

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

**Perdas de nitrogênio por lixiviação em café fertirrigado no oeste baiano**

**Rafael Pivotto Bortolotto**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor  
em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia**

**Piracicaba  
2010**

Rafael Pivotto Bortolotto  
Engenheiro Agrônomo

**Perdas de nitrogênio por lixiviação em café fertirrigado no oeste baiano**

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

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor  
em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia**

**Piracicaba  
2010**

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

Bortolotto, Rafael Pivotto

Perdas de nitrogênio por lixiviação em café fertirrigado no oeste baiano / Rafael Pivotto

Bortolotto. - - Piracicaba, 2010.

105 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.

1. Balanço hídrico 2. Café 3. Drenagem 4. Evapotranspiração 5. Fertilizantes nitrogenados  
6. Fertirrigação 7. Irrigação por pivô central 8. Lixiviação 9. Uréia I. Título

CDD 633.73  
B739p

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

Aos meus pais Edito Vicente Bortolotto e  
Lourdes Pivotto Bortolotto, que tanto me apoiaram e  
pelo exemplo de vida e o amor que tem por mim.

À minha noiva Velcir Schneider Zuse, pelo apoio nessa caminhada,  
superando a distância que nos separou durante a realização do Doutorado.

**DEDICO**



## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde, oportunidades concedidas e força para perseverar.

A minha família, que é a base da minha vida.

À Universidade de São Paulo (USP) e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pela oportunidade de realização do curso.

Ao professor Dr. Klaus Reichardt, pela orientação, disponibilidade e incentivo durante a realização do curso.

Aos professores Osny Oliveira Santos Bacchi, Paulo Augusto Manfron e Durval Dourado-Neto, pelo auxílio, disponibilidade e incentivo.

Aos queridos amigos e colegas, pelos momentos que passamos juntos, principalmente os de descontração e apoio.

Aos funcionários João Eduardo Pilotto, Robson Clayton Jacques Arthur, Luciane Aparecida Lopes Toledo, Hugo Henrique Batagello e Sheila Roberta Wenzel Perdigão, pelo apoio e colaboração na realização deste projeto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudo, fundamental para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), pela infraestrutura para realização desse trabalho.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pela liberação dos dados climáticos, fundamental para realização desse trabalho.

À Agropecuária Arakatu Ltda, por disponibilizar a área experimental e por todo auxílio em todas as fases de realização do experimento.

A todos que me apoiaram, incentivaram, acreditaram em meu potencial e lutaram comigo, nas decisões importantes a que fui submetido ao longo da vida.

**Muito obrigado!**



**“O Reino de Deus é como um homem que lança a semente à terra. Dorme, levanta-se, de noite e de dia, e a semente brota e cresce, sem ele o perceber. Pois a terra por si mesma produz, primeiro a planta, depois a espiga e, por último, o grão abundante na espiga. Quando o fruto amadurece, ele mete-lhe a foice, porque é chegada a colheita”.**

(Marcos 4, 26-29)



## SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
Referências.....	18
2 DRENAGEM PROFUNDA E BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO PARA UMA CULTURA DE CAFÉ FERTIRRIGADA POR PIVÔ CENTRAL NO OESTE BAIANO.....	21
Resumo.....	21
Abstract.....	21
2.1 Introdução.....	22
2.2 Material e Métodos.....	25
2.2.1 Localização e características da área experimental.....	25
2.2.2 Curva de retenção de água no solo.....	26
2.2.3 Balanço hídrico climatológico sequencial.....	29
2.2.4 Variação do armazenamento da água no solo.....	30
2.2.5 Precipitação e irrigação.....	31
2.2.6 Ascensão capilar, drenagem profunda e runoff.....	31
2.2.7 Evapotranspiração potencial pelo modelo de Thornthwaite.....	31
2.2.8 Evapotranspiração potencial pelo modelo de Penman-Monteith.....	32
2.3 Resultados e Discussão.....	33
2.4 Conclusões.....	48
Referências.....	48
3 ESTIMAÇÃO DA LIXIVIAÇÃO DE NITRATO ATRAVÉS DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO PARA UMA CULTURA DE CAFÉ FERTIRRIGADA.....	53
Resumo.....	53
Abstract.....	53
3.1 Introdução.....	54
3.2 Material e Métodos.....	56
3.2.1 Localização e características da área experimental.....	56
3.2.2 Balanço hídrico climatológico sequencial.....	59

3.2.3 Adubação com uréia.....	60
3.2.4 Lixiviação.....	61
3.3 Resultados e Discussão.....	64
3.4 Conclusões.....	70
Referências.....	70
4 LIXIVIAÇÃO DE NITROGÊNIO ( <sup>15</sup> N) DO FERTILIZANTE EM UMA CULTURA DE CAFÉ FERTIRRIGADA NA BAHIA.....	75
Resumo.....	75
Abstract.....	75
4.1 Introdução.....	76
4.2 Material e Métodos.....	79
4.2.1 Localização e características da área experimental.....	79
4.2.2 Balanço hídrico climatológico sequencial.....	81
4.2.3 Adubação com uréia enriquecida <sup>15</sup> N.....	83
4.2.4 Lixiviação.....	84
4.2.5 Análise estatística.....	88
4.3 Resultados e Discussão.....	88
4.4 Conclusões.....	99
Referências.....	99
5 CONCLUSÕES GERAIS.....	105

## RESUMO

### Perdas de nitrogênio por lixiviação em café fertirrigado no oeste baiano

A cafeicultura possui grande destaque no cenário agrícola nacional e seu cultivo vem avançando para regiões não tradicionais, como o oeste do Estado da Bahia. Esta região apresenta relevo plano, facilmente mecanizável, proporcionando utilização de alta tecnologia, como a fertirrigação via pivô-central. Os cafeeiros desta região apresentam alta produtividade, alcançando a média de 55 sacas  $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ . O cafeeiro 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. O balanço hídrico - BH é um dos métodos utilizados para estimar essa demanda hídrica para os diferentes estádios de desenvolvimento das culturas. O BH consiste no somatório das quantidades de água que entram e saem de um elemento de volume de solo e, em dado intervalo de tempo, é a quantidade líquida de água que nele permanece. Através do componente drenagem profunda do BH é possível fazer a estimativa da lixiviação de nitrato -  $\text{NO}_3^-$ . Na região de Barreiras-BA não tem sido realizado, com frequência, pesquisa básica em relação ao cultivo do cafeeiro, de tal forma que pouco se sabe em relação à eficiência do uso de dose elevada de nitrogênio - N, que oscila na faixa de 600-800  $\text{kg ha}^{-1}$ , bem como sobre a sua possível perda por lixiviação. A uréia é o adubo mais utilizado em fertirrigação devido à sua alta solubilidade, o que facilita muito o preparo das soluções nutritivas, porém, possui o inconveniente de apresentar perdas por lixiviação em situações de altas doses aplicadas e altos volumes de irrigação. O parcelamento e a época de aplicação do adubo nitrogenado constituem-se em alternativas para aumentar a eficiência dos adubos e da adubação nitrogenada pelas culturas e mitigar as perdas. As quantidades de  $\text{NO}_3^-$  no perfil, susceptíveis à perda, são muito variáveis, dependendo da quantidade de N adicionado, do tipo de adubo, da taxa de mineralização do N nativo, da remoção pelas colheitas, do tipo de cultura e do volume de água drenada, fatores estes afetados significativamente pelas propriedades do solo (capacidade de troca iônica, pH, textura, estrutura, matéria orgânica, relação C:N, etc.) e pelo clima (principalmente precipitação). O uso de isótopos, na forma de fertilizante marcado com  $^{15}\text{N}$ , é uma ferramenta apropriada para avaliar o destino do fertilizante no sistema solo-cafeeiro-atmosfera, podendo-se inferir sobre a lixiviação. Assim sendo, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a drenagem profunda, a estimativa da lixiviação de  $\text{NO}_3^-$  e de N ( $^{15}\text{N}$ ) do fertilizante através do BH sequencial com a utilização dos modelos de evapotranspiração de Thornthwaite - TH e Penman-Monteith - PM em uma cultura de café fertirrigada por pivô central no oeste baiano. Através dos modelos de evapotranspiração de TH e PM foi possível estimar a drenagem profunda, a lixiviação de  $\text{NO}_3^-$  e de  $^{15}\text{N}$ . O modelo de evapotranspiração de TH é menos preciso, porém onde apenas há disponibilidade de dados de temperatura, pode ser usado na elaboração do BH.

Palavras-chave: Penman-Monteith; Thornthwaite; Evapotranspiração; Drenagem profunda; Uréia



## ABSTRACT

### Nitrogen leaching losses in a coffee crop of west Bahia

The coffee crop is of great importance in the Brazilian scenario and its cultivation is expanding to non traditional growing areas as the west of the state Bahia. This region presents a very flat relief of easy mechanization, allowing for the implementation of high agricultural technology as it is the case of fertigation via central pivot irrigation. Crops of this region reach high productivities, with an average of 55 bags per hectare and per year. The coffee plant requires easily available water in the soil in its vegetative phase to promote the growth of lateral branches, and in its reproductive phase (flowering, fruit filling and maturation) to develop and produce satisfactorily. The water balance - WB is one of the methods used to estimate this water demand during the different growth stages of agricultural crops. It consists of the accounting of the water fluxes into and out of an elemental soil volume of a chosen time interval, resulting the net amount of water that is stored in the soil. Through the deep drainage component of the WB it is possible to estimate the nitrate leaching -  $\text{NO}_3^-$ . In the region of Barreiras-BA very little research has been carried out in relation to the cultivation of coffee, so that not much is known in relation to the efficiency of the use of high N application rates, as those there applied in the range of 600-800 kg  $\text{ha}^{-1}$ , as well as about the possible leaching losses. Urea is mostly used a N source during fertigation due to its high solubility in water, but that has the inconvenience of allowing leaching losses in case of high N and water applications. Splitting of doses and application times are alternatives to increase absorption efficiencies and minimize losses to the environment. The  $\text{NO}_3^-$  quantities in the soil profile which are susceptible to leaching are very variable, depend on N application rates, type of fertilizer, mineralization rate in the soil, export by harvests, crop type and drainage volume. These factors are significantly affected by soil properties (cation exchange capacity, pH, texture, structure, organic matter, C:N ratio, etc.) and by climate (mainly rainfall). The use of isotopes in the form of  $^{15}\text{N}$  labeled fertilizer is an appropriate tool to evaluate the fate of fertilizer N in the soil-coffee plant-atmosphere system, including the estimation of N leaching. Therefore, this study was developed with the objective of evaluating the deep drainage and the leaching of  $\text{NO}_3^-$  and fertilizer ( $^{15}\text{N}$ ) through the sequential water balance, using the evapotranspiration models of Thornthwaite - TH and Penman-Monteith - PM, for a fertigated coffee crop under central pivot irrigation, in west Bahia. It was possible to estimate the internal drainage and the leaching of  $\text{NO}_3^-$  and  $^{15}\text{N}$ . The TH model is less precise; however for regions where only air temperature data are available, it can be used with success.

Keywords: Penman-Monteith; Thornthwaite; Evapotranspiration; Deep drainage; Ureia



## 1 INTRODUÇÃO

O café tem grande destaque no cenário agrícola nacional e, devido ao alto custo de produção nas regiões montanhosas, tradicionalmente utilizadas para seu cultivo, este avançou para regiões não tradicionais, como o oeste baiano. Esta região apresenta relevo plano, facilmente mecanizável, condições edafoclimáticas distintas das regiões tradicionais, proporcionando utilização de alta tecnologia, como a fertirrigação via pivô-central. Os cafeeiros desta região apresentam elevado índice de produtividade média de 55 sacas  $ha^{-1} ano^{-1}$ .

O interesse pela irrigação na cultura pelos cafeicultores tem aumentado nos últimos anos, principalmente por aqueles mais tecnificados, pois, para produzir com qualidade, é importante o manejo adequado dos tratos culturais e, sem sombra de dúvida, a condição ideal do teor de água no solo é uma das partes mais importantes para o sucesso dessa atividade (KARASAWA; FARIA; GUIMARÃES, 2002). 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 (PEREIRA; CAMARGO; CAMARGO, 2008).

Para que a irrigação seja uma prática viável torna-se necessário adotar práticas que contribuam para o aumento da produtividade e do lucro. Uma destas práticas é a fertirrigação, que tem sido utilizada com frequência pelos cafeicultores que utilizam irrigação, em especial por aqueles que dispõem de sistemas de irrigação por pivô central e gotejamento (FERNANDES et al., 2007). Uma vez que o cultivo do café é submetido à irrigação, a fertirrigação torna-se altamente interessante, já que a irrigação é de alta frequência e o parcelamento da adubação fica oportuno. A necessidade de estudos sobre o número de parcelamentos é uma realidade, principalmente nas novas regiões de produção onde ocorre predomínio de solos arenosos. A maioria dos estudos visa à produtividade em função das lâminas ou parcelamentos de adubação, (KARASAWA; FARIA; GUIMARÃES, 2002). O parcelamento e a época de aplicação do adubo nitrogenado constituem-se em alternativas para aumentar a eficiência dos adubos e da adubação nitrogenada pelas culturas e mitigar as perdas. Isso é respaldado pelo maior aproveitamento do nitrogênio - N, resultante da sincronização entre as aplicações e o período de alta demanda do nutriente pelas culturas (AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002; SILVA et al., 2005).

Para se determinar a quantidade e a disponibilidade de água para as plantas é necessário um conhecimento da dinâmica da água no solo. O balanço hídrico - BH é um dos métodos utilizados para estimar essa demanda hídrica nos diferentes estádios de desenvolvimento das culturas. Através da equação geral de conservação de massas, é possível quantificar a água que entra e sai de um volume de solo durante um determinado período de tempo. O BH consiste no somatório das quantidades de água que entram e saem de um elemento de volume de solo e, em dado intervalo de tempo, é a quantidade líquida de água que nele permanece (REICHARDT; TIMM, 2004). Através do componente drenagem profunda do BH, é possível fazer a estimativa da lixiviação de nutrientes, dentre eles, o N.

O N é o nutriente requerido em maior quantidade pelo cafeeiro. Ele participa da síntese de proteínas estruturais e enzimáticas, as quais são responsáveis pela síntese de outras proteínas e dos intermediários metabólicos e componentes da estrutura celular, como carboidratos, lipídios e pigmentos. Estes compostos, segundo Lemaire et al. (1992), Lawlor (1995) e Malavolta (2006), constituem a estrutura da planta e são requeridos para o crescimento celular e dos órgãos, como os frutos. Segundo o último autor, em cafeeiros, 20% do N é absorvido na fase de repouso, 34% na floração, 26% na formação do fruto e 20% na maturação.

Na região de Barreiras-BA não tem sido realizada, com frequência, pesquisa básica em relação ao cultivo do cafeeiro. Sendo assim, pouco se sabe em relação à eficiência da prática de adubação pelo uso de dose elevada de N, que atinge a faixa de 600-800 kg ha<sup>-1</sup>, bem como sobre a sua possível perda por lixiviação. No estado de São Paulo, as doses de N aplicadas via fertilizante baseiam-se no rendimento esperado da cultura e no teor foliar do nutriente para cafeeiros em produção, sendo recomendadas aplicações menores parceladas, até 450 kg ha<sup>-1</sup> de N por ano agrícola, fornecidos no período chuvoso (RAIJ et al., 1996).

A uréia é o adubo mais utilizado em fertirrigação devido à sua alta solubilidade, o que facilita muito o preparo das soluções de fertilizante. Porém, possui o inconveniente de apresentar perdas por lixiviação em situação de altas doses aplicadas e alto volume de irrigação. O N aplicado ao solo na forma de fertilizantes minerais segue diferentes caminhos: uma parte é absorvida pelas plantas; outra, perdida no sistema solo-planta por processos de lixiviação, volatilização, erosão e desnitrificação (LARA CABEZAS et al., 2000). O N de qualquer fonte aplicado ao solo converte-se rapidamente em nitrato - NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, que é sujeito à lixiviação. Nesses

casos de nutrientes muito móveis, a fertirrigação possibilita um maior parcelamento da aplicação do fertilizante, reduzindo essas perdas.

As quantidades de  $\text{NO}_3^-$  no perfil, susceptíveis à perda, são muito variáveis, dependendo da quantidade de N adicionado, do tipo de adubo, da taxa de mineralização do N nativo, da remoção pelas colheitas, do tipo de cultura e do volume de água drenada, fatores estes afetados significativamente pelas propriedades do solo (capacidade de troca iônica, pH, textura, estrutura, matéria orgânica, relação C:N, etc.) e pelo clima (precipitação, principalmente) (REICHARDT; TIMM, 2004). O tipo de solo pode ter grande influência na magnitude do processo de lixiviação. Solos argilosos possuem maior capacidade de retenção de água e de N, principalmente na forma de  $\text{NH}_4^+$ , em relação aos solos arenosos. A maior capacidade de armazenamento de água dos solos argilosos reduz a percolação da água pelo perfil, e, com isso, o arraste de  $\text{NO}_3^-$  para camadas inferiores do solo (BERTOLINI, 2000). A matéria orgânica também influi na lixiviação de  $\text{NO}_3^-$ , devido à maior disponibilidade de N decorrente de sua decomposição. A forma de aplicação do adubo pode influenciar as perdas de N por lixiviação. A lixiviação de N pode ser maior quando se incorpora o adubo nitrogenado, devido à redução nas perdas de N por volatilização, resultando em maiores concentrações desse nutriente na solução do solo (BOUWEESTER et al., 1985). A cobertura vegetal sobre a superfície do solo também pode favorecer o movimento descendente de  $\text{NO}_3^-$  via macroporos, devido a menor evaporação de água (MUZILLI, 1983). A intensidade da lixiviação é influenciada pelos fatores morfoclimáticos e pelo sistema de manejo adotado. Os fatores que influenciam diretamente a massa total e a relação dos íons percolados no solo são: textura, capacidade de troca catiônica - CTC e aniônica - CTA, dose do fertilizante, solubilidade dos sais, sua afinidade pelos sítios de adsorção do solo e presença de íons acompanhantes, composição dos resíduos culturais incorporados ao solo, intensidade de aproveitamento dos nutrientes da solução do solo pelas plantas e microrganismos e, por último, o fator de influência direta, o volume de chuvas e regime hídrico do solo, o qual influenciará o volume da solução drenada no solo (NG KEE KWONG; DEVILLE, 1984).

Segundo Di e Cameron (2002), a lixiviação de  $\text{NO}_3^-$  em sistemas intensivos de produção agrícola como, por exemplo, em pastagens destinadas a gado de leite, é um dos grandes problemas ambientais em muitos países de clima temperado, pois a contaminação das fontes de água pode, a longo prazo, comprometer a sustentabilidade da produção agrícola de uma região (CAMERON; DI; McLAREN, 1997). A lixiviação de  $\text{NO}_3^-$  é um fenômeno físico, favorecido

pela baixa energia envolvida na sua adsorção às partículas do solo e também pela sua alta solubilidade em água (CERETTA, 1997). Este íon pode ser carregado pela água de percolação, resultando em perdas deste nutriente e contaminação do lençol freático e de cursos de água (DYNIA; CAMARGO, 1999).

O uso de isótopos, na forma de fertilizante marcado com  $^{15}\text{N}$  é uma ferramenta apropriada para avaliar o destino do fertilizante no sistema solo-planta-atmosfera e, portanto, estimar a eficiência da cultura em aproveitá-lo, bem como inferir sobre os vários processos de perda, entre eles, a lixiviação (REICHARDT; TIMM, 2004). Ela consiste em fornecer à planta um composto químico no qual a razão isotópica ( $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$ ) é diferente da natural e avaliar a distribuição da composição isotópica no sistema em estudo. O uso de uma fonte marcada com  $^{15}\text{N}$  constitui-se no método que permite quantificar com maior precisão o destino do fertilizante, quando comparado ao método da diferença. Além disso, possibilita distinguir a fonte originária, seja solo ou fertilizante (LARA CABEZAS et al., 2000; SILVA et al., 2006). A relativa escassez de trabalhos utilizando a técnica do traçador isotópico  $^{15}\text{N}$  em culturas perenes no campo talvez se explique pelas dificuldades encontradas quando se trabalha com culturas de grande porte, pois é necessária uma grande quantidade de fertilizante marcado, o que eleva os custos de experimentação.

Assim sendo, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a drenagem profunda, a estimativa da lixiviação de nitrato -  $\text{NO}_3^-$  e de nitrogênio - N ( $^{15}\text{N}$ ) do fertilizante através do balanço hídrico - BH sequencial com a utilização dos modelos de Evapotranspiração de Thornthwaite e Penman-Monteith em uma cultura de café fertirrigada por pivô central no oeste baiano. Este estudo é apresentado a seguir, na forma de três capítulos independentes, porém, interrelacionados.

## Referências

- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 241-248, 2002.
- BERTOLINI, C.G. **Eficiência do método de adubação nitrogenada em présemeadura do milho implantado em semeadura direta após aveia-preta**. 2000. 48 p Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- BOUWEESTER, R.J.B.; VLEK, P.L.G.; STUMPE, J.M. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from an urea-fertilized soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 2, p. 376-381, 1985.

CAMERON, K.C.; DI, H.J.; McLAREN, R.G. Is soil an appropriate dumping ground for our wastes? **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 35, n. 5 p. 995-1035, 1997.

CERETTA, C.A. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia/milho, no sistema de plantio direto. In: FRIES, M.R.; DALMOLIN, R.S.D. **Atualização em recomendação de adubação e calagem: ênfase em plantio direto**. Santa Maria : Universidade Federal de Santa Maria, Pallotti, 1997. p. 112-124.

DI, H.J.; CAMERON, K.C. Nitrate leaching and pasture production from different nitrogen sources on a shallow stoney soil under flood-irrigated dairy pasture. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 40, n. 2, p. 317-334, 2002.

DYNIA, J.F.; CAMARGO, O.A. Retenção de nitrato num solo de carga variável, influenciada por adubação fosfatada e calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 141-144, 1999.

FERNANDES, A.L.T. SANTINATO, R.; DRUMOND, L.C.D.; OLIVEIRA, C.D. Avaliação do uso de fertilizantes organominerais e químicos na fertirrigação do cafeeiro irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 2, p. 159-166, 2007.

KARASAWA, S.; FARIA, M.A.; GUIMARÃES, R.J. Influência da irrigação e do parcelamento de fertirrigação sobre a produtividade, rendimento e qualidade do café (*Coffea arábica* L. cv. Topázio MG-1190). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, edição especial, p. 1427-1438, 2002.

LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; KONDÖRFER, G.H.; PEREIRA, S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 363-376, 2000.

LAWLOR, D.W. Photosynthesis, productivity and environment. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 46, número especial, p. 1449-1461, 1995.

LEMAIRE, G.; KHAITY, M; ONILLON, B.; ALLIRAND, J.M.; CHARTIER, M.; GOSSE, G. Dynamics of accumulation and partitioning of N in leaves, stems and roots of Lucerne (*Medicago sativa*) in a dense canopy. **Annals of Botany**, Oxford, v. 70, n. 5 p. 429-435, 1992.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MUZZILI, O. A influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 1, p. 95-102, 1983.

NG KEE KWONG, K.E.; DEVILLE, J. Nitrogen leaching from soils cropped with sugarcane under the humid tropical climate of Mauritius, Indic Ocean. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 13, n. 3, p. 471-474, 1984.

PEREIRA, A.R.; CAMARGO, A.D.; CAMARGO, M.B.P. **Agrometeorologia de cafezais no Brasil**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 127 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações da adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1996. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100)

REICHARDT, K; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

SILVA, E.C.; BUZETTI, S.; GUIMARÃES, G.L.; LAZARINI, E.; SÁ, M.E. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 353-362, 2005

SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; VELOSO, M.E.; TRIVELIN, P.C.O. Aproveitamento do nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) da crotalária e do milheto pelo milho sob plantio direto em latossolo vermelho de Cerrado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3 p. 739-746, 2006.

## 2 DRENAGEM PROFUNDA E BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO PARA UMA CULTURA DE CAFÉ FERTIRRIGADA POR PIVÔ CENTRAL NO OESTE BAIANO

### Resumo

A cultura do café abrange várias regiões do Brasil com diferentes características de clima, solo e nível tecnológico aplicado, dentre elas, o uso da fertirrigação através do uso do pivô-central, fatores estes que se relacionam diretamente com a produtividade do cafeeiro. O balanço hídrico - BH é ferramenta essencial no manejo desta cultura, e seu estabelecimento, quando feito de maneira direta com medidas de todos os componentes no campo, é trabalhoso e de alto custo. Já os BH climatológicos, por envolverem praticamente apenas medidas de parâmetros climáticos, apresentam-se como uma opção muito vantajosa. Devido às limitações, sua viabilidade é aqui testada para o caso de uma cultura de café conduzida em alto padrão tecnológico de fertirrigação por pivô central, estabelecida no oeste baiano, sob uma planície de solo arenoso. O objetivo do trabalho foi comparar elementos do BH utilizando-se dados medidos de chuva e de irrigação e fazendo estimativa da evapotranspiração máxima -  $ET_m$  de uma cultura de café pelos modelos de Thornthwaite - TH e Penman-Monteith - PM para o cálculo da drenagem profunda -  $Q_i$ . O caso especial do oeste baiano é uma nova fronteira para a cultura do café, onde predominam solos arenosos de topografia extremamente plana. O estudo visa contribuir para o conhecimento do regime hídrico de culturas de café manejadas por irrigação com pivô central, utilizando-se para isso três cenários distintos de regime hídrico durante o período de um ano do ciclo da cultura de café: i) apenas precipitação - P, ii) precipitação + irrigação - P + I no ano inteiro e iii) precipitação + irrigação apenas na estação seca - P +  $I_{es}$ . Para o estudo, foram utilizadas medidas das propriedades físicas de retenção de água no solo e dados climáticos obtidos em estações climatológicas locais e da redondeza. A precipitação concentrada dos meses de novembro a abril na região do oeste baiano afeta a  $Q_i$ . O emprego do BH sequencial para o acompanhamento das relações hídricas do café cultivado por pivô central no oeste baiano foi satisfatório. A  $ET_m$  anual estimada por TH superestimou àquela estimada por PM. Esse mesmo comportamento foi verificado com a evapotranspiração real -  $ET_r$  calculada através do BH. Tais diferenças nos métodos de estimativas de  $ET_m$  afetaram as estimativas de  $Q_i$  nos três cenários estudados [cenário i ( $Q_i$  TH = 667,8 e  $Q_i$  PM = 811,5 mm), cenário ii ( $Q_i$  TH = 891,7 e  $Q_i$  PM = 1010,5 mm) e cenário iii ( $Q_i$  TH = 763,4 e  $Q_i$  PM = 873,1 mm)], sendo que o corte da irrigação no período chuvoso (cenário iii) reduziu o  $Q_i$  em 14,0% em média e não afetou o aparecimento de períodos de défices.

Palavras-chave: Thornthwaite; Penman-Monteith; Evapotranspiração; Drenagem profunda; Precipitação

### Abstract

The coffee crop covers several regions of Brazil with different climatic, soil and management characteristics. Among them, a good proportion of the use fertigation under central pivot management with high fertilizer application rates and high productivities. The water

balance - WB is one of the essential tools to manage these crops. When measured directly in the Field it is laborious and costly. The climatologic WBs use essentially weather parameters which are commonly recorded by automatic weather station, represent an advantageous alternative. Due to their limitations the viability of them is here tested for the case of a coffee crop, grown under high technological system, on a flat sandy soil area of savanna (cerrado) in west Bahia, Brazil. The objective was to compare WB components using measured rainfall and irrigation data and estimating: i) the maximum coffee evapotranspiration -  $ET_m$  using the methods of Thornthwaite - TH and Penman-Monteith PM; and ii) the deep drainage -  $Q_i$ . The special case of west Bahia is a new frontier for the coffee crop and, therefore, this study has the aim of contributing to the knowledge of the hydric regime of this region where coffee is fertigated by central pivot technology, using high fertilizer N rates. It focuses three scenarios during the one year coffee production cycle: i) considering only the rainfall - P; ii) rainfall + irrigation - P + I during the whole year and iii) rainfall + irrigation only in the dry season - P +  $I_{es}$ . For the application of the WB program, the available water capacity was determined and the meteorological data were taken from nearest weather station recordings. The rainfall concentrated in the period November to April affected the values of  $Q_i$ . The use of the sequential WB program to follow the soil water relations in the coffee crop was satisfactory. The  $ET_m$  estimated using TH overestimated that of PM. The same behavior was verified in relation to the actual evapotranspiration -  $ET_r$  calculated by the WB. These differences affected the  $Q_i$  estimatives in the three scenarios [scenario i ( $Q_i$  TH = 667.8 and  $Q_i$  PM = 811.5 mm), scenario ii ( $Q_i$  TH = 891.7 and  $Q_i$  PM = 1010.5 mm), and scenario iii ( $Q_i$  TH = 763.4 and  $Q_i$  PM = 873.1 mm)]. The suppression of irrigation during the rainy period (scenario iii) reduced  $Q_i$  by 14.0% e and did not induce water deficit periods.

Keywords: Thornthwaite; Penman-Monteith; Evapotranspiration; Deep drainage; Rainfall

## 2.1 Introdução

A produção de café de qualidade no Brasil atualmente alcançou regiões anteriormente não consideradas aptas pelo déficit hídrico apontado por balanços hídricos climatológicos. A irrigação como suplementação da chuva em períodos de déficit hídrico é uma tecnologia que proporciona menos riscos e se mostra eficiente como veículo de aplicação de insumos, além de proporcionar maior produtividade e melhor qualidade do produto final. Estes fatos implicam em investimentos de pesquisa na cafeicultura, 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.

Autores citam que a irrigação do cafeeiro tem recebido grande destaque nos últimos anos, cujo interesse se deve a fatores como: expansão da cafeicultura para novas fronteiras; evolução da técnica da irrigação; diminuição dos custos dos sistemas de irrigação e a mentalidade do cafeicultor no sistema de produção, priorizando a eficiência e a qualidade da produção (SILVA; FARIA; REIS, 2003; FARIA; SIQUEIRA, 2005; GOMES; LIMA; CUSTÓDIO, 2007; LIMA;

CUSTÓDIO; GOMES, 2008). O efeito da irrigação no crescimento vegetativo e na produção do cafeeiro e a melhoria na qualidade da sua produção estão bem documentados na literatura podendo-se, ainda, utilizar esta técnica como condicionante do florescimento e, portanto, da época de colheita (CAMARGO; PEREIRA, 1994).

Assim, para determinar a quantidade e a disponibilidade de água para uma determinada cultura, é preciso conhecimento da dinâmica da água no solo. O balanço hídrico - BH é um dos métodos indiretos utilizados para estimar a demanda hídrica para os estádios de desenvolvimento das culturas. Através da equação geral de conservação de massa, é possível quantificar o volume de água que entra e sai em um determinado volume de solo durante um determinado período de tempo. Vários 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); Timm et al. (2002); Silva et al. (2006) e Bruno et al. (2007). Esta equação mostra que a soma algébrica, durante dado período, de todas as entradas (consideradas positivas) e saídas (negativas) de água em um volume de controle de solo, submetido às peculiaridades dos fenômenos meteorológicos, dos atributos do solo e das características genéticas da espécie ou mesmo da variedade vegetal, resulta no saldo ou balanço de água no solo no período. Considera-se esse volume, no campo, delimitado por duas superfícies paralelas: a interface solo-atmosfera (limite superior do volume ou simplesmente superfície do solo) e uma superfície horizontal localizada à profundidade do sistema radicular do cultivo (limite inferior do volume) (BRITO; LIBARDI; GHIBERTO, 2009).

BH são importantes para seguir a dinâmica da água em ecossistemas agrícolas e naturais. Eles indicam no espaço e no tempo, as condições sob as quais plantas crescem e se desenvolvem, e são úteis para a interação do comportamento da planta durante períodos que diferem das condições climáticas locais, tais como períodos de excesso ou déficit de água. Estes aspectos são importantes para o manejo da cultura e do entendimento do comportamento dos ecossistemas naturais. Solos com menor capacidade de armazenamento são susceptíveis a causar problemas de abastecimento de água e também permitir maiores valores de drenagem profunda (SILVA et al., 2006). Os componentes do BH, que aparentemente podem ser avaliados mais facilmente, são chuva e irrigação (TIMM et al., 2002). Na escala local, Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002) citam que o BH permite estabelecer a variação de armazenamento de água no solo e, com isso, a quantidade disponível para a cultura, em um intervalo de tempo, permitindo

assim conhecer déficits ou excessos hídricos. Esta contabilização pode ser feita tanto através de BH agroclimatológicos, como é o caso do BH sequencial, ou através do BH medido diretamente no campo. Esse último envolve medidas no interior e na superfície do solo, sendo trabalhoso e dispendioso, enquanto o climatológico baseia-se, principalmente, na medida de elementos de clima e da capacidade de água disponível do solo.

O BH climatológico sequencial é mais frequentemente apresentado na escala mensal e para um ano genérico médio (normal), ou seja, BH Normal (Cíclico). Ele também pode ser utilizado para o acompanhamento do armazenamento da água do solo em tempo real, isto é, no momento ou até mesmo num determinado período. Esse tipo de BH pode ser feito em várias escalas de tempo: diária, quinquidial (5 dias), semanal (7 dias), decendial (10 dias), ou mensal (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

Em relação à cultura de café, Carvajal (1972) constata que, ao se avaliar o nível ótimo de precipitação para o cafeeiro, devem-se considerar algumas variáveis importantes: precipitação anual média, distribuição da precipitação durante o ano (número de meses secos), desvio da precipitação anual em relação à 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).

Neste contexto, o objetivo do trabalho foi comparar elementos do balanço hídrico - BH utilizando-se dados medidos de chuva e de irrigação e fazendo-se estimativa da evapotranspiração máxima -  $ET_m$  de uma cultura de café pelos modelos de Thornthwaite - TH e Penman-Monteith - PM para o cálculo da drenagem profunda -  $Q_i$ . O caso especial da fazenda da região do oeste baiano é uma nova fronteira para a cultura do café, onde predominam solos arenosos de topografia extremamente plana. O estudo visa contribuir para o conhecimento do regime hídrico para cultura de café manejada por irrigação com pivô central, utilizando-se para isso três cenários distintos de regime hídrico durante o período de um ano do ciclo da cultura: i) apenas precipitação - P; ii) precipitação + irrigação no ano inteiro - P + I; e iii) precipitação + irrigação apenas na estação seca - P +  $I_{es}$ .

## 2.2 Material e Métodos

### 2.2.1 Localização e características da área experimental

O estudo foi desenvolvido no campo durante um ano, iniciando-se em 1º de agosto de 2008 até 31 de julho de 2009, com foco na Fazenda Morena, de propriedade da Agropecuária Arakatu, no Município de Barreiras - BA. As coordenadas geográficas do local são: 11° 46' 00" de Latitude Sul e 45° 43' 32" de Longitude Oeste, com 740 m de altitude. O solo é classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Alumínico típico (EMBRAPA, 2006), com baixa fertilidade natural, com 75,2% de areia, 2,8% de silte e 22% de argila. O clima do local, segundo a classificação de Köppen (1931), pertence ao tipo Aw – tropical subúmido com chuvas de verão, período seco bem definido no inverno. Nesta região, a precipitação varia de 800 a 1800 mm por ano, com sua concentração nos meses de outubro a abril (SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA - SEI, 1998). Os dados climáticos da região no período de estudo podem ser observados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Média mensal e dias após início do experimento - DAI, de agosto de 2008 a julho de 2009 de umidade relativa média do ar - UR, radiação solar líquida - Rn, velocidade do vento - V, temperatura média do ar - T e precipitação - P

Mês/Ano	DAI	UR	Rn	V	T	P
		%	MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>	m s <sup>-1</sup>	°C	mm
AGO/08	15	42,4	10,2	1,6	24,0	0,0
SET/08	46	49,5	10,4	1,9	26,4	31,5
OUT/08	76	36,1	11,8	2,2	28,5	0,0
NOV/08	107	70,8	7,8	1,5	26,8	314,5
DEZ/08	137	76,3	9,7	1,4	25,3	195,0
JAN/09	168	76,6	10,7	1,3	25,4	230,0
FEV/09	199	77,5	10,2	1,1	25,5	185,5
MAR/09	227	76,3	9,7	1,0	25,7	350,5
ABR/09	258	83,5	7,9	0,9	24,7	108,5
MAI/09	288	78,1	8,0	1,0	23,7	67,0
JUN/09	319	76,2	8,4	0,9	22,6	52,5
JUL/09	349	69,9	9,3	1,1	22,2	0,0
Anual	-	67,8	9,5	1,3	25,1	1535,0

O cafezal da Fazenda Morena constitui-se de plantas da espécie *Coffea arabica* L., variedade Catuaí Vermelho, plantadas em 15 de janeiro de 2001, com espaçamento 3,8 m nas

entrelinhas e 0,5 m entre plantas, em arranjo circular disposto sob sistema de pivô central, com área útil de 80 ha, adaptado para irrigação e fertirrigação (Figura 2.1A). Esta fazenda realiza adubação de acordo com a estimativa de produção, aplicando-se aproximadamente  $600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de nitrogênio - N via fertirrigação com uréia. A média da propriedade é de  $56 \text{ sacas ha}^{-1} \text{ ano}$ , com a colheita sendo realizada de maio a junho.

O manejo normal da fertirrigação é feito com auxílio de emissores do tipo LEPA (low energy precision application – aplicação precisa de baixo consumo de energia/pressão) (Figura 2.1B) que distribuem a água de forma localizada sobre as linhas circulares de café, de tal forma que as entrelinhas praticamente não recebem água. A operação do pivô central é praticamente contínua durante o ano todo (com pequenas variações em épocas muito chuvosas e interrupção na colheita), fornecendo de  $2 \text{ a } 4 \text{ mm dia}^{-1}$  de água com adição de produtos de fertirrigação em dias alternados.



Figura 2.1 – Geral da área do cafezal com pivô-central (A) e emissores do tipo LEPA (B)

### 2.2.2 Curva de retenção de água no solo

As amostras de solo foram coletadas em um dos pivôs da Fazenda Morena, considerado como objeto de estudo, para estimativa da capacidade de água disponível – CAD, necessário para a utilização do programa de balanço hídrico - BH sequencial, e outras propriedades físicas para caracterização do solo. Isto foi feito através da abertura de uma trincheira de 1 m de profundidade com coleta de solo a cada 0,2 m, totalizando cinco amostras. Considerou-se que as necessidades

hídricas da cultura seriam supridas por esta camada de solo de 1 m, onde se assumiu que ela continha pelo menos 95% do sistema radicular, sendo que não foi objetivo do trabalho determinar-se a profundidade específica das raízes, pois de acordo com Malavolta (1986), 80 a 90% das raízes absorventes estão nos primeiros 20 cm do solo, localizadas até 90 cm de distância do caule, dados esses similares aos encontrados experimentalmente por Barreto et al. (2006). Rena e Maestri (1986), estudando o comportamento do sistema radicular do cafeeiro em diferentes densidades, constataram que, nas densidades mais altas, as raízes axiais penetram mais profundamente no solo. Essa profundidade também foi escolhida em razão desse trabalho estar ligado a outro experimento onde o objetivo foi determinar-se a lixiviação de N abaixo de 1 m de profundidade. No Laboratório de Física do Solo do CENA/USP as amostras foram destorroadas, peneiradas por malha de 2 mm e secas ao ar (EMBRAPA, 1997). Antes de peneirar o solo, foram separados torrões de estrutura não deformada para a medida da densidade do solo.

A curva de retenção foi determinada em laboratório em placas de pressão de Richards para as profundidades (0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8 e 0,8-1,0 m), em nove pontos de pressão ou potencial mátrico -  $h$  (100, 200, 330, 500, 1000, 3000, 5000, 10000 e 15000 cm de H<sub>2</sub>O). As amostras peneiradas foram acondicionadas em anéis de 1 cm de altura por 5 cm de diâmetro e submetidas a uma determinada pressão. Procurou-se reproduzir a densidade do solo em condições de campo por meio de compactação, o que foi bem satisfatório em se tratando de solo bem arenoso, cuja estrutura é pouco agregada. Essas amostras foram saturadas com água destilada e, posteriormente, submetidas às pressões acima citadas. Para as amostras sob pressão 100, 200, 330, 500 cm de H<sub>2</sub>O foram utilizadas placas de pressão de Richards de 1 atm, por 14 dias e para as demais pressões, placas de 15 atm, por 21 dias, para atingirem o equilíbrio. Com os resultados foi determinada a umidade gravimétrica do solo -  $\mu$  (g g<sup>-1</sup>) a cada potencial.

A densidade do solo foi determinada através do método do torrão parafinado (BLAKE; HARTGE, 1986, adaptando por REICHARDT; TIMM, 2004), separando-se torrões entre 50 e 100 cm<sup>3</sup>. Para impermeabilização dos torrões foi utilizada parafina aquecida entre 60 e 70° C. Com a diferença entre os pesos no ar e na água (descontando o peso e o volume da parafina) obteve-se o volume total -  $V_t$  do torrão e sua densidade -  $D_s$  foi obtida pela relação entre sua massa -  $M_s$  e o volume total -  $V_t$  pela eq. (2.1):

$$D_s = \frac{M_s}{V_t} \quad (2.1)$$

A umidade volumétrica -  $\theta$  para cada amostra de solo utilizada na elaboração da curva de retenção foi obtida pelas eq. (2.2) e (2.3):

$$\theta = \mu \cdot D_s \quad (2.2)$$

$$\mu = \frac{M_u - M_s}{M_s} \quad (2.3)$$

onde  $M_u$  = massa úmida (g)

$M_s$  = massa seca (g)

O valor saturado da umidade volumétrica -  $\theta_s$  [eq. (2.5)] foi estimado através da densidade de partículas -  $D_p$ , determinada em álcool como sugere EMBRAPA (1997) pela eq. (2.4):

$$D_p = \frac{M_a}{V_a} \quad (2.4)$$

onde  $M_a$  = massa da amostra (g)

$V_a$  = volume de álcool gasto (mL)

Sendo:

$$\theta_s = 1 - \left( \frac{D_s}{D_p} \right) \quad (2.5)$$

A CAD foi determinada pela diferença do armazenamento de água do solo na capacidade de campo - CC e o ponto de murcha permanente - PMP. A CC foi considerada para o solo h 330 cm de H<sub>2</sub>O e o ponto de murcha permanente o solo em 15000 cm de H<sub>2</sub>O, como é feito classicamente.

Com o software Soil Water Retention Curve - SWRC (DOURADO-NETO et al., 2009), valores de  $\theta$  e respectivos valores de h foram usados para determinar os parâmetros da curva de retenção ajustada pelo modelo der van Genuchten (1980),  $\alpha$ , n e m através da eq. (2.6):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (2.6)$$

onde  $\theta_r$  = umidade volumétrica residual

$\theta_s$  = umidade volumétrica saturada

$\alpha$ , n e m = parâmetros de ajuste

### 2.2.3 Balanço hídrico climatológico sequencial

Para este estudo, o BH foi feito de forma diária, quinquidial, decendial e quinzenal. Como o período total é de 365 dias, o BH quinquidial (cada 5 dias) mostrou-se o mais satisfatório para acompanhar as relações hídricas no sistema solo-café-atmosfera. Para isso, foram estimadas as médias dos parâmetros climáticos de interesse a cada 5 dias para se chegar aos valores mensais. O BH é a contabilização da água do solo, resultante da aplicação do Princípio de Conservação de Massa em um volume de solo vegetado. A variação do armazenamento no volume considerado -  $\Delta ARM$ , por intervalo de tempo representa o balanço entre o que entrou e o que saiu de água do volume de controle representado na eq. (2.7):

$$\pm \Delta ARM = P + I - ET_r + AC - Q_i - RO \quad (2.7)$$

onde P = precipitação

I = irrigação

$ET_r$  = evapotranspiração real

AC = ascensão capilar

$Q_i$  = drenagem profunda

RO = runoff

Na elaboração do BH sequencial por Thornthwaite e Mather (1955) foi utilizada uma planilha em ambiente Excel (ROLIM; SENTELHAS; BARBIERI, 1998), onde a evapotranspiração potencial -  $ET_p$  é calculada por Thornthwaite - TH (1948) e que também foi adaptado para o modelo de Penman-Monteith - PM (1965) por Allen et al. (1989).

Para melhor entendimento do trabalho é importante lembrar algumas definições importantes a respeito da evapotranspiração (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002): 1)

evapotranspiração potencial -  $ET_p$  é a quantidade de água que seria utilizada por uma extensa superfície vegetada com grama, com altura entre 8 e 15 cm, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo, e sem restrição hídrica; 2) evapotranspiração máxima de cultura -  $ET_m$  é a quantidade de água utilizada por uma cultura, em qualquer fase de seu desenvolvimento, desde o plantio/semearura até a colheita, quando não houver restrição hídrica e 3) evapotranspiração real -  $ET_r$  é quantidade de água realmente utilizada pela cultura, em crescimento ativo, porém, com ou sem restrição hídrica, calculada pelo BH o que é o caso da eq. (2.7). Quando for citada a palavra “evapotranspiração” considera-se a evapotranspiração de uma maneira geral considerado tanto a  $ET_m$  como a  $ET_r$ . Adotou-se  $ET_m$  do café a  $ET_p$ , tanto pelo modelo de TH e PM, pois os cálculos foram feitos com coeficiente de cultura -  $K_c = 1$ . Como se sabe, o  $K_c$  é difícil de ser medido devido à sua dependência da arquitetura do sistema solo-planta-atmosfera. Os dados da literatura são bastante conflitantes, com  $K_c$  variando desde 0,65 a 1,30, pois seu valor depende da metodologia de sua determinação, fenologia, idade e arranjo das planta e tratos culturais (SANTINATO; FERNANDES; FERNANDES, 1996; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002; PEREIRA; CAMARGO; CAMARGO, 2008). De qualquer forma, para diferentes valores de  $K_c$ , apenas muda a relação entre  $ET_m$  e  $Q_i$ . Se  $ET_m$  aumentar de um fator 1,2;  $Q_i$  se reduz de 0,8. Desta forma, os dados aqui apresentados para  $K_c = 1$  podem ser avaliados para qualquer outro valor de  $K_c$ .

#### 2.2.4 Variação do armazenamento da água no solo

Foi calculado pela própria planilha Excel para o período do estudo do BH, pela eq. (2.8):

$$ARM = CAD \cdot e^{\left[ \frac{NEG.ACUM.}{CAD} \right]} \quad (2.8)$$

onde ARM = armazenamento de água no solo

NEG. ACUM. = negativo acumulado, é o somatório da sequência de valores negativos da diferença entre precipitação e evapotranspiração potencial ( $P - ET_p$ ). Quando apareceu um mês com  $P - ET_p$  positivo, após uma sequência de  $P - ET_p$  negativos, procedeu-se da seguinte forma: 1) somou-se o valor positivo da  $P - ET_p$  ao ARM do mês anterior, obtendo-se o ARM do mês em questão, que não ultrapassou o valor da CAD e, 2) com esse valor de ARM obtém-se o negativo acumulado do mês pela eq. (2.9):

$$\text{NEG.ACUM.} = \text{CAD} \cdot \text{Ln} \left[ \frac{\text{ARM}}{\text{CAD}} \right] \quad (2.9)$$

A planilha também exige a introdução da CAD, que representa a diferença entre os armazenamentos (mm) na CC e no PMP, cujo cálculo é indicado abaixo.

### 2.2.5 Precipitação e irrigação

A precipitação - P e a irrigação - I foram medidas na área do pivô central escolhido. A I foi da ordem de 2-4 mm dia<sup>-1</sup>, combinada com a fertilização (fertirrigação). Neste trabalho os componentes P e I foram considerados em conjunto e em separado, para verificar o efeito da I. Utilizando-se para isso três cenários distintos de regime hídrico durante o período de um ano do ciclo da cultura: i) apenas precipitação - P; ii) precipitação + irrigação no ano inteiro - P + I; e iii) precipitação + irrigação apenas na estação seca - P + I<sub>es</sub>.

### 2.2.6 Ascensão capilar, drenagem profunda e runoff

O BH sequencial não calcula separadamente estes componentes. A ascensão capilar - AC é uma contribuição de água que vem de profundidades maiores que 1 m, que são contabilizadas indiretamente pelo ARM. De qualquer forma, nas condições da área de estudo, estes componentes não ocorrem, pois a área tem declive de 0%, o lençol freático é profundo e com excesso de água o perfil está constantemente sob drenagem. O BH calcula um componente chamado excesso - EXC, que inclui as demais perdas de água do sistema, no caso, a drenagem profunda - Q<sub>i</sub> e o runoff - RO. Como a área onde o cafezal foi instalado é praticamente plana, assume-se que RO = 0 e EXC = Q<sub>i</sub>.

### 2.2.7 Evapotranspiração potencial pelo modelo de Thornthwaite

O programa do BH sequencial exige a inclusão de dois parâmetros locais para a execução do método de TH, “a” e “T”, que foram estimados de acordo com a sugestão de Pereira,

Angelocci e Sentelhas (2002). O valor “I” depende do ritmo anual da temperatura, integrando o efeito térmico de cada mês e foi calculado pela eq. (2.10):

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2T)^{1,514} \quad (2.10)$$

O expoente “a”, da equação da  $ET_p$ , sendo função de I, também é um índice térmico regional, e é calculado pela eq. (2.11):

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (2.11)$$

A evapotranspiração potencial ( $ET_p$ , mm mês<sup>-1</sup>) foi calculada a cada cinco dias pela planilha Excel pela eq. (2.12) empírica:

$$ET_p = 16(10T/I)^a \quad 0 \leq T \leq 26,0^\circ \text{C} \quad (2.12)$$

sendo T a temperatura média °C no intervalo de tempo (5 dias) e I um índice que expressa o nível de calor disponível na região. Devido à inexistência de dados da área em estudo, optou-se por utilizar a temperatura média diária obtida da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET mais próxima, que se localiza no município de Barreiras – BA. Foram calculadas as médias a cada cinco dias para sua entrada na planilha. No caso de  $T > 26,5^\circ \text{C}$  a  $ET_p$  é dada pela eq. (2.13) de Willmott, Rowe e Mintz (1985) (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002), que substitui a Tabela de TH (1948) (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

$$ET_p = -415,85 + 32,24T - 0,43T^2 \quad T > 26,6^\circ \text{C} \quad (2.13)$$

### 2.2.8 Evapotranspiração potencial pelo modelo de Penman-Monteith

Este método não faz parte da planilha Excel e, por isso, os dados de  $ET_p$  foram calculados separadamente e, depois, incluídos na planilha. Os dados adicionais de umidade média do ar,

radiação solar e a velocidade média do vento foram também obtidos da estação meteorológica do INMET. O cálculo da  $ET_p$  foi feito de forma diária para posterior cálculo da média a cada cinco dias para sua entrada na planilha. A estimativa da  $ET_p$  ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) é feita através da eq. (2.14):

$$ET_p = \frac{0,408s(Rn - G) + \frac{\gamma 900 U_2 (e_s - e_a)}{T + 275}}{s + \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad (2.14)$$

onde  $Rn$  = radiação líquida total ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )

$G$  = fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ), eq. (2.15):

$$G = 0,38(T_d - T_{-3d}) \quad (2.15)$$

$\gamma = 0,063 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ , é uma constante psicrométrica

$T$  = temperatura média do ar ( $^\circ\text{C}$ )

$U_2$  = velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ )

$e_s$  = pressão de saturação de vapor (kPa), eq. (2.16):

$$e_s = 0,6108 \cdot 10^{(7,5T/237,3+T)} \quad (2.16)$$

$e_a$  = pressão parcial de vapor (kPa), eq. (2.17):

$$e_a = (e_s \text{ UR})/100 \quad (2.17)$$

$s$  = declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ), eq. (2.18):

$$s = \frac{4098e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (2.18)$$

### 2.3 Resultados e Discussão

O conhecimento da função que rege a retenção de água no solo torna-se muito importante quando se trata de questões do manejo agrícola. Esta relação entre potencial mátrico -  $h$  e umidade do solo favorecem a avaliação rápida e precisa da disponibilidade de água do solo para plantas cultivadas (CENTURION; MORAES; DELLA LIBERA, 1997). A curva característica de água apresenta como principal vantagem o fato de mostrar o aspecto dinâmico da água no solo, isto é, a energia em termos de potencial que a planta tem que despende para utilizar a água disponível no solo. Por outro lado, como até o momento não existe nenhuma teoria satisfatória

que descreva esta relação, a alternativa é sua determinação experimental, que constitui uma característica específica de cada solo ou mesmo de cada horizonte ou camada do seu perfil, e que pode ser modelada por equações empíricas (REICHARDT, 1988). O modo de coleta das amostras, deformada ou indeformada, influencia muito pouco o resultado da curva de retenção de água no solo de solos arenosos desestruturados. Urach (2007) afirma que amostras com estruturas não preservadas são utilizadas para  $h$  mais baixos (-300 a -1500 kPa) tanto para a câmara de Richards quanto para dados de psicrômetro de solo. Segundo o mesmo autor, nos  $h$  mais baixos (-100 a -1500 kPa), o efeito da estrutura sobre a retenção de água vai sendo reduzido, e tem-se um aumento acentuado do efeito da granulometria do solo. Com base nessa afirmação, a Tabela 2.2 fornece os dados obtidos no levantamento da curva de retenção de amostras deformadas de solo da área de estudo.

Tabela 2.2 – Densidade do solo -  $D_s$  e umidade volumétrica do solo -  $\theta$ , medidos em laboratório, em função da profundidade – Prof e dos potenciais mátricos da água no solo -  $h$

Prof m	$D_s$ g cm <sup>-3</sup>	h - cm de H <sub>2</sub> O									
		0	100	200	330	500	1000	3000	5000	10000	15000
		umidade $\theta$ - cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>									
0-0,2	1,79 ± 0,07	0,310	0,235	0,202	0,164	0,161	0,131	0,118	0,114	0,111	0,107
0,2-0,4	1,57 ± 0,03	0,392	0,228	0,207	0,170	0,147	0,118	0,112	0,109	0,107	0,102
0,4-0,6	1,53 ± 0,04	0,409	0,260	0,223	0,183	0,156	0,127	0,116	0,114	0,111	0,108
0,6-0,8	1,52 ± 0,04	0,412	0,292	0,276	0,222	0,172	0,132	0,121	0,119	0,114	0,114
0,8-1	1,50 ± 0,05	0,421	0,313	0,309	0,236	0,217	0,134	0,127	0,121	0,118	0,117
0-1	1,58	0,389	0,266	0,243	0,195	0,171	0,128	0,119	0,115	0,112	0,110

Os valores médios dos armazenamentos de água no solo - ARM para a capacidade de campo - CC ( $\theta_{330}$ ), ponto de murcha permanente - PMP ( $\theta_{15000}$ ) e a capacidade de água disponível - CAD, calculados antes do ajuste por van Genuchten (Tabela 2.3), para a camada 0-1 m, foram:  $\theta_{330}$  (195,0 mm) e  $\theta_{15000}$  (109,6 mm) e CAD 85,4 mm. Com o intuito de aprimorar os resultados do balanço hídrico - BH para uma irrigação mais criteriosa (PEREIRA; CAMARGO; CAMARGO, 2008), os dados da Tabela 2.3 foram comparados com aqueles obtidos a partir do ajuste dos dados da curva de retenção de água no solo pelo modelo de van Genuchten [(eq. (2.6)].

As equações para cada camada, com os parâmetros  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$ , são apresentadas na Tabela 2.4. Como se pode ver, apesar de se tratar do mesmo solo, os valores do parâmetro  $\alpha$  do modelo de van Genuchten eq. (2.6) variaram bastante em função da profundidade, principalmente da primeira camada em relação às demais devido à sua maior densidade, o que afeta a porosidade. O

parâmetro  $n$  variou menos, mas o  $m$  variou bastante. Os coeficientes de ajuste foram todos altos, acima de 0,98.

Tabela 2.3 – Armazenamento da água no solo - ARM e capacidade de água disponível - CAD em função da profundidade do solo – Prof, onde  $\theta_{330}$  é a umidade volumétrica na capacidade de campo e  $\theta_{15000}$  no ponto de murcha permanente

Prof	$\theta_{330}$	ARM	$\theta_{15000}$	ARM
m	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	mm	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	mm
0-0,2	0,164	32,8	0,107	21,4
0,2-0,4	0,170	34,0	0,102	20,4
0,4-0,6	0,183	36,6	0,108	21,6
0,6-0,8	0,222	44,4	0,114	22,8
0,8-1	0,236	47,2	0,117	23,4
ARM Total		195,0		109,6
CAD				85,4

Tabela 2.4 – Parâmetros de van Genuchten e coeficientes de ajuste

Profundidade (m)	van Genuchten (1980)	Coefficiente de Ajuste
0-0,2	$\theta = 0,103 + \frac{0,310 - 0,103}{[1 + (0,0113h)^{1,3547}]^{0,5681}}$	0,996
0,2-0,4	$\theta = 0,102 + \frac{0,392 - 0,102}{[1 + (0,0004h)^{0,5765}]^{5,4389}}$	0,996
0,4-0,6	$\theta = 0,108 + \frac{0,409 - 0,108}{[1 + (0,0012h)^{0,7240}]^{3,4511}}$	0,998
0,6-0,8	$\theta = 0,114 + \frac{0,412 - 0,114}{[1 + (0,0007h)^{0,8601}]^{4,3855}}$	0,990
0,8-1	$\theta = 0,117 + \frac{0,421 - 0,117}{[1 + (0,0003h)^{0,8471}]^{7,4726}}$	0,984

A Tabela 2.5 reproduz a Tabela 2.2 com os dados de ajuste pelo uso das equações da Tabela 2.4.

A Tabela 2.6 reproduz a Tabela 2.3 com os dados de ajuste da Tabela 2.4, sendo possível obter os valores corrigidos de armazenamento do  $\theta_{330}$  (196,0 mm) e  $\theta_{15000}$  (109,6 mm), com isso ajustando o valor da CAD para 86,4 mm deste Latossolo. O resultado obtido foi 1,16% superior a CAD sem o ajuste, o que no nosso caso de estudo, não é uma diferença relevante, mas mesmo assim, permite inferir a possibilidade de determinar o valor da CAD ajustado através do auxílio

computacional do Soil Water Retention Curve - SWRC que, de qualquer forma, é uma metodologia mais científica.

Tabela 2.5 – Umidade volumétrica -  $\theta$  estimada utilizando o modelo de van Genuchten em função do potencial mátrico da água no solo - h e da profundidade do solo - Prof

Prof m	h - cm de H <sub>2</sub> O									
	0	100	200	330	500	1000	3000	5000	10000	15000
	umidade $\theta$ - cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>									
0-0,2	0,310	0,236	0,197	0,172	0,155	0,134	0,117	0,112	0,108	0,107
0,2-0,4	0,392	0,235	0,196	0,169	0,150	0,126	0,107	0,104	0,102	0,102
0,4-0,6	0,409	0,264	0,216	0,183	0,159	0,131	0,112	0,109	0,108	0,108
0,6-0,8	0,412	0,310	0,257	0,214	0,182	0,141	0,117	0,115	0,114	0,114
0,8-1	0,421	0,334	0,285	0,242	0,206	0,155	0,120	0,118	0,117	0,117
0-1	0,389	0,276	0,230	0,196	0,170	0,137	0,115	0,112	0,110	0,110

Tabela 2.6 - Armazenamento - ARM e capacidade de água disponível - CAD estimada por van Genuchten em função da profundidade do solo – Prof, onde  $\theta_{330}$  é a umidade volumétrica na capacidade de campo e  $\theta_{15000}$  no ponto de murcha permanente

Prof m	$\theta_{330}$ cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	ARM mm	$\theta_{15000}$ cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	ARM mm
0-0,2	0,172	34,4	0,107	21,4
0,2-0,4	0,169	33,8	0,102	20,4
0,4-0,6	0,183	36,6	0,108	21,6
0,6-0,8	0,214	42,8	0,114	22,8
0,8-1	0,242	48,4	0,117	23,4
ARM Total		196,0		109,6
CAD				86,4

Com a CAD obtida pelo modelo de van Genuchten, fez-se um estudo comparativo do BH através da evapotranspiração máxima - ET<sub>m</sub> estimada pelos modelos de Thornthwaite - TH e Penman-Monteith - PM. Os BH elaborados com o auxílio da planilha são apresentados considerando três cenários: o primeiro que caracteriza o clima da região, sem a influência da irrigação - I feita pelo pivô central; o segundo inclui a I o ano inteiro, e o terceiro a irrigação apenas no período seco - I<sub>es</sub>:

#### A) Cenário i

A precipitação - P total no ano agrícola foi de 1535,0 mm (Tabela 2.1), que poderia suprir as necessidades das plantas desde que as precipitações fossem distribuídas, caracterizando um

regime hídrico favorável ao cultivo de café com o fornecimento de água via I nos seis meses mais secos (PEREIRA; CAMARGO; CAMARGO, 2008). Os meses de novembro a abril concentraram 1384 mm, ou seja, 90,2% do total de P. Para este trabalho, a estação seca foi considerada de maio a outubro. Os cafeeiros são plantas perenifólias e formam folhas praticamente o ano todo, desde que haja disponibilidade de água suficiente (CARR, 2001). O suprimento de água via I, em quantidades e intervalos necessários, pode proporcionar grandes aumentos de produtividade na cafeicultura, além de menores perdas para a planta, o que é necessário nos seis meses restantes como forma de complementação.

Pelos dados da Figura 2.2 que mostra valores de  $ET_m$  e de evapotranspiração real -  $ET_r$  calculada através do BH do cafezal pelos modelos de PM e de TH, nota-se que em 6 meses do período do experimento ou seja, de novembro de 2008 a abril de 2009, o ganho de água por P superou a perda de água pela  $ET_m$  e  $ET_r$  calculada pelos dois modelos. Nota-se que nos meses em que há pouca P, a perda de água para a atmosfera, pela  $ET_m$  e  $ET_r$ , calculada pelo modelo de PM supera a calculada pelo modelo de TH, sendo que nos demais meses do ano o inverso é verdadeiro. Mais uma vez fica comprovado a necessidade de I complementar a P para produção de café. Considerando o período total de estudo para este cenário, a  $ET_m$  por TH foi de 1409,9 mm e por PM foi de 1337,8 mm; e a  $ET_r$  foi de 938,5 mm por TH e 799,1 mm por PM. Araújo, Costa e Santos (2007) mostram que antes de se eleger o modelo a ser utilizado para a estimativa da evapotranspiração, é necessário saber quais os elementos climáticos disponíveis, uma vez que PM é muito mais exigente em relação à TH que emprega apenas a temperatura média. Em nosso caso, dada a possibilidade de se empregar ambos os métodos, fazemos sua comparação em termos de BH da área. A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) recomenda o uso do modelo de PM para a estimativa de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998). Para Camargo e Camargo (2000) este modelo prediz com eficácia a evapotranspiração em diversas condições de umidade atmosférica necessitando, entretanto, de vários elementos meteorológicos que nem sempre se encontram disponíveis em algumas regiões. Conceição e Mandelli (2005) citam que os métodos de estimativa da evapotranspiração que empregaram a radiação solar incidente apresentaram desempenhos superiores aos que utilizaram somente valores de temperatura do ar. Segundo Camargo e Sentelhas (1997), dos modelos de estimativa que empregam a temperatura do ar como variável, o de TH apresentou bom desempenho para as

condições subtropicais úmidas do interior paulista, quando comparados a dados obtidos em evapotranspirômetros.

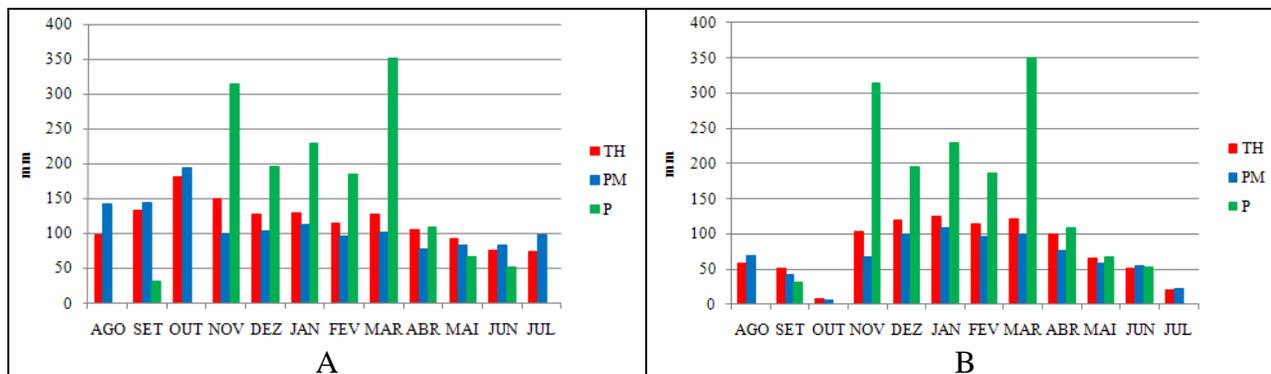


Figura 2.2 - Precipitação - P, evapotranspiração máxima (A) e evapotranspiração real elaborada pelo balanço hídrico (B) pelos modelos de Penman Monteith - PM e Thornthwaite - TH para cultura de café

Os dados da Figura 2.3 mostram o BH mensal simples ( $P - ET_m$ ) pelos modelos de PM e TH. Nota-se que de novembro de 2008 a abril de 2009 não foram observados déficits hídricos - DEF e que, no mês de agosto (primeiro mês do experimento) ocorreu o maior DEF para os dois modelos,  $69,6 \text{ mm mês}^{-1}$  para PM e  $58,9 \text{ mm mês}^{-1}$  para TH, o que não é observado pelo extrato do BH elaborado cada cinco dias (Figura 2.4), no qual em outubro é observado o maior DEF, assim, detalhando melhor o BH, pois este leva em consideração a CAD do solo para sua elaboração. Nos meses de novembro de 2008 a abril de 2009 (Figura 2.3) observaram-se P maiores que a  $ET_m$  calculada pelos dois modelos. Os meses de maio e junho de 2009 apresentaram valores muito próximos de zero para o BH, indicando assim um equilíbrio entre a  $ET_m$  e a P. A Figura 2.4 corrobora essa afirmação através do extrato do BH onde é mostrada o componente excesso - EXC e o DEF. A estimativa das perdas por evaporação e transpiração é de grande importância para atividades como projetos de I, gerenciamento de reservatórios e planejamento de uso e outorga de recursos hídricos (BORGES; MENDIONDO, 2007). Os mesmos autores ainda citam que o BH relaciona a quantidade de cada componente do ciclo podendo ser efetuado em diversos níveis, de acordo com o volume de controle utilizado. A análise dos componentes do BH é ferramenta significativa na implantação de programas de desenvolvimento com sustentabilidade.

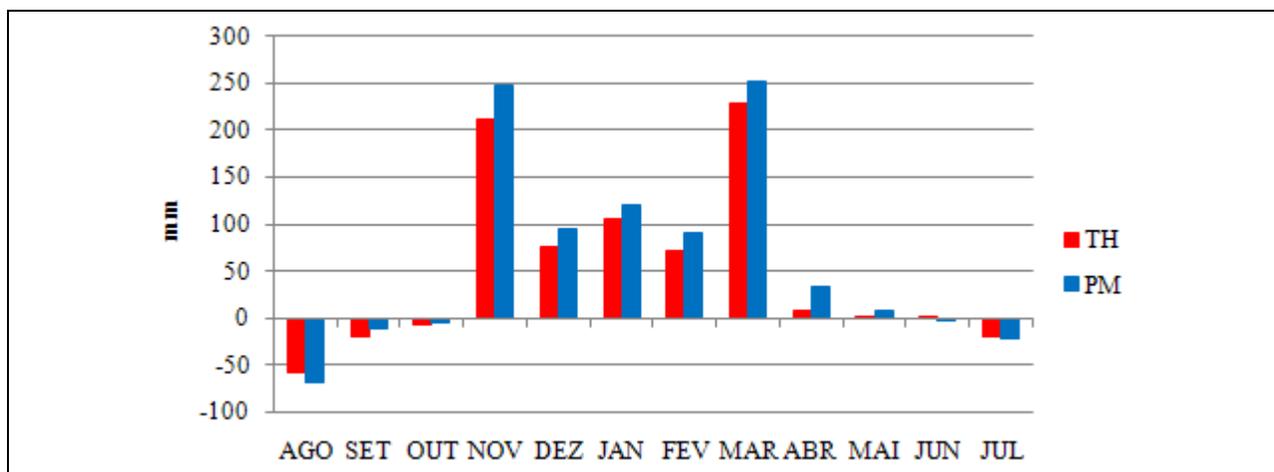


Figura 2.3 - Balanço hídrico (precipitação menos evapotranspiração máxima) pelos modelos de evapotranspiração máxima de Penman Monteith - PM e Thornthwaite - TH

Outro ponto importante que é possível observar na Figura 2.4 é em relação ao componente EXC, uma vez que valores altos representam grandes perdas por drenagem profunda -  $Q_i$  em solos arenosos e planos como este do nosso estudo, e valores nulos indicam DEF que podem estar prejudicando a cultura do café. A camada superficial do solo é importante no ciclo hidrológico, pois é ali que ocorre interação entre a água da atmosfera e a água subterrânea, através dos processos de evaporação, transpiração, P, I, runoff - RO e  $Q_i$ . Essa camada sustenta todas as atividades agrícolas para as quais a água é o recurso natural mais limitante (PEREIRA, 1986).

A Figura 2.4 representa o extrato do BH mensal completo [eq. (2.7)], onde se nota que nos meses de novembro a abril praticamente não ocorre DEF, sendo esse considerado o período das chuvas nessa região. Por outro lado, de maio a outubro ocorre um grande DEF, ficando praticamente inviável a agricultura nesse período sem a utilização de I. O suprimento de água via I, em quantidades e intervalos necessários, pode proporcionar grandes aumentos de produtividade na cafeicultura. Nessa figura a diferença entre os modelos de  $ET_m$  de TH e PM para cálculo do BH fica praticamente imperceptível. O mês de outubro teve o maior DEF, chegando a um acumulado de 173,7 mm pelo BH calculado por TH e 189,1 mm por PM. Por outro lado, no período de novembro a abril ocorreu um grande EXC com muito pouco DEF. Como no caso do nosso estudo o  $EXC = Q_i$ , isso significa que no período de novembro a abril houve um  $Q_i$  acumulado de 614,1mm por TH e 752,4 mm por PM, sendo que nesse período TH subestimou em 18,4% PM. O mês em que ocorreu maior  $Q_i$  foi março, variando de 228,3 a 251,4 mm por TH e PM, respectivamente. Considerando toda a P acumulada no ciclo anual do cafeeiro (1535,0 mm),

ocorreu uma  $Q_i$  de 667,8 mm por TH e 811,5 mm por PM. Isso significa que em média, foram drenados 48,2% da P. O modelo de TH subestimou a  $Q_i$  em 17,7% em relação a PM. Foi encontrada uma boa correlação entre a P e  $Q_i$  acumulados pelos modelos de TH e PM (Figura 2.5).

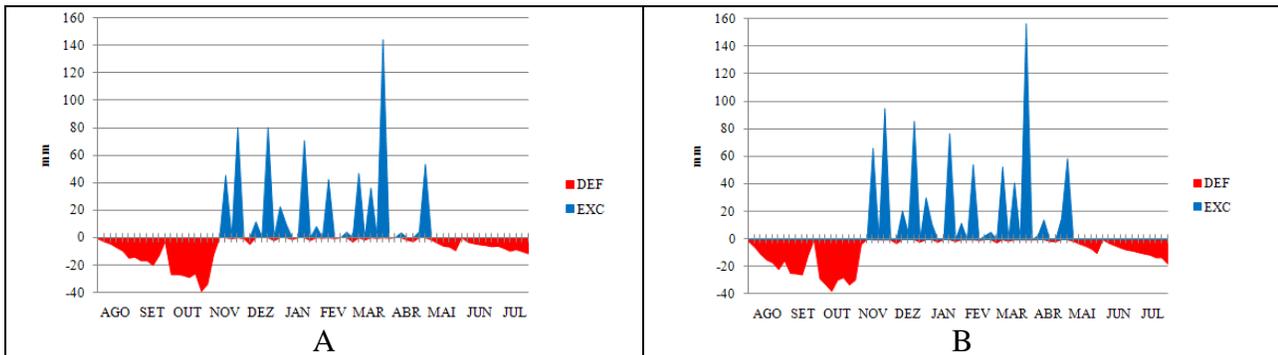


Figura 2.4 – Extrato do balanço hídrico pelo modelo de evapotranspiração máxima de Thornthwaite (A) e Penman Monteith (B) para o cenário i

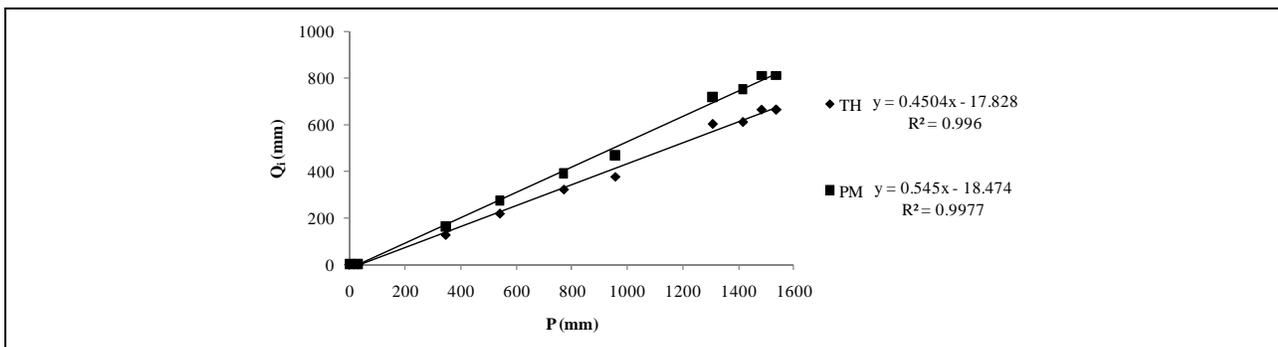


Figura 2.5 – Correlação entre a precipitação - P e a drenagem profunda -  $Q_i$  elaborado pelo balanço hídrico utilizando os modelos de evapotranspiração máxima de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM para o cenário i

O solo funciona como um reservatório ativo que impõe restrições à utilização de seu conteúdo, limitando o fluxo de água das camadas inferiores para a superfície e desta para a atmosfera. A restrição de fluxo para a superfície reduz a evaporação tão logo o teor de água da superfície diminua até um valor crítico, economizando água para as plantas. Em condições de alta pluviosidade, pode ser importante a quantidade de água que deixa a camada superficial do solo e atinge camadas mais profundas. Esse componente  $Q_i$ , responsável pela recarga dos reservatórios subterrâneos, é frequentemente desprezado em estudos de BH. No entanto, pode chegar à mesma ordem de grandeza da evapotranspiração (PEREIRA, 1986). Silva et al. (2007) citam em seu

trabalho que a drenagem abaixo da zona radicular (1,0 m) foi estimada pela equação de Darcy, que é comumente utilizada em estudos de física do solos; porém, esse método não foi considerado apropriado para essa estimativa em condições de campo. Silva et al. (2006), trabalhando com o método denominado “método da diferença”, considera como  $Q_i$  o EXC de água descontando o RO, em situações de perfil de solo acima da CC. Por esse método os autores encontraram uma  $Q_i$  de 364,6 mm em dois anos a 1 metro de profundidade, correspondente a 15,2% da P.

Os dados da Tabela 2.7 mostram as médias mensais de ARM de água no solo e da porcentagem da CAD no solo e, juntamente com os dados de ARM a cada cinco dias (Figura 2.6), é possível perceber, que devido ao regime hídrico, ocorre uma queda no ARM de agosto a meados de novembro, voltando a subir a partir de então. Neste período, o solo chegou a ter de 2,3 a 3,6 do % da CAD, dependendo do modelo de  $ET_m$  adotado, tendo um ARM muito baixo. De meados de novembro a dezembro, o ARM aumenta bruscamente, resultado do aumento de P com isso a CAD esteve sempre acima de 89,0 % até o mês de abril, sendo que a partir de maio voltou a cair, devido ao período de regime hídrico ser concentrado de novembro a abril. O mês de fevereiro fechou com média de 97,5% da CAD. Vê-se que a irrigação é fundamental no período maio a outubro para a produção de café nessa região.

Tabela 2.7 - Armazenamento de água no solo - ARM e porcentagem - % da capacidade de água disponível - CAD elaborado pelo balanço hídrico utilizando os modelos de evapotranspiração máxima de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM para o cenário i

Mês/Ano	TH		PM	
	ARM (mm)	% da CAD	ARM (mm)	% da CAD
AGO/08	49,7	57,5	39,7	45,9
SET/08	13,4	15,5	7,7	8,9
OUT/08	3,1	3,6	2,0	2,3
NOV/08	49,6	57,4	52,4	60,6
DEZ/08	77,1	89,2	79,2	91,7
JAN/09	79,4	91,9	80,0	92,6
FEV/09	83,6	96,8	84,8	98,1
MAR/09	78,8	91,2	80,7	93,4
ABR/09	76,9	89,1	80,3	92,9
MAI/09	57,0	66,0	59,1	68,4
JUN/09	51,7	59,8	53,5	61,9
JUL/09	22,7	26,3	19,0	22,0

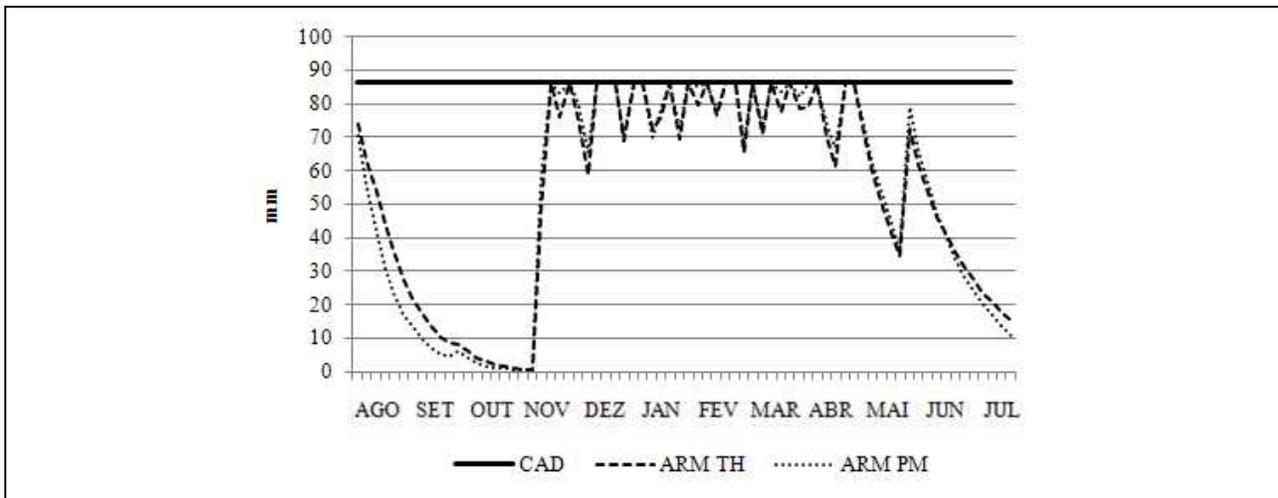


Figura 2.6 - Capacidade de água disponível - CAD e armazenamento de água no solo - ARM elaborado pelo balanço hídrico utilizando os modelos de evapotranspiração máxima de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM para o cenário i

### B) Irrigação anual com pivô central, cenário ii

No cafezal em estudo ocorreram aplicações periódicas de insumos via fertirrigação, o que caracteriza o cenário ii, P + I e com isso, um novo extrato de BH é representado na Figura 2.7, baseado nos dados da Tabela 2.8. Com o emprego da fertirrigação praticamente não ocorreu DEF em todo período do experimento. Entre os pequenos DEF, o mês de outubro teve o maior, chegando a um acumulado de 9,1 mm pelo BH calculado pela  $ET_m$  por TH e 16,6 mm por PM. No entanto, no período de novembro a abril ocorreu o maior EXC com DEF praticamente nulo. Nesse período ocorreu um  $Q_i$  acumulado de 773,4 mm por TH e 921,4 mm por PM. Isso significa um acréscimo de 25,94% e 22,46% respectivamente, quando comparado ao  $Q_i$  do cenário i feito anteriormente. Nesse período com I, TH subestimou em 16,1% PM a  $Q_i$ . O mês em que ocorreu maior  $Q_i$  foi março, variando de 235,2 a 258,4 mm por TH e PM, respectivamente. A I conduzida o ano todo acumulou 697,3 mm, o que representa 45,4% da P, que acumulou 1535,0 mm. A  $Q_i$  estimada com o emprego de TH foi 11,8% menor que aquela empregando PM, sendo seus valores 891,7 e 1010,5 mm, respectivamente. Em média, estes valores de  $Q_i$  representam 62,0 % de P e 42,6% de P + I, o que pode ser considerado uma  $Q_i$  alta. Existe uma boa correlação entre a P + I e  $Q_i$  pelo modelo de TH e PM (Figura 2.8).

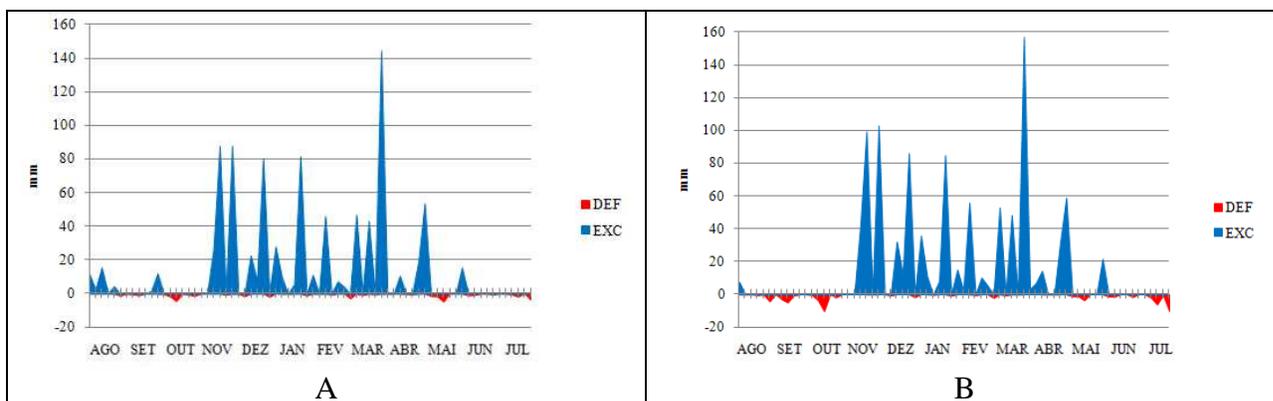


Figura 2.7 – Extrato do balanço hídrico pelo modelo de evapotranspiração máxima de Thornthwaite (A) e Penman Monteith (B) para o cenário ii

Tabela 2.8 – Precipitação - P, Irrigação - I do período do estudo

Mês/Ano	P	I	P + I	
			mm	P + I <sub>es</sub> *
AGO/08	0,0	118,1	118,1	118,1
SET/08	31,5	128,8	160,3	160,3
OUT/08	0,0	139,9	139,9	139,9
NOV/08	314,5	69,6	384,1	314,5
DEZ/08	195,0	22,4	217,4	195,0
JAN/09	230,0	26,5	256,5	230,0
FEV/09	185,5	11,2	196,7	185,5
MAR/09	350,5	7,5	358,0	350,5
ABR/09	108,5	26,1	134,6	108,5
MAI/09	67,0	48,5	115,5	115,5
JUN/09	52,5	46,6	99,1	99,1
JUL/09	0,0	52,2	52,2	52,2
Anual	1535,0	697,3	2232,3	2069,1

\*I<sub>es</sub> = irrigação na estação seca.

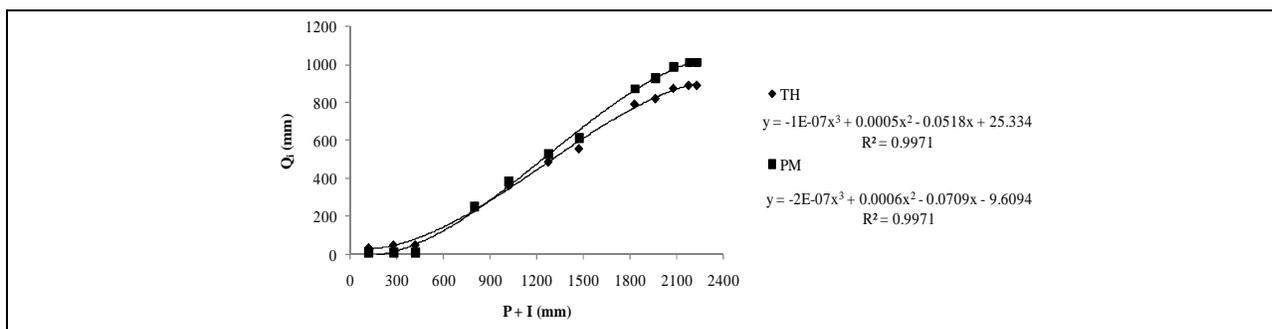


Figura 2.8 - Correlação entre a precipitação + irrigação - P + I e a drenagem profunda - Q<sub>i</sub> elaborado pelo balanço hídrico utilizando os modelos de evapotranspiração máxima de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM para cenário ii

Camargo e Camargo (2001) citam que a esquematização das diferentes fases fenológicas do cafeeiro arábica é útil para facilitar e racionalizar as pesquisas e observações na cafeicultura. Possibilita identificar as fases que exigem água facilmente disponível no solo e aquelas nas quais se torna conveniente ocorrer um pequeno estresse hídrico, para condicionar uma abundante florada. Através dos dados apresentados na Figura 2.7 e Tabela 2.8, é possível observar que ocorreu um aumento da disponibilidade hídrica via I, essencial para que ocorra a florada no mês de agosto. De setembro a dezembro, período que contempla a fase de chumbinho, praticamente não ocorreu DEF; a água é essencial nessa fase. O DEF de janeiro a março pode causar chochamento de frutos na fase de granação de frutos, o que não ocorreu. De abril até junho a diminuição de  $P + I$  beneficia a qualidade do produto (CAMARGO; CAMARGO, 2001). Para o cenário ii, com base na eq. (2.7), considerando o período total de estudo a  $ET_r$  foi de 1368,6 mm por TH e 1270,4 mm por PM.

Os dados da Tabela 2.9 mostram as médias mensais de ARM de água no solo e da porcentagem da CAD para o cenário ii e, juntamente com Figura 2.9, que mostra os dados de ARM cada cinco dias; é possível perceber que devido a I, ocorre um maior ARM comparado ao cenário i de agosto a meados de novembro. O ARM de água no solo aumentou, suprimindo as necessidades da cultura nesse período sem P considerável. Nesse período, o menor ARM foi no mês de outubro, sendo em média 67,4% da CAD. De meados de novembro a até o mês de abril o ARM continua alto pois além da P tem a fertirrigação, sendo que a partir de maio voltou a cair, devido à falta de P, mas agora com ARM suficiente para cultura do cafeeiro. O mês de fevereiro fechou com média de 97,9 % da CAD. Com uso de irrigação no período maio a outubro fica viável a produção de café nessa região.

### **C) Irrigação apenas na estação seca, cenário iii**

A Figura 2.10 representa um novo extrato do BH elaborado eliminando a água da I do período chuvoso de novembro a abril (cenário iii, precipitação + irrigação na estação seca –  $P + I_{es}$ ) e deixando a I no período de DEF, conforme dados da Tabela 2.8. Novamente, com a  $I_{es}$ , pode-se dizer que não ocorreu DEF. Nesse novo extrato do BH, o mês de novembro teve o maior DEF, atingindo um acumulado de 24,7 mm pelo BH calculado por TH e 18,2 mm por PM. Agora, no período de novembro a abril ocorreu um menor EXC com pequeno DEF. Nesse

período ocorreu um  $Q_i$  acumulado de 645,0 mm pelo modelo de  $ET_m$  de TH e 784,0 mm por PM, com uma TH subestimando em 17,7%. O mês em que ocorreu maior  $Q_i$  foi março, variando de 228,34 a 251,5 mm por TH e PM respectivamente. Considerando esse terceiro cenário todo  $P + I_{es}$  acumulada no ciclo anual do cafeeiro (2069,1 mm), ocorreu uma  $Q_i$  de 763,4 mm por TH e 873,1 por PM. Em média, drenou 39,5% da  $P + I_{es}$ . O modelo de  $ET_m$  de TH subestimou a  $Q_i$  em 12,6% em relação a PM. A correlação entre a  $P + I_{es}$  e  $Q_i$  pelo modelo de TH e PM (Figura 2.11) foi boa. Esses resultados mostram pouca diferença entre suspender ou não a I no período chuvoso, podendo, portanto ser mantida para efeito de aplicação de insumos durante o ano agrícola inteiro, mas caso seja suspensa a I no período chuvoso, existe a alternativa de fazer adubação com uréia solida na saia da plantas, pois não irá faltar umidade no solo. Para o cenário iii, com base na eq. (2.7), considerando o período total de estudo a  $ET_r$  foi de 1333,8 mm por TH e 1244,6 mm por PM.

Tabela 2.9 – Armazenamento de água no solo - ARM e porcentagem - % da capacidade de água disponível - CAD elaborado pelo balanço hídrico utilizando os modelos de evapotranspiração máxima de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM para o cenário ii

Mês/Ano	TH		PM	
	ARM (mm)	% da CAD	ARM (mm)	% da CAD
AGO/08	84,0	97,2	78,3	90,6
SET/08	75,2	87,0	60,9	70,5
OUT/08	62,4	72,2	54,0	62,5
NOV/08	76,8	88,9	78,6	91,0
DEZ/08	80,1	92,7	82,1	95,0
JAN/09	83,4	96,5	83,4	96,5
FEV/09	84,2	97,5	85,0	98,4
MAR/09	79,4	91,9	81,2	94,0
ABR/09	83,4	96,5	85,4	98,8
MAI/09	66,2	76,6	68,5	79,3
JUN/09	75,4	87,3	70,7	81,8
JUL/09	71,8	83,1	53,5	61,9

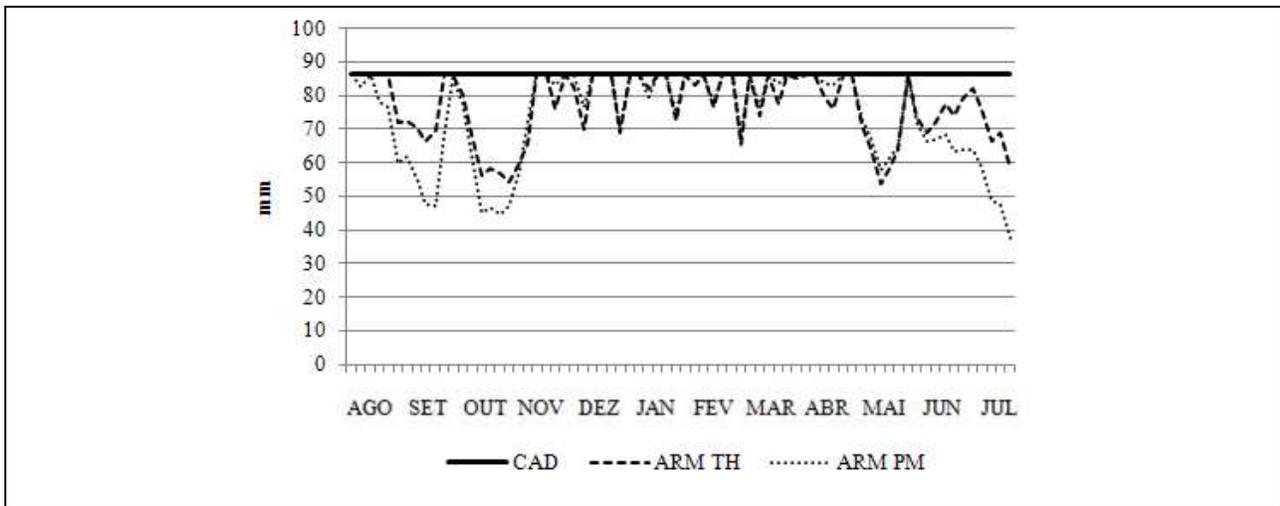


Figura 2.9 - Capacidade de água disponível - CAD e armazenamento de água no solo - ARM elaborado pelo balanço hídrico utilizando os modelos de evapotranspiração máxima de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM para o cenário ii

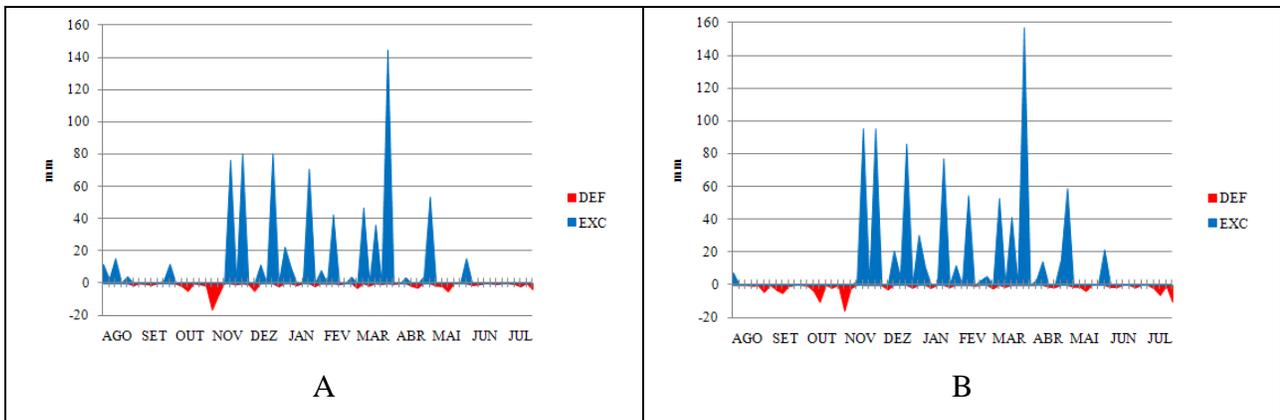


Figura 2.10 - Extrato do balanço hídrico pelo modelo de evapotranspiração máxima de Thornthwaite (A) e Penman Monteith (B) para o cenário iii

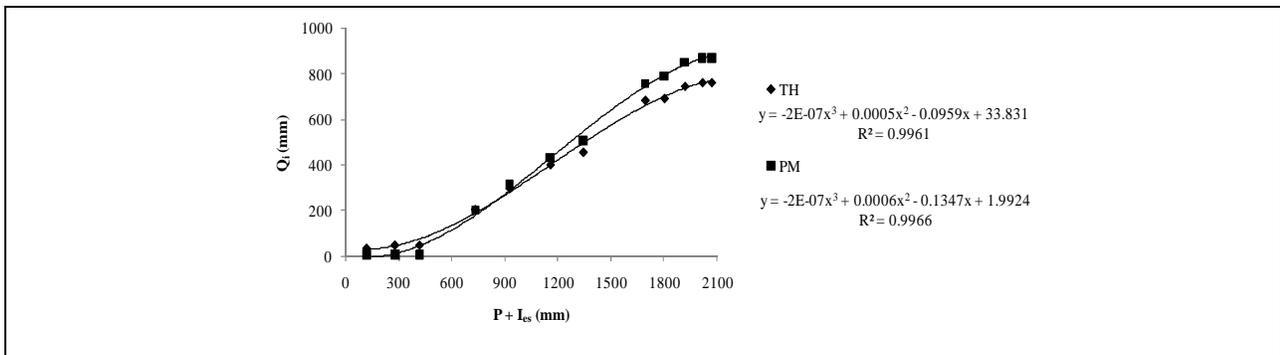


Figura 2.11 - Correlação entre a precipitação + irrigação na estação seca -  $P + I_{es}$  e a drenagem profunda -  $Q_i$  elaborado pelo balanço hídrico utilizando os modelos de evapotranspiração máxima de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM para o cenário iii

Os dados da Tabela 2.10 mostram as médias mensais de ARM de água no solo e da porcentagem da CAD para o cenário iii e a Figura 2.12 mostra os dados de ARM a cada cinco dias. Considerando-se o período seco de agosto a outubro e de maio a junho, o mês de outubro foi o que teve menor ARM com a média da % da CAD utilizando os modelos de cálculo da  $ET_m$  de 67,4. Assim sendo, esse cenário também é viável em termos de I, mas não para fertirrigação, sendo necessária a colocação do adubo na saia da planta no período chuvoso. Ocorre um ARM semelhante quando comparado ao cenário ii de agosto a meados de novembro, o ARM de água no solo aumentou se compararmos com o cenário i, assim, suprindo as necessidades da cultura nesse período sem P considerável. De meados de novembro até o mês de abril, o ARM continua alto, pois P é suficiente para manter o ARM de água no solo. A partir de maio o ARM voltou a cair devido à falta de P, mas agora com ARM suficiente para cultura do cafeeiro. Com uso da I no período maio a outubro fica viável a produção de café nessa região.

Tabela 2.10 – Armazenamento de água no solo - ARM e porcentagem - % da capacidade de água disponível - CAD elaborado pelo balanço hídrico utilizando os modelos de evapotranspiração máxima de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM para o cenário iii

Mês/Ano	TH		PM	
	ARM (mm)	% da CAD	ARM (mm)	% da CAD
AGO/08	84,0	97,2	78,3	90,6
SET/08	75,2	87,0	60,9	70,5
OUT/08	62,4	72,2	54,0	62,5
NOV/08	65,9	76,3	68,0	78,7
DEZ/08	77,1	89,2	79,2	91,7
JAN/09	79,5	92,0	80,0	92,6
FEV/09	83,6	96,8	84,8	98,1
MAR/09	78,8	91,2	80,7	93,4
ABR/09	76,9	89,0	80,3	92,9
MAI/09	66,2	76,6	68,5	79,3
JUN/09	75,4	87,3	70,7	81,8
JUL/09	71,8	83,1	53,5	61,9

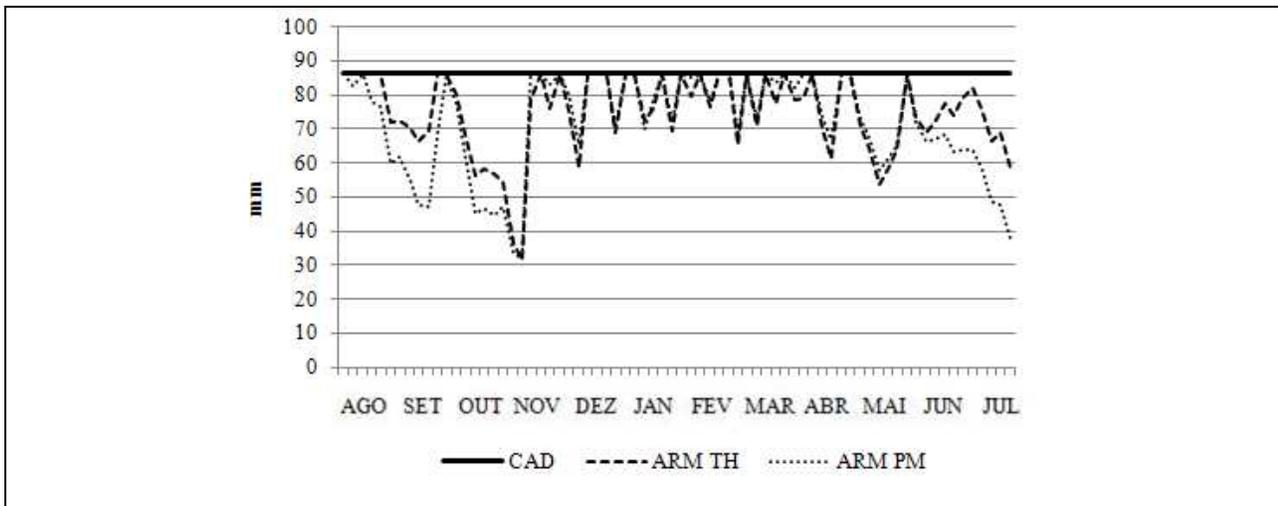


Figura 2.12 - Capacidade de água disponível - CAD e armazenamento de água no solo - ARM elaborado pelo balanço hídrico utilizando os modelos de evapotranspiração máxima de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM para o cenário iii

## 2.4 Conclusões

O emprego do balanço hídrico - BH sequencial para o acompanhamento das relações hídricas do café irrigado por pivô central no oeste baiano foi satisfatório. A evapotranspiração máxima -  $ET_m$  anual estimada pelo modelo de Thornthwaite - TH superestimou aquela estimada por Penman Monteith - PM. Esse mesmo comportamento foi verificado com a evapotranspiração real -  $ET_r$  calculada através do BH nos três cenários. As diferenças nos métodos de estimativas de  $ET_m$  afetaram as estimativas de déficit hídrico - DEF e de drenagem profunda -  $Q_i$  nos três cenários estudados [cenário i ( $Q_i$  TH = 667,8 e  $Q_i$  PM = 811,5 mm), cenário ii ( $Q_i$  TH = 891,7 e  $Q_i$  PM = 1010,5 mm), e cenário iii ( $Q_i$  TH = 763,4 e  $Q_i$  PM = 873,1 mm)], sendo que o corte da irrigação - I no período chuvoso (cenário iii) reduziu em média o  $Q_i$  em 14,0% e não afetou o aparecimento de períodos de défices.

## Referências

ALFONSI, R.R. **Histórico climatológico da cafeicultura brasileira**. Informativo Garcafé. Maio/2000. Disponível em: <<http://www.coffeefreak.com.br/ocafezal.asp?SE=8&ID=67>> Acesso em: 23 jun. 2009.

ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; BURMAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ARAÚJO, W.F.; COSTA, S.A.A.; SANTOS, A.E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) para Boa Vista, RR. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 84-88, 2007.

BARRETO, C.V.G.; SAKAI, E.; ARRUDA, F.B. SILVA, E.A.; PIRES, R.C.M. Distribuição espacial do sistema radicular do cafeeiro fertirrigado por gotejamento em Campinas. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 4, p. 641-647, 2006.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Physical and Mineralogical Methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. pt. 1, p. 363-375.

BORGES, A.C.; MENDIOONDO, E.M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 293-300, 2007.

BRITO, A.S.; LIBARDI, P.L.; GHIRBERTO, P.J. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 295-303, 2009.

BRUNO, I.P.; SILVA, A.L.; REICHARDT, K.; DOURADO-NETO, D.; BACCHI, O.O.S.; VOLPE, C.A. Comparison between climatological and field water balances for a coffee crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 3, p. 215-220, 2007.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.

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.

CAMARGO, A.P.; PEREIRA, A.R. **Agrometeorology of coffee crop**. Geneve: WMO, 1994. 53 p. (Bulletin, 58).

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

CARR, M.K.V. The water relations and irrigation requirements of coffee. **Experimental Agriculture**, London, v. 37, n. 1, p. 1-36, 2001.

CARVAJAL, J.F. **Cafeto: cultivo y fertilización**. Berna: Instituto Internacional de La Potasa, 1972. 141 p.

CENTURION, J.F.; MORAES, M.H.; DELLA LIBERA, C.L.F. Comparação de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 173-179, 1997

CONCEIÇÃO, M.A.F.; MANDELLI, F. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 303-307, 2005.

COSTE, R. **Le caféier**. Paris: Techniques Agricoles et Productions Tropicales, 1968. 310 p.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K. BACCHI, O.O.S.; LOPES, P.P. **Soil water retention curve**. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/docentes/dourado/>>. Acesso em: 16 jul. 2009.

EMBRAPA. **Manual de métodos e análise de solos**. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1997. 212 p.

\_\_\_\_\_. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 306 p.

FARIA, R.T.; SIQUEIRA, R. Produtividade do cafeeiro e cultivos intercalares sob diferentes regimes hídricos. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 4, p. 583-590, 2005.

GOMES, N.M.; LIMA, L.A.; CUSTÓDIO, A.A.P. Crescimento vegetativo e produtividade do cafeeiro irrigado no sul do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11 n. 6, p. 564-570, 2007.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press, 1982. 413 p.

KÖPPEN, W. **Grundriss der Klimakunde**, Berlin: Leipzig:Walter de Gruyter. 1931. 388 p.

LIMA, L.A.; CUSTÓDIO, A.A.P.; GOMES, N.M. Coffee yield and production during the initial five harvests under irrigation with center pivot in Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32 n. 6, p. 1832-1842, 2008.

MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.). **Cultura do cafeeiro**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Potafos, 1986. p. 165- 274.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. In: SYMPOSIUM OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 19., 1965, Swansea. **Proceedings...** Cambridge: University Press, 1965. p. 205-234.

PEREIRA, A.R. Balanço hídrico de um solo podzolizado de Lins e Marília cultivado com cafeeiros. **Bragantia**, Campinas, v. 45, n. 2, p. 239-247, 1986.

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

PEREIRA, A.R.; CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. **Agrometeorologia de cafezais no Brasil**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. 127 p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v. 12, n. 3, p. 211-216, 1988.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; SAUNDERS, L.C.U.; CADIMA, A.Z. Dinâmica da água em solo cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 3, n. 1, p. 1-5, 1979.

RENA, A.B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.). **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Potafos, 1986. p. 13-86.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente Excel<sup>TM</sup> para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

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, n. 1, p. 11-19, 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.; FARIA, M.A.; REIS, R.P. Viabilidade técnico-econômica do uso de sistema de irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7 n. 1, p. 37-44, 2003.

SILVA, A.L.; REICHARDT, K.; ROVERATTI, R.; BACCHI, O.O.S.; TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; DOURADO-NETO, D. On the use of soil hydraulic conductivity functions in the field. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, n. 1, p. 162-170, 2007.

SILVA, A.L.; ROVERATTI, R.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; TIMM, L.C.; BRUNO, I.P.; OLIVEIRA, J.C.M.; DOURADO-NETO, D. Variability of water balance components in a coffee crop in Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 2, p. 105-114, 2006.

SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Análise dos atributos climáticos do Estado da Bahia**. Salvador: Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, 1998. 85 p. (Série Estudos e Pesquisa, 38).

THORNTHWAITE, C.W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, London, n. 38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p. 1955.

TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. Water balance of a sugarcane crop: quantitative and qualitative aspects of its measurement. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6 n. 1, p. 57-62, 2002.

URACH, F.L. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação**. 2007. 79 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola), - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

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

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, n. 3/4, p. 317-325, 1995.

WILLMOTT, C.J.; ROWE, C.M.; MINTZ, Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. **Journal of Climatology**, London, v. 5, p. 589-606, 1985.

### 3 ESTIMAÇÃO DA LIXIVIAÇÃO DE NITRATO ATRAVÉS DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO PARA UMA CULTURA DE CAFÉ FERTIRRIGADA

#### Resumo

As perdas de nitrato -  $\text{NO}_3^-$  do perfil do solo e as quantidades de drenagem profunda -  $Q_i$  devem ser monitoradas preferencialmente em ocasiões de altas precipitações pluviométricas e irrigações quando o uso de insumos nitrogenados é elevado. O estudo aqui apresentado teve os objetivos de avaliar os modelos de evapotranspiração potencial -  $\text{ET}_p$  de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM para monitoramento da lixiviação de  $\text{NO}_3^-$ , através do balanço hídrico - BH, determinando-se a concentração e a quantidade a 1 m de profundidade no perfil do solo de uma área de produção de café sob fertirrigação via pivô-central, utilizando-se duas doses de nitrogênio - N,  $T_{400}$  que corresponde a  $400 \text{ kg ha}^{-1}$  de N e  $T_{800}$  que corresponde a  $800 \text{ kg ha}^{-1}$ . Neste trabalho, os componentes do BH precipitação - P e irrigação - I foram considerados em conjunto para verificar o efeito de P + I, e os componentes ascensão capilar - AC,  $Q_i$  e runoff - RO foram considerados em conjunto e iguais a  $Q_i$ , por se tratar de solo arenoso com declive 0%. A AC é uma contribuição de água que vem de profundidades maiores que 1 m, que são contabilizadas indiretamente pelo armazenamento. Como o lençol freático é profundo e com excesso de água o perfil está constantemente sob drenagem, e esse componente foi considerado igual a 0. O BH calcula um componente chamado excesso - EXC, que inclui as demais perdas de água do sistema, no caso a  $Q_i$  e o RO. Como a área onde o cafezal foi instalado é praticamente plana, assume-se que  $\text{RO} = 0$  e  $\text{EXC} = Q_i$ . O volume de controle considerado tem 0 - 1 m de profundidade, considerando-se que esta camada de solo é a responsável pela disponibilidade de água para a cultura. Ela foi estabelecida porque, praticamente, a totalidade do sistema radicular do café se encontra nesta camada e ela é responsável tanto pela absorção de água como da do N, principalmente  $\text{NO}_3^-$  pelas plantas. Desta forma, a água drenada abaixo de 1 m pode ser considerada para os cálculos da lixiviação do  $\text{NO}_3^-$ . Com o uso dos modelos de  $\text{ET}_p$  de TH e PM através do BH foi possível estimar as perdas por lixiviação de  $\text{NO}_3^-$ , com isso podendo-se fazer o monitoramento da contaminação da água das camadas mais profundas do solo ou que venha a atingir a água do lençol freático propriamente dito. A concentração de  $\text{NO}_3^-$  do  $T_{400}$  ( $5,42 \text{ mg L}^{-1}$ ) foi inferior em relação ao  $T_{800}$  ( $25,01 \text{ mg L}^{-1}$ ), sendo que o segundo atingiu uma concentração 2,5 vezes superior ao limite tolerado pela legislação ( $10,00 \text{ mg L}^{-1}$ ). A quantidade de  $\text{NO}_3^-$  lixiviado pelo  $T_{800}$  ( $153,0 \text{ kg ha}^{-1}$ ) foi, em média, mais que 6 vezes superior que o  $T_{400}$  ( $24,2 \text{ kg ha}^{-1}$ ), caracterizando-se um potencial problema ambiental.

Palavras-chave: Thornthwaite; Penman-Monteith; Evapotranspiração; Drenagem profunda; Uréia

#### Abstract

Nitrate -  $\text{NO}_3^-$  from the soil profile and the amounts of deep drainage -  $Q_i$  have mainly to be monitored during periods of high precipitation or irrigation and when N inputs are high. This report had the objectives of evaluating the potential evapotranspiration -  $\text{ET}_p$  models of Thornthwaite - TH and of Penman Monteith - PM to monitor  $\text{NO}_3^-$  leaching through the use of

water balances - WB and the measurement of the nitrate concentration at 1 m depth, in a fertigated coffee producing area under central pivot irrigation. The applied fertilizer rates were:  $T_{400}$  corresponding to  $400 \text{ kg ha}^{-1}$  of N and  $T_{800}$ ,  $800 \text{ kg ha}^{-1}$  of N. Rainfall - P and irrigation - I were considered together, capillary rise,  $Q_i$  and runoff - RO were also considered together as only  $Q_i$  because the area is very flat (almost 0% slope) and the water table is located several meters below soil surface. The WB program calculates a component called excess - EXC that includes other losses of the system, in this case  $Q_i$  and RO, so that  $RO = 0$  and  $EXC = Q_i$ . For the WB calculations the considered control volume was 0 – 1 m deep, considering that this volume contains the totality of the active root system, responsible of the  $\text{NO}_3^-$  absorption by the plant, so that the fluxes below this depth can be considered as leaching. Through the  $ET_p$  models of TH and PM applied to the WB program it was possible to estimate  $\text{NO}_3^-$  leaching losses. The average  $\text{NO}_3^-$  concentration of treatment  $T_{400}$  ( $5.42 \text{ mg L}^{-1}$ ) was much less than that of  $T_{800}$  ( $25.01 \text{ mg L}^{-1}$ ), the last one being 2.5 times above the tolerance limit of the Brazilian legislation ( $10.00 \text{ mg L}^{-1}$ ). The amount of leached  $\text{NO}_3^-$  in  $T_{800}$  ( $153.0 \text{ kg ha}^{-1}$ ) was six times greater than that of  $T_{400}$  ( $24.2 \text{ kg ha}^{-1}$ ), characterizing a potential environmental problem.

Keywords: Thornthwaite; Penman-Monteith; Evapotranspiration; Deep drainage; Urea

### 3.1 Introdução

O aumento da concentração de nitrato -  $\text{NO}_3^-$  na água subterrânea é coincidente em áreas agrícolas onde se almejam altas produtividades em resposta à quantidade de adubação nitrogenada aplicada, sendo de grande importância a racionalização da aplicação de fertilizantes para garantir a sustentabilidade do meio ambiente. O íon  $\text{NO}_3^-$  é o mais abordado na literatura, por ser altamente solúvel em água e de fácil lixiviação no perfil do solo (COSTA et al., 1999; HANSEN et al., 2000; ASSADI et al., 2002; BASSO et al., 2005). Diversos fatores podem comprometer a qualidade da água subterrânea: o destino final do esgoto doméstico e industrial em fossas e tanques sépticos, a disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos e industriais, postos de combustíveis e de lavagem de automóveis e a modernização da agricultura, representam fontes de contaminação de  $\text{NO}_3^-$ , além das bactérias e vírus patogênicos, parasitas, substâncias orgânicas e inorgânicas (SILVA; ARAÚJO, 2003).

Segundo Bologna et al. (2006), a perda de um nutriente em profundidade ocorre quando ele é arrastado no perfil do solo, juntamente com a água, para fora do ambiente de exploração do sistema radicular das plantas em cobertura, o que pode acarretar redução na eficiência de uso deste nutriente, queda na fertilidade do solo e até mesmo a contaminação do lençol freático. Neste sentido Costa et al., (1999) citam que elementos liberados por resíduos podem contaminar

os mananciais subterrâneos ou serem arrastados pela superfície para rios e lagos, degradando a qualidade dos ecossistemas aquáticos.

O  $\text{NO}_3^-$  no solo é oriundo do processo de mineralização da matéria orgânica ou do uso de fertilizantes nitrogenados que são aplicados nas culturas. Por outro lado, quando o  $\text{NO}_3^-$  na solução do solo não é absorvido pelas plantas ou imobilizado pela microbiota do solo, ele pode ser facilmente lixiviado, pois apresenta carga negativa, sendo pouco adsorvido pelos colóides do solo que apresentam predominantemente cargas negativas (PRIMAVESI et al., 2006). Os íons  $\text{NO}_3^-$  são fortemente repelidos pelas cargas negativas dos colóides do solo. Não sendo retidos pela fase sólida, tendem a permanecer na solução do solo, ficando disponíveis para serem lixiviados pelas águas de percolação, o que resulta em perdas de nitrogênio - N que poderia ser utilizado pelas plantas e em contaminação de lençóis freáticos e cursos de água (DYNIA; CAMARGO, 1999).

Em solos positivamente carregados, os quais têm capacidade de troca aniônica não desprezível, o  $\text{NO}_3^-$  pode ser adsorvido. A textura do solo e o conteúdo de matéria orgânica têm grande influência nas perdas por lixiviação (COSTA et al., 1999). Solos de textura mais grosseira e de baixo conteúdo de matéria orgânica tendem a permitir maiores perdas de  $\text{NO}_3^-$  por lixiviação, enquanto as menores perdas devem ocorrer em solos argilosos (MUCHOVEJ; RECHCIGL, 1994). Em geral, para os mesmos autores, perdas de  $\text{NO}_3^-$  por lixiviação em solos arenosos são mínimas quando o N é aplicado em taxas menores que  $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e aumenta rapidamente para taxas maiores. Nesses solos, os limites de potabilidade, que é  $10 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$  expresso em N (BRASIL, 2004; BRASIL, 2008), da água subterrânea foram suplantados para taxas de aplicação entre  $350$  e  $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de N em áreas cultivadas com pastos.

Além disso, há a preocupação quanto à contaminação dos mananciais com nutrientes, principalmente o  $\text{NO}_3^-$  (STEWART et al., 2006). O aumento da concentração de  $\text{NO}_3^-$  na água de drenagem profunda -  $Q_i$  e o aumento da contaminação do lençol freático devido às altas taxas de aplicação dos fertilizantes nitrogenados é fenômeno observado mundialmente. Neste caso, o efeito da taxa de aplicação de N, a produtividade e as perdas de  $\text{NO}_3^-$  na água de  $Q_i$  necessitam ser quantificados para permitir um adequado desenvolvimento econômico e ao mesmo tempo, garantir o desenvolvimento sustentável das práticas agrícolas. Reichardt (1979), afirma que o aproveitamento do N por uma cultura pode ser sensivelmente afetado pela dinâmica da água no solo.

Os fatores que influenciam a perdas de  $\text{NO}_3^-$  para o lençol freático são, em maior escala, as precipitações pluviais, a taxa de aplicação de fertilizante e a textura do solo. Dentre esses fatores, vários são antrópicos e podem ser manejados para minimizar os efeitos de poluição, mantendo-se o benefício do fertilizante. Chuvas mais intensas que escoam o  $\text{NO}_3^-$  lixiviado podem entrar em rios e águas subterrâneas e iniciar processo de eutroficação em ecossistemas naturais normalmente pobres em N (PRIMAVESI et al., 2002). A textura do solo é outro fator importante que influencia a dinâmica dos íons em solução, pois a retenção física, em função do tamanho de partícula exerce forte influência sobre a capacidade de suporte do solo. Sendo assim, agregados de menor tamanho promovem maior retenção de amônio (COELHO et al., 2000).

As perdas de  $\text{NO}_3^-$  no perfil do solo e as quantidades de  $Q_i$  devem ser monitoradas em ocasiões de altas precipitações pluviométricas, quando o uso de insumos nitrogenados é elevado, para que sejam tomadas medidas que promovam aumento da eficiência do uso do N aplicado com a finalidade de otimizar o sistema de produção economicamente sustentável, diminuindo o impacto ambiental negativo. Neste contexto foi realizado um estudo com os objetivos de avaliar os modelos de evapotranspiração potencial -  $\text{ET}_p$  de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM no estabelecimento de balanços hídricos para monitoramento da lixiviação de nitrato -  $\text{NO}_3^-$ , determinando-se a concentração e a quantidade na solução do solo a 1 m de profundidade no perfil do solo de uma área de produção de café sob fertirrigação via pivô-central, utilizando-se duas doses de N, com forte suspeita de perdas por lixiviação devido às altas doses empregadas, que giram em torno de  $600 \text{ kg ha}^{-1}$  de N.

## **3.2 Material e Métodos**

### **3.2.1 Localização e características da área experimental**

O estudo foi desenvolvido em uma cultura de café fertirrigada por pivô central, onde se aplicam altas doses de nitrogênio - N e, devido a isso, apresenta um grande potencial para perdas de nitrato -  $\text{NO}_3^-$  abaixo da zona radicular. O estudo foi realizado durante um ano, iniciando-se em 1º de agosto de 2008 e prosseguindo até 31 de julho de 2009, com foco na Fazenda Morena, de propriedade da Agropecuária Arakatu, no município de Barreiras - BA. As coordenadas geográficas do local são:  $11^\circ 46' \text{ S}$  e  $45^\circ 43' \text{ W}$ , a 740 m de altitude. A área é representativa do

planalto central do Brasil, anteriormente coberto pelo cerrado e que hoje apresenta extensas áreas cultivadas, muitas delas com auxílio de pivôs centrais. O solo é classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Alumínico típico (EMBRAPA, 2006), cuja análise granulométrica encontra-se na Tabela 3.1. O clima local, segundo a classificação de Köppen (1931), pertence ao tipo Aw – tropical subúmido com chuvas de verão e período seco bem definido no inverno. Nesta região, a precipitação varia de 800 a 1800 mm por ano, com sua concentração nos meses de outubro a abril (SEI, 1998).

Tabela 3.1 – Análise granulométrica no solo em diferentes profundidades

Profundidade m	Areia (%) 2 - 0,05 mm	Silte (%) 0,05-0,002	Argila (%) <0,002 mm	Classe de textura
0-0,2	81	3	16	média arenosa
0,2-0,4	79	3	18	média arenosa
0,4-0,6	74	3	23	média arenosa
0,6-0,8	72	3	25	média argilosa
0,8-1	70	2	28	média argilosa
0-1	75,2	2,8	22,0	-

Na Tabela 3.2 encontram-se as características de retenção de água que levaram à estimativa de sua capacidade de água disponível - CAD de 86,4 mm para o perfil de 1 m de profundidade, assumido conter a quase totalidade do sistema radicular. Considerou-se para efeito de balanço hídrico - BH que toda água que ultrapassasse esta camada corresponde à drenagem profunda -  $Q_i$ .

Tabela 3.2 - Armazenamento - ARM e capacidade de água disponível - CAD estimados pelo modelo de van Genuchten (1980) em função da profundidade do solo - Prof, onde  $\theta_{330}$  é a umidade volumétrica na capacidade de campo e  $\theta_{15000}$  no ponto de murcha permanente

Prof m	$\theta_{330}$ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	ARM mm	$\theta_{15000}$ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	ARM mm
0-0,2	0,172	34,4	0,107	21,4
0,2-0,4	0,169	33,8	0,102	20,4
0,4-0,6	0,183	36,6	0,108	21,6
0,6-0,8	0,214	42,8	0,114	22,8
0,8-1	0,242	48,4	0,117	23,4
ARM Total		196,0		109,6
CAD				86,4

Na Tabela 3.3 encontram-se as características químicas do solo, de relevância para o processo de lixiviação de  $\text{NO}_3^-$  por arraste pela água.

Tabela 3.3 – Análise química de solo em diferentes profundidades – Prof

Prof	pH	MO	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V	m	N-Total
m	CaCl <sub>2</sub>	g dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>					mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>				%		mg L <sup>-1</sup>
0-0,2	4,7	25	114	10	2	23	9	3	31	34	65	52	8	1080
0,2-0,4	3,6	20	40	21	1	5	3	9	34	9	43	21	50	620
0,4-0,6	3,8	16	5	60	0,8	4	2	9	31	6,8	37,8	18	57	532
0,6-0,8	3,6	14	1	72	0,8	3	1	9	31	4,8	35,8	13	65	520
0,8-1	3,8	14	1	96	0,8	2	1	10	31	3,8	34,8	11	72	505
0-1	3,9	17,8	32,2	51,8	1,1	7,4	3,2	8,0	31,6	11,7	43,3	23,0	50,4	631,4

SB = soma de bases, T = capacidade de troca de cátions, V = saturação de bases, m = saturação por alumínio.

O cafezal da Fazenda Morena constitui-se de plantas da espécie *Coffea arabica* L., variedade Catuaí Vermelho, plantadas em 15 de janeiro de 2001, com espaçamento 3,8 m nas entrelinhas e 0,5 m entre plantas, em arranjo circular disposto sob sistema de pivô central, com área útil de 80 ha, adaptado para irrigação e fertirrigação. Esta fazenda realiza adubação de acordo com a estimativa de produção, aplicando aproximadamente 600 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de N via fertirrigação com uréia. A média de produtividade da propriedade é de 56 sacas ha<sup>-1</sup> ano, onde a colheita é realizada de maio a junho.

O manejo normal da fertirrigação é feito com auxílio de emissores do tipo LEPA (low energy precision application – aplicação precisa de baixo consumo de energia/pressão) que distribuem a água de forma localizada sobre as linhas circulares de café, de tal forma que as entrelinhas praticamente não recebem água. A operação do pivô central é praticamente contínua durante o ano todo (com pequenas variações em épocas muito chuvosas e interrupção na colheita), fornecendo de 2 a 4 mm dia<sup>-1</sup> de água com adição de produtos de fertirrigação em dias alternados. Na Tabela 3.4 encontra-se o volume de irrigação - I e dados climáticos da região, para o período do estudo. A precipitação - P e a I foram medidas na área do pivô central escolhido. Os dados de temperatura média do ar, umidade média do ar, radiação solar líquida e a velocidade média do ar são provenientes da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET mais próxima, que se localiza no Município de Barreiras – BA.

Tabela 3.4 - Precipitação - P, irrigação - I, temperatura média - T, umidade relativa do ar - UR, radiação solar líquida - Rn e velocidade do vento - V do período do estudo (DAI = dias após início)

Mês/Ano	DAI	P	I	P + I	T	UR	Rn	V
		mm			°C	%	MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>	m s <sup>-1</sup>
AGO/08	15	0,0	118,1	118,1	24,0	42,4	10,2	1,6
SET/08	46	31,5	128,8	160,3	26,4	49,5	10,4	1,9
OUT/08	76	0,0	139,9	139,9	28,5	36,1	11,8	2,2
NOV/08	107	314,5	69,6	384,1	26,8	70,8	7,8	1,5
DEZ/08	137	195,0	22,4	217,4	25,3	76,3	9,7	1,4
JAN/09	168	230,0	26,5	256,5	25,4	76,6	10,7	1,3
FEV/09	199	185,5	11,2	196,7	25,5	77,5	10,2	1,1
MAR/09	227	350,5	7,5	358,0	25,7	76,3	9,7	1,0
ABR/09	258	108,5	26,1	134,6	24,7	83,5	7,9	0,9
MAI/09	288	67,0	48,5	115,5	23,7	78,1	8,0	1,0
JUN/09	319	52,5	46,6	99,1	22,6	76,2	8,4	0,9
JUL/09	349	0,0	52,2	52,2	22,2	69,9	9,3	1,1
Anual	-	1535,0	697,3	2232,3	25,1	67,8	9,5	1,3

### 3.2.2 Balanço hídrico climatológico sequencial

Para este estudo, o balanço hídrico - BH foi feito de forma diária, quinidial, decendial e quinzenal. Como o período total é de 365 dias, o BH quinidial (cada 5 dias) mostrou-se o mais satisfatório para acompanhar as relações hídricas no sistema solo-café-atmosfera. Para isso, foram estimadas as médias dos parâmetros climáticos de interesse a cada 5 dias para se chegar aos valores mensais. O BH é a contabilização da água do solo resultante da aplicação do Princípio de Conservação de Massa num volume de solo vegetado. A variação do armazenamento no volume considerado -  $\Delta ARM$  por intervalo de tempo representa o BH entre o que entrou e o que saiu de água do volume de controle eq. (3.1):

$$\pm \Delta ARM = P + I - ET_r + AC - Q_i - RO \quad (3.1)$$

onde: P = precipitação

I = irrigação

$ET_r$  = evapotranspiração real

AC = ascensão capilar

$Q_i$  = drenagem profunda

$$RO = \text{runoff}$$

Neste trabalho, os componentes P e I foram considerados em conjunto para verificar o efeito de P + I, e os componentes ascensão capilar - AC,  $Q_i$  e runoff - RO foram considerados em conjunto e iguais a  $Q_i$ , por se tratar de solo arenoso com declive 0%. A AC é uma contribuição de água que vem de profundidades maiores que 1 m, que são contabilizadas indiretamente pelo ARM. Como o lençol freático é profundo e com excesso de água, o perfil está constantemente sob drenagem, esse componente foi considerada igual a 0. O BH calcula um componente chamado excesso - EXC, que inclui as demais perdas de água do sistema, no caso a  $Q_i$  e o RO. Como a área onde o cafezal foi instalado é praticamente plana, assume-se que  $RO = 0$  e  $EXC = Q_i$ . O volume de controle considerado tem 0 – 1 m de profundidade, considerando-se que esta camada de solo é a responsável pela disponibilidade de água para a cultura. Ele foi estabelecido porque praticamente a totalidade do sistema radicular do café se encontra nesta camada e ela é responsável tanto pela absorção de água como do N, principalmente  $NO_3^-$ , pelas plantas. Desta forma, a água drenada abaixo de 1 m pode ser considerada para os cálculos da lixiviação do  $NO_3^-$ .

Na elaboração do BH sequencial por Thornthwaite e Mather (1955), foi utilizada uma planilha em ambiente Excel (ROLIM; SENTELHAS; BARBIERI, 1998), onde a evapotranspiração potencial -  $ET_p$  é calculada pelo modelo de Thornthwaite - TH (1948) e que também foi adaptado para o modelo de Penman-Monteith - PM (1965) por Allen et al. (1989).

### 3.2.3 Adubação com uréia

O adubo utilizado foi uréia com aplicação quinzenal manual devido à presença de parcelas com doses distintas, que não podem ser monitoradas pelo aspersor LEPA. A adubação manual da uréia foi feita na 4ª linha (central) dos cafeeiros, utilizando-se regador e escadas. A uréia foi diluída em água na mesma quantidade da I, procurando-se simular a fertirrigação normalmente realizada na fazenda. A linha 4 compreende um círculo com 144 cafeeiros plantados em renque e que, pelos motivos acima abordados, não recebeu a fertirrigação com N. As parcelas tiveram distribuição casual ao longo do círculo e cada uma delas foi formada de 7 plantas incluindo a bordadura que recebeu sua dose de N do tratamento. Foram utilizados dois tratamentos com quatro repetições, onde cada repetição corresponde à uma parcela descrita anteriormente:

- T<sub>400</sub> (400 kg ha<sup>-1</sup> de N), 76 g planta<sup>-1</sup> de N correspondentes a 169 g planta<sup>-1</sup> de uréia;
- T<sub>800</sub> (800 kg ha<sup>-1</sup> de N), 152 g planta<sup>-1</sup> de N correspondentes a 338 g planta<sup>-1</sup> de uréia.

### 3.2.4 Lixiviação:

Na planta central de cada parcela foi instalado um extrator de solução do solo com cápsula porosa (Figura 3.1), abaixo da saia da planta a 1,0 m de profundidade, para a realização de avaliações periódicas da lixiviação de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> em período chuvoso nos tratamentos T<sub>400</sub> e T<sub>800</sub>. Para a extração da solução do solo faz-se vácuo no extrator da ordem de 500 mmHg mediante a utilização de uma bomba de vácuo; após 12 horas, a solução do solo foi extraída em recipiente de vidro após a quebra do vácuo entre o extrator e o solo. A solução foi armazenada em recipientes de vidro rotulados de acordo com o extrator e o dia da coleta. Após a coleta das soluções, as amostras foram preservadas em ácido clorídrico a uma relação 1% do volume coletadas e congeladas para evitar alterações e encaminhadas para análise da concentração de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (GINÉ et al., 1980) pelo método FIA (Flow Injection Analysis). Em geral, são coletados 10 a 50 mL e, como as quantidades de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> são baixas, estas quantidades não são significantes para as análises químicas e a solução mais comum é fazer uso de amostras combinadas. Em nosso caso, optou-se por um extrator por repetição, assumindo que os volumes e concentrações do extrato seriam suficientes para as análises. Durante o processo de análise, ao final do experimento, verificou-se que tanto o volume de solução do solo como as quantidades de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> não eram suficientes para a análise e optou-se pela junção das amostras das 4 repetições em uma amostra média que representasse a solução do solo daquele respectivo tratamento. Isto inviabilizou uma análise estatística que seria útil para o cálculo de erro na estimativa final da lixiviação. Foi também feita avaliação de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> na solução de solo, que foi sempre a níveis não detectáveis e, assim, o N total da amostra de solução do solo foi considerada igual à do íon NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. O método utiliza a redução de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e posterior espectrofotometria deste através da reação de Griess modificada. A amostra é introduzida no sistema de forma que há uma tamponização com uma solução mista de Cloreto de Amônio, Tetraboreto de Sódio e EDTA de Sódio. Depois, passa-se por coluna de Cádmio coperizado, em seguida é inserido o reagente de Griess modificado dando-se então a reação com a formação da cor rosada, a qual é impulsionada para leitura no espectrofotômetro na faixa de 535 nanômetros (nm).

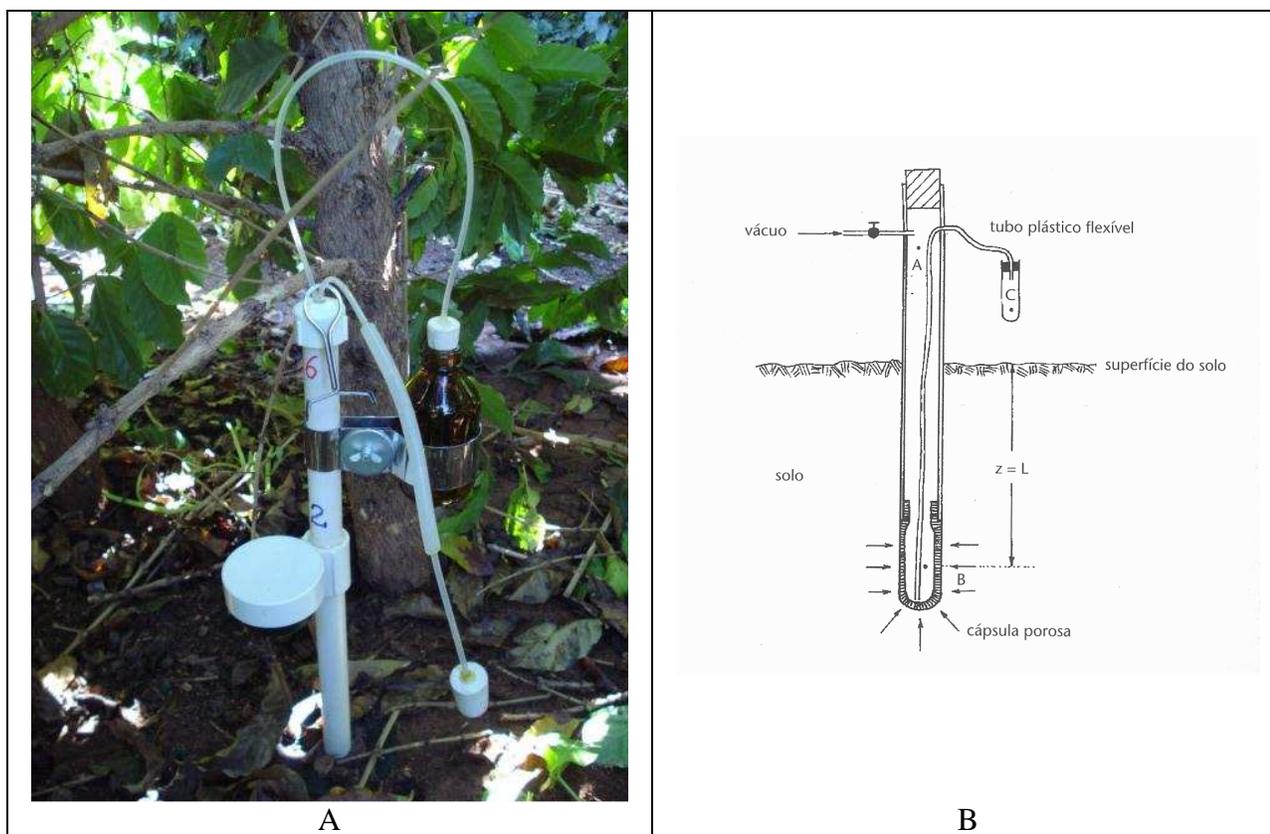


Figura 3.1 - Vista dos extratores de solução do solo a vácuo instalados nas parcelas para o cálculo da quantidade de nitrato lixiviado (A) e esquema do extrator de solução do solo (REICHARDT e TIMM, 2004) (B)

Para o cálculo do fluxo de  $\text{NO}_3^-$  lixiviado há necessidade de um valor médio de concentração de  $\text{NO}_3^-$  e o estabelecimento da área pela qual este N passa. No experimento em questão, o adubo é aplicado em área concentrada, isto é, na copa da planta sem distribuir na entrelinha. Sendo o espaçamento entre plantas  $3,80 \times 0,50 \text{ m} = 1,90 \text{ m}^2$ , a área de aplicação do adubo é  $1,90 \times 0,5 = 0,95 \text{ m}^2$  uma vez que a copa das plantas cobre aproximadamente a metade do espaçamento (Figura 3.2B). Os extratores estão localizados abaixo da copa, portanto representam bem a área adubada, mas não a área da entrelinha. A área de lixiviação por planta para efeito de concentração de  $\text{NO}_3^-$  foi de  $1,425 \text{ m}^2$ , considerando-se concentração total medida pelos extratores como válida nos  $1,90 \text{ m}$  centrais e abaixo da copa e com a concentração diminuindo para zero até o centro da entrelinha (Figura 3.2A).

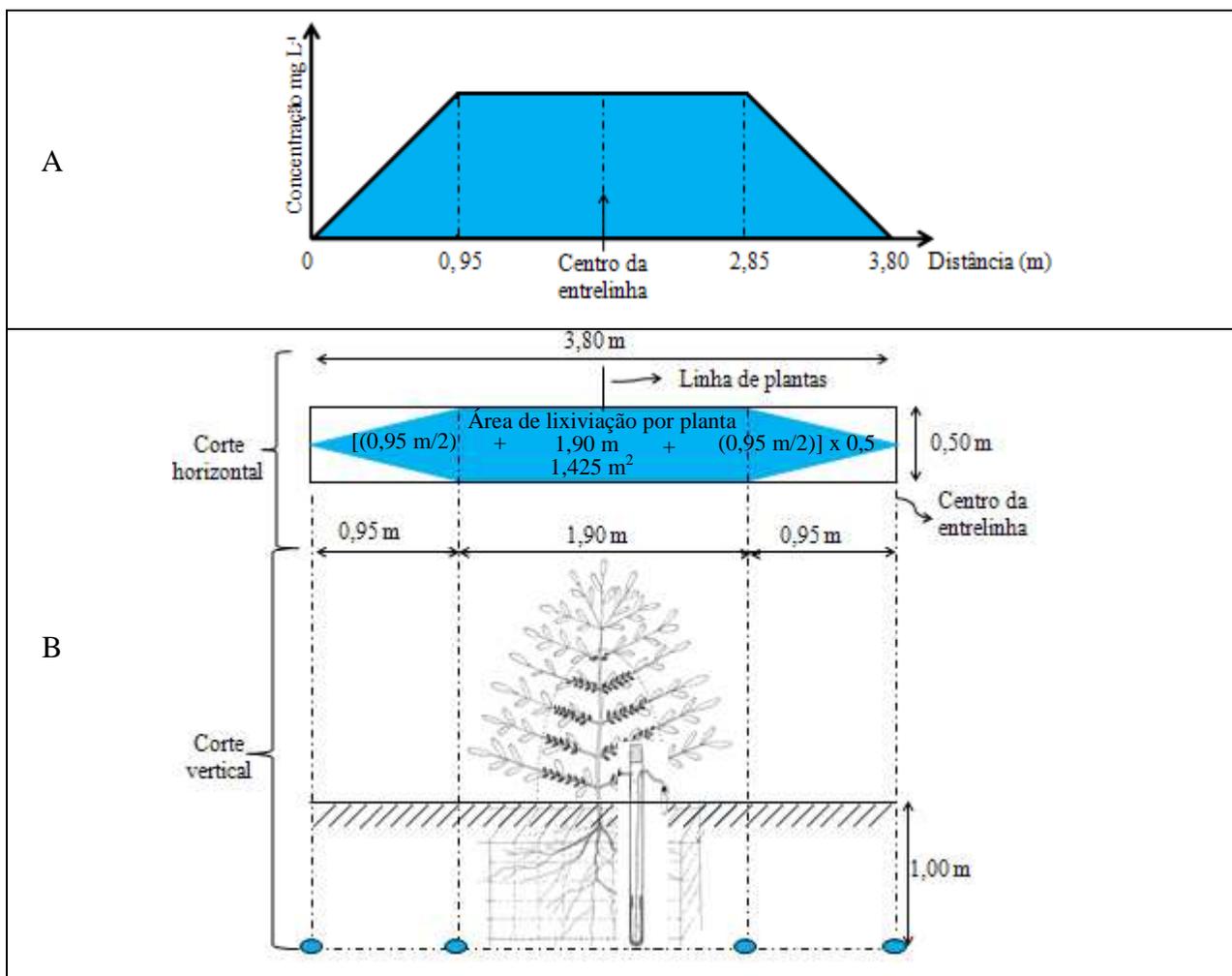


Figura 3.2 - Concentração de nitrato -  $\text{NO}_3^-$  na solução do solo a 1 m de profundidade (A) em cafezal sob fertirrigação para estimação da lixiviação determinando a área de lixiviação por planta (B)

A solução do solo foi retirada apenas a partir do início do período chuvoso até o término do estudo (novembro a julho), entre 10 e 14 dias após a aplicação de uma dose do fertilizante, porém, sempre antes da próxima aplicação. Desta forma, foi possível acompanhar a lixiviação de  $\text{NO}_3^-$  durante um ano de aplicações quinzenais dos tratamentos. A partir dos dados de  $Q_i$  e concentração de  $\text{NO}_3^-$  -  $C_i$  medidos em um período  $\Delta t_i$  de um mês, foi possível calcular a perda de  $\text{NO}_3^-$  por lixiviação -  $PL_i$  no período  $\Delta t_i$  [eq. (3.2)]:

$$PL_i = Q_i \cdot C_i \quad (3.2)$$

onde  $Q_i$  ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) é drenagem profunda calculada pelo programa de BH, no período  $\Delta t_i$  (1 mês) transformada de

mm em quilos de água drenada por hectare.  $C_i$  é a concentração de  $\text{NO}_3^-$  na solução do solo ( $\text{mg L}^{-1}$  transformada para  $\text{kg kg}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$  expresso em N). A perda anual  $\text{PL}_a$  ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ) foi dada pelo somatório de todos os  $\text{PL}_i$  avaliados no ano conforme a eq. (3.3):

$$\text{PL}_a = \sum_{i=1}^n \text{PL}_i \quad (3.3)$$

### 3.3 Resultados e Discussão

No cafezal em estudo ocorreram aplicações periódicas de insumos via fertirrigação; sua contabilização somada com a água de precipitações - P + I pode ser observada na Tabela 3.5 em cada mês. Nesta tabela também são observadas as concentrações médias de nitrato -  $\text{NO}_3^-$  expressa em nitrogênio - N em cada mês do período de estudo. Observa-se pelo decorrer dos meses que, em ambos os tratamentos, a concentração de  $\text{NO}_3^-$  teve uma tendência de aumento, com um decréscimo nos meses de março, maio e junho. A queda na concentração no mês de março pode ser atribuída, segundo Neto (2009) a demanda de macronutrientes pela planta que aumenta no estágio de granação do fruto, o que para nosso trabalho ocorreu no mês de março. A queda nos meses de maio e junho pode ser explicada por Bruno (2010) que, conduzindo trabalho sobre absorção de N no mesmo experimento, observou que nesse período as plantas de café acumularam maior quantidade de N na parte aérea e frutos e maior concentração de  $\text{NO}_3^-$  nas folhas. Também essas quedas na concentração nesses meses podem ser atribuídas à percolação da água de chuva para camadas inferiores a ação do sistema radicular das plantas na absorção do N (OLIVEIRA et al., 2001). No mês de julho houve um aumento nas concentrações de  $\text{NO}_3^-$  para ambos os tratamentos, que pode ser atribuído à decomposição da serrapilheira já que a queda das folhas foi pronunciada a partir do DAI 265 e à aplicação de uréia nesse mês com pouca absorção pela planta. A serrapilheira tem um relação C:N 31:1 (RICCI et al., 2010), ou seja, um material de rápida decomposição fazendo com que o N volte ao solo na forma de  $\text{NO}_3^-$ .

Tabela 3.5 – Precipitação + irrigação - P + I, concentração de nitrato -  $[\text{NO}_3^-]$  expresso em nitrogênio na solução do solo para o  $T_{400}$  e  $T_{800}$ , a 1 m de profundidade no período de estudo (DAI = dias após início)

Mês/Ano	DAI	P	I	P + I	Concentração $[\text{NO}_3^-]$	
					$T_{400}$	$T_{800}$
					mg L <sup>-1</sup>	
AGO/08	15	0,0	118,1	118,1	0,00	0,00
SET/08	46	31,5	128,8	160,3	0,00	0,00
OUT/08	76	0,0	139,9	139,9	0,00	0,00
NOV/08	107	314,5	69,6	384,1	2,20	8,87
DEZ/08	137	195,0	22,4	217,4	2,87	15,85
JAN/09	168	230,0	26,5	256,5	3,12	20,34
FEV/09	199	185,5	11,2	196,7	7,49	39,76
MAR/09	227	350,5	7,5	358,0	3,33	29,82
ABR/09	258	108,5	26,1	134,6	9,67	39,19
MAI/09	288	67,0	48,5	115,5	1,69	23,86
JUN/09	319	52,5	46,6	99,1	1,82	14,14
JUL/09	349	0,0	52,2	52,2	16,62	33,32
Anual	-	1535,0	697,3	2232,3	5,42	25,01

Outro ponto importante em relação às concentrações de  $\text{NO}_3^-$  (Tabela 3.5) diz respeito ao seu limite máximo para consumo humano na água. O Ministério da Saúde, com sua Portaria número 518 de 25 de março de 2004 (BRASIL, 2004) e a Resolução do CONAMA de 3 de abril de 2008 (BRASIL, 2008) estabelece como limite máximo para consumo humano 10 mg L<sup>-1</sup> de  $\text{NO}_3^-$  expresso em N. No entanto, Alaburda e Nishihara (1998) consideram que concentrações superiores a 3,0 mg L<sup>-1</sup> de  $\text{NO}_3^-$  são indicativas de contaminação por atividades antropogênicas. Observa-se que no  $T_{400}$ , praticamente em todo período de estudo não foi superado esse limite, com exceção do mês de julho. No entanto, para o  $T_{800}$  não podemos fazer essa mesma afirmação, pois, praticamente desde o início da contabilização das concentrações, ficou acima do limite permitido, sendo que nos meses de fevereiro e abril atingiu um valor praticamente quatro vezes o permitido e nos meses de março e julho, três vezes. O aumento das concentrações  $\text{NO}_3^-$  no mês de julho para ambos os tratamentos pode ter ocorrido devido a um acúmulo do  $\text{NO}_3^-$  em uma profundidade superior a 1 m no mês anterior e com a água da irrigação carregou esse  $\text{NO}_3^-$  a 1 m de profundidade. Segundo Oliveira et al. (2001), trabalhando com lodo de esgoto, aumentos nos teores de  $\text{NO}_3^-$  ocorreram em todas as profundidades, proporcionalmente às quantidades de N aplicadas através das doses crescentes do resíduo. Esses mesmos autores ainda citam que a movimentação do  $\text{NO}_3^-$  para as camadas subsuperficiais do solo foi evidenciada pelos teores

encontrados nas amostras de solução, coletadas nas profundidades de 0,6 e 0,9 m, propiciada pelas precipitações elevadas ocorridas nesse período. Contudo, não sabemos se essas concentrações iriam atingir camadas mais profundas, contaminando a água, pois não sabemos a profundidade exata em que se encontra o lençol freático e também pontos importantes referentes às cargas eletroquímicas do solo. Vale lembrar que esses valores foram encontrados na faixa limite de controle de nosso trabalho: a 1 m de profundidade.

Os dados de quantidade de  $\text{NO}_3^-$  lixiviado a 1 m de profundidade (Figura 3.3) mostram que para o  $T_{400}$  e para o  $T_{800}$  podem variar conforme o modelo adotado para cálculo de evapotranspiração potencial -  $ET_p$ , pois este tem influencia na quantidade de água da drenagem profunda -  $Q_i$  obtido pelo balanço hídrico - BH sequencial, que fazem parte da eq. (3.2). Independentemente disto, pode-se perceber que em cada mês são encontradas quantidades altas de  $\text{NO}_3^-$  no solo, principalmente para o  $T_{800}$ . A quantidade para ambos os tratamentos segue a mesma tendência de aumento e de declínio, tendendo a seguir o mesmo comportamento da  $P + I$  e de  $Q_i$ , ou seja, crescendo de outubro a março e decrescendo de março a julho. Em estudo realizado por Dynia (2000), verifica-se que Latossolos podem apresentar lixiviação de  $\text{NO}_3^-$ , como no nosso caso. Apesar de serem classificados como Latossolos, possuem altos teores de areia (Tabela 3.1). No mês de março foi encontrado o valor máximo de  $\text{NO}_3^-$  lixiviado para ambos os tratamentos, variando de 5,9 a 6,5  $\text{kg ha}^{-1}$  para  $T_{400}$ , respectivamente calculados por Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM, e  $T_{800}$  52,6 a 57,8  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$ , respectivamente por TH e PM. Essa diferença para o mesmo tratamento se deve à diferença de  $Q_i$  no solo pelos modelos adotados. Por TH ocorreu uma  $Q_i$  de 235,2 e por PM de 258,4 mm nesse mês. Essas perdas de  $\text{NO}_3^-$  ocorreram pela combinação das altas concentrações de  $\text{NO}_3^-$  na solução com os maiores fluxos de água no solo, o que evidencia a estreita relação entre o movimento da água no solo e a lixiviação de  $\text{NO}_3^-$  (OLIVEIRA et al., 2001). Para Primavesi et al. (2006), os picos nas quantidades de  $\text{NO}_3^-$  na camada superficial (0 a 40 cm) parecem ocorrer preferencialmente após eventos pluviais, sobretudo aqueles precedidos de períodos secos, dentro do período chuvoso, independentemente da aplicação de adubos nitrogenados. Araújo et al. (2004) citam em seu trabalho que no tratamento que recebeu uréia e calcário, a lixiviação de  $\text{NO}_3^-$  foi maior no decorrer do ensaio em relação ao tratamento que recebeu apenas uréia, sendo esses tratamentos visivelmente superiores à testemunha.

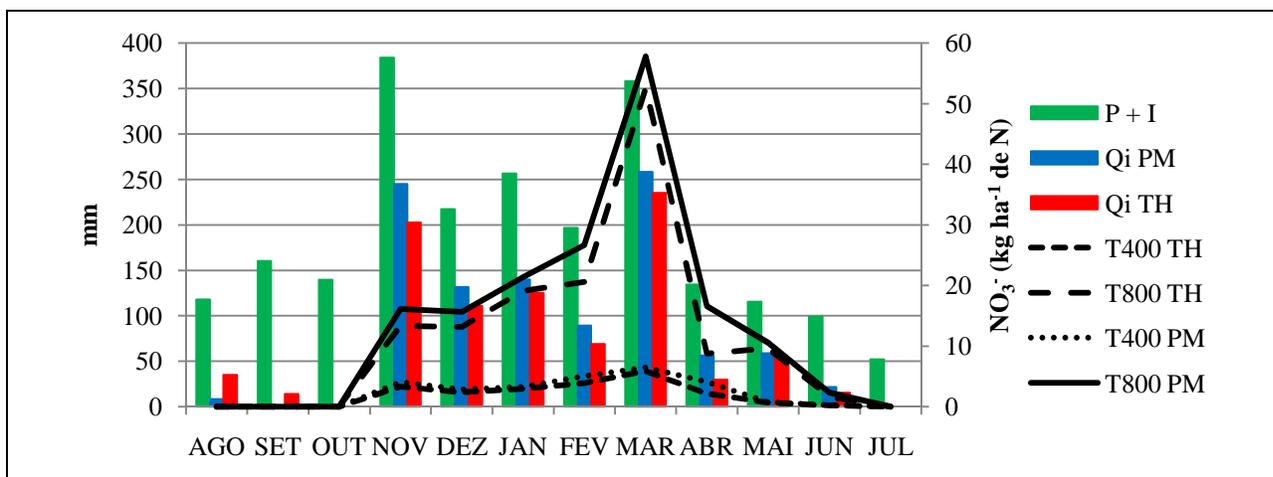


Figura 3.3 - Precipitação + irrigação - P + I, drenagem profunda - Q<sub>i</sub>, quantidade de nitrato - NO<sub>3</sub><sup>-</sup> lixiviado abaixo de 1 m, nos tratamentos T<sub>400</sub> e T<sub>800</sub> através do balanço hídrico pelos modelos de evapotranspiração potencial de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM

Os mesmos dados de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, quando apresentados na forma acumulada (Figura 3.4), mostram a mesma tendência de evolução durante o ano em estudo entre os tratamentos T<sub>400</sub> e entre os tratamentos T<sub>800</sub> utilizando-se o BH pelos modelos de ET<sub>p</sub> de TH e PM. Os coeficientes angulares das regressões menores que 1, da figura citada, indicam que as estimativas acumuladas no eixo das abscissas apresentam constantemente valores menores que o eixo das ordenadas.

Os dados da Figura 3.5 mostram os acumulados da Q<sub>i</sub> pelos dois métodos calculados com sua respectiva lixiviação de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Os valores de Q<sub>i</sub> tiveram a mesma tendência independente do modelo de cálculo da ET<sub>p</sub>, porém, com resultados finais diferentes: por TH foi encontrado uma Q<sub>i</sub> de 891,7 mm e por PM uma Q<sub>i</sub> 1010,5 mm. A Q<sub>i</sub> diferente influenciou o resultado final acumulado de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> [eq. (3.3)], onde para o T<sub>400</sub> foi encontrado 21,5 e 26,8 kg ha<sup>-1</sup> e para o T<sub>800</sub> foi encontrado 138,9 e 167,1 kg ha<sup>-1</sup> por TH e por PM, respectivamente. Em trabalho realizado por Oliveira et al. (2001), foram observadas perdas acima de 100 kg de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> em solos que receberam lodo de esgoto ou mesmo adubação nitrogenada convencional em cultura de cana-de-açúcar. Para Araújo et al. (2004), lixiviação de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nessa magnitude representa um óbvio problema ambiental. Além disso, Dynia (2000) cita que, mesmo em solos eletropositivos e com alto teor de argila, o NO<sub>3</sub><sup>-</sup> se movimentava além da zona de exploração radicular da maioria das culturas, alcançando profundidades entre 2 e 6 m e acabando por se acumular aí. Para Primavesi et al. (2006), a maior variação no teor de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ocorreu nas camadas superiores do solo, até 20 cm de profundidade, com tendência de movimentação do NO<sub>3</sub><sup>-</sup> para profundidades abaixo de 1 m,

para as doses de adubação nitrogenada maiores que  $500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Mesmo com doses realistas de adubos nitrogenados e em Latossolos muito argilosos, com altos teores de óxidos de Fe e Gibsita, a lixiviação de  $-3 \text{ NO}$  e  $+4 \text{ NH}$  é uma realidade. Isso implica em maiores cuidados no manejo da adubação nitrogenada em razão das enormes implicações econômicas e ambientais envolvidas (ARAÚJO et al., 2004).

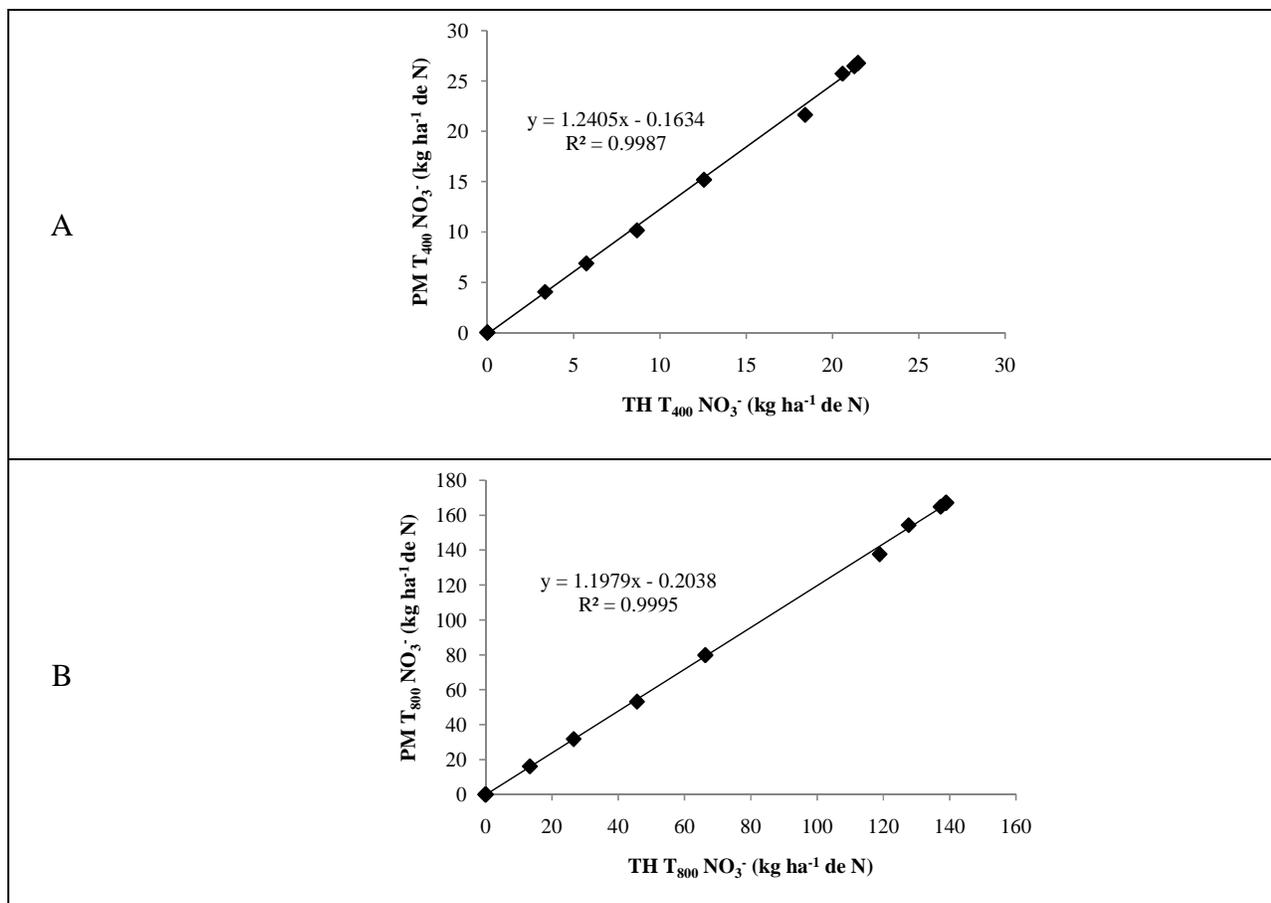


Figura 3.4 - Correlação entre os dados acumulados de quantidade de nitrato -  $\text{NO}_3^-$  através do balanço hídrico pelos modelos de evapotranspiração potencial de Thornthwaite - TH e pelo modelo de Penman Monteith - PM entre  $T_{400}$  (A) e  $T_{800}$  (B)

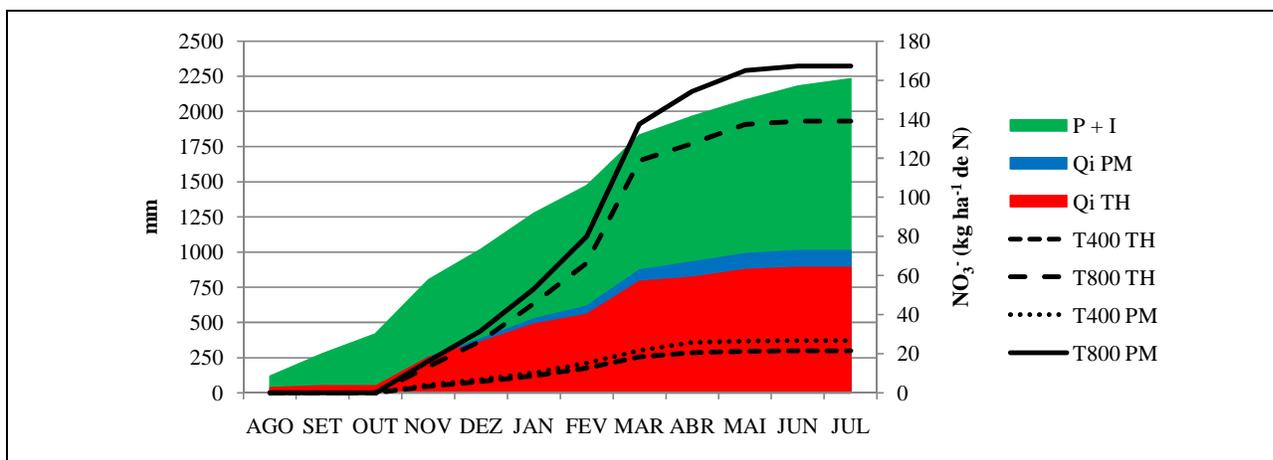


Figura 3.5 - Precipitação + irrigação acumulada - P + I, drenagem profunda acumulada - Qi, quantidade de nitrato - NO<sub>3</sub><sup>-</sup> acumulado lixiviado nos tratamentos T<sub>400</sub> e T<sub>800</sub> através do balanço hídrico pelos modelos de evapotranspiração potencial de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM

Os dados da Figura 3.6 mostram que ocorreu uma boa correlação entre os dados de P + I e lixiviação da quantidade acumulada de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> utilizando-se o BH pelos modelos de ET<sub>p</sub> de TH e PM.

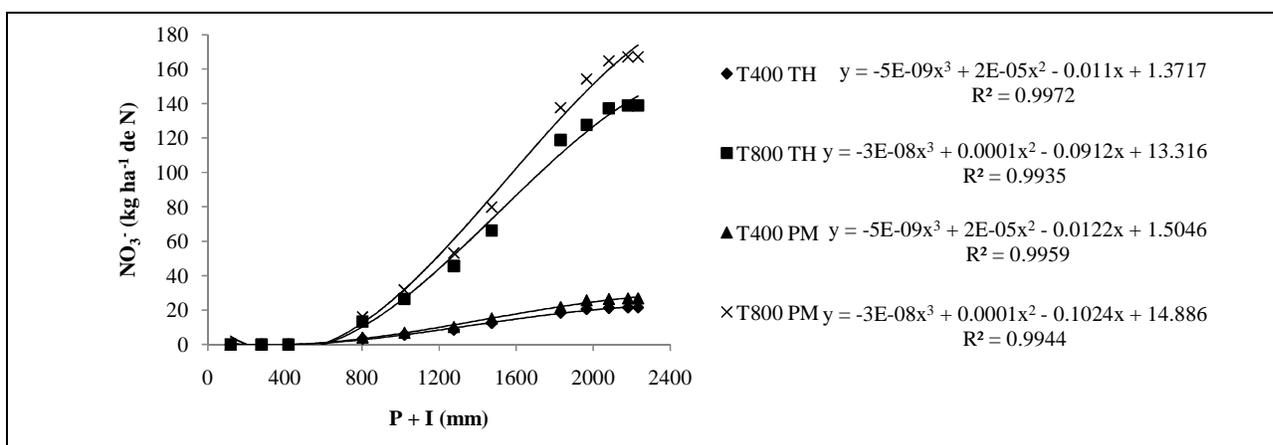


Figura 3.6 – Correlação entre os dados acumulados de precipitação + irrigação - P + I e lixiviação de nitrato - NO<sub>3</sub><sup>-</sup> para os tratamentos T<sub>400</sub> e T<sub>800</sub> através do balanço hídrico pelos modelos de evapotranspiração potencial de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM

Uma consideração final é feita com relação aos cálculos da ET<sub>p</sub>. Adotou-se evapotranspiração máxima do café - ET<sub>m</sub> igual a ET<sub>p</sub> tanto pelo modelo de TH e PM, pois os cálculos foram feitos com coeficiente de cultura - K<sub>c</sub> igual a 1. Como se sabe, o K<sub>c</sub> é difícil de ser medido devido à sua dependência da arquitetura do sistema solo-planta-atmosfera. Os dados da

literatura são bastante conflitantes com  $K_c$  variando desde 0,65 a 1,30, pois seu valor depende da metodologia de sua determinação, fenologia, idade e arranjo das planta e tratos culturais (SANTINATO; FERNANDES; FERNANDES, 1996; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002; PEREIRA; CAMARGO; CAMARGO, 2008). De qualquer forma, para diferentes valores de  $K_c$ , apenas muda a relação entre  $ET_m$  e  $Q_i$ . Se  $ET_m$  aumentar de um fator 1,2,  $Q_i$  se reduz de um fator 0,8. Assim, os dados aqui apresentados para  $K_c = 1$  podem ser avaliados para qualquer outro valor de  $K_c$ .

### 3.4 Conclusões

Com o uso do balanço hídrico - BH sequencial utilizando-se os modelos de evapotranspiração potencial -  $ET_p$  de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM, foi possível estimar as perdas por lixiviação de nitrato -  $NO_3^-$ , assim podendo-se fazer o monitoramento da contaminação das camadas mais profundas da água do solo ou que essa venha a atingir água do lençol freático propriamente dito.

A concentração de  $NO_3^-$  do  $T_{400}$  (5,42 mg L<sup>-1</sup>) foi inferior em relação ao  $T_{800}$  (25,01 mg L<sup>-1</sup>), sendo que o segundo atingiu uma concentração 2,5 vezes superior ao limite tolerado pela legislação (10,00 mg L<sup>-1</sup>). A quantidade de  $NO_3^-$  lixiviado pelo  $T_{800}$  (153,0 kg ha<sup>-1</sup>) foi, em média, mais que 6 vezes superior ao do  $T_{400}$  (24,2 kg ha<sup>-1</sup>), caracterizando-se um potencial problema ambiental.

### Referências

ALABURDA, J.; NISHIHARA, L. Presença de compostos de nitrogênio em águas de poços. **Revista Saúde Pública**, São Paulo, v. 32, n. 2, p. 160-165, 1998.

ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; BURMAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989.

ARAÚJO, A.R.; CARVALHO, J.L.N.; GUILHERME, L.R.G.; CURTI, H.; MARQUES, J.J. Movimentação de nitrato e amônio em colunas de solo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 3, p. 537-541, 2004.

ASSADI, M.E.; CLEMENTE, R.S.; GUPTA, A.D.; LOOF, R.; HANSEN, K.G. Impacts of fertigation via sprinkler irrigation on nitrate leaching and corn yield in an acid-sulphate soil in Thailand. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 52, p. 197-213, 2002.

BASSO, C.J.; CERETTA, C.A.; DURIGON, R.; POLETTO, N.; GIROTTO, E. Dejeito líquido de suínos: II-perdas de nitrogênio e fósforo por percolação no solo sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 6, p. 1305-1312, 2005.

BOLOGNA, I.R.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; FARONI, C.E.; FRANCO, H.C.J. Lixiviação de enxofre em solo arenoso cultivado com cana-de-açúcar. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DA ÁGUA E DO SOLO, 16., 2006, Aracaju. **Resumos...** Aracaju: UFS, SBCS, p. 45-46, 2006.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. O Ministério da Saúde aprova normas e padrões de potabilidade da água destinada ao consumo humano. **Diário Oficial**, Brasília, 26 mar. 2004. Seção I, p. 266-270.

\_\_\_\_\_. Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente – Ministério do Meio Ambiente) nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 7 abr. 2008. Seção1, p. 64-68.

BRUNO, I.P. **Eficiência da aplicação de uréia em fertirrigação de cafeeiros irrigados por pivô-central utilizando o traçador <sup>15</sup>N**. 2010. 116 p. Tese. (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010. No prelo.

COELHO, F.C; RUIZ, H. A.; FERREIRA, P.A.; FRANÇA, G.E.; ARAUJO, C.A.S.; DUARTE, M.A. Transporte do amônio em colunas com agregados de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 362-367, 2000.

COSTA, S.N.; MARTINEZ, M.A.; MATOS, A.T.; RAMOS, V.B.N. Mobilidade de nitrato em colunas de solo sob condições de escoamento não permanente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 190-194, 1999.

DYNIA, J. F. Nitrate retention and leaching in variable charge soils of a watershed in São Paulo State, Brazil. **Communications Soil Science in Plant Analysis**, New York, v. 31, n. 5/6, p. 777-791, 2000.

DYNIA, J.F.; CAMARGO, O.A. Retenção de nitrato num solo de carga variável, influenciada por adubação fosfatada e calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 141-144, 1999.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 306 p.

GINÉ, M.F.; BERGAMIN, H.; ZAGATTO, E.A.G.; REIS, B.F. Simultaneous determination of nitrate and nitrite by flow injection analysis. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 114, p. 191-197, 1980.

HANSEN, B.; KRISTENSEN, E.S.; GRANT, R.; HØGH-JENSEN, H.; SIMMELSGAARD, S.E.; OLESEN, J.E. Nitrogen leaching from conventional versus organic farming systems – a systems modeling approach. **European Journal of Agronomy**, Oxford, v. 13, n. 1, p. 65-82, 2000.

KÖPPEN, W. **Grundriss der Klimakunde**, Walter de Gruyter. Berlin: Leipzig, 1931. 388 p.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. In: SYMPOSIUM OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 19., 1965, Swansea. **Proceedings...** Cambridge: University Press, 1965. p. 205-234.

MUCHOVEJ, R.M.C.; RECHCIGL, J.E. **Impact of nitrogen fertilization of pastures and turfgrasses on water quality**. In: LAL, R.; STEWART, B.A. (Ed.). Soil processes and water quality, Boca Raton: Lewis Publishers, 1994. p. 91-135.

NETO, A.P. **Metabolismo do nitrogênio e concentração de nutrientes no cafeeiro irrigado em razão da dose de N**. 2009. 93 p. Dissertação. (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E.; MARCIANO, C.R.; MORAES, S.O. Lixiviação de nitrato em um Latossolo Amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 1, p. 171-180, 2001.

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

PEREIRA, A.R.; CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. **Agrometeorologia de cafezais no Brasil**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 127 p.

PRIMAVESI, O.; FREITAS, A.R.; PRIMAVESI, A.C.; OLIVEIRA, H.T. Water quality of the Canchim's creek watershed, in São Carlos, SP, Brazil, occupied by beef and dairy cattle activities. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba v. 45, n. 2, p. 209-217, 2002.

PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A.C.; CORRÊA, L.A.; SILVA, A.G.; CANTARELLA, H. Lixiviação de nitrato em pastagem de *coastcross* adubada com nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 683-690, 2006.

REICHARDT, K; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; SAUNDERS, L.C.U.; CADIMA, A.Z. Dinâmica da água em solo cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 3, n. 1, p. 1-5, 1979.

RICCI, M.S.F.; NEVES, M.C.P.; NANNETTI, A.N.; MOREIRA, C.F.; AGUIAR-MENEZES, E.L.; SILVA, É.; CAIXETA, I.F.; ARAÚJO, J.B.S.; LEAL, M.A.A.; FERNANDES, M.C.; ALMEIDA, P.S.; PEDINI, S. **Cultivo do café orgânico**. Disponível em<[http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Cafe/CafeOrganico\\_2ed/anexo03.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Cafe/CafeOrganico_2ed/anexo03.htm)>. Acesso em: 16 jul. 2010.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente Excel<sup>TM</sup> para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

SANTINATO, R.; FERNANDES, A.L.T.; FERNANDES, D.R. **Irrigação na cultura do café**. Campinas: Arbore Agrícola e Comércio, 1996. 146 p.

SILVA, R.C.A.; ARAÚJO, T.M. Qualidade da água do manancial subterrâneo em áreas urbanas de Feira de Santana (BA). **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 4, p. 1019-1028, 2003.

STEWART, L.K.; CHARLESWORTH, P.B.; BRISTOW, K.L.; THORBURN, P.J. Estimating deep drainage and nitrate leaching from the root zone under sugarcane using APSIM-SWIM. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 81, n. 3 p. 315-334, 2006.

SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Análise dos atributos climáticos do Estado da Bahia**. Salvador: Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, 1998. 85 p. (Série Estudos e Pesquisa, 38).

THORNTHWAITE, C.W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, London, n. 38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.

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



## 4 LIXIVIAÇÃO DE NITROGÊNIO ( $^{15}\text{N}$ ) DO FERTILIZANTE EM UMA CULTURA DE CAFÉ FERTIRRIGADA NA BAHIA

### Resumo

O nitrogênio - N possui uma dinâmica complexa no sistema solo-planta-atmosfera. Os fertilizantes nitrogenados aplicados ao solo sofrem transformações químicas e microbianas que resultam em perdas. Nesse contexto, considerando-se o custo dos adubos nitrogenados, é fundamental o desenvolvimento de manejos adequados da adubação nitrogenada que visem o melhor aproveitamento do N pelas culturas. Uma dessas formas que procuram melhorar o aproveitamento do N pelas plantas de café é a sua aplicação via água da irrigação. Visando contribuir para o conhecimento mais aprofundado de suas relações hídricas, bem como do caminho do N do adubo no solo, o trabalho teve o objetivo de apresentar um estudo detalhado dos balanços de água e de lixiviação de N derivado do fertilizante, desenvolvido em um cafezal sob fertirrigação com uréia marcada com  $^{15}\text{N}$  no oeste baiano, em três cenários distintos de regime hídrico, durante o período de um ano do ciclo da cultura de café: i) precipitação + irrigação no ano inteiro - P + I; ii) apenas precipitação - P; e iii) precipitação + irrigação apenas na estação seca P +  $I_{es}$ . Neste trabalho, os componentes P e I foram considerados em conjunto e em separado, para verificar o efeito de I, e os componentes ascensão capilar, drenagem profunda e runoff foram considerados em conjunto e iguais à drenagem profunda, por se tratar de solo arenoso com declive praticamente de 0%, com lençol freático profundo. A irrigação foi feita por pivô-central utilizando-se o aspersor tipo LEPA, que aplica água diretamente sobre a copa das plantas, sem molhar a entrelinha. O volume de controle considerado foi de 0 – 1 m de profundidade, considerando-se que esta camada de solo é a responsável pela disponibilidade de água pela cultura. Desta forma, a água drenada abaixo de 1 m pode ser considerada para os cálculos da lixiviação do N do fertilizante. Na elaboração do balanço hídrico, foi utilizada uma planilha em ambiente Excel onde a Evapotranspiração potencial é calculada pelo modelo de Thornthwaite e que também foi adaptado para o modelo de Penman-Monteith. Considerando-se um coeficiente de cultura unitário, foi possível estimar a Quantidade de Nitrogênio lixiviado derivado do fertilizante. Através dos cenários de irrigação, foi possível verificar que a alta taxa de aplicação de N, associada à precipitação concentrada, são as grandes responsáveis pela lixiviação, cujos valores máximos foram 18 e 104,5 kg ha<sup>-1</sup> de N para as doses de 400 e 800 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente, aplicado na forma de uréia, parceladamente por fertirrigação, correspondendo a 4,5 e 13,1 % do adubo aplicado.

Palavras-chave: Thornthwaite; Penman-Monteith; Evapotranspiração; Drenagem profunda; Uréia

### Abstract

Nitrogen - N has a complex dynamic in the soil-plant-atmosphere system. N fertilizers applied to soil suffer chemical and microbial transformations that can result in losses. In this context, considering the cost of fertilizers, it is of high importance to develop agricultural management practices that lead to the most efficient use of N by the crop. One of these more

efficient forms to better use the N by coffee plants is the fertilizer application via irrigation, i.e., fertigation. With the aim of better understanding this management practice and the movement of the N in the soil profile, this study has the objective of presenting detailed water balances - WB established to evaluate fertilizer N leaching in a fertigated coffee plantation using  $^{15}\text{N}$  labeled urea in west Bahia, Brazil. Three distinct scenarios were analyzed during the period of one coffee cropping year: i) rainfall + irrigation the full year - P + I, ii) rainfall only - P; and iii) rainfall + irrigation only in the dry season - P +  $I_{cs}$ . The components P and I were considered together and separately to analyze the effect of I on the deep drainage. The excess calculated by the WB program was considered equal to the deep drainage because the area is very flat so that the runoff can be considered zero, and the capillary rise was also considered zero because the water table is located several m below soil surface. Irrigation was performed with low energy precision application - LEPA sprinklers installed on a central pivot irrigation system, which deliver the water directly on the plant canopy without wetting the inter-row. The considered control volume for the WB calculations was considered for the layer 0 – 1 m, considering that this depth involves the complete active root system. In this way, the water drained below this depth can be used to estimate fertilizer N leaching losses. The WB calculations evaluated potential evapotranspiration using the models of Thornthwaite and Penman-Monteith. Considering the crop coefficient equal to unity, it was possible to estimate the amounts of leached fertilizer N in the three described scenarios. It was found that the high N application rate associated to the high rainfall plus irrigation is the main cause of fertilizer N leaching whose largest values were 18.0 and 104.5 kg  $\text{ha}^{-1}$  de N for the rates 400 and 800 kg  $\text{ha}^{-1}$  of N, respectively, which correspond to 4.5 and 13.1 % of the applied fertilizer.

Keywords: Thornthwaite; Penman-Monteith; Evapotranspiration; Deep drainage; Urea

#### 4.1 Introdução

O nitrogênio - N apresenta uma dinâmica complexa por sua mobilidade no sistema solo-planta-atmosfera. Os fertilizantes nitrogenados aplicados ao solo sofrem uma série de transformações químicas e microbianas que resultam em perdas para a cultura. Nesse contexto, considerando-se o custo dos adubos nitrogenados, é fundamental o desenvolvimento de manejos adequados da adubação nitrogenada que visem o melhor aproveitamento do N pelas culturas. Uma dessas formas que procuram melhorar o aproveitamento do N pelas plantas de café é a sua aplicação via água da irrigação, isto é, fertirrigação.

Produtores têm adotado novas tecnologias de condução e manejo das lavouras de café, como o adensamento do espaçamento de plantio, a mecanização inclusive da colheita, e a irrigação/fertirrigação, a fim de aumentar a produtividade e, conseqüentemente, a margem de lucro (COELHO; SILVA, 2005). A irrigação do cafeeiro surgiu com o avanço dessa cultura para as regiões consideradas marginais ao seu cultivo quanto às suas necessidades hídricas, como, por

exemplo, o cerrado mineiro e o oeste baiano. Nessas regiões, a cafeicultura só é viável quando irrigada e, dessa maneira, vale ressaltar, têm-se alcançado elevadas produtividades, com um produto de alta qualidade (SILVA; COELHO; SILVA, 2005).

A utilização da fertirrigação oferece inúmeras vantagens em comparação com o método convencional de aplicação de fertilizantes. Entre elas, pode-se destacar a não-compactação do solo e o fim de injúrias mecânicas às plantas, causadas pela entrada de equipamentos pesados nas áreas de cultivos para promover a adubação pelos métodos tradicionais; menor quantidade de equipamento exigido e menor gasto de energia; a dosagem de nutrientes pode ser mais cuidadosamente regulada, monitorada, distribuída e parcelada na linha de café, conforme as necessidades da cultura ao longo de seu ciclo fenológico (COELHO; SILVA, 2005). Sendo assim, a fertirrigação é uma boa forma de veículo para condução do N via absorção foliar e pelas raízes do cafeeiro.

A adubação do N feita na forma de uréia incrementa sua disponibilidade às plantas, embora possam ocorrer perdas por lixiviação, que podem ser minimizadas (OLIVEIRA et al., 2002). Em função das transformações do N no sistema solo-planta-atmosfera, apenas parte do N proveniente do fertilizante é absorvida pelas plantas. Isto porque o N aplicado no solo está sujeito a perdas por lixiviação, escoamento superficial, desnitrificação, volatilização da amônia e imobilização na biomassa microbiana (ALVA et al., 2006); o restante permanece no solo, predominantemente na forma orgânica (SCIVITTARO et al., 2003; SILVA et al., 2006). Além desses processos, a resposta à adubação de N também é influenciada pelo manejo de irrigação e frequência de aplicação do N. O aumento da eficiência de absorção traduz-se em redução potencial de perdas por lixiviação e perdas de N associadas ao excesso de chuvas (QUIÑONES et al., 2005; QUIÑONES et al., 2007). Resultados obtidos sob os mais diversos sistemas agrícolas mostraram que raramente uma cultura aproveita mais de 60% do N aplicado como fertilizante (REICHARDT et al., 2009).

De acordo com a recomendação oficial, para cafeeiros em produção as doses de N baseiam-se no rendimento esperado e no teor do nutriente na folha. São recomendadas doses de até 450 kg ha<sup>-1</sup> de N por ano agrícola, fornecidas no período chuvoso, de setembro a março, compreendendo as fases de floração, frutificação e desenvolvimento vegetativo (RAIJ et al., 1996). O parcelamento e a época de aplicação dos adubos nitrogenados constituem-se em alternativas para aumentar sua eficiência pelas culturas e mitigar as perdas. Isso é respondido

pelo maior aproveitamento do N, resultante da sincronização entre as aplicações e o período de alta demanda do nutriente (AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002; SILVA et al., 2005).

As perdas decorrentes da fertilização nitrogenada com uréia sempre foram bastante estudadas em razão de sua grandeza. O uso de técnicas isotópicas permite a quantificação do movimento e da lixiviação de nutrientes derivados do fertilizante, do solo ou dos resíduos das plantas. Fertilizantes marcados enriquecidos com o  $^{15}\text{N}$  têm sido frequentemente utilizados em estudos sobre lixiviação no perfil do solo. O uso do marcador  $^{15}\text{N}$  constitui-se no método que permite quantificar com maior precisão a fonte de origem do N, comparando doses e quantificando a utilização deste nutriente pela cultura (LARA CABEZAS et al., 2000; SILVA et al., 2006; REICHARDT et al., 2009). O fato de possibilitar a distinção da fonte originária, seja a nativa do solo ou a do fertilizante, contribui na tomada de decisão quanto ao manejo da adubação nitrogenada.

Poucos estudos foram realizados com plantas perenes utilizando o traçador  $^{15}\text{N}$ , pela dificuldade de se avaliar o acúmulo de massa seca e por necessitar-se de fertilizante marcado em grande quantidade, o que onera bastante os custos de pesquisa. No Brasil, entre as culturas perenes, destacam-se os trabalhos de Boaretto et al. (1999), que estudaram fertilização foliar em laranjeiras em formação; Fenilli et al. (2004), que estudaram a dinâmica de  $^{15}\text{N}$  em laranjeiras em solução nutritiva e Quiñones et al. (2005), Boaretto et al. (2007) e Quiñones et al. (2007), que estudaram o acúmulo de nutrientes e destino do N aplicado em pomar de laranjeira. Na cultura da cana-de-açúcar, que é considerada como semi-perene e permanece ao redor de 6-10 anos no campo, destacam-se os trabalhos de Oliveira et al. (2002), que estudaram lixiviação de N, potássio, cálcio e magnésio em solo arenoso; Gava et al. (2003), que estudaram a recuperação do N da uréia e da palhada por soqueira de cana-de-açúcar, e Franco et al. (2008), que verificaram o aproveitamento pela cana-de-açúcar da adubação nitrogenada de plantio.

Na cultura de café, os trabalhos que se destacam no Brasil são os de Lima Filho e Malavolta (2003), que fizeram estudos relacionados à nutrição mineral do cafeeiro, remobilização e reutilização de nitrogênio por plantas normais e deficientes; Fenilli et al. (2007a), que estudaram a eficiência do isótopo  $^{15}\text{N}$  na absorção da cultura; Fenilli et al. (2007b), que verificaram o crescimento, desenvolvimento e recuperação do  $^{15}\text{N}$  do fertilizante; Fenilli et al. (2008), que estudaram o balanço do  $^{15}\text{N}$  do fertilizante, e Reichardt et al. (2009), que verificaram a relação entre a adubação nitrogenada e as condições hídricas do solo.

Apesar do manejo da cultura do café estar bem consolidado, ainda há espaço para seu aprimoramento, principalmente no que se refere às relações clima-solo-café (RENA; MAESTRI, 2000) e à adubação nitrogenada, que muitas vezes não é feita de forma adequada, tanto em termos de dose como época de aplicação (MALAVOLTA, 1986).

Visando contribuir para o conhecimento mais aprofundado de suas relações hídricas, bem como do caminho do nitrogênio - N do adubo no solo, o trabalho teve o objetivo de apresentar um estudo detalhado dos balanços de água e de lixiviação de N derivado do fertilizante, desenvolvido em um cafezal sob fertirrigação com uréia marcada com  $^{15}\text{N}$  no oeste baiano, em três cenários distintos de regime hídrico, durante o período de um ano do ciclo da cultura de café: i) precipitação + irrigação no ano inteiro - P + I; ii) apenas precipitação - P; e iii) precipitação + irrigação apenas na estação seca - P +  $I_{es}$ .

## **4.2 Material e Métodos**

### **4.2.1 Localização e características da área experimental**

O estudo foi desenvolvido em uma cultura de café fertirrigada por pivô central, que aplica altas doses de nitrogênio - N (da ordem de  $600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) e, devido a isso, apresenta um grande potencial para perdas de N abaixo da zona radicular. O experimento foi realizado durante um ano, iniciando-se em 1º de agosto de 2008 e prosseguindo até 31 de julho de 2009, com foco na Fazenda Morena, de propriedade da Agropecuária Arakatu, no Município de Barreiras – BA. As coordenadas geográficas do local são:  $11^\circ 46' \text{ S}$  e  $45^\circ 43' \text{ W}$ , a 740 m de altitude. A área é representativa do planalto central do Brasil, anteriormente coberto por cerrado, e que hoje apresenta extensas áreas cultivadas, muitas delas com auxílio de pivôs centrais. O solo é classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Alumínico típico (EMBRAPA, 2006), cuja análise granulométrica encontra-se na Tabela 4.1. O clima local, segundo a classificação de Köppen (1931), pertence ao tipo Aw – tropical subúmido com chuvas de verão e período seco bem definido no inverno. Nesta região a precipitação varia de 800 a 1800 mm por ano, com sua concentração nos meses de outubro a abril (SEI, 1998).

Tabela 4.1 - Análise granulométrica no solo em diferentes profundidades

Profundidade	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classe de textura
m	2 - 0,05 mm	0,05-0,002	<0,002 mm	
0-0,2	81	3	16	média arenosa
0,2-0,4	79	3	18	média arenosa
0,4-0,6	74	3	23	média arenosa
0,6-0,8	72	3	25	média argilosa
0,8-1	70	2	28	média argilosa
0-1	75,2	2,8	22,0	-

Na Tabela 4.2 encontram-se as características de retenção de água que levaram à estimativa de sua capacidade de água disponível - CAD de 86,4 mm para o perfil de 1 m de profundidade, assumido conter a totalidade do sistema radicular para efeito de absorção de N. Considerou-se, para efeito de balanço hídrico - BH, que toda água que ultrapassasse esta camada, corresponderia à drenagem profunda -  $Q_i$ .

Tabela 4.2 - Armazenamento - ARM e capacidade de água disponível - CAD estimada pelo modelo de van Genuchten (1980) em função da profundidade do solo - Prof, onde  $\theta_{330}$  é a umidade volumétrica na capacidade de campo - CC e  $\theta_{15000}$  no ponto de murcha permanente - PMP

Prof	$\theta_{330}$	ARM	$\theta_{15000}$	ARM
m	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	mm	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	mm
0-0,2	0,172	34,4	0,107	21,4
0,2-0,4	0,169	33,8	0,102	20,4
0,4-0,6	0,183	36,6	0,108	21,6
0,6-0,8	0,214	42,8	0,114	22,8
0,8-1	0,242	48,4	0,117	23,4
ARM Total		196,0		109,6
CAD				86,4

Na Tabela 4.3 encontram-se as características químicas do solo, de relevância para o processo de lixiviação de N derivado do fertilizante por arraste pela água.

O cafezal da Fazenda Morena constitui-se de plantas da espécie *Coffea arabica* L., variedade Catuaí Vermelho, plantadas em 15 de janeiro de 2001, com espaçamento 3,8 m nas entrelinhas e 0,5 m entre plantas, em arranjo circular disposto sob sistema de pivô central, com área útil de 80 ha, adaptado para irrigação e fertirrigação. As plantas de 9 anos de idade encontram-se na fase adulta, com uma altura de aproximadamente 3 m e diâmetro de copa de 1,9

m, deixando ruas livres de 1,9 m de largura para o tráfego de máquinas. A média de produtividade da propriedade é de 56 sacas ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, sendo a colheita realizada de maio a junho.

Tabela 4.3 – Análise química de solo em diferentes profundidades – Prof

Prof m	pH CaCl <sub>2</sub>	MO g dm <sup>-3</sup>	P mg dm <sup>-3</sup>	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V %	m	N-Total mg L <sup>-1</sup>
0-0,2	4,7	25	114	10	2	23	9	3	31	34	65	52	8	1080
0,2-0,4	3,6	20	40	21	1	5	3	9	34	9	43	21	50	620
0,4-0,6	3,8	16	5	60	0,8	4	2	9	31	6,8	37,8	18	57	532
0,6-0,8	3,6	14	1	72	0,8	3	1	9	31	4,8	35,8	13	65	520
0,8-1	3,8	14	1	96	0,8	2	1	10	31	3,8	34,8	11	72	505
0-1	3,9	17,8	32,2	51,8	1,1	7,4	3,2	8,0	31,6	11,7	43,3	23,0	50,4	631,4

SB = soma de bases, T = capacidade de troca de cátions, V = saturação de bases, m = saturação por alumínio.

O manejo normal da fertirrigação é feito com auxílio de emissores do tipo LEPA (low energy precision application - aplicação precisa de baixo consumo de energia/pressão), que distribuem a água de forma localizada sobre as linhas circulares de café, de tal forma que as entrelinhas praticamente não recebem água. A operação do pivô central é praticamente contínua durante o ano todo (com pequenas variações em épocas muito chuvosas e interrupção na colheita), fornecendo de 2 a 4 mm dia<sup>-1</sup> de água com adição de insumos em dias alternados. Para execução deste estudo, o sistema permite a suspensão da fertirrigação em uma ou mais linhas através de fechamento por registro individual de cada rua. Desta forma foi possível evitar a superposição do N do sistema com o N marcado deste experimento, que foi aplicado separadamente por meio de regadores, simulando da melhor forma possível a irrigação feita pelos aspersores LEPA. Na Tabela 4.4 encontram-se o volume de irrigação - I e dados climáticos da região, sendo que os dados de precipitação - P e I foram obtidos na própria fazenda e os demais dados na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET do município de Barreiras, para o período de estudo.

#### 4.2.2 Balanço hídrico climatológico sequencial

O balanço hídrico - BH foi feito de forma diária, quinidial, decendial e quinzenal. Como o período total é de 365 dias, o BH quinidial (cada 5 dias) mostrou-se o mais satisfatório para acompanhar as relações hídricas no sistema solo-café-atmosfera. Para isso, foram estimadas

as médias dos parâmetros climáticos de interesse a cada 5 dias para se chegar aos valores mensais. O BH é a contabilização da água do solo resultante da aplicação do Princípio de Conservação de Massa em um volume de solo vegetado. A variação do armazenamento no volume considerado -  $\Delta\text{ARM}$  por intervalo de tempo representa o balanço entre o que entrou e o que saiu de água do volume de controle [eq. (4.1)]:

$$\pm \Delta\text{ARM} = P + I - \text{ET}_r + \text{AC} - Q_i - \text{RO} \quad (4.1)$$

onde P = precipitação

I = irrigação

$\text{ET}_r$  = evapotranspiração real

AC = ascensão capilar

$Q_i$  = drenagem profunda

RO = runoff

Tabela 4.4 – Precipitação - P, irrigação - I, temperatura média - T, umidade relativa do ar - UR, radiação solar líquida - Rn e velocidade do vento - V do período do estudo (DAI = dias após início)

Mês/Ano	DAI	P	I	P + I	T	UR	Rn	V
		mm			°C	%	$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$	$\text{m s}^{-1}$
AGO/08	15	0,0	118,1	118,1	24,0	42,4	10,2	1,6
SET/08	46	31,5	128,8	160,3	26,4	49,5	10,4	1,9
OUT/08	76	0,0	139,9	139,9	28,5	36,1	11,8	2,2
NOV/08	107	314,5	69,6	384,1	26,8	70,8	7,8	1,5
DEZ/08	137	195,0	22,4	217,4	25,3	76,3	9,7	1,4
JAN/09	168	230,0	26,5	256,5	25,4	76,6	10,7	1,3
FEV/09	199	185,5	11,2	196,7	25,5	77,5	10,2	1,1
MAR/09	227	350,5	7,5	358,0	25,7	76,3	9,7	1,0
ABR/09	258	108,5	26,1	134,6	24,7	83,5	7,9	0,9
MAI/09	288	67,0	48,5	115,5	23,7	78,1	8,0	1,0
JUN/09	319	52,5	46,6	99,1	22,6	76,2	8,4	0,9
JUL/09	349	0,0	52,2	52,2	22,2	69,9	9,3	1,1
Anual	-	1535,0	697,3	2232,3	25,1	67,8	9,5	1,3

Neste trabalho, os componentes P e I foram considerados em conjunto e em separado, para se verificar o efeito de I. Utilizando-se para isso três cenários distintos de regime hídrico durante o período de um ano do ciclo da cultura: i) precipitação + irrigação no ano inteiro - P + I;

ii) apenas precipitação - P; e iii) precipitação + irrigação apenas na estação seca - P + I<sub>es</sub>. Para este trabalho, a estação seca foi considerada de maio a outubro. Os componentes ascensão capilar - AC, Q<sub>i</sub> e runoff - RO foram considerados em conjunto e iguais a Q<sub>i</sub>, por se tratar de solo arenoso com declive de 0%. Com lençol freático profundo e com excesso de água, o perfil está constantemente sob drenagem. A I foi feita por pivô-central utilizando-se o aspersor tipo LEPA, que aplica água diretamente sobre a copa das plantas, sem molhar a entrelinha. A P e a I foram medidas na área do pivô central do experimento em questão. O BH calcula um componente chamado excesso - EXC, que inclui as demais perdas de água do sistema, no caso a Q<sub>i</sub> e o RO, considerando-se, portanto,  $EXC = Q_i$ , baseados na discussão feita acima.

O volume de controle estudado foi de 0 – 1 m de profundidade, considerando-se que esta camada de solo é a responsável pela disponibilidade de água para a cultura. Ela foi estabelecida porque, praticamente, a totalidade do sistema radicular do café se encontra nesta camada e ela é responsável tanto pela absorção de água como do N, principalmente nitrato - NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, pelas plantas. Desta forma, a água drenada abaixo de 1 m pode ser considerada para os cálculos da lixiviação do N do fertilizante.

Na elaboração do BH sequencial por Thornthwaite e Mather (1955) foi utilizada uma planilha em ambiente Excel (ROLIM; SENTELHAS; BARBIERI, 1998), onde a evapotranspiração potencial - ET<sub>p</sub> é calculada pelo modelo de Thornthwaite - TH (1948) e que também foi adaptado para o modelo de Penman-Monteith - PM (1965) por Allen et al. (1989). Os detalhes de cálculo do ARM e ET<sub>p</sub> podem ser vistos no primeiro capítulo desta Tese.

#### **4.2.3 Adubação com uréia enriquecida <sup>15</sup>N**

O uso do marcador <sup>15</sup>N, que foi feito de acordo com Hardarson (1990), permite a estimativa da lixiviação do N do fertilizante dentro do sistema solo. A aplicação do <sup>15</sup>N foi realizada de forma quinzenal e manual, feita na 4ª linha (central) dos cafeeiros, por meio de escadas e regador, com o intuito de simular a aplicação feita pelo pivô central. As parcelas tiveram distribuição casual e cada uma delas foi formada por 7 plantas, incluindo a bordadura. O adubo foi diluído em água na mesma quantidade da I, procurando-se simular a fertirrigação normalmente realizada na fazenda. As plantas da bordadura não receberam adubação com <sup>15</sup>N, apenas uréia. Foram utilizados dois tratamentos com quatro repetições, onde cada repetição correspondeu a uma parcela descrita anteriormente:

- T<sub>400</sub> (400 kg ha<sup>-1</sup> de N), 76 g planta<sup>-1</sup> de N correspondentes a 169 g planta<sup>-1</sup> de uréia;
- T<sub>800</sub> (800 kg ha<sup>-1</sup> de N), 152 g planta<sup>-1</sup> de N correspondentes a 338 g planta<sup>-1</sup> de uréia.

#### 4.2.4 Lixiviação:

Na planta central de cada parcela marcada com <sup>15</sup>N foi instalado um extrator de solução do solo com cápsula porosa (Figura 4.1A), abaixo da saia da planta, a 1,0 m de profundidade, para a realização de avaliações periódicas da lixiviação de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nos períodos chuvosos no local dos tratamentos T<sub>400</sub> e T<sub>800</sub>. Para a extração da solução do solo faz-se vácuo no extrator da ordem de 500 mmHg, mediante a utilização de uma bomba manual de vácuo e, após 12 horas, a solução do solo foi coletada em recipiente de vidro na superfície do solo, após a quebra do vácuo entre o extrator e o solo. A solução coletada foi armazenada em recipientes de vidro, rotulados de acordo com o extrator e o dia da coleta. A extração de solução do solo por meio destes extratores de cápsula porosa não é tarefa fácil. Só há extração de solução quando o vácuo aplicado (cerca de - 500 cm H<sub>2</sub>O) for bem mais negativo que o potencial mátrico da água do solo - h. Em solo bem úmido, após período de chuvas intensas, é da ordem de - 100 cm H<sub>2</sub>O e esta diferença (gradiente de potencial) é suficiente para uma boa extração. O volume de solução extraído depende ainda da condutividade hidráulica do solo (equação de Darcy) e da porosidade da cápsula. Para potenciais mátricos menores que - 300 cm H<sub>2</sub>O o volume de extração é praticamente nulo, a não ser que o tempo de vácuo seja aumentado significativamente. Outras dificuldades de coleta são o custo dos extratores, sua instalação e a operação de vácuo realizada no campo. Em nosso caso, optou-se por um extrator por repetição, assumindo que os volumes do extrato seriam suficientes para as análises. Em geral, coleta-se entre 10 e 50 mL. Durante o processo de análise, ao final do experimento, verificou-se que tanto os volumes do extrato como as quantidades de N não eram suficientes para análise e optou-se pela junção das amostras das quatro repetições em uma amostra média que representasse a solução do solo daquele respectivo tratamento. Isto inviabilizou uma análise estatística que seria útil para o cálculo de erro na estimativa final da lixiviação.

Após a coleta das soluções, as amostras eram identificadas e preservadas em ácido clorídrico a uma relação 1% do volume coletado. Após congeladas para evitar alterações, pois na fazenda não havia infraestrutura laboratorial, eram encaminhadas para análise da concentração de

$\text{NO}_3^-$  (GINÉ et al., 1980) pelo método FIA (Flow Injection Analysis). Foi também feita avaliação de  $\text{NH}_4^+$  na solução de solo, que foi sempre em níveis não detectáveis e, assim, o N total da amostra de solução do solo foi considerada igual à do íon  $\text{NO}_3^-$ . O método utiliza a redução de  $\text{NO}_3^-$  e posterior espectrofotometria deste através da reação de Griess modificada. A amostra é introduzida no sistema de forma que há uma tamponização com uma solução mista de Cloreto de Amônio, Tetraborato de Sódio e EDTA de Sódio. Após, passa-se por coluna de cádmio coperizado; em seguida, é inserido o reagente de Griess modificado dando-se então a reação com a formação da cor rosada, a qual é impulsionada para leitura no espectrofotômetro na faixa de 535 nanômetros (nm).

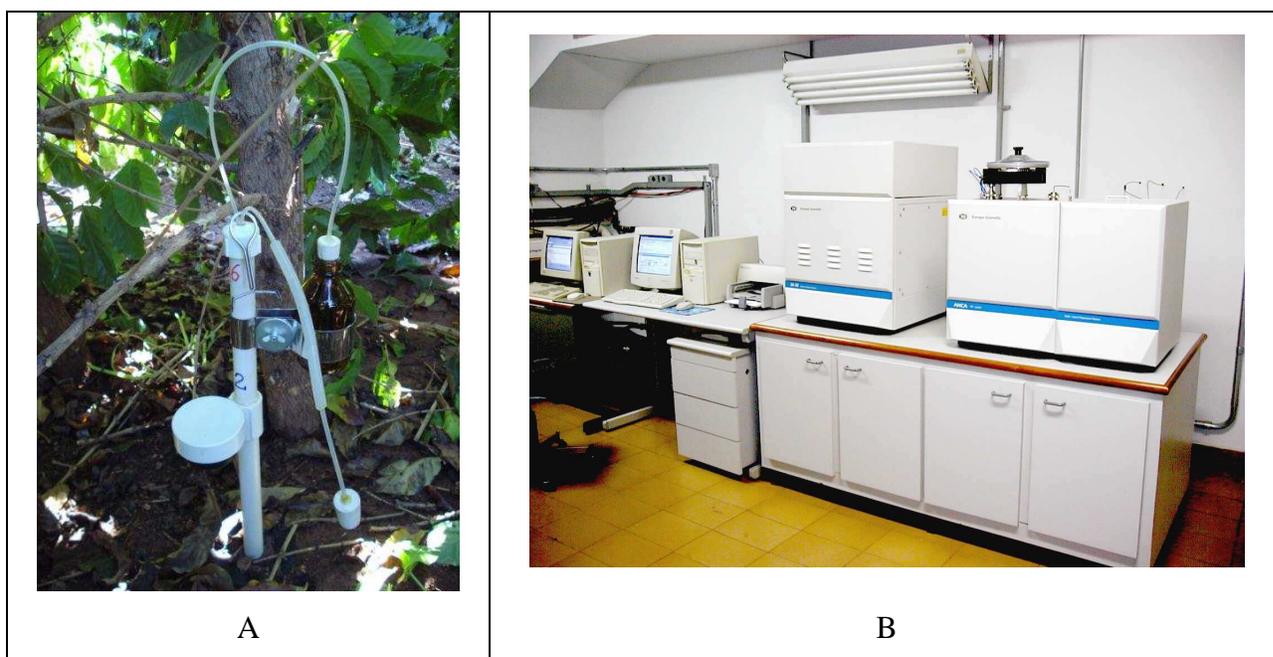


Figura 4.1 - Vista do extrator de solução do solo a vácuo instalado nas parcelas (A) e espectrômetro de massa ANCA SL utilizado nas avaliações de abundância isotópica de  $^{15}\text{N}$  (B)

Para análise da abundância isotópica de  $^{15}\text{N}$ , utilizou-se o método da difusão, desenvolvido por Sorensen e Jensen (1991). Foram utilizados filtros de fibra de vidro (Whatman GF/A 47 mm) que foram acidificados com 10  $\mu\text{L}$  de uma solução de sulfato ácido de potássio 2,5M. Cada filtro foi envolvido por uma fita de politetrafluoretileno PTFE, a qual foi dobrada ao meio e vedada em suas bordas para impedir a entrada da solução durante a agitação. Em um recipiente de plástico adicionou-se um volume da amostra contendo aproximadamente 100  $\mu\text{g}$  de

N e um volume de água deionizada, atingindo um volume total de 50 mL. Nessa solução formada, adicionou-se: óxido de Mg calcinado, utilizado para alcalinizar o meio e converter o  $\text{NH}_4^+$  em  $\text{NH}_3$ , a liga de Devarda, adicionada para reduzir o  $\text{NO}_3^-$  e o  $\text{NO}_2^-$  a  $\text{NH}_3$  e a fita em que o filtro de fibra de vidro estava envolvido. Posteriormente, esses recipientes foram fechados e submetidos a uma agitação por 48 horas em um ambiente escuro artificial para que não houvesse o desenvolvimento de algas, as quais poderiam consumir o N existente na solução. Durante essa etapa, toda amônia formada difundiu-se através da membrana de PTFE, que é impermeável à água e permeável a amônia, e foi retida no filtro. Após 48 horas no agitador, as fitas foram removidas dos recipientes e colocadas no dessecador por aproximadamente 48 horas, garantindo-se ausência de umidade. Depois dessa etapa de secagem, os filtros foram colocados em cápsulas de estanho para determinação da abundância isotópica em espectrômetro de massa ANCA SL (Figura 4.1B).

Para o cálculo do fluxo de  $\text{NO}_3^-$  lixiviado há necessidade de um valor médio de concentração de  $\text{NO}_3^-$  e o estabelecimento da área pela qual o N passa. No experimento em questão, o adubo é aplicado em área concentrada, isto é, na copa da planta, sem distribuição na entrelinha. Sendo o espaçamento entre plantas  $3,80 \times 0,50 \text{ m} = 1,90 \text{ m}^2$ , a área de aplicação do adubo é  $1,90 \times 0,5 = 0,95 \text{ m}^2$ , uma vez que a copa das plantas cobre aproximadamente a metade do espaçamento (Figura 4.2B). Os extratores estão localizados abaixo da copa, portanto representam bem a área adubada, mas não a área da entrelinha. Consideramos, então, a área de lixiviação por planta, para efeito de concentração de  $\text{NO}_3^-$ , de  $1,425 \text{ m}^2$ , considerando-se a concentração total medida pelos extratores como válida nos  $1,90 \text{ m}$  centrais e abaixo da copa, e diminuindo para zero até o centro da entrelinha (Figura 4.2A).

O cálculo da concentração média anual do íon  $\text{NO}_3^-$  e da abundância isotópica foi feito de duas maneiras: a) valores medidos - VM através de valores mensais da concentração do íon  $\text{NO}_3^-$  -  $C_i$  e valores mensais da abundância isotópica -  $^{15}\text{N}_i$  (onde  $i$  indica o mês da coleta), sendo que nos meses com mais de uma coleta utilizou-se seu valor médio. Para todos os meses, os valores de  $C_i$  e  $^{15}\text{N}_i$  foram considerados para o dia 15 de cada mês (nas eq. 4.2 e 4.4, a seguir); b) valores modelados - VL através de valores mensais de  $C_i$  e  $^{15}\text{N}_i$  obtidos por regressão linear de todas as coletas de C e  $^{15}\text{N}$  (20 amostras) em relação ao tempo em dias após o início - DAI. Os dados utilizados para os cálculos de lixiviação (eq. 4.2 e 4.4, a seguir) correspondem a valores interpolados na regressão, no dia 15 de cada mês.

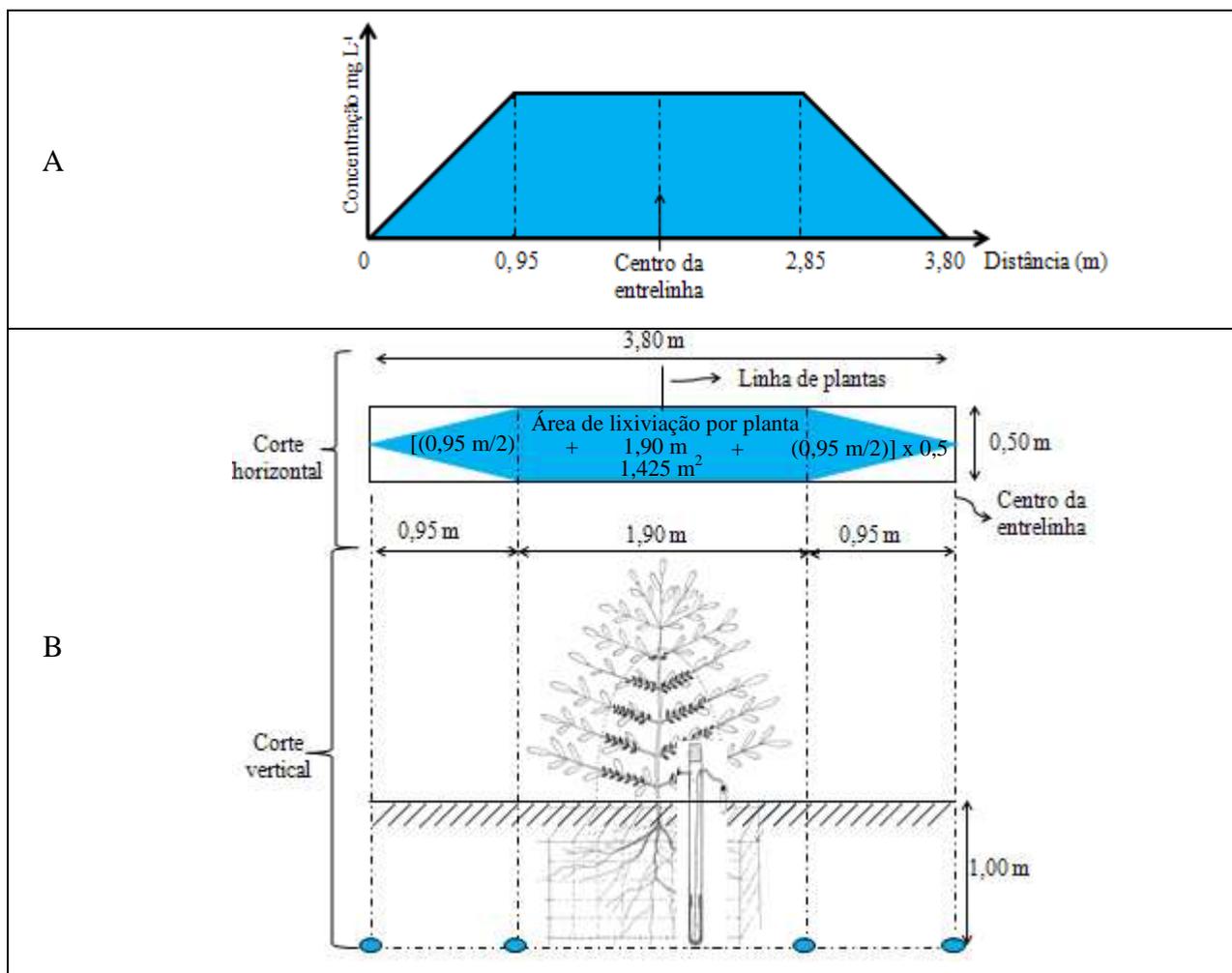


Figura 4.2 – Concentração do íon nitrato  $\text{NO}_3^-$  na solução do solo a 1 m de profundidade (A) em cafezal sob fertirrigação para estimação da lixiviação determinando-se a área de lixiviação por planta (B)

A partir dos dados de  $C_i$  e de  $^{15}\text{N}_i$  calculada por VM e VL, calcula-se a quantidade de nitrogênio derivada do fertilizante -  $\text{QNddf}_i$  ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) pela eq. (4.2):

$$\text{QNddf}_i = Q_i \cdot C_i \cdot \text{Nddf}_i \quad (4.2)$$

onde  $Q_i$  ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) é drenagem profunda calculada pelo programa de BH, no período  $\Delta t_i$  (1 mês) transformada de mm em quilos de água drenada por hectare.  $C_i$  ( $\text{mg L}^{-1}$  do íon  $\text{NO}_3^-$  transformada para  $\text{kg kg}^{-1}$  de N) e  $\text{Nddf}_i$  é o nitrogênio derivado do fertilizante, dado pela eq. (4.3):

$$Nddf_i = \frac{{}^{15}N_{amostra\ i} - 0,365}{{}^{15}N_{fertilizante} - 0,365} \quad (4.3)$$

A solução do solo foi retirada apenas a partir do início do período chuvoso até o término do estudo (novembro a julho), entre 10 e 14 dias após a aplicação de uma dose do fertilizante, porém, sempre antes da próxima aplicação. Desta forma, foi possível acompanhar a lixiviação média a partir de QNddf durante um ano de aplicações quinzenais do adubo dos tratamentos. A perda por lixiviação -  $PL_i$  em cada período mensal  $\Delta t_i$  é dada pela própria eq. (4.2),  $PL_i = QNddf_i$ .

A perda anual -  $PL_a$  ( $kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ ) é dada pelo somatório de todos os  $PL_i$  avaliados no ano, conforme a eq. (4.4):

$$PL_a = \sum_{i=1}^n PL_i \quad (4.4)$$

#### 4.2.5 Análise estatística

Foi realizada análise da significância da correlação simples de concentração do íon  $NO_3^-$  e  ${}^{15}N$  entre o tempo transcorrido em DAI (dias após o início), utilizando-se a tabela de níveis de significância dos coeficientes de correlação simples proposta por Snedecor e Cochran (1967). Os dados de  $C_i$  e  ${}^{15}N_i$  também foram submetidos à análise clássica de médias, desvio padrão e coeficientes de variação. A comparação das formas de cálculo de  $C_i$  e  ${}^{15}N_i$  foi submetida à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5 %.

### 4.3 Resultados e Discussão

As perdas por lixiviação são importantes na cultura de café, uma vez que no oeste baiano as culturas estão sendo estabelecidas em solos normalmente pobres, arenosos e com baixa capacidade de troca de cátions - CTC, nos quais grandes quantidades de nitrogênio - N são aplicadas em sistemas intensivos de cultivo ( $400\ a\ 800\ kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ ). Com base nessa expectativa de lixiviação, são apresentados na Tabela 4.5 os valores de concentração - C do íon nitrato -  $NO_3^-$  com sua respectiva abundância isotópica -  ${}^{15}N$ , encontrados na solução do solo extraída a 1 m de profundidade nas respectivas datas da área de estudo. Nesta mesma tabela também são mostrados

dados da média aritmética dos meses que tiveram mais de uma coleta, para se determinar o valor mensal da concentração do íon  $\text{NO}_3^-$  -  $C_i$  como da abundância isotópica  $^{15}\text{N}_i$  na solução do solo para os tratamentos  $T_{400}$  e  $T_{800}$ .

Tabela 4.5 - Data, coleta em dias após início - DAI, drenagem profunda -  $Q_i$  elaborada através do balanço hídrico pelos modelos de evapotranspiração potencial de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM, concentração do íon nitrato na data da coleta - C e valor mensal -  $C_i$  e abundância isotópica na data da coleta -  $^{15}\text{N}$  e mensal -  $^{15}\text{N}_i$  na solução do solo para os tratamentos  $T_{400}$  e  $T_{800}$ , a 1 m de profundidade, em 20 amostragens

Data	Coletas em DAI	$Q_i$				$T_{400}$		$T_{800}$		$T_{400}$		$T_{800}$	
		TH		PM		C	$C_i$	C	$C_i$	$^{15}\text{N}$	$^{15}\text{N}_i$	$^{15}\text{N}$	$^{15}\text{N}_i$
		mm	$\text{Kg ha}^{-1}$	mm	$\text{Kg ha}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$							
14/11/2008	106					8,57		4,86		0,558		0,867	
21/11/2008	113	203	2030000	245	2450000	10,45	9,73	38,88	38,88	0,703	0,689	0,890	0,901
29/11/2008	121					10,18		72,90		0,805		0,945	
5/12/2008	127					21,42		74,75		0,965		0,952	
12/12/2008	134					4,84		71,32		0,794		0,933	
19/12/2008	141	111	1110000	132	1320000	23,82	12,73	64,46	70,18	0,982	0,843	0,957	0,948
26/12/2008	148					0,82		*		0,632		*	
2/1/2009	155					6,97		75,80		0,808		0,973	
10/1/2009	163					8,04		*		*		*	
17/1/2009	170	125	1250000	140	1400000	12,05	13,82	95,58	90,08	0,890	0,914	1,002	1,029
24/1/2009	177					9,11		109,43		0,925		1,056	
31/1/2009	184					32,92		79,50		1,033		1,086	
6/2/2009	190	69	690000	89	890000	33,19	33,19	176,07	176,07	1,075	1,075	1,026	1,026
13/3/2009	225	235	2350000	258	2580000	14,73	14,73	132,06	132,06	0,997	0,997	1,025	1,025
20/4/2009	263	30	300000	57	570000	42,82	42,82	173,55	173,55	0,997	0,997	1,058	1,058
18/5/2009	291	54	540000	59	590000	7,50	7,50	105,66	105,66	0,868	0,868	1,058	1,058
17/6//2009	321	16	160000	22	220000	8,04	8,04	62,62	62,62	0,981	0,981	1,052	1,052
2/7/2009	336					76,00		149,66		1,062		1,133	
18/7/2009	352	0	0	0	0	81,35	73,59**	154,69	147,57**	1,099	1,073**	1,146	1,137**
22/7/2009	356					63,42		138,35		1,056		1,132	

\*solução insuficiente para análise.

\*\*apesar da  $Q_i$  ter sido nula, houve extração da solução do solo.

Como o adubo foi aplicado progressivamente em doses quinzenais, inicialmente esperava-se um comportamento do tipo assintótico, com aumentos progressivos que tenderiam à estabilização. Ao contrário, os dados experimentais de C (Figura 4.3) não apresentaram tendência alguma e os dados de  $^{15}\text{N}$  (Figura 4.4) indicaram uma tendência linear, maior para  $T_{800}$ . A variabilidade temporal destes dados deve ser atribuída a fatores de clima (principalmente à

irregularidade da precipitação), de solo e de planta. Para Bruno (2010), em seu trabalho que faz parte do mesmo experimento, ocorreu um aumento da quantidade de N nas folhas até o DAI 265, e, depois desta data, um decréscimo devido à perda mais pronunciada de folhas, que passou a fazer parte da serrapilheira. Isso ajuda a explicar a diminuição na C do íon  $\text{NO}_3^-$  no mês de março e o aumento em julho, pois a serrapilheira tem um relação C:N 31:1 (RICCI et al., 2010), ou seja, um material de rápida decomposição fazendo com que o N volte ao solo na forma de  $\text{NO}_3^-$ . A queda da C nos meses de maio e junho pode ser atribuída ao aumento da C de  $\text{NO}_3^-$  nas folhas e aumento da quantidade de N em frutos e na parte aérea (BRUNO, 2010). Os dados foram, então, submetidos à regressão e a de maior  $R^2$  foi a linear, significativa ao nível de 1% de significância para todos os casos, C [ $T_{400}$  ( $r = 0,710$ );  $T_{800}$  ( $r = 0,644$ )] e  $^{15}\text{N}$  [ $T_{400}$  ( $r = 0,660$ );  $T_{800}$  ( $r = 0,887$ )], utilizando-se a tabela de níveis de significância dos coeficientes de correlação simples proposta por Snedecor e Cochran (1967).

Com as equações de ambos os tratamentos (Figuras 4.3 e 4.4) foi calculada a  $C_i$  e  $^{15}\text{N}_i$  média para cada mês do período do estudo, transformando o 15° dia de cada mês em DAI.

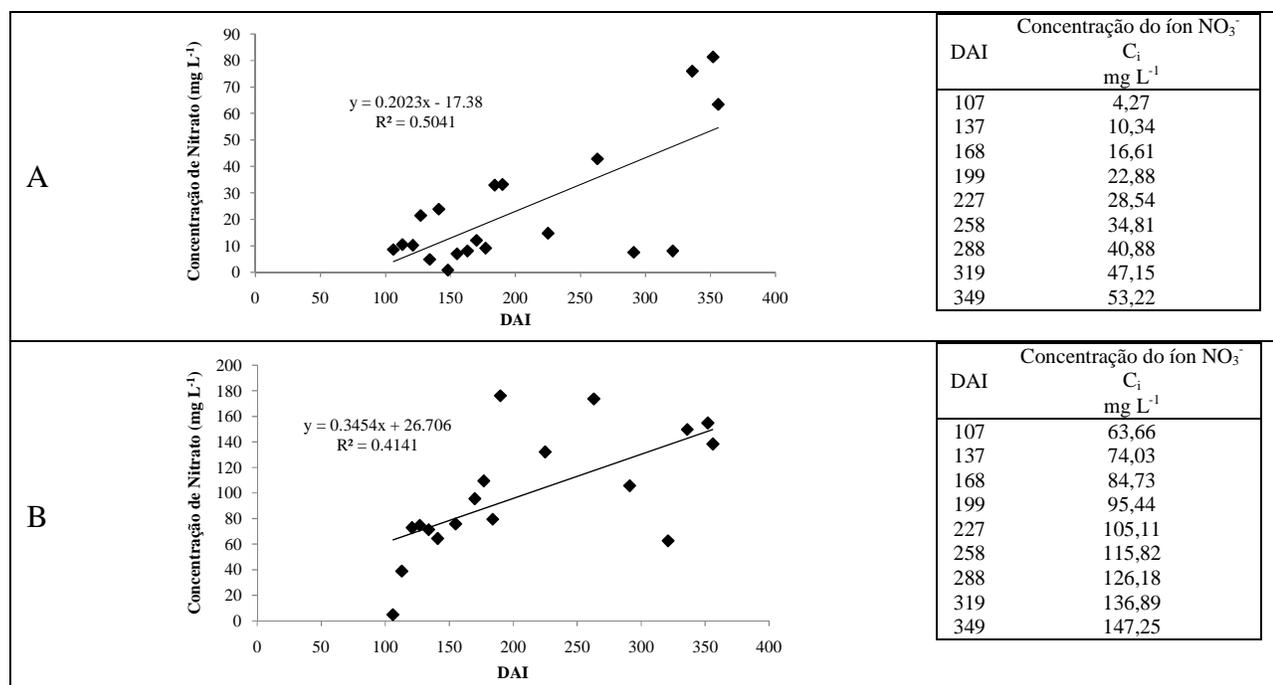


Figura 4.3 - Correlação entre concentração do íon nitrato em relação ao período de estudo em dias após início - DAI e concentração do íon nitrato -  $\text{NO}_3^-$  ( $C_i$ ) no 15° dia de cada mês em DAI, utilizando-se a equação da regressão para  $T_{400}$  (A) e  $T_{800}$  (B)

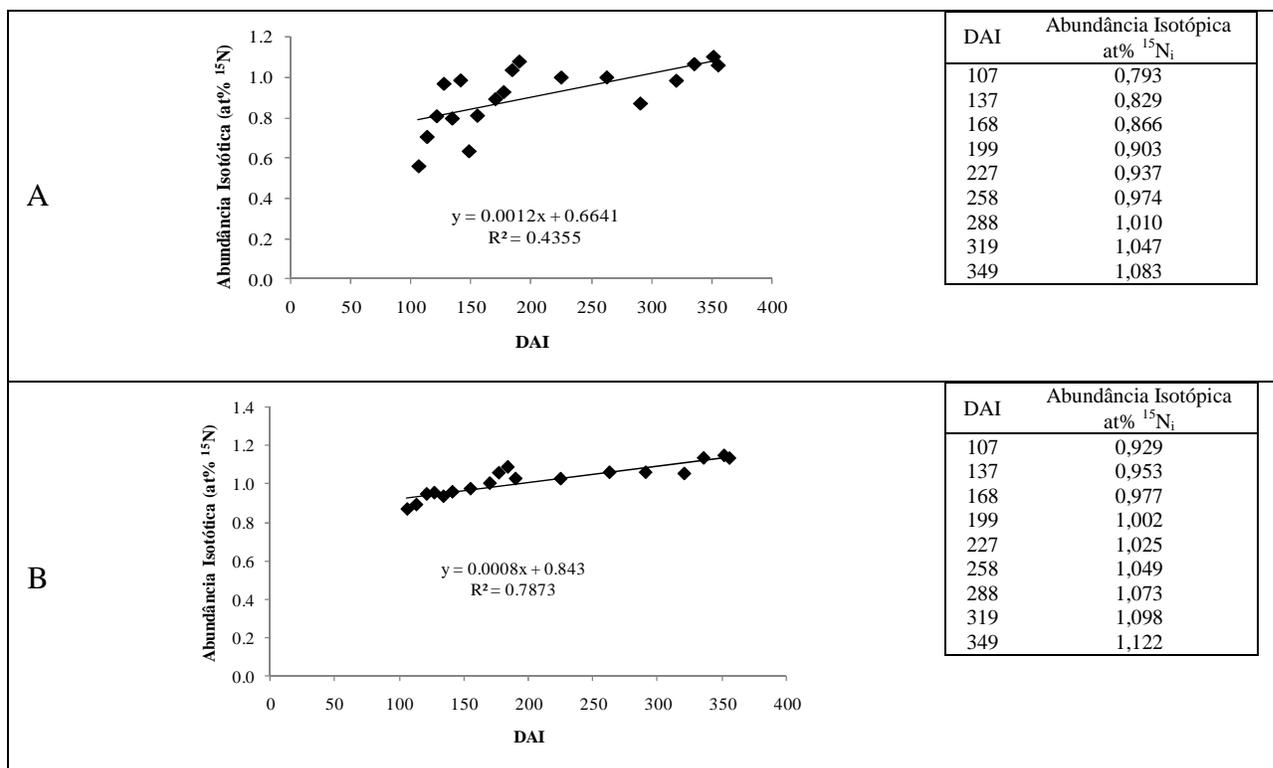


Figura 4.4 – Correlação entre abundância isotópica  $^{15}\text{N}$  em relação ao período de estudo em dias após início - DAI e abundância isotópica -  $^{15}\text{N}_i$  no 15º dia de cada mês em DAI, utilizando-se a equação da regressão para  $T_{400}$  (A) e  $T_{800}$  (B)

Na Tabela 4.6 são apresentados os dados calculados pelos valores medidos - VM e pelos valores modelados - VL para  $C_i$  e  $^{15}\text{N}_i$ . Os dados de VM de  $C_i$  tiveram um alto desvio padrão e coeficiente de variação, valores esses que diminuiriam quando originados por VL. Pelo alto desvio padrão dos dados, não foi encontrado diferença entre os métodos de cálculos de VM e VL (Tabela 4.7). Os dados de  $^{15}\text{N}_i$  (Tabela 4.6) para VM tiveram um baixo desvio padrão e coeficiente de variação, sendo que foram praticamente idênticos ao VL. Para  $^{15}\text{N}_i$  também não foi encontrado diferença entre os métodos de cálculo (Tabela 4.7).

Com os dados mensais de  $^{15}\text{N}_i$  de VM e VL foram calculados os valores de nitrogênio derivado do fertilizante -  $N_{ddf_i}$  [eq. (4.3)]. Em seguida, com os dados de drenagem profunda -  $Q_i$  a 1 m de profundidade e os da de  $C_i$  e  $N_{ddf_i}$ , calculou-se a Quantidade de Nitrogênio derivado do fertilizante -  $Q_{Nddf_i}$  lixiviado [eq. (4.2)].

A  $Q_{Nddf_i}$  lixiviado a 1 m de profundidade (Figura 4.5) variou conforme o modelo adotado para cálculo de evapotranspiração potencial -  $ET_p$ , pois esta influencia a quantidade de água drenada calculada pelo balanço hídrico - BH sequencial. A  $Q_{Nddf_i}$  lixiviado calculada com

VM de  $C_i$  para ambos os tratamentos segue a mesma tendência de aumento e de declínio, tendendo a seguir o mesmo comportamento da precipitação + irrigação - P + I e de  $Q_i$ , independente do modelo de  $ET_p$  utilizado para o cálculo, ou seja, crescendo de outubro a março e decrescendo de março a julho. Porém, quando foram utilizados os dados de  $C_i$  pelo VL, os dados de  $QNddf_i$  lixiviado respondem aos fluxos de  $Q_i$ , crescendo ou decrescendo conforme o  $Q_i$  maior ou menor.

Tabela 4.6 - Concentração do íon nitrato da solução do solo -  $C_i$  e abundância isotópica -  $^{15}N_i$  para os valores medidos - VM e de valores modelados - VL

DAI	$C_i$ VM		$C_i$ VL		$^{15}N_i$ VM		$^{15}N_i$ VL	
	mg L <sup>-1</sup>		mg L <sup>-1</sup>		at% $^{15}N$		at% $^{15}N$	
	T <sub>400</sub>	T <sub>800</sub>	T <sub>400</sub>	T <sub>800</sub>	T <sub>400</sub>	T <sub>800</sub>	T <sub>400</sub>	T <sub>800</sub>
107	9,73	38,88	4,27	63,66	0,689	0,901	0,793	0,929
137	12,73	70,18	10,34	74,03	0,843	0,948	0,829	0,953
168	13,82	90,08	16,61	84,73	0,914	1,029	0,866	0,977
199	33,19	176,07	22,88	95,44	1,075	1,026	0,903	1,002
227	14,73	132,06	28,54	105,11	0,997	1,025	0,937	1,025
258	42,82	173,55	34,81	115,82	0,997	1,058	0,974	1,049
288	7,50	105,66	40,88	126,18	0,868	1,058	1,010	1,073
319	8,04	62,62	47,15	136,89	0,981	1,052	1,047	1,098
349	73,59	147,57	53,22	147,25	1,073	1,137	1,083	1,122
Média	24,02	110,74	28,74	105,46	0,937	1,026	0,938	1,025
Desvio Padrão	19,86	44,27	14,97	25,57	0,11	0,06	0,09	0,06
C.V.%	82,70	39,98	52,08	24,24	11,80	5,91	9,46	5,76

Tabela 4.7 – Comparação entre os métodos de cálculo, valores medidos - VM e valores modelados - VL da concentração do íon nitrato da solução do solo -  $C_i$  e abundância isotópica -  $^{15}N_i$  para VM e VL

Cálculo	$C_i$ mg L <sup>-1</sup>		
	T <sub>400</sub>	T <sub>800</sub>	
VM	24,02a*	110,74a	
VL	28,74a	105,46a	
C.V.%	74,54	37,39	
Cálculo	$^{15}N_i$ at% $^{15}N$		
	T <sub>400</sub>	T <sub>800</sub>	
	VM	0,937a	1,026a
	VL	0,938a	1,025a
C.V.%	11,95	6,52	

\*Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

O mês de março de 2009 teve a maior  $QN_{ddf_i}$  lixiviado (Figura 4.5) em função dos valores altos de  $P + I$  e  $Q_i$  e também pelos baixos valores de evapotranspiração real -  $ET_r$  quando comparada a esses. Nesse mês, no  $T_{400}$ , seguindo o modelo de TH, ocorreu uma lixiviação de  $3,6 \text{ kg ha}^{-1}$  de N para VM e  $6,3 \text{ kg ha}^{-1}$  de N para VL, sendo que VL superestimou em 75% o VM. Pelo mesmo modelo de  $ET_p$ , aconteceu o contrário para o  $T_{800}$ , com VL subestimando em 20,5% o VM, com VM lixiviando  $33,6$  e VL  $26,7 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. Alva et al. (2006) citam que, em função das transformações do N no sistema solo-planta-atmosfera, apenas parte do N proveniente do fertilizante é absorvido pelas plantas. Isto porque o N aplicado no solo está sujeito a perdas por lixiviação, por escoamento superficial, por desnitrificação, por volatilização da amônia e pela imobilização na biomassa microbiana. Nesse contexto, Reichardt et al. (2009) citam que perdas por lixiviação são perdas comuns, porém, difíceis de serem mensuradas e por esse motivo, estimou-se a lixiviação pelo BH pelo modelo de  $ET_p$  de PM e chegou-se a valores semelhantes. Para o  $T_{400}$  utilizando o VM ocorreu uma lixiviação de  $3,9$  e pelo VL de  $6,9 \text{ kg ha}^{-1}$  de N com VL superestimando em 76,9% VM. Para o  $T_{800}$  ocorreu uma lixiviação da  $QN_{ddf_i}$  de  $36,9$  por VM e de  $29,3 \text{ kg ha}^{-1}$  de N pelo VL sendo que VL subestimou em 20,6% a VM. A diferença pelos dois métodos de cálculo da  $QN_{ddf_i}$ , independentemente do modelo de  $ET_p$ , deve-se ao melhor ajuste do VL em relação a VM, pois a primeira segue melhor os fluxos de  $Q_i$ . Essa lixiviação da  $QN_{ddf_i}$  pode ter ocorrido por a uréia estar dissolvida na água de irrigação. Para Martha Jr. et al. (2009), a aplicação de  $^{15}\text{N}$ -uréia dissolvida em água pode acelerar o processo de perda de N em relação à aplicação do fertilizante na forma sólida por lixiviação. Meirelles et al. (1980) apontam para o fato de que dinâmica do N em solos de regiões tropicais úmidas é caracterizada por grande mobilidade e altas taxas de mineralização de matéria orgânica, devido à predominância de temperaturas elevadas. Estes e outros aspectos, incluindo o custo de N-fertilizante, fazem com que a eficiência e a gestão sejam fundamentais para uma agricultura de sucesso, sendo essenciais para a compreensão dos processos subjacentes e das interações do sistema solo-café-atmosfera que serão capazes de maximizar a absorção de N pelas plantas (Fenilli et al. 2008).

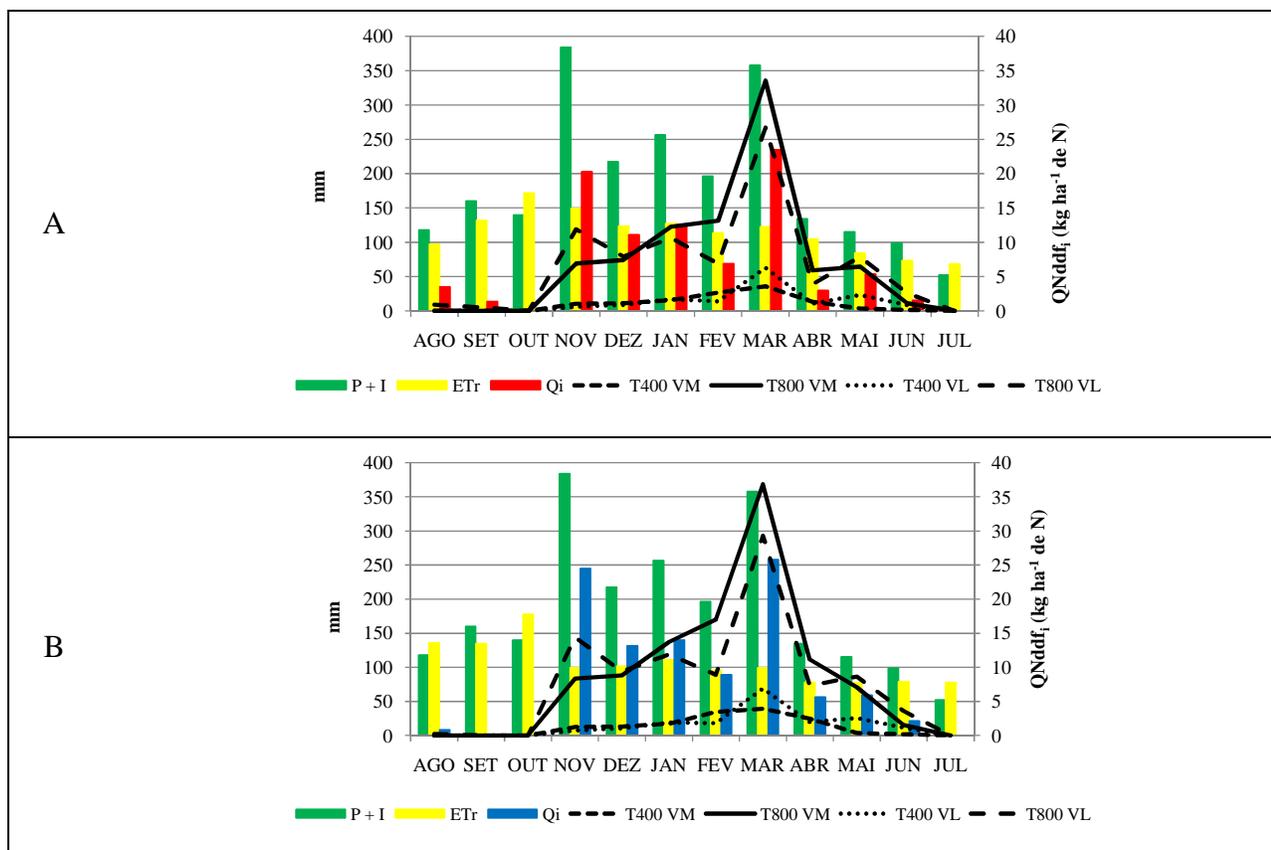


Figura 4.5 - Precipitação + irrigação - P + I, evapotranspiração real - ET<sub>r</sub>, drenagem profunda - Q<sub>i</sub>, Quantidade de Nitrogênio derivado do fertilizante - QNddf<sub>i</sub> lixiviado calculados pelos valores medidos - VM e pelos valores modelados - VL dos tratamentos T<sub>400</sub> e T<sub>800</sub> utilizando os modelos de evapotranspiração potencial de Thornthwaite - TH (A) e Penman Monteith - PM (B) no balanço hídrico

Os dados da Figura 4.6 mostram os dados da Figura 4.5 representados de forma acumulada, indicando também que o mês de março teve a maior lixiviação, perceptível pela curva com uma maior inclinação em relação ao eixo das abcissas. Os acumulados de Q<sub>i</sub> tiveram a mesma tendência independentemente do modelo de ET<sub>p</sub>, porém, com resultados finais diferentes, onde por TH foi encontrado uma Q<sub>i</sub> de 891,7 mm e por PM uma Q<sub>i</sub> 1010,5 mm. A Q<sub>i</sub> diferente influenciou o resultado final acumulado da QNddf<sub>i</sub> lixiviado [eq. (4.4)], onde para o T<sub>400</sub> por TH foi encontrado 11,7 e 15,0 kg ha<sup>-1</sup> de N e para o T<sub>800</sub> foi encontrado 86,7 e 79,7 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente pelos VM e pelo VL. Pelo modelo da ET<sub>p</sub> de PM foram encontrados 14,7 e 18,0 kg ha<sup>-1</sup> de N para T<sub>400</sub> e para o T<sub>800</sub> foram encontrados 104,5 e 93,6 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente pelos VM e pelo VL. Em trabalho realizado por Fenilli et al. (2008), nas condições de Piracicaba-SP na cultura de café, foram aplicados 280 kg ha<sup>-1</sup> de N, encontrou-se uma lixiviação de 6,5 kg ha<sup>-1</sup> de N. No segundo ano de seu estudo, aplicando-se 350 kg ha<sup>-1</sup> de N, encontrou-se uma

lixiviação acumulada de  $14,5 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. Independentemente do modelo de  $ET_p$  adotado, para o  $T_{400}$  o cálculo feito pelo VL superestimou em média 25,0% o VM e o contrario aconteceu com o  $T_{800}$ , onde, em média, o cálculo feito pelo VL subestimou 9,4% a VM. Para Nario et al. (2003), a lixiviação é um processo que depende do manejo da irrigação. Quiñones et al. (2005) citam que a resposta ao fertilizante de N é influenciada pelos métodos de irrigação, pela frequência e a época de aplicação de N, bem como pelos processos de solo como nitrificação, desnitrificação, imobilização, volatilização e lixiviação. Boaretto et al. (2007) citam em seu trabalho com laranjeiras, que em períodos chuvosos, diminui a eficiência do N pela possível perda por lixiviação. Segundo Oliveira et al. (2002) e Franco et al. (2008), perdas de N por lixiviação podem ser desconsideradas, pois, na maioria dos ensaios com o emprego de  $^{15}\text{N}$  em cana-de-açúcar, constatou-se que são pequenas. Para Silva et al. (2006) e Duete et al. (2008), porém perdas mesmo pequenas por lixiviação não devem ser desconsideradas. Em relação apenas aos modelos de  $ET_p$ , TH subestimou PM em 18,3% e 16,0% respectivamente para  $T_{400}$  e  $T_{800}$ .

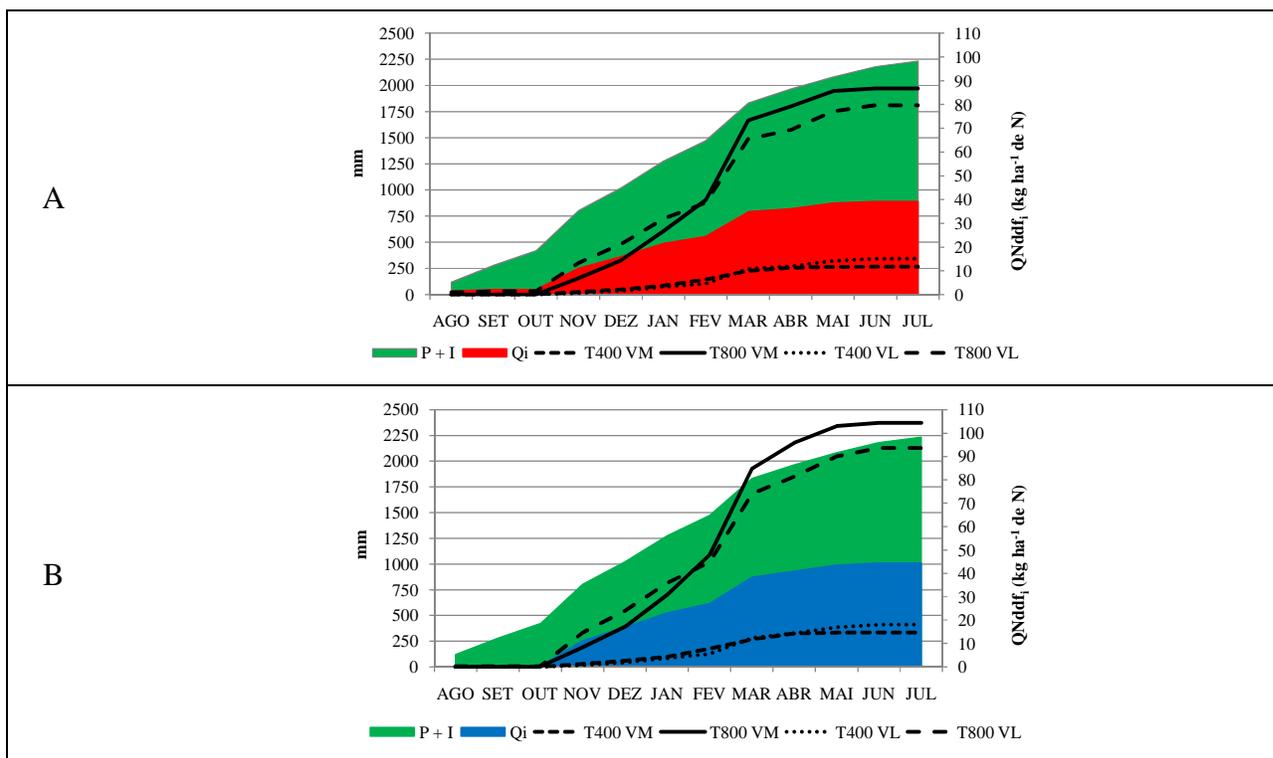


Figura 4.6 - Precipitação + irrigação - P + I acumulada, drenagem profunda -  $Q_i$  acumulada, Quantidade de Nitrogênio derivado do fertilizante -  $QN_{ddf}$ ; lixiviado acumulado calculado pelos valores medidos - VM e valores modelados - VL dos tratamentos  $T_{400}$  e  $T_{800}$  utilizando-se os modelos de evapotranspiração potencial de Thornthwaite - TH (A) e Penman Monteith - PM (B) no balanço hídrico

Todas as diferentes maneiras de cálculo da lixiviação da  $QNddf_i$  para ambos os modelos de  $ET_p$  e tratamentos tiveram uma boa correlação com a  $Q_i$  (Figura 4.7) e com a  $P + I$  (Figura 4.8), sendo que todas elas tiveram  $R^2$  próximo de 1. Pode-se mostrar que os modelos que melhor se ajustam são polinômios do tipo  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ , e que os coeficientes “a” e “b” são muito pequenos. Este fato reduz os modelos à forma linear,  $y = cx + d$ , o que é plenamente lógico, isto é, quanto maior  $Q_i$ , maior  $QNddf_i$ .

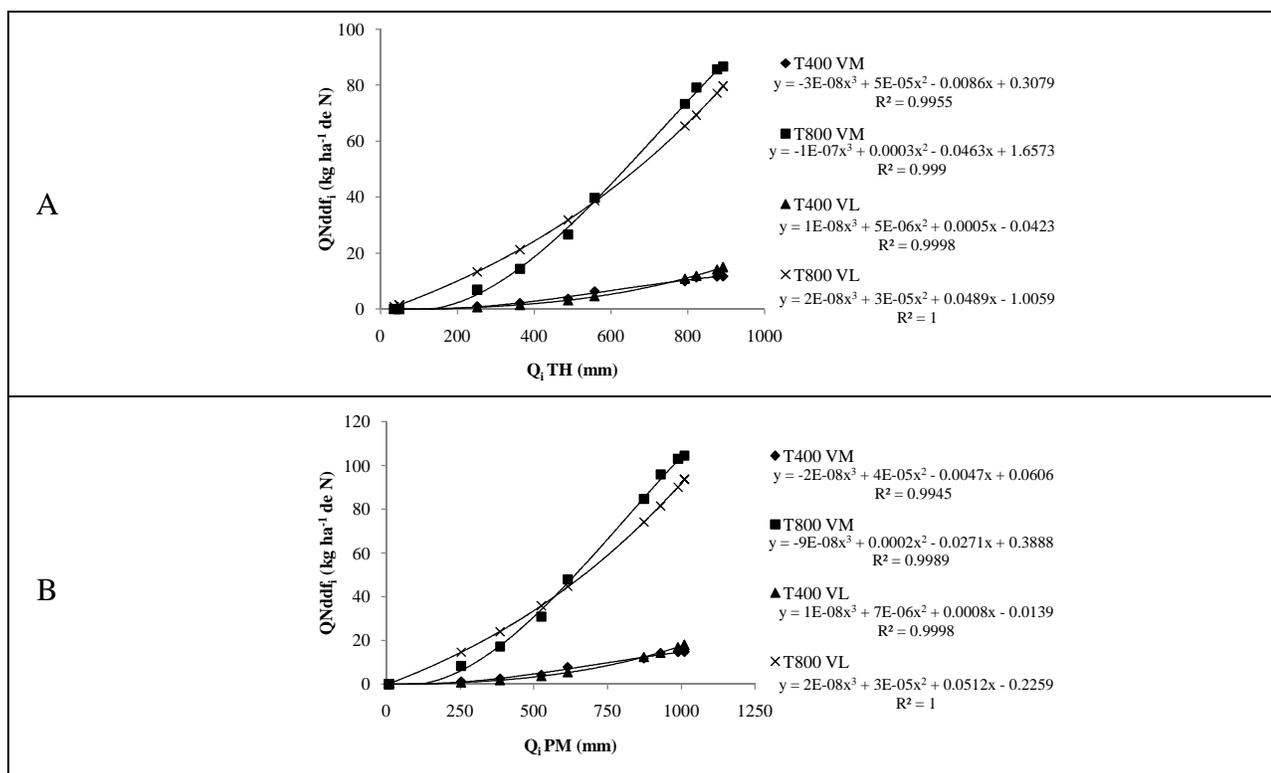


Figura 4.7 - Correlação entre os dados acumulados de drenagem profunda -  $Q_i$  e da Quantidade de Nitrogênio derivado do fertilizante -  $QNddf_i$  lixiviado calculado pelos valores medidos - VM e valores modelados - VL pelo modelos de evapotranspiração potencial de Thornthwaite - TH (A) e Penman Monteith - PM (B) no balanço hídrico para o  $T_{400}$  e  $T_{800}$

Na Tabela 4.8 são mostrados os três cenários estudados e modelos de  $ET_p$  com os métodos de cálculos de lixiviação da  $QNddf_i$  para os dois tratamentos, lembrando que o cenário i é o que realmente aconteceu no campo e os cenários ii e iii são simulações. Os dados dessa tabela mostram que com a  $P + I$ , em média, para o  $T_{400}$  ocorreu uma lixiviação da  $QNddf_i$  de 14,9 kg ha<sup>-1</sup> de N, o que corresponde a 3,7% da dose aplicada. Na simulação, retirando-se a I (cenário ii), a  $QNddf_i$  lixiviado diminui para 12,1 kg ha<sup>-1</sup> de N (3,0% da dose). Podemos inferir desses

dados para esse tratamento que a I não é a responsável pela lixiviação e sim a P. A ausência de I diminui em apenas 2,8 kg ha<sup>-1</sup> de N lixiviado. A alta P ocorrida no período das chuvas (novembro a abril) atingiu 1384 mm o que em média corresponde a 230,7 mm por mês. Como a I é de extrema importância para a cultura de café no oeste baiano, de maio a outubro fez-se uma simulação somente com ela nesse período - P + I<sub>es</sub> e ocorreu uma lixiviação de apenas 0,7 kg ha<sup>-1</sup>, superior em relação ao cenário ii, correspondendo a 3,2% da dose aplicada. Fenilli et al. (2008), trabalhando com café, quando foram aplicados 280 kg ha<sup>-1</sup> de N, encontraram uma lixiviação de 6,5 kg ha<sup>-1</sup> de N, correspondendo a 2,3% da dose; no segundo ano, aumentado-se a dose para 350 kg ha<sup>-1</sup> de N, encontraram uma lixiviação de 8,0 kg ha<sup>-1</sup>, correspondendo novamente a 2,3% da dose. Oliveira et al. (2007) citam que as perdas por lixiviação (se considerada a camada abaixo de 0,40 m) em pastagem foram muito pequenas, pois os níveis de N no solo foram muito baixos e a marcação com o traçador <sup>15</sup>N foi próxima à natural, indicando baixo deslocamento do N da uréia até essa camada do solo.

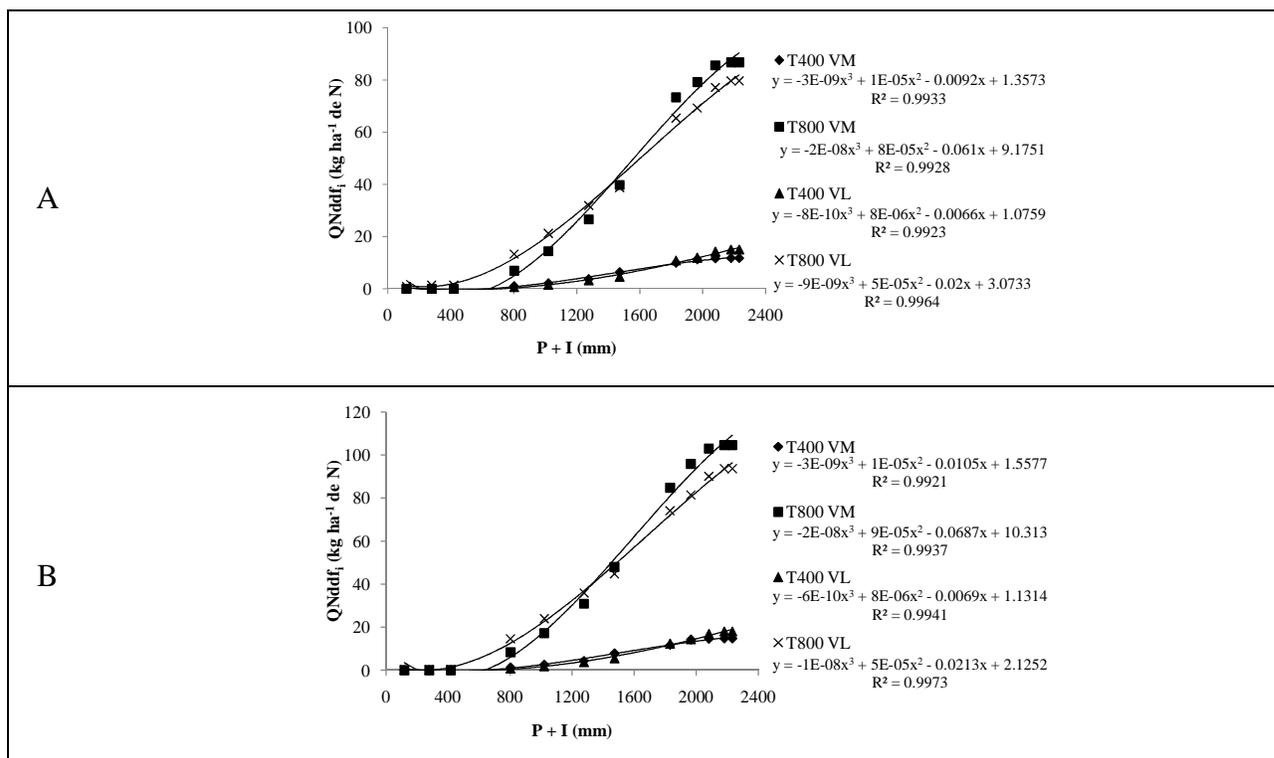


Figura 4.8 – Correlação entre os dados acumulados de precipitação + irrigação - P + I e da Quantidade de Nitrogênio derivado do fertilizante - QNddf<sub>i</sub> lixiviado calculado pelos valores medidos - VM e valores modelados - VM pelos modelos de evapotranspiração potencial de Thornthwaite - TH (A) e Penman Monteith - PM (B) no balanço hídrico para o T<sub>400</sub> e T<sub>800</sub>

Tabela 4.8 – Cenário, modelos, lixiviação da Quantidade do Nitrogênio derivado do fertilizante - QNddf, Porcentagem - % da dose para T<sub>400</sub> e T<sub>800</sub>.

Cenário	Modelos	T <sub>400</sub>		T <sub>800</sub>	
		kg ha <sup>-1</sup>	% dose	kg ha <sup>-1</sup>	% dose
i (P + I)	TH VM	11,7	2,9	86,7	10,8
	PM VM	14,7	3,7	104,5	13,1
	TH VL	15,0	3,8	79,7	10,0
	PM VL	18,0	4,5	93,6	11,7
média		14,9	3,7	91,1	11,4
ii (P)	TH VM	9,1	2,3	71,7	9,0
	PM VM	12,0	3,0	88,4	11,0
	TH VL	12,3	3,1	63,1	7,9
	PM VL	14,9	3,7	76,5	9,6
média		12,1	3,0	74,9	9,4
iii (P + I <sub>es</sub> )	TH VM	9,4	2,4	73,9	9,2
	PM VM	12,3	3,1	91,0	11,4
	TH VL	13,2	3,3	68,9	8,6
	PM VL	16,1	4,0	82,1	10,3
média		12,8	3,2	79,0	9,9

P = precipitação, I = irrigação, I<sub>es</sub> = irrigação na estação seca (maio a outubro), TH = evapotranspiração potencial por Thornthwaite, PM = evapotranspiração potencial por Penman Monteith, VM = valor medido, VL = valor modelado.

Para o T<sub>800</sub> (Tabela 4.8) ocorreu algo semelhante ao T<sub>400</sub>, porém, com valores superiores. No período do estudo lixiviou em média 91,1 kg ha<sup>-1</sup> de N (cenário i), correspondendo a 11,4% do total aplicado, o que é uma QNddf<sub>i</sub> considerável se pensarmos em termos de custo de produção. No cenário onde deixamos apenas a P (cenário ii), observamos que para esse tratamento ainda ocorre uma lixiviação de 74,9 kg ha<sup>-1</sup> de N, o que mostra que a grande P nos meses chuvosos é a principal responsável por essa perda da QNddf<sub>i</sub>, pois ela representa 9,4% da dose aplicada. Aplicando I apenas no período seco (cenário iii), a lixiviação da QNddf<sub>i</sub> aumenta para 79,0 kg ha<sup>-1</sup> de N, correspondendo em termos médios a 9,9% dos 800 kg ha<sup>-1</sup> de N. Nessa mesma cultura, Reichardt et al. (2009) encontraram uma lixiviação de 2,3% de QNddf<sub>i</sub>. Para Gava et al. (2006), estudando a lixiviação em milho, possivelmente, a desnitrificação foi o principal processo de perda de N no sistema solo-planta, uma vez que a lixiviação do N representou cerca de 1% do N-fertilizante. Boaretto et al. (2004), em cultura de trigo, considerando-se a camada de solo de 50 cm, encontraram uma lixiviação de 1% do total N aplicado. Para Quiñones et al. (2007), cerca de 0,1% da N aplicado foi lixiviado através da irrigação por inundação, essencial em períodos de falta de chuva. A resposta do N fertilizante é

influenciada pelos métodos de irrigação, frequência e época de aplicação de N, bem como pelos processos de solo como nitrificação, desnitrificação, imobilização, volatilização e lixiviação. (QUIÑONES et al. 2005).

Uma consideração final é feita com relação aos cálculos da  $ET_p$ . Adotou-se evapotranspiração máxima do café -  $ET_m$  igual a  $ET_p$  tanto pelo modelo de TH e PM, pois os cálculos foram feitos com coeficiente de cultura -  $K_c$  igual a 1. Como se sabe, o  $K_c$  é difícil de ser medido devido à sua dependência da arquitetura do sistema solo-planta-atmosfera. Os dados da literatura são bastante conflitantes com relação ao  $K_c$ , variando desde 0,65 a 1,30, pois seu valor depende da metodologia de sua determinação, fenologia, idade e arranjo da planta e tratos culturais (SANTINATO; FERNANDES; FERNANDES, 1996 PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002; PEREIRA; CAMARGO; CAMARGO, 2008). De qualquer forma, para diferentes valores de  $K_c$ , apenas muda a relação entre  $ET_m$  e  $Q_i$ . Se  $ET_m$  aumentar de um fator 1,2,  $Q_i$  se reduz de 0,8. Desta forma, os dados aqui apresentados para  $K_c = 1$  podem ser avaliados para qualquer outro valor de  $K_c$ .

#### 4.4 Conclusões

Com o uso do balanço hídrico - BH, através de seu componente drenagem profunda -  $Q_i$ , e dos modelos de evapotranspiração potencial -  $ET_p$  de Thornthwaite - TH e Penman Monteith - PM, considerando um coeficiente de cultura unitário, foi possível estimar a Quantidade de Nitrogênio derivado do fertilizante -  $QN_{ddf}$  lixiviado, sendo que TH subestima a lixiviação quando comparada ao modelo de PM em 17,1 %. Através dos cenários de irrigação, foi possível verificar que a alta taxa de aplicação de nitrogênio - N, associada à precipitação concentrada são os grandes responsáveis pela lixiviação, cujos valores máximos foram 18,0 e 104,5 kg ha<sup>-1</sup> de N para as doses de 400 e 800 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente, aplicado na forma de uréia, parceladamente e por fertirrigação, correspondendo a 4,5 e 13,1 % do adubo aplicado.

#### Referências

ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; BURMAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989.

- ALVA, A.K.; PARAMASIVAM, S.; FARES, A.; DELGADO, J.A.; MATTOS Jr., D.; SAJWAN, K. Nitrogen and irrigation management practices to improve nitrogen uptake efficiency and minimize leaching losses. **Journal of Crop Improvement**, Binghamton, v. 15, n. 2, p. 369-420, 2006.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 241-248, 2002.
- BOARETTO, A.E.; SHIAVINATTO-NETO, P.; MURAOKA, T.; OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O. Fertilização foliar de nitrogênio para laranjeira em estágio de formação. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 3, p. 621-626, 1999.
- BOARETTO, A.E.; SPOLIDORIO, E.S.; FREITAS, J.G.; TRIVELIN, P.C.O.; MURAOKA, T.; CANTARELLA. Fate of  $^{15}\text{N}$ -urea applied to wheat-soybean succession crop. **Bragantia**, Campinas, v. 63, n. 2, p. 265-274, 2004.
- BOARETTO, R.M.; MATOS JUNIOR, D.; TRIVELIN, P.C.O.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E. Acúmulo de nutrientes e destino do nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) aplicado em pomar jovem de laranjeira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 29, n. 3, p. 600-605, 2007.
- BRUNO, I.P. **Eficiência da aplicação de uréia em fertirrigação de cafeeiros irrigados por pivô-central utilizando o traçador  $^{15}\text{N}$** . 2010. 116 p. Tese. (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010. No prelo.
- COELHO, G.; SILVA, A.M. O efeito da época de irrigação e de parcelamentos de adubação sobre a produtividade do cafeeiro em três safras consecutivas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 400-408, 2005.
- DUETE, R.R.C.; MURAOKA, T.; SILVA, E.C.; TRIVELIN, P.C.O.; AMBROSANO, E.J. Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) pelo milho em latossolo vermelho. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 161-171, 2008.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos., 2006. 306 p.
- FENILLI, T.A.B.; BOARETTO, A.E.; BENDASSOLLI, J.A.; TRIVELIN, P.C.O.; MURAOKA, T. Dinâmica do nitrogênio em laranjeiras jovens cultivadas em solução nutritiva. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 25, n. 2, p. 461-472, 2004.
- FENILLI, T.A.B.; REICHARDT, K; BACCHI, O.O.S.; TRIVELIN, P.C.O.; DOURADO-NETO, D. The  $^{15}\text{N}$  isotope to evaluate fertilizer nitrogen absorption efficiency by the coffee plant. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 79, n. 4, p. 767-776, 2007a.

FENILLI, T.A.B.; REICHARDT, K; FAVARIN, J.L.; BACCHI, O.O.S.; SILVA, A.L.; TIMM, L.C. Fertilizer  $^{15}\text{N}$  balance in a coffee cropping system: a case study in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1459-1469, 2008.

FENILLI, T.A.B.; REICHARDT, K; DOURADO-NETO, D.; TRIVELIN, P.C.O.; FAVARIN, J.L.; COSTA, F.M.P.; BACCHI, O.O.S. Growth, development, and fertilizer  $^{15}\text{N}$  recovery by the coffee plant. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 5, p. 541-547, 2007b.

FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OTTO, R. Aproveitamento pela cana-de-açúcar da adubação nitrogenada de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. especial, p. 2763-2770, 2008.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W. Recuperação de nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) da uréia e da palhada por soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 621-630, 2003.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; HEINRICHS, R.; SILVA, M.A. Balanço do nitrogênio da uréia ( $^{15}\text{N}$ ) no sistema solo-planta na implantação da semeadura direta na cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 3, p. 477-486, 2006.

GINÉ, M.F.; BERGAMIN, H.; ZAGATTO, E.A.G.; REIS, B.F. Simultaneous determination of nitrate and nitrite by flow injection analysis. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 114, p. 191-197, 1980.

HARDARSON, G. **Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships**. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1990. 223 p. (Training Course Series, 2)

KÖPPEN, W. **Grundriss der Klimakunde**, Walter de Gruyter, Berlin: Leipzig, 1931. 388 p.

LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; KONDÖRFER, G.H.; PEREIRA, S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 363-376, 2000.

LIMA FILHO, O.F.; MALAVOLTA, E. Studies on mineral nutrition of the coffee plant (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí Vermelho). Remobilization and re-utilization of nitrogen and potassium by normal and deficient plants. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 63, n. 3, p. 418-490, 2003.

MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, E. (Ed.). **Cultura do cafeeiro**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1986. p. 165-274.

MARTHA JÚNIOR, G.B.; CORSI, M.; TRIVELIN, P.C.O.; VILELA, L. Recuperação de  $^{15}\text{N}$ -uréia no sistema solo-planta de pastagem de capim-tanzânia. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 95-101, 2009.

MEIRELLES, N.M.F.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Absorção e lixiviação de nitrogênio em cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, n. 2, p. 83-88, 1980.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. In: SYMPOSIUM OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 19., 1965, Swansea. **Proceedings...** Cambridge: University Press, 1965. p. 205-234.

NARIO, A.; PINO, I.; ZAPATA, F.; ALBORNOZ, M.P.; BACHERLE, P. Nitrogen ( $^{15}\text{N}$ ) fertilizer use efficiency in peach (*Prunus persica* L.) cv. Goldencrest trees in Chile. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 97, n. 3/4, p. 279-287, 2003.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; BOARETTO, A.E.; MURAOKA, T.; MORTATTI, J. Leaching of nitrogen, potassium, calcium, and magnesium in a sandy soil cultivated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 861-868, 2002.

OLIVEIRA, P.P.A.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, W.S. Balanço do nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) da uréia nos componentes de uma pastagem de capim-marandu sob recuperação em diferentes épocas de calagem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1982-1989, 2007.

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

PEREIRA, A.R.; CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. **Agrometeorologia de Cafezais no Brasil**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. 127 p.

QUIÑONES, A.; BAÑULS, J.; PRIMO-MILLO, E.; LEGAS, F. Recovery of the  $^{15}\text{N}$ -labelled fertilizer in citrus trees in relation with timing of application and irrigation system. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 268, n. 1, p. 367-376, 2005.

QUIÑONES, A.; MARTÍNES-ALCÁNTARA, B.; LEGAS, F. Influence of irrigation system and fertilization management on seasonal distribution of N in the soil profile and on N-uptake by citrus trees. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 122, n. 3, p. 399-409, 2007.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações da adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: IAC, 1996. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

REICHARDT, K.; SILVA, A.L.; FENILLI, T.A.B.; TIMM, L.C.; BRUNO, I.P.; VOLPE, C.A. Relação entre a adubação nitrogenada e as condições hídricas do solo para um cafezal de Piracicaba, SP. **Coffee Science**, Lavras, v. 4, n. 1, p. 41-55, 2009.

RENA, A.; MAESTRI, M. **Relações hídricas no cafeeiro**. Brasília: ITEM, Irrigação e tecnologia, n. 48, p. 34-41, 2000.

RICCI, M.S.F.; NEVES, M.C.P.; NANNETTI, A.N.; MOREIRA, C.F.; AGUIAR-MENEZES, E.L.; SILVA, É.; CAIXETA, I.F.; ARAÚJO, J.B.S.; LEAL, M.A.A.; FERNANDES, M.C.; ALMEIDA, P.S.; PEDINI, S. **Cultivo do café orgânico**. Disponível em<[http://sistemasdeproducao.cnptia.Embrapa.br/FontesHTML/Cafe/CafeOrganico\\_2ed/anexo03.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.Embrapa.br/FontesHTML/Cafe/CafeOrganico_2ed/anexo03.htm)>. Acesso em: 16 jul. 2010.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente Excel<sup>TM</sup> para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

SANTINATO, R., FERNANDES, A.L.T., FERNANDES, D.R. **Irrigação na cultura do café**. Campinas: Arbore Agrícola e Comércio, 1996. 146 p.

SCIVITTARO, W.B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E., TRIVELIN, P.C.O. Transformações do nitrogênio proveniente de mucuna-preta e uréia utilizados como adubo na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 12, p. 1427-1433, 2003.

SILVA, A.M.; COELHO, G.; SILVA, R.A. Épocas de irrigação e parcelamento de adubação sobre a produtividade do cafeeiro, em quatro safras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 3, p. 314-319, 2005.

SILVA, E.C.; BUZZETTI, S.; GUIMARÃES, G.L.; LAZARINI, E.; SÁ, M.E. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3 p. 353-362, 2005.

SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; BUZZETTI, S.; VELOSO, M.E.C.; TRIVELIN, P.C.O. Aproveitamento do nitrogênio (<sup>15</sup>N) da crotalária e do milheto pelo milho sob plantio direto em Latossolo Vermelho de Cerrado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 739-746, 2006.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical methods**. 6th.ed. Iowa: Ames, Iowa State University Press, 1967. 593p.

SORENSEN, P.; JENSEN, E.S. Sequential diffusion of ammonium and nitrate from soil extracts to a polytetrafluorethylene trap for <sup>15</sup>N determination. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 252, n. 1/2, p. 201-203, 1991.

SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Análise dos atributos climáticos do Estado da Bahia**. Salvador: Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, 1998. 85 p. (Série Estudos e Pesquisa, 38).

THORNTHWAITE, C.W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, London, n. 38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.

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

## 5 CONCLUSÕES GERAIS

- (i) Os fatores climáticos influenciaram os diferentes resultados dos balanços hídricos nos quais a evapotranspiração foi avaliada pelos modelos de Thornthwaite e Penman-Monteith.
- (ii) O modelo de evapotranspiração de Thornthwaite é menos preciso; porém, onde apenas há disponibilidade de dados de temperatura, pode ser usado na elaboração do balanço hídrico.
- (iii) Através do balanço hídrico sequencial foi possível fazer estimativa da drenagem profunda em área plana sem runoff.
- (iv) O modelo de evapotranspiração de Thornthwaite subestimou a drenagem profunda em relação ao de Penman-Monteith.
- (v) Foi possível estimar a lixiviação de nitrato e de nitrogênio do fertilizante a partir de dados de drenagem profunda e de análises da solução do solo.
- (vi) Observaram-se no sistema de fertirrigação lixiviações de grandes concentrações e quantidades de nitrato a 1 m de profundidade.
- (vii) A alta taxa de aplicação de uréia associada às precipitações concentradas são as responsáveis pela lixiviação, associada ao tipo de solo arenoso e ao sistema adensado com aplicações parceladas concentradas na linha de plantas, independentemente do cenário estudado.
- (viii) A lixiviação do nitrogênio do fertilizante para as condições do estudo é da ordem de 3,0% para 400 kg ha<sup>-1</sup> e de 10,0% para 800 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio aplicado, conforme o modelo de evapotranspiração utilizado para elaboração do balanço hídrico.