

ALEXANDRE SILVA MUDRIK

MANEJO DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO EM CAFEEIROS NAS
CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS DO CERRADO DO
TRIÂNGULO MINEIRO

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2005

ALEXANDRE SILVA MUDRIK

MANEJO DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO EM CAFEIROS NAS
CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS DO CERRADO DO
TRIÂNGULO MINEIRO

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

APROVADA EM: 28 de abril de 2005.

Prof. Márcio Mota Ramos
(Conselheiro)

Dr. Maurício Bernardes Coelho
(Conselheiro)

Prof. Salassier Bernardo

Dr. Antônio de Pádua Alvarenga

Prof. Everardo Chartuni Mantovani
(Orientador)

Aos meus pais Márcio Mudrik e Vera Regina Silva Mudrik.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por cada dia vivido e pela força para superar as dificuldades e encontrar nossos caminhos.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao PNP&D-Café e CNPq, pelo apoio na execução do trabalho.

Ao Professor Everardo Chartuni Mantovani, pela amizade, pela oportunidade, pela orientação, pelos ensinamentos acadêmicos e pela compreensão nos momentos difíceis.

À Fazenda Juliana, na pessoa do seu proprietário Renato Baiardi, pela presteza na concessão de dados necessários à realização do trabalho.

Aos meus conselheiros Maurício Bernardes Coelho e Márcio Mota Ramos, pelas valiosas sugestões no decurso do trabalho.

Às minhas irmãs Thaís e Paula, pelo carinho e pela motivação.

Aos meus amigos do Grupo de Estudos e Soluções para Agricultura Irrigada (GESAI) Luís Otávio, Gregório, Maurição, Marconi, Adilson, Adjalma, Rafael, Darik, Marcelo, Fúlvio, Cleiber, Alessandro, Magrão, Marlos etc., pelo convívio e pela colaboração desde a Iniciação Científica.

Aos meus amigos de Três Pontas, pelo incentivo em todos os momentos e, principalmente, pela amizade sincera.

Aos descendentes da “república”, pelos momentos de descontração; e ao André Wisky, pela minha estada em Viçosa nos momentos finais.

A todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

ALEXANDRE SILVA MUDRIK, filho de Márcio Mudrik e Vera Regina Silva Mudrik, nasceu em São Paulo, SP, em 20 de novembro de 1979.

Em 1998, iniciou o Curso de Agronomia na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, onde foi bolsista de iniciação científica de 2000 a 2003, diplomando-se em março de 2003.

Em março de 2003, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola da UFV, com concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa de tese em abril de 2005.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1. O cafeeiro	5
3.2. A cafeicultura no Cerrado do Triângulo Mineiro	6
3.3. Necessidades hídricas do cafeeiro	9
3.4. Determinação das necessidades hídricas do cafeeiro	10
3.5. A irrigação na cafeicultura	22
3.6. Irrigação localizada	23
3.7. O manejo da irrigação	25
3.8. O programa computacional Irriga-Gesai	28
4. MATERIAL E MÉTODOS	30
4.1. Caracterização da área experimental	30
4.2. Coeficiente de localização (KI) de campo	32
4.3. Métodos de manejo da irrigação	35
4.3.1. Manejo da irrigação com tensiômetros	35
4.3.2. Manejo com o programa Irriga-Gesai	36

	Página
4.4. Variação nas lâminas de irrigação recomendadas pelo programa Irriga-Gesai, através da utilização de um, dois e três dias de turno de rega.....	38
4.5. Análise de produtividades e lâminas de irrigação.....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1. Coeficientes de localização (KI).....	40
5.2. Sistemas de manejo de irrigação	47
5.3. Irrigações totais necessárias (ITN), de acordo com o turno de rega (TR)	56
5.4. Análise de produtividades e lâminas de irrigação.....	59
6. RESUMO E CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
APÊNDICE	69
APÊNDICE A.....	70
APÊNDICE B.....	74

RESUMO

MUDRIK, Alexandre Silva, M.S., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2005.
Manejo da irrigação por gotejamento em cafeeiros nas condições edafoclimáticas do cerrado do Triângulo Mineiro. Orientador: Everardo Chartuni Mantovani. Conselheiros: Márcio Mota Ramos e Maurício Bernardes Coelho.

A cultura do cafeeiro apresenta elevada importância no cenário socioeconômico nacional, sendo explorada desde o século passado, tradicionalmente em regiões onde não se observam déficits hídricos elevados. Com o advento da irrigação foi possível a exploração do cultivo do cafeeiro nessas regiões, destacando-se o Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba de Minas. Visando alcançar elevadas produtividades e qualidade do produto, faz-se necessário o conhecimento das reais necessidades hídricas do cafeeiro nas regiões onde é cultivado. Uma das formas de se reporem as necessidades hídricas do cafeeiro é através da irrigação localizada por gotejamento, em que somente parte da superfície do solo é molhada. Em consequência, reduz-se a evaporação direta da água do solo, mantendo o volume de solo molhado, o que favorece o aumento da transpiração. A redução da evapotranspiração se dá em virtude do decréscimo da evaporação em função da menor porcentagem de área molhada e do sombreamento pela cultura dessa área. Um importante conceito dentro da irrigação é o manejo, objetivando repor as necessidades

hídricas da cultura no momento e quantidade adequados. Análises do manejo da irrigação em nível de campo são importantes para se otimizar produtividades de forma sustentável, tanto econômica quanto ambientalmente. O objetivo do presente trabalho foi analisar o manejo da irrigação por gotejamento no Cerrado de Minas Gerais, mediante uma análise técnica de dados de uma propriedade da região, sendo dividido em três partes. A primeira teve como meta a determinação do coeficiente de localização (KI) utilizado para correção da evapotranspiração da cultura em irrigação localizada. Através de leituras de tensiômetros foi possível determinar, em nível de campo, o KI de campo nas condições analisadas, em cafeeiros de diferentes idades. Com essa determinação, pôde-se identificar qual das metodologias empregadas no cálculo do KI se ajustou melhor aos valores encontrados. A segunda etapa teve por objetivo a análise de métodos de manejo da irrigação, um tendo como base a determinação indireta da umidade do solo via tensiômetros e outro através de ferramentas computacionais para auxílio em cálculos de determinação da evapotranspiração da cultura, através de dados meteorológicos realizados pelo programa Irriga-Gesai. A partir desses dados, foi possível estabelecer a precisão do programa no auxílio ao manejo da irrigação dos cafeeiros. A terceira parte do estudo visou analisar possíveis efeitos de déficits hídricos na produtividade e acentuação em processos de biennialidade da produção dos cafeeiros irrigados por gotejamento. A metodologia de cálculo do coeficiente de localização (KI) que melhor se ajustou aos valores encontrados em campo foi a de Keller-Bliesner, comparativamente às metodologias anteriormente recomendadas para manejo da irrigação, como as de Keller e Fereres. A utilização do Irriga-Gesai como ferramenta de auxílio no manejo diário da irrigação apresentou excelentes resultados em todas as fases do cafeeiro, em comparação com a metodologia de manejo da irrigação através da umidade do solo via tensiometria. Déficits hídricos podem expressar uma tendência em queda de produtividade e acentuação do fenômeno da biennialidade no cafeeiro, porém conclusões precisas sobre tais efeitos se tornam complexas, tendo em vista outros fatores determinarem a produtividade e não apenas o fornecimento de lâminas de irrigação adequadas à cultura.

ABSTRACT

MUDRIK, Alexandre Silva, M.S., Universidade Federal de Viçosa, April 2005.
Management of drip irrigation in coffee crop under edaphic-climatic conditions of Cerrado in the region of “Triângulo Mineiro”. Adviser: Everardo Chartuni Mantovani. Committee Members: Márcio Mota Ramos and Maurício Bernardes Coelho.

The coffee crop is extremely important in the national socioeconomic scene, being since the last century traditionally explored in regions with low water deficits. Irrigation made it possible coffee production in these regions, prominently “Triângulo Mineiro” and “Alto Paranaíba”. Knowing the actual water requirements of areas where the crop is cultivated is crucial to achieving product yield and quality. Drip irrigation is one of the means to meet the crop’s demand for water, in which only part of the soil surface is wet, and consequently the water evaporated directly from the soil is reduced, keeping the volume of soil wet and favoring the increase in perspiration. The reduction in evapotranspiration is the result of the decrease in evaporation as a function of a smaller percentage of wet area and shading by the crop. A key concept in irrigation is the management, which aims to supply the crop water demands at the adequate time and amount. Analyses of irrigation management in the field are important for optimizing economic and environmentally sustainable productivity. The objective of the present work was to analyze the drip irrigation

management, by using a technical analysis of data from a farm in the Cerrado of Minas Gerais. The work consisted of three parts; the first was to determine the landscape coefficient (KL) used for evapotranspiration correction of crop with localized irrigation. Tensiometer readings allowed the determination of the KL in the analyzed field conditions for coffee plants of different ages. With these data, it was possible to identify which of the used methodologies for calculation of KI was better adjusted to the found values. The second was to analyze management irrigation methods, one based on indirect determination of soil moisture/humidity by tensiometers, and another using computer tools to determine crop evapotranspiration with meteorological data from the Irrigate-Gesai software. From these data it was possible to establish the software precision in the assistance to the management of coffee irrigation. The third part of the study sought to analyze possible effects of water deficits on productivity and accentuation in biennial processes of production of drip irrigated coffee. The methodology for the calculation of the landscape coefficient (KL) that better adjusted to the values found in the field was described by Keller-Bliesner, compared to the previously recommended methodologies for irrigation management by Keller and Fereres. The Irrigate-Gesai software assistance in the daily irrigation management gave excellent results in all crop stages when compared with the tensiometer methodology. Water deficits can express a tendency for productivity to decrease and intensification of bienniality, however decisive conclusions on such effects become complex, seeing that other factors determine productivity and not only the adequate water supply for the crop.

1. INTRODUÇÃO

A cultura do cafeeiro tem grande importância no cenário socioeconômico nacional, sendo explorada tradicionalmente em regiões onde não ocorrem déficits hídricos elevados. A expansão dessa atividade levou o cultivo para regiões caracterizadas por déficits hídricos em períodos específicos ao longo do ano, o que pode torná-las inaptas ao cultivo ou resultar em queda de produtividade e qualidade do produto, caso não se utilize a irrigação.

A irrigação possibilita o cultivo do cafeeiro nessas regiões, destacando-se o Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba de Minas Gerais e oeste da Bahia.

A cafeicultura irrigada encontra-se em franca expansão nessas regiões, proporcionando altas produtividades, frutos e bebida de boa qualidade, quando se utiliza tecnologia.

Para otimizar a produtividade e gerar um produto de excelente qualidade, é necessário o conhecimento das reais necessidades hídricas do cafeeiro nas regiões em que são cultivadas. A variedade cultivada, o estágio de desenvolvimento da cultura, o espaçamento, o clima e o método de irrigação, entre outros, podem definir as necessidades hídricas.

Essas necessidades podem ser conhecidas através da determinação da evapotranspiração da cultura que integra a evapotranspiração de referência, ajustada para a cultura explorada e a frequência de umedecimento do solo.

Deficiências hídricas em períodos específicos podem prejudicar o crescimento e desenvolvimento do cafeeiro, por restringir a transpiração da cultura e, conseqüentemente, a absorção de água e nutrientes.

Precipitações e a aplicação das lâminas de irrigação suplementares à cultura ao longo do ciclo produtivo garantem o suprimento hídrico, podendo gerar produtividades elevadas e aumento da qualidade dos grãos, desde que outras variáveis relacionadas ao manejo da cultura sejam bem conduzidas.

Uma das maneiras de se repor o consumo hídrico da cultura é através da irrigação localizada por gotejamento, sendo características desse sistema de irrigação a aplicação pontual da água no solo, a alta freqüência de irrigação, a aplicação de pequenas vazões e, principalmente, a alta uniformidade de aplicação de água, alcançando alta eficiência. Tais características propiciam outra vantagem, que é a aplicação de produtos químicos via água de irrigação (quimigação).

Em irrigação localizada, somente uma parte da superfície do solo é molhada. Em conseqüência, reduz-se a evaporação direta da água do solo, mantendo-o sempre próximo à capacidade de campo, o que favorece o aumento da transpiração. A diminuição da evaporação se deve à menor porcentagem de área molhada pelo equipamento e de sombreamento pela cultura da área molhada.

Um aspecto importante relacionado à irrigação é o manejo da água, objetivando-se aplicá-la na quantidade correta e no momento ideal, evitando, assim, que ocorra perda de água por percolação e de nutrientes por lixiviação ou que a planta não expresse uma produtividade potencial.

O manejo da irrigação, aliado às práticas agrícolas de condução da cultura, constitui base para a garantia de sustentabilidade na produtividade e rentabilidade da lavoura cafeeira irrigada. Um bom sistema de manejo da irrigação deve levar em consideração: época de plantio, espaçamento, características de crescimento e desenvolvimento das culturas, informações detalhadas do sistema de irrigação e sua condição de operação, variáveis climáticas diárias, análises fitopatológicas e entomológicas, adubação, plantas daninhas, manejo da cultura, colheita etc. Deve também observar a interação de todos os fatores de condução da cultura com as características da fazenda,

o que constitui uma ferramenta eficiente, simplificada, precisa e operacional em nível de campo.

Buscando analisar todos esses pontos, o presente trabalho teve por objetivo avaliar o manejo da água na irrigação por gotejamento do cafeeiro nas condições edafoclimáticas do Cerrado de Minas Gerais, através de análises do manejo da irrigação realizado em uma propriedade da região.

2. OBJETIVOS

Considerando o exposto, o trabalho teve os seguintes objetivos gerais e específicos:

Gerais

Analisar o manejo da irrigação por gotejamento do cafeeiro nas condições edafoclimáticas de uma propriedade localizada no Triângulo Mineiro.

Específicos

- Analisar a metodologia de cálculo do KI que melhor se ajuste às condições de campo e gerar um valor de campo para o KI a ser recomendado para manejo da irrigação.
- Comparar dois sistemas utilizados no manejo da irrigação: um tendo como base a umidade do solo a partir de tensiômetros e outro que tenha como base dados meteorológicos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. O cafeeiro

O gênero *Coffea* tem sido cultivado em muitos países tropicais. A espécie *Coffea arabica* é nativa de uma região restrita, marginal às demais espécies, localizada no sudoeste da Etiópia, sudeste do Sudão e norte do Quênia, entre 1.000 e 2.000 m de altitude, 5-8° de latitude norte e 34-38° de longitude este de Greenwich (CHEVALIER, 1947; CARRIER, 1978; BRIDSON, 1982). Do ponto de vista comercial, o *Coffea arabica* e o *Coffea canephora* (cujas variedades robusta é conhecida como café Robusta) são as únicas espécies importantes dentro do gênero *Coffea*. O cafeeiro arábica cresce em altitudes médias e altas, sendo cultivado na maioria dos países da América Latina. Ele responde por cerca de 70% do café consumido no mundo, em razão da bebida de qualidade superior que ele proporciona. O café é um dos principais produtos agrícolas do mundo, gerando cerca de US\$ 12 bilhões por ano no comércio de café limpo beneficiado. Em muitos países da América Latina, África e Ásia, o café é a fonte mais importante da balança comercial, sendo o Brasil, Colômbia, Indonésia e México os principais produtores. A atividade cafeeira é uma importante fonte de renda para mais de 20 milhões de pessoas ligadas ao seu cultivo, processamento de pós-colheita, transporte e comercialização (MAESTRI et al., 2001).

O Brasil fornece cerca de 30% do café comercializado no mundo, tendo produzido 28,9 milhões de sacas de 60 kg, em um total de 2,276 milhões de hectares plantados, empregando diretamente 3,5 milhões de pessoas. A maior safra já colhida no mundo foi a de 2002/2003, que chegou a 120 milhões de sacas, 10 milhões acima do consumo mundial. Esse incremento se deve, principalmente, à safra brasileira, que também foi recorde, atingindo 48,7 milhões de sacas (AGRIANUAL, 2004).

Na pauta de exportações brasileiras de café predomina o grupo de produtos básicos (representado entre 86 e 91% do valor exportado no período), e esse grupo é formado quase que completamente por café não-torrado, não descafeinado, em grão. A União Européia é o destino mais importante do café exportado pelo Brasil, representando 53% do valor total em 2002 (VICENTE, 2004).

No período de 1997 a 2002, o valor das exportações brasileiras de café apresentou acentuada tendência de queda, passando de aproximadamente US\$ 3,2 bilhões para cerca de US\$ 1,4 bilhão, portanto com diminuição de 56%, enquanto a quantidade exportada aumentou continuamente entre 1997 e 2002, com exceção do ano 2000, em que houve queda de 21% na quantidade exportada em comparação com 1999. No período de 1997 a 2002, a quantidade exportada aumentou 65%. Os preços recebidos pelos exportadores diminuíram ao longo de todo o período analisado, com a maior queda ocorrendo em 2001 (-38% em relação ao ano anterior). No ano de 2002, os preços médios recebidos pelos exportadores acumulavam perdas de 74%, em comparação com 1997.

3.2. A cafeicultura no Cerrado do Triângulo Mineiro

A cultura do cafeeiro ocupa importante papel na agricultura e economia brasileiras desde a sua introdução no Brasil, em que a cafeicultura desenvolveu-se primeiramente em locais onde não se evidenciam déficits hídricos elevados durante longos períodos do ano. Porém, a agricultura contemporânea dispõe de tecnologia apropriada para tornarem aptas para a cafeicultura, utilizando a irrigação, regiões com períodos extensos de deficiência hídrica.

A cafeicultura irrigada é uma realidade no cenário nacional, ocupando cerca de 8% da sua área plantada, permitindo situar o cafeeiro entre as principais culturas irrigadas no Brasil (MANTOVANI, 2003). Levantamentos preliminares avaliaram um total de quase 200.000 ha irrigados (MANTOVANI, 2000), concentrados principalmente no norte do Espírito Santo, Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba de Minas Gerais e Oeste da Bahia.

A região do Cerrado mineiro compreende 55 municípios, com 147 mil hectares de cafezais cultivados com tecnologia. Em termos quantitativos, o Cerrado de Minas produz 2,5 a 5,0 milhões de sacas por ano, ou de 10 a 15% da produção nacional, com índices de produtividade acima da média brasileira (SAES; JAYO, 2004).

A cafeicultura na região do Cerrado mineiro ocupa 13,84% do total da área cultivada, caracterizando-se por grandes lavouras (ALVES et al., 2003).

Apesar de Minas Gerais produzir café de qualidade, a cafeicultura mineira foi pouco estudada. Pequeno número de trabalhos retratam as características e peculiaridades regionais, que as tornam bem diferentes dos demais produtores do país. Segundo o Anuário...1971/1984 (CAIXETA, 1996), na safra de 1983/1984, Minas Gerais produziu 9,3 milhões de sacas de 60 kg, que representavam 31,9% da produção brasileira. O referido trabalho atribuía ao estado 30,1% das propriedades produtoras de café e 33,2% do total de cafeeiros do país. O mesmo Anuário revela que havia 590 municípios mineiros produtores, estabelecidos em 65.561 propriedades, perfazendo uma área de 720.100 ha plantados, com um total de 1.145.900.000 cafeeiros. Na época, a região IV – Triângulo e Alto Paranaíba – contava com 40 municípios produtores, 1.973 propriedades cafeeiras e 88.900.000 pés de café, que representavam 7,8% da população cafeeira do estado. Em trabalho realizado em 1996, a Faemg (1996) informou que a região do cerrado, aí incluído o noroeste de Minas (Planalto de Paracatu), contava com 50 municípios produtores.

Áreas de cerrado no Triângulo Mineiro e em zonas contíguas de Minas Gerais e Goiás, regiões cafeeiras do Nordeste, norte do Espírito Santo, extremo sul da Bahia e algumas áreas em São Paulo têm apresentado problemas de deficiência hídrica no período de frutificação do cafeeiro. Nessas

regiões, a prática da irrigação tem resultado em bom retorno, com aumentos significativos de produtividade (MATIELLO, 1991).

Em Minas Gerais, nas regiões do Triângulo e Alto Paranaíba a cafeicultura tem-se desenvolvido de forma destacada, em razão da tecnificação e da qualidade de bebida do café produzido, que tem maior peso que outras características na comercialização do café. Nessas regiões merecem especial destaque os municípios de Araguari e Patrocínio, o que tem levado, nessas regiões, a uma grande demanda de técnicas que possibilitam o aumento da produtividade. Nesse cenário, o uso da irrigação tem se tornado cada vez mais freqüente, porém nem sempre seguindo padrões corretos de dimensionamento e manejo.

Em um diagnóstico da cafeicultura na região do Cerrado de Minas Gerais, verificou-se que 76,67% das propriedades já tinham cafezais irrigados, e 63,33% das lavouras dessas propriedades eram irrigadas (RABELO et al., 2004).

Mesmo em locais com períodos curtos de deficiência hídrica, mas que coincidem com as fases críticas da cultura, a irrigação tem se mostrado viável. A deficiência hídrica da cultura nesses períodos pode gerar redução da produtividade e da qualidade final do produto, razão porque o uso da irrigação suplementar pode ser uma prática vantajosa. Além do mais, o sistema de irrigação possibilita o emprego, na cafeicultura, da quimigação, que consiste na aplicação de fertilizantes e defensivos via água de irrigação de maneira eficiente, com menor custo e, também, menor tráfego de máquinas na lavoura.

A solução tradicional para a escassez de água na agricultura é a irrigação. No entanto, considerando-se que a população mundial está aumentando numa taxa alarmante, 100 milhões de pessoas a cada ano (TURNER, 1997), torna-se evidente a necessidade de incrementar a produção por unidade de área sem o aumento substancial da área irrigada, uma vez que as fontes destinadas a essa finalidade são limitadas (BOYER, 1995a). Ademais, a irrigação é alternativa de alto custo, e nem toda a região permite sua implantação, em decorrência, principalmente, da topografia desfavorável, além de a resposta à irrigação não ser regular, em virtude da biannualidade da produção. Portanto, em um mundo em que há limitações de alimentos e carência de sistemas de cultivo mais eficientes, o conhecimento das relações

hídricas das culturas é de importância estratégica, à medida que as informações coletadas possam ser úteis no melhoramento, visando à tolerância à seca (BOYER, 1982; TURNER, 1997).

3.3. Necessidades hídricas do cafeeiro

A necessidade hídrica do cafeeiro é bastante variável, de acordo com as fases do ciclo da planta. Nas condições do Brasil, no período de vegetação e frutificação, que vai de outubro a maio, o cafeeiro é mais exigente em água. Na fase de colheita e repouso, de junho a setembro, essa necessidade é pequena (MATIELLO, 1991).

Nas áreas de Cerrado de Minas Gerais, a cafeicultura desenvolveu-se nas décadas de 1970 e 80 simultaneamente com projetos de colonização agrícola implantados. Nessas áreas, 80 a 90% do total anual das precipitações concentrava-se no período de outubro a abril (LUCHIARI JÚNIOR et al., 1986), período que coincide com as fases de vegetação e frutificação do cafeeiro. Entretanto, essa época está sujeita à ocorrência de “veranicos”. O veranico pode ter menor efeito sobre o cafeeiro quando comparado com culturas anuais, devido ao seu sistema radicular mais desenvolvido. No entanto, em condições de cerrado, o seu efeito pode ser sentido, em razão de esses solos apresentarem baixa capacidade de retenção de água e por coincidir com as fases críticas do cafeeiro, no que se refere ao déficit de umidade (LOPES, 1984). Nessas condições, a irrigação suplementar objetiva fazer a recarga hídrica do solo nos períodos de veranico coincidentes com as fases de demanda hídrica críticas do cafeeiro.

A deficiência hídrica limita a produção primária dos ecossistemas e o rendimento das culturas, principalmente pelas restrições que impõe à fixação fotossintética do gás carbônico e ao crescimento das plantas. A água não é um composto permanente dos tecidos vegetais, mas flui pelo sistema solo-planta-atmosfera em grandes quantidades. As plantas ao longo de seu ciclo vital estão sujeitas a sofrerem continuamente deficiências internas de água, em maior ou menor grau, com suas conseqüências para o crescimento e a produção, se o suprimento de água por chuva ou irrigação não for adequado.

Dentro desse contexto, o estudo das necessidades hídricas do cafeeiro se torna necessário, uma vez que pequenas reduções na disponibilidade de água podem diminuir substancialmente o crescimento, ainda que não se observem murchas nas folhas ou quaisquer outros sinais visíveis de déficit hídrico (GUTIÉRREZ; MEINZER, 1994). A redução no crescimento significa menor produção de nós disponíveis para a formação de flores, acarretando, por conseqüência, queda na produção de frutos. Informações do consumo hídrico em cada região possibilitam melhor zoneamento das regiões produtoras de café, da necessidade e viabilidade da irrigação, bem como o planejamento dos recursos e investimentos a serem realizados na propriedade rural.

3.4. Determinação das necessidades hídricas do cafeeiro

- **Evapotranspiração**

A evapotranspiração pode ser definida como a quantidade de água evaporada e transpirada por uma superfície com vegetal, durante determinado período, e inclui evaporação de água do solo, evaporação da água depositada por irrigação, chuva ou orvalho na superfície das folhas e transpiração vegetal. A evapotranspiração, para fins de irrigação, é expressa em mm/dia.

A quantidade de água evapotranspirada dependerá, principalmente, da planta, do solo e do clima, sendo este último o mais importante. Assim, a quantidade de água requerida por uma cultura varia com a extensão da área coberta pelo vegetal e com as estações do ano.

A maioria dos métodos de determinação da evapotranspiração estima o seu valor potencial, ou seja, aquele que ocorre em condições ideais para o desenvolvimento das plantas, desde fertilidade do solo, passando pela disponibilidade hídrica e pelas condições climáticas. Como as necessidades das culturas são bastantes particulares, a evapotranspiração potencial varia de acordo com a espécie cultivada. Por esse motivo foi necessário estabelecer uma cultura de referência para, a partir dela, ajustar a evapotranspiração das demais, originando-se, dessa maneira, a evapotranspiração de referência (ET_o) e a evapotranspiração da cultura (E_c).

- **Evapotranspiração de Referência (ET_o)**

Obter uma boa estimativa das necessidades hídricas de uma cultura é imprescindível para um dimensionamento e manejo adequados de qualquer sistema de irrigação (LÓPEZ et al., 1992).

A evapotranspiração é um fenômeno combinado, no qual a água é transferida da superfície terrestre para a atmosfera, em um processo que envolve a evaporação da água líquida da superfície do solo e da água interceptada pelas plantas mais a transpiração das plantas (JENSEN et al., 1990).

Com o intuito de padronizar o conceito de evapotranspiração para determinada região, de acordo com suas características climáticas, viu-se a necessidade de padronizar o conceito de evapotranspiração para uma cultura de referência. Doorenbos e Pruitt (1977) definiram a evapotranspiração de referência (ET_o) como a quantidade de água perdida por uma superfície de solo, coberta totalmente por grama, com altura uniforme de 8 a 15 cm, em crescimento ativo e sem restrições de água no solo. Já Jensen (1973) definiu a evapotranspiração de referência como a evapotranspiração que se verifica em uma cultura da alfafa, com 30 a 50 cm de altura e bordadura mínima de 100 m, cultivada sem deficiência hídrica.

Vários são os métodos utilizados para determinar a evapotranspiração de referência, dividindo-se em métodos diretos e métodos indiretos. Os métodos diretos de determinação da evapotranspiração envolvem equipamentos denominados lisímetros e parcelas experimentais, em que é feito o balanço hídrico, entre outros. Já os métodos indiretos são aqueles que envolvem elementos climáticos, utilizando-se modelos ou métodos teóricos e empíricos.

Lisímetros, ou evapotranspirômetros, são volumes de controle que devem ser bem impermeabilizados, podendo ser construídos de vários materiais, como concreto, amianto e plástico, dentre outros. São preenchidos com solo e devem ser localizados de forma a representar um ambiente específico. Tal método de estimativa da evapotranspiração fornece apenas as medições diretas e é freqüentemente utilizado para estimar os efeitos climáticos sobre a evapotranspiração e avaliar os procedimentos de estimativa

desta (DOORENBOS; PRUITT, 1977; JENSEN et al., 1990). Podem apresentar superfície nua ou cobertura vegetal, para determinação direta da água do solo nu ou da evapotranspiração da cultura (ET_c).

Outro método utilizado para a estimativa da evapotranspiração, sob condições de campo, é baseado na determinação da variação da umidade do solo. O balanço hídrico é um método que se caracteriza pela quantificação da entrada e saída de água no perfil do solo, em determinado intervalo de tempo, e tem-se demonstrado mais eficiente para programação da irrigação no nível de campo. A entrada é quantificada pela irrigação e precipitação efetivas, enquanto a saída é dada pela evapotranspiração, pela drenagem da água subsuperficial para o lençol freático e pelo escoamento superficial, sendo os dois últimos parâmetros considerados como excedente hídrico (BERNARDO, 1995). Embora outros métodos para determinação das necessidades de água da planta sejam considerados mais precisos, como a razão de “Bowen”, a correlação de “Eddies” e o fluxo de seiva, e possam ser preferidos por pesquisadores, em algumas situações, como no caso de culturas perenes, o método do balanço hídrico ainda é bastante útil para tais determinações (ANDRADE et al., 1998).

Existem vários métodos para determinação da umidade do solo. Podem-se destacar os métodos-padrão de estufa, das pesagens, de Bouyoucos, de Colman e tensiômetros como os mais utilizados (BERNARDO, 1995). De maneira geral, os mais visualizados em campo são os métodos-padrão de estufa e tensiômetros.

Os métodos indiretos são aqueles que envolvem o uso de modelos ou equações teóricas e empíricas. Segundo Jensen et al. (1990), existem uma série de modelos e equações para estimar a evapotranspiração de referência. Esses modelos variam de simples relações empíricas até complexos métodos baseados em processos físicos, como no caso do método combinado de Penman (1948). Porém, Monteith (1965) modificou o método original de Penman, generalizando o modelo por meio de analogia com a lei de Ohm para circuitos elétricos, introduzindo no termo aerodinâmico duas resistências à transferência de vapor d'água para a atmosfera: a resistência do dossel também chamada de resistência estomatal e a resistência aerodinâmica. A primeira é relacionada às características fisiológicas da planta e a segunda, ao

papel da turbulência atmosférica no processo de transporte do vapor d'água (AMATYA et al., 1995).

Devido, principalmente, à grande variabilidade das culturas de referência atualmente em uso, pesquisadores especialistas em evapotranspiração de diversos países concluíram que o conceito de evapotranspiração de referência (ET_o) apresentava problemas, levando a erros de sub e superestimativas dos principais métodos indiretos para estimativa da ET_o. Assim, os pesquisadores propuseram um novo conceito de ET_o, baseado na equação de Penman-Monteith, padronizada para os termos de resistência do dossel e resistência aerodinâmica às perdas no processo evaporativo (SMITH et al., 1991). Com isso, a ET_o é definida como a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica da superfície de 0,70 sm⁻¹ e albedo de 0,23, sem restrições de água, em que a equação de Penman-Monteith é recomendada como um dos métodos mais precisos para a estimativa da ET_o (SMITH et al., 1991).

A evapotranspiração forma o fundamento para o planejamento e desenho da maioria dos projetos de irrigação. É o ponto de partida na determinação das necessidades de armazenamento da água superficial ou no perfil do solo, na capacidade de descarga do sistema e nas operações de manejo em geral (JENSEN et al., 1990).

Os principais métodos indiretos, que utilizam modelos teóricos e empíricos para estimar a necessidade de água pela cultura, são baseados em dados climáticos. A metodologia de monitoramento do clima vem sendo mais utilizada em virtude da possibilidade de utilização de medidas de algumas de suas variáveis para estimar a evapotranspiração de uma cultura irrigada, que irá definir o consumo de água pela planta. Considerando uma disponibilidade inicial de água no solo, a determinação da evapotranspiração da cultura permite, a qualquer momento, definir a quantidade de água utilizada, possibilitando a identificação do momento da irrigação e a lâmina de água necessária (MANTOVANI, 1996).

Existem vários métodos ou técnicas para se estimar a ET_o a partir de dados meteorológicos, testados em diferentes condições climatológicas e geográficas. A escolha do método para cálculo da ET_o dependerá,

essencialmente, do tipo de dados climatológicos disponíveis na região em estudo (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

A determinação da evapotranspiração da cultura dependerá da ET_o e de coeficientes de ajustes determinados experimentalmente. Atualmente existem programas computacionais que promovem os cálculos de maneira prática e direta, dentre os quais se pode destacar o programa Irriga-Gesai.

- **Evapotranspiração da cultura (ET_c)**

Para determinar as necessidades hídricas da cultura, o método mais usual é baseado na estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c). A estimativa da ET_c envolve um processo que se desenvolve em duas etapas. Na primeira, estima-se a evapotranspiração de referência (ET_o), geralmente utilizando uma equação empírica de Penman-Monteith. Na segunda etapa, a ET_c é obtida multiplicando-se a ET_o por um coeficiente de cultura (K_c), que integra as características da cultura e do clima local (DOORENBOS; PRUITT, 1977). Esse K_c é um coeficiente adimensional dado pela relação entre a ET_c e a ET_o e pode variar de acordo com a textura e o teor de umidade do solo, com a profundidade e densidade do sistema radicular e com as características fenológicas da planta.

A ET_o deveria caracterizar a demanda evaporativa determinada pela condição meteorológica, e o K_c seria a medida do sistema solo planta para atender a tal demanda hídrica. Porém, várias pesquisas têm demonstrado que a ET_o não pode ser simplesmente estabelecida para todas as situações climáticas. Logo, os coeficientes de cultura devem ser determinados para cada estágio de desenvolvimento da cultura e em diferentes regiões de cultivo (GUTIÉRREZ; MEINZER, 1994; SEDIYAMA, 1996).

A evapotranspiração de determinada cultura nas condições normais (real) de campo:

$$ET_c_{aj} = ET_o \times k_c \times k_s \times k_l \quad (1)$$

em que:

ETc_{aj} = evapotranspiração da cultura ajustada;

ETo = evapotranspiração de referência, em mm/dia;

kc = coeficiente da cultura, de acordo com o estágio de desenvolvimento, adimensional;

ks = coeficiente de estresse, em função da variação de umidade no solo (0 a 1), adimensional; e

kl = coeficiente de localização, em função da porcentagem de área molhada e sombreada (0,2 a 1,0).

A evapotranspiração da cultura (no caso o cafeeiro) é o principal parâmetro para determinar a lâmina necessária de irrigação para a cultura. Ela poderá ser reduzida sem diminuir a eficiência de irrigação se não molhar toda a superfície do solo (irrigação localizada), o intervalo for grande entre irrigações e existir queda de folhas devido à ocorrência de doenças e pragas.

- **Coeficiente de cultura (Kc)**

O Kc é o coeficiente que corrige e ajusta a evapotranspiração para as condições da cultura. O valor do Kc de uma cultura é função da fase fenológica, do clima, do manejo, do estande de plantas (espaçamento, adensamento) etc. Os coeficientes de cultura, para uma planta cultivada sob diferentes condições climáticas e épocas de plantio, podem variar, já que os parâmetros locais (temperatura, umidade relativa, vento, radiação solar) e as variações fisiológicas e aerodinâmicas da cultura influenciam diretamente a evapotranspiração (PRUITT et al., 1972). Segundo Barbieri (1981), o Kc varia também de acordo com o método de estimativa da ETo.

A distribuição temporal do Kc, para cada ambiente irrigado, constitui uma curva denominada curva da cultura. Essa curva representa o efeito integrado da mudança na área da folha, da altura da planta do grau de cobertura, da resistência do dossel da planta e do albedo sobre a ETc em relação a ETo (SEDIYAMA, 1996).

Para a maioria das culturas anuais, o valor de K_c aumenta a partir de pequeno valor no momento da emergência até um limite máximo no período em que é alcançado seu pleno desenvolvimento e diminui proporcionalmente à medida que atinge a maturação (DOORENBOS; KASSAN, 1979). Segundo esses mesmos autores, para as culturas perenes, como no caso do cafeeiro, a curva de K_c apresenta valores baixos nos períodos de formação e estabelecimento da cultura. Quando a cultura atinge um dossel máximo, a curva de K_c tende a se estabilizar com valores máximos próximos à unidade, ocorrendo oscilações temporais decorrentes de processos fisiológicos e de manejo da cultura.

Segundo Bonomo (1999), estimativas de K_c para cafeeiros cultivados em várias regiões do mundo apresentam uma faixa típica de 0,7 a 0,8, ressaltando-se que, em geral, essas estimativas têm sido obtidas por métodos hidrológicos, ou avaliando a variação de umidade do solo. Pereira (1957), citado por Gutierrez e Meinzer (1994), afirmou que os valores de K_c para cafeeiros cultivados no Quênia variaram sazonalmente de 0,5 durante a estação seca a 0,8 na estação úmida. De acordo com os referidos autores, Wallis (1963) e depois Blore (1966), trabalhando com a variação de umidade no solo para estimar a necessidade hídrica do cafeeiro no Quênia, encontraram valores de K_c de 0,6 e 0,7 em culturas não-irrigadas e irrigadas, respectivamente.

Gutierrez e Meinzer (1994) determinaram o K_c no cafeeiro de 0,7 a 0,8 em várias idades, exceto naquelas em que as plantas se encontravam com baixos valores de índice de área foliar. Verificaram que o cafeeiro apresentava diferenças sazonais anuais no uso de água e nos valores de K_c .

- **Coeficiente de estresse hídrico (K_s)**

O coeficiente de estresse hídrico (K_s) promove o ajuste da evapotranspiração potencial para a evapotranspiração da cultura em função do nível de umidade atual do solo ao longo do ciclo de desenvolvimento. O programa IRRIGA-GESAI utiliza três modelos de determinação do K_s descritos a seguir (BERNARDO, 1995):

– k_s unitário ($k_s = 1$), utilizado para turnos de rega muito reduzidos (umidade sempre próxima à capacidade de campo);

– k_s linear (modelo linear), a partir da equação 2:

$$k_s = \frac{(U_a - PM)}{(CC - PM)} \quad (2)$$

– k_s logarítmico (modelo logarítmico), a partir da equação 3:

$$k_s = \frac{\ln[(U_a - PM) + 1]}{\ln[(CC - PM) + 1]} \quad (3)$$

em que:

k_s = coeficiente de estresse em função da umidade atual do solo;

U_a = umidade atual do solo, em %;

PM = ponto de murcha permanente, em %; e

CC = capacidade de campo, em %.

Na Figura 1, apresenta-se o comportamento dos valores de K_s pelos modelos (logarítmico e linear), em função da variação da % de água disponível no solo.

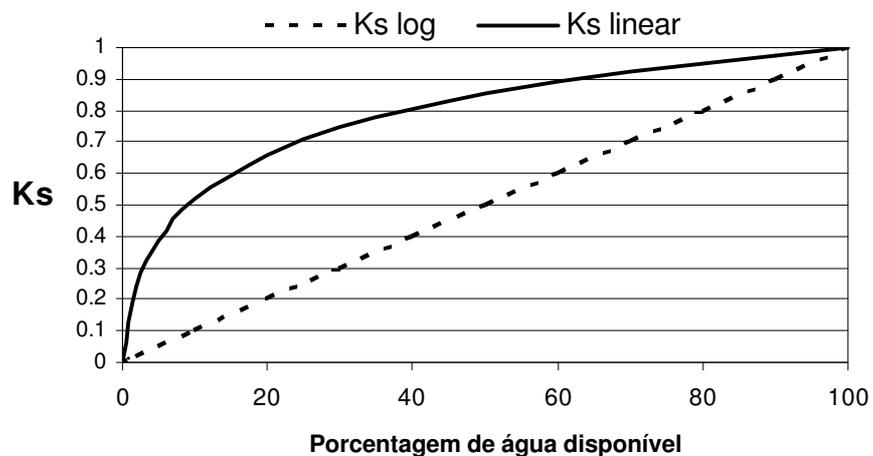


Figura 1 – Curvas do coeficiente de estresse hídrico (K_s) em função da porcentagem da água disponível no solo.

Coeficiente de localização (KI), porcentagem de área molhada (PAM) e porcentagem de área sombreada (PAS)

O método de irrigação localizada aplica água de forma pontual, mas não irriga toda a área, promovendo queda da evapotranspiração direta da água do solo e aumento da transpiração em função da manutenção da umidade do solo sempre próximo à capacidade de campo. A magnitude dessa diminuição dependerá de várias características das partes transpirantes das plantas, como: massa foliar, superfície total das folhas e volume da copa, entre outras (HERNANDEZ ABREU et al., 1987; PIZARRO, 1990).

Em irrigação localizada é necessário, assim, fazer uma correção na evapotranspiração da cultura (ET_c), determinada nos demais sistemas de irrigação (SOARES, 1998). Em média, a irrigação localizada molha apenas de 1/3 a 2/3 da área. Portanto, necessita de correção devido à localização, que consiste em multiplicar a ET_c por um coeficiente de ajuste específico (KI).

Alguns pesquisadores desenvolveram coeficientes de localização (KI) para ajustar a evapotranspiração gerada a partir da irrigação total em evapotranspiração promovida a partir de irrigação pontual.

Têm-se proposto numerosos procedimentos para corrigir a ET_c devido ao efeito da localização. Dentre eles, têm-se, também, selecionado como mais práticos aqueles que se baseiam na porcentagem de área sombreada, que é definida como a fração da superfície do solo sombreada pela cobertura vegetal ao meio-dia no solstício de verão, em relação à superfície total (PIZARRO, 1990). Assim, a correção devido à localização consiste em multiplicar a ET_c por um coeficiente de localização (KI), cujo valor depende da porcentagem de área sombreada definida anteriormente.

Um dos fatores importantes a considerar no cálculo de um projeto de irrigação localizada é a proporção da superfície ou volume de solo que deve ser umedecido em relação à superfície total. Essa proporção designa-se porcentagem de área molhada (PAM) (KELLER; KARMELI, 1975; VERMEIREN; JOBLING, 1980).

Diversos autores têm estudado a relação entre KI e a porcentagem de área sombreada e, ou, molhada, obtendo as mais variadas equações. A seguir

são apresentadas algumas equações, propostas por diversos autores, para a determinação de Kl :

Keller (1978):

$$Kl = (P/100) + 0,15(1 - (P/100)) \quad (4)$$

Keller e Bliesner (1990):

$$Kl = 0,1\sqrt{P} \quad (5)$$

Keller e Karmeli (1975):

$$Kl = \frac{(P/100)}{0,85} \quad (6)$$

Fereres (VILLALOBOS; FERERES, 1990):

$$\text{Se, } P \geq 65\% \rightarrow Kl = 1,0 \quad (7)$$

$$\text{Se, } 20\% < P < 65\% \rightarrow Kl = 1,08667(P/100) + 0,2998889 \quad (8)$$

$$\text{Se, } P \leq 20\% \rightarrow Kl = 1,94(P/100) + 0,1 \quad (9)$$

Aljibury et al. (1974), citados por Hernandez Abreu et al. (1987):

$$Kl = 1,34(P/100) \quad (10)$$

Vermeiren e Jobling (1980):

$$Kl = 0,1 + (P/100) \quad (11)$$

Hoare et al. (1974), citados por Hernandez Abreu et al. (1987):

$$Kl = P + 0,5(1 - (P/100)) \quad (12)$$

Em todas as equações, P representa o valor da porcentagem de área sombreada (PAS) ou a porcentagem de área molhada (PAM), sendo utilizado sempre o maior valor entre os dois.

Esses métodos supõem que a evapotranspiração na área sombreada se comporta quase igual à evapotranspiração da superfície de um solo sob irrigação convencional, enquanto a área não sombreada elimina água com uma intensidade muito menor. As equações propostas por Hoare et al. (1974), citados por Hernandez Abreu et al. (1987) e Keller (1978), indicaram a

influência da parte sombreada (P) e da não-sombreada (1 - P) pela cultura no valor de KI.

Segundo Pizarro (1990), uma crítica que se pode fazer a essas equações é que em todas elas, com exceção das propostas por Fereres (1981) e Keller e Bliesner (1990), a relação entre KI e P é linear. Trabalhos conduzidos na Califórnia por Fereres (1981), com as culturas da amendoeira e do pessegueiro, evidenciaram que tal relação não se cumpre e que, para pequenos valores de P, as necessidades calculadas podem ser menores que as reais.

Em alguns métodos, para maiores valores de P têm-se valores de KI maiores que 1. Nesses casos, deve-se considerar o valor de KI igual a 1. E, no caso de ausência de cultivo (P = 0), algumas equações fornecem valores não nulos de KI. Por essas razões é recomendável, ao aplicar essas equações, não perder de vista o seu significado real.

Na determinação da porcentagem de área molhada, têm-se dois casos a considerar: (i) quando se irriga uma faixa contínua do solo, o que é mais comum nos cultivos com menores espaçamentos entre plantas; (ii) quando se irriga por árvore, ou seja, não se formará uma faixa molhada contínua, mas sim áreas molhadas distintas por árvore, esse processo é usado em cultivos com maiores espaçamentos entre covas, como pomares (BERNARDO, 1995).

A porcentagem de área molhada depende do volume e da vazão em cada ponto de emissão, do espaçamento entre emissores e do tipo de solo que está sendo irrigado (KELLER; KARMELI, 1975; VERMEIREN; JOBLING, 1980; KELLER; BLIESNER, 1990; PIZARRO, 1990).

De acordo com Pizarro (1990), valores elevados de PAM aumentam a segurança do sistema, sobretudo em caso de avaria na instalação ou situações de extrema evapotranspiração. Entretanto, ao aumentar-se PAM, geralmente aumenta-se também o custo de implantação do sistema. Enfim, pode-se dizer que, quanto maior o intervalo entre irrigações, maior o risco no caso de um valor de PAM muito próximo do mínimo. Assim, para efeito de dimensionamento é necessário usar um valor mínimo prestabelecido para a porcentagem de área molhada. Segundo Pizarro (1990), valores de PAM na ordem de 30 a 40% podem ser suficientes.

Keller (1978) aconselhou, para árvores, valores de PAM superiores a 20%, em zonas com altas precipitações e solos de textura média a argilosa, onde a irrigação é aplicada durante os períodos de seca (geralmente curtos), e entre 33 e 50% em zonas com baixas precipitações. Já San Juan (1988) afirmou que é comprovado o aumento de produção quando se irriga mais de 50% do volume ocupado pelas raízes.

Para plantios mais espaçados, Keller e Bliesner (1990) recomendaram valores de PAM entre 33 e 67%, afirmando que em regiões com considerável suprimento de chuvas valores menores que 33% são aceitáveis para solos de textura média a argilosa. Esses referidos autores consideram que valores de PAM superiores a 33% promovem desenvolvimento satisfatório do sistema radicular das plantas.

Merriam e Keller (1978) estabeleceram que a área molhada seja medida a 30 cm de profundidade, e, posteriormente, Hernandez Abreu et al. (1987) sugeriram que essa medida fosse realizada na profundidade em que a densidade radicular fosse máxima.

Um aspecto que deve ser observado no dimensionamento é que, quanto maior o volume de solo molhado e, portanto, o explorado pelas raízes, menor a possibilidade de se produzir um estresse hídrico pelo aumento da reserva de água no solo (VERMEIREN; JOBLING, 1980).

Mantovani e Soares (2003), citando trabalhos relacionados ao manejo da irrigação do cafeeiro, recomendaram os modelos de Keller (1978) e Fereres (1981), sendo o primeiro para sistemas de plantio adensado (colheita manual) e o segundo para o plantio mecanizado.

Na Figura 2, apresenta-se o comportamento dos modelos de Keller (1978) e Fereres (1981) e também do modelo de Keller-Bliesner (1990), de comportamento intermediário entre os outros dois.

França Neto (2003), analisando a sensibilidade relativa da lâmina bruta de irrigação, em cafeeiros irrigados por gotejamento, ao coeficiente de localização (KI), demonstrou ser este um dos mais importantes fatores na estimativa da lâmina bruta de irrigação. Quando se utiliza a metodologia de Fereres para a estimativa do KI, com relação ao método de Keller, a variação do erro relativo é muito alta, 34%.

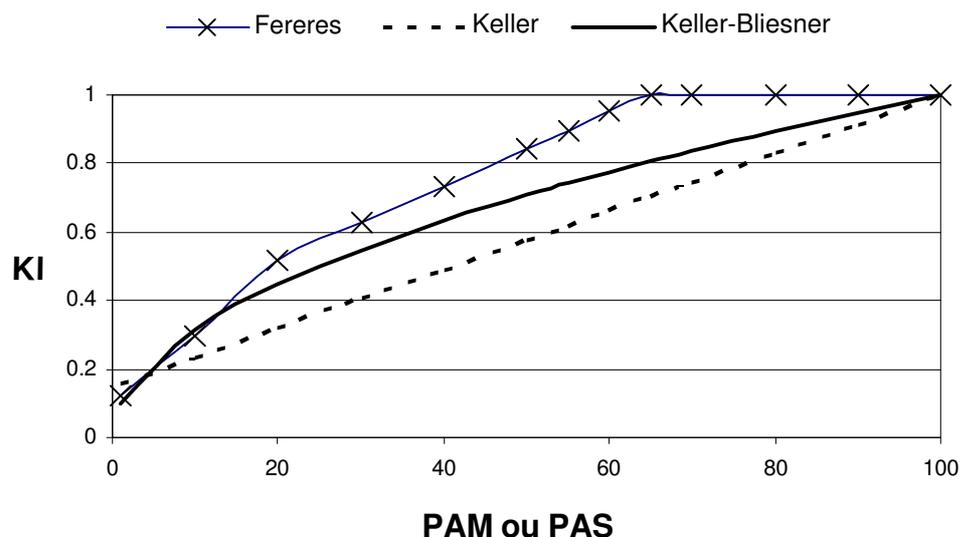


Figura 2 – Curvas de coeficientes de localização propostas por Keller, Fereres e Keller-Bliesner em função da porcentagem da área molhada (PAM) e, ou, da área sombreada (PAS).

3.5. A irrigação na cafeicultura

A irrigação visa, sobretudo, suprir as necessidades hídricas das plantas. Não funciona em separado, mas integrada a outras práticas agrícolas, de forma a beneficiar a cultura e o produtor em particular. É necessária em regiões onde o regime pluvial não atende às necessidades das plantas durante todo o seu ciclo ou em parte dele, permitindo ampliar o tempo de exploração, o número de colheitas ou, ainda, melhorar a produção já existente.

Vários sistemas de irrigação podem ser usados em cafezais, destacando-se irrigação localizada por gotejamento, irrigação por aspersão convencional, autopropelido, pivô central e sistemas simplificados com mangueiras simples ou perfuradas. Na escolha do sistema de irrigação para cafezais devem ser considerados, principalmente, o custo dos equipamentos, os gastos operacionais, a disponibilidade e qualidade da água e a alternativa de aumento de produção (BONOMO, 1999).

Araújo (1982) observou que uma população de cafeeiros da variedade Icatu (H-4782-7) irrigados por gotejamento apresentava maior uniformidade na maturação dos grãos, apresentando menor quantidade de grãos verdes, em comparação com tratamentos não-irrigados.

Os melhores períodos para a irrigação, ou seja, o que gera melhores produtividades em cafeeiros Conilon no Espírito Santo, são aqueles compreendidos entre o abotoamento da floração (março a agosto) e o da floração ao pegamento de frutos (julho a outubro) (SARAIVA; SILVEIRA, 1995).

3.6. Irrigação localizada

A irrigação localizada pode ser caracterizada pelas formas de irrigação em que a água é aplicada diretamente sobre a região radicular, com pequena intensidade e alta frequência, enquadrando-se as irrigações por gotejamento e microaspersão. A irrigação por gotejamento é realizada por meio de tubos perfurados com orifícios de diâmetros reduzidos ou por meio de gotejadores, conectados em tubulações flexíveis de polietileno, operando com pressões variando de 50 KPa a 250 KPa. O sistema de irrigação por gotejamento permite aplicações freqüentes de pequenas quantidades de água, ajustadas muito próximas da taxa de absorção de água pelas plantas. Um sistema de gotejamento bem planejado pode proporcionar, praticamente constante, uma baixa tensão da água do solo em grande parte da rizosfera, gerando uma boa eficiência de aproveitamento de água, a uma melhor condução e distribuição desta na rizosfera (BERNARDO, 1995).

A evapotranspiração de uma cultura que tenha cobertura vegetal completa ou quase completa – por exemplo as hortaliças e outros cultivos arbóreos maduros com pequenos espaçamentos – será pouco afetada por esse método de irrigação, a não ser que se pratique uma irrigação insuficiente. Somente no caso das culturas bem espaçadas e pomares jovens, há uma redução na ET_c , já que se molhará pequena proporção da superfície do solo e a evaporação se limitará à zona que se mantém úmida, próxima de cada planta ou árvore. Em caso de pomares jovens com cobertura vegetal de 20 a 30% e em solos arenosos leves e em condições de elevada evaporação que requerem irrigações muito freqüentes, observou redução da ET_c de até 60% em comparação com os sistemas de irrigação por superfície e por aspersão. Essa diminuição da ET_c será consideravelmente inferior nos casos de solos de textura média a pesada, ou quando existir demanda evaporativa baixa que requeira irrigações muito menos freqüentes.

No caso de culturas de pequeno espaçamento, as necessidades hídricas das culturas poderão ser estimadas, utilizando-se os métodos descritos sem aplicar nenhum fator de correção ou redução. A irrigação localizada é utilizada principalmente em pomares e em cultivos em linha, em que somente uma parte da área está totalmente ocupada pelas plantas. A folhagem dessas plantas, quando jovens e muito separadas, não intercepta mais que uma parte da radiação incidente. Na irrigação por faixa, inundação intermitente ou por aspersão, toda a superfície que não cobre a cultura e que é molhada pela irrigação sofre uma perda de água, devido à evaporação do solo e à transpiração de ervas daninhas, sem nenhum benefício para a cultura. As cifras das necessidades hídricas determinadas pelos métodos de irrigação tradicional incluem essas perdas. Deve-se, entretanto, ao calcular as necessidades hídricas das culturas na irrigação localizada, aplicar a estas cifras um coeficiente de redução K_r , ou coeficiente de cobertura (VERMEIREN; JOBLING, 1980).

Dentre as muitas vantagens citadas por Bernardo (1995) para a irrigação localizada, uma das mais importantes é a eficiência no uso da água. Isso porque os sistemas de irrigação localizada permitem melhor controle da lâmina de água aplicada, diminuem as perdas por evaporação e arrastamento pelo vento e minimizam as perdas por percolação, normalmente não há perdas por escoamento superficial. Entretanto, se o manejo e a operação desses sistemas não forem executados com um controle eficiente e racional, eles podem vir a apresentar baixas eficiências de irrigação, situação observada em muitos projetos em operação no Brasil.

Camp (1997) citou os benefícios da irrigação por gotejamento no que se refere à alta uniformidade de aplicação de água, gerando com isso alta eficiência de aplicação, além da baixa possibilidade de contaminação de aquíferos quando se aplicam produtos químicos via água de irrigação.

Como comentado anteriormente na irrigação localizada, somente uma parte da superfície do solo é molhada; em conseqüência, reduz-se a evapotranspiração da cultura (ET_c), sendo necessária a utilização do coeficiente de localização (K_l) para ajustar o valor da evapotranspiração e da quantidade de água a ser aplicada.

3.7. O manejo da irrigação

Um aspecto importante relacionado à irrigação é o manejo da água, objetivando-se aplicá-la na quantidade correta e no momento ideal, evitando, assim, que ocorra perda de água por percolação e de nutrientes por lixiviação ou que a planta não atinja a produtividade desejada.

O manejo racional de qualquer projeto de irrigação deve considerar os aspectos sociais e ecológicos da região e procurar maximizar a produtividade e a eficiência do uso da água e minimizar custos, mantendo as condições de umidade do solo e de fitossanidade favoráveis ao bom desenvolvimento da cultura irrigada. O manejo correto da irrigação envolve a definição das datas e das lâminas de irrigação a serem aplicadas, estabelecimento de metas de eficiência de aplicação de água para o sistema de irrigação e manutenção preventiva e corretiva desses sistemas. A lâmina e a data de irrigação podem ser obtidas do balanço hídrico no solo, sendo considerados a evapotranspiração da cultura, o escoamento superficial, a percolação, as irrigações e as precipitações.

O manejo da irrigação, aliado às práticas agrícolas de condução da cultura, constitui base para a garantia de sustentabilidade na produtividade e rentabilidade da lavoura cafeeira. Um bom programa de manejo de irrigação deve levar em consideração a época de plantio, o espaçamento, características de crescimento e desenvolvimento das culturas, informações detalhadas do sistema de irrigação e sua condição de operação, as variáveis climáticas diárias, análises fitopatológicas e entomológicas, adubação, plantas daninhas, manejo da cultura, colheita etc. Deve também observar a interação de todos os fatores com a condução de maneira operacional e simplificada, em nível de campo.

Quando realizado de forma pouco tecnicizada, observa-se a aplicação de lâminas de irrigação inadequadas à cultura, possibilitando redução na produtividade e na qualidade do produto pelo déficit hídrico ou desperdício de água e energia, lixiviação de nutrientes e riscos de contaminação de lençóis freáticos pela aplicação de lâminas de irrigação em excesso.

A implementação de um programa de manejo de irrigação apresenta várias vantagens, destacando-se: aumento da produtividade, da qualidade do

produto e da rentabilidade, otimização da utilização da mão-de-obra, energia elétrica, nutrientes e outros insumos, além da preservação do meio ambiente.

Por não adotar um método de controle da irrigação, o produtor rural usualmente irriga em excesso, temendo que a cultura sofra estresse hídrico, o que pode comprometer a produção. Esse excesso tem como consequência o desperdício de energia e de água, usados em um bombeamento desnecessário. Segundo estudo realizado pela Cemig (1993), se a irrigação fosse utilizada de forma racional, aproximadamente 20% da água e 30% da energia consumida seriam economizadas; sendo 20% da energia economizada devido à aplicação desnecessária da água e 10% devido ao redimensionamento e otimização dos equipamentos utilizados para a irrigação.

Na região do Cerrado de Minas Gerais, apenas 28,33% dos cafeicultores faziam avaliação da eficiência da irrigação, enquanto o manejo correto é praticado por 38,33% (RABELO et al., 2004).

A eficiência de um equipamento de irrigação é conceito largamente utilizado, tanto em projetos quanto no manejo de sistemas de irrigação. Segundo Keller e Bliesner (1990), o conceito de eficiência pode ser dividido em dois aspectos básicos: a uniformidade de aplicação e as perdas que podem ocorrer durante a operação do sistema. Para que a eficiência possa atingir valores altos, é necessário que as perdas durante a operação sejam as menores possíveis e a uniformidade de aplicação, a maior possível.

As perdas durante a operação são caracterizadas pelas perdas de água pela evaporação e arrastamento, como é o caso de irrigação por aspersão, além das perdas por vazamentos nas tubulações que compõem o sistema.

A perda de água por evaporação e o arrastamento em irrigação localizada são considerados desprezíveis, visto a aplicação localizada e pontual da lâmina de irrigação.

A perda de água por vazamento é função das condições de manutenção do projeto. Em condições de boa manutenção, elas são menores que 1%. Entretanto, em sistemas com manutenção inadequada esse valor pode chegar a 10%, ou seja, a eficiência de condução de água (E_c) será somente de 90%. Essas perdas ocorrem, principalmente, nos acoplamentos da tubulação.

De acordo com Bernardo (1995), um dos principais fatores para se determinarem as condições de operação de um sistema de irrigação é a determinação da uniformidade de aplicação de água sobre a área irrigada.

A uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação por gotejamento pode ser expressa por meio de vários coeficientes. O principal parâmetro que descreve a uniformidade da irrigação é o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC).

Conhecendo as vazões dos gotejadores (PIZARRO, 1990), pode-se calcular a uniformidade de distribuição do sistema, por meio de várias equações. O uso da equação de Christiansen permite a obtenção de resultados bastante confiáveis, porém ele requer a medição da vazão de todos os gotejadores do sistema, o que demanda muito tempo e muita mão-de-obra, assumindo-se a seguinte forma:

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum |q_i - \bar{q}|}{n \cdot \bar{q}} \right)$$

em que:

CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen (%);

q_i = vazão de cada gotejador (L/h);

\bar{q} = vazão média dos gotejadores (L/h); e

n = número de gotejadores.

Para simplificar o trabalho e o tempo necessários, recomenda-se determinar o CUC por linha, escolhendo, ao acaso, quatro linhas laterais em cada unidade operacional. A estimativa do CUC do sistema será a média dos CUCs das linhas. Nesse caso, tornar-se menos laboriosa a determinação, e com resultados confiáveis.

Keller e Karmeli (1975) sugeriram o uso de no mínimo 16 pontos de coleta da vazão dos gotejadores, distribuídos em quatro linhas laterais e em quatro pontos ao acaso, distribuídos ao longo da linha. Denículi et al. (1980) também recomendaram a utilização de quatro linhas laterais, porém com

utilização de oito pontos distribuídos ao longo da linha lateral, como forma de contornar a limitação do número de pontos imposta pela metodologia apresentada por Keller e Karmeli (1975).

3.8. O programa computacional Irriga-Gesai

Uma ferramenta de auxílio ao manejo da irrigação é a utilização de modelos, dos mais simples aos mais sofisticados, que representam o sistema de produção agrícola, descrevendo os processos físicos e biológicos, por meio de equações matemáticas. Os modelos visam sintetizar o conhecimento científico de acordo com a sua especificidade, podendo ser utilizados no manejo da irrigação (COSTA, 1997). Dentro desse contexto está o programa Irriga-Gesai, um sistema de suporte à decisão na área da agricultura irrigada, indicando, entre outras informações, o momento de irrigar, a lâmina da irrigação, a qualidade da irrigação e o consumo de energia. O Irriga-Gesai, juntamente com a utilização de estações meteorológicas automáticas, vem permitindo a obtenção de resultados adequados para a tomada de decisão de quando e quanto irrigar. Além da utilização no manejo da irrigação, o programa pode auxiliar outras atividades, como na determinação da época ideal de plantio, planejamento das atividades através de simulações e monitoramento do risco de ocorrência de doenças, através de seus vários módulos.

No programa estão disponíveis as mais modernas técnicas aplicadas à agricultura, ou seja, ferramentas para o planejamento da exploração racional e auto-sustentada da propriedade agrícola, adaptadas às condições brasileiras, permitindo um manejo integrado das culturas agrícolas, tanto das anuais quanto das perenes. Uma vez implantado, é uma ferramenta de fácil utilização e controle do momento adequado para irrigar, e a lâmina ou tempo de irrigação necessários e também relacionados à avaliação e definição das condições de distribuição de água e perdas do sistema de irrigação.

O sistema também disponibiliza uma ferramenta para criação de cenários, com possibilidade de auxiliar estudos de demanda hídrica, de consumo de água e energia, intervalo entre irrigações para qualquer cultura, tipo de solo, sistema de irrigação e região do Brasil. Dispõe de um banco de

dados amplo, que incorpora dados diários de cerca de 500 estações meteorológicas de todo o Brasil.

Através da utilização do programa Irriga-Gesai, podem-se conhecer, de maneira rápida e simplificada, as necessidades hídricas da cultura no momento de interesse, fornecendo os valores de evapotranspiração-referência, evapotranspiração da cultura e os demais coeficientes necessários para os procedimentos de cálculo. Para tanto, é preciso cadastrar as características de solo, cultura, qualidade de água e informações meteorológicas diárias no programa.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado na Fazenda Juliana, situada a 18°43'S, 47°30'W e 870 m de altitude, no município de Monte Carmelo, Minas Gerais. A fazenda foi selecionada, entre outras na região, tanto pelo fato de o município de Monte Carmelo representar bem a região quanto pelo extenso banco de dados de manejo da cultura e da irrigação que dispõe. Na Figura 3, apresenta-se o comportamento da evapotranspiração de referência (ET_o) em alguns municípios do Cerrado de Minas Gerais, demonstrando haver boa representatividade nas análises de uma fazenda situada no referido município, visto que não há variabilidade acentuada no comportamento da ET_o. O mesmo acontece com a temperatura média, a umidade relativa do ar, a velocidade do vento, a radiação solar e a precipitação (Figura 1AB).

A Fazenda Juliana possuía 200 ha cultivados com cafeeiros irrigados por gotejamento da variedade Catuaí, em diferentes idades, sendo os mais velhos plantados em 1995 e os mais jovens, em 2001. Os cafeeiros estavam cultivados nos espaçamentos de 3,80 x 0,80 m e 4 x 0,70 m.

A cultura foi conduzida segundo padrões ótimos, baseados em expectativas de altas produtividades. De acordo com o calendário específico programado, amostras de solo e folhas eram coletadas para determinação dos níveis de fertilidade no solo e estado nutricional das plantas, servindo de base

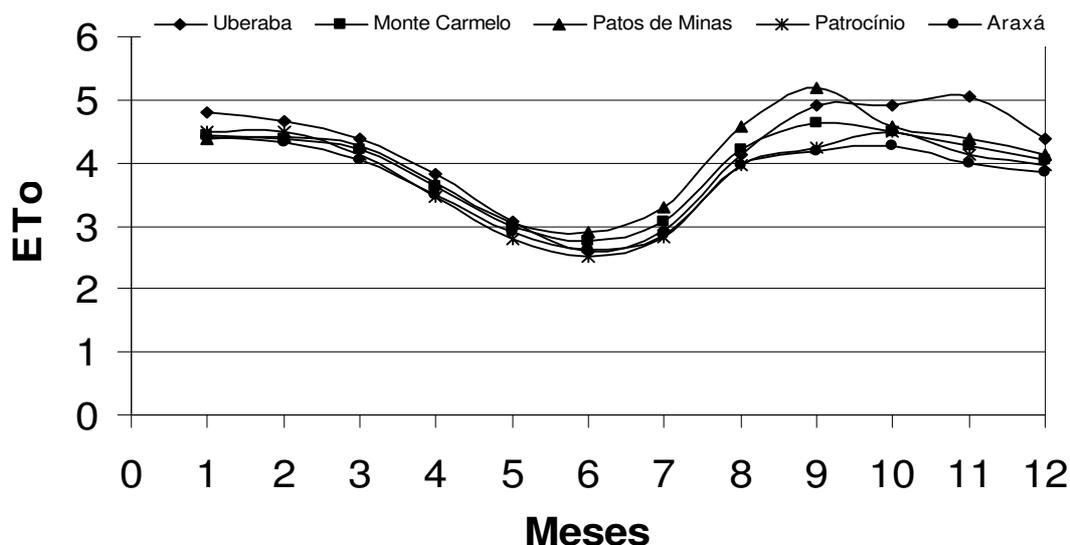


Figura 3 – Comportamento da ETo ao longo do ano nos municípios de Uberaba, Monte Carmelo, Patos de Minas, Patrocínio e Araxá.

para as recomendações das fertilizações. Tratamentos fitossanitários preventivos e curativos para o controle de pragas e doenças foram procedidos conforme acompanhamento técnico especializado.

Desde o ano de 2001 foram coletados dados detalhados referentes às produtividades de cada setor; análises de fertilidade de solo e tecido foliar; fertilizações de solo e foliares; controle de doenças, pragas e plantas daninhas; manejo de solo; levantamento de custos de produção; leituras de tensiômetros instalados; informações meteorológicas diárias locais; irrigações realizadas; idade dos cafeeiros; e informações complementares, servindo de sustentação para a discussão de resultados posteriores.

O equipamento de irrigação foi instalado em julho de 2001, composto por gotejadores que aplicam água a uma pressão de serviço de 20 mca, diâmetro do bocal de 1 mm, vazão de 2,2 e 3,4 Lh⁻¹, com espaçamento entre emissores de 0,75 e 1 m, além de espaçamento entre linhas laterais de 3,8 e 4 m, dependendo do espaçamento entre a cultura. O equipamento de irrigação estava disposto na área nos espaçamentos de 3,80 m entre fileiras e 1 m entre gotejadores com vazão de 3,4 L.h⁻¹, além de 4 m entre fileiras e 0,75 m entre gotejadores com vazão de 2,2 L.h⁻¹. Foram realizadas determinações de

campo, com a ressalva de que em ambos os espaçamentos utilizados para o equipamento de irrigação a porcentagem de área molhada (PAM) foi de 25%.

A propriedade possui três pontos de bombeamento, em que os setores de irrigação são distribuídos ao longo desses pontos e cada setor contém diversos sub-setores. O sistema de acionamento dos conjuntos de irrigação em cada subsetor é constituído por válvulas solenóides de controle automático que respondem a comandos elétricos, localizados no cabeçal de controle e previamente programados, enviados pelos gerenciadores de irrigação.

A aplicação de fertilizantes é feita via água de irrigação, segundo recomendação prévia de dosagens e parcelamentos. Após cada fertirrigação, realizava-se uma limpeza dos tubos gotejadores por continuidade da irrigação, sem a aplicação de fertilizantes, por um período de 30 minutos, e logo em seguida era feita a abertura dos finais de linha, para completar os procedimentos básicos de limpeza dos tubos gotejadores.

O sistema de irrigação era periodicamente avaliado para determinação da uniformidade de distribuição de água, ressaltando-se que avaliações realizadas em fevereiro de 2004 indicaram resultados excelentes em todos os subsetores. Periodicamente era realizada a limpeza química do sistema, através de tratamentos à base de produtos clorados associados a ácidos.

A área destinada às análises compreendeu um total de 156 ha, distribuídos em seis setores, totalizando 35 subsetores.

Em cada setor foram coletadas amostras de solo das profundidades de 0-30 cm e 30-60 cm e encaminhadas para laboratório, onde se realizaram análises físico-hídricas de cada amostra. Com as informações provenientes dessas análises foram estabelecidas curvas de retenção de umidade do solo, utilizando-se o software Soil Water Retention Curve versão 3.00 (DOURADO NETO, 2000).

4.2. Coeficiente de localização (KI) de campo

Para a determinação do coeficiente de localização (KI) de campo foi analisado, no banco de dados da Fazenda Juliana, o consumo hídrico, ao longo do ano, dos cafeeiros cultivados em diferentes idades. Como descrito

anteriormente, esse consumo pode ser conhecido pela determinação da evapotranspiração da cultura (ETc), segundo a equação 13.

$$ETc \text{ (campo)} = ETo \times Kc \times Ks_{\text{(médio)}} \times Kl_{\text{(campo)}} \quad (13)$$

em que:

ETc (campo) = evapotranspiração da cultura em campo, no período analisado;

ETo = somatório da evapotranspiração de referência, no período analisado;

Kc = coeficiente de cultura nas fases do cafeeiro no período analisado;

Ks (médio) = média dos Ks, no período analisado; e

Kl (campo) = Kl observado em condições de campo, no período analisado.

Determinados os valores que influenciam a ETc como ETo, Kc e Ks, foi possível encontrar o Kl.

A determinação da ETc em campo foi baseada em leituras diárias de tensiômetros que indicavam umidades no solo, sendo as variações diárias de umidade interpretadas como consumo de água pela cultura, ou evapotranspiração da cultura, desde que não estivesse ocorrendo percolação de água abaixo das raízes potencialmente absorventes das plantas. Foram cadastradas as leituras de tensiômetros no período de junho de 2001 a junho de 2004, sendo analisados quatro setores, totalizando 18 subsetores da fazenda.

Eventualmente, verificaram-se incoerências nas leituras dos tensiômetros, devido ao comportamento da retenção de água pelo solo, ou mesmo pelo desempenho dos tensiômetros. As análises foram processadas em períodos com duração média de um mês e meio, visando eliminar comportamento irregular dos tensiômetros em dias ao acaso.

Com uma checagem criteriosa dos dados de leitura foram selecionados para análise períodos em que existisse continuidade de leituras, bem como ausência de períodos com alta precipitação. Períodos com alta variabilidade das leituras, gerando dados completamente inesperados, foram descartados

dessas análises, por não apresentarem confiabilidade necessária. Os períodos chuvosos também foram descartados das análises devido ao fato de a existência de precipitações sucessivas poder gerar escoamento superficial e infiltração da água abaixo da zona potencial de absorção radicular, não representando o consumo hídrico da cultura, mas tendendo a superestimar esse consumo.

As precipitações em excesso podem, além de causar escoamento superficial e percolação de água abaixo da profundidade radicular, elevar o lençol freático, fazendo com que a umidade seja alterada nos pontos de leituras dos tensiômetros e mascarando as análises, não evidenciando o real consumo de água pela cultura. Em alguns períodos de análise foram verificadas leituras abaixo da profundidade radicular de 30-60 cm, instalando-se tensiômetros a 90 cm de profundidade. As leituras indicaram não haver movimento de água no solo em tal profundidade, garantindo a inexistência de percolação ou elevação de lençol freático.

As leituras diárias dos tensiômetros foram cadastradas no programa Irriga-Gesai. Pelo cadastro prévio das equações de curvas de retenção dos setores analisados no programa, as leituras de tensão foram convertidas automaticamente em umidade do solo, gerando neste déficit de água, expresso em milímetros, a ser repostado para atingir a umidade do solo à capacidade de campo. Diariamente, esse déficit era acrescido devido ao consumo hídrico da cultura, desde que não ocorressem precipitações ou irrigações.

A evapotranspiração da cultura pôde ser conhecida determinando-se a variação do déficit de água no solo, acrescido dos valores referentes a irrigações e precipitações efetivas.

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi determinada através da equação-padrão de Penman–Monteith (ALLEN et al., 1998). O K_c foi utilizado conforme as fases do cafeeiro nos períodos em análise e o K_s, calculado pelo método logarítmico. Assim, o coeficiente de localização de campo foi definido.

$$Kl_{(\text{campo})} = \frac{(\text{Déficit de Água Solo}(\text{mm}) + \text{Irrigação}(\text{mm}) + \text{Precipitação}(\text{mm}))}{ET_o \times K_c \times K_{s(\text{médio})}} \quad (14)$$

Com os valores de $KI_{(campo)}$ de todos os setores nos períodos analisados foi possível estabelecer um valor médio, verificando-se, estatisticamente, qual metodologia se adapta melhor aos valores encontrados em campo. Foram realizadas análise de variância e teste T para determinar quais metodologias estimavam melhor os valores reais encontrados em campo, estabelecendo-se comparações com as metodologias propostas por Keller (1978), Fereres (1990) e Keller-Bliesner (1990). As metodologias de Keller e Fereres são comumente utilizadas em manejo da irrigação para determinação dos valores de KI , levando-se em consideração a porcentagem de área molhada ou sombreada pela cultura. Atualmente, a metodologia de Keller tem sido empregada em plantios adensados de cafeeiros e a de Fereres, em plantios que favorecem a mecanização da lavoura. A metodologia de Fereres, até o momento, estava sendo recomendada no manejo diário da irrigação em cafeeiros cultivados na região do Triângulo Mineiro. A metodologia de Keller-Bliesner apresenta desempenho intermediário entre as metodologias de Fereres e Keller-Bliesner, podendo ser uma boa alternativa para melhorar as estimativas da evapotranspiração da cultura nas condições do Triângulo Mineiro.

4.3. Métodos de manejo da irrigação

Para o estudo de métodos de manejo da irrigação foram selecionados um método de determinação de umidade do solo, através de tensiometria, e outro de estimativa de evapotranspiração da cultura, tendo como base informações meteorológicas. Considerando-se que os métodos de determinação de umidade do solo traduzem a realidade no campo, as leituras de tensiômetro e suas umidades correspondentes serviram de base para as análises da viabilidade da utilização de metodologia mais prática e rápida para o manejo diário da irrigação.

4.3.1. Manejo da irrigação com tensiômetros

Cada setor de irrigação da propriedade era dotado de três baterias de tensiômetros. As leituras dos manômetros dos tensiômetros eram realizadas diariamente para recomendação das irrigações baseadas no momento em que

os tensiômetros atingiam leituras de aproximadamente 30-40 cbar, e as durações das irrigações tinham o objetivo de repor a umidade no solo até a leitura de 10 cbar nos tensiômetros, considerado pelos técnicos a capacidade de campo do solo. O tempo das irrigações era estimado e tinha duração de 2 a 3 h. A manutenção dos tensiômetros era procedida conforme o necessário, sendo realizados escorvas, preenchimento de água ou mesmo substituição dos equipamentos quando necessário, de acordo com recomendações técnicas.

Assim como nas análises do coeficiente de localização (KI), foram selecionados períodos maiores e confiáveis de leituras de tensiômetros, descartando-se aqueles em que se observavam grande variabilidade nas leituras ou períodos chuvosos.

Foram determinadas, nos períodos em análise, as lâminas de irrigação recomendadas pelos tensiômetros, através das umidades correspondentes em cada período. As umidades diárias eram convertidas em déficit de água no solo, gerando-se lâminas de irrigação necessárias para a elevação da umidade à capacidade de campo.

4.3.2. Manejo com o programa Irriga-Gesai

Comparativamente à tensiometria, foi realizado o manejo da irrigação através do programa Irriga-Gesai, que leva em consideração o cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc) e recomendação da lâmina de irrigação, cadastros da cultura e do equipamento de irrigação, resultados de análises físico-hídricas do solo dos setores e informações meteorológicas diárias.

A evapotranspiração de referência (ETo) foi determinada utilizando-se a equação-padrão de Penman–Monteith (ALLEN et al., 1998). Para tanto, foram cadastrados os dados de temperaturas máxima, média e mínima; velocidade do vento; umidade relativa do ar; radiação solar; e precipitação, do período em questão, coletados diariamente de uma estação meteorológica automática instalada na propriedade. Através do cálculo diário da ETo, o programa utiliza os coeficientes Kc, Ks e KI, para determinar a ETc.

Os cafeeiros presentes na propriedade foram cadastrados e diferenciados, em cada setor, pela data de plantio. Foram cadastradas parcelas

de acordo com a variabilidade do equipamento de irrigação, da cultura, do tipo de solo e do estágio de desenvolvimento da cultura.

Os cadastros de cultura constaram de fases segmentadas em semestres (para melhor utilização dos coeficientes), duração das fases em dias, Kc para cada fase correspondente, porcentagem de área sombreada pela cultura em cada fase e profundidade do sistema radicular nessas mesmas fases. No Quadro 1, apresentam-se as informações de cultura segundo condições médias observadas em campo.

Quadro 1 – Informações da cultura do cafeeiro, compreendendo as fases fenológicas

Fase	Nome	Duração (dias)	Kc *	Prof. Rad. (m)	Área sombreada (%)
1	Plantio	180	0,50	0,10	10
2	Desenvolv. A	185	0,55	0,20	20
3	Ano 2 A	180	0,60	0,30	30
4	Ano 2 B	185	0,67	0,40	35
5	Ano 3 A	180	0,75	0,50	40
6	Ano 3 B	185	0,82	0,60	45
7	Adulto	1850	0,90	0,60	50

* Fonte: Santinato et al. (1996).

O modelo utilizado para o cálculo do coeficiente de estresse hídrico (ks) foi o logarítmico (BERNARDO, 1995). Normalmente, usa-se esse modelo, com a ressalva de que em solos excessivamente arenosos a utilização do valor de Ks unitário tem sido uma prática para evitar erros significativos, sendo empregado quando a umidade permanece sempre próxima à capacidade de campo, ou seja, estabelecendo turnos de rega reduzidos.

Para a análise da evapotranspiração da cultura foram utilizados valores de KI associados à porcentagem de área molhada ou sombreada, usando-se o maior valor dentre esses, através de metodologia proposta por Keller e Bliesner (1990).

Os resultados das análises físico-hídricas dos solos da propriedade foram cadastrados nas profundidades de 0-30 e 30-60 cm, estabelecendo-se curvas de retenção para cada setor. O Irriga-Gesai tem a viabilidade de se utilizar em leituras diretas de valores de tensão lidas nos tensiômetros, sendo estas convertidas automaticamente em umidade atual do solo na data de sua leitura.

Com os dados meteorológicos diários e valores específicos de K_c , K_s e K_l , determinou-se a evapotranspiração da cultura. Para a recomendação da lâmina de irrigação, o programa realiza um balanço de água no solo, definindo-se a lâmina de irrigação em função do déficit de água e da eficiência da irrigação.

O CUC utilizado neste estudo foi de 91%, conforme resultado da avaliação de uniformidade de distribuição de água do sistema, realizada em fevereiro de 2004, sendo consideradas desprezíveis as perdas por evaporação e arraste, bem como vazamentos na tubulação.

Para essas análises foi utilizada uma ferramenta interna do programa Irriga-Gesai, denominada Simulação, que possibilitou a criação de cenários reais, em nível de campo, para a determinação das lâminas de irrigação necessárias à reposição da evapotranspiração da cultura, sendo as simulações realizadas utilizando dados meteorológicos da fazenda, nos períodos em estudo. Nas análises, foi considerado um turno de rega de três dias.

Foi realizado um estudo comparativo das lâminas de irrigação recomendadas pelos tensiômetros, sendo as lâminas de irrigação determinadas com o auxílio do programa, em períodos selecionados de junho de 2001 a junho de 2004.

4.4. Variação nas lâminas de irrigação recomendadas pelo programa Irriga-Gesai, através da utilização de um, dois e três dias de turno de rega

Com os resultados comparativos entre os métodos de manejo da irrigação foi possível, através da utilização da ferramenta Simulação, realizar um estudo comparativo de recomendação de lâminas de irrigação, utilizando-se diferentes turnos de rega.

A variação do turno de rega visa a um melhor aproveitamento da irrigação no que se refere à sua duração, tendo as irrigações mais duradouras a capacidade de ampliar a formação do bulbo ou faixa molhada, fazendo com que haja a tendência de uma melhor distribuição do sistema radicular do cafeeiro, melhor absorção de água e nutrientes e redução de potenciais riscos de déficits hídricos impostos por veranicos inesperados.

Outros benefícios da variação do turno de rega seria o melhor aproveitamento das precipitações, principalmente as ocasionais, bem como a redução das lâminas de irrigação recomendadas devido à diminuição da evapotranspiração da cultura, uma vez que cai a frequência de umedecimento.

Assim, foi possível determinar lâminas de irrigação necessárias à cultura, variando-se o turno de rega em um, dois e três dias, sendo constantes todos os demais fatores que interferem no cálculo da evapotranspiração da cultura e das lâminas de irrigação recomendadas.

4.5. Análise de produtividades e lâminas de irrigação

Com as informações de lâminas de irrigação aplicadas nos diversos setores da fazenda nas safras de 2001-2002, 2002-2003 e 2003-2004, com as respectivas produtividades, estabeleceu-se um estudo objetivando detectar a influência de possíveis déficits hídricos na produtividade e biennialidade do cafeeiro. Além das lâminas de irrigação, foram analisadas as precipitações ocorridas nas safras agrícolas, de acordo com o manejo realizado.

Como o programa Irriga-Gesai permite o cálculo das necessidades hídricas do cafeeiro, foram utilizados os dados meteorológicos da fazenda para gerar as necessidades simuladas de irrigação de cada safra. As lâminas calculadas levam em consideração a evapotranspiração da cultura no período, a eficiência de irrigação e a precipitação efetiva, considerando-se um turno de rega de três dias.

Comparativamente, foram analisadas no mesmo período as lâminas de irrigação aplicadas em cada setor da fazenda e as precipitações efetivas em cada safra. Tanto na simulação quanto nas condições observadas em campo, a determinação das precipitações efetivas levam em consideração a umidade atual do solo no momento em que ocorrem, sendo estabelecidos cálculos que quantificam, dentro de uma precipitação total ocorrida, qual fração escoou superficialmente ou excede a capacidade de absorção do solo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Coeficientes de localização (KI)

Dentro do exposto foi possível realizar um estudo bastante amplo do comportamento do KI em nível de campo. No Quadro 2, têm-se os setores analisados, a data de plantio e a idade dos cafeeiros em julho de 2001, momento do início das análises. O período de análise dos coeficientes de localização compreendeu julho de 2001 a junho de 2004. Portanto, em julho de 2001 os cafeeiros já apresentavam no mínimo seis meses de idade, correspondendo à fase 2 da cultura.

Quadro 2 – Setores analisados, data de plantio e idade dos cafeeiros no início das análises

Setores	Data de plantio	Idade no início do estudo (anos)
Setor 1	01/01/2001	0,5
Setor 2	01/01/2001	0,5
Setor 3	01/01/2000	1,5
Setor 4	01/01/1997	4,5

No Quadro 3, têm-se os setores analisados com as respectivas fases do cafeeiro, de acordo com a data de plantio, a partir de julho de 2001.

Quadro 3 – Setores analisados, data de plantio e fases do cafeeiro no período analisado

Setores	Data de Plantio	Fases do cafeeiro nos períodos analisados						
		Jul./01	Jan./02	Jul./02	Jan./03	Jul./03	Jan./04	Jul./04
Setor 1	01/01/01	2	3	4	5	6	7	7
Setor 2	01/01/01	2	3	4	5	6	7	7
Setor 3	01/01/00	4	5	6	7	7	7	7
Setor 4	01/01/97	7	7	7	7	7	7	7

Pode-se observar, Quadro 3, que no setor 4 os cafeeiros estavam na fase adulta desde o princípio das análises, o que é uma consideração fundamental para a composição dos resultados, visto que essa fase é a mais importante do cultivo do cafeeiro, caracterizada pela maturidade e pelas plantas que podem expressar todo o seu potencial produtivo, com a ressalva de que a repetibilidade reforça os resultados a serem analisados. O setor 3 atingiu a fase adulta em janeiro de 2003, possibilitando, assim como o setor 4, um período expressivo de coleta de dados. Os setores 1 e 2 iniciaram o período de análise na fase 2, sendo importantes também para a composição de análises do comportamento dos valores de KI nas fases iniciais do cultivo, bem como para fornecer a base para a interpretação de resultados discutidos posteriormente, uma vez que o objetivo do trabalho foi selecionar uma metodologia tradicional de cálculo que se ajustasse aos valores encontrados em campo.

No Quadro 4, têm-se os valores de KI encontrados através de análises de campo nos setores e subsetores analisados e nas fases em que o cafeeiro se encontrava. As fases 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 apresentavam, segundo observações médias e dados da literatura, porcentagens de área sombreada de 10, 20, 30, 35, 40, 45 e 50%, respectivamente. Na fase 1, não foi possível realizar as análises de campo, visto o sistema de irrigação e o monitoramento com tensiômetros terem sido implantados a partir da fase 2 do cafeeiro.

Quadro 4 – Valores de KI encontrados em campo nos setores e fases analisados

Setor	Subsetor	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Fase 6	Fase 7
Setor 1	1	-	0,49	-	0,61	-	0,64	0,68
Setor 1	2	-	0,49	-	0,62	-	0,69	0,71
Setor 1	3	-	0,50	-	0,60	-	0,68	0,76
Setor 1	4	-	0,49	-	0,61	-	0,68	0,75
Setor 1	5	-	0,46	-	0,59	-	0,69	0,74
Setor 1	6	-	0,52	-	0,62	-	0,67	0,70
Setor 1	7	-	0,52	-	0,60	-	0,70	0,74
Setor 2	1	-	0,49	0,50	-	-	0,66	0,71
Setor 2	2	-	0,48	0,56	-	-	0,67	0,74
Setor 2	3	-	0,45	0,54	-	-	0,67	-
Setor 2	4	-	0,49	0,51	-	-	0,74	-
Setor 2	5	-	0,50	0,57	-	-	0,72	-
Setor 3	1	-	-	-	0,59	0,64	0,65	0,71
Setor 3	2	-	-	-	0,60	0,64	0,70	0,68
Setor 3	3	-	-	-	0,63	0,65	0,65	0,74
Setor 3	4	-	-	-	0,60	0,63	0,70	-
Setor 3	5	-	-	-	0,61	0,61	0,69	0,80
Setor 4	1	-	-	-	-	-	-	0,66
Valores médios		-	0,49	0,54	0,59	0,63	0,68	0,72

As fases em que se observou a inexistência de valores de KI são relativas aos períodos chuvosos do ano ou com valores de tensão inconsistentes, o que poderia gerar resultados que prejudicassem as análises, por caracterizar falhas no equipamento ou excesso de precipitações, sendo as variações observadas nas leituras dos tensiômetros provenientes desses fenômenos e não do real consumo hídrico da cultura.

Os períodos de valores de KI foram obtidos na época seca do ano ou que apresentam chuvas de pequena magnitude, não alterando, assim, as determinações dos KI através das análises da ETc da cultura pela variação nos tensiômetros. Para a composição dos resultados apresentados no Quadro 4 foram realizadas análises com base nas leituras de tensiômetros nas profundidades de 0-30 e 30-60 cm, profundidade efetiva do sistema radicular do cafeeiro. Durante alguns períodos da análise foram feitas leituras de tensiômetros instalados na profundidade de 60-90 cm que indicaram não haver

movimentação de água em direção aos tensiômetros instalados a 90 cm, com a ressalva de que esses apontavam leituras de tensão que, convertidas em umidade do solo, demonstravam que o solo apresentava baixa umidade nessa profundidade.

Isso leva a crer que todo o volume de água, aplicado através das irrigações ou oriundo das precipitações ocorridas durante os períodos de análise, concentrou-se na camada radicular de 0-60 cm, sendo toda a variação ocorrida nas leituras de tensiômetros proporcionada pelo movimento de absorção de água pelas raízes do cafeeiro ou pela retenção da água no solo na camada de 0-60 cm.

No Quadro 5, têm-se os dados médios de KI encontrados em análises de campo e, segundo metodologias propostas por Keller-Bliesner (1990), Keller (1978) e Fereres (1990), as fases do cafeeiro com as respectivas porcentagens de área sombreada pela cultura e molhada pelo equipamento de irrigação.

Quadro 5 – Valores de KI segundo metodologias de Keller, Keller-Bliesner e Fereres e valores médios de KI de campo nas fases do cafeeiro com as respectivas % de área molhada e, ou, sombreada

Fases	PAS(%)	PAM(%)	KI			
			Keller	Keller-Bliesner	Fereres	Campo
1	10	25	0,37	0,51	0,58	-
2	20	25	0,37	0,51	0,58	0,49
3	30	25	0,43	0,57	0,65	0,54
4	35	25	0,47	0,61	0,71	0,59
5	40	25	0,51	0,65	0,76	0,63
6	45	25	0,55	0,68	0,82	0,68
7	50	25	0,57	0,71	0,84	0,72

Nas fases 1 e 2 do cafeeiro, correspondendo a 10 e 20% de PAS, foi empregado o valor de 25% da PAM, por serem maiores que PAS, e, portanto, os resultados foram iguais. A partir da fase 3, os valores utilizados para o cálculo do KI foram referentes à % de área sombreada pela cultura.

Os valores médios de KI de campo calculados das repetições não levaram em consideração a metodologia de cálculo utilizando-se PAM ou PAS e sim variações de leituras de tensiômetros e metodologia descrita, tendo seu cálculo baseado na evapotranspiração direta da cultura. Portanto, tais observações não se aplicam à determinação dos KI de campo em todas as fases do cafeeiro.

A Figura 4 ilustra o comportamento dos valores de KI estimados segundo as diferentes metodologias e os determinados em campo. Através da análise do comportamento da curva de KI utilizando-se metodologias propostas por Keller, Fereres e Keller-Bliesner, é possível inferir que os valores de KI calculados empregando a metodologia de Keller-Bliesner se aproximam mais dos determinados em campo.

Observou-se que, na fase 6, a média do valor de KI encontrado pelas análises de campo foi igual ao valor calculado, utilizando-se a metodologia de Keller-Bliesner, sendo esse ajuste também extremamente satisfatório na fase 7 e satisfatórios nas fases 2, 3, 4 e 5.

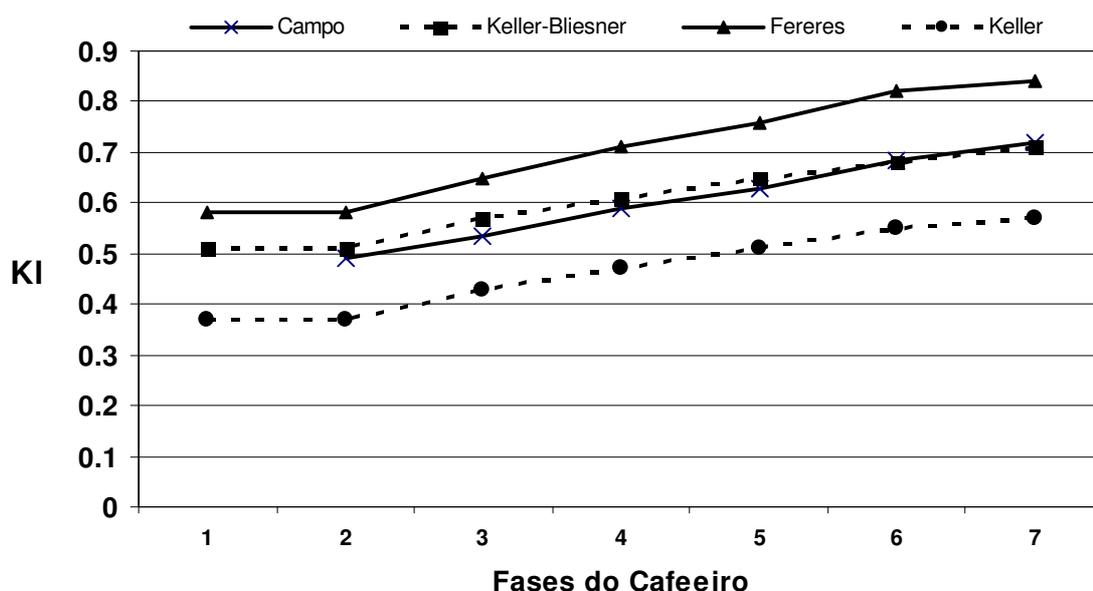


Figura 4 – Comportamento dos valores de KI de acordo com as fases do cafeeiro, pelas metodologias de Keller, Fereres e Keller-Bliesner, e média de valores de campo

Para determinar o modelo de melhor ajuste aos dados de campo, foi estabelecido um modelo estatístico do tipo $Y_i = \beta_1 X_i + e_i$. Foram testadas as hipóteses $H_0: \beta_1 = 1$ e $H_1: \beta_1 \neq 1$ pelo teste T a 5% de probabilidade, nos modelos de Fereres, Keller-Bliesner e Keller.

Realizaram-se análises estatísticas completas dos modelos de Keller-Bliesner, Fereres e Keller, respectivamente, comparativamente ao modelo encontrado em campo (Quadros 1A, 2A e 3A). No Quadro 6, tem-se a análise simplificada dos testes.

Quadro 6 – Teste T dos modelos de Keller-Bliesner, Fereres e Keller

Modelos	Valores do teste T
Keller-Bliesner	1,73 ^{ns}
Fereres	26,67 ^{**}
Keller	12,97 ^{**}

Valores do Teste t a 5% de probabilidade, ^{ns} Não-significativo e ^{**} Significativo.

Através dos resultados apresentados no Quadro 6, pode-se observar que a única metodologia em que a hipótese de nulidade é aceita foi a de Keller-Bliesner, indicando que $\beta_1 = 1$, ou seja, a metodologia proposta estima os mesmos valores de KI encontrados em campo.

Para a visualização do impacto da utilização de uma metodologia em detrimento de outra, calculou-se a irrigação total necessária (ITN) dos seis setores analisados da propriedade.

No Quadro 7, têm-se os resultados das irrigações totais necessárias (ITN) no período de três anos, as quais foram calculadas com os valores de ETc, utilizando-se metodologias de KI de Fereres, Keller-Bliesner e Keller e da eficiência da irrigação, calculados através da ferramenta Simulação, do programa Irriga-Gesai. Foram utilizados os dados meteorológicos da fazenda, ressaltando-se que as recomendações de irrigação levam em consideração as precipitações efetivas ocorridas nos períodos analisados. Através dos resultados (Quadro 7), como verificado anteriormente na estimativa da ETc,

nota-se que as irrigações totais necessárias (ITN) calculadas com a metodologia de Keller-Bliesner foram inferiores em 15,8% dos valores obtidos com a de Fereres e superiores em 26,38% dos obtidos com a metodologia de Keller.

Quadro 7 – Irrigações totais necessárias, ITN (mm), proporcionadas pelas necessidades hídricas do cafeeiro, estimadas utilizando-se metodologias de Keller-Bliesner (K-B), Fereres (F) e Keller (K), além das variações (%) nas ITN, empregando-se a metodologia de Fereres ou Keller, comparativamente à de Keller-Bliesner, em três anos de dados

Setores	ITN (mm)			Variação na ITN (%)	
	K-B	F	K	K-B x F	K-B x K
1	2420,37	2887,94	1947,49	16,20	24,28
2	1729,45	2034,34	1331,77	15,00	29,86
3	2458,66	2936,50	1983,63	16,30	23,95
4	2457,54	2935,04	1982,96	16,30	23,93
5	1731,93	2038,80	1333,07	15,00	29,92
6	2177,45	2584,31	1723,79	15,70	26,32
Variação média na ITN (%)				15,8	26,38

Esse é um resultado bastante expressivo no manejo eficiente da irrigação, gerando recomendações de utilização de coeficientes para auxílio nos cálculos do manejo diário da irrigação mais ajustados às reais situações de campo. Lâminas em excesso, mesmo aplicadas via gotejamento, podem gerar percolação profunda de água, conduzindo nutrientes fornecidos para a cultura em lençóis freáticos ou cursos d'água, podendo contaminá-los, além do aumento dos custos diretos com energia elétrica. Lâminas em déficit podem ocasionar redução no potencial de crescimento e desenvolvimento da parte aérea e absorção de nutrientes, pontos de extrema importância no estabelecimento da produtividade e qualidade final do produto. O refinamento do cálculo das lâminas de irrigação, necessárias ao longo do ciclo da cultura, garante o suprimento hídrico, otimizando água, energia e demais insumos

aplicados no manejo da cultura, tornando a atividade cafeeira irrigada mais sustentável, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental.

5.2. Sistemas de manejo de irrigação

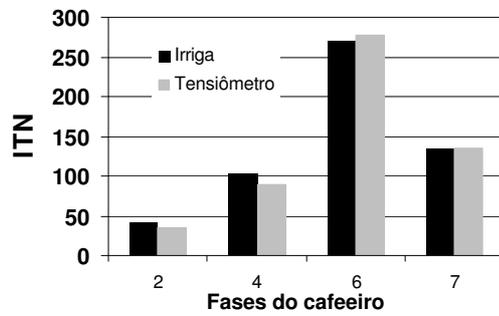
Utilizando-se o banco de dados existentes na fazenda, foi possível realizar uma análise comparativa entre os sistemas de manejo propostos. Analisaram-se as lâminas de irrigação recomendadas pelos tensiômetros instalados nos setores analisados e as lâminas recomendadas pelo programa Irriga-Gesai.

Foram selecionados diversos períodos, obedecendo-se aos mesmos princípios estabelecidos nas análises de KI em que houvesse um período de continuidade de leituras de tensiômetros, ausência de chuvas intensas e por períodos prolongados e confiabilidade dos dados de leituras de tensiômetros.

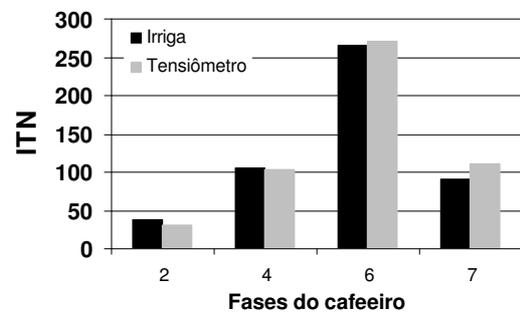
Nas análises do sistema de manejo por tensiômetros foram determinadas as lâminas de irrigação recomendadas, precipitações ocorridas e irrigações realizadas. Nos mesmos períodos foram comparadas as lâminas de irrigação recomendadas pelo programa Irriga-Gesai.

Realizou-se uma análise comparativa completa dos resultados entre o manejo da irrigação utilizando tensiômetros e o Irriga-Gesai, com as informações dos períodos específicos de análise e demais resultados (Apêndice 1B).

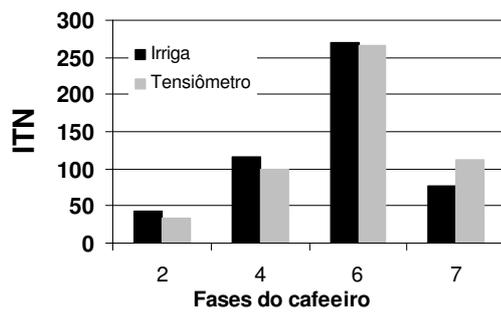
Nas Figuras 4, 5, 6 e 7, têm-se resultados de comparação entre as lâminas totais de irrigação, ou irrigações totais necessárias, estimadas através da recomendação de tensiômetros e através de cálculos processados pelo programa. Os resultados estão separados por subsetores de um mesmo setor, ressaltando-se que cada subsetor dispõe de resultados por fase. As fases foram selecionadas de acordo com o período específico de cada análise. Através das análises dessas figuras, observam-se pequenas variações comparativas entre as recomendações de irrigação nos dois sistemas de manejo.



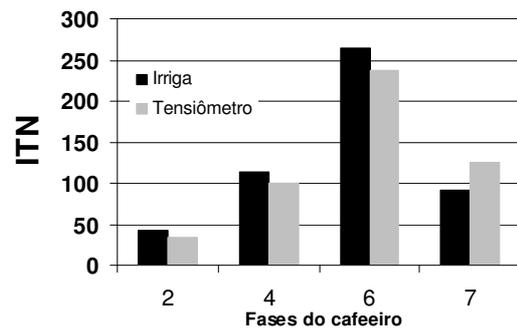
Subsetor 1



Subsetor 2

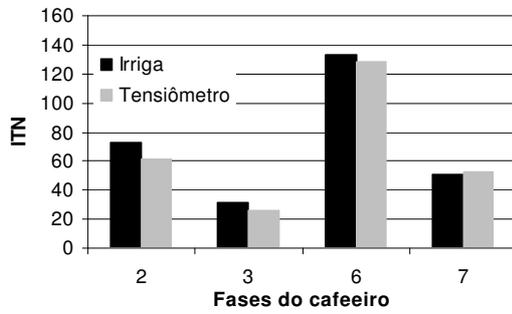


Subsetor 3

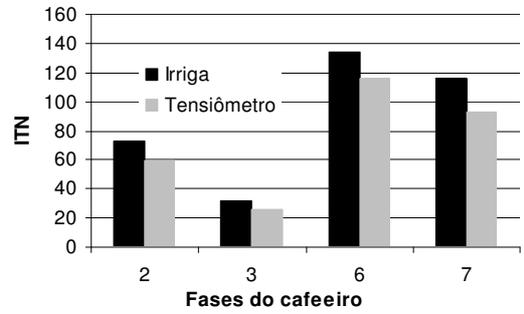


Subsetor 4

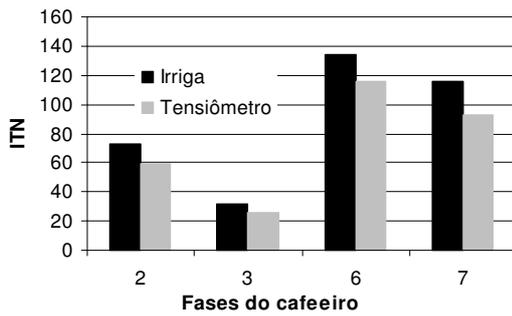
Figura 4 – Gráficos comparativos entre irrigações totais necessárias (ITN) geradas através do manejo da irrigação com tensiômetros e através do Irriga-Gesai, nas fases do cafeeiro do setor 1 e subsectores 1, 2, 3 e 4.



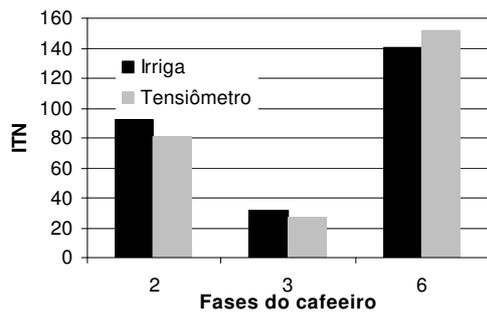
Subsetor 1



Subsetor 2

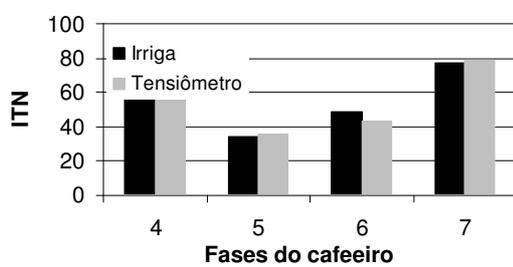


Subsetor 3

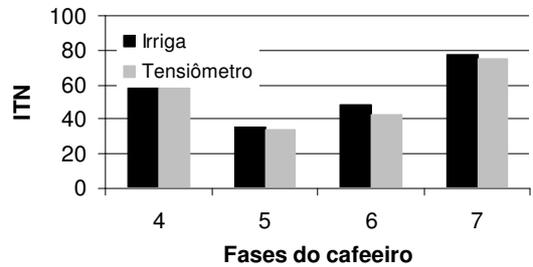


Subsetor 4

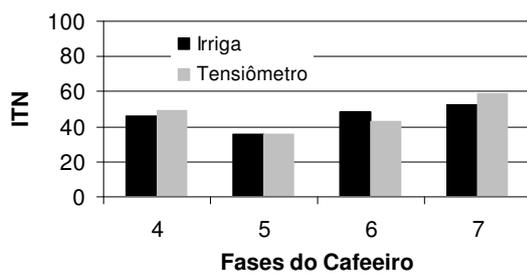
Figura 5 – Gráficos comparativos entre irrigações totais necessárias (ITN) geradas através do manejo da irrigação com tensiômetros e através do Irriga-Gesai, nas fases do cafeeiro do setor 2 e subsectores 1, 2, 3 e 4.



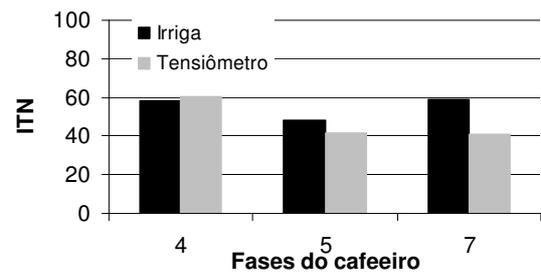
Subsetor 1



Subsetor 2



Subsetor 3



Subsetor 4

Figura 6 – Gráficos comparativos entre irrigações totais necessárias (ITN) geradas através do manejo da irrigação com tensiômetros e através do Irriga-Gesai, nas fases do cafeeiro do setor 3 e subsectores 1, 2, 3 e 4.

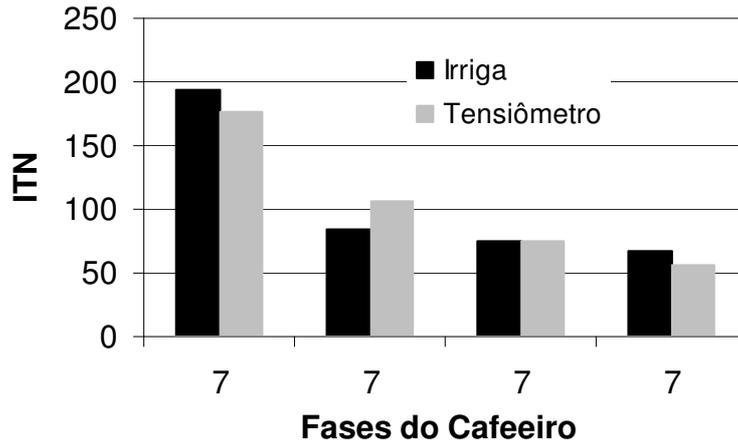


Figura 7 – Gráfico comparativo entre irrigações totais necessárias (ITN) geradas através do manejo da irrigação com tensiômetros e através do Irriga-Gesai, na fase 7 do cafeeiro do setor 4 e subsetor 1.

No Quadro 8, têm-se os resultados de irrigações totais necessárias (ITN) recomendadas pelo tensiômetro e pelo Irriga-Gesai na fase 2 do cafeeiro. Pode-se observar, nesse quadro, que o programa em todas as repetições superestimou os valores das ITN comparativamente ao tensiômetro, sendo a média das estimativas de 18,75% superiores. Uma possível explicação para tais superestimativas pode ser devida ao comportamento do KI. Como analisado anteriormente (Quadro 5), os valores médios encontrados de KI em nível de campo, na fase 2 do cafeeiro, foram inferiores ao gerado pela equação de Keller-Bliesner em torno de 5%, o que fez com que o Irriga-Gesai superestimasse a lâmina de irrigação. Outro ponto importante, que deve ser levado em consideração, seria a utilização, na fase 2 do cafeeiro, de um valor de Kc superior ao das condições da cultura em campo, o que poderia estar superestimando os valores das ITN. A redução dos valores de Kc na fase em questão, ou mesmo a segmentação do Kc em períodos específicos do ano poderia adequar as estimativas das ITN provindas do Irriga-Gesai às recomendações fornecidas pelos tensiômetros.

Quadro 8 – Resultados das irrigações totais necessárias, ITN geradas através do Irriga-Gesai e dos tensiômetros e diferença (%) entre os dois métodos, tendo como base o tensiômetro nos setores analisados, além da média da diferença na fase 2

Setor	Subsetor	Fase	ITN Irriga-Gesai (mm)	ITN Tensiômetro (mm)	Diferença (%)
Setor 1	1	2	42,83	34,81	23,00
Setor 1	2	2	38,32	30,55	25,40
Setor 1	3	2	42,67	32,97	29,40
Setor 1	4	2	42,68	33,42	27,70
Setor 2	1	2	72,64	60,84	19,40
Setor 2	2	2	72,66	59,58	22,00
Setor 2	3	2	70,73	52,81	33,90
Setor 2	4	2	92,32	80,85	14,20
Média					18,75

No Quadro 9, têm-se os resultados encontrados na fase 3 do cafeeiro. Podem-se explicar as superestimativas encontradas, em média de 16,16%, das ITN fornecidas pelo Irriga-Gesai, em comparação com os tensiômetros, da mesma forma que na fase 2, uma vez que o KI médio observado em campo na fase 3 foi inferior em torno de 6% do valor gerado pelo modelo de Keller-Bliesner, bem como os valores de Kc, que estão sendo utilizados para o cálculo, provavelmente sejam superiores ao do comportamento da cultura em campo.

No Quadro 10, têm-se os resultados na fase 4 do cafeeiro, em que nesse caso as superestimativas do modelo de cálculo do Irriga-Gesai superaram, em média, as recomendações de ITN dos tensiômetros em 6,30%. Nessa fase, a superestimativa média pode ser explicada apenas devido à utilização da metodologia de KI proposta por Keller-Bliesner, para a estimativa da ETc e, conseqüentemente, da ITN. Os valores de KI de campo encontrados nessa fase são, em média, inferiores 3,4% em relação ao modelo. A utilização do valor exato encontrado em condições de campo para KI reduziria essa estimativa a valores bem próximos aos encontrados através das recomendações de tensiômetros.

Quadro 9 – Resultados das irrigações totais necessárias, ITN geradas através do Irriga-Gesai e dos tensiômetros e diferença (%) entre os dois métodos, tendo como base o tensiômetro nos setores analisados, além da média da diferença na fase 3

Setor	Subsetor	Fase	ITN Irriga-Gesai (mm)	ITN Tensiômetro (mm)	Diferença (%)
Setor 2	1	3	31,24	26,24	19,10
Setor 2	2	3	31,25	25,87	20,80
Setor 2	3	3	31,26	26,03	20,10
Setor 2	4	3	31,28	26,69	17,20
Média					16,16

Quadro 10 – Resultados das irrigações totais necessárias, ITN geradas através do Irriga-Gesai e dos tensiômetros e diferença (%) entre os dois métodos, tendo como base o tensiômetro nos setores analisados, além da média da diferença na fase 4

Setor	Subsetor	Fase	ITN Irriga-Gesai (mm)	ITN Tensiômetro (mm)	Diferença (%)
Setor 1	1	4	103,01	88,68	16,20
Setor 1	2	4	106,05	103,92	2,00
Setor 1	3	4	116,07	99,89	16,20
Setor 1	4	4	114,36	100,26	14,10
Setor 3	1	4	58,17	58,08	0,20
Setor 3	2	4	58,18	58,06	0,20
Setor 3	3	4	46,40	49,51	-6,30
Setor 3	4	4	58,21	60,14	-3,20
Média					6,30

No Quadro 11, têm-se os resultados na fase 5 do cafeeiro, sendo a superestimativa média nessa fase em torno de 4,55%. Pode-se atribuir a superestimativa ao valor de KI utilizado, pelo fato de o modelo de Keller-Bliesner ser superior em 4,2% ao encontrado em campo.

Quadro 11 – Resultados das irrigações totais necessárias, ITN geradas através do Irriga-Gesai e dos tensiômetros e diferença (%) entre os dois métodos, tendo como base o tensiômetro nos setores analisados, além da média da diferença na fase 5

Setor	Subsetor	Fase	ITN Irriga-Gesai (mm)	ITN Tensiômetro (mm)	Diferença (%)
Setor 3	1	5	34,47	35,54	-3,00
Setor 3	2	5	35,54	33,72	5,40
Setor 3	3	5	35,58	35,84	-0,70
Setor 3	4	5	47,95	41,44	15,70
Média					4,55

No Quadro 12, têm-se os resultados na fase 6 do cafeeiro. As superestimativas das ITN recomendadas pelo Irriga-Gesai foram, em média, 1,95% superiores às ITN recomendadas pelos tensiômetros. Como os valores de KI de campo encontrados foram os mesmos gerados pelo modelo de Keller-Bliesner, pode-se atribuir tal variação à utilização de um Kc inferior ao comportamento da cultura no campo, com a ressalva de que esse valor poderia ser levemente elevado.

Quadro 12 – Resultados das irrigações totais necessárias, ITN geradas através do Irriga-Gesai e dos tensiômetros e diferença (%) entre os dois métodos, tendo como base o tensiômetro nos setores analisados, além da média da diferença na fase 6

Setor	Subsetor	Fase	ITN Irriga-Gesai (mm)	ITN Tensiômetro (mm)	Diferença (%)
Setor 1	1	6	270,51	277,10	-2,40
Setor 1	2	6	265,13	270,58	-2,00
Setor 1	3	6	270,12	265,43	1,80
Setor 1	4	6	265,13	237,71	11,50
Setor 2	1	6	133,64	128,67	3,90
Setor 2	2	6	133,69	115,47	15,80
Setor 2	3	6	140,70	155,17	-9,30
Setor 2	4	6	140,79	151,39	-7,00
Setor 3	1	6	48,40	43,05	12,40
Setor 3	2	6	48,40	43,01	12,50
Setor 3	3	6	48,45	42,95	12,80
Média					1,95

No Quadro 13, têm-se os resultados do manejo da irrigação realizado por tensiômetros e pelo Irriga-Gesai, na fase 7 ou adulta do cafeeiro, caracterizada pela maturidade das plantas. Observa-se, nesse quadro, que em média os valores de ITN gerados pelo Irriga-Gesai foram inferiores aos verificados pelos tensiômetros em 3,90%. Isso indica que, nessa fase do cafeeiro, os coeficientes utilizados internamente no Irriga-Gesai também se mostram adequados ao comportamento fisiológico da cultura no campo. Sendo essa a fase mais importante do cafeeiro, em que a planta tem a possibilidade de expressar todo o seu potencial produtivo. Portanto, estimativas precisas das necessidades hídricas da cultura são de suma importância. O Irriga-Gesai representa uma excelente alternativa para o manejo diário da irrigação, uma vez que pequenos ajustes internos em coeficientes específicos de cada fase possibilita alta precisão na estimativa das ETc e, conseqüentemente, nas recomendações de irrigação diárias em nível de campo.

Quadro 13 – Resultados das irrigações totais necessárias, ITN geradas através do Irriga-Gesai e dos tensiômetros e diferença (%) entre os dois métodos, tendo como base o tensiômetro nos setores analisados, além da média da diferença na fase 7

Setor	Subsetor	Fase	ITN Irriga (mm)	ITN Tensiômetro (mm)	Diferença (%)
Setor 1	1	7	135,03	134,40	0,50
Setor 1	2	7	91,00	110,03	-17,30
Setor 1	3	7	77,18	112,23	-31,20
Setor 1	4	7	90,99	126,13	-27,90
Setor 2	1	7	50,39	52,59	-4,20
Setor 2	2	7	115,79	92,93	24,60
Setor 3	1	7	77,46	78,59	-1,40
Setor 3	2	7	77,46	75,02	3,30
Setor 3	3	7	52,33	59,00	-11,30
Setor 3	4	7	58,94	41,05	43,60
Setor 4	1	7	194,52	176,72	10,10
Setor 4	2	7	83,77	107,00	-21,70
Setor 4	3	7	74,38	74,33	0,10
Setor 4	4	7	67,48	56,22	20,00
Média					3,90

Outro ponto seria a facilidade e praticidade de utilização do Irriga-Gesai perante os tensiômetros, uma vez que estes exigem o deslocamento diário dos técnicos ao campo para o registro das leituras dos aparelhos, processo que se torna desgastante operacionalmente, além do custo de aquisição dos aparelhos, sendo necessário grande repetibilidade para elevar a precisão da metodologia. No entanto, a utilização do Irriga-Gesai se torna mais prática e operacional, com a ressalva de que apenas os dados meteorológicos diários têm que ser coletados e cadastrados no programa, que estima as lâminas de irrigação necessárias à reposição das necessidades hídricas da cultura, procedimento realizado por um computador, que pode durar poucos segundos ou minutos, dependendo do tamanho da propriedade e variabilidade de parcelas.

A disponibilização desses resultados é de suma importância para a atividade cafeeira irrigada. A preocupação atual com o fornecimento racional de água para as culturas via irrigação, gerando tecnologias acessíveis aos produtores, torna a atividade cafeeira irrigada mais sustentável, tanto nas produtividades, uma vez que o suprimento das reais necessidades hídricas da cultura fará com que, entre outros pontos, possa reduzir o efeito da biennialidade de produção verificado nas propriedades, quanto na questão ambiental, uma vez que a aplicação racional de água na agricultura pode reduzir riscos de contaminação química de lençóis freáticos e cursos d'água, bem como preservar o insumo água, tão precioso na atualidade.

5.3. Irrigações totais necessárias (ITN), de acordo com o turno de rega (TR)

Como verificado anteriormente, o programa Irriga-Gesai é uma alternativa ao manejo da irrigação, gerando resultados satisfatórios na estimativa das necessidades hídricas do cafeeiro, bem como das irrigações totais necessárias (ITN).

Considerando o exposto, foi realizado um estudo para determinar a variação das ITN geradas em irrigação localizada do cafeeiro, para procedimentos de cálculo dos turnos de rega de um, dois e três dias. Tais

resultados são importantes, pois o aumento do turno de rega permite irrigações com lâminas maiores, favorecendo maior porcentagem de área molhada.

No Quadro 14, têm-se os resultados de irrigações totais necessárias (ITN), de três safras agrícolas cafeeiras de seis setores da fazenda, geradas utilizando-se um, dois e três dias de turno de rega, constando cada análise a ITN da safra. Pode-se notar, nesse quadro, que em todos os períodos dos setores analisados as estimativas da ITN foram superiores quando foi empregado um turno de rega de um dia, em comparação com dois e três dias.

Esses resultados podem ser explicados devido à variação no coeficiente K_s que determina a ET_c , bem como do aproveitamento das precipitações efetivas. Quando se utiliza turno de rega diário, os valores de K_I estão sempre bem próximos da unidade, ou seja, existe alta frequência de molhamento do solo, fazendo com que a umidade deste permaneça próxima à capacidade de campo. Com o turno de rega de três dias, os valores de K_I diários apresentam valores inferiores aos encontrados em turno de rega diário, o que faz com que ocorra redução da ET_c .

Outro ponto importante para explicar os resultados é o aproveitamento das precipitações. Como em turnos de rega diária o solo permanece sempre próximo à capacidade de campo, as precipitações têm menor aproveitamento, ocorrendo excessos de água e escoamento superficial. Em turnos de rega de três dias, o maior somatório da evapotranspiração da planta no período possibilita a utilização de maior faixa da umidade disponível no solo. Turnos de rega diários geram acréscimo de 14,4% na estimativa das ITN, em comparação com a utilização de turnos de de três dias. A utilização de turnos de rega de dois dias apresenta valores intermediários, com a ressalva de que, comparativamente ao turno de rega diário, há uma queda de 7,9% e um acréscimo de 7%, em comparação com o turno de rega de três dias.

Também é importante salientar que a recomendação de turnos de rega de três dias concentra as lâminas de irrigação, fazendo com que se eleve a eficiência de utilização da água, bem como haja a possibilidade de expandir o bulbo ou a faixa molhada, fator que tem sido amplamente discutido, uma vez que essa expansão faz com que ocorra melhor distribuição do sistema radicular da cultura, implicando maior potencial de absorção de nutrientes e água provinda de precipitações.

Quadro 14 – Valores de irrigações totais necessárias (ITN) para os turnos de rega de um, dois e três dias e comparação, em %, entre eles

	ITN para turnos de rega			Variações comparativas (%)		
	1 dia	2 dias	3 dias	1 x 2	1 x 3	2 x 3
Setor 1 Safra 2001-2002	423,9	391,8	360,8	7,6	14,9	7,9
Setor 1 Safra 2002-2003	616,7	560,6	532,6	9,1	13,6	5,0
Setor 1 Safra 2003-2004	682,2	624,3	571,0	8,5	16,3	8,5
Setor 2 Safra 2001-2002	423,3	393,0	366,3	7,1	13,5	6,8
Setor 2 Safra 2002-2003	618,7	571,0	544,5	7,7	12,0	4,6
Setor 2 Safra 2003-2004	687,5	636,4	580,9	7,4	15,5	8,7
Setor 3 Safra 2001-2002	639,9	591,8	544,0	7,5	15,0	8,1
Setor 3 Safra 2002-2003	819,7	748,5	713,0	8,7	13,0	4,7
Setor 3 Safra 2003-2004	717,9	661,5	605,0	7,8	15,7	8,5
Setor 4 Safra 2001-2002	882,1	800,1	739,2	9,3	16,2	7,6
Setor 4 Safra 2002-2003	856,7	782,1	747,0	8,7	12,8	4,5
Setor 4 Safra 2003-2004	718,1	661,7	605,3	7,8	15,7	8,5
Setor 5 Safra 2001-2002	882,8	800,7	739,6	9,3	16,2	7,6
Setor 5 Safra 2002-2003	857,4	782,6	747,4	8,7	12,8	4,5
Setor 5 Safra 2003-2004	718,5	662,3	605,8	7,8	15,7	8,5
Setor 6 Safra 2001-2002	844,1	767,7	705,9	9,1	16,4	8,1
Setor 6 Safra 2002-2003	855,3	780,1	744,4	8,8	13,0	4,6
Setor 6 Safra 2003-2004	717,1	660,5	603,8	7,9	15,8	8,6
Média				7,9 %	14,4 %	7,0 %

5.4. Análise de produtividades e lâminas de irrigação

Foi realizada uma verificação detalhada das lâminas de irrigação aplicadas nos diversos setores da fazenda, nas safras 2001/02, 2002/03 e 2003/04, bem como as respectivas produtividades. Também, foram obtidos os dados meteorológicos da fazenda no mesmo período.

Considerando que o Irriga-Gesai apresentou bons resultados para definição das necessidades hídricas do cafeeiro, nas diversas fases de desenvolvimento, utilizaram-se o programa para gerar, nesses mesmos períodos, as necessidades de irrigação em cada parcela do campo (necessidades simuladas) e, também, a precipitação efetiva, ocorrida considerando a disponibilidade de água no solo no momento de cada precipitação. Comparativamente, analisaram-se as irrigações realizadas na fazenda e as precipitações efetivas nessas condições.

No Quadro 15, têm-se os resultados do balanço de água no solo para a simulação do Irriga-Gesai, envolvendo as precipitações totais, a estimativa de precipitação efetiva através da consideração do escoamento superficial e excesso (ou percolação) e as irrigações totais necessárias para os setores analisados nas safras 2001-02, 2002-03 e 2003-04. No Quadro 16, têm-se os mesmos resultados do balanço de água no solo para a situação real de campo, com as irrigações realizadas na fazenda.

Através da análise dos Quadros 15 e 16, observa-se que as precipitações efetivas do manejo de campo são maiores que os encontrados em simulação utilizando o Irriga-Gesai. Isso se deve ao fato de que o manejo realizado com o auxílio do programa recomenda irrigações a cada três dias, o que faz com que o aproveitamento das precipitações sejam menores comparativamente ao que se observa no manejo conduzido na fazenda, onde as irrigações eram menos freqüentes e de menor intensidade, o que proporcionava o maior consumo da água disponível no solo, sendo as precipitações mais bem aproveitadas.

Quadro 15 – Valores de precipitação total (mm), escoamento (mm), excesso (mm), precipitação efetiva (mm) e irrigação total necessária (mm), simulada pelo Irriga-Gesai para os seis setores analisados nas safras 2001-02, 2002-03 e 2003-04

Setores	Safra	Balço hídrico Irriga-Gesai				
		Prec. Total (mm)	Escoamento (mm)	Excesso (mm)	Prec. Efetiva (mm)	ITN (mm)
Setor 1	2001-02	1402,60	304,94	978,09	119,57	360,79
Setor 1	2002-03	1073,20	96,70	813,06	163,44	532,60
Setor 1	2003-04	1520,20	251,69	1056,55	211,96	570,98
Setor 2	2002-03	1073,20	96,23	781,45	195,52	544,53
Setor 2	2003-04	1520,20	251,46	1000,92	267,82	580,89
Setor 3	2001-02	1402,60	304,39	899,99	198,22	544,03
Setor 3	2002-03	1073,20	95,97	733,07	244,16	713,04
Setor 3	2003-04	1520,20	251,41	996,45	272,34	605,01
Setor 4	2001-02	1402,60	304,25	834,00	264,35	739,16
Setor 4	2002-03	1073,20	96,01	729,91	247,28	746,97
Setor 4	2003-04	1520,20	251,43	996,32	272,45	605,31
Setor 5	2001-02	1402,60	304,05	839,95	258,60	705,89
Setor 5	2002-03	1073,20	95,83	730,43	246,94	744,36
Setor 5	2003-04	1520,20	251,32	996,91	271,97	603,83
Setor 6	2001-02	1402,60	304,33	833,76	264,51	739,61
Setor 6	2002-03	1073,20	96,09	729,69	247,42	747,37
Setor 6	2003-04	1520,20	251,46	996,11	272,63	605,81

Quadro 16 – Valores de precipitação total (mm), escoamento (mm), excesso (mm), precipitação efetiva (mm) e irrigação realizada em campo, para os seis setores analisados nas safras 2001-02, 2002-03 e 2003-04

Setores	Safra	Balço hídrico campo				
		Prec. Total (mm)	Escoamento (mm)	Excesso (mm)	Prec. Efetiva (mm)	Ir. Realiz. (mm)
Setor 1	2001-02	1402,60	285,35	249,03	868,22	58,16
Setor 1	2002-03	1073,20	96,25	517,66	459,29	175,79
Setor 1	2003-04	1520,20	248,74	481,14	790,32	91,80
Setor 2	2002-03	1073,20	95,31	507,14	470,75	208,45
Setor 2	2003-04	1520,20	250,98	644,28	624,94	199,67
Setor 3	2001-02	1402,60	287,25	284,40	830,95	44,43
Setor 3	2002-03	1073,20	95,20	405,99	572,01	174,82
Setor 3	2003-04	1520,20	251,41	829,40	439,39	115,54
Setor 4	2001-02	1402,60	294,67	264,10	843,83	58,16
Setor 4	2002-03	1073,20	94,46	399,31	579,43	175,79
Setor 4	2003-04	1520,20	240,00	305,75	974,45	68,45
Setor 5	2001-02	1402,60	296,41	460,56	645,63	75,94
Setor 5	2002-03	1073,20	95,50	465,22	512,48	210,43
Setor 5	2003-04	1520,20	250,90	603,59	665,71	118,41
Setor 6	2001-02	1402,60	287,77	254,81	860,02	103,48
Setor 6	2002-03	1073,20	94,95	449,14	529,11	186,34
Setor 6	2003-04	1520,20	250,09	887,09	383,02	254,39

No Quadro 17, têm-se um resumo dos resultados obtidos nos dois quadros anteriores e informações de produtividade de cada safra. Déficits hídricos impostos à cultura não fornecem precisão para conclusões da variação nas produtividades, uma vez que vários outros fatores estão envolvidos como o manejo diário da cultura, adubações, incidência de pragas e doenças, entre outros. Mas os resultados são importantes para verificar possíveis tendências do efeito de déficits hídricos na queda de produtividade ou acentuação da biennialidade de produção dos cafeeiros. O setor 5 apresentou produtividade da safra 2001-02 de 57,44 sc/ha, sendo o déficit de água, em comparação com a recomendação do Irriga-Gesai, de 242,92 mm. Este valor, adicionado ao déficit hídrico da próxima safra, pode gerar a redução do potencial de crescimento da planta, associado ao abortamento floral, dessa forma intensificando processos de biennialidade, observados na safra 2002-03, em que a produtividade foi de 15,81 sc/ha. A possibilidade de altas produtividades na safra 2003-04 não foi verificada, mesmo com déficit reduzido de 90 mm, evidenciando haver tendência em prejudicar sensivelmente processos fisiológicos da cultura associados ao déficit hídrico. O mesmo fenômeno pôde ser observado no setor 4, indicando que o déficit hídrico pode acentuar a biennialidade. Porém, nesse caso, verificou-se uma resposta satisfatória da cultura ao fornecimento de lâminas adequadas, o que proporcionou boa produtividade na safra 2003-04. Mesmo apresentando produtividades inferiores à média regional de cafeeiros irrigados de aproximadamente 70 sc/ha, o setor 4 apresentou baixa biennialidade, com produtividades praticamente constantes de 48 e 46,5 sc/ha, nas safras 2002-03 e 2003-04, respectivamente. Os déficits hídricos impostos ao cafeeiro, em ambas as safras, foram baixos, o que pode explicar as produtividades nas safras analisadas.

Os demais setores, onde não se observaram as mesmas tendências, possivelmente foram acometidos por outros fatores, como incidência de pragas e doenças ou a imposição de condução diferenciada da cultura. Mas é importante analisar as tendências de que a imposição de déficits hídricos na cultura pode gerar quedas de produtividade e acentuação dos efeitos característicos da biennialidade, sendo demonstrados pelas baixas produtividades dos setores analisados.

Quadro 17 – Valores de irrigação e precipitação efetiva (mm) gerados pelo manejo utilizando o Irriga-Gesai e através do manejo de campo com tensiômetros, além das produtividades (sc/ha) dos seis setores analisados com as idades respectivas nas safras 2001-02, 2002-03 e 2003-04

Setores	Safra	Idade (mm)	Irrigação + Prec. Efetiva (mm)		Produtividade (sc/ha)
			Irriga-Gesai	Campo	
Setor 1	2001-02	2	480,36	926,38	11,39
Setor 1	2002-03	3	696,04	635,08	38,16
Setor 1	2003-04	4	782,94	882,12	37,59
Setor 2	2002-03	3	740,05	679,20	48,00
Setor 2	2003-04	4	848,71	824,61	46,54
Setor 3	2001-02	3	742,25	875,38	39,50
Setor 3	2002-03	4	957,20	746,83	28,50
Setor 3	2003-04	5	877,35	554,93	65,17
Setor 4	2001-02	5	1003,51	901,99	42,18
Setor 4	2002-03	6	994,25	755,22	19,53
Setor 4	2003-04	7	877,76	1042,90	68,23
Setor 5	2001-02	4	964,49	721,57	57,44
Setor 5	2002-03	5	991,30	722,91	15,81
Setor 5	2003-04	6	875,80	784,12	45,32
Setor 6	2001-02	5	1004,12	963,50	26,80
Setor 6	2002-03	6	994,79	715,45	30,00
Setor 6	2003-04	7	878,44	637,41	59,11

Verificou-se no setor 1, na safra 2001-02, que a diferença entre os valores do somatório da irrigação com a precipitação efetiva para a situação de campo foi de 926,31 mm, muito superior à do Irriga-Gesai, de 480,36 mm. Esse resultado se deveu a um possível problema nos tensiômetros, provavelmente ocasionado pela falta de manutenção adequada, o que fez com que no período chuvoso da safra em questão, principalmente no mês de dezembro, as leituras dos tensiômetros e, conseqüentemente, as umidades geradas se estabilizassem em valores inferiores ao da capacidade de campo, mesmo com precipitações intensas no período. Isso levou a um excessivo aproveitamento das precipitações, que foi inexistente.

6. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho foi conduzido na Fazenda Juliana, localizada no município de Monte Carmelo, MG. Realizaram-se estudos de determinação da metodologia do cálculo de coeficientes de localização (KI) utilizado para correção da evapotranspiração da cultura em irrigação localizada que melhor se ajustou a valores de campo encontrados através de estudos com o uso de tensiômetros. Análises foram realizadas visando testar diferentes sistemas de manejo da irrigação, um tendo como base a umidade do solo através de tensiômetros e outro, informações meteorológicas diárias, com o auxílio do programa Irriga-Gesai. Tentou-se detectar, também, a influência de possíveis déficits hídricos na queda de produtividade e acentuação da biennialidade de produção dos cafeeiros irrigados por gotejamento.

Com relação ao manejo da irrigação do cafeeiro irrigado por gotejamento na região do Cerrado de Minas Gerais, concluiu-se que:

A metodologia de cálculo do coeficiente de localização (KI) que melhor se ajustou aos valores de campo foi a de Keller-Bliesner.

A recomendação da metodologia de Keller-Bliesner, comparativamente à das de Fereres e Keller, promove redução de 15,8% e acréscimo de 26,38%, respectivamente, na estimativa das irrigações totais necessárias (ITN).

A utilização do programa Irriga-Gesai é uma boa alternativa ao manejo diário da irrigação, gerando resultados satisfatórios na estimativa das necessidades hídricas do cafeeiro e das irrigações totais necessárias para todas as fases da cultura, demonstrando ser um método eficiente, preciso e prático.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALJIBURY, F. K.; MARSH, A. W.; HUNTAMER, J. Water use with drip irrigation. In: INTERNATIONAL DRIP IRRIGATION CONGRESS, 2., 1974, California. **Proceedings...** California, USA, 1974. p. 341-345.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration** – Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 308 p. (FAO Irrigation and Drainage, 56).

ALVES, H.M.R.; VIEIRA, T.G.C.; BERTOLDO, M.A. Avaliação de ambientes cafeeiros de Minas Gerais. Parte I: Patrocínio. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 3., 2003, Porto Seguro. **Anais...** Porto Seguro, BA, 2003. p. 55-56.

ARAÚJO, J. A. C. **Análise do comportamento de uma população de café Icatu (H - 4782 - 7) sob condições de irrigação por gotejamento e quebra-vento artificial.** Piracicaba, SP: ESALQ/USP, 1982. 87 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BARRETO, G. B.; REIS, A. J.; DEMATTÊ, B. J.; IGUE, T. Experiência de irrigação e modo de formação de café novo. **Bragantia**, Campinas, v. 31, n. 4, p. 41-50, 1972.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação.** Viçosa, MG: Editora UFV, 1995. 657 p.

BONOMO, R. **Análise da irrigação na cafeicultura em áreas de Cerrado de Minas Gerais.** Viçosa, MG: UFV, 1999. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

BOYER, J.S. Advances in drought tolerance in plants. **Advances in Agronomy**, v. 56, p. 187-218, 1995a.

BOYER, J.S. Plant productivity and environment. **Science**, v. 218, p. 443-448, 1982.

BRIDSON, D.M. Studies in *Coffea* and *Psilanthus* (Rubiaceae subfam. Cinchonoideae) for part 2 of flora of tropical East Africa: Rubiaceae. **Kew Bulletin**, n. 4, p. 817-859, 1982.

CAIXETA, G.Z.T. **A cafeicultura em Minas Gerais 1983/85**. Viçosa, MG: EPAMIG/CRZM, 1996. 51 p. (Série Documentos, 32).

CAMARGO, A. P.; PEREIRA, A. R. **Prescrição de rega por modelo climatológico**. Campinas, SP: Fundação Cargil, 1990. 27 p.

CAMP, C.R.; SADLER, E.J.; BUSSCHER, W.J. A comparison of uniformity measures for drip irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 40, n. 4, p. 1013-1020, 1997.

CARRIER, A. La structure genetique des caféiers spontanés de la region Malgache (Mascarocoffea). Leur relations avec les caféiers d'origine africaine (Eucoffea). **Memoires ORSTOM**, Paris, n. 97, p. 1-223, 1978.

CEMIG. **Estudo de otimização energética**. Belo Horizonte, 1993. 22 p.

CHEVALIER, A. **Lés caféiers du globe**. III. Systématique des caféiers et faux-caféiers, maladies et insectes nuisibles. Paris: Paul Lechevalier, 1947.

COSTA, L.C. Modelagem e simulação em agrometeorologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA (Mesa-redonda), 10., 1997, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba, SP: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997. p. 3-20.

DENÍCULI, W.; BERNARDO, S.; THIÁBAUT, J. T. L.; SEDIYAMA, G. C. Uniformidade de distribuição de água, em condições de campo num sistema de irrigação por gotejamento. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 27, n. 50, p. 155-162, 1980.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Las necesidades de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 1977. 194 p. (FAO Riego e Drenaje, 24).

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

FRANÇA NETO, A.C. de. **Análise de métodos simplificados de estimativas da ETo e da sensibilidade das variáveis do cálculo da lâmina de irrigação para a cultura do café**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 87 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

FAEMG. **Diagnóstico da cafeicultura em Minas Gerais/FAEMG**. Belo Horizonte: FAEMG, 1996. 52 p.

FERERES, E. Papel de la fisiología vegetal en la microirrigación. Recomendaciones para el manejo mejorado. **Ponencia en IV Seminario Latinoamericano de Microirrigación**. Barquisimeto, Venezuela, 1981.

GUTIÉRREZ, M. V.; MEINZER, F. C. Estimating water use and irrigation requirements of coffee in Hawaii. **Journal of American Society Horticultural Science**, v. 119, n. 3, p. 652-657, 1994.

HERNANDEZ ABREU, J. M.; PEREZ REGALADO, A.; RODRIGO LOPEZ, J.; GONZALEZ HERNANDEZ, J. F. **El riego localizado**. Curso internacional de riego localizado. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrárias, 1987. 317 p.

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation design**. Rain Bird Sprinkler. Glendora, California: [s.n.], 1975. 133 p.

KELLER, J. **Trickle irrigation**. En Soil Conservation Service National Engineering Handbook. Colorado, 1978. 129 p.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinold, 1990. 652 p.

LOPES, A. S. **Solos sob cerrado**. Piracicaba, SP: PATAFOS, 1984. 162 p.

LÓPEZ, J. R.; ABREU, J. M. H.; REGALADO, A. P.; HERNÁNDEZ, J. F. G. **Riego Localizado**. Madrid, España: Mundi-Prensa, 1992. 405 p.

LUCHIARI JÚNIOR, A.; RESENDE, M.; RITCHEY, K. D.; FREITAS, E.; SOUZA, P. I. M. Manejo de solos e aproveitamento de água. In: GOEDERT, W. J. **Solos dos cerrados**. São Paulo: EMBRAPA/Nobel, 1986. p. 285-322.

MAESTRI, M.; BARROS, R.S.; RENA, A.B. Coffee. In: LAST, F.T. (Ed.). **Tree crop ecosystems**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 339-360.

MANTOVANI, E. C. A irrigação do cafeeiro. **ITEM – Irrigação e Tecnologia Moderna**, n. 48, p. 45-49, 2000.

MANTOVANI, E.C.; SOARES, A.R. **Irrigação do cafeeiro**: informações técnicas e coletânea de trabalhos. Viçosa, MG: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais, 2003. 260 p. (Engenharia na Agricultura – Boletim técnico; 8).

MATIELLO, J. B. **O café – Do cultivo ao consumo**. São Paulo: Globo, 1991. 320 p.

MATIELLO, J. B.; DANTAS, F. S. Desenvolvimento do cafeeiro e seu sistema radicular, com e sem irrigação, em Brejão (PE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 1987, Campinas, SP. **Anais...** Campinas, SP, 1987. p. 165-166.

MERRIAN, J. L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management.** Logan: Utah State University, 1978. 271 p.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W. et al. Programa computacional para modelagem de curvas de retenção de água no solo (SWRC, versão 2.00). **Sci. Agric.**, v. 57, n. 1, p.191-192. jan./mar. 2000 (ISSN 0103-9016).

NJOROGE, J. M. A review of some agronomic investigations on arabica coffee in Kenya. **Kenya Coffee**, v. 54, n. 629, p. 553-567, 1989.

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión, exudación.** 2. ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1990. 471 p.

RABELO, P.V.; FERNANDES, A.L.T.; NOGUEIRA, M.A.S.; ROCHA, M.C. **Análise dos sistemas de cultivo do café do cerrado mineiro.** Uberaba, MG: Uniube, 2004. 44 p. (Boletim Técnico ICTA/Uniube, 2).

REIS, G. N.; MIGUEL, A. E.; OLIVEIRA, J. A. Efeito da irrigação, em presença e ausência da adubação NPK, em cafeeiros em produção - Resultados de 3 produções, em Caratinga, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIEIRAS, 16., 1990, Espírito Santo do Pinhal, SP. **Anais...** Espírito Santo do Pinhal, SP, 1990. p. 19-21.

RENA, A.B.; MAESTRI, M. Relações hídricas no cafeeiro. **Revista ITEM**, n. 48, p. 34-41, 2000.

SAES, M.S.M.; JAYO, M. **Coordenando ações para a valorização do café do cerrado.** Grupo Pensa – Programa de Estudos dos Negócios do Sistema Agroindustrial. Disponível em: <<http://www.cafedocerrado.org>>. Acesso em: 30 set. 2004.

SAN JUAN, J. A. M. **Riego por goteo.** Teoria y practica. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1988. 256 p.

SANTINATO, R.; FERNANDES, A. L. T.; FERNANDES, D. R. **Irrigação na cultura do café.** São Paulo: ARBORE, 1996. 146 p.

SARAIVA, J.S.T.; SILVEIRA, J.S.M. Irrigação do café. In: COSTA, E.B. (Coor.). **Manual técnico para a cultura do café no estado do Espírito Santo.** Vitória, ES: SEAG-ES, 1995. p.111-120.

SEDIYAMA, G. C. Evapotranspiração: necessidade de água para as plantas cultivadas. In: **Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior.** Curso de Engenharia e Manejo de Irrigação, módulo 2. Brasília, DF: ABEAS; Viçosa, MG: DEA/UFV, 1996. 173 p.

SMITH, M.; SEGEREN, A.; PEREIRA, L. S.; PERRIER, A.; ALLEN, R. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guideline for prediction of crop water requirements.** Rome: FAO, 1991. 45 p.

SOARES, A. A. Irrigação por aspersão e localizada. In: **Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior.** Curso de Engenharia e Manejo de Irrigação, módulo 4. Brasília, DF: ABEAS; Viçosa, MG: DEA/UFV, 1998. 86 p.

TURNER, N.C. Further progress in crop water relations. **Advances in Agronomy**, v. 58, p. 292-338, 1997.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A. **Localized irrigation.** Rome: FAO, 1980. 203 p. (Irrigation and Drainage Paper, 36).

VICENTE, J.R. Evolução das exportações brasileiras de café, 1997-2002. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 3., 2004, Porto Seguro. **Anais...** Porto Seguro, BA, 2004. p. 379.

VILLALOBOS, F.J.; FERERES, E. Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies. **Agronomy Journal**, v. 82, n. 1, p. 1153-1159, 1990.

ZANINI, J. R.; OLIVEIRA, J. C.; PAVANI, L. C.; PEDROSO, P. A.; VALIM, M. R. Efeito da irrigação no desenvolvimento vegetativo de cafeeiros novos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23., 1994, Campinas. **Separata...** Campinas, SP: [s. n.], 1994. p. 35-37.

APÉNDICE

APÊNDICE A

Quadro 1A – Resultados de análise estatística completa na comparação do modelo de Keller-Bliesner com os dados de KI obtidos em campo

FV	GL	SQ	Qm	F	TESTE T
Regressão	1	2,344726684	2,344726684	8536,736419	t K-b = 1,019136213
Resíduo	5	0,001373316	0,000274663		$V(\hat{\sigma}^2) = 0,000121667$
Total	6	2,3461			t cal = 1,734880999 ^{ns}
					t tab 5% (5) 2,57

^{ns} Não-significativo a 5% de probabilidade, pelo teste T.

Quadro 2A – Resultados de análise estatística completa na comparação do modelo de Fereres com os dados de KI obtidos em campo

FV	GL	SQ	Qm	F	TESTE T
Regressão	1	3,218003141	3,218003141	26957,80085	t K-b = 1,19393134
Resíduo	5	0,000596859	0,000119372		$V(\hat{\sigma}^2) = 5,28779E-05$
Total	6	3,2186			$t = 26,66925453^{**}$
					t tab 5% (5) 2,57

^{**} Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste T.

Quadro 3A – Resultados de análise estatística completa na comparação do modelo de Keller com os dados de KI obtidos em campo

FV	GL	SQ	Qm	F	TESTE T
Regressão	1	1,429639978	1,429639978	12764,13783	t K-b = 0,795791805
Resíduo	5	0,000560022	0,000112004		$V(\hat{\sigma}^2) = 0,000248072$
Total	6	1,4302			$t = 12,96535595^{**}$
					t tab 5% (5) 2,57

^{**} Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste T.

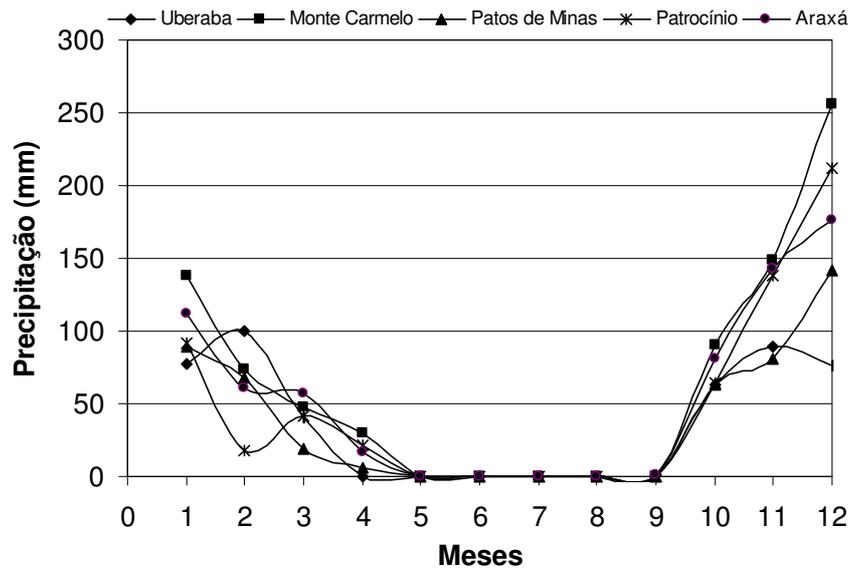


Figura 1A – Distribuição das precipitações mensais dos municípios de Uberaba, Monte Carmelo, Patos de Minas, Patrocínio e Araxá.

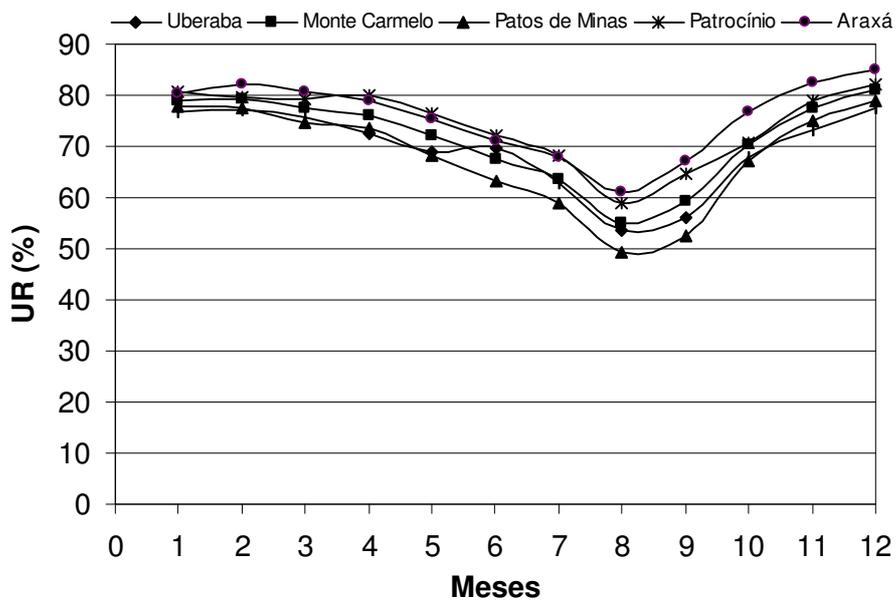


Figura 2A – Comportamento das umidades relativas (%) mensais dos municípios de Uberaba, Monte Carmelo, Patos de Minas, Patrocínio e Araxá.

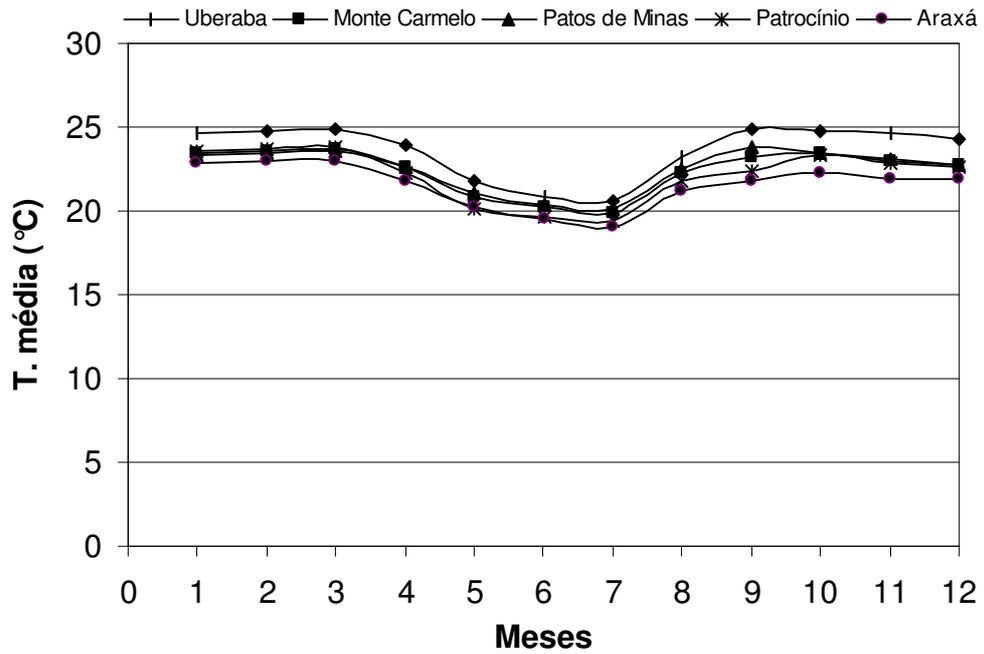


Figura 3A – Comportamento das temperaturas médias (oC) mensais dos municípios de Uberaba, Monte Carmelo, Patos de Minas, Patrocínio e Araxá.

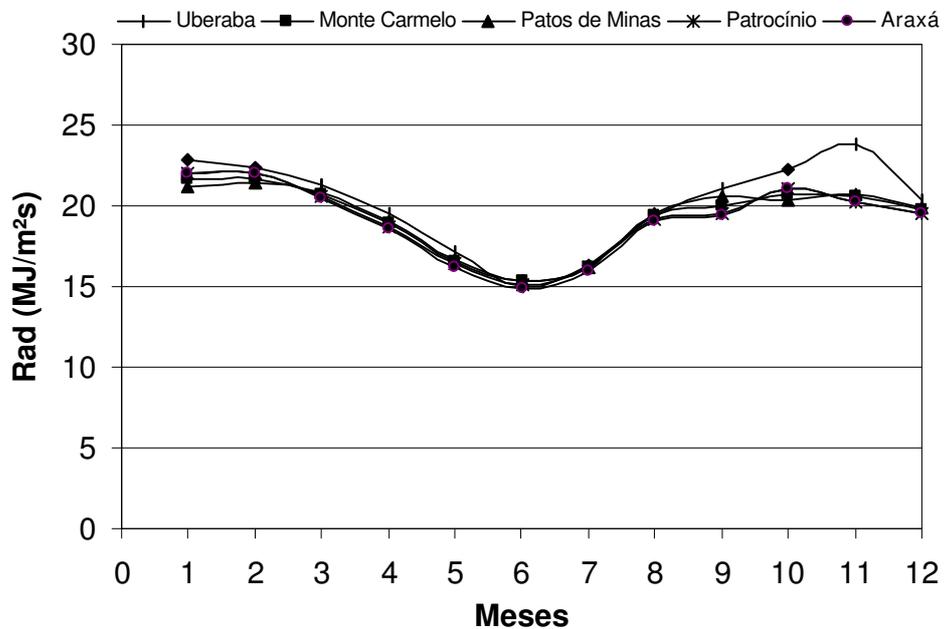


Figura 4A – Comportamento das radiações solares médias (MJ/m2s) mensais dos municípios de Uberaba, Monte Carmelo, Patos de Minas, Patrocínio e Araxá.

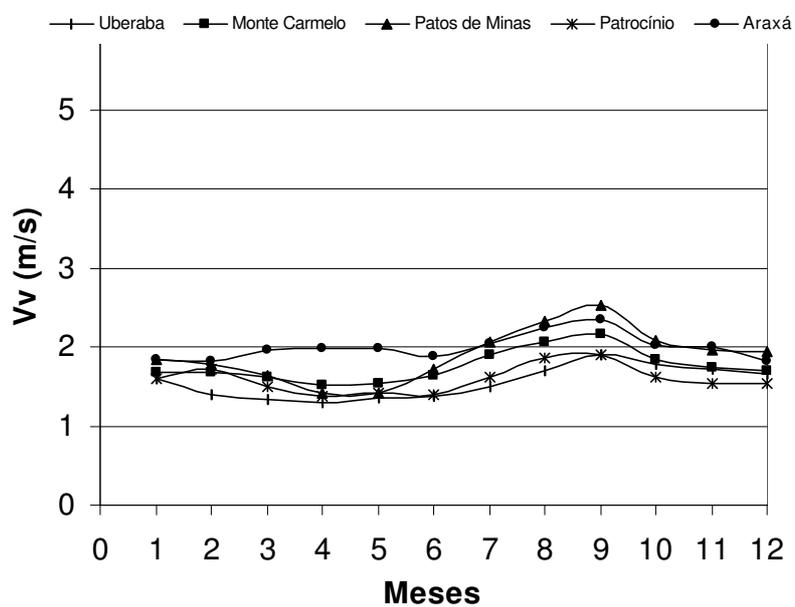


Figura 5A – Comportamento das velocidades do vento médias (m/s) mensais dos municípios de Uberaba, Monte Carmelo, Patos de Minas, Patrocínio e Araxá.

APÊNDICE B

Quadro 1B – Resultados gerais da comparação entre lâminas brutas de irrigação ou irrigações totais necessárias (ITN) para os setores, repetições, períodos e fases correspondentes, bem como a diferença em milímetros e porcentagem (%) das estimativas de ITN do tensiômetro em relação ao IRRIGA-GESAI

Setor	Fase	Período	Irriga (mm)	Tensiômetro (mm)	Diferença (%)
Setor 1 R1 P1	2	02/07/2001-07/08/2001	42,83	34,81	23,00
Setor 1 R1 P2	4	24/07/2002-10/09/2002	103,01	88,68	16,20
Setor 1 R1 P3	6	04/07/2003-10/11/2003	270,51	277,10	-2,40
Setor 1 R1 P4	7	31/03/2004-21/06/2004	135,03	134,40	0,50
Setor 1 R2 P1	2	02/07/2001-02/08/2001	38,32	30,55	25,40
Setor 1 R2 P2	4	22/07/2002-19/09/2002	106,05	103,92	2,00
Setor 1 R2 P3	6	07/07/2003-10/11/2003	265,13	270,58	-2,00
Setor 1 R2 P4	7	29/03/2004-24/05/2004	91,00	110,03	-17,30
Setor 1 R3 P1	2	02/07/2001-06/08/2001	42,67	32,97	29,40
Setor 1 R3 P2	4	22/07/2002-23/09/2002	116,07	99,89	16,20
Setor 1 R3 P3	6	04/07/2003-10/11/2003	270,12	265,43	1,80
Setor 1 R3 P4	7	29/03/2004-17/05/2004	77,18	112,23	-31,20
Setor 1 R4 P1	2	02/07/2001-07/08/2001	42,68	33,42	27,70
Setor 1 R4 P2	4	22/07/2002-20/09/2002	114,36	100,26	14,10
Setor 1 R4 P3	6	07/07/2003-10/11/2003	265,13	237,71	11,50
Setor 1 R4 P4	7	29/03/2004-12/05/2004	90,99	126,13	-27,90
Setor 2 R1 P1	2	02/07/2001-31/08/2001	72,64	60,84	19,40
Setor 2 R1 P2	3	15/04/2002-03/05/2002	31,24	26,24	19,10
Setor 2 R1 P3	6	18/09/2003-12/11/2003	133,64	128,67	3,90
Setor 2 R1 P4	7	14/04/2004-10/05/2004	50,39	52,59	-4,20
Setor 2 R2 P1	2	02/07/2001-31/08/2001	72,66	59,58	22,00
Setor 2 R2 P2	3	15/04/2002-03/05/2002	31,25	25,87	20,80
Setor 2 R2 P3	6	18/09/2003-12/11/2003	133,69	115,47	15,80
Setor 2 R2 P4	7	29/03/2004-26/05/2004	115,79	92,93	24,60
Setor 2 R3 P1	2	02/07/2001-27/08/2001	70,73	52,81	33,90
Setor 2 R3 P2	3	15/04/2002-03/05/2002	31,26	26,03	20,10
Setor 2 R3 P3	6	18/09/2003-14/11/2003	140,70	155,17	-9,30
Setor 2 R4 P1	2	02/07/2001-11/09/2001	92,32	80,85	14,20
Setor 2 R4 P2	3	15/04/2002-25/04/2002	31,28	26,69	17,20
Setor 2 R4 P3	6	19/09/2003-17/11/2003	140,79	151,39	-7,00
Setor 3 R1 P1	4	06/09/2001-08/10/2001	58,17	58,08	0,20
Setor 3 R1 P2	5	15/04/2002-01/05/2002	34,47	35,54	-3,00
Setor 3 R1 P3	6	28/08/2002-19/09/2003	48,40	43,05	12,40
Setor 3 R1 P4	7	21/04/2004-31/05/2004	77,46	78,59	-1,40
Setor 3 R2 P1	4	06/09/2001-09/10/2001	58,18	58,06	0,20
Setor 3 R2 P2	5	15/04/2002-05/05/2002	35,54	33,72	5,40
Setor 3 R2 P3	6	28/08/2002-19/09/2003	48,40	43,01	12,50
Setor 3 R2 P4	7	21/04/2004-19/05/2004	77,46	75,02	3,30
Setor 3 R3 P1	4	06/09/2001-02/10/2001	46,40	49,51	-6,30

Continua...

Quadro 1B – Cont.

Setor	Fase	Período	Irriga (mm)	Tensiômetro (mm)	Diferença (%)
Setor 3 R3 P2	5	15/04/2002-01/05/2002	35,58	35,84	-0,70
Setor 3 R3 P3	6	28/08/2002-12/09/2003	48,45	42,95	12,80
Setor 3 R3 P4	7	21/04/2004-19/05/2004	52,33	59,00	-11,30
Setor 3 R1 P1	4	06/09/2001-08/10/2001	58,21	60,14	-3,20
Setor 3 R1 P2	5	15/04/2002-05/05/2002	47,95	41,44	15,70
Setor 3 R1 P3	7	21/04/2004-19/05/2004	58,94	41,05	43,60
Setor 4 R1 P1	7	06/08/2001-23/10/2001	194,52	176,72	10,10
Setor 4 R1 P2	7	24/10/2001-22/11/2001	83,77	107,00	-21,70
Setor 4 R1 P3	7	18/09/2003-15/10/2003	74,38	74,33	0,10
Setor 4 R1 P4	7	16/04/2004-23/05/2004	67,48	56,22	20,00