA**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia  
Agrícola, área de concentração em  
Irrigação e Drenagem, para a obtenção  
do título de “Mestre”.

**Orientador:**

Prof. Dr. Elio Lemos da Silva

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2004

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Coelho, Márcio Ronaldo

Coeficiente de cultura (Kc) e desenvolvimento inicial de duas variedades de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) associado à graus-dia / Márcio Ronaldo Coelho.-- Lavras : UFLA, 2004.

64 p. : il.

Orientador: Élio Lemos da Silva.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Graus-dia. 2. Balanço hídrico. 3. Café. 4. Irrigação. 5. Coeficiente de cultura. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-633.7387

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela oportunidade concedida para a realização do curso de mestrado em Engenharia Agrícola.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa ao longo dos estudos.

Ao Prof. Elio Lemos da Silva pela orientação, ensinamentos, paciência e amizade, essenciais para realização deste trabalho

Ao Prof. Antonio Augusto de Aguiar Dantas, pela ajuda e sugestões no trabalho.

À Pesquisadora Dra. Sttella Dellyzete Veiga Franco da Rosa, que se dispôs com muita boa vontade a participar da banca.

Ao Prof. Luís Artur Alvarenga Vilela (in memoriam), que contribuiu com sugestões valiosas com relação ao manejo das irrigações.

Aos professores do Departamento de Engenharia, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica, seu Berg (Lindeberg), Neném (Oswaldo) e José Luiz, pelo auxílio com material e ajuda no experimento.

Às secretárias do Departamento, Juliana e Daniela, por serem sempre muito amigas.

Aos amigos Guilherme e Sato que desde a graduação se tornaram verdadeiros membros da minha família, presentes em todos o momentos.

Aos colegas de mestrado, Pedro, Giulianê, Marcio Santana (Patinho), Welson Lima, Hudson, Márcio Koetz e demais colegas de pós-graduação, pela amizade e companheirismo

Ao pessoal do café, Polyanna, Gilberto Coelho, Carlinhos, Carla, Natalino e Renato, pela amizade e alegria de sempre.

Aos amigos, Rogério, Cebola, Spolaor, Adson, que sempre estiveram juntos em todos os momentos.

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

# SUMÁRIO

	<b>Página</b>
RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 A cafeicultura – considerações gerais.....	4
2.2 Evapotranspiração de referência ( $E_t$ ).....	5
2.3 Retenção de água no solo.....	7
2.4 Balanço hídrico do solo.....	8
2.5 Coeficiente de cultura ( $K_c$ ).....	11
2.6 Graus-dia de desenvolvimento.....	12
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1 Caracterização da área experimental .....	15
3.2 Clima.....	15
3.3 Caracterização física e química do solo .....	15
3.4 Condução do experimento.....	17
3.5 Tratos culturais.....	18
3.6 Retenção de água no solo.....	19
3.7 Manejo da irrigação.....	21
3.8 Evapotranspiração de referência ( $E_t$ ).....	24
3.9 Balanço hídrico do solo.....	26
3.9.1 Precipitação.....	27
3.9.2 Irrigação.....	27
3.9.3 Drenagem interna.....	27
3.9.4 Condutividade hidráulica.....	28

3.9.5	Escoamento superficial.....	29
3.9.6	Variação do armazenamento.....	30
3.9.7	Evapotranspiração da cultura.....	30
3.10	Coeficiente de cultura ( $K_C$ ).....	32
3.11	Graus-dia.....	32
3.12	Desenvolvimento vegetativo.....	34
3.13	Análise dos dados.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1	Elementos meteorológicos.....	36
4.2	Curva de retenção de água no solo.....	37
4.3	Manejo da irrigação.....	39
4.3.1	Uniformidade da irrigação.....	42
4.4	Desenvolvimento vegetativo.....	42
4.4.1	Altura das plantas.....	42
4.4.2	Diâmetro de caule.....	45
4.4.3	Diâmetro de copa.....	48
4.4.4	Comprimento do ramo plagiotrópico.....	50
4.5	Coeficiente de cultura ( $K_C$ ).....	53
4.5.1	Cafeeiro Rubi.....	53
4.5.2	Cafeeiro Acaia Cerrado.....	55
5	CONCLUSÕES.....	58
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

**MÁRCIO RONALDO COELHO**

**COEFICIENTE DE CULTURA ( $K_C$ ) E DESENVOLVIMENTO  
INICIAL DE DUAS VARIEDADES DE CAFEIEIRO (*Coffea arabica* L.)  
ASSOCIADOS A GRAUS-DIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 7 de dezembro de 2004

Prof. Dr. Antonio Augusto Aguiar Dantas

UFLA

Dra. Sttella Dellyzete Veiga Franco da Rosa

Embrapa Café



Prof. Dr. Elio Lemos da Silva

UFLA

(Orientador)

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL

## **DEDICO**

A Deus, por permitir que chegasse a esse estágio da vida com muita perseverança, persistência, alegria e gozando de muita saúde.

## **OFEREÇO**

Aos meus pais, por me terem dado o dom da vida e em especial a minha mãe que sempre confiou em mim em todos os momentos.

Aos meus irmãos, Cláudio e Márcia, por sempre estarem juntos de mim com muita amizade, força e compreensão.

Ao companheiro Edson Pereira Lima, que participou o tempo inteiro do experimento, sem o qual este trabalho não seria o mesmo.

Aos meus amigos Guilherme e Sato, juntos nessa batalha desde a graduação.

## RESUMO

COELHO, Márcio Ronaldo. **Coefficiente de cultura ( $k_c$ ) e desenvolvimento inicial de duas variedades de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) associados a graus-dia.** Lavras: UFLA, 2004. 64 p. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Agrícola)\*

A irrigação é uma prática que, além de incrementar a produtividade, pode proporcionar a obtenção de um produto diferenciado. Necessitando assim do conhecimento adequado da demanda hídrica da cultura, que é regulada por suas características biológicas e por condições climáticas. As informações existentes de coeficiente de cultura para o cafeeiro geralmente caracterizam as fases da cultura utilizando o calendário Juliano. Curvas de  $K_C$  tendo como abscissa dias do ano parecem não representar as diferentes condições das lavouras nas diferentes condições de clima. Dessa forma, objetivou-se, neste trabalho, determinar o coeficiente de cultura ( $K_C$ ), para duas variedades de cafeeiro (*Coffea arabica* L.), estabelecendo a relação entre  $K_C$  e graus-dia de desenvolvimento, além de avaliar o crescimento inicial do cafeeiro irrigado e estabelecer a sua relação com graus-dia de desenvolvimento. O trabalho foi conduzido no setor de experimentos do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Determinou-se o balanço hídrico no solo por meio da contabilização das entradas e saídas de água no volume de controle. De posse dos valores da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e da evapotranspiração da cultura ( $E_t$ ), determinou-se o coeficiente da cultura ( $K_c$ ) e estabeleceu-se a relação com o acúmulo das unidades térmicas de calor (GDD). Foi realizado também o acompanhamento das variáveis de desenvolvimento vegetativo. Os resultados obtidos permitem concluir que: obtém-se boa relação entre desenvolvimento inicial do cafeeiro e graus-dia, demonstrando que um contador de tempo baseado em graus-dia de desenvolvimento pode ser uma boa alternativa. O coeficiente de cultura ( $K_c$ ) variou de 0,1 até 0,5 para as duas variedades, apresentando também boa relação com os graus-dia de desenvolvimento (GDD).

---

\* Comitê Orientador: Elio Lemos da Silva – UFLA (Orientador), Antonio Augusto Aguilar Dantas – UFLA (Co-orientador).

## ABSTRACT

**COELHO, Márcio Ronaldo. Crop coefficient ( $K_c$ ) and initial development of two coffee plant (*Coffea arabica*) varieties associated to Growing Degree Days (GDD). Lavras: UFLA, 2004. 64p. (Thesis - Master of Science in Agricultural Engineering/ Irrigation and Drainage)\***

The irrigation in coffee crop can provide better quality of the final product besides the increasing of productivity. Plant water requirement information is mandatory for a efficient irrigation management that depends on plant characteristics and weather conditions. The existing information of plant water requirement, crop coefficient, is, in general, given in a base of time scale, in most cases in calendar days. Calendar based crop coefficient curve seems not represent the different conditions of crop field in different weather conditions, mainly in different air temperature conditions. This research was carried out at the Engineering Department of the “Universidade Federal de Lavras”, aiming the determination of Growing-Degree-Days (GDD) based crop coefficient ( $K_c$ ) for two *Coffea arabica* varieties and the evaluation of coffee plant development under irrigation, during its initial stage of growth. Daily crop evapotranspiration (ET) and reference evapotranspiration ( $ET_o$ ) values were determined and its ratio ( $ET/ET_o$ ) results were related to Growing degree days (GDD). It was also evaluated some vegetative development parameters that were associated to GDD. The study allows conclude that: i) There is a good correlation between parameters of vegetative development and growing degree days, showing that a GDD can be an excellent alternative of time counter for coffee crop; ii) Crop coefficient ( $K_c$ ) ranged from 0.1 to 0.5, for the two studied varieties, showing well related to GDD.

---

\* Guidance Committee: Elio Lemos da Silva (Major Professor); Antonio Augusto Aguilar Dantas.

# 1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura sempre teve destacada participação no desenvolvimento da economia brasileira. Presente no país desde o século XVIII, a lavoura cafeeira registrou rápida expansão e passou a ser um dos seus principais produtos agrícolas.

O Brasil é um grande produtor e exportador mundial de café. Responsável por uma produção média anual de 28,9 milhões de sacas beneficiadas de 60 kg, apresenta uma área cultivada de 1,98 milhões de hectares, dos quais uma pequena área de 200 mil hectares é irrigada (Item, 2000).

Para o cafeicultor, a irrigação é uma prática que, além de incrementar a produtividade, pode proporcionar a obtenção de um produto diferenciado, de qualidade superior e com perspectivas de melhores preços, proporcionando sua sobrevivência no mercado. Nesse contexto, a cafeicultura passa a ser cada vez mais dependente da suplementação hídrica.

Para que a aplicação de água seja eficiente, é fundamental o conhecimento adequado da demanda hídrica da cultura que, por sua vez, é regulada por suas características biológicas e por condições climáticas. Sendo assim, torna-se essencial o estudo de parâmetros, como o coeficiente de cultura ( $K_C$ ) que se apresenta como uma ferramenta importante na tomada de decisão no âmbito da propriedade agrícola.

As informações existentes de coeficiente de cultura,  $K_C$ , como as publicadas pelo Boletim Técnico n. 56 da FAO (Allen et al., 1998) e também por Matiello (1991) para cafeeiro, caracterizam as fases da cultura na escala de tempo, como dias após o início da emissão de novas folhas ou dias após o plantio, seguindo, na maioria das vezes o calendário Juliano. Curvas de  $K_C$  tendo como abscissa dias do ano parecem não representar as diferentes condições das lavouras nas diferentes condições de clima, principalmente de temperatura.

Mônica / 2003

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A cafeicultura: considerações gerais

A espécie *Coffea arabica* originou-se nos vales das regiões montanhosas da Abissínia, em altitudes compreendidas entre 1.000 e 2.500 metros, 6° a 9° de latitude norte e 34° a 40° de longitude leste. A temperatura média dessas regiões é de 20°C, com precipitações bem distribuídas e superiores a 1.600 mm anuais, entremcada por um período seco de 3 a 4 meses. Esta espécie é bastante maleável quanto à distribuição de chuvas, estando a precipitação anual ótima entre 1.200 e 1.800 mm (Rena e Maestri, 1994). Segundo Matiello (1991), a espécie *Coffea canephora* (café robusta), oriunda de bacia do Congo, na África, adapta-se bem às regiões equatoriais baixas, quentes e úmidas, portanto, em condições de temperaturas mais elevadas que as apropriadas ao cafeeiro arábica. Em geral, dependendo das condições climáticas do local e de alguns fatores de produção, como variedade da planta cultivada, solo da região, tratamentos culturais e pós-colheita, o café arábica proporciona melhor bebida que o café robusta (Camargo e Pereira, 1994; Illy, 1998; Ormond et al., 1999).

Esta é uma informação relevante e de grande importância para os cafeicultores, principalmente aqueles que fazem uso de tecnologias como a irrigação, visto que, tanto no mercado norte-americano como no europeu, as estatísticas indicam declínio ou estagnação do consumo de café *commodity*, ao passo que se constata crescimento de cafés especiais (Saes e Nunes, 1998).

O cafeeiro é cultivado em condições ecológicas variadas, altitudes desde uns poucos metros acima do nível do mar até 2.000 metros e nos tipos mais variados de solo e clima (Carvajal, 1984). Segundo este mesmo autor, o cafeeiro é cultivado em condições desde muito secas, como no Yemen, até muito úmidas,

# 1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura sempre teve destacada participação no desenvolvimento da economia brasileira. Presente no país desde o século XVIII, a lavoura cafeeira registrou rápida expansão e passou a ser um dos seus principais produtos agrícolas.

O Brasil é um grande produtor e exportador mundial de café. Responsável por uma produção média anual de 28,9 milhões de sacas beneficiadas de 60 kg, apresenta uma área cultivada de 1,98 milhões de hectares, dos quais uma pequena área de 200 mil hectares é irrigada (Item, 2000).

Para o cafeicultor, a irrigação é uma prática que, além de incrementar a produtividade, pode proporcionar a obtenção de um produto diferenciado, de qualidade superior e com perspectivas de melhores preços, proporcionando sua sobrevivência no mercado. Nesse contexto, a cafeicultura passa a ser cada vez mais dependente da suplementação hídrica.

Para que a aplicação de água seja eficiente, é fundamental o conhecimento adequado da demanda hídrica da cultura que, por sua vez, é regulada por suas características biológicas e por condições climáticas. Sendo assim, torna-se essencial o estudo de parâmetros, como o coeficiente de cultura ( $K_C$ ) que se apresenta como uma ferramenta importante na tomada de decisão no âmbito da propriedade agrícola.

As informações existentes de coeficiente de cultura,  $K_C$ , como as publicadas pelo Boletim Técnico n. 56 da FAO (Allen et al., 1998) e também por Matiello (1991) para cafeeiro, caracterizam as fases da cultura na escala de tempo, como dias após o início da emissão de novas folhas ou dias após o plantio, seguindo, na maioria das vezes o calendário Juliano. Curvas de  $K_C$  tendo como abscissa dias do ano parecem não representar as diferentes condições das lavouras nas diferentes condições de clima, principalmente de temperatura.

MSc. Inua / 2003

34,85  
→ 2,42 milhões

Segundo Oliveira Nunez (1986), a duração das fases fenológicas de uma cultura avaliada pelo número de dias do calendário varia bastante entre regiões, anos e datas de plantio, em razão das freqüentes mudanças das condições do tempo e das diferenças climáticas. A determinação de lâminas de irrigação usando coeficiente de cultura ( $K_C$ ) obtido em diferentes locais da lavoura implantada pode ser equivocada se as condições dos locais onde o  $K_C$  foi obtido e onde a cultura está implantada forem diferentes, podendo superestimar ou subestimar o consumo de água pela lavoura. A utilização apropriada de variáveis meteorológicas, que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas, permite determinar com maior precisão a duração das fases fenológicas das plantas cultivadas.

A utilização correta da metodologia de graus-dia ou unidades térmicas como indicador das diferentes fases de uma cultura, em substituição ao acompanhamento por meio de um calendário, poderá permitir a importação e exportação de resultados de pesquisa referentes ao consumo relativo de água ( $K_C$ ) nas diferentes épocas de irrigação. Para definir esta nova forma de acompanhamento das fases da cultura e relaciona-la a momento e lâmina de irrigação é necessário primeiro a definição das temperaturas mínima e máxima exigidas pelo cafeeiro para o seu normal consumo de água e desenvolvimento (temperaturas cardeais), bem como os valores de  $K_C$  durante as suas diferentes fases fenológicas.

O conceito de graus-dia pressupõe a existência de temperaturas basais (temperaturas cardeais), temperatura basal inferior ( $T_b$ ) e temperatura basal superior ( $T_B$ ), aquém ou além das quais a planta não se desenvolve e se o fizer será a taxas muito reduzidas (Ometto, 1981).

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivos determinar o coeficiente de cultura ( $K_C$ ) para duas variedades de cafeeiro (*Coffea arabica* L.), estabelecendo a relação entre  $K_C$  e graus-dia de

desenvolvimento, além de avaliar o crescimento inicial do cafeeiro irrigado e estabelecer a sua relação com graus-dia de desenvolvimento.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A cafeicultura: considerações gerais

A espécie *Coffea arabica* originou-se nos vales das regiões montanhosas da Abissínia, em altitudes compreendidas entre 1.000 e 2.500 metros, 6° a 9° de latitude norte e 34° a 40° de longitude leste. A temperatura média dessas regiões é de 20°C, com precipitações bem distribuídas e superiores a 1.600 mm anuais, entremçada por um período seco de 3 a 4 meses. Esta espécie é bastante maleável quanto à distribuição de chuvas, estando a precipitação anual ótima entre 1.200 e 1.800 mm (Rena e Maestri, 1994). Segundo Matiello (1991), a espécie *Coffea canephora* (café robusta), oriunda de bacia do Congo, na África, adapta-se bem às regiões equatoriais baixas, quentes e úmidas, portanto, em condições de temperaturas mais elevadas que as apropriadas ao cafeeiro arábica. Em geral, dependendo das condições climáticas do local e de alguns fatores de produção, como variedade da planta cultivada, solo da região, tratamentos culturais e pós-colheita, o café arábica proporciona melhor bebida que o café robusta (Camargo e Pereira, 1994; Illy, 1998; Ormond et al., 1999).

Esta é uma informação relevante e de grande importância para os cafeicultores, principalmente aqueles que fazem uso de tecnologias como a irrigação, visto que, tanto no mercado norte-americano como no europeu, as estatísticas indicam declínio ou estagnação do consumo de café *commodity*, ao passo que se constata crescimento de cafés especiais (Saes e Nunes, 1998).

O cafeeiro é cultivado em condições ecológicas variadas, altitudes desde uns poucos metros acima do nível do mar até 2.000 metros e nos tipos mais variados de solo e clima (Carvajal, 1984). Segundo este mesmo autor, o cafeeiro é cultivado em condições desde muito secas, como no Yemen, até muito úmidas,

com precipitações pluviométricas superiores a 5.000 mm anuais, como na Índia. O autor ressalta que chuva excessiva produz efeitos negativos na produtividade e que valores superiores a 3.000 mm anuais devem ser considerados como não apropriados para a condução econômica de cafezais.

## **2.2 Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ )**

Thornthwaite (1948) introduziu o conceito de evapotranspiração potencial ( $ET_p$ ) definindo-a como sendo a perda d'água por uma superfície de solo úmido suficientemente grande, com suprimento contínuo e adequado de água, coberto completamente por vegetação de porte baixo, em crescimento ativo, de tal modo que possa tornar-se desprezível o efeito advectivo.

Jensen (1973) definiu  $E_{tr}$  como sendo a evapotranspiração de uma cultura de alfafa, com 30 a 50 cm de altura e bordadura mínima de 100 m, sem déficit hídrico. Doorenbos e Pruitt (1975) definiram a evapotranspiração de referência como aquela que ocorre em uma extensa superfície gramada, com porte de 8 a 15 cm, em pleno crescimento, cobrindo toda a superfície do solo e sem restrição hídrica.

Uma padronização da definição de  $ET_0$  foi proposta por Smith (1991), segundo a qual a evapotranspiração de referência é aquela que ocorre em uma cultura hipotética, com as seguintes características: altura fixa de 0,12 m, poder refletor (albedo) igual a 0,23 e resistência do dossel de  $69 \text{ s m}^{-1}$ .

A evapotranspiração pode ser obtida por meio de medidas diretas ou de modelos que levam em consideração a utilização de variáveis climáticas. No primeiro grupo são utilizados diversos tipos de lisímetros e o método do balanço de água no solo, enquanto que no segundo são largamente utilizados modelos teóricos, empíricos e evaporímetros, como o Tanque Classe A. Peres et al. (1995) comentam que, apesar de fornecer as melhores estimativas da

evapotranspiração, os métodos diretos são de difícil operacionalidade, motivo pelo qual seu uso se restringe basicamente a centros de pesquisa visando calibrar os métodos do segundo grupo. Diante dessas dificuldades, muitos métodos teóricos e empíricos foram desenvolvidos para estimar a evapotranspiração. Alguns são bastante simples e necessitam apenas da temperatura do ar como variável climática e outros têm uma configuração teórica mais refinada que depende de um maior número de variáveis meteorológicas na sua utilização.

Em 1990, a Food and Agriculture Organization (FAO) reuniu uma equipe de especialistas em evapotranspiração para rever seu *Irrigation and Drainage Paper 24*, preparado por Doorenbos e Pruitt (1977). A partir dessa reunião definiu-se que o método de Penman-Monteith é o mais indicado para estimar a evapotranspiração de uma cultura na escala diária. Essa parametrização foi proposta como representativa de uma cultura hipotética (Pereira et al., 1997).

Peres et al. (1995) avaliaram, em três localidades do estado de São Paulo, o modelo de Penman-Monteith padronizado pela FAO e, a partir de seus estudos, concluíram que o modelo estimou de forma consistente e bem correlacionada a  $ET_0$  para a grama. Ele sugere que o modelo de Penman-Monteith padronizado pela FAO pode ser utilizado com sucesso no cálculo das necessidades hídricas das culturas.

Pereira et al. (1997) citam que a literatura sobre evapotranspiração é riquíssima e disponibilizam uma lista de onze publicações sobre o assunto. Eles apresentam dezessete métodos de estimativa da evapotranspiração, podendo ser agrupados em cinco categorias que são: empíricos, aerodinâmicos, balanço de energia, combinados e correlação dos turbilhões.

Santiago (2001), em estudos comparando a evapotranspiração de referência medida por lisímetro pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO 56) nas escalas mensal e decenal, comenta que o lisímetro, apesar de

permitir detalhada mensuração da massa de água, é de difícil operação em períodos de chuvas intensas e prolongadas. Em virtude dessas dificuldades, a estimativa da  $ET_0$  por meio da parametrização proposta pela FAO para a equação de Penman-Monteith pode ser considerada como adequada, tanto nas escalas mensais como decendiais.

Comparando dados  $ET_0$  medidos em lisímetro de pesagem com dados calculados pela equação de Penman-Monteith, Medeiros (2002) não obteve boa correlação entre os dados analisados, porém, ele faz a ressalva de que este fato possivelmente ocorreu em função do dispositivo lisimétrico não estar operando satisfatoriamente. O mesmo autor reforça que o método Penman-Monteith é uma referência internacional e que representa uma cultura hipotética, a qual permite a obtenção de resultados confiáveis do potencial de evapotranspiração de um local.

### **2.3 Retenção de água no solo**

O solo é um sistema aberto e dinâmico, constituído por três fases distintas: sólida (matriz do solo), líquida (solução aquosa) e gasosa (ar do solo). As interações entre essas fases influenciam o estado energético com que a água se movimenta no solo (Libardi, 1999). O estudo da retenção de água é feito por meio de gráficos que relacionam a umidade do solo com o potencial matricial, denominado de curva de retenção da água no solo.

A influência da umidade do solo sobre o potencial matricial pode ser avaliada de três maneiras: por tensiômetro, pelo funil de Haines e por câmara de pressão de Richards. As curvas podem ser determinadas após estabelecer-se uma série de pontos de equilíbrio entre a umidade das amostras de solo com potencial matricial conhecido.

A retenção de água no solo está relacionada à distribuição e à forma dos poros que, por sua vez, são influenciadas pela textura, conteúdo e qualidade da matéria orgânica e pela disposição dos componentes sólidos formando os agregados (Hillel, 1971). Da mesma forma, Jorge e Prado (1988) comentam que a textura e a estrutura são atributos que influenciam diretamente na retenção da água pelo solo.

#### **2.4 Balanço hídrico do solo**

O balanço hídrico é um sistema contábil de monitoramento da água no solo que resulta na aplicação do princípio de conservação de massa (Pereira et al., 1997). Isto nada mais é do que a contabilização das entradas e saídas de água de um elemento de volume de solo num dado intervalo de tempo. O balanço hídrico do solo é fundamental, pois ele define as condições hídricas sob as quais a cultura se desenvolve (Reichardt, 1985).

Os primeiros estudos foram feitos por agrometeorologistas que, de posse de dados meteorológicos, calcularam balanços estimando a evapotranspiração por equações teórico-empíricas e assumindo a variação do armazenamento constante e independente do tipo de solo (Reichardt, 1985).

Conforme Guandique (1993), o balanço hídrico pode ser realizado por meio de uma série de dados climatológicos disponíveis em um determinado local ou pode ser feito também com dados obtidos num volume de controle do solo. Ele pode ser classificado como balanço hídrico climatológico e do solo, respectivamente. Nos dois casos pode ser definido intervalo de tempo variável, dependendo da finalidade do estudo.

Qualquer que seja o método empregado, a determinação da evapotranspiração da cultura é difícil, onerosa e sujeita a muitos erros, porém,

seu conhecimento torna-se essencial para manter o solo em condições ideais para o crescimento e o desenvolvimento vegetativo das culturas.

Vários são os autores que utilizam a metodologia do balanço hídrico no solo em um dado volume de controle (Rose, 1966; Slatyer, 1967; Reichardt et al., 1979; Guandique, 1993; Cruz, 2003), tendo como os principais componentes a precipitação (P), irrigação (I), evapotranspiração da cultura (ET), deflúvio superficial/run-off (R), drenagem interna (D) e a variação do armazenamento de água no solo ( $\Delta A$ ). A quantificação desses componentes pode ser apresentada na forma integral ou diferencial por meio da equação geral do balanço de conservação de massa (Volpe, 1986).

As componentes precipitação e irrigação são as principais formas de entrada de água no volume de controle. A precipitação pode ser medida com boa precisão por pluviômetros ou pluviógrafos. O principal problema está relacionado à representatividade dos dados coletados pela estação meteorológica. Segundo Cruz (2003), a distância da estação em relação à cultura onde é efetuado o balanço assume uma importância fundamental, sendo recomendável que a medida da precipitação seja feita o mais próximo possível da área experimental. A irrigação consiste na aplicação artificial de água no solo, visando manter o armazenamento em nível adequado ao pleno desenvolvimento das culturas. Para que as plantas se desenvolvam nas condições ideais é necessário que as lâminas de irrigação sejam bem quantificadas e aplicadas corretamente, de forma a não provocar nem o estresse hídrico, nem o excesso de água para as plantas.

O deflúvio superficial ou “run-off” representa, no balanço hídrico, um dos elementos de saída de água do perfil do solo. Segundo Rose (1966), a determinação do deflúvio superficial pode ser feita por meio de técnicas e estruturas apropriadas, porém, em algumas situações, as medidas diretas se tornam difíceis devido ao volume de água envolvido e à variação com a

declividade. Vários são os trabalhos nos quais a quantificação dessa variável é desconsiderada, sendo justificado principalmente pela baixa declividade do terreno e pelas dificuldades na sua mensuração (Volpe, 1986; Ramos, 1998; Cruz, 2003).

A drenagem profunda, que representa as perdas de água para além do limite da zona radicular da cultura, é a componente do balanço hídrico realizado em campo com maior dificuldade de mensuração, motivo que leva vários autores a desprezá-la ou incluí-la como parte do armazenamento ou evapotranspiração. Segundo Vachaud et al. (1985), este componente não é sempre desprezível, podendo representar 30% ou mais do balanço hídrico total.

De acordo com Libardi (1995), a determinação da variação do armazenamento de água no solo pode ser obtida por meio da integração de perfis consecutivos de umidade do solo em determinado intervalo de tempo. Downey (1972), citado por Guandique (1993), encontrou erros da ordem de 10% na determinação da variação do armazenamento

A taxa de evapotranspiração demonstra as necessidades hídricas da cultura, que variam com seu estágio de desenvolvimento, tornando sua estimativa essencial ao planejamento da irrigação (Doorembos e Kassam, 1979).

De acordo com Ometto (1981), o volume de controle a ser considerado deve estar compreendido entre a superfície do solo e uma profundidade que atinja no mínimo 80% do sistema radicular da cultura em estudo.

Existe uma carência muito grande de estudos envolvendo o balanço hídrico, irrigação e cafeicultura, e muito ainda pode ser feito para que se possa ter um avanço de pesquisa nessa área. Grande parte dos trabalhos que estudam as necessidades hídricas do cafeeiro é feita por meio do balanço hídrico climatológico, geralmente por um período mensal, baseando-se na metodologia desenvolvida por Thornthwaite e Mather (1955).



## 2.5 Coeficiente de cultura ( $K_C$ )

A reposição de água às plantas pela irrigação pode ser calculada a partir da evapotranspiração máxima da cultura (ET) que é geralmente determinada, de maneira indireta, pela sua relação com a evapotranspiração potencial de uma cultura de referência ( $ET_0$ ), e com o coeficiente de cultura ( $K_C$ ), ( $ET = ET_0 \times K_C$ ). Segundo Allen et al. (1998), os valores de  $K_C$  refletem as necessidades hídricas das plantas nos seus estádios vegetativos e reprodutivos .

Blore (1964) sugere, para o cafeeiro, um coeficiente de cultura ( $K_C$ ) igual a 0,5 para estação seca e de 0,8 para a estação úmida. Clowes (1984) considera um coeficiente de cultura de 0,6 para todas as fases fenológicas do cafeeiro. Gutiérrez e Meinzer (1994) sugerem  $K_C = 0,58$  para cafeeiros com 1 ano de plantio e um coeficiente variando de 0,75 a 0,79 para cafeeiros de 2 a 4 anos de plantio. Santinato et al. (1996) apresentaram uma tabela com valores de coeficiente de cultura para cafeeiro em função do espaçamento entre ruas e plantas e conforme a idade da lavoura. Oliveira (2003) encontrou valores de  $K_C$  variando de 0,44 a 0,87 com valor médio de 0,51 para uma cultura de café recepado e, para o cafeeiro adulto com 16 anos de idade, encontrou valores de coeficiente de cultura variando 0,72 a 1,5 com valor médio de 0,97 para estudos conduzidos no período de junho a outubro na região de Lavras.

As fases ou estádios de uma cultura qualquer, fator de grande importância na determinação do consumo de água, podem ser definidos de diversas formas, tais como: dias após plantio, dias após emergência, índice de área foliar e graus-dias de desenvolvimento (GDD). Tradicionalmente, os coeficientes cultura,  $K_C$ , têm sido determinados com base em semana ou mês do ano. Algumas pesquisas já foram desenvolvidas com o objetivo de se determinar coeficientes de cultura como função do estágio fenológico, percentagem do ciclo

(Tosso e Torres, 1986) e graus-dia de desenvolvimento (Sammis *et al.*, 1985; Fox *et al.*, 1992).

Sammis *et al.* (1985) descobriram que um polinômio de terceira ordem descreve muito bem a relação entre coeficiente de cultura e graus-dia de desenvolvimento para alfafa, milho, sorgo e algodão. Shayya *et al.* (1991) encontraram uma relação linear entre Kc e GDD para milho. Uma metodologia diferente foi usada por Fox Jr. *et al.* (1992), que usaram séries de Fourier para descrever Kc com base em GDD.

## 2.6 Graus-dia de desenvolvimento

Os estudos das interações clima-planta foram iniciados, segundo Mota (1986), por Réaumur, em 1735, que é considerado o precursor do sistema de graus-dia ou unidades térmicas de calor. A determinação de GD está baseada na quantidade de graus centígrados a que a planta estará ou ficou sujeita, acima de um determinado valor, denominado de temperatura base. A temperatura base é definida como a temperatura abaixo da qual a planta não se desenvolve ou se desenvolve a taxas muito reduzidas (Fox *et al.*, 1992). É importante salientar que, além da temperatura basal, deve-se considerar também a temperatura máxima na utilização do método de graus-dia. Acima desta temperatura, normalmente, ocorre a paralisação ou a diminuição das atividades biológicas da planta (Volpe, 1992).

Um grau-dia, ou unidade térmica, era definido por Réaumur como a temperatura média do dia. No método original aplicado por Réaumur, a constante térmica é calculada a partir da soma das temperaturas médias diárias acima 0°C, que podia ser determinada para o ciclo total ou para cada fase. Esse método foi denominado de método direto, que apresentava o inconveniente de sofrer variações segundo as localidades consideradas (Mota, 1986). De acordo

com este autor, para atender ao cálculo de graus-dia para diversas localidades, deve-se usar o método residual, que consiste no somatório das diferenças entre a temperatura média diária e a temperatura mínima necessária para uma espécie.

A planta apresenta uma faixa com pontos extremos, inferior e superior de temperaturas, abaixo e acima das quais ela praticamente cessa o seu crescimento e desenvolvimento ou continua a taxas relativamente reduzidas. Esses valores são denominados de “temperaturas cardeais”. A complexidade fisiológica da planta impede a determinação precisa destas temperaturas. Contudo, é possível encontrar, na literatura, resultados de pesquisas com faixas de valores aproximados da espécie cultivada. Segundo Matiello (1991), as temperaturas ótimas para o crescimento do cafeeiro jovem (até o primeiro ano) são de cerca de 30°C durante o dia e 23°C à noite. À medida que a planta cresce, essas temperaturas diminuem e, após um ano e meio de idade, as temperaturas ideais, diurnas e noturnas, situam-se em torno de 23°C e 17°C. Segundo este autor, a máxima fotossíntese ocorre a uma temperatura de 24°C, havendo um decréscimo de 10% no processo, com o aumento de cada grau de temperatura acima.

Iaffe et al. (2001) determinaram a temperatura base inferior de 12,3°C e superior de 34°C para o subperíodo do florescimento à colheita, para o cafeeiro Mundo Novo na região de Botucatu, SP. Amaral (1991), analisando as taxas de crescimento do cafeeiro no período de baixas temperaturas, verificou que a transição do crescimento ativo para crescimento reduzido do cafeeiro ocorreu quando as temperaturas mínimas ficaram entre 13,5 e 14°C

Trabalhos como os de Sammis et al. (1985) têm demonstrado a grande utilidade do uso de graus-dia de desenvolvimento (GDD) para previsão das fases fenológicas, bem como zoneamento de culturas. Essa forma de “quantificar” as fases fenológicas da planta tem como característica o fato de que GDD independe da época e do local do plantio. Estes trabalhos de pesquisas têm

demonstrado uma maior adaptação do ciclo de algumas culturas ao GDD do que à quantidade de dias do calendário. Sammis et al. (1985) afirmam que um contador de tempo ou “relógio fisiológico” desenvolvido como base em GDD é menos variável do que a contagem por dias do calendário.

O aumento de temperatura acelera o desenvolvimento da planta, reduzindo o seu ciclo (Chandler, citado por Infeld e Silva, 1987). Com base nesse princípio ficavam explicadas as diferentes durações do ciclo de uma cultura, em dias, para cultivos em localidade com regimes de temperaturas diferentes. Para o acúmulo de graus-dia, um dos métodos utilizados é o descrito por Volpe (1992). Este método considera que uma planta necessita de uma certa quantidade de energia equivalente à soma de graus térmicos acima da temperatura basal, para completar determinadas fases fenológicas ou ciclo total (Ortolani et al., 1991).

Arnold (1959), citado por Bolonhezi (2000), propôs o Método da Menor Variabilidade para a determinação da temperatura base, realizando pesquisas com milho doce. Este método ainda é o mais utilizado e baseia-se em uma série de sementeiras e na atribuição, antes de instalar o ensaio, de alguns valores de temperatura base, a partir dos quais são calculados os somatórios de graus-dia, desvio padrão em graus-dia e desvio padrão em dias. Considerando-se a média de temperatura da série de cada sementeira, a temperatura base determinada será aquela que coincidir com o menor desvio padrão em dias, confirmado matematicamente pelo coeficiente de variação.

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Caracterização da área experimental**

O presente trabalho foi conduzido no setor de experimentos do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA). A área experimental está situada ao lado da estação meteorológica automática, pertencente à rede de plataforma de coleta de dados (PCD) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cujas coordenadas geográficas são 21° 14' de latitude Sul, 45° 00' longitude Oeste e altitude média de 918,841 metros.

O solo do experimento foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Típico (EMBRAPA, 1999).

### **3.2 Clima**

De acordo com a classificação de Köppem (Ometto, 1981), utilizando as normais climatológicas (Brasil, 1992), a região apresenta clima Cwa, ou seja, clima temperado, chuvoso, com inverno seco. A temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e superior a 3°C e a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C. Lavras apresenta umidade relativa do ar média de 76%, com uma precipitação média anual normal de 1.530 mm, bem como uma evaporação média normal anual de 1.034 mm (Brasil, 1992).

### **3.3 Caracterização física e química do solo**

Para a caracterização física e química do solo em estudo, foram coletadas amostras de solo em toda a área experimental, nas profundidades de 0-20cm e 20-40cm. Posteriormente, as amostras foram conduzidas ao

laboratório de análise de solos do Departamento de Ciência do Solo. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 Resultados da caracterização física e química do solo da área experimental\*. UFLA, Lavras, MG, 2004.

SIGLA	DESCRIÇÃO	UNIDADE	AMOSTRAS	
			0 a 20 cm	20 a 40 cm
ph	Em água (1:2.5)	–	6	6
P	Fósforo (Mehlich)	mg/dm <sup>3</sup>	11,5	4
K	Potássio	mg/dm <sup>3</sup>	78	69
Ca	Cálcio	Cmol/dm <sup>3</sup>	3,5	2,4
Mg	Magnésio	Cmol/dm <sup>3</sup>	1,2	0,8
Al	Alumínio	Cmol/dm <sup>3</sup>	0,1	0,1
H+Al	Ac. potencial	Cmol/dm <sup>3</sup>	2,1	2,1
SB	Soma bases	Cmol/dm <sup>3</sup>	4,9	3,4
(t)	CTC efetiva	Cmol/dm <sup>3</sup>	5	3,5
(T)	CTC a ph 7,0	Cmol/dm <sup>3</sup>	7	5,5
V	Sat. Bases	%	70	61,7
M	Sat. alumínio	%	2	3
Mo	Mat. orgânica	dag/kg	2,5	2,4
P-rem	Fósforo remanescente	mg/l	8,3	5,8
Zn	Zinco	mg/dm <sup>3</sup>	5,2	5,3
Fe	Ferro	mg/dm <sup>3</sup>	28,4	26,4
Mn	Manganês	mg/dm <sup>3</sup>	30,5	24
Cu	Cobre	mg/dm <sup>3</sup>	5,2	5,3
B	Boro	mg/dm <sup>3</sup>	0,2	0,2
S	Enxofre	mg/dm <sup>3</sup>	91,5	72
Areia	–	dag/kg	9	8
Silte	–	dag/kg	21	24
Argila	–	dag/kg	70	68
Textura	Classe textural	–	M. argilosa	M.argilosa

\* Realizadas no DCS/UFLA

### 3.4 Condução do experimento

O experimento foi implantado com duas cultivares do cafeeiro (*Coffea arabica* L.), a cultivar Rubi MG-1192 e a cultivar Acaiá Cerrado MG-1474, tendo o transplântio das mudas sido realizado no dia 19/04/03, quando estas apresentavam de 6 a 7 pares de folhas. O espaçamento utilizado foi o de 0,80 m entre plantas e de 3,5 m entre linhas de plantio, que tem sido o espaçamento mais utilizado nas lavouras mais novas, com as cultivares em estudo, na região.

O balanço hídrico no solo, bem como o acompanhamento do desenvolvimento vegetativo, foi realizado em parcela constituída de nove plantas para cada um dos dois cultivares estudados. Foram monitoradas quatro plantas (repetições) das nove plantas por parcela da cultivar Rubi e quatro plantas da cultivar Acaiá Cerrado. Porém, as análises de regressão foram feitas em três repetições.

O desenvolvimento vegetativo do cafeeiro foi monitorado durante o período de 06/06/03 a 25/03/04, totalizando aproximadamente 9 meses e meio. Já o balanço hídrico no solo teve início a partir de 06/08/04 a 24/03/04, com aproximadamente 8 meses de coleta de dados.

Foi instalado um sistema de irrigação localizada com linhas de tubo flexível de polietileno com gotejadores auto-compensados (5 a 35 m.c.a), apresentando vazão nominal de  $1,6 \text{ L h}^{-1}$  e emissores espaçados de 0,3 m, (Figura 1).



FIGURA 1 Sistema de irrigação por gotejamento instalado na área experimental. Lavras, MG, 2004.

### 3.5 Tratos culturais

As adubações de plantio e de manutenção foram realizadas em função dos resultados das análises de fertilidade do solo fornecidas pelo Laboratório de Fertilidade do Solo do Departamento de Ciências do Solo da UFLA (Tabela 1). A adubação de plantio foi feita com a aplicação de 100 g/planta de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), 100 g/planta de super simples e, uma semana após o transplante, foram aplicados 10 g/planta da formulação 20-05-20 (NPK). A adubação de manutenção foi parcelada em três vezes, também com 10 g/planta da formulação 20-05-20 em cada aplicação.

Foram realizadas capinas periódicas e sucessivas com o intuito de manter o experimento sempre limpo, evitando a competição com ervas daninhas.

O controle fitossanitário, assim como os demais tratamentos culturais, foi realizado na medida em que houve necessidade.

### **3.6 Retenção de água no solo**

As curvas de retenção de água no solo foram construídas a partir de medidas experimentais e representadas graficamente por equações empíricas.

Para a confecção das curvas foram coletadas amostras (repetições) deformadas e indeformadas nas camadas de 0-0,2 m; 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m de profundidade. Posteriormente, as amostras foram conduzidas ao Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Lavras, para a realização das análises. As amostras indeformadas foram saturadas por 24 horas e após esse processo foram colocadas em funis de placa porosa, de maneira a se estabelecer o total contato com a placa. Foram aplicadas, em seguida, as tensões de 2; 4; 6; 8 e 10 kPa.

As amostras deformadas foram acondicionadas em cilindros de PVC e saturadas sobre a placa de cerâmica da câmara extratora. Em seguida, foram submetidas às seguintes pressões: 33; 100; 500 e 1500 kPa.

Com os valores das umidades associados às suas respectivas tensões foram obtidos os ajustes conforme os parâmetros empíricos da equação proposta por Van Genuchten (1980), Equação 1, utilizando o programa computacional SWRC desenvolvido por Dourado Neto et al. (1990). Na Tabela 2 estão apresentadas as equações ajustadas e a densidade aparente para as três camadas em estudo.

$$\theta[\Psi_m] = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha \cdot \Psi_m)^n\right]^m} \dots\dots\dots(1)$$

em que:

$\theta[\Psi_m]$ : umidade do solo em função do potencial matricial ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_s$ : umidade de saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_r$ : umidade residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\Psi_m$ : tensão ou potencial matricial (kPa);

$\alpha$ : parâmetro de ajuste ( $\text{cm}^{-1}$ );

m e n : parâmetros de ajuste da equação, adimensionais.

TABELA 2 Equações de Van Genuchten ajustadas com a densidade aparente para as três camadas do solo em estudo. Lavras, MG, 2004.

Camada (cm)	Equações ajustadas	Densidade aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
0-20	$\theta = 0,22 + \frac{0,438}{\left[1 + \left 1,5104 \times \varphi m\right ^{1,5799}\right]^{0,367}}$	0,91
20-40	$\theta = 0,241 + \frac{0,409}{\left[1 + \left 1,1303 \times \varphi m\right ^{1,5137}\right]^{0,3394}}$	0,93
40-60	$\theta = 0,238 + \frac{0,423}{\left[1 + \left 1,1340 \times \varphi m\right ^{1,6297}\right]^{0,3864}}$	0,90

### 3.7 Manejo da irrigação

O momento da irrigação foi determinado com base na tensão de água no solo, indicada por sensores “watermark” e pelo modelo  $\theta(\psi)$  proposto por Van Genuchten (1980). Na planta central da parcela foram instalados 7 sensores (Figura 2), dos quais 4 eram para o manejo da irrigação, espaçados de 0,2 m entre si e distanciados de 0,2 m em relação à planta. As profundidades consideradas foram de 0,05 m; 0,15 m; 0,25 m e 0,35 m, tanto na área com Acaiá Cerrado como na área com o Rubi.

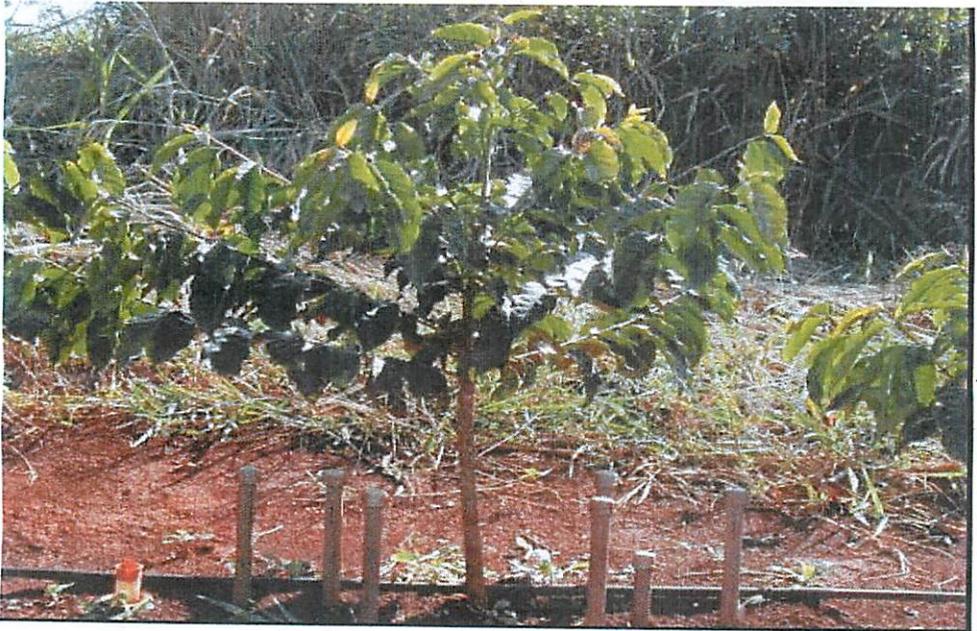


FIGURA 2 - Indicadores do teor de água no solo instalados junto à planta central. Lavras, MG, 2004.

O manejo da irrigação foi feito de forma a repor a lâmina correspondente à variação do armazenamento de água entre as tensões de 10 kPa e 20 kPa, indicadas pelos sensores de tensão instalados no solo e pelo modelo de

van Genuchten (1980) (Equação 1). A lâmina de irrigação foi determinada considerando o perfil de 0,40 m de profundidade.

A partir dos valores de umidade no momento da irrigação, do valor da capacidade de campo fornecido pela curva de retenção, além da espessura da camada de solo considerada para o balanço, foram calculadas as lâminas de reposição (Equações 2, 3 e 6) e, finalmente, o tempo de funcionamento do sistema de irrigação (Equação 7), de acordo com Cabello (1996). Considerou-se, para cálculo da lâmina de irrigação, as camadas de 0-0,2 m e de 0,2-0,4 m com suas respectivas curvas de retenção de água.

$$LL = (\theta_{cc} - \theta_{atual}) \cdot z \cdot Pw \dots\dots\dots(2)$$

em que:

LL : lâmina líquida de irrigação em cada parcela (mm);

$\theta_{cc}$  : umidade na capacidade de campo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_{atual}$  : umidade no momento de irrigar ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

Z : profundidade do sistema radicular (mm)

Pw: fração de área molhada (%)

$$LB = \frac{LL}{(1 - k) \cdot CU} \dots\dots\dots(3)$$

em que :

LB : lâmina bruta de irrigação (mm);

CU : coeficiente de uniformidade do sistema de irrigação;

k : constante que leva em conta a salinização do solo bem como a eficiência de aplicação do sistema. É determinada encontrando-se o maior valor nas equações 4 e 5 seguintes:

$$k = 1 - Ea \dots\dots\dots (4)$$

$$k = LR = \frac{CEi}{(2 \cdot CEe)} \dots\dots\dots (5)$$

em que:

Ea : eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação considerada como 90%;

LR : lâmina necessária para lavagem do solo, caso tenha problemas com salinidade (mm);

CEi : condutividade elétrica da água de irrigação (dS m<sup>-1</sup>);

CEe : condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (dS m<sup>-1</sup>);

$$LBm\u00e9dia = LBm\u00e9dia_{0-20cm} + LBm\u00e9dia_{20-40cm} \dots\dots\dots (6)$$

LBm\u00e9dia : soma das lâminas brutas m\u00e9dias obtidas de 0-40 cm;

LBm\u00e9dia<sub>0-20cm</sub> : lâmina bruta m\u00e9dia de 0-20 cm;

LBm\u00e9dia<sub>20-40cm</sub> : lâmina bruta m\u00e9dia de 20-40 cm.

$$T = \frac{LBm\u00e9dia \cdot Sp}{e \cdot qa} \dots\dots\dots (7)$$

em que:

T : tempo de funcionamento do sistema de irrigação (h);

Sp : \u00e1rea ocupada por planta (m<sup>2</sup>);

e : n\u00famero de emissores por planta;

qa : vaz\u00e3o m\u00e9dia dos emissores (L h<sup>-1</sup>).

Foram realizados testes para a determina\u00e7\u00e3o do coeficiente de uniformidade de distribui\u00e7\u00e3o de \u00e1gua (CU) do sistema de irriga\u00e7\u00e3o. Para isso foi

adaptado o procedimento recomendado por Merriam e Keller (1978), citados por Cabello (1996), em que se escolhe uma subunidade e nela se selecionam quatro laterais. Em cada lateral são medidas as vazões do primeiro gotejador, do gotejador situado a 1/3 do início, do situado a 2/3 e do último. Foram coletadas vazões desses emissores e, a partir da Equação 8, foi calculado o coeficiente de uniformidade.

$$CU = \left( \frac{q_{25}}{qa} \right) \cdot 100 \dots\dots\dots(8)$$

em que:

CU : coeficiente de uniformidade de distribuição (%);

$q_{25}$  : média das 25% menores vazões coletadas ( $L h^{-1}$ );

$qa$  : média das vazões coletadas ( $L h^{-1}$ ).

### 3.8 Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ )

Foram coletados dados diários de variáveis meteorológicas, como temperatura do ar, umidade relativa (UR), pressão atmosférica, velocidade do vento, precipitação e radiação solar incidente ( $R_s$ ), que deram subsídios ao cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), pelo Método Penman-Monteith padronizado pela FAO. Os dados foram registrados pela estação meteorológica automática localizada próxima ao experimento (Figura 3) e estão disponíveis na página do INPE na internet, no endereço ([www4.cptec.inpe.br/pcd.htm](http://www4.cptec.inpe.br/pcd.htm)).



FIGURA 3 Estação meteorológica automática pertencente à rede de plataforma de coleta de dados do INPE, Lavras, MG , 2004.

O cálculo da  $ET_0$  foi realizado na escala diária, de acordo com a metodologia de Penman-Monteith parametrizada pela FAO, (Pereira et al., 1997), Equação 9.

$$ET_o = \frac{S}{S + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{(S + \gamma^*)} \frac{900}{(T + 275)} U_2 (e_s - s_a) \dots\dots(9)$$

em que :

- ET<sub>o</sub>: evapotranspiração de referência (mm d<sup>-1</sup>);
- S: declividade da curva de pressão de vapor ( kPa °C );
- γ<sup>\*</sup>: constante psicrométrica modificada ( kPa °C );
- R<sub>n</sub>: saldo de radiação (MJm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);
- G: fluxo de calor no solo, desprezível na escala diária ;
- λ : calor latente de evaporação (MJK g<sup>-1</sup>);
- γ: coeficiente psicrométrico ( kPa °C );
- T: temperatura média do dia (°C);
- U<sub>2</sub>: velocidade do vento a 2m (ms<sup>-1</sup>);
- e<sub>s</sub>: pressão de saturação do vapor d'água (kPa);
- e<sub>a</sub>: pressão parcial do vapor (kPa)

### 3.9 Balanço hídrico do solo

O balanço hídrico no solo para uma determinada cultura pode ser representado pela seguinte equação:

$$\int_{t_i}^{t_f} (p + i - et \pm d \pm r) dt = \int_{t_i}^{t_f} \int_b^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dZ dt \dots\dots\dots(10)$$

A Equação 10 pode ser escrita de forma mais simplificada, integrando-se com relação ao tempo e à profundidade.

$$P + I - ET \pm D \pm R = \pm \Delta A \dots\dots\dots(11)$$

em que:

P: precipitação pluviométrica efetiva (mm);

I: irrigação (mm);

ET: evapotranspiração da cultura (mm);

R: deflúvio superficial (mm);

D: drenagem interna (mm);

$\Delta A$  : variação do armazenamento (mm).

### **3.9.1 Precipitação**

A precipitação ocorrida no intervalo considerado para o balanço hídrico foi obtida por meio de dados obtidos pela plataforma de coleta de dados instalada junto à área experimental.

### **3.9.2 Irrigação**

O manejo das irrigações foi feito com base na metodologia apresentada por Cabello (1996), descrita no item 3.7.

### **3.9.3 Drenagem interna**

A saída (drenagem) ou entrada de água (ascensão) na camada de solo em estudo foi obtida com uso da equação expressa por Reichardt (1985) como,

$$D = \int_{t_i}^{t_f} q_z \cdot dt \dots\dots\dots(12)$$

em que  $q_z$  é a densidade de fluxo calculada usando a equação de Darcy-Buckingham, modificada por Richards (1928)

$$q_z = -K(\theta) \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial z} \dots\dots\dots(13)$$

em que:

$q_x$ : densidade de fluxo (mm d<sup>-1</sup>);

$K(\theta)$ : condutividade hidráulica como função da umidade do solo (mm d<sup>-1</sup>);

$\partial \Psi / \partial z$ : gradiente de potencial total na profundidade considerada (adimensional);

Valores negativos de q representam fluxo descendente de água no limite da camada de controle. Por outro lado, valores positivos de q representam a entrada de água vinda da camada abaixo da profundidade de controle.

### 3.9.4 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica como função do teor de água no solo não saturado foi determinada pela metodologia de Mualem (1976). A adoção dessa metodologia se deve ao fato de outras metodologias para determinação da condutividade hidráulica em campo terem como limite inferior a capacidade de campo e na prática, na maioria das vezes, se trabalha com valores de umidades inferiores à capacidade de campo.

$$K(\theta) = K_0 \times w^L \left[ 1 - \left( 1 - w^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \dots\dots\dots(14)$$

em que:

$K_0$ : condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{mm d}^{-1}$ );

$L$  : parâmetro empírico, sendo aproximadamente 0,5 para maioria dos solos;

$m$ : parâmetro de ajuste da equação (adimensionais).

$$w = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \dots\dots\dots(14.1)$$

em que:

$\theta$  = umidade atual do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_r$  = umidade residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ).

$\theta_s$  = umidade de saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

### 3.9.5 Escoamento superficial

O escoamento superficial deve ser medido por meio de técnicas e estruturas apropriadas. Dependendo da inclinação do terreno, pode-se somar às entradas ou às saídas de água, porém, devido às suas características de grandeza e volume, medidas diretas se tornam difíceis (Rose, 1966).

Neste trabalho o balanço hídrico do solo foi feito diariamente, disponibilizando assim uma elevada quantidade de dados. Em função desse número elevado de informações e da dificuldade em se determinar o escoamento

superficial, optou-se por não realizar o balanço hídrico em dias em que houve precipitação.

### 3.9.6 Variação do armazenamento

A variação de armazenamento ( $\Delta A$ ) foi obtida, de acordo com Libardi (1999), pela (Equação 15). As leituras de umidade do solo foram feitas diariamente utilizando-se o "Profile Probe", equipamento que fornecia o teor de água no solo nas seguintes profundidades: 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 60 cm e 100 cm.

$$\Delta A = \int_0^z \int_{T1}^{T2} \frac{\partial \theta}{\partial t} dt dZ \dots\dots\dots(15)$$

em que:

$\Delta A$  : variação do armazenamento (mm);

$z$  : profundidade (mm);

$T2$ : tempo no final (dia);

$T1$ : tempo no início (dia);

$\theta$ : umidade base volume ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )

### 3.9.7 Evapotranspiração da cultura

A evapotranspiração da cultura foi determinada a partir da equação geral do balanço hídrico (Equação 11). Conhecendo-se todos os demais termos daquela equação, foi possível determinar o consumo hídrico da planta.

$$ET = P + I \pm D \pm R - \Delta A \dots\dots\dots(16)$$

- ET: evapotranspiração da cultura (mm);
- P: precipitação pluviométrica efetiva (mm);
- I: irrigação (mm);
- R: deflúvio superficial (mm);
- D: drenagem Interna (mm);
- $\Delta A$  variação do armazenamento (mm).

Para efeito de balanço hídrico, em solos cultivados, necessita-se que a profundidade considerada para o volume de controle corresponda à profundidade efetiva do sistema radicular (Libardi, 1999). O esquema do elemento de volume de solo em estudo está representado pela Figura 4. No caso em questão, Z corresponde a 55 cm.

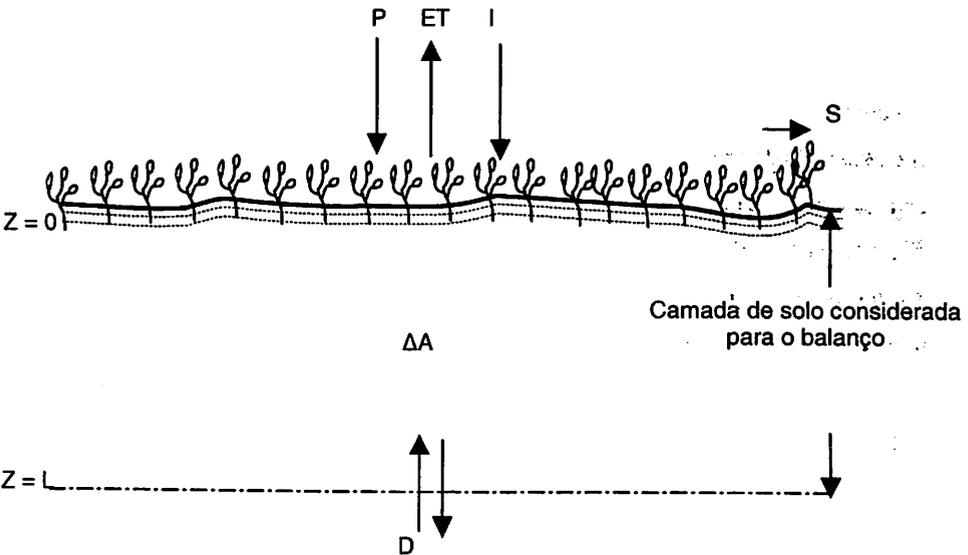


FIGURA 04 Esquema do elemento de volume de solo considerado para o balanço hídrico sob condições de campo. Lavras, MG , 2004.

### 3.10 Coeficiente de cultura (K<sub>C</sub>)

De posse dos valores da evapotranspiração de referência (ET<sub>O</sub>), pôde-se determinar o coeficiente da cultura (K<sub>C</sub>), de acordo com a sua definição, pela equação:

$$K_C = \frac{ET}{ET_o} \dots\dots\dots(17)$$

em que:

K<sub>C</sub>: coeficiente de cultura;

ET: evapotranspiração da cultura (mm d<sup>-1</sup>);

ET<sub>O</sub>: evapotranspiração de referência (mm d<sup>-1</sup>);

### 3.11 Graus-dia

Adotou-se, para o cálculo dos graus-dia, o procedimento apresentado por Ometto (1981). Esse procedimento leva em consideração cinco situações possíveis de acontecerem (Equações 18, 19, 20, 21 e 22). Adotaram-se os valores de temperatura base, inferior (T<sub>b</sub>) e superior (T<sub>B</sub>), baseados em Iaffe et al.(2001) e Amaral (1991). Embasado nesses resultados foram adotadas neste trabalho a temperatura basal inferior da planta (T<sub>b</sub>) igual a 13°C e a temperatura basal superior igual a 34°C. Os graus-dia foram computados a partir do transplântio em 19/04/2003.



✓ 1º caso: se  $T_b < T_m$  e  $TB > TM$

$$GD = \left( \frac{TM - T_m}{2} \right) + (T_m - T_b) \dots \dots \dots (18)$$

✓ 2º caso: se  $T_b > T_m$  e  $TB > TM$

$$GD = \frac{(TM - T_b)^2}{2(TM - T_m)} \dots \dots \dots (19)$$

✓ 3º caso : se  $(T_b \text{ e } TB) > (T_m \text{ e } TM)$

$$GD = 0 \dots \dots \dots (20)$$

✓ 4º caso : se  $T_b < T_m$  e  $TB < TM$

$$GD = \frac{2(TM - T_m)(T_m - T_b) + (TM - T_m)^2 - (TM - TB)^2}{2(TM - T_m)} \dots \dots \dots (21)$$

✓ 5º caso : se  $T_b > T_m$  e  $T_B < T_M$

$$GD = \frac{1}{2} \left[ \frac{(T_M - T_b)^2 - (T_M - T_B)^2}{T_M - T_m} \right] \dots\dots\dots(22)$$

em que:

GD: graus-dia (°C);

T<sub>b</sub>: temperatura base inferior da planta (°C);

T<sub>B</sub>: temperatura base superior da planta (°C);

T<sub>m</sub>: temperatura mínima do ar (°C);

T<sub>M</sub>: temperatura máxima do ar (°C).

### 3.12 Desenvolvimento vegetativo

O cafeeiro foi transplantado em 19/04/03, tendo o início das avaliações ocorrido em 06/06/03. As avaliações foram feitas a partir de medidas freqüentes e sucessivas, com as primeiras avaliações realizadas num período mensal, devido às reduzidas taxas de crescimento em função das baixas temperaturas. A partir de 26/09/03, com a aceleração do desenvolvimento vegetativo das plantas, associada à elevação das temperaturas, os intervalos entre as medições reduziram para 15 dias. Foram feitas as medições nas quatro plantas centrais das parcelas analisadas, tanto para o cafeeiro Rubi como para o Acaia Cerrado, com as seguintes variáveis analisadas:

. **altura da planta:** as medidas dessa variável foram realizadas com auxílio de uma trena, tomando-se desde a superfície do solo até o ápice da planta;

. **diâmetro de caule:** as medições de diâmetro de caule foram feitas com um paquímetro, tomando-se o cuidado de sempre coletar os dados no mesmo ponto de medição. As medidas foram feitas à altura do terceiro internódio do ramo ortotrópico;

. **diâmetro de copa:** iniciou-se a coleta de dados desta variável a partir do momento em que a planta apresentava uma copa bem definida. As medidas foram feitas também com auxílio de uma trena, no sentido transversal à linha de plantio;

. **comprimento do ramo plagiotrópico:** as medidas tiveram início a partir da emissão do primeiro par de ramos plagiotrópicos, sendo monitorado apenas um ramo. Para isso utilizou-se também uma trena.

### **3.13 Análise dos dados**

A interpretação estatística dos dados observados em campo foi feita por meio de análise de regressão, utilizando uma planilha eletrônica (Excel).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Elementos meteorológicos

Na Figura 5 estão apresentados os comportamentos das variáveis meteorológicas ao longo de todo o período em que se procedeu a condução do experimento. Pode-se observar que os menores e maiores valores das temperaturas mínimas e máximas foram, respectivamente, 4,5°C e 19,3°C, 18°C e 35,5°C. Tendo 13°C sido o valor adotado para a temperatura basal inferior, verificou-se que o período de maio a setembro de 2003 coincidiu com as maiores ocorrências em que a temperatura mínima do ar ficou abaixo da temperatura base inferior da planta, o que concorreu para a queda na atividade fisiológica da cultura. De outubro de 2003 a março 2004, as temperaturas mínimas do ar apresentaram elevação, permanecendo acima da temperatura base inferior da planta, o que mostra a plena atividade fisiológica neste período.

Em toda a fase de realização do experimento as temperaturas máximas do ar ficaram abaixo da temperatura basal superior da planta, exceto em três dias de setembro e três dias do mês de outubro de 2003.

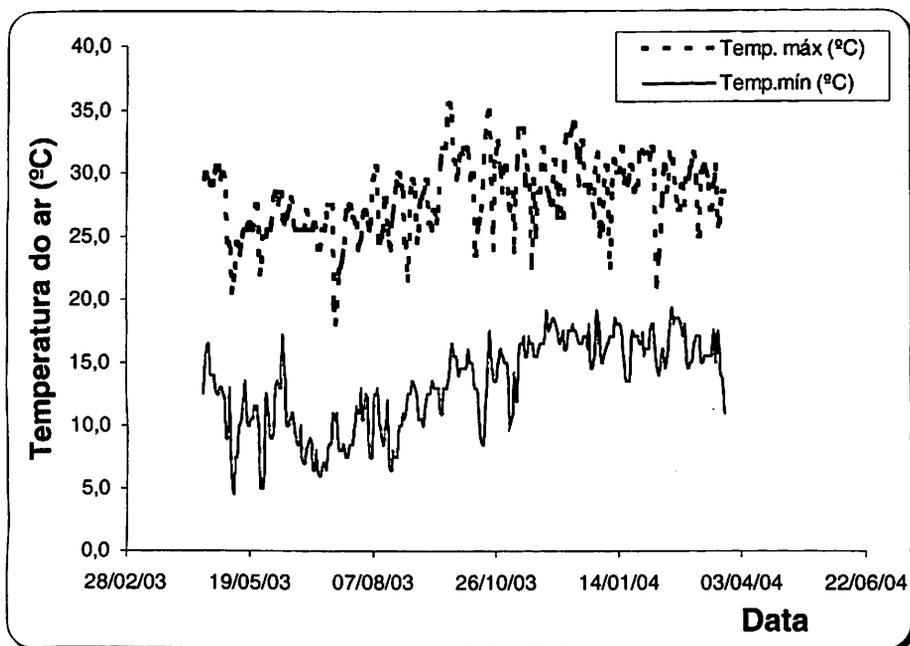


FIGURA 05 Temperaturas mínimas e máximas ar durante o acompanhamento experimental. Lavras, MG, 2004.

#### 4.2 Curva de retenção de água no solo

Determinou-se a curva de retenção de água no solo neste trabalho para as camadas 0-0,2 m, 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m, conforme mostra a Figura 6. Nota-se um bom ajuste dos dados experimentais ao modelo de Mualem-Van Genuchten, confirmado pelos valores dos coeficientes de determinação das curvas, incluídos na Tabela 3, iguais ou superiores a 0,98.

As curvas de retenção de água permitem visualizar melhor a grande semelhança hidráulica das camadas, evidenciando os valores de capacidade de campo (-10 kPa) que são bem próximos.

**TABELA 3** Parâmetros de ajuste da curva de retenção ao modelo proposto por Genuchten (1980), com potencial matricial em kPa e teor de água em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ . Lavras, MG, 2004.

Parâmetros	Camada (cm)		
	0 – 20	20 – 40	40 - 60
$\theta_s$	0,658	0,650	0,661
$\theta_r$	0,22	0,241	0,238
$\alpha$	1,5104	1,1303	1,1340
m	0,3670	0,3394	0,3864
n	1,5799	1,5137	1,6297
$r^2$	0,98	0,99	0,99

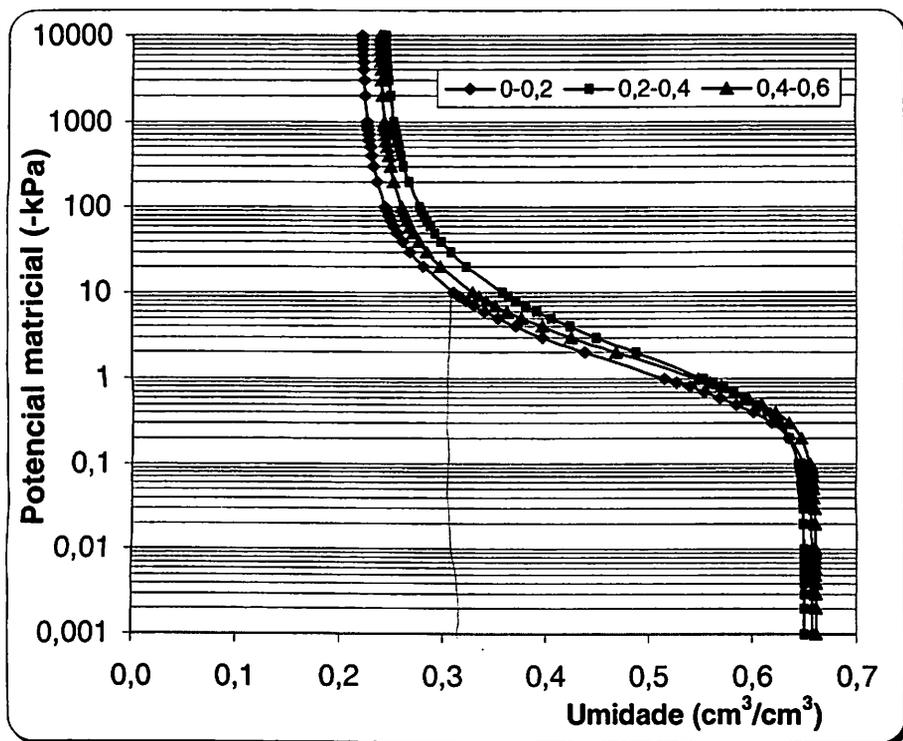


FIGURA 06 Curvas de retenção de água no solo para as três camadas estudadas do Latossolo Vermelho Distrófico Típico. Lavras, MG, 2004.

### 4.3 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi feito de forma a repor o déficit hídrico entre a umidade da capacidade de campo e a umidade do solo equivalente a um potencial matricial variável entre -10 e -20 kPa. Considerou-se que, nessa faixa, o teor de água no solo não restringe a capacidade potencial de absorção de água pelo cafeeiro, por ser uma faixa muito próxima à capacidade de campo.

O comportamento do potencial matricial ao longo do período de análises, para o cafeeiro Rubi está apresentado na Figura 7. Pode-se observar que, em quase todo o período de estudo, o potencial matricial ficou compreendido entre -10 e -20 kPa. Em algumas datas, o potencial ficou acima de -10 kPa, em função da ocorrência de precipitações com lâminas superiores àquela necessária para levar o solo à capacidade de campo ou por períodos prolongados de chuva. Houve também poucas situações em que o potencial ficou abaixo de -20 kPa. Este fato pode estar relacionado a intervalo longo entre duas irrigações consecutivas ou a uma rápida redistribuição de água no perfil do solo que, ao sair da camada de estudo, provocou uma sensível redução do potencial matricial.

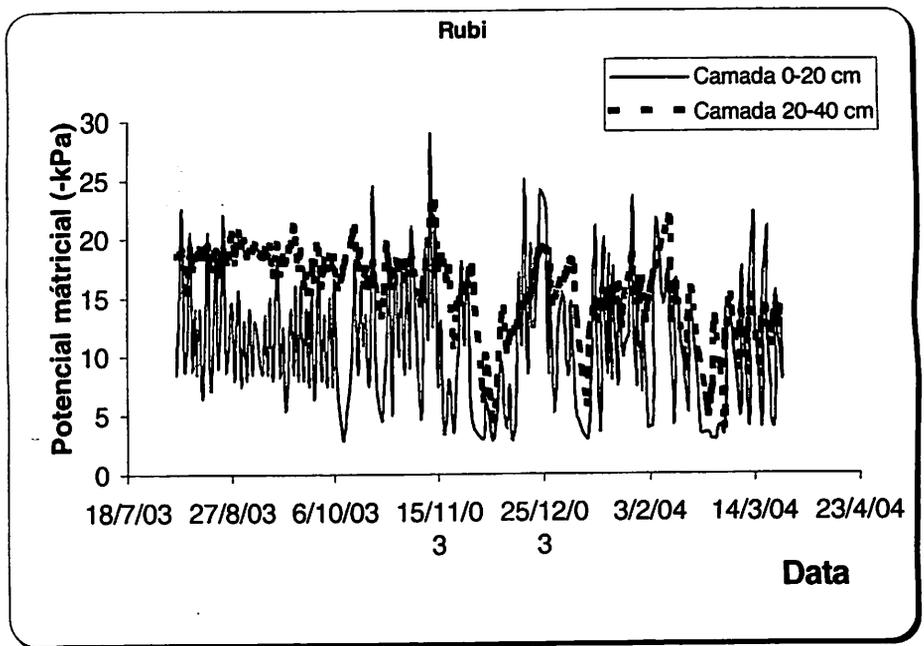


FIGURA 07 Comportamento do potencial matricial durante o período de monitoramento do cafeeiro Rubi . Lavras, MG, 2004.

Pela Figura 8 pode ser observado que o objetivo de manter o potencial matricial entre -10 e -20 kPa para o cafeeiro Acaia Cerrado também foi atingido em quase todo o período de irrigação. Observam-se duas situações distintas: a primeira compreendida entre agosto e outubro de 2003, quando verificou-se que os valores de potencial matricial na camada de 0-20 cm estiveram melhor distribuídos entre -10 e -20 kPa e a segunda, compreendida entre outubro de 2003 e março de 2004, quando o potencial matricial nesta camada se manifestou, em alguns pontos, acima de -10 kPa refletindo o período das chuvas.

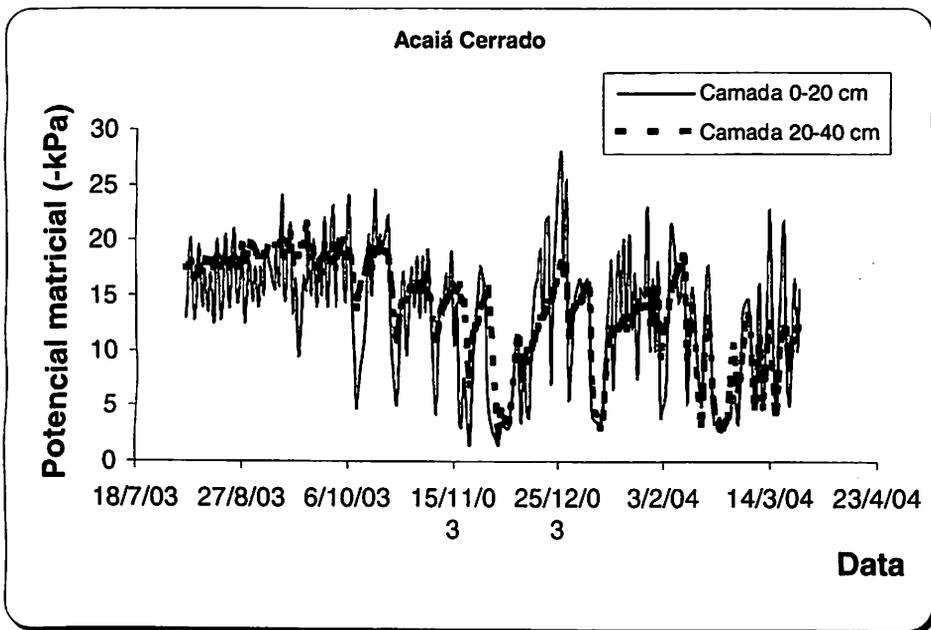


FIGURA 08 Comportamento do potencial matricial durante o período de monitoramento do cafeeiro Acaia Cerrado. Lavras, MG, 2004.

Pode-se afirmar que o objetivo de manter o potencial matricial entre -10 e -20 kPa na área cultivada com as duas variedades foi atingido em quase

todo período de irrigação. Este fato demonstra que o manejo de irrigação proposto manteve o solo próximo às condições ideais de umidade nas duas áreas em praticamente todo tempo de coleta de dados, justificando assim o sucesso das irrigações.

#### **4.3.1 Uniformidade da irrigação**

Os gotejadores utilizados na irrigação trabalham com uma faixa de compensação de vazão para uma variação na pressão de operação de 5 a 35 mca. Em função disso e devido às necessidades hidráulicas do sistema, trabalhou-se com uma pressão na saída da motobomba de 24 m.c.a., que garantiu, em toda a área, a pressão correta de funcionamento dos gotejadores

Realizou-se o teste de uniformidade conforme metodologia apresentada no item 3.7. A vazão média encontrada foi de 1,67 L h<sup>-1</sup>, valor ligeiramente superior ao fornecido pelo fabricante. O coeficiente de uniformidade de distribuição encontrado para os emissores foi de 0,94 ou 94%, indicando assim uma excelente uniformidade de distribuição de água.

#### **4.4 Desenvolvimento vegetativo**

Ao longo do período experimental foram feitas 16 avaliações das variáveis vegetativas (altura das plantas, diâmetro de caule, diâmetro de copa e comprimento de ramo plagiotrópico).

##### **4.4.1 Altura das plantas**

A variável altura das plantas, para o cafeeiro Rubi, apresentou uma estreita relação com os graus-dia acumulados ou graus-dia de desenvolvimento

(GDD), como pode ser observado na Figura 9. Aos dados de campo foi ajustada uma equação do tipo exponencial, com um elevado coeficiente de determinação ( $r^2 = 0.94$ ), demonstrando uma boa relação entre o crescimento da planta com os graus-dia de desenvolvimento.

Fazendo-se uma análise da variável altura de plantas, tende-se a concordar com a afirmativa de Sammis et al. (1985) de que um contador de tempo ou “relógio fisiológico” desenvolvido como base em GDD é menos variável do que a contagem por dias do calendário, embora ainda não se tenham estudos fazendo esta comparação para a cafeicultura .

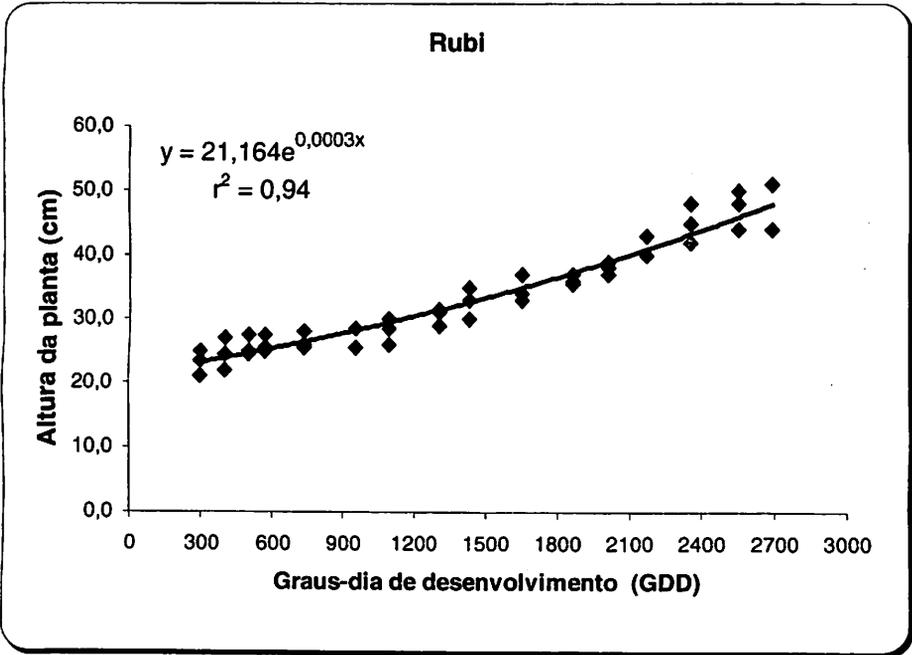


FIGURA 09 Altura da planta associada a graus-dia de desenvolvimento para o cafeeiro Rubi. Lavras, MG, 2004.

A Figura 10 apresenta a relação de altura da planta com GDD para o cafeeiro Acaia Cerrado. Nota-se que, também para o Acaia Cerrado, a variável altura da planta está intimamente correlacionada com as unidades térmicas de calor. O coeficiente de determinação para a cultivar Acaia Cerrado, assim como para a cultivar Rubi, apresentou elevado valor ( $r^2 = 0,94$ ).

A altura média das plantas na primeira avaliação era de 28,9 cm para um GDD de  $298^{\circ}\text{C}$  e, na última avaliação, com GDD de  $2.689^{\circ}\text{C}$ , a cultura apresentava uma altura média de 72,8 cm.

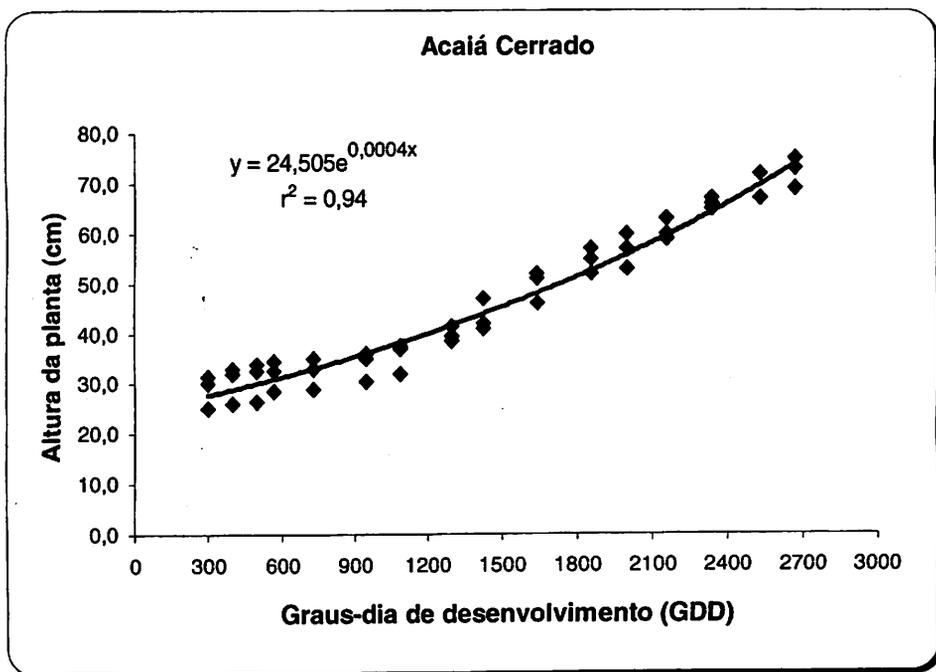


FIGURA 10 Altura da planta associada a graus-dia de desenvolvimento para o cafeeiro Acaia Cerrado. Lavras, MG, 2004.

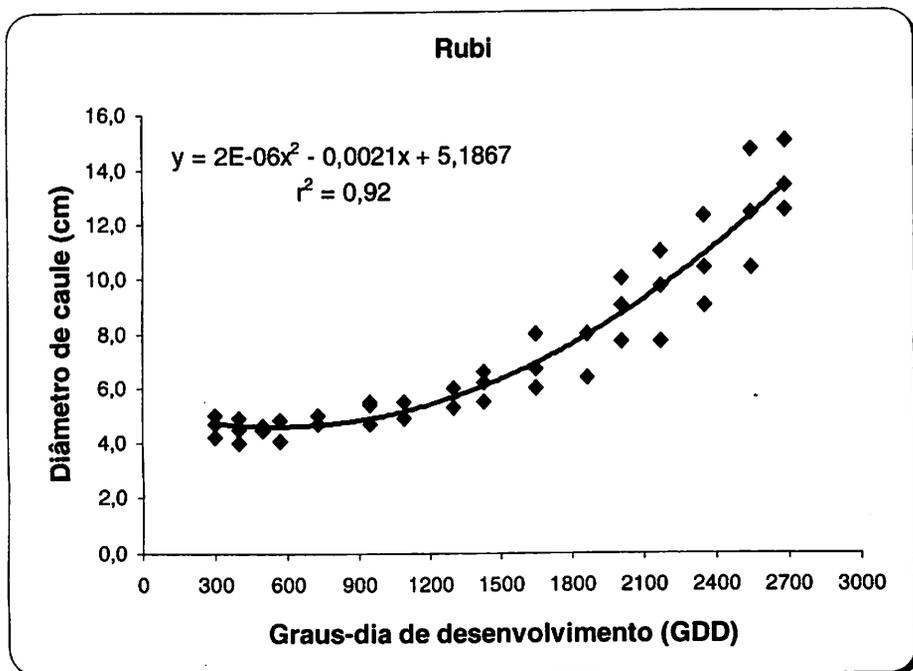


FIGURA 11 Diâmetro de caule associado a graus-dia de desenvolvimento para o cafeeiro Rubi. Lavras, MG, 2004.

Na Figura 12 tem-se a representação da regressão polinomial para o Acaia Cerrado, em que o polinômio de segundo grau também foi o que indicou o melhor ajuste aos pontos mensurados. Verifica-se um excelente ajuste aos dados cujo coeficiente de determinação é ( $r^2 = 0,99$ ), indicando que a equação gerada estima com excelente precisão o desenvolvimento do diâmetro de caule. Ao contrário do que foi observado no cafeeiro Rubi, os valores de diâmetro de caule são mais uniformes quando associados ao acúmulo de graus-dia, o que pode ser observado pelo valor de  $r^2$ .

No início das avaliações, a cultivar Rubi apresentava uma altura média de 20,8 cm, enquanto a 'Acaiá Cerrado' tinha um porte médio de 28,9 cm para 298 GDD, no entanto, ao final do período experimental, quando haviam sido acumulados 2689 graus-dia, o cafeeiro Rubi apresentava uma altura média de 47,0 cm enquanto o Acaiá Cerrado tinha 72,8 cm. O Acaiá Cerrado apresenta como características um porte mais elevado em relação ao Rubi.

As equações mostradas nas Figuras 9 e 10 descrevem com boa precisão o comportamento da altura das plantas para as duas variedades analisadas, porém, é conveniente ressaltar que as equações foram geradas dentro do intervalo de graus-dia estudado. Portanto, a sua utilização deve, preferencialmente, limitar-se aos respectivos intervalos.

#### **4.4.2 Diâmetro de caule**

O aumento do diâmetro de caule associado aos graus-dia de desenvolvimento (GDD), para o cafeeiro Rubi pode ser observado na Figura 11. Para esta variável, a análise de regressão indicou um polinômio de segundo grau como a equação que melhor descreve este comportamento. O coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,92$ ) para esta variável analisada demonstrou um bom ajuste dos dados mensurados em campo aos graus-dia de desenvolvimento. Estes resultados permitem evidenciar que a equação gerada estima com boa precisão os valores de diâmetro de caule para o GDD, dentro do período analisado.

No entanto, verifica-se que, a partir de 1600 GDD, os valores de diâmetro de caule tendem a um pequeno aumento na dispersão dos pontos, associado ao acúmulo de graus-dia, o que, provavelmente, não afetará os resultados obtidos.

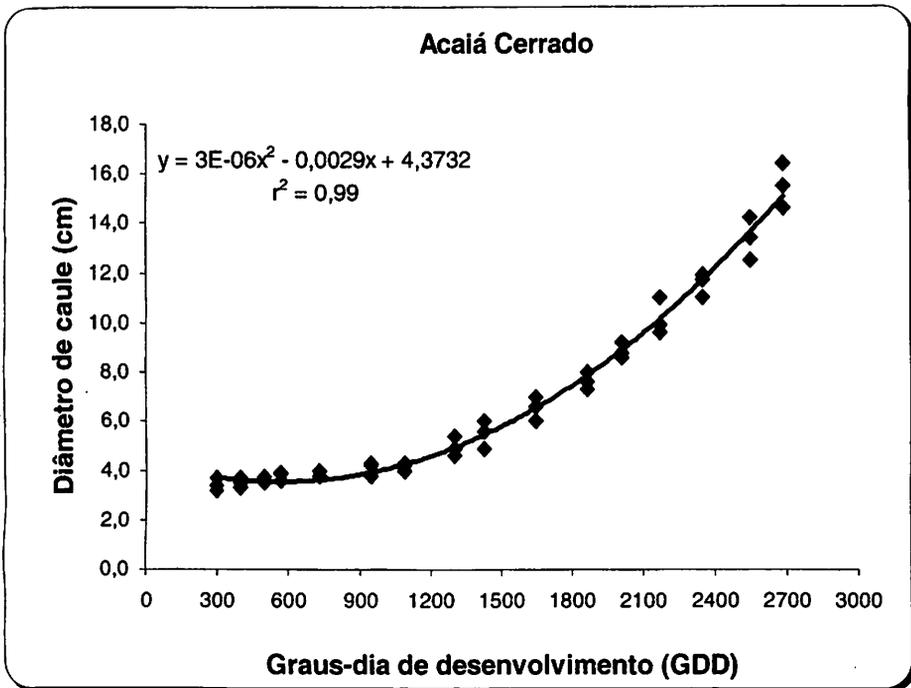


FIGURA 12 Diâmetro de caule associado a graus-dia de desenvolvimento para o cafeeiro Acaíá Cerrado. Lavras, MG, 2004.

Em 06/06/03 iniciaram-se as avaliações da variável diâmetro de caule para as duas culturas. Nesta data haviam sido acumulados 298 graus-dia para a cultivar Rubi, apresentando um diâmetro médio de 4,3 cm, valor superior ao do Acaíá Cerrado que era de 3,4 cm. À medida que foram sendo acumuladas as unidades térmicas de calor, o Acaíá Cerrado demonstrou um maior desenvolvimento desta variável analisada. Ao final do período para 2689 GDD, a cultivar Rubi apresentava 12,7 cm, ao passo que a 'Acaíá Cerrado' apresentava o diâmetro médio de caule de 14,6 cm.

O comportamento do diâmetro de caule, tanto para a cultivar Rubi como para a cultivar Acaíá Cerrado, foi bastante semelhante e apresentou uma boa

relação com os graus-dia acumulados. Os resultados obtidos demonstram que o acompanhamento dessa variável associado a graus-dia de desenvolvimento pode ser feito com excelente precisão. Ometto (1981) já comentava ser possível analisar o crescimento e prever os estádios fenológicos das culturas por meio dos graus-dia.

#### **4.4.3 Diâmetro de copa**

Para a variável diâmetro de copa da cultivar Rubi, em função dos graus-dia de desenvolvimento, utilizou-se a análise de regressão na qual uma equação do tipo exponencial foi a que melhor representou os dados observados em campo, como pode ser verificado na Figura 13. Para esta variável, as medições em campo tiveram início somente a partir de 730 GDD, quando a cultura já apresentava uma copa bem definida. Nota-se que, a partir de 1429 GDD, houve uma maior dispersão dos dados, no entanto, obteve-se ainda um bom ajuste, com o coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,88$ ). Na primeira avaliação, a cultura apresentava um valor médio 9,9cm de diâmetro de copa para um somatório de 730 graus-dia, sendo que na última medição o valor do diâmetro de copa era, em média, de 51,8 cm para 2689 GDD.

Diante dos resultados obtidos pode-se considerar que a equação gerada para o acompanhamento do diâmetro de copa da cultivar Rubi não possui elevado coeficiente como as anteriores, porém, estima com boa segurança o comportamento dessa variável. É necessário reforçar que esta equação é válida para a faixa de graus-dia em que o estudo foi conduzido.

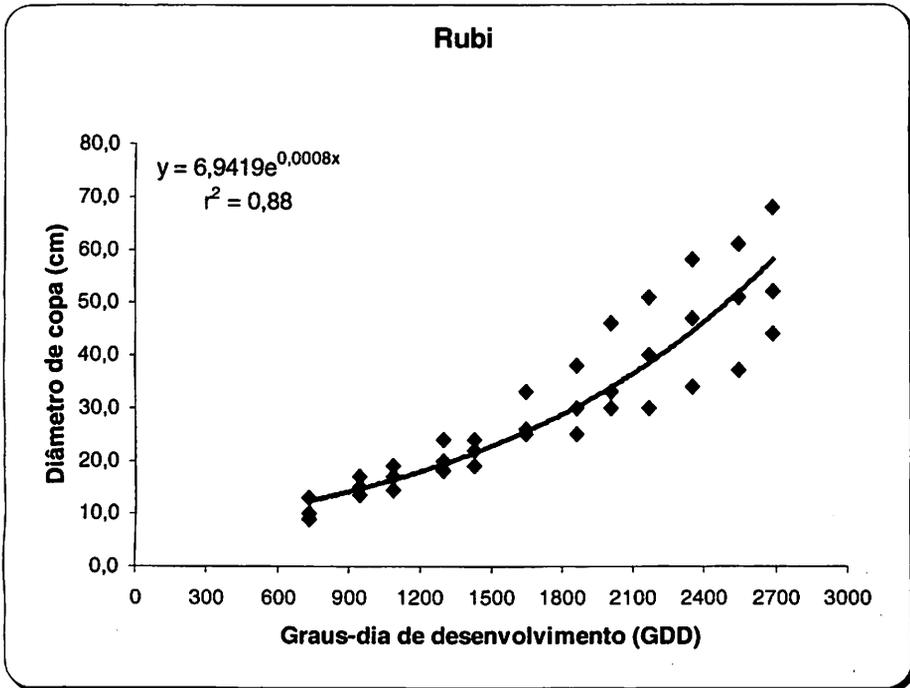


FIGURA 13 Diâmetro de copa associado a graus-dia de desenvolvimento para o cafeeiro Rubi. Lavras, MG, 2004.

Para a cultivar Acaia Cerrado, as avaliações de diâmetro de copa também foram a partir de 730 GDD, momento em que a cultura já apresentava uma copa bem definida. Os dados obtidos em campo apresentaram um bom ajuste aos graus-dia acumulados, demonstrando uma excelente precisão, como pode ser constatado pelo coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,98$ ). Observa-se, pela Figura 14, que o diâmetro de copa para a cultivar Acaia Cerrado cresce também de forma exponencial em relação ao acúmulo das unidades térmicas de calor e, assim como para a cultivar Rubi, a partir de 1600 GDD os valores de diâmetro de copa tendem a um aumento crescente na dispersão dos pontos,

quando associado aos graus-dia de desenvolvimento, porém, com uma menor amplitude de variação.

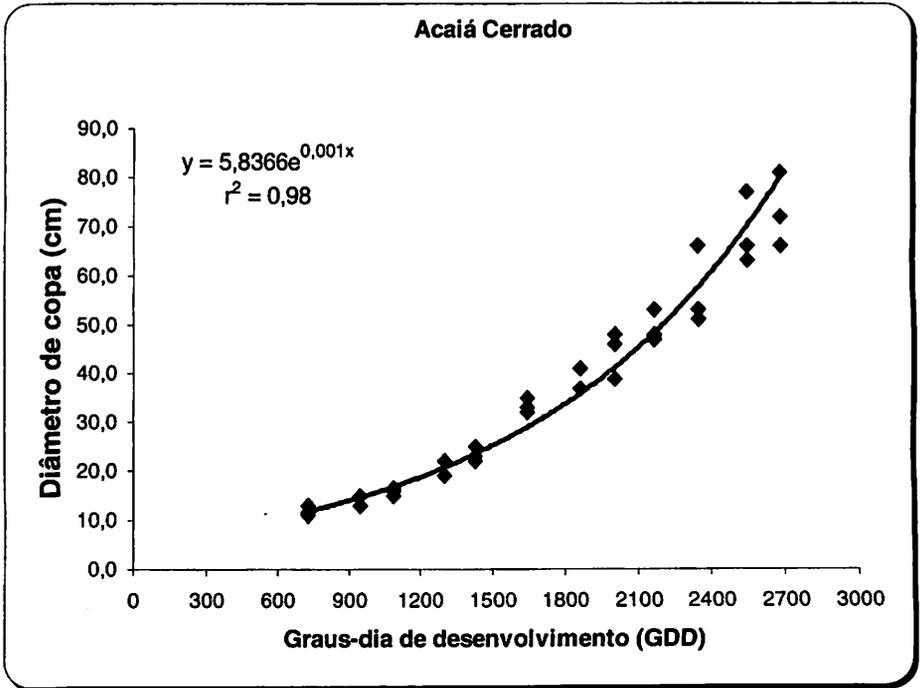


FIGURA 14 Diâmetro de copa associado a graus-dia de desenvolvimento para o cafeeiro Acaia Cerrado. Lavras, MG, 2004.

#### 4.4.4 Comprimento do ramo plagiotrópico

As avaliações para esta variável tiveram início em 10/10/03, a partir da emissão do primeiro par de ramos plagiotrópicos, com o acúmulo de 1089 graus-dia.

As medidas de comprimento do ramo plagiotrópico para a cultivar Rubi apresentaram uma boa relação com o somatório das unidades térmicas de calor (GDD). Procedendo-se a análise de regressão polinomial, a equação que melhor representou os dados observados de comprimento do ramo plagiotrópico em função dos GDD foi uma equação do primeiro grau, demonstrada na Figura 15. Porém, como foi verificado para as variáveis diâmetro de caule e diâmetro de copa desta cultivar, os valores de ( $r^2$ ) foram inferiores aos da cultivar Acaí Cerrado. A equação gerada para esta variável apresenta um bom coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,86$ ) e pode estimar com segurança o desenvolvimento do ramo plagiotrópico para a cultivar Rubi.

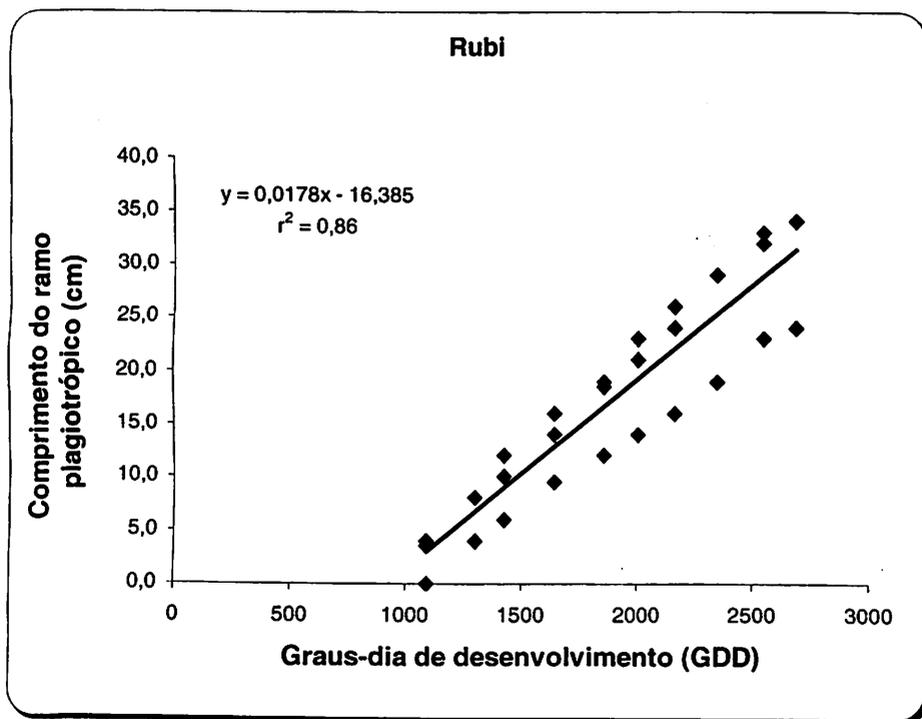


FIGURA 15 Comprimento do ramo plagiotrópico associado aos graus-dia de Desenvolvimento para o cafeeiro Rubi. Lavras, MG, 2004.

Para o Acaia Cerrado, o primeiro par de ramos plagiotrópicos foi emitido com o acúmulo de 1301 graus-dia. Na Figura 16 está representado o comportamento da variável comprimento do ramo plagiotrópico em função dos graus-dia de desenvolvimento para a cultivar Acaia Cerrado. Nota-se também um bom ajuste dos dados observados em campo, confirmado pelo elevado coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,96$ ). Por meio de análise de regressão, a equação que melhor representou os dados observados foi uma equação do primeiro grau.

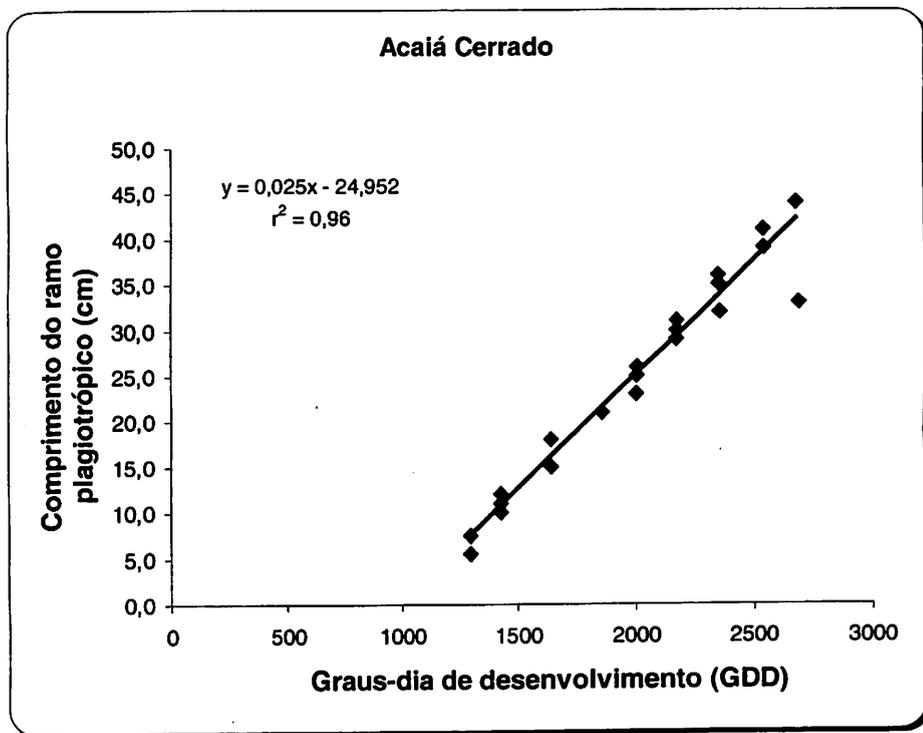


FIGURA 16 Comprimento do ramo plagiotrópico associado a graus-dia de desenvolvimento para o cafeeiro Acaia Cerrado. Lavras, MG, 2004.

As duas cultivares apresentaram uma evolução linear aos graus-dia acumulados, tendo a 'Acaiá Cerrado' demonstrado uma taxa de crescimento do ramo plagiotrópico relativamente superior a Rubi para o mesmo somatório de unidades térmicas. Ao final das avaliações haviam sido acumulados 2689 GDD; quando o Acaiá Cerrado apresentava um tamanho médio de 37,8 cm do ramo plagiotrópico o Rubi apresentava, em média, 29cm.

Nota-se claramente um bom ajuste entre GDD e comprimento do ramo plagiotrópico, o que leva a crer que o acompanhamento desta variável vegetativa como função das unidades térmicas possa ser realmente mais preciso que em função de um calendário baseado na escala de tempo. Porém, para fazer uma afirmativa com maior grau de certeza, são necessários mais trabalhos de pesquisa evidenciando essas afirmativas.

#### **4.5 Coeficiente de cultura ( $K_C$ )**

O balanço hídrico no solo teve início em 06/08/2003, quando já haviam sido acumulados 603 graus-dia. A partir de então, tiveram início os cálculos dos valores dos coeficientes de cultura para as duas cultivares.

##### **4.5.1 Cafeeiro Rubi**

Na Figura 17 estão apresentados os valores de coeficiente de cultura associados a graus-dia de desenvolvimento (GDD) para o cafeeiro Rubi. Por meio da análise de regressão identificou-se que o polinômio de segundo grau foi o que apresentou o melhor ajuste aos dados mensurados, com o valor do coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,70$ ). Nota-se que o coeficiente de determinação não apresentou valor elevado, o que já era esperado em virtude da

grande complexidade das variáveis envolvidas durante o processo de determinação do balanço hídrico no solo. No entanto, os valores encontrados para o coeficiente de cultura estão próximos aos citados na literatura.

Os valores de  $K_c$  encontrados variaram de 0,1 a 0,5, no período em que os estudos foram realizados, cujo início foi em 603 GDD e término em 2673 GDD. Estes valores estão próximos aos recomendados pela literatura. Blore (1964) sugere, para o cafeeiro, um coeficiente de cultura ( $K_c$ ) igual a 0,5 para estação seca e de 0,8 para a estação úmida. Já Clowes (1984) considera um coeficiente de cultura de 0,6 para todas as fases fenológicas do cafeeiro, enquanto Gutiérrez e Meinzer (1994) sugerem  $K_c = 0,58$  para cafeeiros com 1 ano de plantio.

A cultura estudada apresentou valor de  $K_c$  baixo no início dos estudos, em função de ainda estar com um porte menor, pouco desenvolvimento vegetativo, coincidindo com o período de baixas temperaturas o que, conseqüentemente, acarretou baixo consumo hídrico. À medida que a planta foi se desenvolvendo, com a elevação das temperaturas e com o acúmulo das unidades térmicas, houve maior demanda hídrica, acarretando a elevação no valor do coeficiente de cultura ( $K_c$ ).

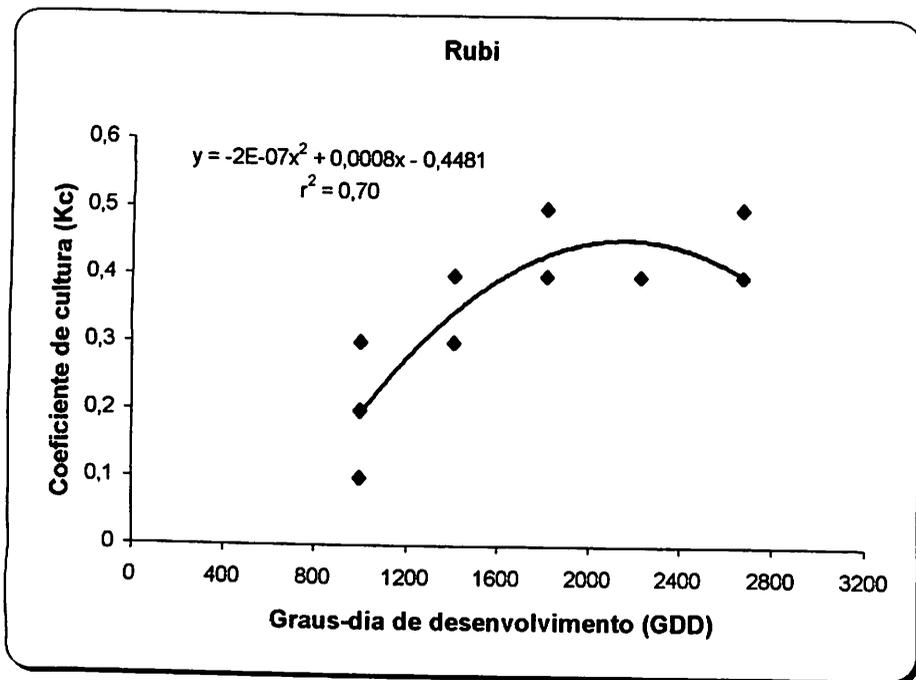


FIGURA 17 Coeficiente de cultura (Kc) associado a graus-dia de desenvolvimento (GDD) para o cafeeiro Rubi. Lavras, MG, 2004.

#### 4.5.2 Cafeeiro Acaia Cerrado

Os valores de coeficiente de cultura em função dos graus-dia de desenvolvimento para o Acaia Cerrado podem ser visualizados na Figura 18. A determinação de GDD como variável independente e do Kc como variável dependente proporcionou uma curva de regressão de comportamento quadrático semelhante à encontrada por Conceição et al. (2001) ao estudarem a relação entre os graus-dia acumulados e o coeficiente de cultura (Kc) para a videira 'Niagara Rosada'. Sammis et al. (1985) descobriram que um polinômio de

terceira ordem descreve muito bem a relação entre coeficiente de cultura e graus-dia de desenvolvimento para alfafa, milho, sorgo e algodão. Shayya et al. (1991) encontraram uma relação linear entre Kc e GDD para milho. O coeficiente de determinação se mostrou um pouco superior ao encontrado para o cafeeiro Rubi ( $r^2 = 0,71$ ).

Assim como para a 'Rubi' a cultivar Acaíá Cerrado apresentou uma tendência de elevação do coeficiente de cultura à medida que foram sendo acumulados os graus-dia. O Kc para esta cultivar também variou de 0,1 a 0,5 para a faixa que vai de 606 a 2673 GDD, ficando bem próximo aos valores de literatura anteriormente citados.

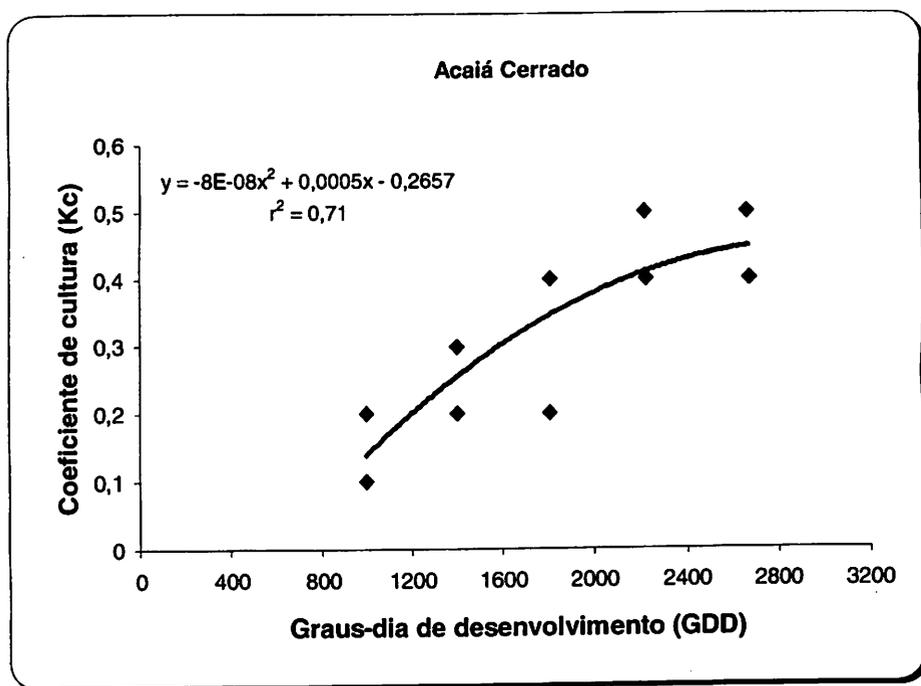


FIGURA 18 Coeficiente de cultura (Kc) associado a graus-dia de desenvolvimento (GDD) para o cafeeiro Acaíá Cerrado. Lavras, MG, 2004.

Embora as variáveis analisadas tenham demonstrado estreita relação com graus-dia de desenvolvimento (GDD), para se afirmar com maior segurança que o uso de graus-dia como contador de tempo é mais preciso que o calendário baseado em dias, torna-se necessária a realização de mais trabalhos de pesquisa nessa área.

## 5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

As variáveis de desenvolvimento vegetativo analisadas apresentam estreita relação com as unidades térmicas de calor, indicando assim que o uso dos graus-dia desenvolvimento (GDD) pode ser uma boa alternativa como contador de tempo;

Os coeficientes de cultura ( $K_C$ ) determinados para as duas cultivares, Rubi e Acaiá Cerrado, variaram de 0,1 a 0,5 no período de 603 a 2673 GDD;

Os coeficientes de cultura ( $K_C$ ), tanto para a 'Rubi' como para a 'Acaiá Cerrado', demonstraram uma relação quadrática com a GDD.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome, Italy: FAO, 1998. 301 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, n. 56).

AMARAL, A. T.de. **Crescimento vegetativo estacional do cafeeiro e suas inter-relações com fontes de nitrogênio, fotoperíodo, fotossíntese e assimilação do nitrogênio**. Viçosa, 1991. 139p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa.

BLORE, T. W. D. Further studies of water use by irrigated and unirrigated Arábica coffee in Kenya. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 67, n. 2, p. 145-154, Oct. 1964.

BOLONHEZI, D. **Épocas de semeadura do algodoeiro: características agronômicas, tecnológicas da fibra, determinação da temperatura base e graus-dia**. 2000. 182 p. Dissertação (Mestre em Agronomia) – Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Normais Climatológicas:1961-1990**. Brasília: SPI/EMBRAPA, 1992. 84p.

CABELLO, F. P. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, micro aspersión, exudación**. 3. ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1996. 511 p.

CAMARGO, A. P. Balanço hídrico, florescimento e necessidade de água para o cafeeiro. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DA ÁGUA NA AGRICULTURA, 1., 1987, Campinas-SP. **Anais...** Campinas: IAC/CPA/SAA, 1987. p. 53-90.

CAMARGO, A. de.; PEREIRA, A. R. **Agrometeorology of the coffe crop**. Geneva: World Meteorological Organization, 1994. 91 p. (WMO/TD, 615).

CARVAJAL, J. F. **Cultivo y fertilización**. Berna, Suíza: Instituto Internacional de la Potasa, 1984. 254 p.

CLOWES, M. S. J. Drip irrigation on coffee. **Zimbabwe Agricultural Journal**, Harare, v. 81, n. 6, p. 215-219, 1984.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MAIA, J. D. G. Relação entre os Graus-Dia Acumulados e o coeficiente de cultura (Kc) para a Videira Niagara Rosada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., 2001, Fortaleza, CE. *Anais...* Fortaleza, 2001. p. 513-514. CD-ROM.

CRUZ, A. C. R. **Consumo de água por cultura de citros cultivada em latossolo vermelho amarelo.** 92 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. **Guidelines for predicting crop water requirements.** Rome: FAO, 1975. 179 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Las necesidades de agua de los cultivos.** Roma: FAO, 1977. 144 p. (FAO Boletim Irrigacion y Drenage, 24).

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Yield response to water.** Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO. Irrigation Drainage Paper, 33).

DOWNEY, L. A. Water – Yield relations for nonforage crops. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 98, n. 1, p. 107-114, Mar. 1972.

DOURADO NETO, D.; VAN LIER, Q. J.; BOTREL, T. A. et al. Programa para confecção da água no solo utilizando modelo Genuchten. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 1, p. 92-102, jul. 1990.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FOX Jr.; F. A.; SHERER, T.; SLACK, D. C.; CLARK, L. J. **Arizona Irrigation Scheduling – AZSCHED ver. 1. 01 – Users Manual.** The University of Arizona/Cooperative Extension/ Agricultural and Biosystems Engineering, 1992. 36 p.

GUANDIQUE, M. E. G. **Balanço hídrico no solo e consumo de água pela cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) irrigado.** 1993. 94 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

- GUTIÉRREZ, M. V.; MEINZER, F. C. Estimating water use and irrigation requirements of coffee in Hawaii. **Journal of American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 119, n. 3, p. 652-657, May 1994.
- HILLEL, D. **Soil and water: physical principles and processes**. New York: Academic Press, 1971. 288 p.
- IAFFE, A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E. Estimativa da Temperatura Base e Graus-Dia do Florescimento a Colheita de cafeeiro Mundo Novo em Botucatu, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., 2001, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza: SBA, 2001. CD-ROM. p. 703-704.
- ILLY, E. Café de qualidade tem futuro garantido no Brasil. **Preços Agrícolas**, Piracicaba, v. 7, n. 142, p. 7, ago. 1998.
- INFELD, J. A.; SILVA, J. B. da. Somas térmicas da duração da fase vegetativa do arroz irrigado. (*Oryza sativa*. L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 5º. Belém-PA, **Anais...** Belém: SBA, 1987. p. 160-161.
- ITEM - IRRIGAÇÃO & TECNOLOGIA MODERNA. Cafeicultura irrigada. Belo Horizonte, n. 48, set. 2000. 90 p
- JENSEN, M. E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. **Transaction of the ASAE**. New York, p. 215. 1973.
- JORGE, J. A.; PRADO, H. Porosidade, consistência e propriedades hídricas de três Podzólicos Vermelho-Amarelos e uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, n. 1, p. 1-6, jan./abr. 1988.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 1999. 497 p.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: ESALQ. Departamento de Física e Meteorologia, 1995. 497 p.
- MATIELLO, J. B. **O Café – do cultivo ao consumo**. São Paulo: Editora Globo, 1991. 320 p.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de penman-monteith de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE**. 2002. 103 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

MOTA, F. S. **Meteorologia agrícola**. 7. ed. São Paulo: Nobel, 1986. 376 p.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resource Research**, Washington, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

OLIVEIRA, P. M. de. **Estimativa da evapotranspiração e do coeficiente de cultura do cafeeiro (*Coffea arábica L.*)**. 2003. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

OLIVEIRA NUNEZ, J. G. **Caracterização das fases fenológicas de três cultivares de milho, utilizando o conceito de graus-dia**. 1986. 54 p. Dissertação (Mestrado Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440 p.

ORMOND, J. G. P.; PAULA, S. R. L. de.; FAVERET FILHO, P. **Café: (re)conquista dos mercados**. BNDS SETORAL, Brasília, n. 10, p. 3-56, set. 1999.

ORTOLANI, A. A.; PEDRO, J. R.; ALFONSI, R. R. **Agroclimatologia e o cultivo dos citros**. In: RODRIGUES, O.; VIEGAS, F.; POMPEU JR., J.; AMARO, A. (Ed.) **Citricultura brasileira**. Campinas: Fundação Cargill, 1991. v. 1, p. 153-188.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PERES, J. G.; PEREIRA, A. R.; FRIZZONE, J. A. **Avaliação do modelo de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração de referência padronizada pela FAO**. **Engenharia Rural**, v. 6, n. 1, p. 65-75, jul./dez. 1995.

RAMOS, A. **Desenvolvimento vegetativo da pupunheira (*Bactris gasipaes Kunth*)**. 1998. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4. ed. Campinas – SP: Fundação Cargill, 1985. 448 p.

REICHARDT, K.; LIBARDI, P. L.; SAUNDERS, L. C. V.; CADINA, A. C. et al. A dinâmica da água em solo cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 3, p. 1-5, jan./abr. 1979.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Coffee. In: SCHAFFER, B.; ANDERSON, P. C. (Ed.). **Handbook of environmental physiology of fruit crops: sub-tropical and tropical crops**. Florida, 1994. v. 2, 310 p.

RICHARDS, L. A. The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigators. **Journal Agricultural Research**, Cambridge, v. 37, n. 12, p. 719-742, Dec. 1928.

ROSE, C. W. **Agricultural physics**. London: Pergamon Press, 1966. 230p

SAES, M. S. M.; NUNES, R. Participação do Brasil no mercado internacional de café. **Preços Agrícolas**, Piracicaba, v. 7, n. 142, p. 10-13, ago. 1998.

SAMMIS, T. W.; MAPEL, C. L.; LUGG, D. G.; LANSFORD, R. R.; MCGUCKIN, J. T. Evapotranspiration crop coefficients predicted using growing-degree-days. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 28, n. 3, p. 773-780, May/June 1985.

SANTIAGO, A. V. **Evapotranspiração de referência medida por lisímetro pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO 56), nas escalas mensal e decendial**. Piracicaba, 2001. 37 p. Dissertação (Mestrado) - Escola superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

SANTINATO, R.; FERNANDES, A. L. T.; FERNANDES, D. R. **Irrigação na cultura do café**. Campinas: Arbore Agrícola, 1996. 145 p.

SHAYYA, E. H.; BRALTZ, V. F.; LOUDON, T. L. **Irrigation scheduling based on growing degree days**. St. Joseph: ASAE, 1991. 23 p. (ASAE Paper 91- 2643. Winter Meeting).

SLATYER, R. O. **Plant-water relationships**. New York: Academic Press, 1967. 366 p.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45 p.

TOSSO, J. T.; TORRES, J. J. Relaciones hidricas de la vid, bajo diferentes niveles de riego usando goteo, aspersión y surcos. I. Evapotranspiración y eficiencia en el uso del agua. **Agricultura Técnica**, Mexico, v. 46, p. 193-198, 1986.

THORNTON, C. W. An approach a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Laboratory of climatology, 1955. 107 p. (Publications in climatology, v. 8, n. 1)

VACHAUD, G.; PASSERAT, D.; SILANS, A.; BALABANIS, P.; VAUCLIN, M. Temporal Stability of spatially measured soil water probability density function. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 4, p. 822-828, July/Aug. 1985.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept./Oct. 1980.

VOLPE, C. A. **Eficiência no uso da água, resistência estomática e parâmetros aerodinâmicos da cultura de milho (*Zea mays* L.)**. 1986. 103 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

VOLPE, C. A. Fenologia dos citros. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE CITROS, 2., 1992, Bebedouro. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1992. p. 107-120.