

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Variabilidade dos componentes do balanço hídrico: um estudo de caso em uma cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no Brasil

Adriana Lúcia da Silva

Tese apresentada, para obtenção do título de Doutor em
Agronomia, Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2005**

Adriana Lúcia da Silva
Engenheira Agrícola

**Variabilidade dos componentes do balanço hídrico: um estudo de caso em uma cultura do
cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no Brasil**

Orientador:
Prof. Dr. **KLAUS REICHARDT**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba
2005

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Silva, Adriana Lúcia da

Variabilidade dos componentes do balanço hídrico: um estudo de caso em uma cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no Brasil / Adriana Lúcia da Silva. - - Piracicaba, 2005.

72 p. : il.

Tese (doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2005.
Bibliografia.

1. Água-do-solo 2. Balanço hídrico 3. Café 4. Chuva I. Título

CDD 633.73

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

A Deus,
por sua presença constante.

Dedico este trabalho aos mais importantes da minha vida:

-José Cândido,

meu pai, que me mostrou que sempre temos algo a
aprender com os outros, por mais simples que sejam;

-Lúcia,

minha mãe e melhor amiga, que me ensinou,
através de seu exemplo, a sempre lutar e a nunca desistir;

-Vinícius,

meu único irmão e fonte segura de amor e carinho;

-E mais recentemente, Klaus,

meu sempre orientador, que me fez ver o mundo com outros olhos.

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) através do Departamento de Irrigação e Drenagem e ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) através do Laboratório de Física do Solo, pela oportunidade de desenvolver este trabalho de doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Ao Prof. Dr Klaus Reichardt pela amizade, compreensão, dedicação e sábia orientação na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Durval Dourado Neto pela amizade e colaboração durante todo este período.

Aos Profs. do Departamento de Irrigação e Drenagem pelos ensinamentos transmitidos.

Ao Prof. Dr. Kurt Christian Kersebaum do “Institute for Soil Landscape Research (ZALF)”, Müncheberg, Alemanha pela colaboração e auxílio durante o estágio, oferecido pelo Deutscher Akademischer Austausch Dienst (DAAD).

Aos membros da banca examinadora de qualificação pelas ótimas sugestões feitas para a redação final desta tese.

À equipe técnica e aos colegas do laboratório de Física dos Solos do CENA pelo apoio e amizade.

Aos colegas e amigos do curso de Irrigação e Drenagem pelo convívio e companheirismo.

Aos amigos: Luciana, Roberta, Juliane, Ana, Isabeli, Ana Luiza, Carolina, Thomas, Luiz Roma, Luizmar, Carlos Alberto, Alexandre e Bentinho, pelo carinho, incentivo e ajuda nos momentos mais difíceis. Sem a amizade de vocês nada faria sentido.

Finalmente, a minha família que sempre me apoiou e que tenho a certeza que sempre me apoiará.

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
1 INTRODUÇÃO.....	8
2 DESENVOLVIMENTO.....	10
2.1 Revisão Bibliográfica.....	10
2.2 Materiais e Métodos.....	18
2.2.1 Campo experimental.....	18
2.2.2 Delineamento estatístico.....	20
2.2.3 Balanço Hídrico.....	21
2.2.3.1 Definições.....	21
2.2.3.2 Precipitação Pluvial (P).....	21
2.2.3.3 Irrigação (I).....	22
2.2.3.4 Evapotranspiração Atual (ER).....	23
2.2.3.5 Armazenamento de água no solo (S).....	24
2.2.3.6 Escoamento superficial (RO).....	25
2.2.3.7 Drenagem (Q _L).....	27
2.2.4 Determinação da Condutividade Hidráulica do solo K(H).....	28
2.2.5 Crescimento e Desenvolvimento do café.....	30
2.3 Resultados e Discussão.....	32
2.3.1 Precipitação Pluvial (P).....	32
2.3.2 Irrigação (I).....	35
2.3.3 Evapotranspiração atual (ER).....	36
2.3.4 Armazenamento de água no solo (S).....	41
2.3.5 Escoamento Superficial (RO).....	45
2.3.6 Drenagem (Q _L).....	47
2.3.7 Balanços.....	56
2.3.8 Crescimento das plantas.....	60
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
REFERÊNCIAS.....	68

RESUMO

Variabilidade dos componentes do balanço hídrico: um estudo de caso em uma cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no Brasil

O estabelecimento de balanços hídricos no campo é difícil e dispendioso, sendo a variabilidade de seus componentes o maior problema para se obter resultados confiáveis. Esta variabilidade dos componentes é aqui apresentada para uma cultura de café desenvolvida no hemisfério sul, em um solo tropical com 10% de declividade. É concluído que a chuva deve ser medida com um número apropriado de repetições, que a irrigação pode introduzir grande variabilidade dos cálculos, que a evapotranspiração calculada a partir da equação do balanço hídrico tem coeficientes de variação muito altos, que o componente armazenamento de água no solo é o que mais contribui na propagação dos erros e que a enxurrada pôde ser satisfatoriamente controlada nesse declive por meio de práticas de manejo.

Palavras-chave: Balanço hídrico; Variabilidade dos componentes; Chuva; Evapotranspiração; Armazenamento de água.

ABSTRACT

Variability of water balance components: a case study of a coffee crop (*Coffea arabica* L.) grown in Brazil

The establishment of field water balances is difficult and costly, the variability of its components being the major problem to obtain reliable results. This component variability is here presented for a coffee crop grown in the Southern Hemisphere, on a tropical soil with 10% slope. It is concluded that rainfall has to be measured with an appropriate number of replicates, that irrigation can introduce great variability into calculations, that evapotranspiration calculated from the water balance equation has high coefficients of variation, that the soil water storage component is the major contributor in error propagation calculations, and that the run-off could be satisfactorily controlled through crop management practices.

Keywords: Water balances; Component variability; Rainfall; Evapotranspiration; Soil water storage.

1 INTRODUÇÃO

A cultura de café se destaca entre as mais importantes do Brasil, que é reconhecido mundialmente como um dos países mais competitivos na cafeicultura. A maior safra já colhida no mundo foi a de 2002/03, chegando ao total de 120 milhões de sacas, 10 milhões de sacas acima do consumo mundial. Esse incremento se deve principalmente à safra brasileira, que também foi recorde, atingindo 48,8 milhões de sacas. A safra brasileira deve seguir variando aproximadamente entre 35 milhões e 45 milhões de sacas, em consonância com o efeito característico de bienalidade da produção (FNP, 2004).

Atualmente, a produção de café de excelente qualidade alcançou regiões anteriormente consideradas inaptas pelo elevado déficit hídrico, pela utilização de irrigação suplementar. Essa é uma tecnologia que proporciona menores riscos e mostra alta eficiência na utilização e aplicação de insumos, além de proporcionar maior produtividade e melhor qualidade do produto (SILVA, 2002). Estes fatos justificam os investimentos para a pesquisa cafeeira, no que se refere a reavaliar práticas atuais e estabelecer novas, mais adequadas do ponto de vista de sustentabilidade do sistema e do ponto de vista econômico.

O cafeeiro, como as demais culturas, necessita de água facilmente disponível no solo em sua fase vegetativa, promovendo o crescimento de ramos laterais e em sua fase reprodutiva (floração, granação e maturação dos frutos) para se desenvolver e produzir satisfatoriamente.

De uma maneira geral, a água é essencial para a produção das culturas, devendo-se fazer seu melhor uso para obter produção satisfatória e altos rendimentos (DOORENBOS; KASSAM, 1979), dando atenção especial à sua demanda pelas culturas. Quando não satisfeitas as exigências, há reflexo direto na qualidade e quantidade da produção. Por isso a irrigação deve ser utilizada, visando suprir as necessidades hídricas que ocorrem por falta ou insuficiência da precipitação, que é um dos principais elementos do ciclo hidrológico.

Segundo Stikker (1998), apenas 0,3% da água do planeta está prontamente disponível ao homem em lagos e rios e, destes, 65% são utilizados em atividades agrícolas tornando-se então, necessária a implantação de sistemas eficientes para seu uso e utilização de métodos que quantifiquem as demandas hídricas das culturas de modo que não haja desperdício.

Estimativas de consumo de água na cultura cafeeira nas diversas situações de disponibilidade hídrica ou estiagem constituem um importante instrumento para planejamento e manejo de irrigação (IAFFE; ARRUDA; SAKAI, 2000). Nesse contexto, nota-se a necessidade

de se identificar os métodos de determinação das necessidades hídricas que melhor se ajustem às condições regionais, considerando o clima, o solo, a operacionalidade, o desenvolvimento da cultura e o sistema de irrigação utilizado. A quantidade de água a ser aplicada pela irrigação depende da interação de uma série de fatores como o tipo de cultura, condições meteorológicas, tipo de solo, dentre outros. Envolvida por estes fatores está a evapotranspiração, que pode ser obtida de diferentes maneiras, por meio de medidas diretas destacando-se os lisímetros e balanço hídrico de campo, e medidas indiretas representadas por equações empíricas, semi-empíricas e evapórimetros (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

Devido a importância da cultura do café no cenário agrícola brasileiro, qualquer refinamento da prática agrícola que proporcione um custo/benefício adequado é relevante tanto do ponto de vista prático, como científico. Assim, este projeto de pesquisa foi realizado com base na hipótese de que o estado atual de nossos conhecimentos sobre a dinâmica da água, incluindo suas relações com a nutrição mineral e o crescimento/desenvolvimento de culturas perenes como a do café, ainda é insuficiente, havendo espaço para gerar ou aprimorar práticas agrícolas e procedimentos culturais que levem a uma maior sustentabilidade do sistema, a uma maior produtividade, a uma maior eficiência no uso de recursos naturais disponíveis e a melhorar a relação custo/benefício do agronegócio.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

Devido a tradição da cultura de café, introduzida no início do século XVIII (ano 1727), ela possui um manejo bem estabelecido. Uma das publicações científicas mais antigas é a de Dafert (1899) que mostra conhecimentos de época sobre a cultura racional do café. Hoje vários aspectos ainda merecem maior atenção da pesquisa, entre os quais destaca-se a adubação nitrogenada, responsável por fatia considerável do custo de produção. A recomendação oficial refere-se à aplicação parcelada da ordem de 450 kg.ha^{-1} de nitrogênio por ano agrícola, em função do rendimento esperado e do teor foliar do nutriente para cafeeiros em produção (RAIJ et al., 1996; RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999), fornecido no período chuvoso de setembro a março, compreendendo as fases de floração, desenvolvimento vegetativo e frutificação (SIMPÓSIO SOBRE FATORES QUE AFETAM A PRODUTIVIDADE DO CAFEIRO, 1986).

A eficiência da adubação nitrogenada é conhecida apenas indiretamente, por meio da resposta da cultura em termos de produção. Como as doses de nitrogênio aplicadas são altas e, aplicadas na época das chuvas com ou sem irrigação, pressupõe-se que as perdas sejam significativas. O alto custo do adubo nitrogenado, aliado ao risco de perdas tanto para a atmosfera como para regiões fora do alcance do sistema radicular, exigem um manejo correto da água e um parcelamento da adubação, o que só pode ser feito de forma adequada levando em conta a dinâmica da água no sistema, refletida por seu balanço hídrico. Além disso, o uso de isótopos, na forma de fertilizante marcado com ^{15}N , é uma ferramenta apropriada para estudos desta natureza, podendo-se avaliar o destino do fertilizante no sistema solo-planta-atmosfera e, portanto, estimar a eficiência da cultura em aproveitá-lo, bem como permite inferir sobre os vários processos de perda, como a lixiviação e a volatilização (REICHARDT; TIMM, 2004).

Por estas razões, o estudo da dinâmica da água no perfil de um solo é importante na solução de problemas que envolvem irrigação, drenagem, armazenamento e transporte de nutrientes no solo. De acordo com Choudhury e Millar (1983), o conhecimento das características hidrodinâmicas do solo auxilia no entendimento de grande número de processos físicos, químicos e biológicos de importância para a agricultura. Dentre esses, pode-se mencionar a contribuição de

água pelo lençol freático aos cultivos, a absorção da água pelo sistema radicular das culturas, o movimento de nutrientes associados ao movimento da água, a drenagem interna abaixo da zona radicular efetiva e o movimento de sais no perfil do solo.

Segundo Souza (1989), o solo é o reservatório de água para as plantas, aberto para a atmosfera e para os horizontes mais profundos do perfil, periodicamente reabastecido pela chuva, lençol freático ou irrigação. A capacidade de retenção de água pelo solo está diretamente relacionada a sua matriz e a distribuição espacial dos poros. Esta interação sofre também influência de fatores como: taxas de evaporação e transpiração locais, tipo de cultura estabelecida, densidade de plantio, profundidade e impedimentos à drenagem (CASSEL; NIELSEN, 1986).

A dificuldade de se estimar ou medir a quantidade de água no solo, que através de um equilíbrio dinâmico nele permanece por mais tempo, tem criado metodologias empíricas para a medição deste parâmetro, apresentando controvérsias quanto a sua generalização para diferentes tipos de solo. Segundo o Glossary of Soil Science Terms (SOUZA, 1989), a capacidade de campo é definida como: “quantidade de água remanescente no solo, 2 ou 3 dias após irrigação, quando a drenagem livre é desprezível”. Esta definição é oriunda daquela emitida por Veihmeyer e Hendrickson (1931), que a completaram posteriormente, relacionando o estado da energia da água neste teor de água, com a tensão de $-1/3$ atm (VEIHMAYER; HENDRICKSON, 1949).

Reichardt (1978) comenta que a água do solo foi classicamente subdividida de uma forma empírica e qualitativa, em diferentes frações, tais como: *água gravitacional*; *água capilar*, *água disponível* e *água higroscópica* e mostra que a dinâmica da água no solo é complexa, variando de situação para situação, de acordo com a “história” do perfil de solo, dependendo de inúmeros fatores como heterogeneidade do perfil de solo, tipo de planta, desenvolvimento e atividades radiculares, condições atmosféricas, etc. Do ponto de vista da disponibilidade da água para as plantas definiu-se também a água disponível AD, correspondendo à água retida entre os potenciais de $-1/3$ atm. (capacidade de campo, θ_{CC}) e -15 atm. (ponto de murchamento permanente, θ_{PMP}). Experiências das décadas 30 e 40 do século passado demonstraram que as plantas não conseguem retirar água de solos sob potenciais menores que -15 atm. Definiu-se então, o PMP como uma característica física de um solo, sendo igual ao valor da umidade do solo quando o potencial da água é -15 atm. Assim: $AD = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Muitas vezes AD é expressa também em cm ou mm, da mesma forma como o armazenamento de água no solo.

Considerando θ_{CC} e θ_{PMP} constantes e independentes da profundidade, a água disponível de uma camada de profundidade L será: $AD = L (\theta_{CC} - \theta_{PMP})$ em cm.

Estes conceitos estáticos como o da capacidade de campo definida pelo potencial de $-1/3$ atm., do ponto de murchamento permanente (-15 atm.) e conseqüentemente da AD não representam a realidade. São inúmeras citações bibliográficas de plantas que em potenciais próximos a $-1/3$ atm entraram em murchamento e, por outro lado, plantas a potenciais da ordem de -30 a -40 atm não apresentaram deficiência de água, como por exemplo, o trabalho clássico de Denmead e Shaw, (1962).

Atualmente a disponibilidade de água do solo às plantas é vista de maneira dinâmica, podendo variar de situação para situação para o mesmo solo e mesma cultura. O conceito baseia-se na mobilidade da água. Toda vez que o fluxo de água do solo para a raiz é de uma intensidade tal que supre a demanda de água da planta e da atmosfera, a água é disponível. A planta entra em déficit de água ou murcha, quando o fluxo deixa de suprir esta demanda.

Este conceito de disponibilidade de água é bastante amplo. Ele mostra que qualquer fator que afeta a mobilidade da água afeta sua disponibilidade. Estes fatores podem ser do solo, da planta e da atmosfera.

Assim é que, sob condições atmosféricas brandas (pouca radiação solar, temperatura baixa, sem vento e umidade relativa do ar alta), uma planta em um solo com água a potenciais baixíssimos (-20 a -30 atm.) muitas vezes consegue sobreviver. Nestas condições, apesar da condutividade hidráulica do solo ser muito baixa, a demanda evaporativa da atmosfera ainda é suprida pelo pequeno fluxo de água no solo. Por outro lado, sob condições atmosféricas intensas, plantas em solo com água sob potenciais altos (-1 a -3 atm) podem facilmente entrar em murcha. Isto é bastante freqüente por volta do meio-dia, quando o fluxo de água no solo, apesar de grande, não supre a demanda evaporativa da atmosfera.

Como foi mostrada nos parágrafos acima, a disponibilidade de água para as plantas é um problema complexo devido à própria complexidade do sistema. Cada caso deve ser estudado de forma particular levando em conta as leis gerais que governam o movimento de água no solo, na planta e na atmosfera e, desta forma, cada caso terá uma solução particular. Isto é importantíssimo no manejo da água em agriculturas sob diferentes condições de disponibilidade de água.

No caso de necessidade de suplementação artificial de água (irrigação) o conceito clássico de água disponível (-1/3 a -15 atm.) tem sido utilizado com frequência e com relativo sucesso (OLITTA, 1978; BERNARDO, 1995). Isto decorre do fato da necessidade de se possuir um critério para cálculo da quantidade de água a ser fornecida a uma cultura, para efeito de projeto, previsão de necessidades, dimensionamento de sistemas de irrigação, etc. É, porém, importante que o responsável pelo manejo da água em certa área esteja consciente das limitações do conceito, sem considerá-lo como uma lei física rígida, como é bastante comum entre técnicos de Agronomia. O conceito moderno de disponibilidade, mais amplo, praticamente engloba o clássico, fazendo dele um caso particular que funciona em determinadas condições e permite que muitos outros casos particulares possam ser interpretados, possibilitando soluções adequadas.

A necessidade da análise das inter-relações entre os fatores físicos de crescimento das plantas, e as propriedades do solo para definição do teor adequado de água às plantas é um fato incontestável para a grande maioria dos pesquisadores, que se dedicam ao estudo da água no solo. Letey (1985) ressalta que o intervalo de água não limitante ao crescimento das plantas pode ser reduzido pela baixa aeração e/ou alta resistência mecânica apresentada por alguns solos como consequência de densidades muito elevadas e/ou devido a problemas na estrutura e que, um pequeno intervalo de água disponível às plantas requer manejo especial para manter condições favoráveis ao seu desenvolvimento. Em situações como essa, o intervalo de água considerado não limitante para as plantas é, em geral, muito menor do que o previsto pelo método clássico de água disponível. Trabalho conduzido por Silva; Kay e Perfect (1994) em que foram avaliadas as inter-relações entre as propriedades do solo, no caso a densidade, com os fatores físicos de crescimento das plantas e, tendo como um dos objetivos medir a sensibilidade do índice LLWR (intervalo mínimo de água no solo limitante ao crescimento das plantas) associado ao potencial mátrico da água, aeração e resistência mecânica do solo, demonstrou que a variação natural na densidade de dois tipos de solo promoveu uma grande variação nesse índice.

Apesar de concordar com a ausência de respaldo teórico do método clássico de determinação da capacidade de campo, e de enfatizar grande parte das limitações já referidas e inerentes ao próprio método, Reichardt (1988) chama atenção para o fato de que, devido à facilidade encontrada na determinação em laboratório através do valor da umidade a -0,033MPa, este tem sido um critério bastante utilizado sendo que, algumas vezes, com resultados consistentes, principalmente, em projetos de irrigação. O autor alerta, no entanto, que, em caso de

seu uso em condições de solos tropicais, deve-se optar por potenciais maiores, entre -0,01 e -0,006 MPa, os quais ocorrem com maior frequência nestas regiões em que os solos são submetidos a drenagem em condições de campo.

A grande maioria dessas observações têm sido testadas e confirmadas ao longo das últimas décadas e contribuído para consolidar a tese de que a água disponível no solo para as plantas está relacionada aos seus diferentes estados de energia e deve ser vista, portanto, dentro de um conceito biofísico, onde deverão estar envolvidos a planta com todo o seu sistema radicular e outras propriedades que lhe são inerentes, as condições meteorológicas que determinam seu regime de transpiração das plantas e de evaporação do solo que além de todas as características físicas do solo que interferem nos fatores físicos de crescimento como potencial e conteúdo de água no solo, aeração, resistência à penetração das raízes e temperatura do solo. Com base nesse pressuposto, é de se esperar, portanto, que quanto maior o número de fatores envolvidos no estudo da dinâmica da água no solo, maior será a aproximação com as condições de campo. Entre os vários métodos existentes para avaliar a dinâmica da água no solo e o seu volume disponível para uma determinada cultura, em determinado ecossistema e período de tempo, um dos mais informativos é o balanço da água no campo.

Para determinar a quantidade e a disponibilidade de água para as plantas é necessário um conhecimento da dinâmica da água no solo. O balanço hídrico é um dos métodos utilizados para estimar essa demanda hídrica para os diferentes estádios de desenvolvimento das culturas. Através da equação geral de conservação da massa é possível quantificar a água que entra e sai em um volume de solo durante um determinado período de tempo. Diversos autores citaram essa equação como metodologia para quantificar a água disponível para as plantas, entre eles Rose e Stern (1967); Reichardt et al. (1979); Hillel (1982); Villagra et al. (1995) e Timm (2002).

Segundo Tubelis e Nascimento (1992), o balanço hídrico indica a contabilização da água do solo, representando o balanço entre o que entrou e o que saiu de água. Os valores de balanço hídrico altos indicam excedentes hídricos e os baixos, deficiência hídrica ou falta de água. Ocorre excedente de água sempre que a precipitação for superior à quantidade necessária para atender à evapotranspiração potencial¹ e completar o armazenamento de água no solo. A deficiência

¹ Thornthwaite e Wilm introduziram o termo Evapotranspiração potencial (Etp), em 1944, que representa a perda natural de água do solo vegetado para a atmosfera através da ação conjunta da evaporação e da transpiração. A ETp é processo oposto à precipitação, representa a água que retorna forçosamente para a atmosfera, em estado gasoso, e depende da energia solar disponível na superfície do terreno para vaporizá-la (CAMARGO; CAMARGO, 2001).

aparece sempre que o solo não conseguir suplementar a demanda atmosférica. O balanço hídrico contabiliza a precipitação perante a evapotranspiração potencial, levando em consideração a capacidade de armazenamento de água no solo. Esta é a máxima quantidade de água, utilizável pelas plantas, que pode ser armazenada na sua zona radicular. O valor de armazenamento para a cultura de café já foi determinado, estipulado em 125mm, pelo método de Thornthwaite-Mather.

Em relação à cultura do café, Carvajal (1972) constata que ao se avaliar o ótimo de precipitação para o cafeeiro, deve-se considerar algumas variáveis importantes: precipitação anual média, distribuição da precipitação durante o ano (número de meses secos), desvio da precipitação anual em relação a média (anos secos e úmidos) e condições do solo (características físicas). Coste (1968) também menciona a importância de se considerar o total das precipitações durante o ano e sua repartição mensal, quinzenal, decendial ou pentadial. As exigências das chuvas são da ordem de 1500 a 2000 milímetros anuais (ALFONSI, 2000).

Camargo e Camargo (2001), confirmam que a cultura do café leva dois anos para completar o ciclo fenológico de frutificação, sendo constituído de seis fases distintas iniciada em setembro: 1º fase, vegetativa, com sete meses, de setembro a março, todos com dias longos; 2º fase, também vegetativa, de abril a agosto, com dias curtos, quando há indução das gemas vegetativas dos nós formados na 1º fase, para gemas reprodutivas. No final da 2º fase, em julho e agosto do 1º ano fenológico, as plantas entram em relativo repouso com formação de um ou dois pares de folhas pequenas, que aparecem no período de relativo repouso do cafeeiro, entre os dois anos fenológicos. Em seguida vem a maturação das gemas reprodutivas após a acumulação de 350mm de evapotranspiração potencial (ETp), a partir de abril; 3º fase, de florada e expansão dos frutos, de setembro a dezembro. As floradas ocorrem cerca de 8 a 15 dias após o aumento do potencial hídrico nas gemas florais (choque hídrico), causado por chuva ou irrigação; 4º fase, granação dos frutos, de janeiro a março; 5º fase, maturação dos frutos ao completar cerca de 700mm de somatório de Etp, após a florada principal, de abril a junho; 6º fase, de senescência e morte dos ramos produtivos, não primários, em julho e agosto.

O cafeeiro, para vegetar e frutificar normalmente, necessita encontrar água facilmente disponível no solo durante todo o período de vegetação e frutificação que vai de setembro a maio (CAMARGO, 1977). Para definir satisfatoriamente as disponibilidades hídricas climáticas, Assad e Pinto (2001) estabeleceram limites para definir as áreas propícias para o cultivo do café no Estado de São Paulo. Déficit hídrico anual menor que 100mm apresenta condições aptas para o

cultivo do café, déficit hídrico entre 100 e 150mm indicam condições marginais para a cafeicultura, recomendando-se irrigação e, déficit hídrico maior que 150mm representa condições inaptas para o cultivo do café.

Segundo Santinato; Fernandes e Fernandes (1996), os estudos e o acompanhamento das lavouras através do balanço hídrico indicam a aptidão hídrica para o cafeeiro que pode ser vista no Quadro 1, com indicações da necessidade ou não de irrigação.

DÉFICIT HÍDRICO (MM)	APTIDÃO HÍDRICA (MM)	OBSERVAÇÕES
< 100	Apto sem irrigação	-
100 a 150	Apto com irrigação ocasional	Anos com déficit hídrico superior a 150 mm prejudiciais ao cafeeiro
150 a 200	Apto com irrigação suplementar ou complementar	Ocorre déficit hídrico altamente prejudicial ao cafeeiro
> 200	Apto com irrigação obrigatória	Em todos os anos o déficit hídrico é limitante ao cafeeiro

Quadro 1 - Aptidão hídrica do cafeeiro

Estudos de balanços hídricos nas diferentes regiões cafeeiras do Brasil e do mundo indicam que o café, cultivar arábica, suporta até 150 mm/ha de deficiência hídrica, especialmente se este período não se prolongar até o mês de setembro e se as condições de solo (textura e profundidade) forem adequadas (solos argilosos e profundos).

Assim, havendo água no solo facilmente disponível durante todo o período de maior vegetação e frutificação, de setembro a abril/maio, a umidade do solo no período de julho a agosto pode ser bastante reduzida sem causar problemas na diferenciação floral, dormência e florada, situação que acontece no sul de Minas e Mogiana de São Paulo.

O processo de iniciação floral que culmina com a formação dos primórdios florais claramente reconhecíveis é precedido de reações fisiológicas que levam à indução do estado florífero na planta, o qual resulta na produção do estímulo floral e da evocação do meristema, ao final, irreversivelmente destinado a transformar-se em flor ou inflorescência. A transição floral em que a gema vegetativa passa a reprodutiva, a evocação, compreende uma seqüência de eventos de natureza morfológica, fisiológica e bioquímica, que começa com a chegada do

estimulo indutivo (RENA; MAESTRI, 1986). Os botões florais após a diferenciação crescem até atingir 4 a 5 mm de comprimento, quando entram em dormência se houver antes um período seco definido (MES, 1957; PAGACZ, 1959). Segundo Oliveira (2003) a irrigação nas épocas: abril a julho, abril a junho e abril e maio, proporcionaram uma maior quantidade de flores nos ramos dos cafeeiros e os cafeeiros que receberam água através da irrigação no período de florescimento apresentaram maior número de floradas.

Para projetos de irrigação objetivando estabelecer o volume necessário de água mensal ou anual a fim de implantação do sistema de irrigação e respectivo manejo, é recomendado o balanço hídrico de região com base nas médias das normais climatológicas de temperatura, precipitações e evapotranspiração.

O Quadro 2 refere-se ao coeficiente de cultura do café (K_c), que foi construído com base em experimentos e acompanhamentos de campo de inúmeras lavouras irrigadas no Triângulo Mineiro, Nordeste de Minas e Oeste da Bahia, em função do espaçamento entre ruas, espaçamento entre plantas e idade da lavoura (SANTINATO; FERNANDES; FERNANDES, 1996).

IDADE (ANOS)	espaçamento entre ruas X entre plantas(m)	VALORES DE K_c
Adulta > 3	a) > 3.0 x >1.0 ↔ 2500 plantas/ha	1.0
	b) > 3.0 x 0.5 a 1.0 ↔ 3333 plantas/ha	1.1
	c) 2.0 a < 3.0 x 0.5 a 1.0 ↔ 6666 plantas/ha	1.2
	d) 1.0 a < 2.0 x 0.5 a 1.0 ↔ 13333 plantas/ha	1.3
Nova 1 a < 3	a) > 3.0 x >1.0 ↔ 2500 plantas/ha	0.8
	b) > 3.0 x 0.5 a 1.0 ↔ 3333 plantas/ha	0.9
	c) 2.0 a < 3.0 x 0.5 a 1.0 ↔ 6666 plantas/ha	1.0
	d) 1.0 a < 2.0 x 0.5 a 1.0 ↔ 13333 plantas/ha	1.1
Nova 0 < 1	a) > 3.0 x >1.0 ↔ 2500 plantas/ha	0.6
	b) > 3.0 x 0.5 a 1.0 ↔ 3333 plantas/ha	0.7
	c) 2.0 a < 3.0 x 0.5 a 1.0 ↔ 6666 plantas/ha	0.8
	d) 1.0 a < 2.0 x 0.5 a 1.0 ↔ 13333 plantas/ha	0.9

Quadro 2 - Valores de coeficiente de cultura (K_c) em função do espaçamento entre ruas, espaçamento entre plantas e idade da lavoura

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Campo experimental

O experimento foi conduzido na fazenda Areão da ESALQ/USP em Piracicaba, SP, (22°42'S, 47°38'W, 580m de altitude) em solo classificado como Nitossolo Vermelho Eutroférico, A moderado e textura argila. O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, denominado "tropical de altitude" mesotérmico de inverno seco, em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente ultrapassa 22°C. As médias anuais de temperatura, precipitação pluvial e umidade relativa são de 21,1°C, 1.257 mm e 74%, respectivamente. A estação seca ocorre entre os meses de abril e setembro, sendo julho o mês mais seco. O mês mais chuvoso oscila entre janeiro e fevereiro. O total das chuvas do mês mais seco não ultrapassa 30 mm (VILLA NOVA, 1989).

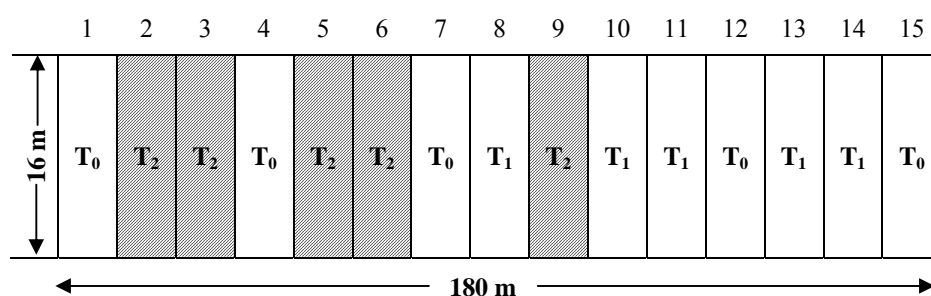
Foram utilizadas plantas de cafeeiro (*Coffea arabica L.*) da cultivar "Catuaí Vermelho" (IAC-44). O plantio foi feito em renque, ao longo de curvas de nível, em maio de 2001 tendo um espaçamento de 1,75 m entrelinhas e 0,75 m entre plantas. A área total é de aproximadamente 0,2 ha, que foi dividida em 15 talhões com aproximadamente 120 plantas cada (150 m²), utilizados para distribuir em arranjo casual três tratamentos de estudo paralelo de balanço de nitrogênio, com cinco repetições, descritos abaixo.

O início das avaliações experimentais se deu às 8h00 horas do dia 01 de Setembro de 2003. A datas posteriores receberam a sigla DAI (dia após o início) juntamente com o número de dias que se sucederam. É importante notar que um dia experimental se inicia às 8h00 da manhã e termina às 8h00 da manhã do dia seguinte. Este início baseou-se no trabalho de Camargo e Camargo (2001) que mostram que a cultura do café tem um ciclo fenológico de dois anos, com início em setembro. Os balanços hídricos se estenderam por dois anos agrícolas, cobrindo as safras 2003/2004 (menor produção devido à bianualidade da cultura) e 2004/2005 (maior), terminando em DAI-729 (30 Agosto 2005).

Para o estabelecimento do balanço hídrico foram utilizadas as 5 repetições correspondentes aos tratamentos de maior dose de fertilizante nitrogenado (T₂) de experimento paralelo (FENILLI, 2005). Dentro de cada parcela T₂ foi escolhida uma sub-parcelas com 9 plantas cobrindo uma área de 12 m², com um declive de 10 ± 2% cada uma. Essas sub-parcelas

foram cercadas com tela de arame de 80cm de altura para o estudo dos balanços de água e de nitrogênio (FENILLI, 2005) por adubação com sulfato de amônio enriquecido à 2,072 at.% de ^{15}N (Figura 1). A área experimental (Figura 2) é coberta pela extremidade de um pivô central, localização que não permite aplicações de lâminas regulares. Nas proximidades (cerca de 200 m) do experimento encontra-se uma estação meteorológica automática.

(A)



(B)

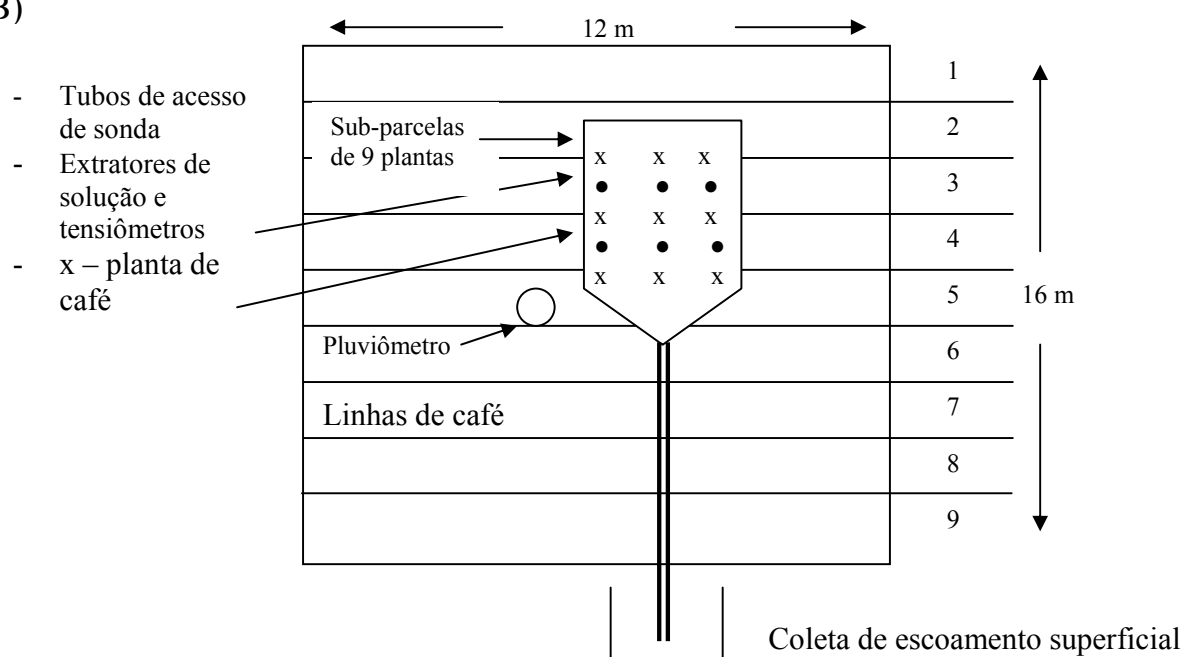


Figura 1 - A: Esquema da área experimental com as 15 parcelas numeradas de 1 a 15, indicando as 2, 3, 5, 6 e 9 onde se fizeram os balanços hídricos (T_0 = sem nitrogênio; T_1 = meia dose; T_2 = dose integral); B: Detalhe de uma sub-parcela indicando a localização da instrumentação



Figura 2 - Vista geral do campo no momento da instalação do experimento, com destaque para os coletores de enxurrada

2.2.2 Delineamento estatístico

O delineamento experimental que foi usado, apresentado em estudos paralelos de crescimento e desenvolvimento da cultura (COSTA, 2005) e de balanço de nitrogênio (FENILLI, 2005) foi o de blocos ao acaso com três tratamentos de N, T_0 , T_1 (1/2 dose) e T_2 (1 dose), com 5 repetições cada um. No primeiro ano (2003/2004) o T_2 recebeu 280 kg N.ha^{-1} , na forma de sulfato de amônia, aplicado em 4 partes (DAI-0, DAI-63, DAI-105 e DAI-151) com adubação normal de P e K. No segundo ano (2004/2005) recebeu 350 kg N.ha^{-1} do mesmo fertilizante, também aplicado em 4 doses (DAI-366, DAI-429, DAI-471 e DAI-519).

Para o balanço hídrico, foco principal deste trabalho, não houve tratamentos, ele foi estabelecido apenas nas 5 repetições das parcelas com tratamento T_2 , que receberam a dose de fertilizante atualmente recomendada, nas quais a probabilidade de lixiviação do nitrogênio do

fertilizante é mais provável. A variabilidade dos componentes do balanço hídrico foi estudada através de médias (\bar{m}), desvios padrão [s(m)] e coeficientes de variação (CV).

2.2.3 Balanço Hídrico

2.2.3.1 Definições

A equação clássica de balanço hídrico, que representa o conceito de conservação de massa de água, considera os fluxos de água que entram e que saem de um volume unitário de solo, delimitado pela superfície do solo ($z = 0$) e por um plano horizontal situado em $z = L = 1,0\text{m}$. Pela idade do café este volume contém a quase totalidade do sistema radicular (FENILLI, 2005). Os fluxos foram integrados em relação ao tempo, em períodos de 14 dias, $\Delta t = t_{i+14} - t_i$, por um período de 2 anos:

$$\int_{t_i}^{t_{i+14}} p dt + \int_{t_i}^{t_{i+14}} i dt - \int_{t_i}^{t_{i+14}} e dt - \int_{t_i}^{t_{i+14}} r dt \pm \int_{t_i}^{t_{i+14}} q_L dt + S_{i+14} - S_i = 0 \quad (1)$$

que por solução das integrais resulta em:

$$P + I - ER + S_{i+14} - S_i - RO - Q_L = 0 \quad (2)$$

onde todas as unidades dos componentes do balanço são dadas em mm: P = precipitação pluvial; I = irrigação; ER = evapotranspiração atual; S = armazenamento de água no solo na camada de 0 – 1 m em t_i e t_{i+14} ; RO = escoamento superficial, enxurrada ou runoff; e Q_L = fluxos de drenagem ou de ascensão de água no limite inferior do volume de solo, na profundidade $z = 1$ m. A coordenada vertical de posição z é tomada como nula na superfície do solo e negativa de cima para baixo. A eq. (2) foi usada com valores médios de cinco repetições.

Em seguida são apresentados os detalhes de cada componente.

2.2.3.2 Precipitação Pluvial (P)

Este componente foi medido com pluviômetros do tipo “Ville de Paris”, com área de captação de $0,04047 \text{ m}^2$, instalados junto às sub-parcelas, de tal forma que sua boca ficasse a 1,2m da superfície do solo (Figura 3). As medidas da precipitação acumulada em 24h foram realizadas às 8h00 da manhã de cada dia de chuva, sendo o valor correspondente às 24 horas anteriores.

Devido à presença de obstáculos na redondeza da área experimental, como um silo, galpão e árvores, a precipitação foi medida em cada parcela T₂ usando portanto 5 pluviômetros, distantes entre si de 15 a 100 m, o que abriu a possibilidade de obter valores médios \bar{m} com desvios padrão SD e coeficientes de variação CV, avaliando desse modo a variabilidade dessa componente.



Figura 3 - Pluviômetro e a extremidade do pivô central

2.2.3.3 Irrigação (I)

Em épocas de muita seca foi feita irrigação suplementar através de um pivô central instalado na área (Figura 4). As parcelas de café ficam na extremidade desse pivô o que aumentou a variabilidade de aplicação de água, medida também através dos 5 pluviômetros instalados em cada parcela do balanço hídrico.

Os critérios de quanto e quando irrigar levaram em conta o fato das irrigações serem suplementares e aplicadas apenas em caso de extrema necessidade, por falta ou atraso da chuva. Levaram também em conta aspectos da fisiologia do café, que exige inverno frio e seco para dar início à floração. Depois da floração a falta excessiva de água acarreta queda de frutos. Assim as

irrigações foram administradas por critério visual de déficit hídrico, procurando aplicar uma lâmina de 30 mm que, pelos cálculos de armazenamento de água no solo, molharia uma camada de 0,3 a 0,4 m de solo, cobrindo assim a parte principal do sistema radicular do café cuja densidade radicular na camada superficial do solo é muito alta. Fatores operacionais do pivô e de deriva por vento, porém, não permitiram aplicação correta. De qualquer forma, estes poucos eventos afetaram pouco o balanço hídrico, objetivo principal desse estudo.



Figura 4 - Pivô central em operação

2.2.3.4 Evapotranspiração Atual (ER)

A evapotranspiração atual da cultura (ER) foi estimada pela diferença dos outros componentes, de acordo com a eq. (2), de duas formas distintas:

1. ER_i : Assumindo $Q_L = 0$ na eq. (2) do balanço. Com esta consideração, em períodos em que há Q_L a ER é superestimada pois inclui Q_L . Nestes períodos, como há abundância de água no solo, considerou-se $ER = ET$ (evapotranspiração potencial) e a diferença $ER_i - ET = Q_L$. A evapotranspiração potencial foi corrigida pela evapotranspiração de referência (ET_0) e pelo coeficiente de cultura (K_C) e a ET_0 , calculada usando a equação de Penman-Monteith (PEREIRA;

VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997) com os dados meteorológicos coletados na estação próxima à área experimental, obtida no site <http://www.climapiracicaba.hpg.com.br>. O K_C foi calculado pelo quociente entre ER e ET em alguns períodos em que as plantas não sofriam estresse, quando o armazenamento de água no solo era relativamente alto, e nos quais se tinha certeza de não ter havido drenagem.

2. ER_{ii} : Calculada como incógnita da eq. (2), estimando a drenagem Q_L através de equação de Darcy, como será visto a seguir.

É importante notar que nos períodos em que $Q_L = 0$, $ER_i = ER_{ii}$.

2.2.3.5 Armazenamento de água no solo (S)

O armazenamento da água no solo S , na camada de 0-1,0 m, foi estimado nos tempos t_{i+14} e t_i pela integração em relação à profundidade, de medidas de umidade de solo (θ) obtidas pelo uso de sonda de nêutrons (BACCHI; REICHARDT; CALVACHE, 2002). Para isso, três tubos de acesso para sonda foram instalados até a profundidade de 1,2m, em cada parcela, totalizando 15 tubos. A calibração da sonda, modelo CPN 503 DR, foi feita em uma área adjacente ao experimento, correlacionando leituras da sonda com valores de umidade volumétrica do solo (Figura 5).



Figura 5 - Sonda de nêutrons em operação, durante uma medida de umidade do solo

As medições da umidade do solo foram feitas nas profundidades de 0,20, 0,40, 0,60, 0,80 e 1,00 m nas datas selecionadas, durante todo o período experimental, iniciando em t_i para $i = 0$ (DAI-0) e continuando em t_{i+14} , sendo $i = 0, 14, 28, \dots$, com $\Delta t = 14$ dias, até DAI-728.

O armazenamento de água no solo S (mm) foi aproximado pelo método trapezoidal, como sugerido por Reichardt e Timm (2004):

$$S = \int_0^L \theta dz \cong [\bar{\theta}(t_i)] \cdot L \quad (3)$$

onde $\bar{\theta}$ é a média das umidades nas cinco profundidades e a profundidade do solo L é tomada como 1000 mm para que o resultado de S seja obtido em mm.

2.2.3.6 Escoamento superficial (RO)

Para o controle de escoamento superficial de água cada parcela experimental foi delimitada por diques de metal (Figura 6). Sua medição foi feita através da água escoada por gravidade pelas parcelas experimentais, que foi coletada em sua parte inferior em coletores de

60L. O volume (L) coletado, dividido pela área de cada parcela (12 m^2) resulta na lâmina de água em mm, lembrando a relação: $1 \text{ L/m}^2 = 1 \text{ mm}$.



Figura 6 - Diques de metal utilizados para delimitar as sub-parcelas e recolher o escoamento superficial



Figura 7 - Detalhe do tanque de 60 litros para coleta do escoamento superficial

2.2.3.7 Drenagem (Q_L)

A perda de água no limite inferior do elemento de volume de solo utilizado para o balanço, por drenagem Q_L foi também estimada de duas formas distintas, como já indicado no item 2.2.3.4:

1. Q_{Li} : Considerando $Q_L = 0$ na eq. (2) do balanço e calculando ER pela mesma equação. Neste caso, ER é superestimada (incluindo Q_L), e $Q_L = ER - K_C \cdot ET_0$;

2. Q_{Lii} : Pelo uso da equação de Darcy-Buckingham, na profundidade de $L = 1\text{m}$. Para isso foram instalados tensiômetros em cada parcela, nas profundidades de 0,9 e 1,1m, com três repetições, para estimativa do gradiente de potencial (ΔH) em $z = 1,0\text{ m}$, por diferenças finitas. O potencial total da água no solo (H) foi considerado como a soma do potencial gravitacional (z), negativo de cima para baixo a partir da superfície do solo, e o potencial matricial (h). Com os tensiômetros, munidos de vacuômetros mecânicos (tipo cápsula de Bourdon) obtém-se leituras de H em mmHg, que foram transformados em cm de coluna d'água pelo fator 1,36. Para facilitar as operações de cálculo, levando em consideração que a profundidade é a mesma, optou-se por usar

a condutividade hidráulica na forma $K(H)$ e assim o fluxo de água instantâneo q_L em $z = 1,0$ m foi calculado por:

$$q = -K(H) \frac{\partial H}{\partial z} \quad (4)$$

onde q é a densidade de fluxo de Darcy-Buckingham (mm.dia^{-1}) e $\partial H / \partial z$ calculado por diferença finita:

$$\frac{\partial H}{\partial z} = \frac{H_{110} - H_{90}}{20} \quad (5)$$

A relação $K(H)$ foi obtida pelo método de Reichardt et al. (2004), como descrito no item 2.2.4, abaixo.

A integração numérica da eq. (4) em relação ao tempo resultou nos valores de Q_L :

$$Q_L = \int_{t_i}^{t_{i+14}} q dt \cong \sum_{i=1}^{14} q_i \Delta t = q_1 + q_2 + \dots + q_{14} \quad (6)$$

que com Δt igual a 1 dia, resultam 14 valores de q_i cuja soma é equivalente à Q_L para cada período de balanço. Leituras de tensiômetros foram feitas somente durante períodos úmidos com possibilidade de drenagem e não diariamente, de tal forma que houve a necessidade de fazer interpolações para obter 14 leituras de H por período com drenagem.

2.2.4 Determinação da Condutividade Hidráulica do solo $K(H)$

A medida de $K(H)$ foi feita em parcela separada, próximo a área experimental, pelo método do perfil instantâneo (REICHARDT; TIMM, 2004). As plantas de café foram cortadas na superfície do solo, mantendo seus sistemas radiculares para deixar o solo em condição mais próxima possível da que ocorre nas áreas de medida de balanço hídrico. O método específico de drenagem interna foi o de Reichardt et al. (2004) que se baseia na saturação prévia do solo por infiltração com posterior acompanhamento da drenagem interna. Para isso foi utilizado um conjunto de anéis concêntricos (interior com diâmetro de 1,5 m e externo de 2,5 m) que receberam uma lâmina de água constante de cerca de 50 mm, por mais de 6 horas, isto é, até a infiltração atingir o equilíbrio dinâmico para a medida da infiltração básica, aqui denominada de condutividade hidráulica saturada K_0 (mm.dia^{-1}) (Figura 8). No anel central foram instalados três tubos de acesso de sonda de nêutrons para medidas da umidade (θ) nas mesmas profundidades

utilizadas nas parcelas experimentais, e três conjuntos de tensiômetros nas profundidades de 0,9 e 1,1 m, para medidas do potencial total (H) na região do limite inferior do balanço.



Figura 8 - Conjunto de cilindros concêntricos para uso do método de determinação da condutividade hidráulica

Durante o processo de infiltração mediu-se a taxa de infiltração (i) através da variação da altura da lâmina de água (l) em função do tempo (t):

$$i = \frac{(l_1 - l_2)}{(t_2 - t_1)} \quad (7)$$

No equilíbrio dinâmico, quando i tende a estabilizar-se em torno de um valor médio constante, considerou-se $i = K_0$ e também foram feitas medidas da umidade de saturação (θ_0), parâmetros necessários para a determinação da equação de condutividade hidráulica do solo.

Finalizada a infiltração ($t = 0$ para a drenagem), os anéis foram cobertos com lona plástica para evitar perdas por evaporação, e iniciou-se uma série de medidas de $\theta_{(z,t)}$ e de $H_{(z,t)}$ em intervalos crescentes de tempo, uma vez que, o processo de drenagem é desacelerado, interrompendo-as depois de 13 dias.

Segundo o método proposto por Reichardt et al. (2004), estas séries de dados são utilizadas em regressões semilogarítmicas para obter os parâmetros da relação $K(\theta)$:

$$\theta_z(t) = a + b \ln t \quad (8)$$

$$S_L(t) = c + d \ln t, \text{ sendo } L=1,0 \text{ m} \quad (9)$$

$$H_L(t) = e + f \ln t, \text{ para } z=0,9 \text{ e } 1,1 \text{ m} \quad (10)$$

Feitas as regressões e sendo elas significativas, seus parâmetros são inseridos na seguinte equação:

$$K(\theta)_L = \left\{ \frac{\left[-d \cdot \exp\left(\frac{a}{b}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{-\theta}{b}\right) \right]}{\left[e' + \frac{f'}{b}(\theta - a) \right]} \right\} \quad (11)$$

Como foi visto acima, no item 2.2.3.7, foi utilizada a relação $K(H)$ e não $K(\theta)$. A razão disto é que as variações de condutividade do solo durante períodos de drenagem são muito grandes e como θ é apenas medido de 14 em 14 dias, muita informação seria perdida. Nestes períodos, as leituras de tensiômetros foram intensificadas e um maior número de dados de H ficou disponível. Dessa forma, na eq. (11) o θ foi substituído por H através do uso das eqs. (8) e (10) e a equação final utilizada para os cálculos de q_L foi:

$$K(H)_L = \left\{ \frac{\left[-d \cdot \exp\left(\frac{\bar{e}}{f}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{-H}{f}\right) \right]}{\left[e' + \frac{f'}{f}(h - \bar{e}) \right]} \right\} \quad (12)$$

2.2.5 Crescimento e Desenvolvimento do café

Devido à estreita ligação entre as magnitudes dos componentes dos balanços hídricos e de nitrogênio com o crescimento das plantas de café, durante o 1º ano (DAI 0 a DAI 366) foi feita uma análise de crescimento e de desenvolvimento, apresentada em maior detalhe em Costa (2005). A cada 60 dias, aproximadamente, foram coletadas plantas inteiras, uma de cada repetição, semelhantes às das parcelas experimentais utilizadas no balanço hídrico, mas localizadas fora delas. Nestas plantas, mediu-se a matéria seca MS de cada uma de suas partes,

dimensões destas partes e área foliar. O sistema radicular foi avaliado apenas uma vez aos DAI 366, no início do 2º ano fenológico, através de tradagens das camadas 0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8 e 0,8-1,0m, com trado de caneca, de 0,08m de diâmetro. Por meio de cubagens calculou-se a matéria seca radicular no volume ocupado por uma planta: $0,75 \times 1,75 \times 1,00 \text{ m}^3$.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Precipitação Pluvial (P)

No período analisado (DAI-0 a DAI-728), que cobre duas colheitas de café, a chuva P acompanhou bem os valores normais de precipitação pluvial (P') de Piracicaba, com uma pequena discrepância no final do período, como mostra a Figura 9. Esta pluviosidade está um pouco abaixo daquela indicada por Alfonsi (2000) como a ideal para a cultura do café, mas os resultados aqui obtidos mostram que Piracicaba é uma região apta à cultura, com eventual necessidade de irrigação nos períodos secos de maio a setembro. Os valores integrados de precipitação para cada período de balanço (14 dias) estão apresentados na Tabela 1. Apesar dos pluviômetros se encontrarem relativamente próximos entre si (de 15 a 100 m), houve variabilidade significativa entre as leituras das 5 repetições. De uma maneira geral a maioria dos CVs foram baixos, variando de 1,9 a 4%, com alguns destaques de valores maiores, principalmente os dos períodos de balanço 2, 16, 22, 29 e 40 com CVs acima de 10%. O maior CV nos balanços 2, 22 e 40 se justificam pelos valores médios baixos de P e nos balanços 16 e 29 aparecem uma ou mais repetições com valores discrepantes, provavelmente devidos a condições muito localizadas impostas pelos obstáculos mencionados em Materiais e Métodos.

A variabilidade dos dados, quantificada pelos CVs da Tabela 1, justifica a necessidade da medida de P com repetições em situações como as do presente experimento. Reichardt et al. (1995) discutem o problema da variabilidade da chuva em Piracicaba e mostraram que a variabilidade espacial tem que ser levada em consideração e que P tem que ser medido o mais próximo possível da área experimental. Estes autores mostraram que 10 pluviômetros distribuídos em uma área da ordem de 1.000 ha apresentavam alta variabilidade espacial para períodos curtos, de 1 a 30 dias, mas que as médias acumuladas para 1 ano apresentaram CV menor que 3%, e que no nosso caso, para o período total, foi de 2,4%.

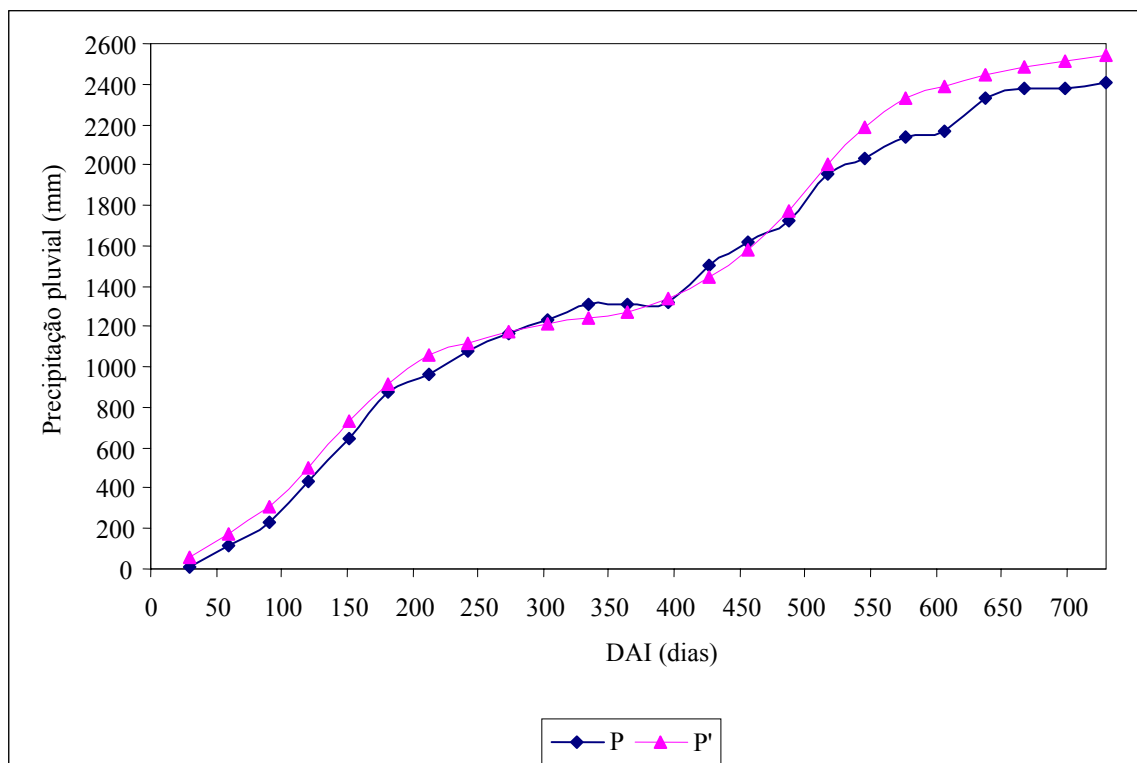


Figura 9 - Comparação entre os valores acumulados de precipitação pluviométrica P e de normais P' (observações de 1917 a 2004). DAI = dias após o início
 Fonte: <http://www.ciagri.usp.br/~emdabreu/MEDIAS.TXT>

Tabela 1 - Precipitação média (P), desvios padrão (SD) e coeficientes de variação (CV) de cada período analisado. DAI = dias após o início

(continua)

Nº Balço	Período	DAI	Precipitação Pluvial (P)							
			2	3	5	6	9	\bar{P}	s(P)	CV
1	01/09 a 15/09	0_14	4,0	4,2	4,3	4,2	4,0	4,1	0,1	3,2
2	15/09 a 29/09	14_28	5,8	5,8	6,4	4,8	6,2	5,8	0,6	10,6
3	29/09 a 13/10	28_42	79,0	75,4	80,6	78,0	75,9	77,8	2,2	2,8
4	13/10 a 27/10	42_56	18,2	18,1	18,2	17,6	17,5	17,9	0,3	1,9
5	27/10 a 10/11	56_70	25,4	24,9	26,3	24,5	25,5	25,3	0,7	2,7
6	10/11 a 24/11	70_84	75,7	74,2	78,7	74,2	72,5	75,1	2,3	3,1
7	24/11 a 08/12	84_98	93,9	88,9	91,8	87,4	86,7	89,7	3,0	3,4
8	08/12 a 22/12	98_112	51,0	49,8	49,3	48,5	48,0	49,3	1,2	2,4
9	22/12 a 05/01	112_126	89,2	86,5	85,1	84,4	82,8	85,6	2,4	2,8
10	05/01 a 19/01	126_140	52,4	51,1	50,5	49,6	49,3	50,6	1,2	2,5
11	19/01 a 02/02	140_154	173,7	168,4	165,7	166,7	164,2	167,7	3,7	2,2
12	02/02 a 16/02	154_168	73,9	71,4	69,1	67,9	66,9	69,8	2,8	4,0
13	16/02 a 01/03	168_182	156,6	156,3	153,7	149,2	148,8	152,9	3,7	2,5
14	01/03 a 15/03	182_196	75,9	74,8	72,2	71,4	71,2	73,1	2,1	2,9

Tabela 1 - Precipitação média (P), desvios padrão (SD) e coeficientes de variação (CV) de cada período analisado. DAI = dias após o início

Nº Balanço	Período	DAI	(conclusão)							
			Precipitação Pluvial (P)							
			2	3	5	6	9	Média	SD	CV
15	15/03 a 29/03	196_210	14,4	14,4	14,0	13,8	13,2	14,0	0,5	3,6
16	29/03 a 12/04	210_224	59,4	78,6	62,2	65,0	61,0	65,2	7,7	11,9
17	12/04 a 26/04	224_238	54,7	53,6	51,8	50,9	50,7	52,3	1,7	3,3
18	26/04 a 10/05	238_252	23,9	24,1	22,9	22,3	22,7	23,2	0,8	3,4
19	10/05 a 24/05	252_266	27,4	27,2	25,1	23,9	24,1	25,5	1,7	6,5
20	24/05 a 07/06	266_280	105,5	104,5	101,1	98,5	97,7	101,5	3,5	3,4
21	07/06 a 21/06	280_294	7,6	8,0	7,1	6,7	6,5	7,2	0,6	8,7
22	21/06 a 05/07	294_308	2,4	2,0	1,8	1,6	1,6	1,9	0,3	17,8
23	05/07 a 19/07	308_322	33,2	33,1	32,5	32,2	32,3	32,7	0,5	1,4
24	19/07 a 02/08	322_336	46,8	45,4	43,9	43,6	43,1	44,6	1,5	3,4
25	02/08 a 16/08	336_350	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-
26	16/08 a 30/08	350_364	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-
1-26	01/09 a 30/08	0_364	1350,0	1340,7	1314,3	1286,9	1272,4	1312,9	33,4	2,5
27	30/08 a 13/09	364_378	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-
28	13/09 a 27/09	378_392	6,8	6,6	6,4	6,2	6,4	6,5	0,2	3,6
29	27/09 a 11/10	392_406	56,8	50,0	57,0	60,4	76,6	60,2	9,9	16,5
30	11/10 a 25/10	406_420	122,0	118,4	116,0	114,4	114,7	117,1	3,2	2,7
31	25/10 a 08/11	420_434	12,6	12,4	11,6	11,2	11,0	11,8	0,7	6,1
32	08/11 a 22/11	434_448	91,0	88,0	86,8	85,8	85,2	87,4	2,3	2,6
33	22/11 a 06/12	448_462	33,5	33,4	32,6	31,9	32,5	32,8	0,7	2,0
34	06/12 a 20/12	462_476	19,8	19,0	19,0	18,4	18,2	18,9	0,6	3,3
35	20/12 a 03/01	476_490	78,8	77,0	74,0	73,4	72,8	75,2	2,6	3,4
36	03/01 a 17/01	490_504	127,4	125,4	122,8	121,2	110,4	121,4	6,6	5,4
37	17/01 a 31/01	504_518	117,6	116,6	112,2	110,4	110,8	113,5	3,4	3,0
38	31/01 a 14/02	518_532	31,8	30,4	29,4	29,2	29,2	30,0	1,1	3,7
39	14/02 a 28/02	532_546	52,6	45,8	46,6	42,0	45,6	46,5	3,8	8,2
40	28/02 a 14/03	546_560	1,2	1,6	1,4	1,4	1,4	1,4	0,1	10,1
41	14/03 a 28/03	560_574	101,2	99,4	97,8	96,4	96,4	98,2	2,1	2,1
42	28/03 a 11/04	574_588	24,4	27,8	28,2	27,8	28,8	27,4	1,7	6,3
43	11/04 a 25/04	588_602	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-
44	25/04 a 09/05	602_616	4,2	4,4	4,2	4,2	4,2	4,2	0,1	2,1
45	09/05 a 23/05	616_630	13,0	12,6	12,4	12,2	12,0	12,4	0,4	3,1
46	23/05 a 06/06	630_644	151,4	147,0	148,2	148,4	146,2	148,2	2,0	1,3
47	06/06 a 20/06	644_658	28,4	28,2	28,0	27,8	27,6	28,0	0,3	1,1
48	20/06 a 04/07	658_672	20,6	20,2	20,2	20,0	19,8	20,2	0,3	1,5
49	04/07 a 18/07	672_686	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-
50	18/07 a 01/08	686_700	8,8	8,8	8,8	8,6	8,4	8,7	0,2	2,1
51	01/08 a 15/08	700_714	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-
52	15/08 a 29/08	714_728	23,4	23,6	23,4	22,8	23,2	23,3	0,3	1,3
27-52	30/08 a 29/08	364_728	1127,3	1096,6	1087,0	1074,1	1081,4	1093,3	20,7	1,9

Os balanços 11, 13, 20, 30, 36 e 37 apresentaram valores de P superiores a 100mm em 14 dias. Estas precipitações podem ser consideradas altas, com grande probabilidade de escoamento superficial (RO) e drenagem profunda (Q_L). Como veremos a seguir, o RO destes períodos foi apenas 0,36%; 0,78%; 0,79%; 0,09%; 0,33% e 0,09%, em relação à P, respectivamente, o que é extremamente baixo e mostra o ótimo controle das perdas de água por deflúvio superficial, através do cultivo do café em sulcos ao longo de curvas de nível. Quanto à drenagem profunda Q_L , veremos adiante que ela foi significativa nestes períodos.

2.3.2 Irrigação (I)

Como já mencionado, as irrigações foram suplementares e aplicadas apenas para evitar stress hídrico que prejudicasse de forma irreversível a cultura, pois na região de Piracicaba (SP) e redondezas esta prática não é rotineira nesta cultura.

A estiagem de inverno em Piracicaba se estende de julho à setembro e, neste período o café sofre déficit hídrico com perda de folhas. No fim deste período começa a floração e este déficit pode afetar o pegamento de flores, tornando a irrigação suplementar necessária. No início do experimento (DAI = 0), o café vinha sofrendo forte déficit e, por isso, mesmo com a pequena chuva de 4,1 mm, foi feita uma irrigação programada para 30 mm com os resultados indicados na Tabela 2. Sua variabilidade foi bem maior que as das chuvas (CV = 35,1%) devido aos fatores já mencionados: extremidade do pivô, vento, obstáculos, etc.

No inverno seguinte (2004) foram necessárias duas irrigações durante os balanços 26 e 29, que pelas mesmas razões mencionadas tiveram variabilidades ainda maiores com CVs de 41,7 e 72,6%. Em 2005, durante o balanço 44, houve a necessidade de mais uma irrigação para proteger a produção de frutos, bastante alta neste momento.

Apesar das dificuldades ocorridas nas irrigações, seu total em 2 anos foi pequeno em relação ao total de chuvas (4,0%) e sua variabilidade afetou apenas as estimativas dos quatro balanços onde elas ocorreram. Esta alta variabilidade evidencia o problema da aplicação homogênea de água em irrigações por pivô central, que nas bordas do círculo é problemática.

Tabela 2 - Irrigação média (\bar{I}), desvios padrão (s(I)) e coeficientes de variação (CV) de quatro períodos. DAI = dias após o início

Nº Balanço	Período	DAI	Irrigação							
			2	3	5	6	9	\bar{I}	s(I)	CV
1	01/09 a 15/09	0_14	46,2	30,9	47,4	22,6	23,7	34,2	12,0	35,1
26	16/08 a 30/08	350_364	47,7	44,2	41,6	9,8	44,1	37,5	15,6	41,7
29	27/09 a 11/10	392_406	8,6	8,8	3,6	2,6	1,0	4,9	3,6	72,6
44	25/04 a 09/05	602_616	22,6	25,0	13,2	26,8	8,2	19,2	8,1	42,1

2.3.3 Evapotranspiração atual (ER)

Como descrito no item 3.3.4, apresentam-se inicialmente a variabilidade de ER_i calculada considerando $Q_L = 0$ na eq. (2) (Tabela 3) lembrando que nos balanços em que houve drenagem, ER_i inclui Q_L .

A variabilidade dos CVs de (ER_i + Q_L) é alta pois ela engloba as variabilidades dos demais componentes do balanço que entram em seu cálculo feito por diferença usando a eq. (2). O maior valor de CV= 69,7% ocorreu no período de balanço 44 em que houve um déficit de água no solo, a ponto de exigir uma irrigação, cuja variabilidade com CV = 42,1% que contribuiu para a grande variabilidade de ER_i. O segundo maior CV = 54,5% ocorreu no balanço 23, em que também houve déficit de água devido às duas semanas precedentes com muito pouca chuva. Os balanços 1 e 26, com altos CVs de 40,2% e 37,8% também envolveram irrigação. Os demais CVs oscilam entre 2,8 e 27,7%, o que mostra bem o problema da variabilidade de ER quando calculada pelo Balanço hídrico. Villagra et al. (1994) trabalhando também em Terra Roxa Estruturada, utilizando uma transeção de 25 parcelas de balanço hídrico, espaçadas de 5 m, também verificaram uma grande variabilidade dos dados de ER calculados através do balanço, chegando a sugerir que os modelos aerodinâmicos de estimativa de ET₀ são mais precisos e dispensam as medidas complicadas de dinâmica da água no solo.

A Tabela 4 repete a coluna de ER_i já corrigido da drenagem Q_{Li} juntamente com dados de ET₀, K_C, ET_C. Como o K_C é um coeficiente que relaciona a ET do café com a ET da grama em condições potenciais, ele foi calculado nos períodos considerados sem déficit hídrico e nos quais não houve drenagem, através da relação ER_i/ET₀. Os balanços escolhidos para o primeiro ano foram os 6 a 23 excluindo os 11, 12, 13 e 20 nos quais houve drenagem. A variabilidade do K_C é

bastante grande, oscilando entre 0,4 e 1,7, com uma média 1,0, desvio padrão 0,4 e CV=36,3%. Para completar a coluna de K_C na Tabela 4 considerou-se o K_C médio para os balanços com déficit e com drenagem. Para o segundo ano, foram escolhidos os balanços 31 a 42 excluindo os 36, 37 e 41 e, como a área foliar média da cultura praticamente se manteve constante de um ano para outro (COSTA, 2005), o valor médio do K_C não diferiu do primeiro ano: média de 1,0, desvio padrão 0,3 e CV = 26,7%. Vê-se, portanto, que para nossa cultura, de 3 a 5 anos de idade, o K_C foi de 1,0. Este valor encontra-se dentro daqueles apresentados no Quadro 2.

O maior valor de ER_i foi do balanço 14, sendo de 89,3 mm em 14 dias ou $6,4 \text{ mm.dia}^{-1}$, o que é um valor coerente para Março, em Piracicaba. Já os menores valores ocorreram nos balanços 2, 23, 25, 43, 44 e 45, variando de 0,8 a $1,1 \text{ mm.dia}^{-1}$ quando as plantas sofriam déficit hídrico e perda de folhas.

A Tabela 5 apresenta a segunda forma de estimativa de ER, aqui chamada de ER_{ii} , calculada segundo o item 2.2.3.4, isto é, através da equação de balanço utilizando os dados de Q_L estimados pela equação de Darcy, que incluem a curva $K(H)$, discutidos nos itens seguintes. É importante chamar a atenção para o problema do uso da curva $K(H)$, que nos balanços 11, 13, 20, 21, 37 e 38 levou à superestimativas de Q_L a ponto de tornar ER_{ii} positivo, o que é absurdo. Devido à problemática do uso de $K(H)$, discutida mais adiante no item 2.3.6, optou-se pela alternativa ER_i para a estimativa da evapotranspiração da cultura de café.

Tabela 3 - Evapotranspição real ER_i mais a drenagem profunda Q_L para cada período analisado. DAI = dias após o início. CV = coeficiente de variação

(continua)

Nº Balanço	Período	DAI	$ER_i + Q_L(\text{mm})$					Média	Desvio Padrão	CV
			2	3	5	6	9			
1	01/09 a 15/09	0_14	-39,4	-24,8	-34,1	-15,8	-16,5	-26,1	10,5	40,2
2	15/09 a 29/09	14_28	-10,9	-11,3	-14,3	-11,1	-12,1	-11,9	1,4	11,6
3	29/09 a 13/10	28_42	-62,6	-56,5	-50,5	-33,7	-51,3	-50,9	10,8	21,1
4	13/10 a 27/10	42_56	-20,6	-22,2	-28,2	-28,4	-24,4	-24,8	3,5	14,1
5	27/10 a 10/11	56_70	-32,1	-29,2	-37,5	-37,9	-28,6	-33,1	4,5	13,5
6	10/11 a 24/11	70_84	-65,9	-62,8	-60,9	-55,8	-66,3	-62,3	4,3	6,9
7	24/11 a 08/12	84_98	-80,6	-69,6	-68,1	-66,5	-75,4	-72,0	5,9	8,1
8	08/12 a 22/12	98_112	-59,4	-56,8	-61,8	-56,5	-53,1	-57,5	3,3	5,7
9	22/12 a 05/01	112_126	-78,8	-73,3	-62,8	-54,9	-70,8	-68,1	9,4	13,8
10	05/01 a 19/01	126_140	-52,7	-52,6	-51,6	-58,2	-46,0	-52,2	4,3	8,3
11	19/01 a 02/02	140_154	-81,7	-99,6	-110,0	-109,1	-86,7	-97,4	12,8	13,2
12	02/02 a 16/02	154_168	-101,8	-96,8	-90,6	-91,8	-96,7	-95,5	4,5	4,7
13	16/02 a 01/03	168_182	-130,4	-128,3	-137,8	-132,2	-124,3	-130,6	5,0	3,8
14	01/03 a 15/03	182_196	-95,1	-93,0	-83,6	-85,9	-88,7	-89,3	4,8	5,4

Tabela 3 - Evapotranspição real E_{Ri} mais a drenagem profunda Q_L para cada período analisado.
DAI = dias após o início. CV = coeficiente de variação

Nº Balanço	Período	DAI	ERi + Q _L (mm)					Média	Desvio Padrão	CV
			2	3	5	6	9			
15	15/03 a 29/03	196_210	-60,0	-64,1	-61,3	-61,5	-65,0	-62,4	2,1	3,3
16	29/03 a 12/04	210_224	-64,8	-75,7	-57,8	-61,1	-61,7	-64,2	6,9	10,7
17	12/04 a 26/04	224_238	-54,2	-57,5	-52,6	-47,7	-46,8	-51,7	4,5	8,7
18	26/04 a 10/05	238_252	-27,9	-31,0	-30,8	-31,6	-26,5	-29,6	2,2	7,6
19	10/05 a 24/05	252_266	-28,2	-28,8	-23,8	-26,5	-20,7	-25,6	3,3	13,1
20	24/05 a 07/06	266_280	-45,6	-49,3	-40,5	-46,6	-52,2	-46,8	4,4	9,4
21	07/06 a 21/06	280_294	-19,3	-19,1	-26,6	-20,9	-12,2	-19,6	5,1	26,2
22	21/06 a 05/07	294_308	-17,7	-17,6	-15,3	-16,6	-15,6	-16,5	1,1	6,5
23	05/07 a 19/07	308_322	-15,7	-20,9	-6,2	-5,4	-11,7	-12,0	6,5	54,5
24	19/07 a 02/08	322_336	-56,1	-56,2	-59,1	-59,4	-56,7	-57,5	1,6	2,8
25	02/08 a 16/08	336_350	-7,3	-10,3	-10,3	-15,0	-14,3	-11,4	3,2	27,7
26	16/08 a 30/08	350_364	-56,9	-58,0	-37,9	-19,1	-58,6	-46,1	17,4	37,8
1_26	01/09 a 30/08	0_364	-1365,7	-1365,3	-1313,8	-1249,1	-1282,8	-1315,3	51,2	3,9
27	30/08 a 13/09	364_378	-25,0	-27,8	-43,2	-30,5	-35,8	-32,5	7,2	22,2
28	13/09 a 27/09	378_392	-34,1	-19,7	-30,4	-24,2	-23,3	-26,4	5,8	22,0
29	27/09 a 11/10	392_406	-45,1	-32,8	-36,5	-35,1	-50,2	-39,9	7,4	18,4
30	11/10 a 25/10	406_420	-49,2	-54,0	-42,7	-36,1	-43,1	-45,0	6,8	15,2
31	25/10 a 08/11	420_434	-44,9	-53,6	-53,2	-60,0	-49,4	-52,2	5,6	10,7
32	08/11 a 22/11	434_448	-72,6	-77,2	-69,3	-68,1	-73,3	-72,1	3,6	5,0
33	22/11 a 06/12	448_462	-77,3	-72,2	-69,9	-77,3	-68,7	-73,1	4,1	5,5
34	06/12 a 20/12	462_476	-48,8	-36,6	-50,7	-41,4	-47,9	-45,1	5,9	13,1
35	20/12 a 03/01	476_490	-69,8	-68,5	-61,0	-64,4	-60,2	-64,8	4,3	6,7
36	03/01 a 17/01	490_504	-91,3	-98,8	-84,2	-89,4	-71,9	-87,1	10,0	11,5
37	17/01 a 31/01	504_518	-54,7	-67,6	-61,2	-59,2	-52,3	-59,0	6,0	10,1
38	31/01 a 14/02	518_532	-92,7	-83,5	-87,5	-86,2	-94,6	-88,9	4,6	5,2
39	14/02 a 28/02	532_546	-89,3	-62,3	-78,5	-62,7	-79,4	-74,5	11,7	15,7
40	28/02 a 14/03	546_560	-27,0	-19,8	-25,7	-33,3	-24,4	-26,1	4,9	18,8
41	14/03 a 28/03	560_574	-63,2	-74,8	-66,4	-66,8	-63,8	-67,0	4,6	6,9
42	28/03 a 11/04	574_588	-38,8	-40,8	-44,8	-45,4	-43,3	-42,6	2,8	6,5
43	11/04 a 25/04	588_602	-23,0	-12,3	-13,2	-12,3	-12,3	-14,6	4,7	32,1
44	25/04 a 09/05	602_616	-14,1	-17,7	-7,9	-28,1	-2,4	-14,1	9,8	69,7
45	09/05 a 23/05	616_630	-13,9	-13,6	-15,8	-12,5	-18,0	-14,8	2,2	14,6
46	23/05 a 06/06	630_644	-97,7	-106,0	-97,3	-98,4	-104,2	-100,7	4,1	4,0
47	06/06 a 20/06	644_658	-41,2	-31,4	-27,4	-29,7	-32,8	-32,5	5,3	16,2
48	20/06 a 04/07	658_672	-5,8	-10,5	-12,5	-16,4	-9,5	-10,9	3,9	35,9
49	04/07 a 18/07	672_686	-20,8	-14,1	-13,2	-19,4	-15,4	-16,6	3,3	20,1
50	18/07 a 01/08	686_700	-16,7	-14,4	-15,2	-15,8	-14,0	-15,2	1,1	7,0
51	01/08 a 15/08	700_714	-16,6	-14,4	-10,3	-15,7	-18,4	-15,1	3,0	20,2
52	15/08 a 29/08	714_728	-35,7	-38,5	-43,1	-42,1	-50,1	-41,9	5,4	13,0
27_52	30/08 a 29/08	364_728	-1209,2	-1162,8	-1161,1	-1166,4	-1158,7	-1171,6	21,2	1,8

Tabela 4 - Evapotranspição real E_{Ri}, evapotranspição de referência (ET₀), coeficiente de cultura (K_c) e evapotranspição potencial (ET_c) de cada período analisado. DAI = dias após o início

(Continua)

Nº Balanço	Período	DAI	ET ₀ (mm.dia ⁻¹)	ET ₀ (mm)	K _c	ET _c (mm)	E _{Ri} (mm)
1	01/09 a 15/09	0_14	-3,3	-45,9	1,0	-47,3	-26,1
2	15/09 a 29/09	14_28	-4,0	-56,0	1,0	-57,7	-11,9
3	29/09 a 13/10	28_42	-3,8	-53,9	1,0	-55,6	-50,9
4	13/10 a 27/10	42_56	-4,7	-65,4	1,0	-67,5	-24,8
5	27/10 a 10/11	56_70	-3,4	-47,5	1,0	-49,0	-33,1
6	10/11 a 24/11	70_84	-4,3	-60,3	1,0	-62,3	-62,3
7	24/11 a 08/12	84_98	-3,6	-50,5	1,4	-72,0	-72,0
8	08/12 a 22/12	98_112	-4,5	-62,4	0,9	-57,5	-57,5
9	22/12 a 05/01	112_126	-4,1	-57,5	1,2	-68,1	-68,1
10	05/01 a 19/01	126_140	-4,5	-63,2	0,8	-52,2	-52,2
11	19/01 a 02/02	140_154	-2,8	-39,3	1,0	-40,5	-40,5
12	02/02 a 16/02	154_168	-4,4	-62,0	1,0	-64,0	-64,0
13	16/02 a 01/03	168_182	-3,3	-46,8	1,0	-48,3	-48,3
14	01/03 a 15/03	182_196	-3,7	-52,3	1,7	-89,3	-89,3
15	15/03 a 29/03	196_210	-4,0	-55,3	1,1	-62,4	-62,4
16	29/03 a 12/04	210_224	-3,4	-47,7	1,3	-64,2	-64,2
17	12/04 a 26/04	224_238	-2,6	-36,1	1,4	-51,7	-51,7
18	26/04 a 10/05	238_252	-2,5	-35,6	0,8	-29,6	-29,6
19	10/05 a 24/05	252_266	-1,7	-24,4	1,0	-25,6	-25,6
20	24/05 a 07/06	266_280	-1,7	-23,4	1,0	-24,2	-24,2
21	07/06 a 21/06	280_294	-2,1	-29,9	0,7	-19,6	-19,6
22	21/06 a 05/07	294_308	-2,5	-35,4	0,5	-16,5	-16,5
23	05/07 a 19/07	308_322	-2,0	-27,7	0,4	-12,0	-12,0
24	19/07 a 02/08	322_336	-2,5	-35,7	1,0	-36,8	-36,8
25	02/08 a 16/08	336_350	-3,2	-45,1	1,0	-46,5	-11,4
26	16/08 a 30/08	350_364	-3,3	-46,7	1,0	-48,1	-46,1
1_26	01/09 a 30/08	0_364	-3,3	-1206,0	1,0	-1268,6	-1101,2
27	30/08 a 13/09	364_378	-4,5	-63,4	1,0	-63,2	-32,5
28	13/09 a 27/09	378_392	-4,0	-55,8	1,0	-55,6	-26,4
29	27/09 a 11/10	392_406	-3,7	-51,2	1,0	-51,0	-39,9
30	11/10 a 25/10	406_420	-3,0	-41,6	1,0	-41,5	-41,5
31	25/10 a 08/11	420_434	-3,9	-53,9	1,0	-52,2	-52,2
32	08/11 a 22/11	434_448	-4,1	-57,8	1,2	-72,1	-72,1
33	22/11 a 06/12	448_462	-4,6	-64,6	1,1	-73,1	-73,1
34	06/12 a 20/12	462_476	-4,3	-59,9	0,8	-45,1	-45,1
35	20/12 a 03/01	476_490	-3,9	-54,5	1,2	-64,8	-64,8
36	03/01 a 17/01	490_504	-4,1	-57,0	1,0	-56,8	-56,8
37	17/01 a 31/01	504_518	-2,5	-34,9	1,0	-34,8	-34,8
38	31/01 a 14/02	518_532	-5,1	-71,3	1,2	-88,9	-88,9
39	14/02 a 28/02	532_546	-4,9	-68,2	1,1	-74,5	-74,5
40	28/02 a 14/03	546_560	-4,2	-59,4	0,4	-26,1	-26,1
41	14/03 a 28/03	560_574	-3,0	-41,9	1,0	-41,8	-41,8
42	28/03 a 11/04	574_588	-4,0	-56,0	0,8	-42,1	-42,1

Tabela 4 - Evapotranspição real ER_i , evapotranspição de referência (ET_0), coeficiente de cultura (K_c) e evapotranspição potencial (ET_c) de cada período analisado. DAI = dias após o início

Nº Balanço	Período	DAI	(conclusão)				
			ET_0 (mm.dia ⁻¹)	ET_0 (mm)	K_c	ET_c (mm)	ER_i (mm)
43	11/04 a 25/04	588_602	-3,9	-54,9	1,0	-54,7	-14,3
44	25/04 a 09/05	602_616	-2,9	-41,0	1,0	-40,9	-14,0
45	09/05 a 23/05	616_630	-3,3	-46,9	1,0	-46,7	-14,7
46	23/05 a 06/06	630_644	-2,4	-33,5	1,0	-33,4	-33,4
47	06/06 a 20/06	644_658	-3,1	-42,9	1,0	-42,7	-32,5
48	20/06 a 04/07	658_672	-2,4	-34,1	1,0	-34,0	-10,9
49	04/07 a 18/07	672_686	-2,9	-40,4	1,0	-40,2	-16,6
50	18/07 a 01/08	686_700	-2,8	-38,6	1,0	-38,5	-15,2
51	01/08 a 15/08	700_714	-	-	1,0	-	-15,1
52	15/08 a 29/08	714_728	-	-	1,0	-	-18,6
27_52	30/08 a 29/08	364_728	-3,4	-1223,8	1,0	-1214,6	-997,7

Tabela 5 - Evapotranspição real (ER_{ii}) de cada período analisado obtida através da equação de balanço utilizando os dados de Q_L estimados pela equação de Darcy. DAI = dias após o início

Nº Balanço	Período	DAI	ER _{ii} (mm)					ER _{ii}	Desvio Padrão	CV
			2	3	5	6	9			
			1	01/09 a 15/09	0_14	-39,4	-24,8			
2	15/09 a 29/09	14_28	-10,9	-11,3	-14,3	-11,1	-12,1	-11,9	1,4	11,6
3	29/09 a 13/10	28_42	-62,6	-56,5	-50,5	-33,7	-51,3	-50,9	10,8	21,1
4	13/10 a 27/10	42_56	-20,6	-22,2	-28,2	-28,4	-24,4	-24,8	3,5	14,1
5	27/10 a 10/11	56_70	-32,1	-29,2	-37,5	-37,9	-28,6	-33,1	4,5	13,5
6	10/11 a 24/11	70_84	-65,9	-62,8	-60,9	-55,8	-66,3	-62,3	4,3	6,9
7	24/11 a 08/12	84_98	-80,6	-69,6	-68,1	-66,5	-75,4	-72,0	5,9	8,1
8	08/12 a 22/12	98_112	-59,4	-56,8	-61,8	-56,5	-53,1	-57,5	3,3	5,7
9	22/12 a 05/01	112_126	-78,8	-73,3	-62,6	-54,9	-69,2	-67,8	9,3	13,7
10	05/01 a 19/01	126_140	-52,7	-52,5	-51,5	-58,2	-43,8	-51,7	5,1	9,9
11	19/01 a 02/02	140_154	-65,9	-29,9	-45,2	-44,8	96,7	-17,8	65,3	366,2
12	02/02 a 16/02	154_168	-101,4	-95,9	-90,1	-89,5	-77,4	-90,8	9,0	9,9
13	16/02 a 01/03	168_182	-91,0	-21,8	-73,1	-116,8	140,4	-32,4	102,7	316,5
14	01/03 a 15/03	182_196	-90,1	-73,1	-79,9	-84,6	-69,7	-79,5	8,3	10,4
15	15/03 a 29/03	196_210	-60,0	-64,0	-61,3	-61,5	-64,9	-62,3	2,0	3,3
16	29/03 a 12/04	210_224	-64,8	-75,7	-57,8	-61,1	-61,5	-64,2	6,9	10,7
17	12/04 a 26/04	224_238	-54,2	-57,5	-52,6	-47,7	-46,5	-51,7	4,6	8,8
18	26/04 a 10/05	238_252	-27,9	-31,0	-30,8	-31,6	-26,5	-29,6	2,2	7,6
19	10/05 a 24/05	252_266	-28,2	-28,8	-23,8	-26,5	-20,7	-25,6	3,3	13,1
20	24/05 a 07/06	266_280	25,9	501,2	79,9	-45,3	88,1	129,9	214,3	164,9
21	07/06 a 21/06	280_294	-4,6	3,0	-24,1	-20,4	3,3	-8,5	13,0	151,8
22	21/06 a 05/07	294_308	-17,6	-17,5	-15,3	-16,5	-14,6	-16,3	1,3	8,2

Tabela 5 - Evapotranspição real (ERii) de cada período analisado obtida através da equação de balanço utilizando os dados de Q_L estimados pela equação de Darcy. DAI = dias após o início

Nº Balanço	Período	DAI	ERii (mm)					ERii	(conclusão)	
			2	3	5	6	9		Desvio Padrão	CV
23	05/07 a 19/07	308_322	-15,5	-2,4	-6,1	-5,4	-3,3	-6,6	5,2	79,7
24	19/07 a 02/08	322_336	-55,9	-37,7	-59,0	-59,4	-48,2	-52,1	9,2	17,6
25	02/08 a 16/08	336_350	-7,3	-10,3	-10,3	-15,0	-13,8	-11,3	3,1	27,0
26	16/08 a 30/08	350_364	-56,9	-58,0	-37,9	-19,1	-57,7	-45,9	17,3	37,6
1_26	01/09 a 30/08	0_364	-1218,4	-558,4	-1056,8	-1164,1	-617,2	-923,0	312,1	33,8
27	30/08 a 13/09	364_378	-25,0	-27,8	-43,2	-30,5	-35,3	-32,4	7,2	22,1
28	13/09 a 27/09	378_392	-34,1	-19,7	-30,4	-24,2	-23,3	-26,4	5,8	22,0
29	27/09 a 11/10	392_406	-45,1	-32,8	-36,5	-35,1	-50,2	-39,9	7,4	18,4
30	11/10 a 25/10	406_420	-49,2	-49,5	-42,4	-36,0	-23,3	-40,1	10,9	27,2
31	25/10 a 08/11	420_434	-44,9	-49,1	-52,9	-60,0	-29,3	-47,2	11,5	24,3
32	08/11 a 22/11	434_448	-72,3	-76,3	-69,2	-68,1	-54,5	-68,1	8,2	12,1
33	22/11 a 06/12	448_462	-77,0	-71,3	-69,8	-77,3	-50,3	-69,1	11,0	16,0
34	06/12 a 20/12	462_476	-48,8	-36,6	-50,7	-41,4	-47,9	-45,1	5,9	13,1
35	20/12 a 03/01	476_490	-69,8	-68,5	-61,0	-64,4	-60,2	-64,8	4,3	6,7
36	03/01 a 17/01	490_504	-91,2	-98,5	-84,2	-89,4	-67,5	-86,1	11,6	13,5
37	17/01 a 31/01	504_518	-41,8	41,0	-46,7	-41,2	320,8	46,4	157,7	339,6
38	31/01 a 14/02	518_532	-80,8	23,8	-73,0	-68,2	274,3	15,2	150,9	990,7
39	14/02 a 28/02	532_546	-89,3	-62,3	-78,5	-62,7	-79,2	-74,4	11,7	15,7
40	28/02 a 14/03	546_560	-27,0	-19,8	-25,7	-33,3	-24,4	-26,1	4,9	18,8
41	14/03 a 28/03	560_574	-63,2	-74,8	-66,4	-66,8	-63,0	-66,9	4,8	7,2
42	28/03 a 11/04	574_588	-38,8	-40,8	-44,8	-43,0	-42,5	-41,9	2,3	5,4
43	11/04 a 25/04	588_602	-23,0	-12,3	-13,2	-11,0	-12,3	-14,3	4,9	34,0
44	25/04 a 09/05	602_616	-14,1	-17,7	-7,9	-27,6	-2,4	-14,0	9,6	68,8
45	09/05 a 23/05	616_630	-13,9	-13,6	-15,8	-12,5	-18,0	-14,8	2,1	14,6
46	23/05 a 06/06	630_644	-97,7	-106,0	-97,3	-98,4	-104,0	-100,7	4,0	4,0
47	06/06 a 20/06	644_658	-41,2	-31,4	-27,4	-29,7	-32,7	-32,5	5,3	16,2
48	20/06 a 04/07	658_672	-5,8	-10,5	-12,5	-16,4	-9,4	-10,9	3,9	36,1
49	04/07 a 18/07	672_686	-20,8	-14,1	-13,2	-19,4	-15,3	-16,6	3,3	20,2
50	18/07 a 01/08	686_700	-16,7	-14,4	-15,2	-15,8	-14,0	-15,2	1,1	7,0
51	01/08 a 15/08	700_714	-16,6	-14,4	-10,3	-15,7	-18,4	-15,1	3,0	20,2
52	15/08 a 29/08	714_728	-35,7	-38,5	-43,1	-42,1	-50,1	-41,9	5,4	13,0
27_52	30/08 a 29/08	364_728	-1183,8	-935,7	-1131,4	-1130,1	-332,3	-942,7	354,1	37,6

2.3.4 Armazenamento de água no solo (S)

A Tabela 6 mostra a variabilidade dos dados de armazenamento de água no solo S_L , calculados pela regra trapezoidal a partir de dados de umidade do solo θ obtidos com sonda de nêutrons. Os CVs são relativamente baixos e extremamente homogêneos. Como em cada parcela

(repetição) se encontram três tubos de acesso de sonda, cada valor médio de S_L é o resultado de 15 medidas, o que deve ser bem representativo da situação do solo no instante da medida. As sondas de neutros têm a vantagem sobre as metodologias clássicas de possibilitar medidas ao longo do tempo, exatamente nos mesmos pontos de medida. Daí a homogeneidade dos CVs, e a variabilidade dos dados da Tabela 6 é, portanto, um retrato da variabilidade do campo experimental. Através de métodos convencionais, como por exemplo o da tradagem, não seria possível medir θ sempre nos mesmos pontos, o que aumentaria muito a variabilidade dos dados e exigiria uma área experimental muitas vezes maior por causa das amostragens destrutivas. Turati e Reichardt (1991) discutem a variabilidade do armazenamento de água em Terra Roxa Estruturada.

Uma análise da Tabela 6 nos mostra que o valor mais baixo de S_L é o do balanço 1, de 245,2mm, correspondente à uma condição de stress hídrico severo, mas ainda suportável para a cultura. O valor máximo se refere ao balanço 12, de 369,9mm, correspondente à condição mais úmida, na qual houve até drenagem. Com estes dados pode-se avaliar a capacidade de água disponível deste perfil de solo para fins de irrigação ou para julgar, em períodos chuvosos, o início das perdas por drenagem e conseqüente lixiviação de nutrientes. A diferença é da ordem de 125mm, que representa, portanto, a máxima variação possível de S_L nesta cultura, até 1m de profundidade. Este valor coincide com aquele sugerido pelo método de Thornthwaite-Mather, citado por Tubelis e Nascimento (1992).

As sondas de nêutrons têm o problema da calibração para a obtenção de valores absolutos de θ corretos, Bacchi; Reichardt e Calvache (2002). No caso do balanço hídrico, porém, utilizamos $\Delta\theta$ e esse fato minimiza o problema da calibração, pois mesmo que valores absolutos de θ em t_i e t_f tenham desvios sistemáticos de calibração, suas diferenças $\Delta\theta$ no intervalo t_f-t_i eliminam boa parte destes desvios. Os dados de ΔS_L são apresentados na Tabela 7, com seus correspondentes CVs. Os valores muito altos de CV, chegando até 3.835,4%, aparentemente contrariam o que foi dito acima. É preciso salientar que a interpretação de coeficientes de variação precisa ser cuidadosa por não ser simples, havendo casos em que seus valores pouco representam. Um deles é o de ΔS_L que passa de valores positivos para negativos, passando por zero. Nesta situação, com média zero ou próxima de zero, o CV tende para infinito, mesmo com uma média estimada corretamente. Por isso, os CVs de ΔS_L apresentados na Tabela 7 não refletem a variabilidade dos dados, esta é dada pelos dados de S_L da Tabela 6.

Tabela 6 - Armazenamento inicial de água no solo (S_i), desvios padrão (SD) e coeficientes de variação (CV) de cada período analisado. DAI = dias após o início

(continua)

Nº Balanço	Período	DAI	S_i					\bar{S}_i	SD	CV
			2	3	5	6	9			
1	01/09 a 15/09	0_14	250,2	260,8	203,4	254,6	257,2	245,2	23,7	9,7
2	15/09 a 29/09	14_28	261,0	271,1	221,0	265,6	268,3	257,4	20,7	8,0
3	29/09 a 13/10	28_42	255,9	265,6	213,1	259,3	262,4	251,3	21,6	8,6
4	13/10 a 27/10	42_56	272,3	284,5	242,8	303,0	286,9	277,9	22,5	8,1
5	27/10 a 10/11	56_70	269,9	280,3	232,8	292,2	279,9	271,0	22,8	8,4
6	10/11 a 24/11	70_84	263,2	276,0	221,5	278,7	276,8	263,3	24,1	9,2
7	24/11 a 08/12	84_98	273,0	287,4	238,7	296,3	282,5	275,6	22,3	8,1
8	08/12 a 22/12	98_112	286,3	306,7	262,3	317,2	293,1	293,1	21,0	7,2
9	22/12 a 05/01	112_126	277,9	299,8	249,8	309,2	288,0	284,9	22,9	8,0
10	05/01 a 19/01	126_140	288,3	312,9	271,4	336,9	299,9	301,9	24,8	8,2
11	19/01 a 02/02	140_154	288,0	311,4	270,2	328,0	303,2	300,2	22,1	7,4
12	02/02 a 16/02	154_168	380,0	380,2	324,5	384,3	380,6	369,9	25,5	6,9
13	16/02 a 01/03	168_182	352,1	354,8	302,6	359,5	350,8	344,0	23,3	6,8
14	01/03 a 15/03	182_196	375,4	382,3	317,4	375,2	375,3	365,1	26,9	7,4
15	15/03 a 29/03	196_210	356,2	364,1	305,4	359,2	357,7	348,5	24,3	7,0
16	29/03 a 12/04	210_224	310,5	314,4	258,0	311,5	306,0	300,1	23,7	7,9
17	12/04 a 26/04	224_238	304,5	317,2	261,9	315,4	305,2	300,8	22,5	7,5
18	26/04 a 10/05	238_252	305,0	313,3	261,0	318,2	309,2	301,3	23,1	7,7
19	10/05 a 24/05	252_266	301,0	306,4	253,0	308,7	305,4	294,9	23,6	8,0
20	24/05 a 07/06	266_280	300,2	304,8	254,3	306,1	308,8	294,8	22,9	7,8
21	07/06 a 21/06	280_294	360,1	359,9	312,8	356,2	354,3	348,7	20,2	5,8
22	21/06 a 05/07	294_308	348,4	348,7	293,3	342,0	348,7	336,2	24,2	7,2
23	05/07 a 19/07	308_322	333,1	333,2	279,8	327,0	334,7	321,6	23,5	7,3
24	19/07 a 02/08	322_336	350,7	345,4	306,0	353,7	355,3	342,2	20,6	6,0
25	02/08 a 16/08	336_350	341,4	334,6	290,7	337,9	341,7	329,3	21,7	6,6
26	16/08 a 30/08	350_364	334,1	324,3	280,4	322,9	327,4	317,8	21,4	6,7
27	30/08 a 13/09	364_378	323,4	310,3	284,2	313,6	313,0	308,9	14,7	4,8
28	13/09 a 27/09	378_392	298,3	282,5	240,9	283,1	277,2	276,4	21,3	7,7
29	27/09 a 11/10	392_406	271,0	269,4	216,9	265,1	260,3	256,5	22,6	8,8
30	11/10 a 25/10	406_420	291,3	295,4	241,0	293,0	287,7	281,7	22,9	8,1
31	25/10 a 08/11	420_434	364,1	359,8	314,3	371,3	359,3	353,8	22,6	6,4
32	08/11 a 22/11	434_448	331,9	318,7	272,7	322,5	320,9	313,3	23,2	7,4
33	22/11 a 06/12	448_462	350,2	329,4	290,2	340,2	332,8	328,6	22,9	7,0
34	06/12 a 20/12	462_476	306,3	290,6	253,0	294,8	296,6	288,3	20,6	7,1
35	20/12 a 03/01	476_490	277,3	273,0	221,2	271,8	266,8	262,0	23,1	8,8
36	03/01 a 17/01	490_504	286,2	281,6	234,2	280,9	279,5	272,5	21,5	7,9
37	17/01 a 31/01	504_518	321,5	308,1	272,5	312,1	317,9	306,4	19,7	6,4
38	31/01 a 14/02	518_532	384,3	357,1	323,4	363,1	376,3	360,8	23,5	6,5
39	14/02 a 28/02	532_546	322,4	303,0	265,4	306,1	310,9	301,6	21,5	7,1
40	28/02 a 14/03	546_560	285,1	286,4	233,4	285,3	277,1	273,5	22,7	8,3
41	14/03 a 28/03	560_574	259,3	268,2	209,1	253,4	254,1	248,8	23,0	9,2
42	28/03 a 11/04	574_588	296,9	292,8	240,4	285,4	286,7	280,5	22,9	8,2
43	11/04 a 25/04	588_602	282,5	279,9	223,9	269,2	272,3	265,5	23,9	9,0
44	25/04 a 09/05	602_616	259,6	267,6	210,7	257,4	260,0	251,0	22,9	9,1

Tabela 6 - Armazenamento inicial de água no solo (S_i), desvios padrão (SD) e coeficientes de variação (CV) de cada período analisado. DAI = dias após o início

Nº Balanço	Período	DAI	S_i					\overline{S}_i	SD	CV
			2	3	5	6	9			
45	09/05 a 23/05	616_630	272,3	279,3	220,2	260,2	269,9	260,4	23,5	9,0
46	23/05 a 06/06	630_644	271,4	278,3	216,8	259,9	264,0	258,1	24,1	9,4
47	06/06 a 20/06	644_658	325,1	319,3	267,7	309,9	306,0	305,6	22,5	7,4
48	20/06 a 04/07	658_672	312,3	316,1	268,3	307,9	300,8	301,1	19,2	6,4
49	04/07 a 18/07	672_686	327,1	325,8	276,0	311,5	311,1	310,3	20,6	6,6
50	18/07 a 01/08	686_700	306,3	311,7	262,8	292,1	295,7	293,7	19,0	6,5
51	01/08 a 15/08	700_714	298,5	306,1	256,4	284,9	290,1	287,2	19,0	6,6
52	15/08 a 29/08	714_728	281,8	291,7	246,1	269,2	271,7	272,1	17,0	6,3

Tabela 7 - Variação do armazenamento de água no solo (ΔS_L), desvios padrão [$s(\Delta S)$] e coeficientes de variação (CV) de cada período analisado. DAI = dias após o início

Nº Balanço	Período	DAI	ΔS					$\overline{\Delta S}$	SD	CV
			2	3	5	6	9			
1	01/09 a 15/09	0_14	10,8	10,3	17,6	11,0	11,2	12,2	3,1	25,1
2	15/09 a 29/09	14_28	-5,1	-5,5	-7,9	-6,3	-5,9	-6,1	1,1	17,4
3	29/09 a 13/10	28_42	16,4	18,9	29,6	43,6	24,5	26,6	10,8	40,6
4	13/10 a 27/10	42_56	-2,4	-4,1	-10,0	-10,8	-7,0	-6,9	3,6	52,8
5	27/10 a 10/11	56_70	-6,7	-4,3	-11,2	-13,4	-3,1	-7,8	4,5	57,5
6	10/11 a 24/11	70_84	9,8	11,4	17,2	17,6	5,6	12,3	5,1	41,2
7	24/11 a 08/12	84_98	13,3	19,3	23,5	20,9	10,6	17,5	5,4	30,8
8	08/12 a 22/12	98_112	-8,4	-7,0	-12,5	-8,0	-5,1	-8,2	2,7	33,3
9	22/12 a 05/01	112_126	10,4	13,1	21,7	27,7	12,0	17,0	7,4	43,7
10	05/01 a 19/01	126_140	-0,3	-1,5	-1,3	-8,8	3,3	-1,7	4,4	256,1
11	19/01 a 02/02	140_154	92,0	68,8	54,3	56,3	77,4	69,8	15,6	22,4
12	02/02 a 16/02	154_168	-27,9	-25,4	-21,9	-24,8	-29,8	-26,0	3,0	11,7
13	16/02 a 01/03	168_182	23,3	27,5	14,7	15,7	24,5	21,1	5,6	26,6
14	01/03 a 15/03	182_196	-19,2	-18,2	-12,0	-16,1	-17,5	-16,6	2,8	17,0
15	15/03 a 29/03	196_210	-45,6	-49,7	-47,3	-47,7	-51,8	-48,4	2,4	4,9
16	29/03 a 12/04	210_224	-6,0	2,7	3,8	3,9	-0,7	0,7	4,2	567,8
17	12/04 a 26/04	224_238	0,5	-3,9	-0,9	2,9	3,9	0,5	3,1	618,2
18	26/04 a 10/05	238_252	-4,0	-6,9	-8,0	-9,5	-3,8	-6,4	2,5	38,8
19	10/05 a 24/05	252_266	-0,8	-1,6	1,3	-2,6	3,4	-0,1	2,4	3835,4
20	24/05 a 07/06	266_280	59,9	55,1	58,5	50,0	45,5	53,8	6,0	11,1
21	07/06 a 21/06	280_294	-11,7	-11,1	-19,5	-14,2	-5,7	-12,4	5,0	40,3
22	21/06 a 05/07	294_308	-15,3	-15,6	-13,5	-15,0	-14,0	-14,7	0,9	5,9
23	05/07 a 19/07	308_322	17,5	12,2	26,2	26,6	20,6	20,6	6,1	29,4

Tabela 7 - Variação do armazenamento de água no solo (ΔS_L), desvios padrão [$s(\Delta S)$] e coeficientes de variação (CV) de cada período analisado. DAI = dias após o início

Nº Balanço	Período	DAI	ΔS					$\overline{\Delta S}$	SD	CV
			2	3	5	6	9			
			(conclusão)							
24	19/07 a 02/08	322_336	-9,3	-10,8	-15,2	-15,8	-13,6	-12,9	2,8	21,8
25	02/08 a 16/08	336_350	-7,3	-10,3	-10,3	-15,0	-14,3	-11,4	3,2	27,7
26	16/08 a 30/08	350_364	-10,7	-14,0	3,7	-9,3	-14,5	-8,9	7,4	82,8
27	30/08 a 13/09	364_378	-25,0	-27,8	-43,2	-30,5	-35,8	-32,5	7,2	22,2
28	13/09 a 27/09	378_392	-27,3	-13,1	-24,0	-18,0	-16,9	-19,9	5,7	28,8
29	27/09 a 11/10	392_406	20,3	26,0	24,1	27,9	27,4	25,1	3,1	12,3
30	11/10 a 25/10	406_420	72,8	64,4	73,3	78,3	71,6	72,1	5,0	6,9
31	25/10 a 08/11	420_434	-32,3	-41,2	-41,6	-48,8	-38,4	-40,5	6,0	14,8
32	08/11 a 22/11	434_448	18,4	10,7	17,5	17,7	11,9	15,2	3,6	23,7
33	22/11 a 06/12	448_462	-43,9	-38,8	-37,3	-45,4	-36,2	-40,3	4,1	10,1
34	06/12 a 20/12	462_476	-29,0	-17,6	-31,7	-23,0	-29,7	-26,2	5,8	22,2
35	20/12 a 03/01	476_490	8,9	8,5	13,0	9,0	12,6	10,4	2,2	21,0
36	03/01 a 17/01	490_504	35,3	26,6	38,2	31,2	38,4	33,9	5,0	14,9
37	17/01 a 31/01	504_518	62,8	49,0	51,0	51,0	58,5	54,4	5,9	10,8
38	31/01 a 14/02	518_532	-61,9	-54,1	-58,1	-57,0	-65,4	-59,3	4,4	7,4
39	14/02 a 28/02	532_546	-37,3	-16,6	-32,0	-20,7	-33,8	-28,1	8,9	31,8
40	28/02 a 14/03	546_560	-25,8	-18,2	-24,3	-31,9	-23,0	-24,7	5,0	20,1
41	14/03 a 28/03	560_574	37,6	24,6	31,4	32,0	32,6	31,6	4,6	14,7
42	28/03 a 11/04	574_588	-14,4	-13,0	-16,6	-16,3	-14,5	-14,9	1,5	10,0
43	11/04 a 25/04	588_602	-23,0	-12,3	-13,2	-11,8	-12,3	-14,5	4,8	32,8
44	25/04 a 09/05	602_616	12,7	11,7	9,5	2,8	10,0	9,3	3,9	41,4
45	09/05 a 23/05	616_630	-0,9	-1,0	-3,4	-0,3	-6,0	-2,3	2,4	102,1
46	23/05 a 06/06	630_644	53,7	41,0	50,9	50,0	42,0	47,5	5,7	-11,9
47	06/06 a 20/06	644_658	-12,8	-3,2	0,6	-1,9	-5,2	-4,5	5,1	112,9
48	20/06 a 04/07	658_672	14,8	9,7	7,7	3,6	10,3	9,2	4,1	-44,4
49	04/07 a 18/07	672_686	-20,8	-14,1	-13,2	-19,4	-15,4	-16,6	3,3	20,1
50	18/07 a 01/08	686_700	-7,9	-5,6	-6,4	-7,2	-5,6	-6,5	1,0	15,1
51	01/08 a 15/08	700_714	-16,6	-14,4	-10,3	-15,7	-18,4	-15,1	3,0	20,2
52	15/08 a 29/08	714_728	-12,3	-14,9	-19,7	-19,3	-26,9	-18,6	5,6	29,9

2.3.5 Escoamento Superficial (RO)

O escoamento superficial teve uma grande variabilidade, nem sempre aparecendo em todas as parcelas e de forma imprevisível. A Tabela 8 mostra que houve escoamento irregular nas parcelas durante o período todo; nos 45 balanços ocorreram 10 vezes na parcela 2; 5 na 3; 16 na 5; 15 na 6 e 7 na 9, sempre de forma alternada e nunca ocorrendo enxurrada nas 5 parcelas no mesmo balanço. De qualquer forma, seus valores foram muito pequenos em relação à chuva, em

média 0,3%. Isto significa que o cultivo em curva de nível está sendo adequado para o controle do escoamento superficial e, conseqüentemente, da erosão.

Tabela 8 - Escoamento superficial (RO), desvios padrão (SD) e coeficientes de variação (CV) de cada período analisado. DAI = dias após o início

(continua)

Nº Balanço	Período	DAI	RO (mm)					\overline{RO} (mm)	SD	CV
			2	3	5	6	9			
1	01/09 a 15/09	0_14	-	-	-	-	-	-	-	-
2	15/09 a 29/09	14_28	-	-	-	-	-	-	-	-
3	29/09 a 13/10	28_42	0,0	0,0	0,4	0,6	0,1	0,2	0,3	118,9
4	13/10 a 27/10	42_56	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	223,6
5	27/10 a 10/11	56_70	-	-	-	-	-	-	-	-
6	10/11 a 24/11	70_84	0,0	0,0	0,6	0,8	0,5	0,4	0,4	94,3
7	24/11 a 08/12	84_98	0,0	0,0	0,2	0,0	0,7	0,2	0,3	173,2
8	08/12 a 22/12	98_112	-	-	-	-	-	-	-	-
9	22/12 a 05/01	112_126	0,0	0,0	0,7	1,8	0,1	0,5	0,8	149,6
10	05/01 a 19/01	126_140	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	138,3
11	19/01 a 02/02	140_154	0,0	0,0	1,4	1,4	0,1	0,6	0,7	125,6
12	02/02 a 16/02	154_168	0,0	0,0	0,4	0,9	0,0	0,3	0,4	152,7
13	16/02 a 01/03	168_182	3,0	0,5	1,1	1,3	0,0	1,2	1,1	96,0
14	01/03 a 15/03	182_196	0,0	0,0	0,6	1,5	0,0	0,4	0,7	155,1
15	15/03 a 29/03	196_210	-	-	-	-	-	-	-	-
16	29/03 a 12/04	210_224	0,6	0,2	0,6	0,0	0,0	0,3	0,3	110,6
17	12/04 a 26/04	224_238	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	158,8
18	26/04 a 10/05	238_252	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	142,6
19	10/05 a 24/05	252_266	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	223,6
20	24/05 a 07/06	266_280	0,0	0,0	2,2	1,9	0,0	0,8	1,1	136,6
21	07/06 a 21/06	280_294	-	-	-	-	-	-	-	-
22	21/06 a 05/07	294_308	-	-	-	-	-	-	-	-
23	05/07 a 19/07	308_322	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1	127,3
24	19/07 a 02/08	322_336	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	156,5
25	02/08 a 16/08	336_350	-	-	-	-	-	-	-	-
26	16/08 a 30/08	350_364	1,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	0,7	189,9
1_26	01/09 a 30/08	0_364	5,1	1,0	8,7	11,1	1,6	5,5	4,4	80,3
27	30/08 a 13/09	364_378	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
28	13/09 a 27/09	378_392	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
29	27/09 a 11/10	392_406	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
30	11/10 a 25/10	406_420	0,0	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1	99,2
31	25/10 a 08/11	420_434	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
32	08/11 a 22/11	434_448	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	138,2
33	22/11 a 06/12	448_462	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	223,6
34	06/12 a 20/12	462_476	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
35	20/12 a 03/01	476_490	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	223,6
36	03/01 a 17/01	490_504	0,8	0,0	0,4	0,6	0,1	0,4	0,3	89,1
37	17/01 a 31/01	504_518	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	110,4

Tabela 8 - Escoamento superficial (RO), desvios padrão (SD) e coeficientes de variação (CV) de cada período analisado. DAI = dias após o início

Nº Balanço	Período	DAI	RO (mm)					(conclusão)		
			2	3	5	6	9	\overline{RO} (mm)	SD	CV
38	31/01 a 14/02	518_532	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
39	14/02 a 28/02	532_546	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	194,7
40	28/02 a 14/03	546_560	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
41	14/03 a 28/03	560_574	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	223,6
42	28/03 a 11/04	574_588	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
43	11/04 a 25/04	588_602	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
44	25/04 a 09/05	602_616	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
45	09/05 a 23/05	616_630	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
46	23/05 a 06/06	630_644	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
47	06/06 a 20/06	644_658	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
48	20/06 a 04/07	658_672	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
49	04/07 a 18/07	672_686	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
50	18/07 a 01/08	686_700	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
51	01/08 a 15/08	700_714	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
52	15/08 a 29/08	714_728	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
27_52	30/08 a 29/08	364_728	2,1	0,2	0,7	0,8	0,1	0,8	0,8	100,2

Como já comentado para o caso de ΔS , os CVs de RO precisam ser analisados com critério. A presença de muitos zeros também indica que esta variável provavelmente não segue a distribuição normal. De qualquer forma, os valores absolutos de RO são muito pequenos e pouco afetaram o estabelecimento dos balanços hídricos.

2.3.6 Drenagem (Q_L)

Como citado no item 2.2.3.7, inicialmente calculou-se ER_i considerando $Q_L=0$ na eq. (2) o que permite o cálculo de Q_L pela diferença $ER_i - ET_c$, aqui chamado de Q_{L_i} . A Tabela 9 apresenta os dados de ER_i e de Q_{L_i} para os balanços em que apareceu que são: 11, 12, 13, 20, 24, 30, 36, 37 e 41.

Tabela 9 - Períodos de drenagem Q_{Li} calculados pela diferença $ERi-ETc$ e de Q_{Lii} pela equação de Darcy. DAI = dias após o início

Nº Balanço	Período	DAI	ERi (mm)	ETc (mm)	$Q_{L i}$ (mm)	$Q_{L ii}$ (mm)
11	19/01 a 02/02	140_154	-97,4	-40,5	-56,8	-56,8
12	02/02 a 16/02	154_168	-95,5	-64,0	-31,5	-1,5
13	16/02 a 01/03	168_182	-130,6	-48,3	-82,3	-55,8
14	01/03 a 15/03	182_196	-89,3	-89,3	0,0	-6,2
20	24/05 a 07/06	266_280	-46,8	-24,2	-22,7	-58,6
21	07/06 a 21/06	280_294	-19,6	-19,6	0,0	-5,6
22	21/06 a 05/07	294_308	-16,5	-16,5	0,0	-0,1
23	05/07 a 19/07	308_322	-12,0	-12,0	0,0	-0,3
24	19/07 a 02/08	322_336	-57,5	-36,8	-20,7	-0,1
Total					-214,1	-185,0
30	11/10 a 25/10	406_420	-45,0	-41,5	-3,5	-0,1
31	25/10 a 08/11	420_434	-52,2	-52,2	0,0	-0,1
32	08/11 a 22/11	434_448	-72,1	-72,1	0,0	-0,4
33	22/11 a 06/12	448_462	-73,1	-73,1	0,0	-0,4
36	03/01 a 17/01	490_504	-87,1	-56,8	-30,3	-0,1
37	17/01 a 31/01	504_518	-59,0	-34,8	-24,3	-45,0
38	31/01 a 14/02	518_532	-88,9	-88,9	0,0	-44,9
41	14/03 a 28/03	560_574	-67,0	-41,8	-25,2	0,0
46	23/05 a 06/06	630_644	-100,7	-33,4	-67,3	0,0
Total					-150,5	-91,0

A segunda forma utilizada para estimar a drenagem Q_L , aqui chamada de Q_{Lii} foi feita usando a equação de Darcy-Buckingham, eq. (4). A medida de $K(H)$, como explicado no item 3.4, foi feita utilizando o método de Reichardt et al (2004) que se baseia na saturação prévia do solo por infiltração com posterior acompanhamento da drenagem interna. Durante a infiltração avaliou-se a condutividade hidráulica K_0 e a umidade volumétrica θ_0 saturadas, que foram de $468,64 \text{ mm.dia}^{-1}$ e $0,459 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, respectivamente, quando a infiltração atingiu o equilíbrio dinâmico.

Já no processo de redistribuição de água, as séries de medidas de $\theta(z,t)$ e de $H(z,t)$ em intervalos crescentes de tempo permitiram o estabelecimento das regressões indicadas pelas eqs. (8), (9), e (10), cujos gráficos são apresentados nas Figuras 10, 11 e 12.

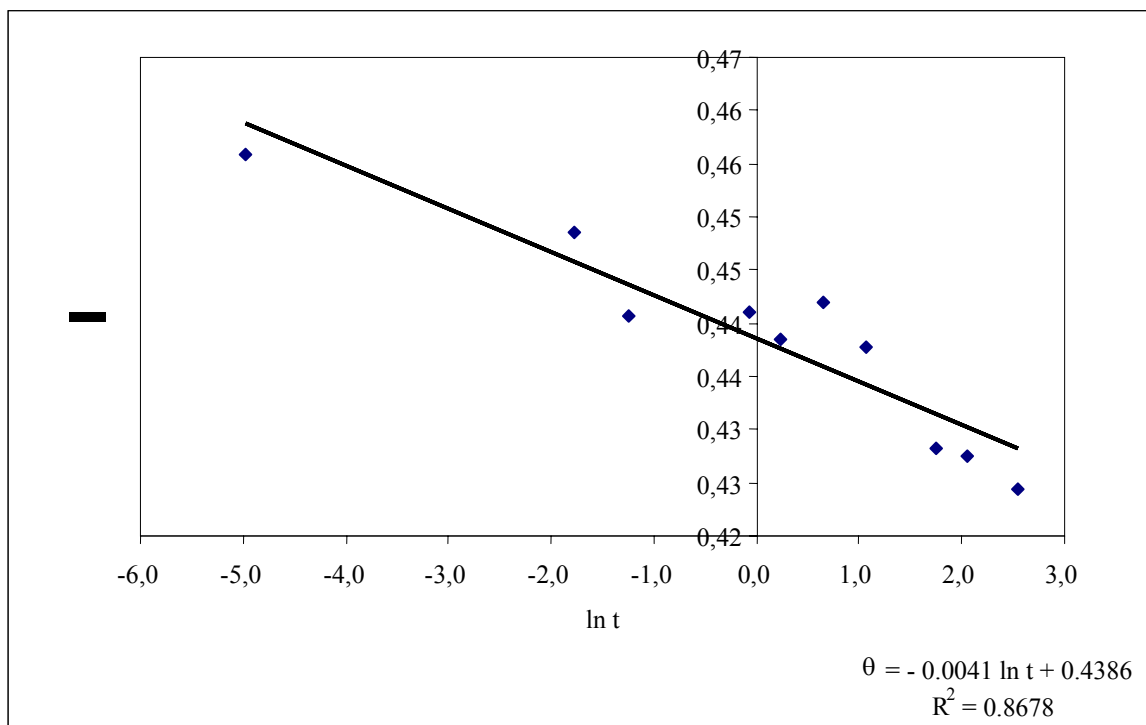


Figura 10 - Umidade do solo θ ($m^3 \cdot m^{-3}$) na profundidade $z = 1$ m, em função logaritmo neperiano do tempo t (dias), utilizando a eq. (8)

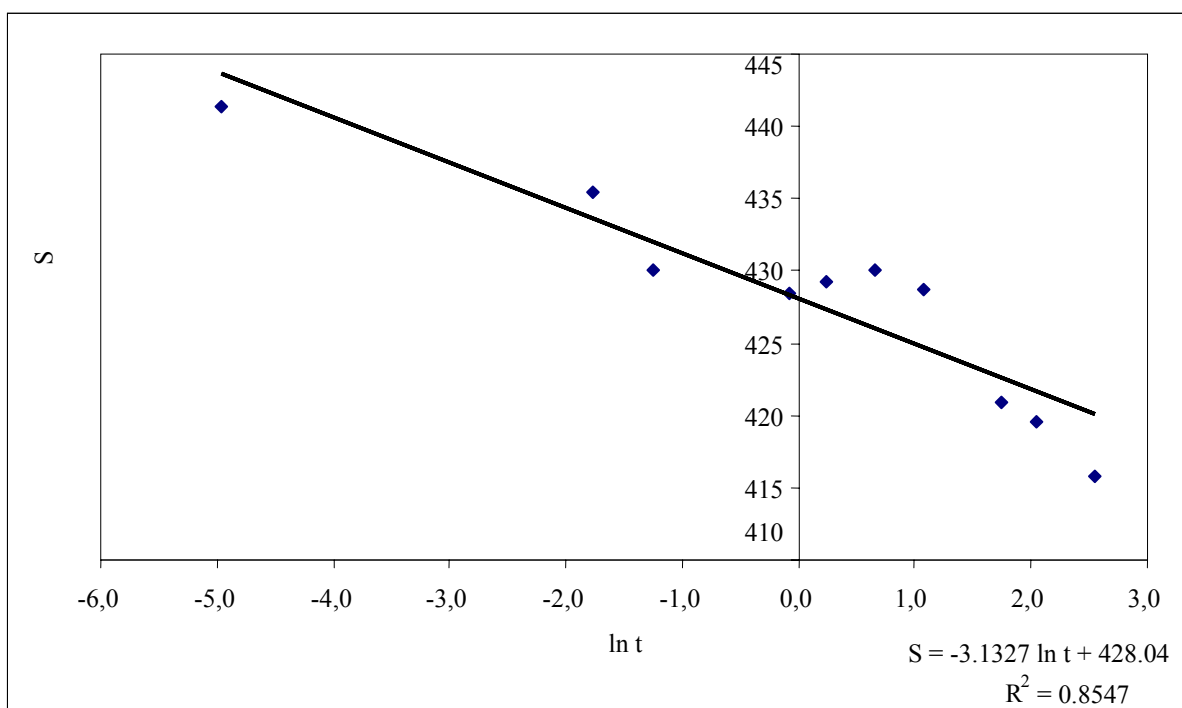


Figura 11 - Armazenamento de água no solo, S (mm) na camada $z = 0-1$ m, em função logaritmo neperiano do tempo t (dias), utilizando a eq. (9)

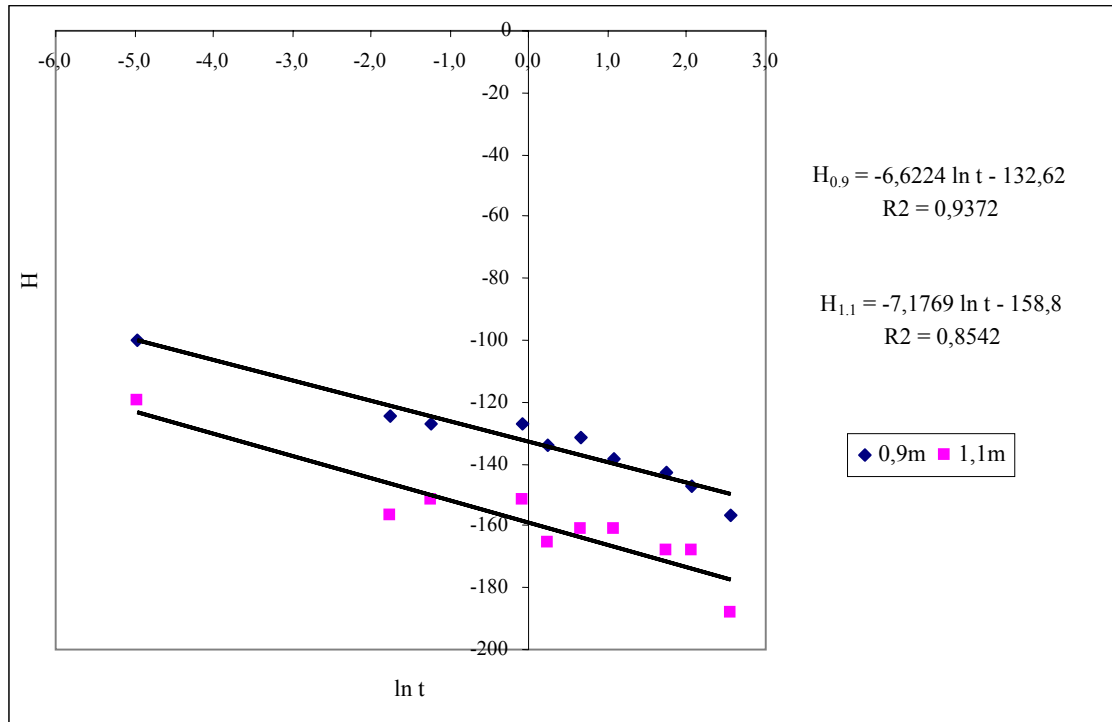


Figura 12 - Potencial total H (cm H₂O) para z = 0,9 m e z = 1,1 m, em função do logaritmo neperiano do tempo (dias), utilizando a eq. (10)

Estas regressões, todas com alto R², forneceram os parâmetros da relação $K(\theta)$ das eqs. (8), (9), (10) e (11) que são: a = 0,4386; b = -0,0041; d = -3,1327; e' = 1,309 e f' = 0,0277 e a equação obtida foi:

$$K(\theta)_L = \frac{\left[-(-3,1327) \cdot \exp\left(\frac{0,4386}{-0,0041}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{-\theta}{-0,0041}\right) \right]}{\left[1,309 + \frac{0,0277}{-0,0041} (\theta - 0,4386) \right]} \quad (15)$$

Que transformada em K(H) resultou em:

$$K(\bar{H}) = \frac{4,651757 \times 10^9 \cdot \exp\left(\frac{\bar{H} - 21,57}{6,8996}\right)}{0,723486 - 0,004018 * (\bar{H} - 21,57)} \quad (16)$$

Para estimativa do gradiente de potencial H foram utilizadas as leituras de tensiômetros em cada parcela experimental de café, nas profundidades de 0,9 e 1,1m, segundo a eq. (5). A Figura 13 mostra as variações de H (média dos 6 tensiômetros por parcela) em função de DAI, onde se pode ver os principais períodos de drenagem, o primeiro de DAI 140 a 200, o segundo de

260 a 280, o terceiro de 420 a 460, o quarto de 500 a 530 e o último, menos pronunciado, de 560 a 580, nos quais H apresentou os maiores valores, próximos à saturação. Nestes períodos as leituras de tensiômetros foram intensificadas e, por interpolação de ajuste de curva feito por Microsoft Excel[®] obteve-se 14 valores de H, gradH e K(H) para cálculo de q (eq. 4) cuja integração resultou em Q_{Lii} (eq. 6) apresentados na Tabela 10 para os balanços 11, 12, 13, 14, 20 e 24, a título de exemplo.

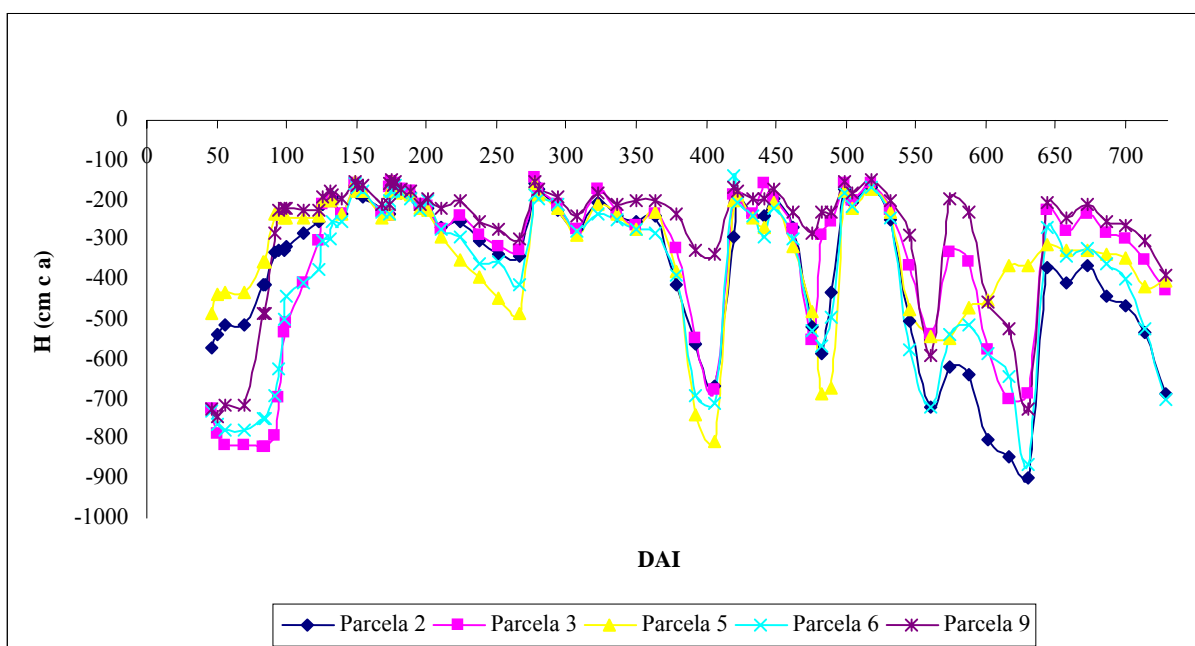


Figura 13 - Potencial Total médio por parcela (6 tensiômetros por parcela) em função de DAI (dias após o início)

Tabela 10 - Valores de H, gradH e K(H) utilizados no cálculo de q_{Lii} e de Q_{Lii} . DAI = dias após o início

(continua)						
Nº Balanço	Período	DAI	H (cm c a)	Grad H	K(H) (mm/dia)	q_{Lii} (mm/dia)
		141	-222,5	-1,5	0,0007	0,0
		142	-214,1	-1,6	0,0024	0,0
		143	-205,1	-1,7	0,0089	0,0
		144	-195,6	-2,0	0,0364	-0,1
		145	-188,0	-1,9	0,1120	-0,2
		146	-179,1	-2,0	0,4137	-0,8
		147	-171,3	-2,1	1,3279	-2,8
11	19/01 a 02/02	148	-165,1	-2,1	3,2831	-6,8
		149	-157,4	-2,3	10,2697	-23,5
		150	-160,1	-2,3	6,9125	-16,0
		151	-172,8	-2,2	1,0502	-2,4
		152	-174,0	-2,1	0,8881	-1,8
		153	-175,7	-2,1	0,6838	-1,4
		154	-178,5	-2,2	0,4544	-1,0
			Soma: Q_L			-56,8
		155	-181,9	-2,2	0,2767	-0,6
		156	-185,5	-2,2	0,1608	-0,4
		157	-189,2	-2,2	0,0935	-0,2
		158	-192,6	-2,2	0,0566	-0,1
		159	-196,1	-2,2	0,0336	-0,1
		160	-199,8	-2,2	0,0195	0,0
12	02/02 a 16/02	161	-203,3	-2,2	0,0116	0,0
		162	-206,7	-2,2	0,0070	0,0
		163	-210,3	-2,2	0,0042	0,0
		164	-213,5	-2,2	0,0026	0,0
		165	-217,3	-2,2	0,0015	0,0
		166	-220,9	-2,2	0,0009	0,0
		167	-224,3	-2,2	0,0005	0,0
		168	-227,9	-2,2	0,0003	0,0
			Soma: Q_L			-1,5
		169	-229,6	-2,3	0,0002	0,0
		170	-231,7	-2,4	0,0002	0,0
		171	-233,9	-2,5	0,0001	0,0
		172	-234,6	-2,5	0,0001	0,0
		173	-231,5	-2,5	0,0002	0,0
		174	-175,3	-1,7	0,7264	-1,2
		175	-159,0	-1,9	8,1202	-15,1
13	16/02 a 01/03	176	-169,0	-1,9	1,8567	-3,6
		177	-163,4	-2,1	4,2646	-9,0
		178	-161,3	-2,2	5,8061	-12,6
		179	-164,5	-2,2	3,6305	-7,9
		180	-169,4	-2,1	1,7597	-3,7
		181	-174,5	-2,1	0,8195	-1,7
		182	-179,0	-2,0	0,4249	-0,9
			Soma: Q_L			-55,8

Tabela 10 - Valores de H, gradH e K(H) utilizados no cálculo de q_{Lii} e de Q_{Lii} . DAI = dias após o início

							(conclusão)
Nº Balanço	Período	DAI	H (cm c a)	Grad H	K(H) (mm/dia)	q_{Lii} (mm/dia)	
		183	-179,3	-2,1	0,4055	-0,9	
		184	-179,4	-2,2	0,3974	-0,9	
		185	-179,6	-2,2	0,3895	-0,9	
		186	-179,7	-2,3	0,3817	-0,9	
		187	-180,1	-2,4	0,3594	-0,8	
		188	-181,3	-2,4	0,2999	-0,7	
		189	-183,5	-2,4	0,2174	-0,5	
14	01/03 a 15/03	190	-186,6	-2,4	0,1370	-0,3	
		191	-190,6	-2,4	0,0765	-0,2	
		192	-195,3	-2,4	0,0379	-0,1	
		193	-200,3	-2,3	0,0180	0,0	
		194	-205,4	-2,2	0,0086	0,0	
		195	-210,8	-2,2	0,0038	0,0	
		196	-215,7	-2,2	0,0019	0,0	
			Soma: Q_L				-6,2
		267	-352,6	-0,5	0,0000	0,0	
		268	-333,1	-0,8	0,0000	0,0	
		269	-312,1	-0,8	0,0000	0,0	
		270	-291,7	-1,1	0,0000	0,0	
		271	-271,6	-1,0	0,0000	0,0	
		272	-251,9	-1,2	0,0000	0,0	
		273	-198,9	1,9	0,0223	0,0	
20	24/05 a 07/06	274	-211,6	-1,7	0,0034	0,0	
		275	-192,9	-1,8	0,0544	-0,1	
		276	-175,9	-1,8	0,6702	-1,2	
		277	-159,9	-2,0	7,1006	-14,5	
		278	-154,7	-2,2	15,4645	-34,1	
		279	-164,3	-2,2	3,7043	-8,0	
		280	-179,9	-2,1	0,3716	-0,8	
			Soma: Q_L				-58,6
		323	-204,4	-3,4	0,0099	0,0	
		324	-206,7	-3,3	0,0070	0,0	
		325	-213,0	-2,8	0,0028	0,0	
		326	-211,2	-3,1	0,0036	0,0	
		327	-228,4	-1,5	0,0003	0,0	
		328	-215,7	-2,9	0,0019	0,0	
		329	-221,9	-3,1	0,0007	0,0	
24	19/07 a 02/08	330	-220,2	-2,6	0,0010	0,0	
		331	-222,2	-2,5	0,0007	0,0	
		332	-224,3	-2,4	0,0005	0,0	
		333	-227,1	-2,3	0,0003	0,0	
		334	-229,0	-2,2	0,0003	0,0	
		335	-231,3	-2,1	0,0002	0,0	
		336	-233,6	-2,0	0,0001	0,0	
			Soma: Q_L				-0,1

A eq. (16), obtida para o mesmo solo em parcela ao lado das 5 parcelas de balanço hídrico, ao ser aplicada nos cálculos de Q_{Lii} forneceu valores de K praticamente nulos em todos os balanços com drenagem. Este fato pode ser explicado através de dois argumentos. O primeiro é a variabilidade espacial do solo, que afeta demais os parâmetros da relação $K(H)$. Esta variabilidade foi estudada por vários pesquisadores (GREMINGER; SUD; NIELSEN, 1985; VILLAGRA et al., 1988) que indicaram sua importância, mas não discutiram suas implicações no cálculo do balanço hídrico. Reichardt et al. (1990) e Villagra et al. (1995) salientaram que o uso das relações $K(\theta)$ exige uma quantidade considerável de instrumentos nos limites superior (superfície do solo) e inferior (zona radicular da cultura) do elemento de volume, o que causa uma significativa limitação no estudo da variabilidade espacial, já que esta requer um grande número de repetições. Como consequência, poucos trabalhos discutem as dificuldades impostas pela variabilidade espacial no estudo e no cálculo do balanço hídrico (TIMM, 2002).

O segundo argumento é o caráter exponencial das relações $K(\theta)$ ou $K(H)$ que para pequenas variações de θ ou H levam à enormes variações em K . Analisemos o caráter exponencial utilizando nossa eq. (16) que é válida no intervalo $H = -131,4$ a -350 cmH₂O (Tabela 11). Para $H = -131,4$ (saturação) obtém-se o valor de $K_0 = 468,64$ mm.dia⁻¹. É uma infiltração básica muito alta, de quase 0,5 m por dia, típica de solos mais arenosos e permeáveis. Acontece porém, que a exponencialidade da equação é muito grande, medida pelo fator $\beta = 1/b = -243,90$, que reduz K drasticamente com pequenos aumentos de H . A Tabela 11 mostra as variações de K para variações de ΔH de -10 cmca, que é, aproximadamente, a precisão dos tensiômetros utilizados (valor normal para este tipo de medida). Vê-se que K varia mais de 300% para estas pequenas variações de H . Este fato é discutido na literatura e torna o uso da equação de Darcy impraticável, como é o caso de Warrick e Nielsen (1980) que apresentaram dados com coeficientes de variação na ordem de 100% para a condutividade hidráulica do solo saturado, e de 400% para a condutividade hidráulica do solo não-saturado em umidades mais baixas. Libardi e Saad (1994) comentam que é comum encontrar estudos de balanço hídrico que se baseiam em apenas uma medida da condutividade hidráulica para a área experimental, o que acarreta erros na estimativa da drenagem profunda ou na ascensão capilar. Em nosso caso, H é uma média de 6 tensiômetros por parcela ou de 30 no total (5 parcelas) o que fornece valores com erro menor que -10 cmca, dependendo da variabilidade espacial do solo. Este problema da exponencialidade das relações $K(\theta)$ ou $K(H)$ é abordado de uma forma crítica por Reichardt et al

(1998), que chegam a afirmar que o uso destas relações é impraticável. Para seu uso, em nosso caso, foi necessário um ajuste da eq. (16), mostrado a seguir, que corrobora com a tese de que o uso da equação de Darcy de forma determinística, para a medida de fluxos de água no solo, em condições de campo, é inviável.

O problema da variabilidade espacial foi aqui resolvido fazendo uma “calibração” da eq. (16) a ponto de fornecer resultados mais ajustados para o cálculo do balanço hídrico. Considerando o procedimento 1) de cálculo de Q_{Li} como correto, o que é bastante razoável, a eq. (16) foi ajustada para que no balanço 11 $Q_{Li} = Q_{Lii}$, como pode ser visto na Tabela 9. O ajuste foi apenas uma correção em H, que foi substituído por $H - 21,57$. Esta correção significa que devido à variabilidade espacial do solo em questão, o valor médio de H medido na parcela onde foi obtida a função $K(H)$, difere da média dos H das 5 parcelas de balanço hídrico de um valor de $-21,57$ cmca. Este é um valor pequeno que pode ser muito bem justificado pela variabilidade das curvas de retenção de água de solos como o do experimento em questão. Apesar disso, devido ao caráter exponencial de $K(H)$, este pequeno ajuste foi o suficiente para viabilizar o uso da eq. (16). Uma vez ajustada para o balanço 11, a eq. (16) foi utilizada com o mesmo fator nos demais balanços. A Tabela 10 apresenta os valores individuais de q, que somados resultam em Q_{Lii} para valores médios das 5 parcelas.

Tabela 11 - Relação H vs K(H)

H cm c a	K(H) mm/dia
-131.4	468.64
-140	130.8310
-150	29.7141
-160	6.7557
-170	1.5375
-180	0.3502
-190	0.0798
-200	0.0182
-210	0.0042
-220	0.0010
-230	0.0002

Uma comparação entre os valores de Q_{Li} e Q_{Lii} da Tabela 9 evidencia o balanço 11, com valores iguais devido ao ajuste feito na eq. (16). Este ajuste, porém, não foi satisfatório para os demais balanços. Nos balanços 12, 24, 36 e 41 apareceram pequenos valores de Q_{Lii} quando Q_{Li} foi alto. Inversamente, no balanço 38, quando Q_{Li} foi nulo, Q_{Lii} foi 44,9mm. Os totais de Q_L pelos 2 métodos foram diferentes (Tabela 9) e devido à todas inconsistências e às maiores dificuldades de medir Q_{Lii} , adotou-se a metodologia simplificada de Q_{Li} como a mais adequada.

2.3.7 Balanços

Na Tabela 12 encontram-se os balanços hídricos completos de todo período. Eles dão uma visão global das relações hídricas ocorridas durante o período estudado da cultura. A chuva, o principal componente que determina a aptidão de certa região para uma cultura, acompanhou muito bem os valores históricos de precipitação em Piracicaba, o que foi visto na Figura 9 que mostra que este período (Set 2003/Ago 2005) foi apenas levemente menos chuvoso que o normal. A irrigação nesta região, para a maioria das culturas perenes como o café, é suplementar e ocasional, pois o total de chuva está um pouco abaixo do limite estabelecido por Alfonsi (2000). Os 95,7 mm de irrigação foram aplicados durante os 2 anos apenas como uma prevenção para que as floradas no período de stress hídrico não fossem prejudicadas. Considerando o total de entradas (P+I), verifica-se que o RO representou apenas 0,3% do balanço, mostrando o ótimo controle desse componente nas condições experimentais avaliadas. A Figura 14 mostra a tendência de um aumento de RO em função do aumento de P, fato esperado mas de difícil previsão uma vez que, RO depende mais da intensidade da chuva, do que do total sendo ainda influenciado pelo valor de S_i , que quando baixo, favorece a infiltração da água, além das condições de declive e de superfície de solo.

Já a drenagem Q_L abaixo da profundidade $z = 1,0$ m foi 14,6% de (P+I), o que não é muito mas que em anos mais chuvosos poderia alcançar uma percentagem maior. Em termos de lixiviação de nitrogênio, que é um reflexo da drenagem, verificou-se que esta é pequena (FENILLI, 2005), podendo-se concluir que a adubação e seu parcelamento foram adequados em relação aos componentes do balanço hídrico. É importante, porém, lembrar da importância da drenagem profunda como fonte de água na manutenção de cursos de água e de aquíferos subterrâneos.

A variação ΔS deve ser pequena em relação aos demais componentes num período grande, em termos médios nunca maior que 125mm em termos absolutos para nosso solo, como mostrado no item 2.3.4. No caso estudado (20 meses) foi de 12,8 mm, o restante de (P+I) é ER e representou 86,1%. Em uma situação ideal, na qual RO e Q_{Li} são nulos, ER representaria 100% de (P+I), isto é, $ER=(P+I)$. No período estudado esta condição quase ocorreu.

Tabela 12 - Precipitação (P), irrigação (I), armazenamento inicial (Si), variação do armazenamento de água no solo (ΔS), escoamento superficial (RO), drenagem (Q_{Li}) e evapotranspiração real (ERi) e a evapotranspiração potencial ETc, para todos os períodos analisados. DAI = dias após o início

(continua)

Nº Balanço	Período	DAI	P (mm)	I (mm)	Si (mm)	ΔS (mm)	RO (mm)	Q_{Li} (mm)	ERi (mm)	ETc (mm)
1	01/09 a 15/09	0_14	4,1	34,2	245,2	12,2	0,0	0,0	-26,1	-47,3
2	15/09 a 29/09	14_28	5,8	0,0	257,4	-6,1	0,0	0,0	-11,9	-57,7
3	29/09 a 13/10	28_42	77,8	0,0	251,3	26,6	-0,2	0,0	-50,9	-55,6
4	13/10 a 27/10	42_56	17,9	0,0	277,9	-6,9	0,0	0,0	-24,8	-67,5
5	27/10 a 10/11	56_70	25,3	0,0	271,0	-7,8	0,0	0,0	-33,1	-49,0
6	10/11 a 24/11	70_84	75,1	0,0	263,3	12,3	-0,4	0,0	-62,3	-62,3
7	24/11 a 08/12	84_98	89,7	0,0	275,6	17,5	-0,2	0,0	-72,0	-72,0
8	08/12 a 22/12	98_112	49,3	0,0	293,1	-8,2	0,0	0,0	-57,5	-57,5
9	22/12 a 05/01	112_126	85,6	0,0	284,9	17,0	-0,5	0,0	-68,1	-68,1
10	05/01 a 19/01	126_140	50,6	0,0	301,9	-1,7	-0,1	0,0	-52,2	-52,2
11	19/01 a 02/02	140_154	167,7	0,0	300,2	69,8	-0,6	-56,8	-40,5	-40,5
12	02/02 a 16/02	154_168	69,8	0,0	369,9	-26,0	-0,3	-31,5	-64,0	-64,0
13	16/02 a 01/03	168_182	152,9	0,0	344,0	21,1	-1,2	-82,3	-48,3	-48,3
14	01/03 a 15/03	182_196	73,1	0,0	365,1	-16,6	-0,4	0,0	-89,3	-89,3
15	15/03 a 29/03	196_210	14,0	0,0	348,5	-48,4	0,0	0,0	-62,4	-62,4
16	29/03 a 12/04	210_224	65,2	0,0	300,1	0,7	-0,3	0,0	-64,2	-64,2
17	12/04 a 26/04	224_238	52,3	0,0	300,8	0,5	-0,1	0,0	-51,7	-51,7
18	26/04 a 10/05	238_252	23,2	0,0	301,3	-6,4	-0,1	0,0	-29,6	-29,6
19	10/05 a 24/05	252_266	25,5	0,0	294,9	-0,1	0,0	0,0	-25,6	-25,6
20	24/05 a 07/06	266_280	101,5	0,0	294,8	53,8	-0,8	-22,7	-24,2	-24,2
21	07/06 a 21/06	280_294	7,2	0,0	348,7	-12,4	0,0	0,0	-19,6	-19,6
22	21/06 a 05/07	294_308	1,9	0,0	336,2	-14,7	0,0	0,0	-16,5	-16,5
23	05/07 a 19/07	308_322	32,7	0,0	321,6	20,6	-0,1	0,0	-12,0	-12,0
24	19/07 a 02/08	322_336	44,6	0,0	342,2	-12,9	0,0	-20,7	-36,8	-36,8
25	02/08 a 16/08	336_350	0,0	0,0	329,3	-11,4	0,0	0,0	-11,4	-46,5
26	16/08 a 30/08	350_364	0,0	37,5	317,8	-8,9	-0,4	0,0	-46,1	-48,1
1_26	01/09 a 30/08	0_364	1312,8	71,6	-	63,7	-5,5	-214,1	-1101,2	-1268,7
27	30/08 a 13/09	364_378	0,0	0,0	308,9	-32,5	0,0	0,0	-32,5	-63,2
28	13/09 a 27/09	378_392	6,5	0,0	276,4	-19,9	0,0	0,0	-26,4	-55,6
29	27/09 a 11/10	392_406	60,2	4,9	256,5	25,1	0,0	0,0	-39,9	-51,0
30	11/10 a 25/10	406_420	117,1	0,0	281,7	72,1	-0,1	-3,5	-41,5	-41,5
31	25/10 a 08/11	420_434	11,8	0,0	353,8	-40,5	0,0	0,0	-52,2	-52,2

Tabela 12 - Precipitação (P), irrigação (I), armazenamento inicial (Si), variação do armazenamento de água no solo (ΔS), escoamento superficial (RO), drenagem ($Q_{L,i}$) e evapotranspiração real (ERi) e a evapotranspiração potencial ET_c , para todos os períodos analisados. DAI = dias após o início

(conclusão)

Nº Balanço	Período	DAI	P (mm)	I (mm)	Si (mm)	ΔS (mm)	RO (mm)	$Q_{L,i}$ (mm)	ERi (mm)	ETc (mm)
32	08/11 a 22/11	434_448	87,4	0,0	313,3	15,2	0,0	0,0	-72,1	-72,1
33	22/11 a 06/12	448_462	32,8	0,0	328,6	-40,3	0,0	0,0	-73,1	-73,1
34	06/12 a 20/12	462_476	18,9	0,0	288,3	-26,2	0,0	0,0	-45,1	-45,1
35	20/12 a 03/01	476_490	75,2	0,0	262,0	10,4	0,0	0,0	-64,8	-64,8
36	03/01 a 17/01	490_504	121,4	0,0	272,5	33,9	-0,4	-30,3	-56,8	-56,8
37	17/01 a 31/01	504_518	113,5	0,0	306,4	54,4	-0,1	-24,2	-34,8	-34,8
38	31/01 a 14/02	518_532	30,0	0,0	360,8	-59,3	0,0	0,0	-88,9	-88,9
39	14/02 a 28/02	532_546	46,5	0,0	301,6	-28,1	-0,1	0,0	-74,5	-74,5
40	28/02 a 14/03	546_560	1,4	0,0	273,5	-24,7	0,0	0,0	-26,1	-26,1
41	14/03 a 28/03	560_574	98,2	0,0	248,8	31,2	-0,1	-25,2	-41,8	-41,8
42	28/03 a 11/04	574_588	27,4	0,0	280,0	-14,7	0,0	0,0	-42,1	-42,1
43	11/04 a 25/04	588_602	0,0	0,0	265,3	-14,3	0,0	0,0	-14,3	-54,7
44	25/04 a 09/05	602_616	4,2	19,2	250,9	9,4	0,0	0,0	-14,0	-40,9
45	09/05 a 23/05	616_630	12,4	0,0	260,4	-2,3	0,0	0,0	-14,7	-46,7
46	23/05 a 06/06	630_644	148,2	0	258,1	47,5	0,0	-67,3	-33,4	-33,4
47	06/06 a 20/06	644_658	28,0	0	305,6	-4,5	0,0	0,0	-32,5	-42,7
48	20/06 a 04/07	658_672	20,2	0	301,1	9,2	0,0	0,0	-10,9	-34,0
49	04/07 a 18/07	672_686	0	0	310,3	-16,6	0,0	0,0	-16,6	-40,2
50	18/07 a 01/08	686_700	8,7	0	293,7	-6,5	0,0	0,0	-15,2	-38,5
51	01/08 a 15/08	700_714	0	0	287,2	-15,1	0,0	0,0	-15,1	0,0
52	15/08 a 29/08	714_728	23,3	0	272,1		0,0	0,0	-18,6	0,0
27_52	30/08 a 29/08	364_728	1093,3	24,1	-	-36,8	-0,8	-150,5	-997,7	-1214,6

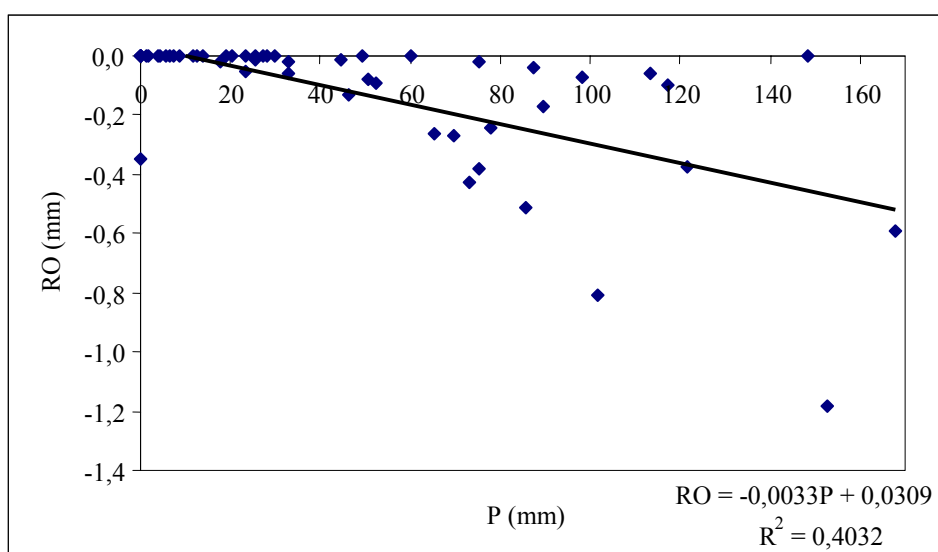


Figura 14 - Escoamento superficial, RO (mm) em função da precipitação P, mm

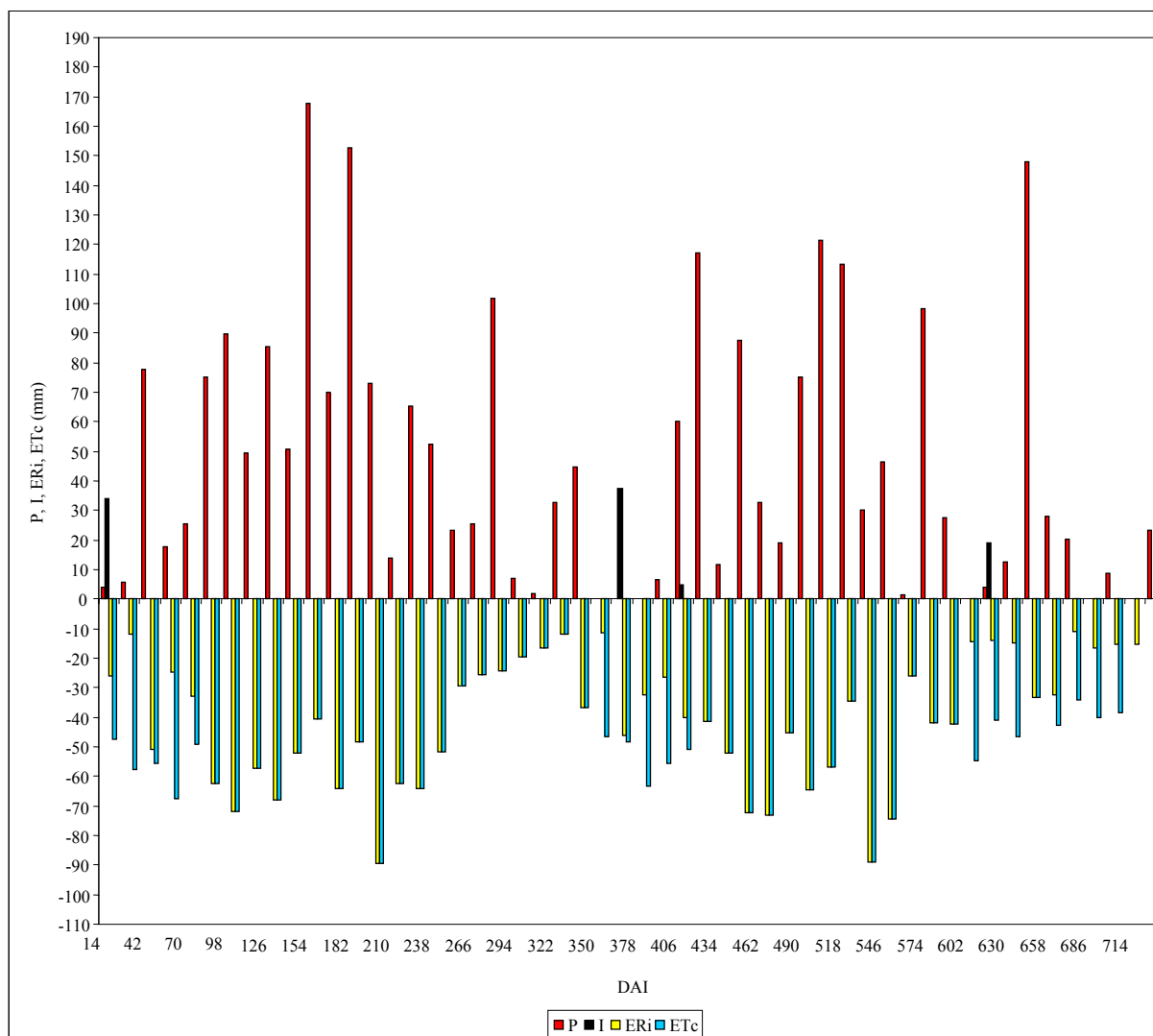


Figura 15 - Precipitação (P), irrigação (I), evapotranspiração atual (ERi) e evapotranspiração potencial (ETc), em mm, em função dos períodos analisados. DAI = dias após o início

A Figura 15 mostra ainda a distribuição das chuvas e das evapotranspições no decorrer do período. De uma maneira geral as chuvas foram bem distribuídas, sendo exceção o alto índice de pluviosidade nos meses de Junho e Julho de 2004 (DAI 266 a 366), geralmente mais secos em Piracicaba, mas que garantiram um bom desempenho da cultura. Os finais das estações secas, representados pelos balanços 1, 26, 29 e 44 exigiram irrigação. As mais altas pluviosidades ocorreram nos DAI 140 a 182 e tiveram como consequência altos índices de drenagem.

A evapotranspiração real se aproximou da máxima praticamente o ano inteiro, exceção feita aos períodos secos (balanços 1, 2, 4, 23, 25, 26, 43, 44 e 45) quando as plantas perderam folhas porque a condutividade hidráulica do solo foi tão baixa a ponto do fluxo de água para as raízes não atender a demanda atmosférica.

2.3.8 Crescimento das plantas

As Figuras 16, 17 e 18 mostram, respectivamente, as evoluções médias da matéria seca total (MS) da parte aérea das plantas de café, de sua altura (AT) e da área foliar (AF), em função dos DAI, para o ano agrícola 2003/2004. Apesar dos gráficos apresentarem alguma tendência de comportamento sigmóide, as três variáveis podem ser consideradas com variação linear em função do tempo, o que indica não ter havido nenhum período de maior exigência por água. A AF apresenta um desvio de linearidade no final do período, provocado pela queda de folhas na época mais fria e de stress hídrico.

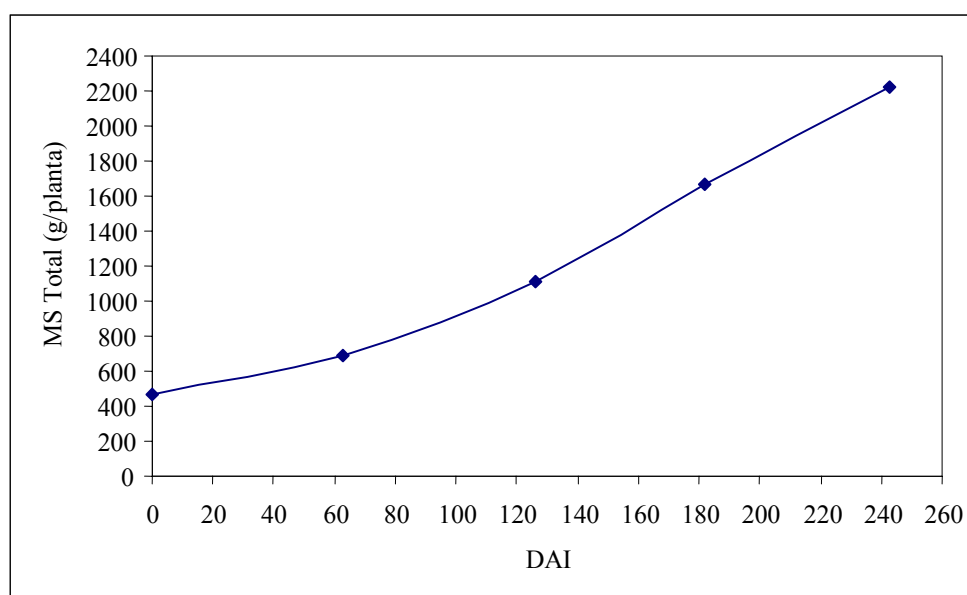


Figura 16 - Matéria seca total MS da parte aérea das plantas no decorrer do experimento

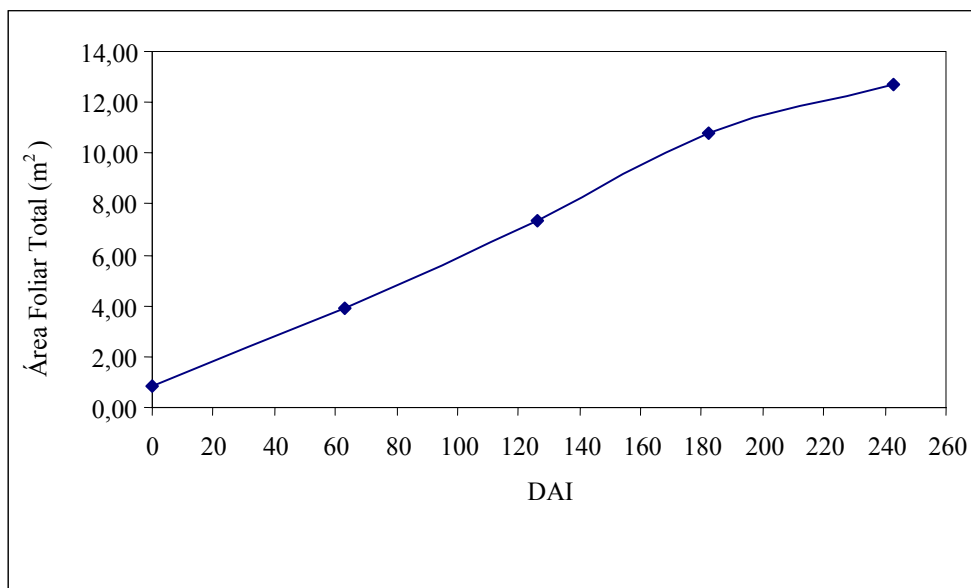


Figura 17 - Área foliar (AF) das plantas no decorrer do experimento

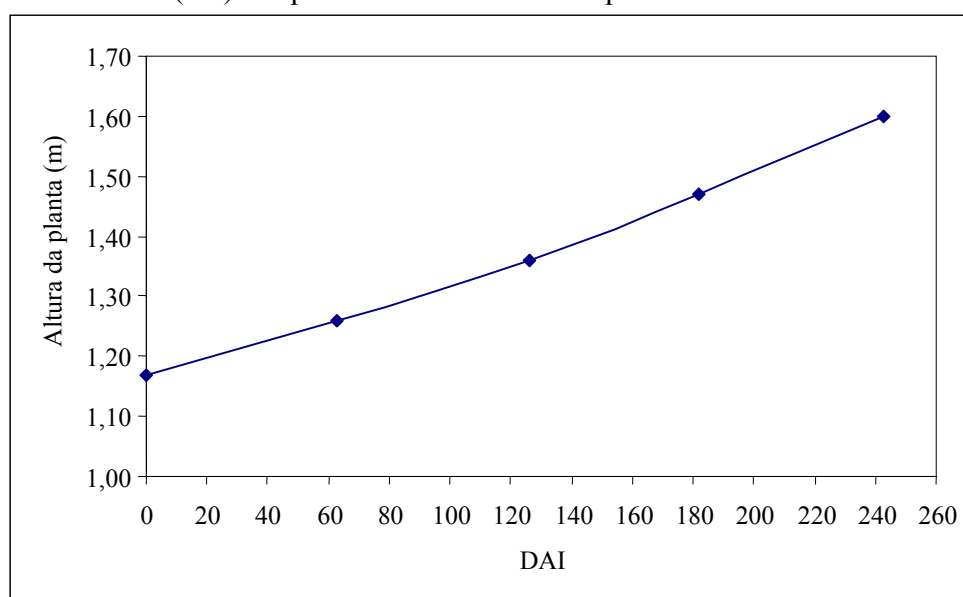


Figura 18 - Altura das plantas (AT) no decorrer do experimento

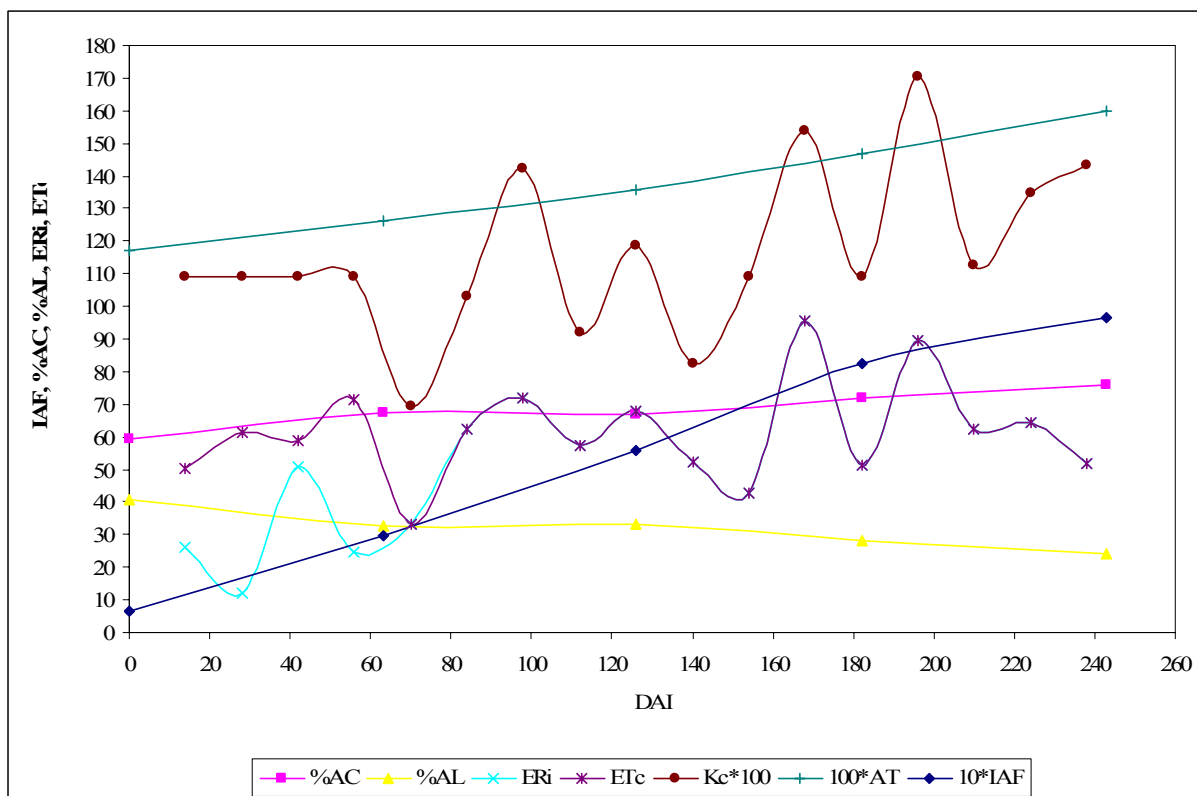


Figura 19 - Porcentagem de área coberta (%AC) e área livre (%AL), evapotranspiração real (ERi), evapotranspiração potencial (ETc), coeficiente de cultura (Kc*100), altura de planta (100*AT) e índice de área foliar (10*IAF) no decorrer do experimento

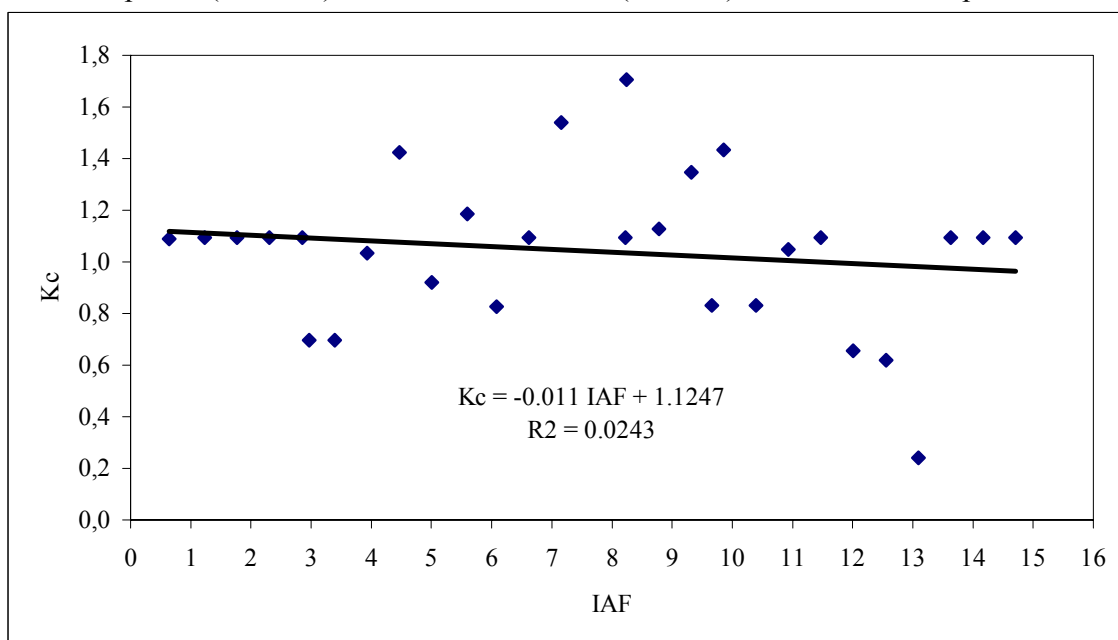


Figura 20 - Coeficientes de cultura Kc e o índice de área foliar (IAF)

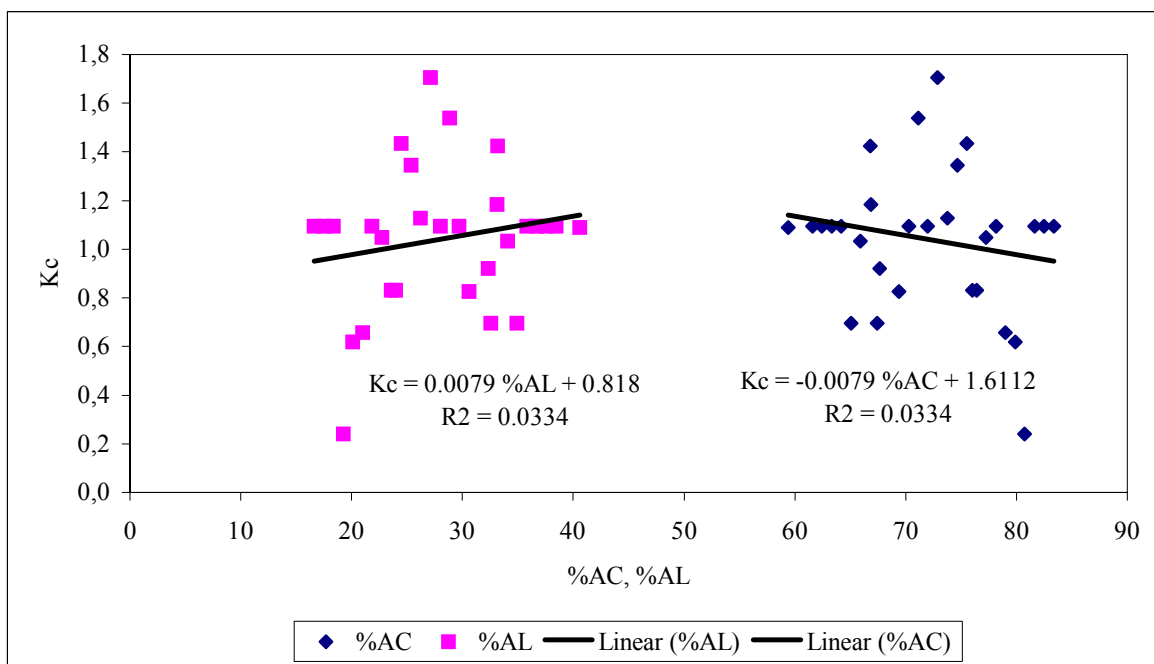


Figura 21 - Coeficientes de cultura Kc e a percentagem de área coberta %AC e livre %AL

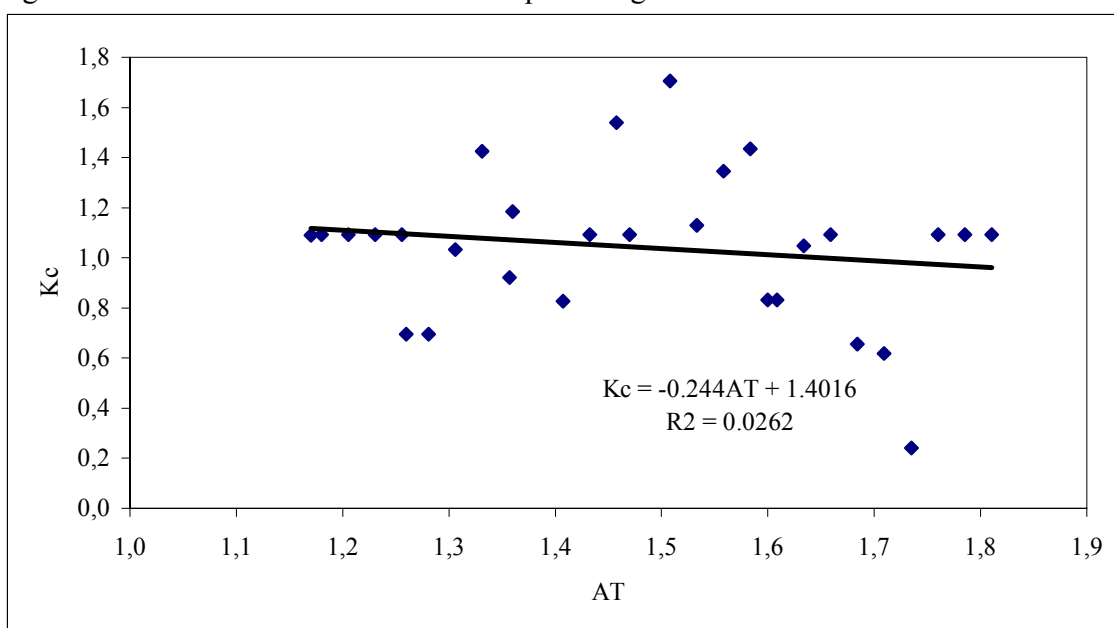


Figura 22 - Coeficientes de cultura Kc e a altura da planta AT (m)

Com a finalidade de analisar as relações dos parâmetros de planta com a evapotranspiração, o índice de área foliar (IAF), a altura das plantas (AT), a percentagem de área coberta (%AC), representada pelo quociente da área da projeção da copa na superfície do solo e a área total ocupada por uma planta ($0,75 \times 1,75 \text{ m}^2$), a percentagem de área livre (%AL = 100 -

%AC), foram dispostas em gráficos em função de DAI, juntamente com E_{Ri}, E_{Tc} e K_c, o que é mostrado na Figura 19. Visualmente vê-se pouca interação entre estes parâmetros. O mesmo comportamento pode ser visto nas regressões apresentadas nas Figuras 20, 21 e 22.

Assim sendo, com os dados obtidos, podemos apenas caracterizar o K_c desta cultura de café, de 3 anos de idade, através de valores médios dos parâmetros de planta (Tabela 13).

Tabela 13 - Valores de coeficiente de cultura (K_c), índice de área foliar (IAF), altura de planta (AT), porcentagem de área coberta (%AC) e área livre (%AL) no decorrer do 1º ano de experimento

Parâmetro	Média	Dif. *	SD	CV (%)
K_c	1,0	1,3	0,3	32,4
IAF	5,4	9,0	3,7	68,2
AT (m)	1,4	0,4	0,2	12,4
% AC	68,3	16,6	6,2	9,1
% AL	31,7	16,6	6,2	19,6

* Diferença entre o maior e o menor valor

Quanto ao sistema radicular, amostrado no início da floração de 2004 (DAI-366), os valores de matéria seca (MS) são apresentados na Figura 23. Como se pode notar a variação é logarítmica em profundidade, sendo que o modelo $z = -0,2536 \ln MS + 1,8513$ se ajustou com $R^2=0,9824$. Através deste modelo estimou-se a quantidade de raízes na camada 1,0 a 1,2m e o resultado foi de 19,3 g/planta, o que representa 1,0% das raízes contidas no volume considerado para o balanço, isto é, da camada 0-1m. Isto significa que a escolha de $z = L = 1m$ como limite inferior dos balanços hídricos foi adequada.

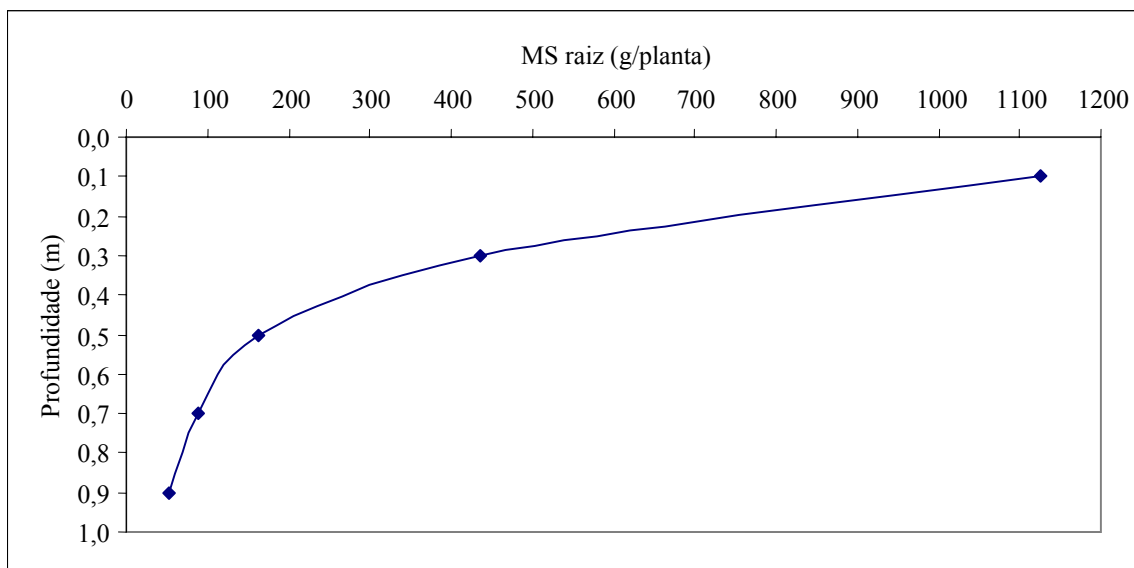


Figura 23 – Distribuição da matéria seca radicular aos DAI-366

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseados na hipótese formulada no final da introdução, podem-se apresentar várias proposições conclusivas que levam a um manejo mais racional da cultura do café, do ponto de vista hídrico:

- 1) Cuidados especiais são necessários na avaliação da precipitação pluvial, geralmente medida em apenas um ponto de observação ou, como é feito em muitos casos toma-se o valor da estação meteorológica mais próxima mas localizada fora da área experimental. Verificou-se que em áreas experimentais cercadas por obstáculos que afetam a dinâmica do vento e, conseqüentemente, a da chuva, a sua medida deve ser feita com número adequado de repetições. Nesse caso, uma área de 0,2 ha, com árvores, silo e galpão localizados à cerca de 100 m de distância, 5 pluviômetros distantes entre si de 15 a 100 m, apresentaram CVs de até 17,8%;
- 2) A irrigação em Piracicaba, para a cultura do café em anos normais não é necessária. Ela envolve alto custo e sua aplicação tem baixa probabilidade. No estabelecimento de balanços hídricos este componente pode ser responsável por alta contribuição na propagação de erros. Nesse caso, problemas com o pivô-central levará a coeficientes de variação de até 72,6%, muito maiores que os da chuva;
- 3) A demanda atmosférica da cultura de café expressa por sua evapotranspiração atual, foi de 1957,5 mm no período total, ou de 3,1 mm.dia⁻¹. Ela não foi afetada pelos parâmetros que caracterizam os estádios de crescimento e desenvolvimento da cultura. Durante todo o ano a evapotranspiração atual foi bem próxima à máxima, daí o valor médio de $K_c = 1,0$. E a análise de crescimento mostrou não ter havido nenhum período de maior exigência de água;
- 4) O Nitossolo Vermelho Eutroférico, vulgarmente denominado de Terra Roxa Estruturada, apresentou uma capacidade máxima de armazenamento de água da ordem de 125 mm até 1 m de profundidade, o que representa uma reserva de água para 40 dias, sem considerar as restrições de fluxo de água para as raízes em períodos mais secos e considerando a média de 3,1 mm/dia. No período estudado, a pluviosidade foi próxima a média de

período longo, e foi suficiente para atender a demanda atmosférica da cultura, com restrições no período de inverno frio e seco, favorável à floração. Solos com capacidade de armazenamento menor podem porém apresentar problemas de suprimento de água e também permitir maiores valores de drenagem interna e, conseqüentemente, lixiviação;

- 5) O cultivo do café em áreas com declive precisa ser feito de forma a propiciar a infiltração da água, minimizando assim as perdas por escoamento superficial e o processo de erosão. O cultivo em renque, ao longo de curvas de nível, com covas no sulco, reduziu sensivelmente o escoamento e a erosão foi nula. Em nosso caso, com um declive médio de 10%, o valor do escoamento foi muito pequeno, da ordem de 0,3% do total de chuva. Como era esperado, observou-se uma relação positiva entre o escoamento superficial e a precipitação pluvial;
- 6) A drenagem abaixo da zona radicular (1 m) foi da ordem de 287 mm no período estudado, enquanto o total de chuva mais irrigação foi de 2292,6 mm, isto é, 12,5%. Este valor deve se reduzir muito em anos mais secos ou em solos com maior capacidade de armazenamento de água. Sua medida através do balanço hídrico é bem mais simples e se mostrou superior em relação à medida mais sofisticada que envolve o uso da equação de Darcy e de equipamento trabalhoso e de alto custo. Baseados na literatura e nas medidas feitas na própria área experimental, recomenda-se o abandono do uso da abordagem gradiente x condutividade hidráulica (equação de Darcy) na estimativa de fluxos de drenagem no solo para o estabelecimento de balanços hídricos.

REFERÊNCIAS

- ALFONSI, R.R. **Histórico climatológico da cafeicultura brasileira**. Informativo Garcafé. Maio/2000. Disponível em <http://www.coffeebreak.com.br/ocafezal.asp?SE=8&ID=67> Acesso em 23 jun. 2005.
- ASSAD, E.D.; PINTO, H.S. **Zoneamento climático do café para os estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Goiás e Sudoeste da Bahia**. Brasília: Ministério da Agricultura e Abastecimento, Coordenação Nacional do Zoneamento Agrícola; EMBRAPA; FUNCAFÉ, 2001.
- BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K.; CALVACHE, M. Neutron and gamma probes: their use in agronomy. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Training course series**. Vienna, 2002. 75 p.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa: UFV, Impr. Univ., 1995. 657 p.
- CAMARGO, A.P. Zoneamento de aptidão climática para a cafeicultura de arábica e robusta no Brasil. In: FUNDAÇÃO E INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Recursos, meio ambiente e poluição**. Rio de Janeiro, 1977. p. 68-76.
- CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.
- CARVAJAL, J.F. **Cafeto: cultivo y fertilización**. Berna: Instituto Internacional de La Potasa, 1972. 141 p.
- CASSEL, D.K.; NIELSEN, D.R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. pt 1: Physical and mineralogical methods, p. 901-926.
- CHOUDHURY, E.N.; MILLAR, A.A. Retenção e movimento de água em latossolo vermelho-amarelo irrigado de Petrolina (PE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, 1983. p. 21-26.
- COSTA, F.M.P. **Crescimento e desenvolvimento do cafeeiro em início de produção sob efeito da adubação nitrogenada**. 2005. 115 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- COSTE, R. **Le caféier**. Paris: Techniques Agricoles et Productions Tropicales, 1968. 310 p.
- DAFERT, F.W. **Erfahrungen über rationellen kaffeebau**. Berlin: Verlagsbuchhandlung Paul Parey, 1899. 60 p.
- DENMEAD, O.T.; SHAW, R.H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, p. 385-390, 1962.

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

FENILLI, T.A.B. **Destino do nitrogênio do fertilizante em cultura do café**. 2005. 115 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **Agrianual 2004**: anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2004. 185 p.

IAFFE, A.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E. Simulação do consumo diário de água do cafeeiro baseado em amostragens eventuais da umidade do solo em Pindorama, SP. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Resumos expandidos...** Brasília: EMBRAPA Café; MINASPLAN, 2000. v. 2, p. 786.

GREMINGER, P.J.; SUD, Y.K.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of field measured soil-water characteristics. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 1075-1081, 1985.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press, 1982. 320 p.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, Madison, v. 1, p.277-294, 1985.

LIBARDI, P.L.; SAAD, A.M. Balanço hídrico em cultura de feijão irrigada por pivô central em Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, n. 3, p. 529-532, 1994.

MES, M.G. **Estudos sobre o florescimento de *Coffea arabica* L.** New York: IBEC Research Institute, 1957. 48 p. (Division of American International Association, 14).

OLITTA, A.F.L. **Os métodos de irrigação**. São Paulo: Nobel, 1978. 267 p.

OLIVEIRA, L.A.M. **Desenvolvimento vegetativo e reprodutivo do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) irrigado em diferentes épocas do ano**. 2003. 54 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

PAGACZ, E.A. Quelques considérations sur la floraison du caféier. **Bulletin Agricole du Congo Belge et du Ruanda – Urundi**, Bruxelles, v.50, p.1531-1540, 1959.

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

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia**: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

RAIJ, B.van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: IAC e Fundação IAC, 1996. 285 p.

- REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. São Paulo: McGraw – Hill do Brasil, 1978. 119 p.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, p. 211-216, 1988.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.
- REICHARDT, K.; ANGELOCCI, L.R.; BACCHI, O.O.S.; PILOTTO, J.E. Daily rainfall variability at a local scale (1,000 ha), in Piracicaba, SP, Brazil, and its implications on soil water recharge. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 52, n. 1, p. 43-49, 1995.
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; SAUNDERS, L.C.V.; CADIMA, Z.A. Dinâmica da água em solo cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 3, n. 1, p. 1-5, 1979.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C.; BACCHI, O.O.S.; OLIVEIRA, J.C.M.; DOURADO-NETO, D. A parameterized equation to estimate soil hydraulic conductivity in the field. **Australian Journal of Soil Research**, Sidney, v. 42, p.283-287, 2004.
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; MORAES, S.O.; BACCHI, O.O.S.; TURATTI, A.L.; VILLAGRA, M.M. Soil spatial variability and its implications on the establishment of water balances. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CIÊNCIA DO SOLO, 14., 1990, Kyoto. **Anais...** Quioto: Sociedade Internacional de Ciência do Solo, 1990. v. 1, p. 41-46.
- REICHARDT, K.; PORTEZAN-FILHO, O.; LIBARDI, P.L.; BACCHI, O.O.S.; MORAES, S.O.; OLIVEIRA, J.C.M.; FALLEIROS, M.C. Critical analysis of the field determination of soil hydraulic conductivity functions using the flux-gradient approach. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.48, p. 81-89, 1998.
- RENA, A.B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. In: SIMPÓSIO SOBRE FATORES QUE AFETAM A PRODUTIVIDADE DO CAFEEIRO, 1., 1984, Poços de Caldas. **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade...** Piracicaba: POTAFOS, 1986. p.13-85.
- RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V, V.H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 359 p.
- ROSE, C.W.; STERN, W.R. Determination of withdrawal of water from soil by crop roots as function of depth and time. **Australian Journal of Soil Research**, Sidney, v.5, p.11-9, 1967.
- SANTINATO, R., FERNANDES, A. L. T., FERNANDES, D. R. **Irrigação na cultura do café**. Campinas: Arbore Agrícola e Comércio, 1996. 146 p.

- SILVA, A.L. **Estudo técnico e econômico do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.)**. 2002. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.
- SILVA, A.P. da; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.1775-1781, 1994.
- SIMPÓSIO SOBRE FATORES QUE AFETAM A PRODUTIVIDADE DO CAFEEIRO, 1., 1984, Poços de Caldas. **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade...** Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1986. 447 p.
- SOUZA, L.D. **Estimativas e utilização da capacidade de campo**. 1989. 126 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.
- STIKKER, A. Water today and tomorrow: prospects for overcoming scarcity. **Futures**, v.30, n. 1, p.43-62, 1998.
- TIMM, L.C. **Efeito do manejo da palha da cana-de-açúcar nas propriedades físico-hídricas de um solo**. 2002. 115 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Nobel, 1992. 374 p.
- TURATTI, A.L.; REICHARDT, K. Variabilidade do armazenamento de água em Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 13, n. 3, p. 253-257, 1991.
- VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 32, n. 3, 181-193, 1931.
- VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. **Soil Science**, New Brunswick, v. 68, p. 75-95, 1949.
- VILLA NOVA, N.A. **Dados agrometeorológicos do município de Piracicaba**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1989.
- VILLAGRA, M.M.; BACCHI, O.O.S.; TUON, R.L.; REICHARDT, K. Difficulties of estimating evaporation from the water balance equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 72, p. 317-325, 1995.
- VILLAGRA, M.M.; MICHIELS, P.; HARTMANN, R.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Field determined variation of the unsaturated hydraulic conductivity functions using simplified analysis of internal drainage experiments. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 51, n. 1, p. 113-122, 1994.

VILLAGRA, M.M.; MATSUMOTO, O.M.; BACCHI, O.O.S.; MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Tensiometria e variabilidade espacial em terra roxa estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, n. 3, p. 205-210, 1988.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.