LIXIVIAÇÃO DE NITROGÊNIO EM CULTURA DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.).

CLAUDIO BENEDITO BAPTISTA LEITE

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de Concentração: Agrometeorologia.

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Fevereiro - 1993

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCLQ/USP

Leite, Claudio Benedito Baptista

L533L Lixiviação de nitrogênio em cultura de feijão
(*Phaseolus vulgaris* L.). Piracicaba, 1993.
p.

Diss.(Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Feijão - Balanço de nitrogênio 2. Lixiviação
3. Nitrogênio em feijão - Lixiviação I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 635.652

LIXIVIAÇÃO DE NITROGÊNIO EM CULTURA DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.).

CLAUDIO BENEDITO BAPTISTA LEITE
Geólogo

Orientador: Prof. Dr. PAULO LEONEL LIBARDI

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de Concentração: Agrometeorologia.

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Fevereiro - 1993

LIXIVIAÇÃO DE NITROGÊNIO EM CULTURA DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.).

CLAUDIO BENEDITO BAPTISTA LEITE

Aprovada em: 27.04.1993

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi

ESALQ/USP

Prof. Dr. Décio Eugênio Crucciani

ESALQ/USP

Prof. Dr. Sergio Oliveira Moraes

ESALQ/USP

Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi
Orientador

À
Marília e
Regina Maria,
dedico.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi, pela viabilização e orientação deste trabalho,
- Ao Prof. Dr. Sergio Oliveira Moraes, pela colaboração,
- Aos estagiários
Oscar Vieira, Fernando Maquiné Vieira Jr. e
Alexandre Braga de Souza, pela solidariedade e ajuda
no acompanhamento diário das leituras e amostragens,
- Às demais pessoas que direta ou indiretamente
contribuíram para a realização deste trabalho,

meu muito obrigado.

S U M Á R I OPágina

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xi
SUMMARY	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1. Características do meio físico	21
3.2. Parcela experimental	24
3.3. Equipamentos utilizados no campo	25
3.3.1. Tensiômetros com manômetro de mercúrio	26
3.3.2. Extratores de solução do solo	29
3.3.3. Tanque classe "A"	31
3.3.4. Critério de reposição de água	32
3.4. Plantio da cultura de feijão	33
3.5. Procedimentos experimentais	34
3.5.1. Umidade	34
3.5.2. Armazenagem de água no solo	35
3.5.3. Potencial hidráulico da solução do solo	37
3.5.4. Função condutividade hidráulica	38
3.5.5. Concentração de nitrogênio	41
3.6. Parâmetros avaliados	41

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1. Cultura do feijão	45
4.2. Curva de retenção	46
4.3. Umidade do solo	53
4.4. Gradiente do potencial hidráulico da solução do solo	57
4.5. Condutividade hidráulica do solo	59
4.6. Balanço hídrico da cultura do feijão	60
4.7. Fluxo de nitrogênio	65
4.8. Comportamento global dos parâmetros	72
5. CONCLUSÕES	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXOS	
Anexo 1	93
Anexo 2	97

LISTA DAS TABELASTABELAPágina

1	Características físicas do solo na parcela experimental	23
2	Produção média de feijão para as regiões de maior produtividade no Brasil e Estado de São Paulo	45
3	Curva de retenção de água	46
4	Parâmetros para as equações de umidade segundo GENUCHTEN (1978)	47
5	Umidade volumétrica média durante o ensaio de redistribuição de água	59
6	Parâmetros para as equações da condutividade hidráulica segundo LIBARDI et alii (1980)	59
7	Distribuição das precipitações e irrigações ao longo do ciclo da cultura	60
8	Balanço hídrico para as diversas fases de desenvolvimento do feijoeiro para profundidade de sistema radicular de 60 cm	64
9	Concentrações de nitrogênio nas várias amostras coletadas durante o cultivo para as profundidades 25 e 50 cm	66

TABELAPágina

10	Drenagem da solução do solo, concentração de nitrogênio na solução e quantidade de nitrogênio lixiviado abaixo da profundidade 25 cm	67
11	Drenagem da solução do solo, concentração de nitrogênio na solução e quantidade de nitrogênio lixiviado abaixo da profundidade 50 cm	68

LISTA DAS FIGURASFIGURAPágina

1	Croquis de localização da área experimental	22
2	Distribuição dos equipamentos na área	25
3	Esquema de instalação dos tensiômetros no solo	27
4	Esquema de instalação dos extratores de solução do solo	30
5	Curva de retenção de água para a profundidade de 15 cm	48
6	Curva de retenção de água para a profundidade de 30 cm	49
7	Curva de retenção de água para a profundidade de 45 cm	50
8	Curva de retenção de água para a profundidade de 60 cm	51
9	Curva de retenção de água para a profundidade de 60 cm	52
10	Comportamento da umidade volumétrica ao longo do cultivo nas profundidades 10 e 20 cm	54
11	Comportamento da umidade volumétrica ao longo do cultivo nas profundidades 30 e 40 cm	55

FIGURAPágina

12	Comportamento da unidade volumétrica ao longo do cultivo nas profundidades 60 e 75 cm	56
13	Comportamento do gradiente do potencial hidráulico nas profundidades 25, 50 e 75 cm durante o cultivo do feijoeiro	59
14	Potencial mátrico ao longo do desenvolvimento da cultura para a profundidade de 20 cm	62
15	Concentração de nitrogênio ao longo do ciclo da cultura nas profundidades 25 e 50 cm	71
16	Associação de alguns parâmetros envolvidos no transporte de nitrogênio durante o ciclo da cultura na profundidade 50 cm	73

LIXIVIAÇÃO DE NITROGÊNIO EM CULTURA DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.).

Autor: CLAUDIO BENEDITO BAPTISTA LEITE

Orientador: PROF. DR. PAULO LEONEL LIBARDI

R E S U M O

O nitrogênio é um macro nutriente essencial ao crescimento, desenvolvimento e aumento de produtividade das culturas, sendo o fertilizante mineral mais aplicado em terras agrícolas.

No solo, independentemente da sua formulação original, o nitrogênio progressivamente é convertido a nitrato, forma essa mais estável e disponível às plantas.

Pesquisas realizadas em diferentes localidades no mundo mostram que a eficiência na assimilação deste nutriente pelas culturas raramente atinge 50/60%, resultando uma quantidade importante de nitrogênio no meio (sistema solo/solução do solo).

O nitrogênio não utilizado, já na forma de nitrato, tem uma grande mobilidade no solo, podendo migrar e atingir as águas subterrâneas.

Neste trabalho quantificou-se a lixiviação de nitrogênio agrícola, para baixo do sistema radicular de uma cultura de feijão irrigado, através da estimativa de um balanço de água no sistema solo.

O experimento foi realizado em uma área de aproximadamente 2400 m² (40x60 m), junto à Estação Agrometeorológica do Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, em Piracicaba - SP (coordenadas geográficas 22° 42' 30" de latitude sul, 47° 38' 00" de longitude oeste e 576 m de altitude), entre os dias 28/05/92 a 20/09/92.

Foram delimitadas 6 (seis) parcelas onde se instalou, em cada uma delas: a) 1 (uma) bateria de tensiômetros com manômetro de mercúrio nas profundidades 10, 20, 30, 40, 60 e 75 cm; b) 1 (uma) bateria de extratores de solução do solo nas profundidades 25 e 50 cm; e c) 2 (dois) coletores de precipitação e/ou irrigação.

Para a reposição da água foi instalado um sistema fixo de irrigação por aspersão convencional, sendo que os momentos de rega foram estabelecidos a partir do Método do Tanque Classe "A".

Os resultados mostraram a) uma lixiviação expressiva de nitrogênio particularmente no início do cultivo, ou seja 86% das perdas de nitrogênio abaixo da profundidade 50 cm ocorreram nos primeiros 25 dias após o plantio, fato este, que coloca a necessidade de se rediscutir os procedimentos de como melhor definir adubação de plantio e o cálculo da lâmina de água para irrigação durante o início de uma cultura agrícola pelo Método do Tanque Classe "A"; e b) ser perfeitamente viável o cultivo do feijão durante o período de inverno na região.

NITROGEN LOSSES IN BEAN (*Phaseolus* *vulgaris* L.) CROP

Author: CLAUDIO BENEDITO BAPTISTA LEITE

Adviser: PROF. DR. PAULO LEONEL LIBARDI

S U M M A R Y

The nitrogen is an essential nutrient to the yield of agricultural crops and one of the most important mineral fertilizers applied in agricultural lands. In the soil, regardless of its original formulation, the nitrogen is progressively converted into nitrate, the most stable and available form to the plants. Researches carried out in different parts of the world have shown that the nitrogen utilization efficiency was never higher than 50/60%. The nitrate which is not absorbed by the plant has a high mobility in the soil profile and, therefore, is a potential pollutant of the groundwater. In this work, we quantified the nitrate leached with the drainage water below the root system

of a bean crop as well as the water balance process along the crop cycle. The experiment was carried out in an area of approximately 2400 m² beside the Agrometeorological Station of the Department of Physics and Meteorology of the Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", in Piracicaba, SP - Brazil (22°42'30"S LAT; 47°38'00"W LONG; 576m ALT). Six experimental plots were delimited and in each of them were installed a) eight mercury tensiometer at the depths of 10, 20, 30, 40, 60 and 75 cm; b) two soil solution extractors at the depths of 25 and 50 cm; and c) two rain and irrigation collectors. The crop was irrigated with a traditional sprinkler irrigation system using the Class "A" method to establish the amount and irrigation schedule. Results showed that the nitrogen loss below the 50 cm soil depth was important mainly at the beginning of the crop cycle (approximately 86% of the total loss occurred during the 25 days after the sowing). This fact led to more adequate way to use the Class "A" method of irrigation schedule.

1. INTRODUÇÃO

O esforço das nações em obter auto suficiência na produção de alimentos tem colocado a necessidade de um aumento contínuo da produção agrícola. Consubstancia esta necessidade um modelo de agricultura sustentado em variedades melhoradas, altamente exigentes em fertilizantes químicos, uso intensivo de pesticidas, e mecanização de várias atividades agrícolas. Conseqüentemente, a cada ano, milhares de toneladas de fertilizantes químicos são adicionados às terras agrícolas.

Para responder a esse esforço, e paralelamente a ele, a produção industrial destes fertilizantes tem crescido geometricamente. Para o nitrogênio, desde 1950, a quantidade média fixada anualmente para a produção industrial de fertilizantes tem aumentado cerca de cinco vezes, podendo exceder a 100 milhões de toneladas no ano 2000 (DELWICHE, 1970).

A disponibilidade dos fertilizantes às culturas, não é imediata, sendo controlada por processos variados tais como adsorção, fixação, atividades microbiológicas,

lixiviação, etc..

Para os nutrientes fósforo (P) e potássio (K), predominam processos de adsorção e fixação, resultando em uma baixa mobilidade no solo. Para o nutriente nitrogênio (N) predominam, principalmente, processos microbiológicos e de lixiviação.

Relativamente às perdas causadas pelo processo de lixiviação, ou seja, processo pelo qual o fertilizante é removido pela água para fora dos limites do sistema radicular de uma cultura, estas tem grande importância para o produtor agrícola. Tais perdas significam baixas eficiências de utilização dos nutrientes e, por extensão, menores rendimentos ou custos mais elevados para o mesmo patamar de produção.

Este modelo de agricultura, a par do ganho real de produtividade obtida, trouxe consigo efeitos colaterais que podem afetar diretamente a qualidade ambiental.

A atenção dos pesquisadores, principalmente nos últimos 25 anos, tem se voltado aos impactos e ou possíveis prejuízos causados notadamente à água e atmosfera, pelo uso dos fertilizantes. Dentre estes, os compostos nitrogenados assumem papel relevante (VRBA e ROMIJN, 1986; SMITH et alii, 1990).

O nitrogênio é um macro nutriente de importância essencial ao crescimento das plantas, principalmente no que

diz respeito ao incremento de produção, mas geralmente se apresentando em quantidades inadequadas no solo. Segundo BREMNER (1965) menos de 3% do total de nitrogênio do solo é convertido à forma solúvel, portanto disponível às plantas. Disto resulta que o fertilizante nitrogenado é o fertilizante mineral mais aplicado em terras agrícolas.

SMITH et alii (1990) apresentam uma importante revisão dos trabalhos publicados nos últimos 15 anos sobre os principais processos de perdas deste íon para o meio. Concluem que a maior responsabilidade pelas perdas recaem sobre as práticas muitas vezes inadequadas de aplicação do fertilizante, e que o impacto negativo do nitrogênio se deve ao fato de este se encontrar na formulação inadequada (nitrato) em local inadequado (água).

PRATT et alii (1978) identificam que a atenção dos pesquisadores tem-se voltado para a grande mobilidade do nitrogênio na forma de nitrato no solo. Tal mobilidade além de resultar em perdas significativas de nitrogênio do sistema solo-planta (NIELSEN et alii, 1980; SMITH et alii, 1990), pode induzir alterações importantes ao meio ambiente, com particular destaque aos impactos negativos causados às águas superficiais e subterrâneas.

A Organização Mundial de Saúde tem estabelecido que águas com concentrações maiores que 44 mg.l⁻¹ de nitrato, ou 10 mg.l⁻¹ de nitrogênio são impróprias ao consumo humano.

CONLEY (1945) relatou sobre a metahemoglobinemia em crianças (doença conhecida como bebê azul), relacionada ao excesso de nitrato na água. GINOCCHIO (1984) apontou que a presença de nitrato na água para consumo humano pode causar cianoses em crianças e câncer gástrico em adultos.

O nitrogênio sempre esteve presente na natureza e particularmente no sistema solo/água. Sua origem deve-se a processos geológicos, biológicos e atmosféricos perfeitamente naturais e equilibrados no tempo. Representa 79% do ar atmosférico, mas na forma em que aí ocorre, é um gás inerte, exceto para poucos organismos que possuem a capacidade de converter tal elemento numa forma combinada. Somente após fixado, isto é, incorporado a um composto químico, é que estará disponível e poderá ser aproveitado por plantas e animais.

No solo, os principais processos que envolvem o nitrogênio são representados por ciclos. Os microorganismos, lentamente, convertem o nitrogênio orgânico na forma de amônio, que é reincorporado à matéria orgânica fresca (imobilizado) ou é transformado a nitrato. A eficiência dos microorganismos depende da relação carbono/nitrogênio, ou seja, relações C/N altas resultam um acentuado acréscimo na atividade microbiológica (EIRA et alii, 1968).

Alguns nitratos podem também ser imobilizados, parte pode se denitrificar e passar para a atmosfera na forma

gasosa, mas o resíduo restante permanece na solução do solo até ser assimilado pelas plantas, ou ser perdido pelo processo de lixiviação, se movimentando livremente com as águas que percolam o solo.

Com base nas preocupações acima apresentadas, este trabalho se propôs a estimar as perdas de nitrogênio agrícola através do estudo da dinâmica da solução no sistema solo, realizando um balanço de água na zona radicular, quantificando a drenagem da solução, e a quantidade de nitrogênio movimentado através do processo de lixiviação, para baixo do sistema radicular de uma cultura de feijão irrigado.

A quantificação da drenagem através do balanço hídrico permite tanto aferir a eficiência da irrigação, como estimar a quantidade de nitrogênio em movimento na solução do solo, não mais disponível às plantas, e com potencial de atingir as águas subterrâneas. Secundariamente verificou-se a viabilidade desta cultura, durante o período de inverno na região de Piracicaba. Como critério para aplicação de água utilizou-se o Método do Tanque Classe "A".

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A contabilização de todas as entradas e saídas de fertilizantes ao longo do ciclo de uma cultura agrícola, em um volume de solo delimitado pela superfície do terreno e pela profundidade do sistema radicular, em um dado intervalo de tempo, define o que podemos chamar de balanço de nutrientes no solo. As entradas podem ser através de adubações minerais e orgânicas, pelas águas de chuva e irrigação, e pelo processo de fixação biológica para o caso do fertilizante nitrogênio. Como saídas tem-se a quantidade exportada pela cultura, a quantidade carregada pelo escoamento superficial, e a quantidade lixiviada para baixo do sistema radicular. Para o nitrogênio uma quantidade deixa o volume de solo na forma gasosa.

Relativamente à movimentação do fertilizante nitrogênio no solo pelo processo de lixiviação, sabe-se que, dos grupos nitrogenados, o nitrato é considerado o íon mais móvel e a forma mais disponível às plantas (GETMANETS e AVRAMENKO, 1976). Algumas vezes os íons amônio e nitrito quando não fortemente retidos pelos colóides do solo, podem

permanecer, como o nitrato, livres na solução do solo e sujeitos ao arraste pela água para fora do alcance das raízes.

VELASCO (1976) citou que estudos específicos sobre movimento de compostos nitrogenados indicaram que a lixiviação de amônio e nitrito, para baixo do sistema radicular, atingindo a água subterrânea, representaram menos de 1% do nitrogênio total lixiviado.

Isto se deve tanto ao fato de o nitrato ser o resultado de um processo natural de degradação, ou seja, é o produto final do processo biológico aeróbico chamado nitrificação, sendo por isso, a forma mais comum e estável do nitrogênio no sistema água-solo, como pelo fato de as micelas e colóides do solo, assim como o íon nitrato, serem negativamente carregados, não havendo atração entre eles. Resulta que o movimento deste íon é fundamentalmente condicionado pelo movimento da solução do solo, e dependente dos fatores envolvidos na dinâmica da solução do solo, tais como condutividade hidráulica e gradiente do potencial hidráulico da solução.

Para a estimativa das perdas de nitrogênio pelo processo de lixiviação, torna-se indispensável, portanto, tanto o conhecimento dos parâmetros que quantificam o fluxo de água em meios não saturados, tais como densidade de fluxo da solução, condutividade hidráulica e gradiente do potencial

hidráulico, como da concentração deste elemento na solução do solo.

A densidade de fluxo representa a vazão de água por unidade de área de secção transversal normal à direção do fluxo, e tem sido determinada através da Equação de Darcy. Esta equação estabelece uma relação de proporcionalidade entre a densidade de fluxo e o gradiente do potencial hidráulico da solução, ou seja, a densidade de fluxo é diretamente proporcional ao gradiente do potencial hidráulico da solução do solo e o parâmetro de proporcionalidade denomina-se condutividade hidráulica (K), sendo esta uma função da umidade do solo (θ).

Esta equação foi primeiramente definida para meios porosos saturados, com base em trabalhos com colunas de areia, objetivando a construção de filtros. No começo deste século, Buckingham introduziu os conceitos de condutividade hidráulica não saturada e de potencial mátrico, adaptando a Equação de Darcy às condições de fluxo não saturado.

Apesar das diferenças conceituais entre as duas equações, atualmente utiliza-se indistintamente a denominação Equação de Darcy tanto para as condições saturadas como não saturadas.

Para determinar a densidade de fluxo da solução em condições de solo não saturado precisa-se conhecer como se relaciona a condutividade hidráulica com umidade do solo, ou

seja a função condutividade hidráulica - $[K = K(\theta)]$, e os valores do gradiente do potencial hidráulico da solução do solo - $[\nabla\phi]$. O gradiente do potencial, que representa a força responsável pelo movimento da solução do solo, é obtido facilmente por meio de tensiômetros (RICHARDS, 1965).

A condutividade hidráulica é um coeficiente que expressa a facilidade com que um fluido é transportado através de um meio poroso, dependendo portanto das propriedades do meio e do fluido. Para a sua quantificação existem vários métodos sob condições de campo e laboratório, conforme apresentado em LIBARDI (1984b).

Na presente pesquisa utilizou-se o Método da Umidade de LIBARDI et alii (1980). Tal metodologia pressupõe uma simplificação do método do perfil instantâneo para se obter a função condutividade hidráulica de modo analítico. Do ponto de vista prático, na utilização desta metodologia são necessários somente os dados da umidade ao longo do tempo para se definir a equação da função $[K(\theta)]$. Agrega-se à simplicidade do método na determinação da condutividade hidráulica não saturada, a facilidade na instalação e determinação "in situ".

O método do perfil instantâneo, apesar de ser indicado somente para solos com perfis relativamente homogêneos (BAKER et alii, 1974), tem sido indistinta e amplamente utilizado por vários pesquisadores, para vários

tipos de solos, com resultados bastante representativos (NIELSEN et alii, 1973; LIBARDI et alii, 1980; REICHARDT e LIBARDI, 1974; HILLEL, 1972).

Segundo LIBARDI et alii (1979), as possíveis limitações do método do perfil instantâneo devido a variações na homogeneidade do solo podem ser perfeitamente negligenciadas quando se leva em conta a variabilidade espacial da condutividade hidráulica em condições de campo (NIELSEN et alii, 1973; WARRICK et alii, 1977).

A determinação das concentrações ou atividades de íons, nutrientes ou quaisquer substância na solução do solo, como salienta REICHARDT et alii (1977), tem sido abordada há muito tempo por pesquisadores interessados em ciência do solo. As restrições quanto ao método convencional de coleta de amostras do solo e sua agitação com uma solução extratora são oriundas principalmente do fato das amostras provirem de locais diferentes e com a destruição do arranjo natural do sistema solo-solução do solo (ALBERTS et alii, 1977). Atualmente, uma outra técnica tem sido utilizada, onde a solução do solo é extraída diretamente pela aplicação de vácuo a uma cápsula porosa em íntimo contato com a matriz do solo (WAGNER, 1962; WAGNER, 1965; REEVE e DOERING, 1965; HELLIOTT et alii, 1972; REICHARDT et alii, 1977).

A grande vantagem desta técnica de extração está no fácil manuseio do sistema, e a extração da solução se

realizar diretamente no campo, sem destruição da estrutura do solo e sempre no mesmo local do perfil.

HANSEN E HARRIS (1975) estudando a validade e representatividade das amostras da solução do solo coletadas com cápsulas porosas encontraram variações importantes na concentração de nitrato associadas ao contato cápsula-solo, profundidade e condutância da cápsula, e tipo do sistema de vácuo. Sugerem, para redução das incertezas e facilidade de interpretações e generalizações dos resultados, selecionar cápsulas com condutâncias similares, pequenos períodos de amostragem, cápsulas de comprimentos uniformes e mesmo vácuo inicial para todos amostradores.

Uma vez conhecidos os valores da densidade de fluxo da solução do solo e da concentração do íon ou elemento em questão, na profundidade em estudo, estima-se seu fluxo de massa pelo produto numérico de ambos (BIGGAR et alii, 1975; TANJI et alii, 1977; RAWITZ, 1977; LIBARDI e REICHARDT, 1978; MEIRELLES et alii, 1980; NIELSEN et alii, 1980).

Em estudos sobre o movimento do íon nitrato num Alfisol bem estruturado na Nigéria, WILD (1972) observou que este íon se movimentava para baixo a uma taxa de $0,5 \text{ mm.mm}^{-1}$ de chuva, valor este considerado baixo em comparação aos obtidos por TERRY e McCANTS (1970) em solos arenosos da Carolina do Norte - USA, os quais variaram de 1 a 5 mm.mm^{-1} de chuva.

PRATT et alii (1980) trabalhando com solos de diferentes texturas, verificaram que o volume de água drenado, a concentração do íon nitrato e sua lixiviação estavam significativamente relacionadas aos tratamentos de irrigação e características físico-hídricas do solo, principalmente a condutividade hidráulica saturada. FRIED et alii (1976) citaram perdas potenciais de $5,7 \text{ Kg.N.ha}^{-1}$ em experimentos realizados em 1973 com milho adubado com 90 Kg.N.ha^{-1} , irrigado com uma lâmina de água 60% superior à evapotranspiração, em experimentos realizados em Davis, California - USA.

Trabalhando com lisímetros e com taxas de adubação superiores à recomendação agronômica, CHICHESTER e SMITH (1978), em experimentos objetivando estudos sobre a disposição do nitrogênio marcado aplicado durante a implantação de cultura de milho, constataram que a maior perda de nitrogênio foi através da lixiviação.

Em trabalho apresentado na 5a. Reunião Coordenada da Agência Internacional de Energia Atômica sobre "Resíduos Nitrogenados Agrícolas", em Viena, Áustria, SATARIOU e KORTE (1980) avaliaram por um período de quatro anos os caminhos seguidos pela uréia marcada com ^{15}N em solos arenosos e de textura média, com e sem adição de matéria orgânica e, no solo de textura média, com diferentes culturas agrícolas. Seus resultados mostraram que a matéria orgânica

não afetou as perdas de nitrogênio, mas que o nitrogênio aplicado decrescia com a profundidade do solo. Nesta mesma reunião, YOUNGDAHL et alii (1980) trabalhando com uréia de grânulos de diferentes tamanhos em solos de diferentes texturas, mostraram que para taxas de drenagem moderada a alta (10 a 20 mm.dia⁻¹), especialmente nos solos com baixa capacidade de troca catiônica, a perda por lixiviação da uréia super granulada pode ser total. Verificaram experimentalmente que num solo de textura barro-arenosa, uma cultura de arroz recuperou 63% do fertilizante super granulado quando a taxa de drenagem era 4,4 mm.dia⁻¹ e somente 5% quando a taxa era de 18,3 mm.dia⁻¹. Ainda nesta mesma reunião, GOLDEN (1980) em seu trabalho realizado em Sri Lanka, enfatizou o fato de que as culturas de chá naquela região recebem normalmente 200 Kg.N.ha⁻¹ e que a eficiência de utilização estava na faixa de 30 a 50%, porquanto o remanescente fica potencialmente disponível para ser lixiviado.

No Brasil, especificamente em Piracicaba - SP, no Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA e na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP, muitos trabalhos tem sido realizados utilizando a técnica nuclear do isótopo ¹⁵N como traçador para quantificar o balanço de nitrogênio fertilizante em culturas agrícolas. Um dos primeiros trabalhos em nosso meio, nesta linha, foi o de

LIBARDI e REICHARDT (1978), no qual se utilizaram aplicações de 40 e 120 Kg.N.ha⁻¹, na forma de uréia marcada com ¹⁵N, em parcelas com feijão, em um solo Terra Roxa Estruturada (Oxic Paleudalf). Como resultado obtiveram valores aproximados de 38 e 33%, respectivamente, de eficiência de utilização de nitrogênio 77 dias após ao plantio. Constataram ainda que durante o ciclo da cultura (120 dias) foram perdidos por lixiviação 6,72 Kg.N.ha⁻¹ abaixo da profundidade de 120 cm. Este número é a média de todas as parcelas e inclui tanto o nitrogênio fertilizante como o do solo. A contribuição do nitrogênio do fertilizante não pôde ser estimada devido ao pequeno volume das amostras de solução do solo obtidas com os extratores de solução do solo.

MEIRELLES et alii (1980) e CERVELLINI et alii (1980), estudando o destino do nitrogênio e, usando sulfato de amônio à base de 100 Kg.ha⁻¹, no mesmo solo utilizado para o trabalho anterior e uma outra variedade de feijão, verificaram que a maior absorção de nitrogênio pelas plantas se deu 60 dias após a germinação, mas que a eficiência máxima (30%) se deu 45 dias após a germinação. Observaram ainda que, do total de 15 Kg.N.ha⁻¹ lixiviado abaixo da profundidade de 120 cm, durante o ano de 1977, somente 1,35 Kg era proveniente do fertilizante aplicado.

REICHARDT et alii (1979) estudando a dinâmica do nitrogênio numa cultura de milho, em solo de textura média,

aplicando 80 Kg.N.ha^{-1} na forma de sulfato de amônio enriquecido com ^{15}N mostraram que, durante o ciclo da cultura foram perdidos $9,2 \text{ Kg.N.ha}^{-1}$ para baixo da profundidade de $127,5\text{cm}$, sendo que $4,8\%$ provinham do fertilizante aplicado.

LIBARDI et alii (1982) objetivando determinar a eficiência de utilização de nitrogênio pela cultura, efeitos residuais do nitrogênio aplicado de uma cultura para outra, distribuição do nitrogênio no solo após o cultivo e perdas por lixiviação de nitrogênio realizou um experimento sobre o destino do nitrogênio aplicado à três culturas de feijão subsequentes. Para a primeira cultura a eficiência foi de $38,5\%$, para a segunda $4,6\%$ e para a terceira $1,2\%$, com uma recuperação total nas três culturas de $44,3\%$ do nitrogênio aplicado na primeira. O restante, ou permaneceu no solo ou foi perdido pelos processos de lixiviação, volatilização e denitrificação.

Este trabalho mostrou que o balanço de massa do nitrogênio (remoção pela cultura, nitrogênio mineral no solo e nitrogênio orgânico no solo), no final da primeira cultura, totalizou $109,1 \text{ Kg.N.ha}^{-1}$, o que indicaria um erro de aproximadamente 10% se nenhum nitrogênio fosse perdido por lixiviação, volatilização ou denitrificação. No final da segunda e terceira cultura, os balanços totalizaram $75,8$ e $80,1 \text{ Kg.N.ha}^{-1}$, indicando, respectivamente, que 20 a 25% do nitrogênio aplicado foi perdido do sistema. O trabalho

mostrou ainda que a variação de armazenagem de nitrogênio no solo para o ciclo da cultura foi praticamente nula, e as perdas por volatilização e denitrificação provavelmente devem ter sido pequenas sob as condições do experimento, de maneira que é razoável concluir que aproximadamente 20 a 25 Kg.N.ha⁻¹ do nitrogênio fertilizante adicionado ao solo foram lixiviados para baixo da profundidade de 120 cm.

SILVA (1982) realizou um trabalho no mesmo Paleudalf óxico, em cultura de milho com taxa de aplicação de 100 Kg.N.ha⁻¹ enriquecido com ¹⁵N. Verificou que durante o período da cultura, 30% (195mm) do balanço de água correspondeu à drenagem abaixo da profundidade de 120 cm. Assumindo que o nitrato é lixiviado somente por fluxo de massa, observou uma perda de 32,4 Kg.N.ha⁻¹, com contribuição de 34% a partir do fertilizante (11,0 Kg.N.ha⁻¹).

Ainda no mesmo solo, URQUIAGA (1982) usando sulfato de amônio altamente enriquecido com ¹⁵N (56,11% de átomos de ¹⁵N em excesso) em cultura de feijão, obteve uma eficiência (76%) extremamente alta de utilização de nitrogênio pela cultura (32 dos 42 Kg.N.ha⁻¹ aplicados). No final do período da cultura foram encontrados no perfil do solo 9,2 Kg.N.ha⁻¹ provenientes do fertilizante aplicado. As perdas por lixiviação não foram calculadas.

Numa análise global, REICHARDT et alii (1982) reuniram todos os trabalhos conduzidos no CENA/ESALQ/USP

(SILVA, 1982; LIBARDI e REICHARDT, 1978; MEIRELLES et alii, 1980; REICHARDT et alii, 1979; URQUIAGA, 1982) e puderam concluir que, para taxas de aplicação da ordem de 90 Kg.N.ha⁻¹, usando valores médios, os quais, certamente, apresentam muitas limitações, somente 4,5 g de nitrogênio fertilizante foram perdidos por lixiviação, por hectare e por milímetro de chuva, para o solo Terra Roxa Estruturada, nas condições tropicais.

As perdas por lixiviação mencionadas em URQUIAGA (1982) foram retomadas por LIBARDI (1984a) que analisou ainda o efeito residual do adubo marcado e o balanço de nitrogênio em três culturas subseqüentes de milho, feijão e milho, concluindo, no caso da lixiviação, que as perdas foram desprezíveis.

Ainda no Brasil, SALCEDO & SAMPAIO (1984) monitorando o deslocamento vertical de nitrogênio em solo Podzólico vermelho-amarelo textura arenosa estimaram perdas de 14 Kg.N.ha⁻¹ e 21 Kg.N.ha⁻¹ para aplicações parceladas e aplicação única, respectivamente, em experimentos com cana-de-açúcar.

O destino final das perdas de nitrogênio pelo processo de lixiviação para baixo do sistema radicular de culturas agrícolas pode ser a água subterrânea. CECH e HARRIST (1984) após estudos exaustivos realizados no Texas - USA associaram as concentrações anômalas de nitrato na água

subterrânea à presença de terras fertilizadas, resíduos animais e domésticos.

YOUNG (1981) discutiu os efeitos e influências das várias fontes de contaminação de nitrato em um período de 34 anos no Reino Unido. O maior crescimento em importância relativa recaiu sobre os fertilizantes inorgânicos, que saltaram de 2% em 1938 para 23% em 1972.

HUBBARD et alii (1984) compararam as variações da concentração de nitrato sob um sistema intensivo de agricultura com locais de floresta em solos arenosos de planície costeira. O sistema intensivo envolvia irrigação por pivô central e fertirrigação. As medidas efetuadas em amostras coletadas em poços de observação apontaram concentrações de nitrato variando entre 0,1 a 133 mg.l⁻¹, com média de 20 mg.l⁻¹ para os solos cultivados, e concentrações variando entre 0,1 a 1,0 mg.l⁻¹ para os solos de floresta.

DUKE et alii (1978), estudando o movimento da água e nitrogênio no solo sob irrigação por pivô central no Colorado - USA, observaram que a irrigação acentuou as perdas de nitrogênio agrícola, na forma de nitrato, para as águas subterrâneas.

Avaliações realizadas em vários estados americanos sobre o efeito da agricultura na qualidade da água subterrânea concluíram que varias áreas apresentam contaminações por fertilizantes agrícolas e pesticidas, com

especial importância ao íon nitrato, estando estas associadas à prática de irrigação (BOUWER, 1987; SCHMIDT e SHERMAN, 1987; SABOL et alii, 1987; LAW, 1987; SONNEN et alii, 1987).

A lixiviação de nitrato em solos de regiões de clima temperado pode causar perdas significativas do nitrogênio mineral aplicado. Tal processo depende das características físico-químicas do solo e do excesso de precipitação sobre a evapotranspiração.

Para regiões tropicais úmidas, a depender do tipo de solo, a lixiviação pode ser potencializada, uma vez que as precipitações excedem em muito a evapotranspiração. Medidas realizadas por MULLER-HERVEY et alii (1985) e por KRUIJS et alii (1988) nestas condições, para solos recém cultivados, obtiveram valores variando entre 150 a 250 Kg.N.ha⁻¹.

EIRA et alii (1968), em experimentos realizados em solos de textura leve da série Itaguaí (Podzólico vermelho-amarelo), que predominam nas meia-encostas do município de mesmo nome, na baixada fluminense, demonstraram que 145 mm (30 dias) de chuva foram suficientes para lixiviar todo fertilizante nitrogenado dos primeiros 28cm do solo sem cobertura vegetal.

Contrariamente, vários pesquisadores trabalhando com solos ácidos de clima tropical, tem observado a adsorção de nitrato na superfície de colóides do solo (BLACK e WARING,

1979; ESPINOSA et alii, 1975; GILLMAN e SINCLAIR, 1987; KINJO e PRATT, 1971; SINGH e KANEHIRO, 1969; WONG et alii, 1987). Tal adsorção retardaria o movimento do íon nitrato, relativamente ao movimento da solução do solo (RAIJ e CAMARGO, 1974; KINJO et alii, 1978).

Em trabalho mais recente, WONG et alii (1990) constataram que não somente a lixiviação decai, como aparentemente uma quantidade significativa de nitrato trocável permanece na forma disponível na região do sistema radicular.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Características do meio físico

Os trabalhos foram conduzidos durante a estação de inverno, entre os dias 28/05 a 20/09 de 1992, na área experimental anexa à Estação Agrometeorológica pertencente ao Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), da Universidade de São Paulo (USP), em Piracicaba - Estado de São Paulo, com coordenadas geográficas 22° 42' 30" de latitude sul, 47° 38' 00" de longitude oeste e 576 m de altitude, em uma área de aproximadamente 2400 m² (60x40 m), conforme croquis apresentado na FIGURA 01.

O solo da área segundo as normas da EMBRAPA-SNLCS (1988) foi classificado por Torrado⁽¹⁾, citado por DOURADO NETO (1992) como Terra Roxa Estruturada Latossólica, e de acordo com a classificação americana (ESTADOS UNIDOS, 1990), é um Kandiudalfic Eutrudox.

⁽¹⁾ TORRADO, V.P. (Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, Piracicaba, SP). Comunicação pessoal, 1992.

FIGURA 1 - Croquis de localização da área experimental anexa à Estação Agrometeorológica.

Este solo é formado a partir da meteorização de basaltos pertencentes ao Grupo São Bento, apresentando um perfil bastante profundo, com nível d'água a vários metros de profundidade. As principais características físicas deste solo estão apresentadas na TABELA 01, e correspondem a valores obtidos a partir de ensaios em amostras coletadas em uma trincheira ao lado da parcela experimental, recuperadas de COSTA (1986).

TABELA 1 - Características físicas do solo na parcela experimental. Dados médios retirados de COSTA (1986).

prof (cm)	Granulometria			Densidade		porosidade total (%)
	areia (%)	silte (%)	argila (%)	solo (g.cm ³)	partículas (g.cm ³)	
15	31,9	19,5	48,6	1,54	2,83	45,5
30	23,8	15,2	61,0	1,43	2,79	49,0
45	21,3	15,0	63,7	1,40	2,81	50,3
60	21,7	15,4	62,9	1,38	2,80	50,7
75	22,3	15,6	62,1	1,25	2,74	54,2

Segundo a classificação de KOEPPEN o clima na região de Piracicaba é Cwa, isto é, clima tropical, úmido, com verão chuvoso, inverno seco e temperatura do mes mais quente superior a 22°C.

Em termos anuais médios, os principais parâmetros meteorológicos coletados na Estação

Agrometeorológica do Departamento de Física e Meteorologia, segundo OMETTO (1989) são:

- precipitação média anual 1247 mm
- temperatura média máxima do ar 27,8 °C
- temperatura média mínima do ar 14,3 °C
- temperatura média do ar 21,1 °C
- umidade relativa média 74 %
- velocidade média do vento 2,2 m.s⁻¹
- insolação média na superfície 6,73 h.dia⁻¹
- pressão barométrica média 715,1 mmHg

3.2. Parcela Experimental

A área experimental foi totalmente cultivada e para efeito prático considerada plana. Os equipamentos foram distribuídos conforme apresentado na FIGURA 2.

Em cada um dos seis locais delimitados foram instalados, para determinação da umidade volumétrica, do potencial mátrico, e do fluxo da solução e de nutrientes, 1 (uma) bateria de tensiômetros com manômetro de mercúrio nas profundidades 10, 20, 30, 40, 60, 75 cm, 1 (uma) bateria de extratores de solução do solo nas profundidades 25 e 50 cm e 2 (dois) coletores de precipitação e/ou irrigação.

FIGURA 2 - Distribuição dos equipamentos na área (A - aspersores, B_n - baterias de tensiômetros, E - extratores de solução do solo).

3.3. Equipamentos utilizados no campo

Os equipamentos utilizados durante a realização do experimento foram: tensiômetros de mercúrio, extratores de solução do solo, Tanque Classe A, e sistema de irrigação por aspersão convencional.

3.3.1. Tensiômetros com manômetro de mercúrio

São equipamentos utilizados para medir diretamente o potencial mátrico da solução do solo e indiretamente a umidade sob condições de campo. O potencial mátrico reflete as diferentes interações entre a matriz e a solução do solo, e é uma medida da energia necessária para liberar a solução da ação das forças associadas a adsorção e capilaridade no solo.

Para este experimento, como esquematizado na FIGURA 3, os tensiômetros foram construídos a partir de dois tubos de PVC rígido branco, de 21 e 15 mm respectivamente de diâmetros externo e interno, sendo um de tamanho fixo (20 cm) e com tampa de excelente vedação, testado com pressão de 3 atmosferas, e outro de tamanho variado (depende da profundidade de instalação). Em uma das extremidades dos tubos de PVC de tamanho variado foi acoplada uma cápsula de cerâmica porosa de 6 cm de comprimento, e de diâmetro externo similar ao do tubo, e na outra extremidade acoplou-se uma tampa, também de PVC, vedada por cola "Araldite". Compõem ainda este equipamento um reservatório (cuba) de mercúrio e dois tubos flexíveis de nylon ("espaguete") de comprimento variável e diâmetro externo 3 mm.

Um dos tubos "espaguete" serve como comunicante entre os dois tubos de PVC por onde se realiza a fluxão para

FIGURA 3 - Esquema de instalação dos tensiômetros no solo.

eliminação de bolhas de ar do sistema, e o outro conecta a água interna ao tensiômetro ao reservatório de mercúrio.

Para a instalação da bateria de tensiômetros, primeiramente se removeu uma camada superficial de 5 cm de solo na parcela. A seguir utilizando-se de um trado rosca de diâmetro semelhante ao do tubo de PVC, instalou-se os tensiômetros nas profundidades previstas. Após estas operações, recolocou-se o solo removido ao local de origem, sendo que os "espaguetes" ficaram enterrados a aproximadamente 10 centímetros de profundidade, e estendidos por uma distância de aproximadamente 2 metros para fora do local onde foram instalados os tensiômetros, de onde emergiram, um para se conectar ao suporte da cuba de mercúrio e o outro para o tubo de PVC utilizado nas fluxões.

Este esquema de construção e instalação, pelo fato de manterem tanto os tubos de PVC como os espaguetes enterrados, e os locais de leitura e fluxões afastados do local de instalação dos tensiômetros, apresenta as vantagens de se evitar infiltrações preferenciais de água pela parede do tubo de PVC no contato parede do tubo/solo, fenômeno este que ocorre com frequência nos tensiômetros tradicionais encontrados no mercado, induzindo valores falsos de potencial mátrico; evitar degradação pela ação do sol e estragos durante os tratos culturais nos "espaguetes"; e preservar o solo, nos locais e entornos onde foram instalados os

tensiômetros, de possíveis compactações pelo uso diário do local.

3.3.2. Extratores de solução do solo

Estes equipamentos, do ponto de vista de sua construção são semelhantes aos tensiômetros, sendo que buscou-se incorporar as considerações apresentadas por HANSEN E HARRIS (1975). São constituídos (FIGURA 4) por uma cápsula porosa de 5,0 cm de diâmetro externo por 6,0 cm de comprimento; dois tubos de PVC rígido branco com respectivamente 5,0 e 4,4 cm de diâmetros externo e interno, sendo um tubo de tamanho fixo de 10 cm de comprimento, e outro de tamanho variável, dependendo da profundidade de instalação; um tarugo cilíndrico de PVC maciço de 5,0 cm de comprimento, com rosca nos dois lados e três perfurações de diâmetro de 3,0 mm que o atravessa longitudinalmente; e três tubos flexíveis de nylon ("espaguete") de comprimento variável.

A junção da cápsula porosa, o tubo de PVC de comprimento fixo e o tarugo com rosca formam a câmara para armazenagem de solução durante a extração, e desta forma garante-se um volume constante de amostragem, e mesmo vácuo para todas as profundidades.

FIGURA 4 - Esquema de instalação dos extratores de solução do solo.

Dos "espaguete", um comunica o interior da câmara do extrator à bomba de vácuo, um outro com uma de suas extremidades bem próxima ao fundo interno da câmara, junto à cápsula porosa, e a outra extremidade adaptada a uma rolha de borracha que se encaixa perfeitamente a um tubo de ensaio de vidro de 50 cm³, permite a retirada da solução do interior da câmara para o tubo de ensaio; e o último "espaguete" com uma extremidade dentro da câmara e a extremidade externa ligada a um manômetro de mercúrio, permite o controle de mesmo vácuo e acompanhamento da sua manutenção durante a coleta.

3.3.3. Tanque Classe "A"

O Tanque Classe "A" é um evaporímetro amplamente utilizado como método padrão de estimativa tanto da evapotranspiração potencial como na estimativa da lamina de água de irrigação.

Consiste em um tanque circular com 1,20m de diâmetro por 0,25m de altura, construído com chapa galvanizada nº 22, cheio de água até 5cm da borda superior.

A partir das medidas de evaporação realizadas neste tanque estima-se a evapotranspiração potencial, ou seja, a perda de água sofrida por uma superfície coberta de vegetação rasteira, em fase de desenvolvimento ativo,

cobrindo totalmente o terreno, utilizada para o cálculo da evapotranspiração real e na estimativas de reposição de água à cultura.

3.3.4. Critério de reposição de água

Utilizou-se para a reposição de água à cultura um sistema de irrigação por aspersão convencional fixo, com espaçamento entre aspersores de 12 X 12m, sendo utilizado como critério de irrigação a reposição do total de água evapotranspirada, sendo este total definido através do Tanque Classe "A", conforme apresentado em Ometto (1981).

Para tanto considerou-se como parâmetros de entrada a capacidade de campo, a profundidade do sistema radicular, a umidade relativa, a velocidade do vento, o estágio de desenvolvimento, e o coeficiente de cultura (K_c). O estágio de desenvolvimento e o coeficiente de cultura foram estimados a partir de DOORENBOS e PRUITT (1975).

Apresenta-se no ANEXO 01 as leituras diárias da evaporação do tanque, e o acompanhamento do manejo da água.

3.4. Plantio da cultura do feijão

Após o preparo convencional do terreno e a instalação dos equipamentos, preparou-se a parcela para o plantio do feijão. A semeadura foi realizada no dia 28/05/1992, com espaçamento e adubação tradicionais para esta cultura, obtendo-se um padrão de 200.000 plantas por hectare. A adubação durante o plantio foi de 30 Kg.N.ha⁻¹ na forma de uréia, 30 Kg.K.ha⁻¹ e 80 Kg.P.ha⁻¹ simples. Foi realizada a complementação da adubação nitrogenada durante os dias 14.07.92 a 16.07.92, 49 dias após plantio, com a aplicação de 70 Kg.N.ha⁻¹ perfazendo um total de 100 Kg.N.ha⁻¹. Foram realizados tratos fitossanitários para garantia de um perfeito desenvolvimento vegetativo.

A escolha da estação de inverno para o plantio objetivou um maior controle das entradas de água no sistema, já que, nesta época do ano, na região de Piracicaba, não raramente a precipitação é nula.

Imediatamente após o plantio foi realizada uma irrigação abundante para que o solo fosse levado à capacidade de campo, não tendo sido esta irrigação computada para efeito do balanço hídrico.

3.5. Procedimentos experimentais

3.5.1. Umidade (θ)

A umidade foi obtida indiretamente a partir das leituras diárias dos tensiômetros. Primeiramente calculou-se o potencial mátrico⁽¹⁾ como segue:

$$\phi_m = - 12,6h + H + z \quad (1)$$

onde:

- ϕ_m - potencial mátrico [cca]
- h - altura de mercúrio [cm]
- H - distância entre o nível de Hg na cuba de mercúrio e o solo [cm]
- z - profundidade de instalação da cápsula porosa [cm].

⁽¹⁾ Os potenciais envolvidos na dinâmica da solução do solo serão expressos em termos de energia por unidade de volume, o que equivale a força por unidade de área, podendo, portanto, ser expresso por uma altura de coluna de água, ou seja, centímetros de coluna de água (cca).

A seguir recorreu-se ao tratamento proposto por GENUCHTEN (1978) para se obter a equação que relaciona a umidade ao potencial mátrico, através da equação abaixo:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot \phi_m)^n]^m} \quad (2)$$

Esta é uma equação não linear, que utiliza dois parâmetros extremos da curva de retenção de água no solo:

θ_r - umidade residual - umidade volumétrica equivalente a uma tensão de água no solo de 15000 cca
 θ_s - umidade de saturação

Os parâmetros α , m e n são obtidos a partir de técnicas gráficas descrita por GENUCHTEN (1980) ou através de regressão e otimização de funções não lineares.

3.5.2. Armazenagem de água no solo

Representa a quantidade de água existente no perfil ou em um horizonte qualquer do solo, em um determinado momento, expresso em altura de água (mm).

Foi estimado através da equação abaixo:

$$A = \bar{\theta} . z \quad (3)$$

onde

A - armazenagem [mm]

θ - umidade média do perfil de solo [$\text{cm}^3 \text{sol.cm}^{-3} \text{solo}$]

z - profundidade do perfil [mm]

Para a realização do balanço hídrico, no entanto, necessita-se conhecer a variação da armazenagem, isto é, quanto o solo ganhou ou perdeu de água em um determinado intervalo de tempo. Recorreu-se a equação abaixo:

$$\Delta A = (\bar{\theta}_f - \bar{\theta}_i) . z \quad (4)$$

onde:

ΔA - variação da armazenagem no período considerado [mm]

θ_f - umidade média no tempo final [$\text{cm}^3 \text{sol.cm}^{-3} \text{solo}$]

θ_i - umidade média no tempo inicial [$\text{cm}^3 \text{sol.cm}^{-3} \text{solo}$]

z - profundidade do perfil [mm]

3.5.3. Potencial hidráulico da solução do solo - (ϕ)

Este potencial é uma medida do estado de energia em que se encontra a solução do solo em um ponto considerado, sendo dado pelo somatório de um conjunto de outros potenciais que afetam este estado de energia. O conhecimento do estado de energia da solução do solo em vários pontos dentro de um sistema permite definir o gradiente do potencial da solução e avaliar, assim, o potencial de movimento desta solução. Para um meio não saturado, de forma simplificada, este potencial pode ser quantificado pela como segue:

$$\phi = \phi_m + \phi_g \quad (5)$$

onde:

ϕ - potencial da solução do solo [cca]
 ϕ_m - potencial mátrico [cca]
 ϕ_g - potencial gravitacional⁽¹⁾ [cca]

⁽¹⁾ Este potencial esta sempre presente, e reflete a ação do campo gravitacional. Depende, portanto, da posição onde a água se encontra em relação a um dado referencial. Em termos de carga hidráulica, ou seja, de altura de água, o valor deste potencial é numericamente igual à profundidade de estudo.

O gradiente do potencial pode ser facilmente estimado por diferenças finitas a partir dos potenciais da solução do solo dados pelos tensiômetros instalados imediatamente acima e abaixo das profundidades de interesse.

3.5.4. Função condutividade hidráulica - função $K(\theta)$

A condutividade hidráulica expressa a facilidade com que a água é transportada através do solo. Para quantificar a sua dependência à umidade do solo foi determinada a função $K(\theta)$ através do Método da Umidade de LIBARDI et alii (1980).

Assume-se que:

- o gradiente do potencial hidráulico é unitário
- a condutividade hidráulica é função exponencial da umidade e pode ser expressa como:

$$K(\theta) = K_0 \cdot e^{\gamma(\theta - \theta_0)} \quad \dots (6)$$

onde:

- θ_0 - umidade volumétrica saturada [$\text{cm}^3 \text{ sol. cm}^{-3} \text{ solo}$]
- K_0 - condutividade hidráulica [$\text{cm}^3 \text{ sol. cm}^{-2} \text{ área. h}^{-1}$]
- γ - parâmetro obtido dos dados experimentais [cm. cm^{-1}]

Foi realizado o ensaio denominado perfil instantâneo (RICHARDS et alii, 1956; KLUTE, 1972) com prevenção da evaporação por uma capa plástica (OGATA e RICHARDS, 1957). Após a saturação do perfil do solo, resulta uma condição de contorno segundo a qual para o tempo inicial (início da redistribuição da água após a colocação da capa plástica) o fluxo de água é nulo na superfície do solo e a redistribuição da água se dá somente por drenagem.

Com essa condição de contorno, as hipóteses de LIBARDI et alii (1980), e considerando a equação diferencial geral que descreve o movimento de água no solo na direção vertical (Equação de Richards),

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] \quad \dots \dots (7)$$

sua integração resulta em:

$$\theta = \theta_o - \frac{1}{\gamma} \ln \left(1 + \frac{\gamma \cdot K_o}{a \cdot z} t \right) \quad \dots \dots (8)$$

Em termos de umidade média esta equação se torna:

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_o - \frac{1}{\bar{\gamma}} \ln \left(1 + \frac{\bar{\gamma} \cdot K_o}{z} t \right) \quad \dots \dots (9)$$

Comparando-se as equações (8) e (9) resulta:

$$a = \frac{\gamma}{\bar{\gamma}} \quad (10)$$

para tempos longos, a equação (8) pode ser simplificada:

$$\theta_0 - \theta = \frac{1}{\gamma} \ln t + \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\gamma \cdot K_0}{a \cdot z} \right) \quad (11)$$

o que indica que $(\theta_0 - \theta)$ se relaciona linearmente com o logaritmo neperiano de t . Com o mesmo raciocínio,

$$\bar{\theta}_0 - \bar{\theta} = \frac{1}{\bar{\gamma}} \ln t + \frac{1}{\bar{\gamma}} \ln \left(\frac{\bar{\gamma} \cdot K_0}{z} \right) \quad (12)$$

A partir deste desenvolvimento matemático, da comparação entre as equações (10), (11), (12) e considerando a umidade de saturação definida em laboratório, é possível definir os valores de θ_0 , γ , e K_0 , e automaticamente a equação (6) fica explicitada:

$$K(\theta) = K_0 \cdot e^{\gamma(\theta - \theta_0)} \quad (6)$$

3.5.5. Concentração de Nitrogênio (C_N)

As concentrações de nitrogênio foram determinadas em laboratório no Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/Piracicaba - SP, pelo método semi-micro-Kjeldahl, descrito por BREMNER (1965), a partir das amostras de solução do solo coletadas durante o cultivo.

3.6. Parâmetros avaliados

A quantificação da lixiviação de nitrogênio se resume na elaboração de um balanço de massa para o sistema solo, balanço este que se subdivide em dois, intimamente ligados, quais sejam, o balanço hídrico e a contabilização de nitrogênio, uma vez que será junto com a água que se dará o seu deslocamento.

Para o solo, o balanço hídrico pode ser representado pela equação que contabiliza as entradas e saídas de água no sistema, sendo que de maneira simplificada a precipitação e a irrigação representam predominantemente as entradas e a evapotranspiração, a drenagem e o escoamento superficial representam predominantemente as saídas de água no sistema solo, como segue:

$$\Delta A = (P + I) + (D + R + ET) \quad (13)$$

onde:

ΔA - variação de armazenagem (mm)
P - precipitação (mm)
I - irrigação (mm)
D - drenagem (mm)
R - escoamento superficial (mm)
ET - evapotranspiração (mm)

Esta equação estabelece que a soma dos fluxos durante um intervalo de tempo é igual a variação da armazenagem de água no solo, no mesmo intervalo de tempo considerado.

A equação para a contabilização de nitrogênio seria análoga, com a entrada deste íon no sistema podendo ocorrer através de adubação, chuva, escoamento superficial e restos vegetais, e as saídas, por lixiviação, escoamento superficial e exportação pela cultura. A soma destes fluxos de entradas e saídas resultaria, então, na variação de armazenagem de nitrogênio no solo.

Para a lixiviação, o conhecimento da drenagem é de fundamental importância, e recorre-se a equação de Darcy, que de forma generalizada é expressa como:

$$\vec{q} = - K(\theta) \nabla \phi \quad (14)$$

onde:

q - densidade de fluxo ou drenagem $[L.T^{-1}]$.

$K(\theta)$ - condutividade hidráulica $[L.T^{-1}]$.

$\nabla \phi$ - gradiente do potencial da solução do solo $[L.L^{-1}]$.

Para o presente estudo, foi considerado somente o fluxo na direção vertical nas profundidades de 25 e 50 cm. A equação de Darcy pode então ser reescrita:

$$q_z = - K(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (15)$$

onde:

q_z - densidade de fluxo na direção vertical

$\partial \phi / \partial z$ - Gradiente de potencial da solução do solo.

ϕ - potencial da solução.

Para o cálculo da lixiviação considerou-se apenas o movimento por fluxo de massa, isto é, não existe um gradiente de atividade, esta é considerada constante, não ocorrendo, por conseguinte, transporte por difusão. A força motriz para o processo de transferência do nitrogênio é o próprio gradiente do potencial da solução.

Assim, se q_z é a densidade de fluxo da solução do solo na profundidade z , a densidade de fluxo de nitrogênio na mesma profundidade será dada por:

$$q_N = q_z C_N \quad (16)$$

onde:

- q_N - densidade de fluxo de nitrogênio
- q_z - densidade de fluxo da solução do solo
- C_N - concentração de nitrogênio, calculado a partir da solução do solo, em laboratório.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Cultura do Feijão

A produção obtida foi de 2.645 Kg.ha⁻¹, considerada bastante significativa para a época e região de cultivo, principalmente se comparada à média nacional e à média para regiões produtoras de feijão irrigado no Estado de São Paulo, como pode ser observado através da TABELA 2.

TABELA 2 - Produção média de feijão para as regiões de maior produtividade no Brasil e Estado de São Paulo (MASSEI et alii, 1992).

----- PRODUTIVIDADE MÉDIA DO FEIJÃO DA SECA - Kg.ha ⁻¹ -----			
Brasil		Estado de S. Paulo	

SP	817	Rib. Preto	1669
ES	805	Campinas	1024
MG	547	Sorocaba	851
MS	547	S. J. Campos	824
BA	529	S. J. Rio Preto	641
RO	520	Bauru	600
Med Brasil	488	Araçatuba	591

4.2. Curva de Retenção

Apresenta-se na TABELA 3 os valores do potencial mátrico e da umidade correspondente (Curva de retenção de água) retirados e recalculados a partir de COSTA (1986). Estes valores foram obtidos através de medidas realizadas pelo processo de secamento em Funil de Buchner (LIBARDI, 1984b) para as tensões equivalentes a 10, 30, 50, 70, 90 e 150 centímetros de coluna de água (cca), e na Câmara de Pressão de Richards, para as tensões 330, 1000, 5000 e 15000 cca.

TABELA 3 - Curva de retenção de água - umidade volumétrica do solo recalculada a partir de COSTA (1986).

TENSÃO (cca)	P R O F U N D I D A D E S (cm)				
	15	30	45	60	75
10	0,4319	0,4999	0,5058	0,4823	0,4922
30	0,3963	0,4849	0,4862	0,4534	0,4490
50	0,3808	0,4631	0,4695	0,4356	0,4074
70	0,3736	0,4470	0,4520	0,4256	0,3925
90	0,3445	0,4408	0,4462	0,4016	0,3783
150	0,3372	0,4255	0,4284	0,3885	0,3583
330	0,3208	0,3588	0,3698	0,3714	0,3386
1000	0,3090	0,3479	0,3527	0,3513	0,3158
5000	0,2812	0,3185	0,3142	0,3205	0,2920
15000	0,2691	0,2990	0,2904	0,2981	0,2828

Comparando-se os valores de porosidade total apresentados na TABELA 1 aos valores da umidade volumétrica

para tensões equivalentes a 10 cca apresentados na TABELA 7, e neste trabalho considerada como a unidade de saturação, verificou-se que estas, a exceção da profundidade 15 cm são sempre superiores. Este fato pode estar associado a problemas metodológicos, conforme discutido por MORAES (1991), implicando uma certa imprecisão para as leituras realizadas através do Funil de Buchner em condições de unidades próximas à saturação.

Encontram-se na TABELA 4 os valores de θ_r , θ_s , α , m , e n , com os respectivos coeficientes de correlação (R^2), e as FIGURAS 5 a 11 mostram a perfeita aderência dos valores obtidos pela equação de GENUCHTEN (1978) aos dados experimentais obtidos em laboratório (curva de retenção de água).

TABELA 4 - Parâmetros da equação de GENUCHTEN (1978) e respectivo coeficiente de correlação (R^2) para as várias profundidades estudadas

prof	θ_r	θ_s	α	m	n	R^2
15	0,2691	0,4319	0,03480	0,32724	1,48641	0,9788
30	0,2990	0,4999	0,01489	0,37357	1,59634	0,9862
45	0,2904	0,5058	0,01525	0,34299	1,54405	0,9894
60	0,2981	0,4823	0,02865	0,30270	1,43409	0,9834
75	0,2828	0,4922	0,03537	0,37082	1,58936	0,9891

Os valores de α , m e n foram estimados recorrendo-se a técnica de regressão e otimização de funções não lineares, com base em um programa para micro computadores desenvolvido pelo próprio GENUCHTEN (1980).

FIGURA 5 - Curva de retenção de água para a profundidade de 15 cm. Os pontos representados no gráfico foram definidos em laboratório, enquanto a curva foi traçada considerando-se da equação empírica para esta profundidade obtida a partir da metodologia de GENUCHTEN (1978).

FIGURA 6 - Curva de retenção de água para a profundidade de 30 cm. Os pontos representados no gráfico foram definidos em laboratório, enquanto a curva foi traçada considerando-se da equação empírica para esta profundidade obtida a partir da metodologia de GENUCHTEN (1978).

FIGURA 7 - Curva de retenção de água para a profundidade de 45 cm. Os pontos representados no gráfico foram definidos em laboratório, enquanto a curva foi traçada considerando-se da equação empírica para esta profundidade obtida a partir da metodologia de GENUCHTEN (1978).

FIGURA 8 - Curva de retenção de água para a profundidade de 60 cm. Os pontos representados no gráfico foram definidos em laboratório, enquanto a curva foi traçada considerando-se da equação empírica para esta profundidade obtida a partir da metodologia de GENUCHTEN (1978).

FIGURA 9 - Curva de retenção de água para a profundidade de 75 cm. Os pontos representados no gráfico foram definidos em laboratório, enquanto a curva foi traçada considerando-se da equação empírica para esta profundidade obtida a partir da metodologia de GENUCHTEN (1978).

4.3. Umidade do solo

Consta do Anexo 2 os valores médios da umidade do solo nas profundidades 10, 20, 30, 40, 60 e 75 cm, obtidas a partir das leituras diárias dos tensiômetros e das equações (8) e (9). Apresenta-se nas FIGURAS 10, 11, 12 e 13 o comportamento da umidade ao longo do cultivo.

Como pode-se observar nestas figuras, os valores da umidade nas profundidades 10, 20, 30 e 45 cm apresentaram grandes variações ao longo do tempo, refletindo a conjunção dos vários fatores atuantes no processo de transferência de água no sistema solo-planta-atmosfera, representados pela precipitação e irrigação, pela evaporação direta do solo, transpiração das plantas, ascensão capilar e drenagem para profundidades maiores. Para as profundidades 60 e 75 cm já não se observa o mesmo comportamento, as entradas de água no sistema praticamente não afetam o processo de redistribuição natural de água, predominando um secamento progressivo do solo ao longo do cultivo, indicando que para esta cultura e época do ano, toda água que atinja a profundidade de 60 cm, se deslocará para além do sistema radicular.

Figura 10 - Comportamento da umidade volumétrica ao longo do ciclo de cultivo nas profundidades 10 e 20 cm

Figura 11 - Comportamento da umidade volumétrica ao longo do cultivo nas profundidades 30 e 40 cm

Figura 12 - Comportamento da umidade volumétrica ao longo do cultivo nas profundidades 60 e 75 cm.

4.4 Gradiente do potencial hidráulico.

O gradiente do potencial hidráulico representa a força que atua em cada unidade de volume de água do solo, sendo responsável, portanto, pelo seu movimento. Apresenta-se na FIGURA 14 o comportamento do gradiente do potencial hidráulico ao longo do cultivo. Ressalta-se que pelo sistema referencial adotado neste trabalho, os valores do gradiente do potencial positivos indicam que o movimento se dará no sentido da superfície do solo para o lençol freático.

Observa-se que para os primeiros 25 dias após o plantio (Dap), o gradiente do potencial hidráulico permanece positivo até a profundidade 75 cm, indicando que o movimento da solução do solo foi para além desta profundidade, representando um momento exclusivamente de drenagem. A partir desta data, para a profundidade de 25 cm o sentido do deslocamento da solução do solo apresenta alternâncias, ou seja, momentos de ascensão e momentos de drenagem, associados às alternâncias nos valores positivo e negativo do gradiente do potencial. Para as demais profundidades, o gradiente do potencial hidráulico da solução permaneceu ainda predominantemente positivo, o que corrobora a hipótese de que para esta cultura e época do ano, a partir da profundidade de 60 cm, o sentido de deslocamento da água é sempre para além do sistema radicular, representando esta profundidade o

limite inferior máximo a ser considerado como referencia para planejamento e cálculo de reposição de água.

FIGURA 13 - Comportamento do gradiente do potencial hidráulico nas profundidades 25, 50 e 75 cm, durante o ciclo de cultivo do feijoeiro. Os valores positivos representam drenagem enquanto os valores negativos representam ascensão de água relativamente à profundidade monitorada.

4.5. Condutividade hidráulica do solo

Apresenta-se na TABELA 5 os valores médios de umidade durante o ensaio de redistribuição da água no solo, e na TABELA 6 os valores dos parâmetros K_0 , θ_0 , γ , a partir de LIBARDI et alii (1980). Os coeficientes de correlação (R^2) foram sempre superiores a 99%, indicando a grande representatividade da metodologia aos dados de campo.

TABELA 5 - Umidade volumétrica média durante o ensaio de redistribuição de água recalculada a partir de COSTA (1986) (média de três repetições).

tempo horas	profundidades (cm)			
	30	45	60	75
0	0,5059	0,5054	0,4905	0,4745
17	0,4767	0,4794	0,4634	0,4441
35	0,4716	0,4735	0,4586	0,4396
42	0,4674	0,4703	0,4558	0,4366
83	0,4643	0,4667	0,4526	0,4331
154	0,4578	0,4606	0,4470	0,4278
250	0,4511	0,4549	0,4416	0,4225
353	0,4442	0,4477	0,4350	0,4162
443	0,4404	0,4441	0,4322	0,4138
518	0,4385	0,4421	0,4302	0,4118

TABELA 6 - Parâmetros da equação da condutividade hidráulica obtidos segundo LIBARDI et alii (1980).

prof. cm	K_0 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$	θ_0 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	$\gamma^{(1)}$	$(R^2)^{(1)}$
30	0,0592	0,4999	102,0408	0,9978
45	0,0824	0,5058	94,3396	0,9977
60	0,2534	0,4823	94,3396	0,9999
75	1,4713	0,4922	93,4579	0,9992

⁽¹⁾ valores adimensionais

4.6. Balanço hídrico da cultura de feijão

O volume de água que atingiu a superfície do solo durante o cultivo (TABELA 7), totalizou 275,2 mm, sendo 117,1 mm via precipitação e 158,1 mm via irrigação, distribuída de forma relativamente uniforme ao longo do ciclo da cultura (32% na fase de desenvolvimento vegetativo, 21% na fase floração, 17% na fase de formação de vagens, e 30% na fase maturação até a colheita).

TABELA 7 - Distribuição das precipitações e irrigações ao longo do ciclo da cultura.

Dap	Data	P mm	I mm	Dap ⁽¹⁾	Data	P ⁽²⁾ mm	I ⁽³⁾ mm
6	03-06-92	0,0	17,0	83	19-08-92	0,3	0,0
12	09-06-92	0,0	10,0	85	21-08-92	3,2	0,0
19	16-06-92	0,0	9,8	86	22-08-92	2,8	7,8
28	25-06-92	0,0	7,1	87	23-08-92	2,6	0,0
31	28-06-92	0,6	0,0	92	28-08-92	0,0	10,6
37	02-07-92	0,0	6,0	95	31-08-92	1,7	0,0
39	06-07-92	5,7	0,0	96	01-09-92	1,2	0,0
40	07-07-92	11,0	0,0	97	02-09-92	1,0	0,0
41	08-07-92	19,9	0,0	99	04-09-92	2,5	0,0
49	16-07-92	0,0	13,6	100	05-09-92	1,6	0,0
57	24-07-92	0,0	10,6	101	06-09-92	2,2	0,0
61	28-07-92	0,0	10,9	106	11-09-92	4,8	0,0
67	03-08-92	0,0	23,6	107	12-09-92	5,2	0,0
72	08-08-92	0,0	14,9	109	14-09-92	15,3	0,0
79	15-08-92	0,0	16,2	110	15-09-92	25,6	0,0
82	18-08-92	0,3	0,0	112	17-09-92	9,6	0,0
TOTAL						117,1	158,1

- (1) dias após plantio
 (2) precipitação
 (3) irrigação

Esta quantidade de água foi suficiente para proporcionar um vigoroso desenvolvimento vegetativo, mantendo o solo sempre dentro de uma faixa adequada de tensões de água para a cultura (FIGURA 15), atingindo somente durante o período 31° a 38° Dap um intervalo de tensão máxima admissível para obtenção de máxima produtividade conforme recomendado MILLAR (1984), estando, no entanto aquém da tensão máxima admissível proposta por MAGALHÃES e MILLAR (1978).

FIGURA 14 - Potencial mátrico ao longo do desenvolvimento da cultura, para a profundidade de 20 cm.

Relativamente aos parâmetros meteorológicos coletados durante a ciclo do cultivo, como pode ser observado abaixo, estes não apresentaram diferenças significativas em relação às médias esperadas retiradas de OMETTO (1989).

Mes de junho	média	junho/92
- precipitação	46 mm	0,6 mm
- temperatura do ar	16,8 °C	19,7 °C
- umidade relativa	77 %	75 %
- velocidade do vento	1,8 m.s ⁻¹	2,2 m.s ⁻¹
- insolação na superfície	6,62 h.dia ⁻¹	6,99 h.dia ⁻¹
Mes de julho	média	julho/92
- precipitação	26 mm	36,6 mm
- temperatura do ar	17,2 °C	18,1 °C
- umidade relativa	74 %	74 %
- velocidade do vento	2,1 m.s ⁻¹	2,5 m.s ⁻¹
- insolação na superfície	7,27 h.dia ⁻¹	6,53 h.dia ⁻¹
Mes de agosto	média	agosto/92
- precipitação	29 mm	11,1 mm
- temperatura do ar	18,9 °C	19,1 °C
- umidade relativa	68 %	72 %
- velocidade do vento	2,3 m.s ⁻¹	2,3 m.s ⁻¹
- insolação na superfície	7,52 h.dia ⁻¹	6,43 h.dia ⁻¹
Mes de setembro	média	setembro/92
- precipitação	60 mm	87,5 mm
- temperatura do ar	18,9 °C	19,6 °C
- umidade relativa	63 %	81 %
- velocidade do vento	2,5 m.s ⁻¹	2,5 m.s ⁻¹
- insolação na superfície	6,32 h.dia ⁻¹	4,26 h.dia ⁻¹

A quantificação dos diversos parâmetros envolvidos no balanço hídrico foi realizada a partir das leituras dos tensiômetros, do controle de entrada de água no sistema e das equações (1), (8), (9), (10), (11), (14) e (15). Foram estimados os valores da unidade volumétrica, da armazenagem de água no solo, da variação da armazenagem de água no solo, da drenagem profunda e da evapotranspiração real da cultura.

Considerou-se a média entre as unidades das parcelas nº 1, 2, 3, 4 e 5, desprezando-se a parcela nº 6, por esta apresentar valores e comportamento muito diferentes das demais, devido à problemas na irrigação.

Apresenta-se na TABELA 7 os volumes de precipitação e irrigação durante o ciclo, e no ANEXO 2 os valores diários médios das leituras dos tensiômetros e parâmetros associados utilizados na realização do balanço.

A TABELA 8 apresenta a síntese do balanço hídrico real obtido durante o ciclo da cultura.

TABELA 8 - Balanço hídrico para as diversas fases de desenvolvimento do feijoeiro para uma profundidade de sistema radicular de 60 cm. Os valores negativos representam saídas e os positivos ganhos de água no sistema. Para a definição do gradiente do potencial hidráulico da solução utilizou-se os tensiômetros a 60 e 75 cm.

PERÍODO ⁽¹⁾	Dap	duração (dias)	ΔA (mm)	P + I (mm)	D (mm)	ET (mm)	ET/dia (mm)
I	1-40	40	-24,7	+87,1	-24,7	-87,1	-2,2
II	41-63	23	-6,9	+58,7	-0,8	-64,8	-2,8
III	64-84	20	+5,4	+48,1	-0,2	-42,5	-2,1
IV	85-105	22	+25,6	+81,3	-2,1	-53,2	-2,4
TOTAL		105	-0,6	+275,2	-27,7	-247,4	-2,4

Para todo o ciclo observa-se que o volume de água que entrou (P + I) foi igual ao volume que deixou o sistema (D + ET), resultando, portanto, em variação de armazenagem nula no sistema solo. Os valores negativos representam saídas e os positivos ganhos de água no sistema.

A evapotranspiração total foi de 247,4 mm, resultando em uma evapotranspiração diária média de 2,4 mm, valor este semelhante aos valores médios nas diversas fases de desenvolvimento da cultura, ou seja, a evapotranspiração foi praticamente constante durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura.

⁽¹⁾ Período de desenvolvimento da cultura: I - vegetativo, II - floração, III - formação de vagens, IV - maturação.

Relativamente à drenagem (D), o controle tensiométrico mostrou que as irrigações realizadas a partir das leituras do Tanque Classe "A" nos dias 6, 12, 61, 72, 79 e 92 após o plantio se deram em momentos inadequados, favorecendo assim a drenagem para além do sistema radicular, uma vez que as tensões de água no solo eram inferiores às tensões máximas admissíveis de água no solo para se evitar deficiências hídricas em culturas de feijão conforme apresentado por MILLAR (1984) e MAGALHÃES e MILLAR (1978).

4.7. Fluxo de nitrogênio

Como exposto anteriormente, a quantificação do fluxo de nitrogênio foi estimada pelo produto entre a densidade de fluxo da solução do solo e a concentração do íon,

$$q_N = q_z C_N \quad (16)$$

Para a determinação da concentração de nitrogênio na solução do solo foram realizadas 12 campanhas de amostragem, ao longo do ciclo da cultura, nas seis parcelas instrumentadas, após irrigações e precipitações.

Como os volumes de solução do solo recuperadas por parcela individualmente nem sempre foram em quantidade adequadas para análise, optou-se por fazer uma composição média das amostras, objetivando diminuir imprecisões metodológicas. Ainda assim, para algumas amostras, resultaram volumes inadequados e, a solução encontrada foi misturar amostras coletadas em dias diferentes, conforme apresentado na TABELA 9.

TABELA 9 - Concentrações de nitrogênio nas várias amostras coletadas durante o cultivo, para as profundidades 25 e 50 cm.

AMOSTRA	Z (cm)	VOL AMOSTRA (ml)	CONCENTRAÇÃO (mg N.ml ⁻¹)	DIAS ENVOLVIDOS (Dap)
I	25	30	0,0686	20 e 21
I	50	30	0,0345	20 e 21
II	25	30	0,0488	29
II	50	30	0,0390	29
III	25	30	0,0543	36 e 43
III	50	30	0,0360	36 e 43
IV	25	30	0,0340	50
IV	50	30	0,0296	50
V	25	23	0,0206	57 e 62
V	50	30	0,0311	57 e 62
VI	25	30	0,0084	68 e 73
VI	50	30	0,0330	68 e 73
VII	25	30	0,0039	80 e 88
VII	50	6	0,0370	80 e 88

A estimativa da drenagem da solução do solo, nas profundidades consideradas, foi realizada através da equação (14), considerando-se o solo como um meio homogêneo.

As TABELAS 10 e 11 apresentam os resultados obtidos na estimativa da lixiviação abaixo das profundidades 25 e 50 cm, durante um período de 86 dias envolvendo os estádios de desenvolvimento vegetativo, floração, formação de vagens e início da maturação.

Como pode ser observado nestas tabelas, do total de nitrogênio que atingiu as profundidades 25 e 50 cm, quantidades superiores, respectivamente a 60% e 80% foram perdidos, nos primeiros 25 Dap.

TABELA 10 - Drenagem (D) da solução do solo, concentração de nitrogênio na solução e quantidade de nitrogênio lixiviado abaixo da profundidade 25cm.

Dap	D mm	D ⁽¹⁾ cm ³ .m ⁻²	CONCENTRAÇÃO mg N.cm ⁻³ Sol	LIXIVIAÇÃO g.ha ⁻¹	%
7 a 25	9,7	9700	0,0686	6654,20	64,7
26 a 36	0,0	0	0,0488	0,00	0,0
37 a 47	5,1	5100	0,0543	2769,30	26,9
48 a 56	0,0	0	0,0340	0,00	0,0
57 a 67	0,0	0	0,0206	0,00	0,0
68 a 81	7,0	7000	0,0085	595,00	5,8
82 a 92	6,8	6800	0,0039	265,20	2,6
TOTAL	28,6	28600		10283,70	100,0

⁽¹⁾ em cm³.m⁻², unidade compatível para o cálculo da lixiviação

TABELA 11 - Drenagem (D) de solução do solo, concentração de nitrogênio na solução e quantidade de nitrogênio lixiviado abaixo da profundidade 50cm.

Dap	D mm	D ⁽¹⁾ cm ³ .m ⁻²	CONCENTRAÇÃO mg N.cm ⁻³ Sol	LIXIVIAÇÃO g.ha ⁻¹	%
7 a 25	22,3	22300	0,0345	7693,50	86,0
26 a 36	1,4	1400	0,0390	546,00	6,1
37 a 47	1,1	1100	0,0360	396,00	4,4
48 a 56	0,8	800	0,0296	236,80	2,6
57 a 67	0,0	0	0,0311	0,00	0,0
68 a 81	0,1	100	0,0330	33,00	0,4
82 a 92	0,1	100	0,0370	37,00	0,5
TOTAL	25,8	25800		8941,50	100,0

Se considerarmos que a complementação da adubação apenas se realizara entre os dias 14 a 16/07/92, isto é, entre os dias 48° e 51° após o plantio, e que por motivos operacionais não foram realizadas amostragens de solução do solo para quantificação das perdas associadas à irrigação abundante no início do ciclo, a lixiviação ocorrida até esta data, nas duas profundidades, equivaleria a pelo menos 30% do fertilizante nitrogenado colocado durante o plantio.

Pode-se atribuir esta expressiva mobilidade ao fato de a) a umidade do solo no início do cultivo estar

⁽¹⁾ em cm³.m⁻², unidade compatível para o cálculo da lixiviação

próxima a capacidade de campo; b) a presença de irrigações pequenas, mas freqüentes para reposição de água; c) gradiente de potencial sempre positivo, como consequência dos fatos anteriores; d) além da cultura estar em um estágio mínimo de ocupação e exploração do volume de solo.

Associando-se a lixiviação à reposição de água ao solo, apesar desta ter sido bastante criteriosa, resultando em uma drenagem relativamente pequena, pode-se concluir que em média, cada milímetro de chuva e/ou irrigação que atingiu a superfície do solo durante o ciclo da cultura, implicou no transporte de $32,5 \text{ g.N.ha}^{-1}$ para baixo da profundidade de 50cm.

Ao se confrontar estes dados aos apresentados por LIBARDI e REICHARDT (1978), LIBARDI et alii (1982) e LIBARDI (1984a), onde constataram que a variação da armazenagem de nitrogênio foi mínima ao longo do cultivo das culturas, no mesmo solo deste experimento, verifica-se a necessidade de um controle criterioso dos momentos de irrigação para se evitar perdas como as observadas nos primeiros 25 dias após o plantio.

Verificou-se ainda, um comportamento diferenciado entre as concentrações de nitrogênio nas profundidades 25 e 50 cm, como pode ser verificado na FIGURA 16, identificando processos diversos condicionando a movimentação do íon.

Observou-se que para a profundidade de 25 cm as concentrações de nitrogênio diminuíram continuamente, enquanto para a profundidade 50 cm, as concentrações permaneceram praticamente constantes durante todo o ciclo da cultura, independentemente da umidade, evidenciando que os processos e atividades consumidoras de nitrogênio, tais como denitrificação, assimilação pela cultura e lixiviação, foram mais atuantes até 25 cm.

FIGURA 15 - Concentração de nitrogênio ao longo do ciclo de cultivo, nas profundidades 25 e 50 cm.

Abaixo desta profundidade deve ter predominado o processo de homogeneização da concentração através da lixiviação para profundidades maiores, uma vez que gradiente do potencial hidráulico da solução se manteve predominantemente positivo (FIGURA 14).

Acrescenta-se, no entanto, que para a realização de um balanço de água mais rigoroso e a quantificação das perdas pelo processo de lixiviação, para profundidades menores que 50 cm há a necessidade de buscar alternativas para um melhor controle da umidade, além de amostragens sistemáticas e freqüentes imediatamente após a irrigação ou precipitação.

4.8. Comportamento global dos parâmetros

Apresenta-se na FIGURA 17 o comportamento dos componentes precipitação, irrigação e drenagem do balanço hídrico e dos parâmetros gradiente de potencial e densidade de fluxo de nitrogênio (lixiviação) para o período entre 03/06 a 28/08/92 (6° ao 92° Dap) na profundidade 50 cm.

Figura 16 - Associação de alguns parâmetros envolvidos no transporte de nitrogênio durante o ciclo da cultura na profundidade 50cm (P-precipitação em mm, I-irrigação em mm, L-lixiviação acumulada em 10^{-1}gN.ha^{-1} , G-gradiente de potencial em cm.cm^{-1} , D-drenagem acumulada em mm).

De modo global o que se verifica é uma estreita relação entre a entrada de água no sistema ($P + I$) e a drenagem/lixiviação, podendo-se isolar quatro momentos importantes:

- 7 a 15 dias após plantio: drenagem associada, provavelmente, ao fato da umidade estar próxima à capacidade de campo, e a cultura estar pouco desenvolvida, ocupando uma área relativamente pequena, explorando um reduzido volume de solo, com irrigações frequentes,

- 40 a 44 dias após plantio: drenagem associada a precipitações sucessivas,

- 68 a 70 dias após plantio: drenagem associada a irrigação excessiva,

- 85 a 87 dias após plantio: drenagem associada a precipitações sucessivas.

5. CONCLUSÕES

O cultivo de feijão de inverno irrigado mostrou-se viável para a região de Piracicaba - SP.

Contabilizou-se, durante o ciclo da cultura, 27,7 mm de drenagem abaixo da profundidade 60 cm. Este volume de solução representa 10,1% do total de água que atingiu o solo, valor considerado relativamente baixo. No entanto, ressalta-se que esta quantidade poderia ser minimizada. Do total da drenagem durante o ciclo da cultura, 89,2% ocorreu nos primeiros 40 dias após o plantio (Dap), e neste período, pelo controle tensiométrico, foi possível identificar dois momentos (6° e 12° Dap), onde os parâmetros relativos ao movimento da água no solo - potencial mátrico e gradiente do potencial da solução do solo - durante a irrigação favoreciam a drenagem.

A estimativa das perdas de nitrogênio para as profundidades 25 e 50 cm foram respectivamente 10,3 Kg.ha⁻¹ e 8,9 Kg.ha⁻¹, ou seja, o equivalente a pelo menos 10,3 e 8,9% do total de nitrogênio aplicado. Desconsiderou-se possíveis perdas associadas à irrigação abundante no início do ciclo, e durante o estágio de maturação.

Para a profundidade de 50 cm, 86% das perdas de nitrogênio se deram nos primeiros 25 dias após o plantio. Este fato indica que para a realização de uma agricultura que minimize perdas, se coloca a necessidade de se refletir sobre os procedimentos para início da irrigação pelo Método do Tanque Classe "A".

A concentração média de nitrogênio que atingiu a profundidade de 50 cm, durante o período monitorado, foi de 34,3 mg.l⁻¹.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERTS, E.E.; BURWELL, R.E.; SCHUMAN, G.E. Soil nitrate-N determined by coring solution extraction techniques. *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, 41: 90-2, 1977.
- BAKER, F.G.; VENEMAN, P.L.M.; BOUMA, J. Limitations of the instantaneous profile method for field measurement of unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, 38: 885-8, 1974.
- BIGGAR, J.W.; NIELSEN, D.R.; MacINTYRE, J.L. Measurement of water and nitrogen fluxes in soil profiles planted to maize. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Isotope ratios as pollutant source and behavior indicators*. Viena, 1975. p. 417-28.
- BLACK, A.S. & WARING, S.A. Adsorption of nitrate, chloride and sulphate by some highly weathered soils from south-east Queen land. *Australian Journal of Soil Research*, Melbourne, 17: 271-82, 1979.

- BOUWER, H. Effect of irrigated agriculture on groundwater. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York. 113(1): 4-15, 1987.
- BREMNER, J.M. Total nitrogen. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E. (ed.). *Methods of soil analysis*. Madison, Amer. Soc. Agron., 1965. pt. 2, p. 1149-1178. (Agronomy, 9).
- CECH, I. & HARRIST, R. Groundwater contaminations, data analysis and modeling. *Groundwater Pollution Microbiology*, New York, John Willey. p. 261-302, 1984.
- CERVELLINI, A.; RUSCHEL, A.P.; MATSUI, E.; SALATI, E.; ZAGATTO, E.A.G.; FERREYRA, F.F.; KRUG, F.J.; BERGAMIN FILHO, H.; REICHARDT, K.; MEIRELLES, N.M.F.; LIBARDI, P.L.; VICTORIA, R.L.; SAITO, S.M.; NASCIMENTO FILHO, V.F. Fate of ^{15}N applied as ammonium sulphate to a bean crop. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Soil nitrogen as fertilizer or pollutant*. Viena, 1980. p. 23-38 (Panel Proceedings Series).
- CHICHESTER, F.W. & SMITH, S.J. Disposition of ^{15}N -labeled fertilizer nitrate applied during corn culture in field lysimeters. *Journal of Environmental Quality*. Madison, 7(2): 227-233, 1978.

CONLEY, H.H. Cyanosis in infants caused by nitrates in well water. *Journal of the American Medical Association*, 129: 112, 1945.

COSTA, A.C.S. da. Balanço hídrico em culturas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e de milho (*Zea mays* L.) sob condições de campo. Piracicaba, 1986. 166p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

DELWICHE, C.C. O ciclo do nitrogênio. In: FREEMAN, W.H. (ed.). *A biosfera*. Trad. de L.R. Tommasi. São Paulo, Polígono; Edusp, 1974. p. 77-89.

DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. *Crop water requirements*. Roma, FAO, 1975. p. 179. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

DOURADO NETO, D. Previsão do rendimento da cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). Piracicaba, 1992. 124p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

DUKE, H.R.; SMIKA, D.E.; HEERMAN, D.F. Groundwater contamination by fertilizer nitrogen. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, New York. 104(IR3): 288-91, 1978.

EIRA, P.A.; ALMEIDA, D.L.; ALVAHIDO, R. Movimento do íon nitrato em solo da série Itaguaí, nas condições naturais de campo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Sér. Agronomia, Brasília, 3(1): 267-73, 1968.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Crêterios para distinção de classes de solo e de fases de unidade de mapeamento: normas em uso pelo SNLCS*. Rio de Janeiro, 1988. 67p.

ESPINOSA, W.; GAST, R.G. e ADAMS Jr, R.S. Change characteristics and nitrate retention by two Andepts from South-central Chile. *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, 39: 842-6, 1975.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Soil Survey Staff. *Keys to soil taxonomy*. 4.ed. Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1990. 422p. (SMSS. Technical Monograph, 19).

FRIED, M.; TANJI, K.K.; POL, R.M. de. Simplified long term concept for evaluating leaching of nitrogen from agricultural land. *Journal of Environmental Quality*, Madison, 5(2): 197-200, 1976.

- GENUCHTEN, M. T. van. *Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form model*. Princeton, New Jersey, 1978. 63p. (Research report, 78-WR-08).
- GENUCHTEN, M.T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, Madison, **44**:892-8, 1980.
- GETMANETS, A.Y.A. & AVRAMENKO, P.S. Vertical migration of nitrate in the ordinary chernozems of the Ukrainian Steppe Zone. *Soviet Soil Science*, Madison, **8**: 523-7, 1976.
- GILLMAN, G.P. & SINCLAIR, D.F. The grouping of soil with similar change proprieties as a basis for agrotechnology transfer. *Australian Journal of Soil Research*, Melbourne, **16**: 67-77, 1978.
- GINOCCHIO, J. Nitrate levels in drinking water are becoming too high. *Water Services*, **88**(1058): 143-147, 1984.
- GOLDEN, D.C. Nitrification and movement of nitrate after application of ammonium sulphate in a red-yellow podzolic tea soil in Sri Lanka. In: *SEMINAR ON ISOTOPE TECHNIQUES IN STUDIES OF THE USEFUL CONSERVATION AND POLLUTANT POTENTIAL OF AGRICULTURAL NITROGEN RESIDUES*, Viena, 1980. *Abstrats*. Viena, 1980. p. 27

- HANSEN, E.A. & HARRIS, A.R. Validity of soil-water samples collected with porous ceramic cups. *Soil Science of American Proceedings*, Madison, 39: 528-536, 1975.
- HELLIOT, L.F.; MCCALLA, T.M.; MIELKE, L.N.; TRAVIS, T.A. Ammonium, nitrate and total nitrogen in the soil water of feedlot and field soil profiles. *Applied Microbiology*, Maryland, 28: 810-3, 1972.
- HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLIANOV, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil Science*, Blatimore, 114: 395-400, 1972.
- HUBBARD, R.; ASMUSSEN, L.E.; ALLISON, H.D. Shallow groundwater quality beneath an intensive multiple-cropping system using center pivot irrigation. *Journal of Environmental Qualality*, Madison, 13(1): 156-161, 1984.
- KEENEY, D.R. Sources of nitrate to groundwater. *Critical Review of Environmental Control*, 16: 257-304, 1986.
- KINJO, T. & PRATT, P.J. Nitrate adsorption: I. In some acid soil of Mexico and South-America. *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, 35: 722-5, 1971.

- KINJO, T.; KIEHL, E.J.; PRAT, P.F. Movimento do nitrato em colunas de terra de um Latossolo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2: 106-9, 1978.
- KLUTE, A. The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils. *Soil Science*, Baltimore, 113: 264-276, 1972
- KRUIJS, A.C.B.M. Van der; WONG, M.T.F.; JUO, A.S.R.; WILD, A. Recovery of ^{15}N -labelled fertilizer in crops, drainage water and soil using monolith lysimeters in south-east Nigeria. *Journal of Soil Science*, Oxford, 39: 483-92, 1988.
- LAW Jr., J.P. Irrigation effects in Oklahoma and Texas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, 113(1): 49-56, 1987.
- LIBARDI, P.L. Balanço de nitrogênio em culturas agrícolas e desvios encontrados na sua quantificação. Piracicaba, 1984a, 113p. (Livre-docência - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- LIBARDI, P.L. *Dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera*. Piracicaba, CENA, 1984b. 232p.
- LIBARDI, P.L. & REICHARDT, K. Destino da uréia aplicada a um solo tropical. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 2: 40-4, 1978.

- LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K; NASCIMENTO FILHO, V. F. Análise de redistribuição da água visando a condutividade hidráulica do solo. *Energia Nuclear e Agricultura*, Piracicaba, 1: 108-22, 1979.
- LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, 44: 3-7, 1980.
- LIBARDI, P.L.; VICTORIA, R.L.; REICHARDT, K.; CERVELLINI, A. Nitrogen cycling in a ^{15}N -fertilized bean (*Phaseolus vulgaris* L.) crop. *Plant and Soil*, The Hague, 67: 193-208, 1982.
- MAGALHÃES, A.A. e MILLAR, A.A. Efeito do déficit de água no período reprodutivo sobre a produção de feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Sér. Agronomia, Brasília, 13: 55-60, 1978.
- MAZZEI, A.R.; OKAWA, H.; UENO, L.H. Prognóstico agrícola 1991/1992, safra da seca: alho, amendoim, batata, cebola, feijão e tomate. *Informações econômicas*, São Paulo, IEA, 22(2): 29-35, fev. 1992.

- MEIRELLES, N.M.F.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Absorção e .lixiviação de nitrogênio em cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Brasileira de Ciência Solo*, Campinas, 4: 83-8, 1980.
- MILLAR, A.A. Manejo racional da irrigação: uso de informações básicas sobre diferentes culturas. Brasília, IICA: *Série Publicações miscelâneas*, Brasília, 461, 1984. 56 p.
- MORAES, S.O. Heterogeneidade hidráulica de uma terra roxa estruturada. Piracicaba, 1991. 141p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- MUELLER-HARVEY, I.; JUO, A.S.R.; WILD, A. Soil organic C, N, S e P after forest clearance in Nigeria: mineralization rates and spatial variability. *Journal of Soil Science*, Oxford, 36: 585-91, 1985.
- NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; ERH, K. Spatial variability of field measured soil water properties. *Hilgardia*, Berkeley, 42: 215-59, 1973.
- NIELSEN, D.R.; WIERENGA, P.J.; BIGGAR, J.W. Movement of nitrate in the soil profile. In: *SEMINAR ON ISOTOPE TECHNIQUES IN STUDIES OF THE USEFUL CONSERVATION AND POLLUTANT POTENTIAL OF AGRICULTURAL NITROGEN RESIDUES*, Viena, 1980. *Abstrats*. Viena, 1980. p. 15 (IAEA-SR-48).

- OGATA, G. & RICHARDS, L.A. Water content changes following irrigation of bare field soil that is protected from evaporation. *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, 21: 355-6, 1957.
- OMETTO, J.C. Registros e estimativas de parâmetros meteorológicos da região de Piracicaba, SP. Piracicaba, FEALQ, 1991. 76p.
- OMETTO, J.C. Bioclimatologia Vegetal. Piracicaba, Agroceres, 1981. 425p.
- PRATT, P.F.; LUND, L.J.; WARNEKE, E. Nitrogen losses in relation to soil profile characteristics. In: *SEMINAR ON ISOTOPE TECHNIQUES IN STUDIES OF THE USEFUL CONSERVATION AND POLLUTANT POTENTIAL OF AGRICULTURAL NITROGEN RESIDUES*, Viena, 1980. *Abstrats*. Viena, 1980. p. 22 (IAEA-SR-48).
- RAIJ, B. van & CAMARGO, O.A. de. Nitrate elution from soil columns of three Oxisols and one Alfisol. In: *INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE*, 10., Moscou, 1974. *Transactions*, Moscou, International Society of Soil Science. 1974. v.2, p. 384-91.
- RANZANI, G.; FREIRE, O.; KINJO, T. Carta de solos do município de Piracicaba. Piracicaba, ESALQ/USP. 1966, 85p.

- RAWITS, E. *Summary report 1975-1977: an evaluation of the dynamic measurement of soil water flux for use in determining nitrate flux below a cropped field*, Rehovot, FAO, 1977. 27p. (Working Paper 39-b).
- REEVE, R.C. & DOERING, E.J. Sampling the soil solution for salinity appraisal. *Soil Science*, Baltimore, 99: 339-44, 1965.
- REICHARDT, K. & LIBARDI, P.L. An analysis of soil water movement in the field. I. Hydrological field site characterization. *Boletim do CENA*, Piracicaba, 1974. 21p. (CENA BC-021)
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; URQUIAGA, S.S. Fate of fertilizer nitrogen in soil-plant systems with emphasis on the tropics. Viena, IAEA, 1982. (IAEA-SM-263/36).
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; VICTORIA, R.L.; VIEGAS, G.P. Dinâmica do nitrogênio num solo cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 3: 17-20, 1979.
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; MEIRELLES, N.M.F.; FERREYRA, H.F.F.; ZAGATO, E.A.G.; MATSUI, E. Extração e análise de nitrato em solução do solo. *Revista Brasileira de Ciência do solo*. Campinas, 1: 130-2, 1977.

- RICHARDS, L.A. Physical condition of water in soil. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E. *Methods of soil analysis*, Madison, Amer. Soc. Agron., 1965. pt. 1, p.128-52. (Agronomy, 9).
- RICHARDS, L.A.; GARDNER, W.R.; OGATA, G. Physical processes of determining water loss from soil. *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, 20: 310-4, 1956.
- SABOL, G.V.; BOUWER, H.; WIERENGA, P.J. Irrigation effects in Arizona and New Mexico. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, 113(1): 30-48, 1987.
- SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Dinâmica de nutrientes em cana de açúcar. II Deslocamento vertical e horizontal de $\text{NO}_3\text{-N}$ e $\text{NH}_4\text{-N}$ no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 19(9): 1103-8, 1984.
- SATARIOU, N. & KORTE, F. Balance and fate of nitrogen (^{15}N) fertilizer in soil/plant systems under outdoor condition. In: *SEMINAR ON ISOTOPE TECHNIQUES IN STUDIES OF THE USEFUL CONSERVATION AND POLLUTANT POTENTIAL OF AGRICULTURAL NITROGEN RESIDUES*, Viena, 1980. *Abstracts*. Viena, 1980. p. 24 (IAEA-SR-48).

- SCHIMIDT, K.D. & SHERMAN, I. Effect of irrigation on groundwater quality in California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, 113: 16-29, 1987.
- SILVA, J.C.A. Movimento e perdas por lixiviação de nitrogênio - $\text{CO}(\text{}^{15}\text{NH}_2)_2$ - em um Alfisol cultivado com milho (*Zea mays L.*). Piracicaba, 1982. 59p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- SINGH, B.R. & KANEHIRO, Y. Adsorption of nitrate in amorphous and kaolinitic Hawaiian Soil. *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, 33: 681-3, 1969.
- SMITH, S.J.; SCHEPERS, J.S.; PORTER, L.K. Assessing and managing agricultural nitrogen losses to the environment. In: *Advances in Soil Science*, New York, Springer-Verlag, 1990. (Advances in Soil Science 14).
- SONNEN, M.B.; THOMAS, J.L.; GUITJENS, J.C. Irrigation effects in six western states. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, American Society of Civil Engineers. 113(1): 57-68, 1987.
- TANJI, K.K.; FRIED, M.; POL, R.M. van de. A steady-state conceptual nitrogen model for estimating nitrogen emissions from cropped lands. *Journal of Environmental Quality*, Maryland, 6: 155-9, 1977.

- TERRY, D.L. & McCANTS, C.B. Quantitative prediction of leaching in field soils. *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, 34: 271-6, 1970.
- URQUIAGA, S.S. Dinâmica do nitrogênio no sistema solo-planta na cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar carioca. Piracicaba, 1982. 154 p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- VELASCO, J.C., 1976. Contaminação agrícola. In: *SIMPOSIO NACIONAL DE HIDROGEOLOGIA*, 1., Valencia, 1976. *Comunicaciones*. Valencia, Asociacion de Geólogos Españoles, 1976. v.2, p. 965-83.
- VRBA, J. & ROMIJN, E. (ed.). *Impact of agricultural activities on groundwater*. Hannover, Verlag Heinz Heise, 1986. 332p. (International contributions to hydrogeology, 5).
- YOUNG, C.P. Distribution and movement of solutes derived from agricultural land in the principal aquifers of the United Kingdom, with particular reference to nitrate. *Water Science Tecnology*, Toronto, 13(4/5), 1981.

YOUNGDAHL, L.J.; AUSTIN, E.R.; VLEK, P.L.G.; CRASWELL, E.T.

The evaluation of the loss potential of modified urea fertilizers for rice using ^{15}N . In: *SEMINAR ON ISOTOPE TECHNIQUES IN STUDIES OF THE USEFUL CONSERVATION AND POLLUTANT POTENTIAL OF AGRICULTURAL NITROGEN RESIDUES*, Vienna, 1980. Abstracts. Vienna, 1980. p. 23 (IAEA-SR-48).

WAGNER, G.H., 1962. Use of porous ceramic cups to sample soil water within the profile. *Soil Science*, Baltimore, **94**: 379-86, 1962.

WAGNER, G.H. Changes in nitrate-N in field plot profiles as measured by the porous cup technique. *Soil Science*, Baltimore, **100**(6): 397-402, 1965.

WARRICK, A.W.; MULLEN, G.; NIELSEN, D.R. Prediction of the soil water flux based upon field-measured soil water properties. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, **41**: 14-9, 1977.

WILD, A. Nitrate leaching under bare fallow at a site in Northern Nigeria. *Journal of Soil Science*, Oxford, **23**: 315-24, 1972.

WONG, M.T.F.; HUGHES, R.; ROWELL, D.L. Retarded leaching of nitrate in acid soils from the tropics: measurement of the effective anion exchange capacity. *Journal of Soil Science, Oxford*, **41**: 655-63, 1990.

WONG, M.T.F.; WILD, A.; JUO, A.S.R. Retarded leaching of nitrate measurement in monolith lysimeters in south-east Nigeria. *Journal of Soil Science, Oxford*, **38**: 511-8, 1987.

ANEXO 1

Data	Eca ¹	Ed ²	ETm ³	P	I	θ	I _{max} ⁴
03-06-92	-	-	-	-	17.0	33.0	0.00
09-06-92	-	-	-	-	10.0	33.0	0.00
16-06-92	-	-	-	-	9.8	33.0	0.00
17-06-92	2.9	1	0.6	-	-	32.8	0.61
18-06-92	2.8	1	0.6	-	-	32.6	1.20
19-06-92	3.0	1	0.6	-	-	32.4	1.83
20-06-92	3.4	1	0.7	-	-	32.2	2.54
21-06-92	3.2	1	0.7	-	-	31.9	3.21
22-06-92	3.4	1	0.7	-	-	31.7	3.93
23-06-92	3.5	1	0.7	-	-	31.4	4.66
24-06-92	3.3	1	0.7	-	-	31.2	5.35
25-06-92	3.4	1	0.7	-	7.1	33.0	0.00
26-06-92	3.3	3	1.3	-	-	32.6	1.29
27-06-92	3.6	3	1.4	-	-	32.1	2.69
28-06-92	1.1	3	0.4	0.6	-	32.2	2.52
29-06-92	2.0	3	0.8	-	-	31.9	3.30
30-06-92	2.6	3	1.0	-	-	31.6	4.31
01-07-92	4.3	3	1.7	-	-	31.0	5.99
02-07-92	3.7	3	1.4	-	6.0	32.5	1.43
03-07-92	4.2	3	1.6	-	-	32.0	3.07
04-07-92	2.8	3	1.1	-	-	31.6	4.16
05-07-92	4.7	3	1.8	-	-	31.0	6.00
06-07-92	4.0	3	1.6	5.7	-	32.4	1.86
07-07-92	3.4	3	1.3	11.0	-	33.0	0.00
08-07-92	2.2	3	0.9	19.9	-	33.0	0.00
09-07-92	2.1	4	1.0	-	-	32.7	1.01
10-07-92	2.8	4	1.3	-	-	32.2	2.35
11-07-92	3.0	4	1.4	-	-	31.7	3.79
12-07-92	3.1	4	1.5	-	-	31.2	5.28
13-07-92	3.7	4	1.8	-	-	30.6	7.06
14-07-92	5.1	4	2.4	-	-	29.8	9.50
15-07-92	4.5	4	2.2	-	-	29.1	11.66
16-07-92	2.5	4	1.2	-	13.6	33.0	0.00
17-07-92	1.4	4	0.7	-	-	32.8	0.67
18-07-92	5.2	4	2.5	-	-	31.9	3.17
19-07-92	3.8	4	1.8	-	-	31.3	4.99
20-07-92	2.4	4	1.2	-	-	31.0	6.14
21-07-92	3.1	4	1.5	-	-	30.5	7.63

¹ Eca - evaporação Tanque Classe "A"

² Ed - estágio de desenvolvimento da cultura

³ ETm - evapotranspiração potencial

⁴ I_{max} - irrigação máxima

Data	Eca	Ed	ETm	P	I	θ	$I_{\max}$
22-07-92	3.6	4	1.7	-	-	29.9	9.36
23-07-92	3.1	4	1.5	-	-	29.4	10.85
24-07-92	3.8	5	2.2	-	10.6	32.2	2.41
25-07-92	4.3	5	2.5	-	-	31.4	4.87
26-07-92	3.9	5	2.2	-	-	30.6	7.09
27-07-92	3.4	5	1.9	-	-	30.0	9.03
28-07-92	1.4	5	0.8	-	10.9	33.0	0.00
29-07-92	3.9	6	2.6	-	-	32.1	2.57
30-07-92	4.2	6	2.8	-	-	31.2	5.35
31-07-92	4.8	6	3.2	-	-	30.2	8.51
01-08-92	6.2	6	4.1	-	-	28.8	12.61
02-08-92	4.1	6	2.7	-	-	27.9	15.31
03-08-92	2.3	6	1.5	-	23.6	33.0	0.00
04-08-92	4.4	6	2.9	-	-	32.0	2.90
05-08-92	4.7	6	3.1	-	-	31.0	6.01
06-08-92	4.4	6	2.9	-	-	30.0	8.91
07-08-92	4.6	6	3.0	-	-	29.0	11.95
08-08-92	3.7	6	2.4	-	14.9	33.0	0.00
09-08-92	4.0	8	1.9	-	-	32.4	1.92
10-08-92	3.0	8	1.4	-	-	31.9	3.36
11-08-92	4.3	8	2.1	-	-	31.2	5.42
12-08-92	3.5	8	1.7	-	-	30.6	7.10
13-08-92	3.5	8	1.7	-	-	30.1	8.78
14-08-92	4.1	8	2.0	-	-	29.4	10.75
15-08-92	4.7	8	2.3	-	16.2	33.0	0.00
16-08-92	4.4	8	2.1	-	-	32.3	2.11
17-08-92	4.5	8	2.2	-	-	31.6	4.27
18-08-92	2.4	8	1.2	0.3	-	31.3	5.12
19-08-92	4.0	8	1.9	0.3	-	30.8	6.74
20-08-92	5.1	8	2.4	-	-	29.9	9.19
21-08-92	1.3	8	0.6	3.2	-	30.8	6.62
22-08-92	0.7	8	0.3	2.8	7.8	33.0	0.00
23-08-92	3.7	8	1.8	2.6	-	33.0	0.00
24-08-92	5.4	8	2.6	-	-	32.1	2.59
25-08-92	5.6	8	2.7	-	-	31.2	5.28
26-08-92	2.9	8	1.4	-	-	30.8	6.67
27-08-92	4.1	8	2.0	-	-	30.1	8.64
28-08-92	6.1	8	2.9	-	10.6	32.7	0.97
29-08-92	4.6	8	2.2	-	-	31.9	3.18
30-08-92	4.7	8	2.3	-	-	31.2	5.43
31-08-92	1.6	8	0.8	1.7	-	31.5	4.50
01-09-92	1.5	8	0.7	1.2	-	31.7	4.02
02-09-92	0.1	8	0.0	1.0	-	32.0	3.07
03-09-92	2.6	8	1.2	-	-	31.6	4.32
04-09-92	2.9	9	1.0	2.5	-	32.0	2.86
05-09-92	1.0	9	0.4	1.6	-	32.5	1.62

Data	Eca	Ed	ETm	P	I	θ	I _{max}
06-09-92	0.2	9	0.1	2.2	-	33.0	0.00
07-09-92	4.6	9	1.7	-	-	32.4	1.66
08-09-92	5.8	9	2.1	-	-	31.8	3.74
09-09-92	7.2	9	2.6	-	-	30.9	6.34
10-09-92	6.8	9	2.4	-	-	30.1	8.78
11-09-92	0.1	9	0.0	4.8	-	31.7	4.02
12-09-92	0.1	9	0.0	5.2	-	33.0	0.00
13-09-92	4.8	9	1.7	-	-	32.4	1.73
14-09-92	-	-	-	15.3	-	-	-
15-09-92	-	-	-	25,6	-	-	-
16-09-92	-	-	-	-	-	-	-
17-09-92	-	-	-	9,6	-	-	-
18-09-92	-	-	-	-	-	-	-

ANEXO 2

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
04.06.92	10	61	-36.72	-46.72	.391
	20	63	-29.90	-49.90	.398
	30	65	-21.91	-51.91	.489
	40	78	-29.14	-69.14	.488
	60	124	-65.97	-125.97	.424
	75	156	-92.03	-167.03	.382
05.06.92	10	71	-49.91	-59.91	.380
	20	71	-38.99	-58.99	.389
	30	71	-29.90	-59.90	.482
	40	83	-34.90	-74.90	.483
	60	112	-50.89	-110.89	.434
	75	151	-84.71	-159.71	.386
06.06.92	10	85	-67.00	-77.00	.368
	20	76	-45.43	-65.43	.383
	30	76	-35.64	-65.64	.478
	40	86	-38.98	-78.98	.480
	60	118	-58.75	-118.75	.429
	75	152	-86.47	-161.47	.385
07.06.92	10	100	-85.48	-95.48	.359
	20	83	-54.94	-74.94	.376
	30	80	-41.42	-71.42	.473
	40	90	-43.28	-83.28	.477
	60	124	-65.97	-125.97	.424
	75	152	-86.47	-161.47	.385
08.06.92	10	105	-91.89	-101.89	.357
	20	89	-62.65	-82.65	.371
	30	85	-46.87	-76.87	.469
	40	94	-47.83	-87.83	.473
	60	127	-69.93	-129.93	.422
	75	153	-88.28	-163.28	.384
09.06.92	10	120	-110.75	-120.75	.350
	20	95	-69.31	-89.31	.367
	30	89	-51.53	-81.53	.465
	40	97	-52.65	-92.65	.469
	60	130	-74.16	-134.16	.420
	75	153	-88.28	-163.28	.384

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
10.06.92	10	47	-19.09	-29.09	.410
	20	52	-15.34	-35.34	.415
	30	58	-12.67	-42.67	.495
	40	72	-21.12	-61.12	.494
	60	99	-35.14	-95.14	.447
	75	132	-61.68	-136.68	.403
11.06.92	10	61	-36.72	-46.72	.391
	20	65	-31.69	-51.69	.396
	30	68	-25.92	-55.92	.486
	40	78	-28.22	-68.22	.488
	60	104	-40.51	-100.51	.442
	75	130	-59.35	-134.35	.405
12.06.92	10	65	-41.42	-51.42	.386
	20	72	-40.18	-60.18	.388
	30	72	-30.78	-60.78	.482
	40	84	-33.92	-73.92	.484
	60	107	-45.40	-105.40	.438
	75	133	-62.88	-137.88	.402
13.06.92	10	75	-54.94	-64.94	.376
	20	78	-48.36	-68.36	.381
	30	76	-35.64	-65.64	.480
	40	86	-38.98	-78.98	.480
	60	112	-50.89	-110.89	.434
	75	136	-66.66	-141.66	.399
14.06.92	10	91	-74.24	-84.24	.365
	20	82	-53.42	-73.42	.377
	30	80	-41.42	-71.42	.473
	40	90	-43.28	-83.28	.477
	60	117	-57.08	-117.08	.430
	75	141	-72.11	-147.11	.395
15.06.92	10	110	-98.91	-108.91	.354
	20	95	-69.31	-89.31	.367
	30	85	-46.87	-76.87	.469
	40	94	-49.01	-89.01	.472
	60	121	-62.25	-122.25	.427
	75	144	-76.55	-151.55	.391

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
16.06.92	10	143	-140.30	-150.30	.342
	20	103	-79.61	-99.61	.362
	30	90	-53.20	-83.20	.464
	40	98	-53.91	-93.90	.468
	60	124	-65.97	-125.97	.424
	75	145	-78.10	-153.10	.390
17.06.92	10	66	-42.71	-52.71	.385
	20	78	-48.36	-68.36	.381
	30	86	-48.36	-78.36	.468
	40	96	-51.42	-91.42	.470
	60	129	-72.01	-132.01	.421
	75	149	-82.99	-157.99	.387
18.06.92	10	83	-64.77	-74.77	.370
	20	86	-58.64	-78.64	.374
	30	89	-51.53	-81.53	.465
	40	99	-55.19	-95.19	.468
	60	132	-76.38	-136.38	.419
	75	153	-88.28	-163.28	.384
19.06.92	10	100	-85.48	-95.48	.359
	20	95	-69.31	-89.31	.367
	30	93	-56.76	-86.76	.461
	40	102	-59.14	-99.14	.465
	60	134	-78.68	-138.68	.417
	75	156	-92.03	-167.03	.382
20.06.92	10	153	-152.32	-162.32	.340
	20	108	-85.48	-105.48	.359
	30	96	-60.61	-90.61	.459
	40	106	-63.28	-103.28	.462
	60	136	-81.05	-141.05	.416
	75	159	-96.00	-171.00	.380
21.06.92	10	195	-206.17	-216.17	.330
	20	121	-102.67	-122.67	.353
	30	101	-67.10	-97.10	.454
	40	109	-67.65	-107.65	.459
	60	140	-86.03	-146.03	.414
	75	163	-100.18	-175.18	.378

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
22.06.92	10	259	-286.65	-296.65	.322
	20	138	-124.43	-144.43	.346
	30	105	-71.72	-101.72	.451
	40	112	-70.69	-110.69	.457
	60	142	-88.65	-148.65	.413
	75	168	-102.36	-177.36	.377
23.06.92	10	377	-435.05	-445.05	.312
	20	166	-158.82	-178.82	.338
	30	111	-79.61	-109.61	.446
	40	115	-75.46	-115.46	.454
	60	144	-91.35	-151.35	.411
	75	166	-104.61	-179.61	.376
24.06.92	10	492	-579.97	-589.97	.307
	20	219	-225.85	-245.85	.328
	30	118	-88.61	-118.61	.440
	40	118	-78.79	-118.79	.452
	60	146	-94.16	-154.16	.410
	75	168	-106.92	-181.92	.374
25.06.92	10	521	-616.06	-626.06	.306
	20	304	-333.34	-353.34	.318
	30	126	-98.91	-128.91	.435
	40	122	-84.02	-124.02	.449
	60	146	-94.16	-154.16	.410
	75	172	-111.74	-186.74	.372
26.06.92	10	296	-333.34	-343.34	.318
	20	349	-390.17	-410.17	.315
	30	136	-110.75	-140.75	.429
	40	128	-91.48	-131.48	.444
	60	151	-100.06	-160.06	.408
	75	174	-114.26	-189.26	.371
27.06.92	10	220	-236.59	-246.59	.327
	20	318	-351.03	-371.03	.317
	30	143	-119.65	-149.65	.425
	40	131	-95.44	-135.44	.442
	60	148	-97.06	-157.06	.409
	75	176	-116.85	-191.85	.370

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
28.06.92	10	359	-411.83	-421.83	.313
	20	404	-459.97	-479.97	.311
	30	159	-140.30	-170.30	.416
	40	138	-103.85	-143.85	.438
	60	156	-106.38	-166.38	.405
	75	180	-122.28	-197.28	.368
29.06.92	10	441	-515.53	-525.53	.309
	20	449	-515.53	-535.53	.309
	30	169	-152.32	-182.32	.412
	40	142	-108.33	-148.33	.436
	60	159	-109.71	-169.71	.404
	75	183	-125.12	-200.12	.367
30.06.92	10	492	-579.97	-589.97	.307
	20	500	-579.97	-599.97	.307
	30	179	-165.67	-195.67	.407
	40	147	-115.41	-155.41	.432
	60	161	-113.16	-173.16	.403
	75	185	-128.05	-203.05	.366
01.07.92	10	552	-655.08	-665.08	.305
	20	560	-655.08	-675.08	.305
	30	197	-188.61	-218.61	.401
	40	153	-122.96	-162.96	.429
	60	164	-116.74	-176.74	.402
	75	187	-131.08	-206.08	.365
02.07.92	10	492	-579.97	-589.97	.307
	20	594	-697.97	-717.97	.304
	30	219	-215.72	-245.72	.394
	40	164	-136.72	-176.72	.424
	60	167	-120.45	-180.45	.401
	75	187	-131.08	-206.08	.365
03.07.92	10	521	-616.06	-626.06	.306
	20	593	-697.31	-717.31	.304
	30	246	-247.99	-277.99	.387
	40	174	-148.92	-188.92	.419
	60	170	-124.29	-184.29	.400
	75	192	-137.42	-212.42	.363

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
04.07.92	10	492	-579.97	-589.97	.307
	20	593	-697.31	-717.31	.304
	30	275	-286.65	-316.65	.381
	40	187	-165.91	-205.91	.414
	60	173	-128.27	-188.27	.398
	75	195	-140.76	-215.76	.362
05.07.92	10	521	-616.06	-626.06	.306
	20	629	-743.09	-763.09	.302
	30	299	-316.37	-346.37	.376
	40	202	-185.12	-225.12	.408
	60	180	-136.69	-196.69	.396
	75	198	-144.20	-219.20	.361
06.07.92	10	521	-616.06	-626.06	.306
	20	529	-616.06	-636.06	.306
	30	326	-351.03	-381.03	.372
	40	213	-197.89	-237.89	.405
	60	183	-141.14	-201.14	.395
	75	201	-147.76	-222.76	.360
07.07.92	10	521	-616.06	-626.06	.306
	20	529	-616.06	-636.06	.306
	30	413	-459.97	-489.97	.362
	40	227	-216.55	-256.55	.400
	60	187	-145.76	-205.76	.394
	75	204	-151.44	-226.44	.359
08.07.92	10	68	-45.43	-55.43	.383
	20	473	-546.53	-566.53	.308
	30	434	-486.73	-516.73	.360
	40	244	-237.35	-277.35	.396
	60	191	-150.55	-210.55	.392
	75	207	-155.24	-230.24	.358
09.07.92	10	54	-28.23	-38.23	.399
	20	52	-15.34	-35.34	.415
	30	59	-14.52	-44.52	.494
	40	89	-42.19	-82.19	.477
	60	183	-141.14	-201.14	.395
	75	207	-155.24	-230.24	.358

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
10.07.92	10	67	-44.05	-54.05	.384
	20	69	-36.72	-56.72	.391
	30	71	-29.90	-59.90	.482
	40	86	-37.94	-77.94	.481
	60	164	-116.74	-176.74	.402
	75	198	-144.20	-219.20	.361
11.07.92	10	78	-58.64	-68.64	.374
	20	81	-51.53	-71.53	.378
	30	77	-36.72	-66.72	.477
	40	91	-44.40	-84.40	.476
	60	153	-103.16	-163.16	.407
	75	192	-137.42	-212.42	.363
12.07.92	10	100	-85.48	-95.48	.359
	20	97	-71.72	-91.72	.366
	30	86	-48.36	-78.36	.468
	40	97	-52.66	-92.66	.469
	60	153	-103.16	-163.16	.407
	75	190	-134.20	-209.20	.364
13.07.92	10	131	-124.43	-134.43	.346
	20	99	-74.24	-94.24	.365
	30	96	-60.61	-90.61	.459
	40	105	-61.88	-101.88	.463
	60	153	-103.16	-163.16	.407
	75	187	-131.08	-206.08	.365
14.07.92	10	195	-206.16	-216.16	.330
	20	147	-134.74	-154.74	.344
	30	105	-71.72	-101.72	.451
	40	113	-72.25	-112.25	.456
	60	153	-103.16	-163.16	.407
	75	187	-131.08	-206.08	.365
15.07.92	10	325	-369.94	-379.94	.316
	20	246	-260.10	-280.10	.324
	30	123	-95.32	-125.32	.437
	40	128	-91.48	-131.48	.444
	60	159	-109.71	-169.71	.404
	75	190	-134.20	-209.20	.364

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
16.07.92	10	492	-579.97	-589.97	.307
	20	385	-435.05	-455.05	.312
	30	147	-119.65	-149.65	.425
	40	140	-106.07	-146.07	.437
	60	161	-113.16	-173.16	.403
	75	195	-140.76	-215.76	.362
17.07.92	10	66	-42.71	-52.71	.385
	20	93	-67.00	-87.00	.368
	30	126	-98.91	-128.91	.435
	40	118	-78.79	-118.79	.452
	60	167	-120.45	-180.45	.401
	75	198	-144.20	-219.20	.361
18.07.92	10	81	-62.65	-72.65	.371
	20	101	-76.87	-96.87	.363
	30	126	-98.91	-128.91	.435
	40	118	-78.79	-118.79	.452
	60	170	-124.29	-184.29	.400
	75	198	-144.20	-219.20	.361
19.07.92	10	123	-115.09	-125.09	.349
	20	156	-146.06	-166.06	.341
	30	150	-129.46	-159.46	.420
	40	133	-97.48	-137.48	.441
	60	177	-132.40	-192.40	.397
	75	204	-151.44	-226.44	.359
20.07.92	10	203	-215.72	-225.72	.329
	20	227	-236.59	-256.59	.327
	30	179	-165.67	-195.67	.407
	40	145	-113.00	-153.00	.434
	60	180	-136.69	-196.69	.396
	75	207	-155.24	-230.24	.358
21.07.92	10	283	-316.77	-326.77	.319
	20	349	-390.17	-410.17	.315
	30	204	-197.14	-227.14	.398
	40	160	-131.03	-171.03	.426
	60	183	-141.14	-201.14	.395
	75	207	-155.24	-230.24	.358

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
22.07.92	10	466	-546.54	-556.54	.308
	20	385	-435.05	-455.05	.312
	30	254	-260.10	-290.10	.385
	40	178	-155.47	-195.47	.417
	60	191	-150.55	-210.55	.392
	75	213	-163.26	-238.26	.356
23.07.92	10	492	-579.97	-589.97	.307
	20	405	-459.97	-479.97	.311
	30	312	-333.34	-363.34	.374
	40	206	-189.27	-229.27	.407
	60	203	-166.07	-226.07	.389
	75	220	-171.87	-246.87	.354
24.07.92	10	552	-655.08	-665.08	.305
	20	473	-546.54	-566.54	.308
	30	393	-435.05	-465.05	.364
	40	235	-226.66	-266.66	.398
	60	208	-171.66	-231.66	.388
	75	223	-176.42	-251.42	.353
25.07.92	10	83	-64.78	-74.78	.370
	20	151	-140.30	-160.30	.342
	30	204	-197.14	-227.14	.398
	40	227	-216.54	-256.54	.400
	60	199	-160.70	-220.70	.390
	75	227	-181.13	-256.13	.352
26.07.92	10	131	-124.43	-134.43	.346
	20	211	-215.72	-235.72	.329
	30	244	-247.99	-277.99	.387
	40	253	-248.65	-288.65	.393
	60	208	-171.66	-231.66	.388
	75	235	-191.10	-266.10	.350
27.07.92	10	175	-180.54	-190.54	.334
	20	246	-260.10	-280.10	.324
	30	275	-286.65	-316.65	.381
	40	278	-279.91	-319.91	.388
	60	217	-183.50	-243.50	.385
	75	239	-196.38	-271.38	.349

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
28.07.92	10	248	-272.96	-282.96	.323
	20	318	-351.03	-371.03	.317
	30	326	-351.03	-381.03	.372
	40	306	-316.18	-356.18	.382
	60	227	-196.30	-256.30	.383
	75	244	-201.87	-276.87	.347
29.07.92	10	69	-46.87	-56.87	.382
	20	85	-56.76	-76.76	.375
	30	211	-206.17	-236.17	.396
	40	216	-202.37	-242.37	.403
	60	233	-203.11	-263.11	.382
	75	248	-207.57	-282.57	.346
30.07.92	10	100	-85.48	-95.48	.359
	20	115	-95.32	-115.32	.355
	30	254	-260.10	-290.10	.385
	40	213	-197.89	-237.89	.405
	60	238	-210.19	-270.19	.381
	75	252	-213.00	-288.00	.346
31.07.92	10	143	-140.30	-150.30	.342
	20	189	-188.61	-208.61	.333
	30	264	-272.96	-302.96	.383
	40	272	-273.29	-313.29	.389
	60	244	-217.56	-277.56	.380
	75	258	-219.69	-294.69	.344
01.08.92	10	238	-260.10	-270.10	.324
	20	291	-316.78	-336.78	.319
	30	312	-333.35	-363.35	.374
	40	319	-332.32	-372.32	.380
	60	257	-233.23	-293.23	.377
	75	268	-232.83	-307.83	.342
02.08.92	10	397	-459.98	-469.98	.311
	20	405	-459.98	-479.98	.311
	30	413	-459.98	-489.98	.362
	40	363	-387.39	-427.39	.374
	60	285	-268.80	-328.80	.373
	75	292	-262.72	-337.72	.338

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
03.08.92	10	492	-579.99	-589.99	.307
	20	405	-459.98	-479.98	.311
	30	434	-486.75	-516.75	.360
	40	397	-430.68	-470.68	.370
	60	293	-278.67	-338.67	.372
	75	305	-279.76	-354.76	.337
04.08.92	10	44	-14.92	-24.92	.416
	20	52	-14.92	-34.92	.416
	30	62	-18.57	-48.57	.491
	40	127	-89.56	-129.56	.445
	60	285	-268.80	-328.80	.373
	75	286	-254.75	-329.75	.339
05.08.92	10	53	-26.67	-36.67	.401
	20	63	-29.05	-49.05	.399
	30	89	-51.53	-81.53	.465
	40	169	-142.68	-182.68	.421
	60	227	-196.31	-256.31	.383
	75	258	-219.68	-294.68	.344
06.08.92	10	113	-102.67	-112.67	.353
	20	115	-95.32	-115.32	.355
	30	132	-106.62	-136.62	.431
	40	182	-158.87	-198.87	.416
	60	263	-241.58	-301.58	.376
	75	274	-239.83	-314.83	.341
07.08.92	10	158	-158.82	-168.82	.338
	20	151	-140.31	-160.31	.342
	30	169	-152.33	-182.33	.412
	40	244	-237.35	-277.35	.396
	60	277	-259.34	-319.34	.374
	75	274	-239.83	-314.83	.341
08.08.92	10	211	-225.86	-235.86	.328
	20	203	-206.17	-226.17	.330
	30	219	-215.73	-245.73	.394
	40	272	-273.29	-313.29	.389
	60	293	-278.67	-338.67	.372
	75	292	-262.72	-337.72	.339

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
09.08.92	10	63	-38.99	-48.99	.389
	20	61	-27.44	-47.44	.400
	30	94	-58.64	-88.64	.460
	40	319	-332.31	-372.31	.380
	60	293	-278.67	-338.67	.372
	75	286	-254.75	-329.75	.339
10.08.92	10	85	-67.00	-77.00	.368
	20	79	-48.92	-68.92	.380
	30	103	-69.31	-99.31	.453
	40	240	-231.93	-271.93	.397
	60	301	-288.98	-348.98	.371
	75	279	-247.13	-322.13	.340
11.08.92	10	110	-98.91	-108.91	.354
	20	99	-74.24	-94.24	.365
	30	123	-95.32	-125.32	.437
	40	248	-242.92	-282.92	.394
	60	309	-299.75	-359.75	.370
	75	279	-247.13	-322.13	.340
12.08.92	10	139	-134.75	-144.75	.344
	20	128	-110.75	-130.75	.350
	30	150	-129.46	-159.46	.420
	40	271	-271.69	-311.69	.389
	60	318	-310.99	-370.99	.368
	75	292	-262.72	-337.72	.338
13.08.92	10	181	-188.61	-198.61	.333
	20	161	-152.33	-172.33	.340
	30	185	-172.91	-202.91	.405
	40	289	-293.76	-333.76	.386
	60	328	-322.75	-382.75	.367
	75	298	-271.05	-346.05	.338
14.08.92	10	181	-188.61	-198.61	.333
	20	203	-206.17	-226.17	.330
	30	227	-225.86	-255.86	.392
	40	209	-193.52	-233.52	.406
	60	337	-335.03	-395.03	.366
	75	320	-298.44	-373.44	.335

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
15.08.92	10	310	-351.04	-361.04	.317
	20	318	-351.04	-371.04	.317
	30	312	-333.35	-363.35	.374
	40	313	-324.12	-364.12	.381
	60	270	-250.27	-310.27	.375
	75	252	-213.51	-288.51	.345
16.08.92	10	55	-29.90	-39.90	.398
	20	69	-36.72	-56.72	.391
	30	103	-69.31	-99.31	.453
	40	151	-120.38	-160.38	.430
	60	348	-347.88	-407.88	.365
	75	298	-271.05	-346.05	.338
17.08.92	10	71	-49.92	-59.92	.380
	20	91	-64.78	-84.78	.370
	30	115	-85.48	-115.48	.442
	40	128	-91.48	-131.48	.444
	60	358	-361.32	-421.32	.364
	75	298	-271.05	-346.05	.338
18.08.92	10	97	-82.48	-92.48	.361
	20	124	-106.62	-126.62	.351
	30	235	-236.60	-266.60	.389
	40	244	-237.35	-277.35	.396
	60	369	-375.39	-435.39	.363
	75	345	-330.03	-405.03	.332
19.08.92	10	102	-88.61	-98.61	.358
	20	135	-119.65	-139.65	.347
	30	227	-225.86	-255.86	.392
	40	253	-248.65	-288.65	.393
	60	381	-390.11	-450.11	.362
	75	345	-330.03	-405.03	.332
20.08.92	10	127	-119.65	-129.65	.347
	20	166	-158.82	-178.82	.338
	30	227	-225.86	-255.86	.392
	40	184	-162.34	-202.34	.415
	60	348	-347.88	-407.88	.365
	75	313	-288.89	-363.89	.336

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
21.08.92	10	188	-197.14	-207.14	.332
	20	211	-215.73	-235.73	.329
	30	287	-301.24	-331.24	.378
	40	267	-266.86	-306.86	.390
	60	406	-421.69	-481.69	.360
	75	328	-308.47	-383.47	.334
22.08.92	10	-	0.00	0.00	.000
	20	-	0.00	0.00	.000
	30	-	0.00	0.00	.000
	40	-	0.00	0.00	.000
	60	369	-375.39	-435.39	.363
	75	328	-308.47	-383.47	.334
23.08.92	10	47	-19.62	-29.62	.410
	20	51	-14.52	-34.52	.416
	30	63	-19.62	-49.62	.490
	40	94	-49.01	-89.01	.472
	60	369	-375.39	-435.39	.363
	75	328	-308.46	-383.46	.334
24.08.92	10	66	-42.71	-52.71	.385
	20	62	-28.23	-48.23	.399
	30	82	-42.71	-72.71	.472
	40	164	-136.72	-176.72	.424
	60	420	-438.63	-498.63	.359
	75	364	-353.85	-428.85	.330
25.08.92	10	91	-74.24	-84.24	.365
	20	79	-49.92	-69.92	.380
	30	101	-67.00	-97.00	.454
	40	131	-95.44	-135.44	.442
	60	369	-375.39	-435.39	.363
	75	279	-247.13	-322.13	.340
26.08.92	10	123	-115.09	-125.09	.349
	20	105	-82.48	-102.48	.361
	30	123	-95.32	-125.32	.437
	40	145	-113.00	-153.00	.434
	60	369	-375.39	-435.39	.363
	75	328	-308.47	-383.47	.334

DATA	PROF cm	ALT Hg mm	ϕ_m cmH ₂ O	ϕ cmH ₂ O	θ cm ³ .cm ⁻³
27.08.92	10	158	-158.82	-168.82	.338
	20	131	-115.09	-135.09	.349
	30	146	-124.43	-154.43	.423
	40	162	-133.84	-173.84	.425
	60	293	-278.67	-338.67	.372
	75	298	-271.05	-346.05	.338
28.08.92	10	203	-215.73	-225.73	.329
	20	161	-152.33	-172.33	.340
	30	179	-165.68	-195.68	.407
	40	187	-165.91	-205.91	.414
	60	293	-278.67	-338.67	.372
	75	320	-298.44	-373.44	.335
.					
.					
.					
.					
17.09.92	10	61	-36.72	-46.72	.391
	20	63	-29.90	-49.90	.398
	30	70	-28.91	-58.91	.483
	40	84	-33.92	-73.92	.484
	60	120	-60.50	-120.50	.428
	75	155	-90.16	-175.16	.383