VARIABILIDADE DO ARMAZENAMENTO DE ÁGUA
EM TERRA ROXA ESTRUTURADA

ARIOVALDO LUIZ TURATTI

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. KLAUS REICHARDT

Tese apresentada à Escola Superior
de Agricultura "Luiz de Queiroz", da
Universidade de São Paulo, para a
obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração :
Solos e Nutrição de Plantas .

P I R A C I C A B A

Estado de São Paulo - Brasil

Março - 1990

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

Turatti, Ariovaldo Luiz

T929v Variabilidade do armazenamento de água em
Terra Roxa Estruturada. Piracicaba, 1990.
88p. ilus.

Tese - ESALQ
Bibliografia.

1. Água do solo - Armazenamento - Variabilidade espacial 2. Água do solo - Armazenamento - Variabilidade temporal 3. Água do solo - Balanço hídrico 4. Latossolo roxo estruturado
Água - Armazenamento I Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 631.432

VARIABILIDADE DO ARMAZENAMENTO DE ÁGUA
EM TERRA ROXA ESTRUTURADA

ARIOVALDO LUIZ TURATTI

Aprovada em: 22.05.90

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Klaus Reichardt	ESALQ/USP
Prof. Dr. Álvaro Pires da Silva	ESALQ/USP
Dr. Osny Oliveira Santos Bacchi	CENA/USP
Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova	ESALQ/USP
Prof. Dr. Eloy Antonio Pauletto	FAEM/UFPel

Prof. Dr. KLAUS REICHARDT
Orientador

Este trabalho é
integralmente dedicado
aos meus pais

Zilda Porto Turatti e

Orlando Turatti

que não mediram esforços
para a formação
de seus filhos.

À minha esposa

Nina Rosa

Aos meus filhos

Michel

Marcus

Márcio

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos às pessoas e instituições
que possibilitaram a realização
deste trabalho

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	xiii
SUMMARY.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	
2.1. Armazenamento e erros envolvidos	
2.1.1. Armazenamento	4
2.1.2. Erros envolvidos na estimativa do armazenamento de água.....	9
2.2. Balanço Hídrico.....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	13
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	
4.1. Armazenamento e erros envolvidos.....	31
4.2. Número de tubos de acesso para a sonda.....	53
4.3. Desvios relativos dos armazenamentos.....	70
4.4. Balanço Hídrico - Aplicações.....	74
5. CONCLUSÕES.....	79
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Página
1 Localização da área experimental, junto ao posto agrometeorológico da ESALQ-USP.....	14
2 Fotografia da sonda de neutrons Solo 25 utilizada na condução do experimento.....	16
3 Detalhes da transeção com os tubos de acesso da sonda de neutrons e dos tensiômetros instalados na área experimental.....	17
4 Valores de armazenamento médio até 150 cm, com os respectivos desvios da média, calculados pelo método numérico de integração Trapezoidal, durante o período de condução do experimento.....	49
5 Valores de armazenamento médio até 150 cm, com os respectivos desvios da média, calculados pelo método numérico de integração de Simpson, durante o período de condução do experimento.....	50

- 6 Valores de precipitação + irrigação ocorridas durante a condução do experimento..... 51
- 7 Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 2/3/89..... 54
- 8 Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 16/3/89..... 55
- 9 Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 30/3/89..... 56
- 10 Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 20/4/89..... 57

- 11 Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada.
Data: 4/5/89..... 58
- 12 Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada.
Data: 24/5/89..... 59
- 13 Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada.
Data: 12/6/89..... 60
- 14 Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada.
Data: 29/6/89..... 61

- 15 Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada.
Data: 18/7/89..... 62
- 16 Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada.
Data: 3/8/89..... 63
- 17 Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada.
Data: 17/8/89..... 64
- 18 Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada.
Data: 6/9/89..... 65

- 19 Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 28/7/89..... 66
- 20 Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 12/10/89..... 67
- 21 Desvios relativos médios dos armazenamentos calculados através da equação (13) com os respectivos desvios para cada tubo de acesso, em todas as datas estudadas..... 73
- 22 Variação máxima do armazenamento até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada no período de 16/3/89 a 28/9/89 (média de 25 tubos)..... 78

LISTA DE TABELAS

TABELA

Página

- 1 Valores do módulo do potencial mátrico (cm de água); umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) e condutividade hidráulica (cm / dia) obtidos por FAULETTO (1986), em função do tempo, usados para obtenção do modelo descrito pela equação (14)..... 23
- 2 Valores de condutividade hidráulica (K_o) para condições de solo saturado, obtidos na parcela experimental..... 25
- 3 Valores utilizados para o cálculo da densidade de fluxo (q) de água (mm/dia) através da eq. (15) na profundidade de 150 cm, durante o o período de condução do experimento..... 29
- 4 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 2/3/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.. 32

- 5 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 16/3/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.. 33
- 6 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 30/3/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.. 34
- 7 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 20/4/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.. 35
- 8 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 4/5/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.. 36
- 9 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 24/5/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.. 37
- 10 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 12/6/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.. 38
- 11 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 29/6/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.. 39
- 12 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 18/7/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.. 40
- 13 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 3/8/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.. 41

- 14 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 17/8/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.. 42
- 15 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 6/9/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.. 43
- 16 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 28/9/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.. 44
- 17 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 12/10/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.. 45
- 18 Valores de armazenamento médio ao longo da transeção até 150 cm de profundidade calculados pelo método Trapezoidal, variâncias devido às medidas de θ [$s_1^2(\hat{S})$], e ao método de integração [$s_2^2(\hat{S})$], variância total [$s^2(\hat{S})$], desvio padrão [$s(\hat{S})$] e coeficiente de variação (C.V.) nas datas de 2/3/89 a 12/10/89..... 46
- 19 Valores de armazenamento médio ao longo da transeção até 150 cm de profundidade calculados pelo método de Simpson, variâncias devido às medidas de θ [$s_1^2(\hat{S})$], e ao método de integração [$s_2^2(\hat{S})$], variância total [$s^2(\hat{S})$], desvio padrão [$s(\hat{S})$] e coeficiente de variação (C.V.) nas datas de 2/3/89 a 12/10/89..... 47

- 20 Número de tubos de acesso da sonda para estimar o armazenamento médio até 150 cm de profundidade calculados através da equação (18).. 69
- 21 Valores de armazenamento médio (6 profundidades), calculados pelo método Trapezoidal simplificado ($\bar{\theta} \times L$), ao longo da transeção no período de condução do experimento..... 71
- 22 Desvios relativos dos armazenamentos com os respectivos desvios para cada tubo de acesso da sonda, em todas as datas estudadas..... 72
- 23 Valores usados para a estimativa da evapotranspiração (ET) através da equação (17) e relação entre ET e ECA (R) em cada período de leitura com a sonda de neutrons..... 75

VARIABILIDADE DO ARMAZENAMENTO DE ÁGUA
EM TERRA ROXA ESTRUTURADA

Autor: ARIODALDO LUIZ TURATTI

Orientador: PROF. DR. KLAUS REICHARDT

RESUMO

Com o objetivo de estudar o armazenamento de água no solo até a profundidade de 150 cm, foi conduzido um experimento em Terra Roxa Estruturada Eutrófica, localizado na área experimental do Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", em Piracicaba, Brasil, no período de 2 de março a 12 de outubro de 1989.

A parcela experimental constou de uma transeção de 25 pontos, espaçados 5 m um do outro, onde foram instalados tubos de acesso da sonda de neutrons. Lateralmente e distantes 25 e 50 cm, respectivamente, de cada tubo de acesso da sonda, foram também instalados tensiômetros a 135 e a 165 cm de profundidade para obtenção do potencial mátrico e do gradiente de potencial a 150 cm de profundidade, para estimativa dos fluxos de água no limite inferior da camada de solo estudada.

Com as leituras de sonda foram calculados os armazenamentos através das técnicas numéricas de integração Trapezoidal e de Simpson e com os dados de potencial matricio a drenagem profunda através da equação de Darcy durante o período de condução do experimento.

As conclusões do presente trabalho indicam que a técnica de integração de Simoson proporciona um menor erro na estimativa do armazenamento de água; a variabilidade do solo ao longo da transeção deve ser considerada quando de estudos de armazenamentos e aplicações em balanços hídricos; o perfil do solo se apresentou sempre com drenagem em 150 cm de profundidade e que esta representou cerca de 6 % das perdas de água do solo durante o período de condução do experimento.

SOIL WATER STORAGE VARIABILITY
OF TERRA ROXA ESTRUTURADA

Author: ARIODALDO LUIZ TURATTI

Adviser: PROF. DR. KLAUS REICHARDT

SUMMARY

With the objective of studying soil water storage down to the depth of 150 cm, an experiment was conducted on a "terra roxa estruturada" field located in Piracicaba, S.P., Brasil, during the period of March-October 1989.

Neutron probe measurements were performed on a 25 point transect, with observation points spaced 5 m. Soil water potential measurements, using mercury manometer tensiometers located at 135 and 165 cm depths, were made in order to calculate hydraulic gradients at 150 cm depth, chosen to be the lower limit for water storage calculations.

Storages were calculated by integrating soil water content profiles from soil surface down to 150 cm, using trapezoidal and Simpson's rules, and soil water fluxes at the depth of 150 cm were calculated using Darcy's equation.

Results show that Simpson's rule of integration yields lower errors in the estimation of soil water storages; soil spatial variability can not be neglected in storage calculations and in the estimation of water balances; the soil profile at the lower limit (150 cm) showed always downward water fluxes which represented only 6 % of the total water losses during the experimental period.

1. INTRODUÇÃO

A otimização do balanço hídrico de uma cultura agrícola é fundamental para a maximização da produtividade, uma vez que a água é um dos fatores principais da produção agrícola. O controle da água torna-se importante e este é apenas possível com um conhecimento das relações hídricas da cultura, o que é, geralmente, inferido a partir de dados de umidade e de potencial da água no solo. Visando aprimorar as técnicas de estabelecimento de balanços hídricos, foi realizado o presente estudo de variabilidade espacial e temporal do armazenamento de água de um perfil de solo, com a finalidade de estudar sua influência no balanço hídrico.

No estudo do balanço hídrico, as maiores dificuldades encontram-se nas medidas de drenagem profunda e de enxurrada ("run-off"), (REICHARDT, 1985 , 1987). Para a determinação da drenagem profunda, o principal problema recai sobre o uso da equação de Darcy, que implica no conhecimento da condutividade hidráulica do solo e do gradiente de potencial total da água no solo, ambos no limite inferior da zona radicular. Mesmo utilizando métodos recomendados internacionalmente (como por exemplo LIBARDI et alii, 1980) para a determinação da condutividade

hidráulica do solo, as estimativas dos fluxos de drenagem profunda tem apresentado uma variabilidade grande, muitas vezes, impossibilitando seu uso nos cálculos do balanço. Por outro lado, BERTONI & LOMBARDI, (1985) mostram as dificuldades da estimativa da enxurrada, que depende, principalmente, do comprimento do declive, da declividade e do tipo de solo.

Assim sendo, parece-nos mais viável fazer medidas mais precisas e diretas do armazenamento de água pelo solo, que já é um resultado de todas as "entradas" e "saídas" de água no elemento de volume de solo considerado. Para as medidas de umidade no solo, as sondas de neutrons são instrumentos recomendados por apresentarem uma série de vantagens em determinadas situações; sendo que a maior vantagem destes instrumentos é a possibilidade de se obter valores de umidade do solo no mesmo ponto em qualquer tempo. A única perturbação feita é a introdução do tubo de acesso e, após isso, medidas de umidade podem ser feitas em profundidades pré-estabelecidas, ao longo do tempo, tendo-se a certeza de que toda vez o instrumento "amostra" praticamente o mesmo volume de solo (GARDNER, 1987 ;TURATTI et alii, 1990).

O presente trabalho tem a finalidade de:

- (i) estudar, com detalhe, os erros envolvidos na determinação do armazenamento de água pelo solo e caracterizar sua variabilidade no espaço e no tempo;
- (ii) estabelecer o número de tubos de acesso para sonda de

neutrons, necessários para estimar o armazenamento medio de
água com um erro pre-estabelecido;

(iii) estimar fluxos de drenagem profunda e/ou ascensão
capilar e sua aplicação em balanço hidrico.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Armazenamento e erros envolvidos

2.1.1. Armazenamento

A quantidade de água armazenada pelo solo é determinada pela sua umidade. Como o solo é um reservatório sem fundo, quanto maior a profundidade considerada, maior a quantidade de água armazenada. Devido à ação da gravidade, parte da água no solo se move no sentido vertical para baixo, saindo da zona radicular e indo contribuir para recarga dos reservatórios subterrâneos. Por isso, ao se definir o armazenamento de água de um solo, é preciso definir a profundidade.

Quando se calcula o armazenamento de água para o estabelecimento de balanço hídrico de alguma cultura, toma-se entre 90-95 % da profundidade do volume explorado pelo sistema radicular da cultura.

Assim, a definição exata de armazenamento de água (S_L) em uma camada de solo razoavelmente homogênea e de espessura z , é:

$$S_L = \int_0^L \theta \, dz \dots\dots\dots (1)$$

onde θ é a umidade do solo e z a coordenada vertical ou

profundidade. Se θ é dado em cm^3/cm^3 , e z em cm , o resultado S_L é dado em cm^3/cm^2 , que é um volume por unidade de área, isto é, uma lâmina expressa em cm de água. Devido, na maioria das situações mais comuns, não dispor de um método analítico para integração de $\theta(z)$, somente uma estimativa do armazenamento verdadeiro pode ser obtida através de técnicas numéricas.

Para resolver a equação (1), é preciso conhecer-se a variação de θ ao longo de z , no intervalo $0-L$; e como via de regra tem-se poucos dados de θ em L , a integral da equação (1) é simplificada, utilizando-se diferenças finitas, e o resultado é:

$$S_L = \bar{\theta} \cdot L \dots\dots\dots (1a)$$

onde $\bar{\theta}$ é o valor médio da umidade do solo no intervalo $0-L$. Desta forma, quanto maior o número de amostragens entre $0-L$, tanto melhor o valor médio e tanto mais o resultado da equação (1a) se aproxima do valor real obtido na equação (1). Na prática, principalmente da irrigação de culturas onde outras variáveis estão envolvidas, só se utiliza a equação (1a), por ser menos trabalhosa.

O armazenamento de água no solo é uma função da profundidade considerada (L), e para uma dada profundidade, ele varia em função do tempo devido aos processos de ganho de água (chuva e/ou irrigação) e de perdas (evapotranspiração e/ou drenagem profunda).

Existe uma certa quantidade de água que o solo

pode armazenar. Assim, o armazenamento máximo ocorre quando a água no solo entra em equilíbrio, isto é, na condição em que o potencial matricial se iguala ao potencial gravitacional e o perfil para de drenar o excesso de água. Um perfil nesta condição é denominado de perfil na capacidade de campo. Sendo a umidade do solo na capacidade de campo igual a θ_{cc} , então de acordo com as equações (1 e 1a), temos:

$$S_L(CC) = \int_0^L \theta \, dz = \bar{\theta}_{cc} \cdot L \dots\dots\dots (1b)$$

Similarmente, e não entrando no mérito dos conceitos aqui apresentados (capacidade de campo e ponto de murcha permanente), o limite inferior de umidade no qual o fluxo de água no solo não atender mais nenhum nível de demanda atmosférica, é denominado ponto de murcha permanente (PMP) e o perfil do solo nesta condição é denominado de perfil em ponto de murcha permanente. Nesta condição o solo apresenta o armazenamento mínimo de água, sob o ponto de vista biológico. Sendo a umidade do solo no ponto de murcha permanente igual a θ_{PMP} , então de acordo com as equações (1 e 1a), temos:

$$S_L(PMP) = \int_0^L \theta \, dz = \bar{\theta}_{PMP} \cdot L \dots\dots\dots (1c)$$

Biologicamente, a água armazenada entre os limites da capacidade de campo e do ponto de murcha

permanente, é denominado de água disponível (AD) e é expressa pela equação:

$$AD = S_L(DD) - S_L(FMP) \dots\dots\dots(2)$$

GARDNER (1987); REICHARDT (1985) apresentam vários métodos para a determinação do teor de água no solo, e GARDNER (1987) afirma em recente simpósio sobre metodologia da medida do estado da água no solo, que as sondas de neutrons são instrumentos recomendados para a medida de umidade do solo por apresentarem uma série de vantagens em certas condições. A maior vantagem destes instrumentos é a possibilidade de se obter valores de umidade do solo no mesmo ponto em qualquer tempo, pois a única perturbação feita no solo é a introdução do tubo de acesso da sonda, e após isso, medidas podem ser feitas em profundidades pré-fixadas, ao longo do tempo, tendo-se a certeza de que, toda vez, o instrumento "amostra" praticamente o mesmo volume de solo, evitando assim, a variabilidade apresentada pelo mesmo.

Apesar do método de moderação de neutrons já estar em uso por mais de três décadas, não foi possível, até hoje, estabelecer critérios satisfatórios para sua calibração, sendo esta uma das grandes desvantagens do método.

São relatados que vários fatores como densidade do solo, mineralogia, pH, porosidade e matéria orgânica

afetam largamente a calibração das sondas de neutrons (HOLMES & JENKINSON, 1959 ; HOLMES, 1966 ; COUCHAT, 1967 ; MCHENRY & GILL, 1967 ; LAL, 1974 ; TURATTI et alii, 1990).

GREACEN (1981) apresenta vários métodos de campo e de laboratório para a calibração das sondas, todos apresentando problemas, e como resultado, não são frequentes os casos em que a regressão entre as contagens da sonda e o teor de água do solo, apresenta um coeficiente de regressão linear r maior que 0,95.

TURATTI et alii, (1990) em estudos realizados na mesma área experimental, verificaram que a variabilidade do solo foi o principal fator que afetou a calibração da sonda, devido, principalmente, à umidade, à porosidade e à densidade global, apresentando ainda, um coeficiente de regressão igual a 0,86.

Doutros autores como HAVERKAMP et alii, (1984); CARNEIRO & DE JONG, (1985); CHAWLA & TRIPATHI, (1987); COSTA & FARIA, (1989) mostram as dificuldades para a calibração da sonda de neutrons, verificando coeficientes de regressão não muito bons, porém, indicando que estes aparelhos são instrumentos que podem ser usados para a determinação do teor de água do solo e conseqüentemente para a obtenção do armazenamento de água.

PEREIRA (1986) calculou o balanço hídrico utilizando a técnica de moderação de neutrons, em um solo Podzolizado de Lins e Marília cultivado com caféiro, até 2,4 m de profundidade e verificou que o armazenamento médio

deste solo na época das chuvas intensas oscilou em torno de 500 mm e que a drenagem profunda praticamente inexistiu quando o café se apresentava em pleno crescimento e a evaporação foi da ordem de 5-6 mm/dia.

Outros autores também realizaram estudos de armazenamento de água usando sondas de neutrons, como COUCHAT, (1983); GREMINGER et alii, (1985); MOUTONNET et alii, (1988); CISSE & VACHAUD, (1987,1988); REICHARDT et alii, 1976 ; KACHANDSKI & JONG, 1988 ; VACHAUD et alii, 1985 ; HAVERKAMP et alii, 1984 , verificando que as principais vantagens são a possibilidade de se fazer medições em grande número tanto no espaço como no tempo.

2.1.2. Erros envolvidos na estimativa do armazenamento de água.

Nesta última década, apesar da técnica de moderação de neutrons estar sendo e extensivamente usada em estudos de campo para medidas da quantidade de água do solo, do armazenamento de água e suas mudanças com o tempo, os trabalhos de literatura mostram que pouca atenção tem sido dado à estimativa dos erros associados.

HEWLETT et alii, (1964) investigaram todas as fontes de erro resultantes do uso de uma sonda de neutrons e foram identificadas variâncias devido ao instrumento, ao tempo de contagem e ao local como diferentes componentes da

variância total de uma estimativa de umidade. Entretanto, sua análise matemática não levou em consideração os erros decorrentes das incertezas na definição da sua curva de calibração.

Uma análise ampla da contribuição das variâncias instrumental, calibração e localização na variância total dos valores de umidade média e sua mudança no tempo é relatada por SINCLAIR & WILLIAMS, (1979); SCHUDEL, (1983).

Quando a estimativa do armazenamento de água for realizada segundo metodologia proposta por HAVERKAMP et alii, (1984), duas componentes representam a sua variância total : i) variância devida às medidas de umidade do solo [$s_1^2(\hat{\theta})$] e ii) variância devida à técnica numérica usada para integrar a função $\theta(z)$ [$s_2^2(\hat{\theta})$].

Várias técnicas de integração e suas variâncias são descritas por CARNAHAN et alii (1969) e as utilizadas neste trabalho estão apresentadas, em detalhes, no Capítulo 3 (Material e Métodos).

2.2. Balanço Hídrico

O balanço hídrico pode ser definido como a contabilidade das quantidades de água que entram e que saem de uma camada de solo que vai da superfície até uma profundidade L.

Através do plano da superfície do solo, temos as

adições da chuva (P) e/ou irrigação (I), e as perdas por evapotranspiração (ET) e/ou enxurrada (RO). No plano à profundidade L , que deve estar abaixo da zona radicular, podemos ter perdas por drenagem profunda (DP) e ganhos por ascensão capilar (AC) da água (REICHARDT, 1987). A contabilidade de todos estes "componentes" do balanço reflete a quantidade de água que fica contida na camada de solo, medida através do armazenamento de água (S_L).

O balanço hídrico é, portanto, importante para um acompanhamento da quantidade de água armazenada no solo. Esta quantidade deve ser mantida em níveis ótimos para maximizar a produtividade agrícola. Assim, através do balanço hídrico, pode-se estabelecer critérios para a irrigação ou drenagem de um solo (REICHARDT, 1985, 1987 ; MOTA, 1976).

A determinação da disponibilidade hídrica no solo para a agricultura depende basicamente da variação do armazenamento, ou seja, da água no solo. Este é o componente que apresenta maior dificuldade nas medições diretas, especialmente em grandes áreas territoriais. Outros fatores como heterogeneidade da vegetação, dos solos, da topografia e das condições geológicas, contribuem para esta dificuldade.

Assim, foram apresentadas algumas proposições técnicas para avaliação dos recursos hídricos para uso agrícola. O processo de contabilidade hídrica mais

utilizado para fins climáticos é o método de THORNTHWAITE & MATHER, (1955), que consiste no cotejo entre a precipitação pluviométrica e a evapotranspiração, considerando-se uma determinada capacidade de retenção de água pelo solo, bem como em função do tipo de cobertura vegetal (ORTOLONI & CAMARGO, 1987).

Além da evapotranspiração potencial, o balanço hídrico de THORNTHWAITE & MATHER (1955) possibilita estimar a evapotranspiração real, o excedente hídrico, que é a água que excede à capacidade máxima de retenção sujeita à percolação e ao escoamento superficial, a deficiência hídrica, que é a quantidade de água que deixa de ser evapotranspirada pela falta de água, e as fases de reposição e retirada de água do solo, que representam a variação do armazenamento de água do solo (MOTA, 1976).

Um outro método bastante utilizado para determinar a disponibilidade de água na agricultura é o balanço hídrico de campo. Este método consiste na determinação dos componentes do balanço hídrico através de medidas diretas, como por exemplo da variação do armazenamento, utilizando-se o método gravimétrico ou equipamentos como tensiômetros ou ainda a técnica de moderação de neutrons. Este método de determinação do balanço hídrico no campo tem a virtude de levar em conta as características do solo e da planta em estudo. Entretanto, a dificuldade restringe-se na aplicação prática do mesmo, conforme descrito por REICHARDT (1987).

3. MATERIAL E MÉTODOS

A área experimental utilizada localiza-se na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"-(ESALQ-USP), Piracicaba, próxima ao Posto Agrometeorológico do Departamento de Física e Meteorologia, cujas coordenadas geográficas são: $22^{\circ} 42'$ de latitude sul; $47^{\circ} 38'$ de longitude oeste; 580 metros de altitude (Figura 1).

O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo CWA (tropical de altitude com estiagem no inverno), com as seguintes médias anuais: (i) precipitação: 1253 mm, ocorrendo, a maior parte, no verão (de novembro a fevereiro), principalmente com chuvas de alta intensidade e curta duração; (ii) temperatura: $21,1^{\circ}\text{C}$, sendo a mínima da ordem de 10°C em julho e a máxima da ordem de 30°C em janeiro; (iii) umidade relativa: 74 % ; (iv) velocidade do vento: 2,2 m/s com direção E/SE predominante (estas médias anuais são de 1971 a 1987). (VILLA NOVA, 1989 ; CERVellini et alii, 1973).

O solo foi classificado como Terra Roxa Estruturada série "Luiz de Queiroz" de acordo com RANZANI et alii (1966), correspondente ao Paleudalf Oxico da classificação americana (ESTADOS UNIDOS, 1979). Apresenta como material de origem rochas eruptivas básicas e cobre

Figura 1 - Localização da área experimental, junto ao Posto Agrometeorológico da ESALQ/USP.

aproximadamente 10 % da área do Estado de São Paulo, sendo muito profundo e com o lençol freático a varios metros abaixo da superficie.

O estudo da variabilidade espacial e temporal do armazenamento de água no solo foi realizado com o uso de sonda de neutrons. Foram utilizadas duas sondas de neutrons pertencentes à Seção de Física de Solos do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP) de fabricação francesa, tipo Solo 25, com fonte Am-Be e atividade 1,48 GBq (Figura 2). A calibração das sondas e suas respectivas curvas, utilizadas para a transformação da contagem relativa (CR) em umidade volumétrica, encontram-se em TURATTI et alii (1990).

No campo experimental foi escolhida uma transeção de 25 pontos, espaçados de 5 metros (Figura 3). Nestes pontos foram instalados, com o auxílio de um trado holandês, tubos de alumínio (AG 3 com 41 mm de diâmetro interno e 45 mm de diâmetro externo) para acesso da sonda de neutrons, até a profundidade de 1,70 metros.

Como o trado possui o diâmetro um pouco maior que o do tubo de alumínio, no momento da instalação foi feito uma mistura de solo e água e colocada dentro do orifício para permitir melhor contato do tubo de alumínio com o solo.

As medidas do teor de água no solo foram feitas

Figura 2. Fotografia da sonda de neutrons Solo 25 utilizada na condução do experimento.

Figura 3. Detalhes da transeção com os tubos de acesso da sonda e dos tensiômetros instalados na área experimental.

nas profundidades de 25, 50, 75, 100, 125 e 150 cm, a partir da superfície do solo e de 15 em 15 dias aproximadamente, durante um período de 8 meses (de 2/3/89 a 12/10/89). Com estes dados, após o cálculo dos armazenamentos, foram feitas análises geostatísticas (autocorrelograma) de acordo com DAVIS, (1973) e análise dos erros (HAVERKAMP et alii, 1984) para o estudo da variabilidade espacial e temporal do armazenamento.

Os armazenamentos médios até a profundidade L de 150 cm e os erros envolvidos foram calculados pelos métodos numéricos de integração trapezoidal e de Simpson (CARNAHAN et alii, 1969; HAVERKAMP et alii, 1984), de acordo com as seguintes equações:

METODO TRAPEZOIDAL

a) Estimativa do armazenamento $\hat{S}$ (cm)

Esta estimativa é feita integrando-se a equação (1) utilizando a regra trapezoidal. Para medidas equidistantes (mesmo Δz) o resultado é a equação (1a) e como as medidas inicial e final foram feitas para $\Delta z = 1,5$ e $0,5$, respectivamente, a equação de $\hat{S}$ fica:

$$(\hat{S}) = \left[1,5 \theta_{25} + \theta_{50} + \theta_{75} + \theta_{100} + \theta_{125} + 0,5 \theta_{150} \right] \Delta z \quad \text{.. (3)}$$

sendo θ a umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) e Δz o

incremento de profundidade.

b) Estimativa da variância total da estimativa do armazenamento $s^2(\hat{S})$ (cm²)

$$s^2(\hat{S}) = s_1^2(\hat{S}) + s_2^2(\hat{S}) \dots \dots \dots (4)$$

onde: $s_1^2(\hat{S}) \rightarrow$ variância devida às medidas de umidade

$$s_1^2(\hat{S}) = \left[1,5^2 s^2(\theta_{25}) + s^2(\theta_{50}) + s^2(\theta_{75}) + s^2(\theta_{100}) + \right. \\ \left. + s^2(\theta_{125}) + 0,5^2 s^2(\theta_{150}) \right] \Delta z^2 \dots \dots \dots (5)$$

$s_2^2(\hat{S}) \rightarrow$ variância devida ao método de integração

$$s_2^2(\hat{S}) = \frac{Z^2 \Delta z^4}{144} \left[\theta''(z) \right]^2 \dots \dots \dots (6)$$

sendo $\theta''(z)$ a maior derivada segunda em função de $\theta(z)$ no intervalo de integração.

c) Estimativa do desvio padrão do armazenamento $s(\hat{S})$ (cm)

$$s(\hat{S}) = \sqrt{s^2(\hat{S})} \dots \dots \dots (7)$$

MÉTODO DE SIMPSON

a) Estimativa do armazenamento $\hat{S}$ (cm)

$$(\hat{S}) = -\frac{\Delta z}{3} \left[(\theta_0 + 4\theta_{25} + 2\theta_{50} + 4\theta_{75} + 2\theta_{100} + 4\theta_{125} + \theta_{150}) \right] \quad (8)$$

sendo θ a umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) e Δz o incremento de profundidade e θ_0 a umidade da superfície do solo, assumida igual à umidade em $z = 25$ cm, da mesma forma como foi feito para o método Trapezoidal. Este valor (θ_0) foi incluído porque o método de Simpson exige número ímpar de pontos de integração.

b) Estimativa da variância total da estimativa do armazenamento $s^2(\hat{S})$ (cm^2)

$$s^2(\hat{S}) = s_1^2(\hat{S}) + s_2^2(\hat{S}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

onde: $s_1^2(\hat{S}) \rightarrow$ variância devida às medida de umidade

$$s_1^2(\hat{S}) = \left\{ \left(\frac{\Delta z}{3} \right)^2 \left[s^2\theta_0 + 16 s^2\theta_{25} + 4 s^2\theta_{50} + 16 s^2\theta_{75} + \right. \right. \\ \left. \left. + 4 s^2\theta_{100} + 16 s^2\theta_{125} + s^2\theta_{150} \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$s_2^2(\hat{S}) \rightarrow$ variância devida ao método de integração

$$s_2^2(\hat{S}) = \frac{z^2 \Delta z^8}{32400} \left[\theta'''(z) \right]^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

sendo θ'''' a maior derivada quarta da função $\theta(z)$ no intervalo de integração.

c) Estimativa do desvio padrão do armazenamento $s(\hat{S})$
(cm)

$$s(\hat{S}) = \sqrt{s^2(\hat{S})} \dots\dots\dots (12)$$

nas equações (6) e (11) foi considerado $Z = 150$ cm e $\Delta z = 25$ cm. As derivadas 2ª e 4ª foram determinadas pela regra de Taylor:

$$\theta''(z) = \frac{\theta(z-\Delta z) - 2\theta(z) + \theta(z+\Delta z)}{\Delta z^2} \quad (\text{derivada segunda})$$

$$\theta''''(z) = \frac{\theta_5 - 4\theta_4 + 6\theta_3 - 4\theta_2 + \theta_1}{4! \Delta z^4} \quad (\text{derivada quarta})$$

O critério adotado para o cálculo da estimativa dos desvios padrões dos armazenamentos foi o de se utilizar a maior derivada 2ª e 4ª calculada, para maximizar estes erros, para uma maior segurança.

Com os valores dos armazenamentos calculados pelo método Trapezoidal simplificado ($\bar{\theta} \cdot L$) em cada data, procedeu-se o cálculo dos desvios relativos (VACHAUD et alii, 1985.) de acordo com a equação:

$$DR (\%) = \frac{S_i - \bar{S}}{\bar{S}} \cdot 100 \dots\dots\dots (13)$$

onde: DR (%) $\rightarrow$ desvios percentuais em relação à estimativa da média

S_i (mm) $\rightarrow$ armazenamento na posição i da transeção em determinada data.

$\bar{S}$ (mm) $\rightarrow$ estimativa do armazenamento médio na transeção, em determinada data.

Com os desvios relativos em cada data, foram calculados os desvios médios para cada local, com seus respectivos desvios padrões, com o intuito de estudar a estabilidade temporal dos armazenamentos.

Para estimar a drenagem profunda ou ascensão capilar, foram utilizados dados médios da variação da umidade volumétrica (θ em $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) e de potencial mátrico (ψ_m em cm de água) em função do tempo de drenagem, de gama (coeficiente angular da relação de $\theta \times \ln t$) e de condutividade hidráulica do solo $K(\theta)$ calculados de acordo com o método de LIBARDI et alii, 1980, obtidos por PAULETTO (1986). Através de regressão linear de $\ln K$ versus $\ln \psi_m$ (Tabela 1) obteve-se uma relação para $K(\psi_m)$:

$$\ln K = 17,133 - 3,999 \ln \psi_m \dots\dots\dots (14)$$

Tabela 1. Valores do módulo do potencial matricial (cm de água), umidade volumétrica (cm^3/cm^3) e condutividade hidráulica (cm/dia) obtidos por FAULETTO (1986) em função do tempo a 150 cm de profundidade, usados para a obtenção do modelo descrito pela equação (14).

TEMPO	POTENCIAL	TETA	K	LN K	LN POT.
(horas)	(cm H ₂ O)	(cm ³ /cm ³)	(cm/dia)		
0.00	38	0.477	15.005	2.71	3.64
6.87	58	0.454	2.278	0.82	4.06
16.70	72	0.444	1.026	0.03	4.27
35.54	87	0.435	0.498	-0.70	4.47
54.43	95	0.430	0.328	-1.11	4.55
73.28	104	0.426	0.229	-1.47	4.64
102.18	110	0.423	0.176	-1.74	4.70
126.11	116	0.420	0.143	-1.95	4.75
150.34	122	0.418	0.120	-2.12	4.81
174.11	128	0.416	0.103	-2.27	4.85
198.25	131	0.415	0.091	-2.40	4.88
222.00	134	0.413	0.081	-2.51	4.90
246.35	139	0.412	0.073	-2.62	4.93
270.49	142	0.411	0.067	-2.71	4.96
293.55	146	0.410	0.061	-2.79	4.98
318.17	148	0.409	0.057	-2.87	5.00
341.92	151	0.408	0.053	-2.94	5.02
366.04	155	0.407	0.049	-3.01	5.04
390.17	157	0.406	0.046	-3.08	5.06
413.49	160	0.405	0.044	-3.13	5.07
438.32	162	0.405	0.041	-3.19	5.09
462.04	164	0.404	0.039	-3.25	5.10
486.16	167	0.404	0.037	-3.30	5.12
510.26	168	0.403	0.035	-3.35	5.12
534.13	171	0.402	0.034	-3.39	5.14
557.82	174	0.402	0.032	-3.44	5.16
582.03	174	0.401	0.031	-3.48	5.16

Para calcular a função $K(\theta)$ foi utilizado o valor de condutividade hidráulica (K_0) determinado em condições de solo saturado, em uma parcela na área experimental de 5 m x 5 m, protegida lateralmente com uma estrutura de madeira para inundação. O sistema de bombeamento de água para a inundação foi mantido até que o perfil estivesse saturado até uma profundidade de 150 cm, e que o fluxo de infiltração de água se tornasse constante com o tempo. Esta condição foi verificada através de leituras de tensiômetros instalados na parcela nas mesmas profundidades (25 - 150 cm). A seguir, foram instalados dentro da área inundada quatro conjuntos de anéis concêntricos e feitas leituras do abaixamento da lâmina de água em função do tempo. Estas leituras foram repetidas após uma hora para verificar se realmente o fluxo de água estava em equilíbrio dinâmico. Os dados de fluxo foram considerados igual a K_0 e são mostrados na Tabela 2.

Para determinação da drenagem profunda ou ascensão capilar a 150 cm de profundidade foi utilizada a equação de Darcy, na forma:

$$q = - K (\psi_m) \frac{\partial \psi}{\partial z} \dots\dots\dots (15)$$

onde: q representa a densidade de fluxo de água; $K (\psi_m)$ a condutividade hidráulica do solo ; ψ a soma dos potenciais mátrico e gravitacional e z a coordenada vertical de posição.

TABELA 2. Valores de condutividade hidráulica (K_0) para condições de solo saturado, obtidos na parcela experimental.

Repetições	Valores de condutividade hidráulica (cm / dia)		
	Tempo inicial	1 hora após	média
1	9,28	11,07	
2	22,30	20,74	
3	15,40	23,00	
4	7,27	10,28	15,005

A drenagem profunda ou ascensão capilar foi obtida multiplicando-se o fluxo médio pelo número de dias entre cada data de coleta de dados.

Para a estimativa do balanço hídrico nos períodos de coleta de dados adotou-se a seguinte relação:

$$\Delta \hat{S} = + (P+I) + DP + ET + AC \dots\dots\dots (16)$$

$$\text{logo, } ET = + \Delta \hat{S} - (P+I) - DP - AC \dots\dots\dots (17)$$

As entradas de água no sistema solo ($P+I$ e AC) foram consideradas ganhos (+) e as saídas de água (ET e DP) foram consideradas perdas (-), e onde:

$\Delta \hat{S}$ $\Rightarrow$ variação do armazenamento estimado (mm)

P $\Rightarrow$ precipitação (mm)

I $\Rightarrow$ irrigação (mm)

DP $\Rightarrow$ drenagem profunda (mm)

ET → evapotranspiração real (mm)

AC → ascensão capilar (mm)

A partir dos dados de evapotranspiração real (ET) estimada pela equação (17) e com os dados de evaporação do tanque classe A (ECA), em cada período, calculou-se a relação (R) entre ET e ECA.

Ao longo da transeção dos tubos de acesso para medida com a sonda de neutrons, foram também instalados tensiômetros a 135 e a 165 cm de profundidade e distantes horizontalmente 25 e 50 cm, respectivamente, de cada tubo de alumínio (Figura ~~2~~3). Foram medidos os potenciais mátrico e total nestas profundidades e o gradiente de potencial a 150 cm, durante o mesmo período de tempo que foram feitas as leituras com sonda de neutrons, apenas com intervalos de tempo menores (de 2-7 dias). A partir dos dados de potencial mátrico a 135 e a 165 cm, calculou-se o potencial médio a 150 cm, para, a partir do modelo estimado anteriormente (equação 14) calcular a condutividade hidráulica do solo. Com estes dados de K e de gradiente, em cada data, foram calculados as densidades de fluxos (q) segundo a equação (15). Estes dados são apresentados na Tabela 3 e maiores detalhes podem ser encontrados em VILLAGRA et alii, 1990). Como usou-se o potencial em módulo, o critério adotado para o sentido do fluxo foi o seguinte: gradiente (-) fluxo descendente (drenagem profunda) e gradiente (+) fluxo ascendente (ascensão capilar), desprezando o sinal negativo da equação (14).

Para se estimar o número de tubos de acesso para sonda de neutrons a serem instalados, para que a estimativa de armazenamento esteja dentro de um erro previamente estabelecido, utilizou-se o Teorema Central do Valor Limite (WARRICK & NIELSEN, 1980) de acordo com a expressão:

$$N = T_{\alpha}^2 \cdot s^2(\hat{S}) / d^2 \dots\dots\dots (18)$$

onde:

N $\Rightarrow$ número de tubos de acesso para sonda de neutrons, requeridos para uma estimativa da média, com uma precisão pré-estabelecida, dada por um valor de $D = (1 - \alpha) 100$;

T $\Rightarrow$ o nível de confiança desejado na estimativa do armazenamento médio, parâmetro da tabela de t de Student para infinitos graus de liberdade ($t_{0,05} = 1,96$ e $t_{0,10} = 1,645$);

$s^2(\hat{S}) \Rightarrow$ variância do armazenamento estimado em cada data.

d $\Rightarrow$ o produto do armazenamento médio pelo erro pré-fixado no cálculo de N.

Para a utilização desta análise, dois requisitos devem ser observados: a) distribuição normal dos dados e; b) os dados devem ser independentes. Para comprovar o primeiro requisito, foram construídos diagramas de probabilidade acumulada (VAUCLIN et alii, 1984 ; WARRICK & NIELSEN, 1980) e para testar a independência dos dados, foram

construidos autocorrelogramas dos valores de armazenamentos para todas as datas (DAVIS, 1973 ; WARRICK & NIELSEN, 1980 ; REICHARDT, 1985) e utilizou-se o programa STATGRAPH.

Tabela 3. Valores utilizados para o cálculo da densidade de fluxo (q) de água (mm/dia) através da equação (15) na profundidade de 150 cm durante o período de condução do experimento.

datas	psi35	psi65	PM150	K(Psi)	PH135	PH165	GRAD.	FLUXO
2/3/89	-146	-147	146.66	0.060	281	312	-1.0	-0.616
3/3/89	-141	-140	140.25	0.071	276	305	-1.0	-0.593
4/3/89	-147	-142	144.66	0.063	282	307	-0.8	-0.531
5/3/89	-142	-139	140.74	0.070	277	304	-0.9	-0.630
6/3/89	-153	-149	151.19	0.053	288	314	-0.9	-0.455
7/3/89	-150	-147	148.63	0.057	285	312	-0.9	-0.513
8/3/89	-152	-151	151.66	0.052	287	316	-0.9	-0.494
10/3/89	-152	-154	153.07	0.050	287	319	-1.0	-0.527
13/3/89	-155	-156	155.37	0.047	290	321	-1.0	-0.480
14/3/89	-171	-168	169.40	0.034	306	333	-0.9	-0.305
15/3/89	-172	-169	170.53	0.033	307	334	-0.9	-0.297
16/3/89	-173	-171	172.12	0.032	308	336	-0.9	-0.287
17/3/89	-164	-164	164.26	0.038	299	329	-1.0	-0.382
18/3/89	-191	-190	190.30	0.021	326	355	-1.0	-0.200
19/3/89	-163	-164	163.27	0.039	298	329	-1.0	-0.401
21/3/89	-166	-167	166.44	0.036	301	332	-1.0	-0.372
22/3/89	-175	-177	175.55	0.029	310	342	-1.1	-0.310
23/3/89	-172	-172	171.97	0.032	307	337	-1.0	-0.320
24/3/89	-175	-173	173.87	0.030	310	338	-0.9	-0.278
26/3/89	-171	-180	175.69	0.029	306	345	-1.3	-0.373
28/3/89	-167	-180	173.54	0.030	302	345	-1.4	-0.431
30/3/89	-160	-175	167.26	0.035	295	340	-1.5	-0.531
1/4/89	-155	-167	161.18	0.041	290	332	-1.4	-0.577
3/4/89	-154	-169	161.67	0.040	289	334	-1.5	-0.601
5/4/89	-154	-168	161.08	0.041	289	333	-1.5	-0.601
7/4/89	-154	-166	160.21	0.042	289	331	-1.4	-0.591
10/4/89	-156	-166	160.92	0.041	291	331	-1.3	-0.554
12/4/89	-169	-176	172.34	0.031	304	341	-1.2	-0.387
13/4/89	-165	-172	168.37	0.034	300	337	-1.3	-0.432
15/4/89	-176	-181	178.44	0.027	311	346	-1.1	-0.313
18/4/89	-175	-183	179.15	0.027	310	348	-1.3	-0.338
20/4/89	-179	-183	181.17	0.026	314	348	-1.1	-0.289
22/4/89	-181	-182	181.87	0.025	316	347	-1.0	-0.262
25/4/89	-185	-186	185.33	0.023	320	351	-1.0	-0.242
26/4/89	-197	-197	197.14	0.018	332	362	-1.0	-0.184
29/4/89	-188	-191	189.67	0.021	323	356	-1.1	-0.238
30/4/89	-196	-196	196.09	0.019	331	361	-1.0	-0.190
2/5/89	-202	-201	201.20	0.017	337	366	-1.0	-0.165
3/5/89	-208	-207	207.26	0.015	343	372	-1.0	-0.144
4/5/89	-208	-205	206.75	0.015	343	370	-0.9	-0.135
5/5/89	-213	-208	210.30	0.014	348	373	-0.8	-0.119
6/5/89	-212	-207	209.79	0.014	347	372	-0.8	-0.119
8/5/89	-211	-208	209.52	0.014	346	373	-0.9	-0.127
10/5/89	-215	-210	212.52	0.014	350	375	-0.8	-0.112
12/5/89	-223	-217	219.90	0.012	358	382	-0.8	-0.096

continua

Tabela 3. Valores utilizados para o cálculo da densidade de fluxo (q) de água (mm/dia) através da equação (15) na profundidade de 150 cm durante o período de condução do experimento.

datas	pm135	pm165	PM150 K(Psi)	PH135	PH165	GRAD.	FLUXO
14/5/89	-222	-216	219.02	0.012	357	381	-0.8 -0.099
16/5/89	-233	-226	229.30	0.010	368	391	-0.8 -0.079
18/5/89	-225	-221	223.13	0.011	360	386	-0.9 -0.097
20/5/89	-236	-229	232.42	0.009	371	394	-0.8 -0.071
22/5/89	-231	-226	228.87	0.010	366	391	-0.8 -0.084
24/5/89	-243	-236	239.30	0.008	378	401	-0.8 -0.066
26/5/89	-244	-237	240.77	0.008	379	402	-0.8 -0.064
28/5/89	-248	-241	244.19	0.008	383	406	-0.8 -0.060
30/5/89	-248	-242	244.67	0.008	383	407	-0.8 -0.062
1/6/89	-245	-242	243.34	0.008	380	407	-0.9 -0.070
3/6/89	-247	-245	246.01	0.008	382	410	-0.9 -0.069
5/6/89	-266	-256	261.30	0.006	401	421	-0.7 -0.039
9/6/89	-258	-253	255.66	0.006	393	418	-0.8 -0.055
12/6/89	-273	-265	269.14	0.005	408	430	-0.7 -0.038
15/6/89	-279	-270	274.51	0.005	414	435	-0.7 -0.033
16/6/89	-282	-273	277.27	0.005	417	438	-0.7 -0.033
22/6/89	-290	-280	284.90	0.004	425	445	-0.7 -0.028
27/6/89	-298	-287	292.07	0.004	433	452	-0.6 -0.024
3/7/89	-298	-290	293.91	0.004	433	455	-0.7 -0.027
12/7/89	-313	-301	306.97	0.003	448	466	-0.6 -0.019
19/7/89	-322	-340	330.64	0.002	457	505	-1.6 -0.037
2/8/89	-336	-357	346.25	0.002	471	522	-1.7 -0.033
3/8/89	-339	-358	348.09	0.002	474	523	-1.6 -0.031
9/8/89	-340	-361	350.32	0.002	475	526	-1.7 -0.031
17/8/89	-339	-362	350.65	0.002	474	527	-1.8 -0.032
23/8/89	-350	-372	361.19	0.002	485	537	-1.7 -0.028
26/8/89	-339	-360	349.63	0.002	474	525	-1.7 -0.032
30/8/89	-351	-368	359.56	0.002	486	533	-1.6 -0.026
6/9/89	-339	-358	348.57	0.002	474	523	-1.6 -0.030
16/9/89	-350	-368	359.12	0.002	485	533	-1.6 -0.027
28/9/89	-357	-371	363.90	0.002	492	536	-1.5 -0.023
30/9/89	-349	-375	362.08	0.002	484	540	-1.9 -0.030
12/10/8	-327	-374	350.29	0.002	462	539	-2.6 -0.047

4. RESULTADOS E DISCUSSAO

Os valores de umidade volumétrica do solo para todo o período de condução do experimento (2/3/89 a 12/10/89) podem ser visto nas Tabelas 4 a 17. Observa-se que a variabilidade dos dados é pronunciada e torna-se portanto fundamental estudar sua influência no cálculo do armazenamento de água e conseqüentemente no seu posterior uso em balanço hídrico.

Para melhor analisar estes aspectos, dividiu-se a apresentação dos resultados e discussão em quatro itens, a saber:

- 4.1 - Armazenamento e erros envolvidos
- 4.2 - Número de tubos de acesso para sonda
- 4.3 - Desvios relativos dos armazenamentos.
- 4.4 - Balanço hídrico - aplicações.

4.1 Armazenamento e erros envolvidos

As Tabelas 18 e 19 apresentam as estimativas dos armazenamentos médios ($\hat{S}$) até 150 cm de profundidade, as estimativas dos erros totais dos armazenamentos [$s(\hat{S})$] que são as que tem a contribuição dos erros devido à

Tabela 4. Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia
2/3/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.

Pontos	25 Cm	50 Cm	75 Cm	100 Cm	125 Cm	150 Cm
1	0.38	0.39	0.37	0.34	0.33	0.32
2	0.43	0.41	0.39	0.35	0.33	0.35
3	0.37	0.36	0.35	0.34	0.33	0.33
4	0.40	0.40	0.37	0.33	0.33	0.33
5	0.39	0.40	0.38	0.33	0.32	0.32
6	0.38	0.38	0.36	0.34	0.32	0.33
7	0.38	0.39	0.36	0.33	0.33	0.33
8	0.39	0.41	0.38	0.33	0.32	0.33
9	0.41	0.42	0.37	0.34	0.35	0.38
10	0.39	0.39	0.37	0.33	0.33	0.36
11	0.40	0.40	0.38	0.33	0.32	0.32
12	0.40	0.42	0.40	0.34	0.31	0.31
13	0.38	0.40	0.37	0.34	0.33	0.32
14	0.38	0.40	0.37	0.32	0.32	0.31
15	0.37	0.39	0.38	0.33	0.32	0.32
16	0.39	0.43	0.40	0.34	0.33	0.36
17	0.39	0.40	0.38	0.37	0.34	0.35
18	0.37	0.38	0.39	0.39	0.34	0.33
19	0.36	0.41	0.41	0.36	0.32	0.33
20	0.32	0.27	0.38	0.34	0.33	0.31
21	0.36	0.39	0.38	0.34	0.32	0.33
22	0.38	0.42	0.36	0.33	0.32	0.33
23	0.36	0.39	0.37	0.34	0.32	0.32
24	0.38	0.41	0.39	0.36	0.35	0.38
25	0.36	0.41	0.36	0.33	0.32	0.34

Tabela 5. Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia
16/3/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.

Pontos	25 Cm	50 Cm	75 Cm	100 Cm	125 Cm	150 Cm
1	0.40	0.42	0.40	0.37	0.34	0.33
2	0.42	0.43	0.39	0.34	0.34	0.35
3	0.39	0.39	0.36	0.35	0.33	0.33
4	0.42	0.43	0.38	0.33	0.33	0.32
5	0.41	0.41	0.38	0.33	0.32	0.32
6	0.41	0.40	0.37	0.34	0.32	0.34
7	0.38	0.40	0.37	0.33	0.33	0.34
8	0.40	0.44	0.39	0.33	0.32	0.33
9	0.41	0.42	0.38	0.35	0.34	0.39
10	0.40	0.42	0.39	0.33	0.34	0.36
11	0.41	0.41	0.40	0.33	0.33	0.32
12	0.40	0.43	0.40	0.34	0.31	0.32
13	0.39	0.42	0.39	0.34	0.34	0.32
14	0.39	0.42	0.39	0.32	0.32	0.31
15	0.36	0.38	0.38	0.33	0.32	0.32
16	0.40	0.42	0.38	0.34	0.33	0.36
17	0.39	0.40	0.37	0.36	0.33	0.35
18	0.38	0.40	0.40	0.38	0.35	0.33
19	0.37	0.43	0.41	0.36	0.32	0.33
20	0.34	0.28	0.38	0.35	0.33	0.32
21	0.37	0.40	0.37	0.33	0.32	0.33
22	0.37	0.43	0.38	0.33	0.32	0.32
23	0.38	0.42	0.34	0.32	0.32	0.32
24	0.38	0.41	0.39	0.36	0.36	0.38
25	0.37	0.40	0.37	0.33	0.33	0.34

Tabela 6. Valores de umidade volumétrica (cm^3/cm^3) no dia
30/3/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.

Pontos	25 Cm	50 Cm	75 Cm	100 Cm	125 Cm	150 Cm
1	0.40	0.40	0.38	0.35	0.32	0.31
2	0.43	0.41	0.40	0.35	0.32	0.34
3	0.39	0.37	0.36	0.35	0.33	0.33
4	0.41	0.41	0.38	0.33	0.32	0.32
5	0.40	0.41	0.38	0.32	0.32	0.31
6	0.40	0.39	0.37	0.33	0.31	0.32
7	0.38	0.40	0.38	0.33	0.32	0.32
8	0.40	0.41	0.39	0.33	0.31	0.32
9	0.40	0.41	0.38	0.34	0.33	0.36
10	0.40	0.42	0.40	0.34	0.34	0.35
11	0.41	0.41	0.40	0.33	0.32	0.31
12	0.40	0.43	0.40	0.34	0.30	0.30
13	0.39	0.42	0.40	0.34	0.33	0.31
14	0.39	0.42	0.38	0.32	0.31	0.30
15	0.37	0.37	0.37	0.32	0.30	0.31
16	0.39	0.42	0.38	0.32	0.32	0.35
17	0.37	0.38	0.36	0.35	0.32	0.34
18	0.38	0.40	0.40	0.39	0.36	0.31
19	0.36	0.41	0.40	0.35	0.31	0.32
20	0.33	0.28	0.38	0.34	0.32	0.30
21	0.38	0.39	0.37	0.32	0.31	0.32
22	0.38	0.42	0.37	0.32	0.31	0.32
23	0.38	0.40	0.38	0.33	0.31	0.31
24	0.37	0.40	0.38	0.35	0.35	0.37
25	0.36	0.39	0.36	0.33	0.32	0.33

Tabela 7. Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia
20/4/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.

Pontos	25 Cm	50 Cm	75 Cm	100 Cm	125 Cm	150 Cm
1	0.35	0.38	0.37	0.35	0.33	0.33
2	0.38	0.40	0.38	0.35	0.34	0.35
3	0.36	0.36	0.35	0.34	0.33	0.33
4	0.37	0.39	0.37	0.33	0.33	0.33
5	0.34	0.39	0.37	0.33	0.32	0.32
6	0.35	0.37	0.37	0.33	0.31	0.32
7	0.36	0.39	0.36	0.33	0.33	0.33
8	0.37	0.42	0.38	0.33	0.32	0.33
9	0.37	0.40	0.37	0.33	0.33	0.38
10	0.37	0.40	0.38	0.33	0.33	0.35
11	0.39	0.41	0.38	0.33	0.32	0.32
12	0.37	0.41	0.38	0.34	0.31	0.31
13	0.35	0.40	0.37	0.33	0.33	0.32
14	0.35	0.40	0.36	0.31	0.31	0.30
15	0.33	0.38	0.37	0.33	0.30	0.32
16	0.35	0.39	0.37	0.33	0.32	0.35
17	0.33	0.37	0.35	0.35	0.33	0.35
18	0.34	0.37	0.39	0.37	0.33	0.32
19	0.33	0.40	0.39	0.34	0.31	0.33
20	0.31	0.27	0.36	0.34	0.32	0.30
21	0.36	0.38	0.36	0.32	0.31	0.33
22	0.35	0.40	0.35	0.32	0.32	0.33
23	0.34	0.38	0.36	0.33	0.32	0.31
24	0.35	0.38	0.37	0.34	0.35	0.37
25	0.33	0.38	0.35	0.32	0.33	0.33

Tabela 8. Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 4/5/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.

Pontos	25 Cm	50 Cm	75 Cm	100 Cm	125 Cm	150 Cm
1	0.32	0.35	0.34	0.32	0.31	0.30
2	0.32	0.34	0.34	0.32	0.31	0.32
3	0.31	0.31	0.31	0.32	0.31	0.31
4	0.33	0.33	0.32	0.30	0.31	0.31
5	0.31	0.33	0.33	0.30	0.30	0.29
6	0.31	0.32	0.32	0.31	0.30	0.31
7	0.32	0.35	0.34	0.31	0.31	0.31
8	0.33	0.37	0.34	0.31	0.30	0.31
9	0.32	0.34	0.33	0.32	0.32	0.36
10	0.33	0.35	0.35	0.32	0.31	0.34
11	0.34	0.36	0.35	0.31	0.30	0.30
12	0.35	0.35	0.35	0.32	0.29	0.29
13	0.32	0.35	0.34	0.31	0.32	0.30
14	0.34	0.35	0.32	0.30	0.29	0.29
15	0.31	0.33	0.35	0.32	0.30	0.30
16	0.31	0.35	0.33	0.30	0.30	0.33
17	0.29	0.32	0.33	0.32	0.31	0.32
18	0.29	0.33	0.35	0.35	0.33	0.30
19	0.29	0.36	0.35	0.32	0.29	0.31
20	0.26	0.24	0.33	0.31	0.30	0.29
21	0.34	0.35	0.34	0.31	0.29	0.31
22	0.30	0.36	0.33	0.30	0.30	0.30
23	0.29	0.33	0.33	0.31	0.30	0.30
24	0.29	0.34	0.33	0.32	0.33	0.36
25	0.28	0.34	0.33	0.31	0.30	0.31

Tabela 9. Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia
24/5/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.

Pontos	25 Cm	50 Cm	75 Cm	100 Cm	125 Cm	150 Cm
1	0.30	0.35	0.33	0.32	0.30	0.30
2	0.31	0.34	0.33	0.31	0.30	0.32
3	0.30	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31
4	0.32	0.33	0.32	0.30	0.30	0.30
5	0.30	0.33	0.32	0.30	0.30	0.30
6	0.31	0.32	0.31	0.30	0.30	0.30
7	0.31	0.35	0.33	0.30	0.31	0.31
8	0.31	0.36	0.34	0.30	0.30	0.30
9	0.33	0.34	0.32	0.31	0.31	0.35
10	0.32	0.36	0.34	0.31	0.32	0.33
11	0.32	0.35	0.34	0.31	0.31	0.30
12	0.32	0.36	0.34	0.31	0.29	0.29
13	0.31	0.35	0.34	0.31	0.32	0.30
14	0.30	0.35	0.32	0.29	0.29	0.29
15	0.29	0.33	0.34	0.31	0.29	0.30
16	0.31	0.34	0.33	0.30	0.30	0.33
17	0.29	0.32	0.32	0.32	0.31	0.32
18	0.29	0.33	0.35	0.34	0.32	0.31
19	0.28	0.35	0.34	0.31	0.30	0.30
20	0.26	0.24	0.33	0.31	0.31	0.29
21	0.31	0.34	0.33	0.30	0.30	0.30
22	0.29	0.36	0.33	0.30	0.30	0.31
23	0.29	0.33	0.33	0.31	0.30	0.30
24	0.30	0.34	0.34	0.33	0.33	0.35
25	0.28	0.35	0.33	0.31	0.30	0.31

Tabela 10. Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia
12/6/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.

Pontos	25 Cm	50 Cm	75 Cm	100 Cm	125 Cm	150 Cm
1	0.34	0.34	0.33	0.31	0.31	0.30
2	0.32	0.34	0.33	0.31	0.31	0.32
3	0.31	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31
4	0.35	0.33	0.31	0.29	0.30	0.30
5	0.32	0.33	0.32	0.29	0.30	0.30
6	0.35	0.32	0.31	0.31	0.29	0.30
7	0.31	0.34	0.33	0.30	0.30	0.30
8	0.34	0.35	0.33	0.30	0.29	0.30
9	0.32	0.34	0.33	0.31	0.31	0.35
10	0.35	0.35	0.33	0.31	0.31	0.33
11	0.34	0.34	0.33	0.31	0.30	0.29
12	0.35	0.35	0.34	0.31	0.29	0.29
13	0.33	0.34	0.33	0.31	0.31	0.30
14	0.36	0.35	0.31	0.29	0.29	0.28
15	0.33	0.34	0.34	0.30	0.30	0.29
16	0.30	0.34	0.32	0.30	0.30	0.32
17	0.30	0.31	0.32	0.32	0.31	0.31
18	0.32	0.33	0.34	0.33	0.31	0.30
19	0.31	0.35	0.33	0.31	0.29	0.30
20	0.28	0.24	0.33	0.31	0.30	0.29
21	0.33	0.33	0.32	0.30	0.30	0.30
22	0.33	0.34	0.32	0.29	0.29	0.30
23	0.30	0.33	0.32	0.31	0.29	0.30
24	0.29	0.33	0.33	0.32	0.33	0.35
25	0.29	0.34	0.32	0.30	0.29	0.31

Tabela 11. Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia
29/6/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.

Pontos	25 Cm	50 Cm	75 Cm	100 Cm	125 Cm	150 Cm
1	0.33	0.34	0.32	0.31	0.30	0.30
2	0.33	0.34	0.33	0.30	0.30	0.32
3	0.31	0.32	0.31	0.31	0.30	0.30
4	0.34	0.33	0.31	0.30	0.30	0.30
5	0.32	0.33	0.32	0.30	0.29	0.30
6	0.33	0.32	0.31	0.30	0.29	0.30
7	0.31	0.34	0.32	0.30	0.30	0.30
8	0.33	0.35	0.33	0.30	0.29	0.30
9	0.32	0.33	0.32	0.31	0.31	0.35
10	0.34	0.35	0.33	0.30	0.31	0.33
11	0.34	0.35	0.33	0.30	0.29	0.29
12	0.34	0.35	0.33	0.30	0.28	0.28
13	0.32	0.35	0.32	0.31	0.31	0.30
14	0.33	0.35	0.31	0.29	0.29	0.28
15	0.31	0.33	0.34	0.30	0.29	0.29
16	0.31	0.34	0.33	0.30	0.30	0.32
17	0.30	0.31	0.32	0.31	0.30	0.32
18	0.32	0.33	0.34	0.33	0.31	0.30
19	0.30	0.36	0.33	0.30	0.30	0.30
20	0.27	0.24	0.32	0.31	0.30	0.29
21	0.32	0.33	0.32	0.30	0.29	0.30
22	0.32	0.35	0.31	0.30	0.30	0.30
23	0.30	0.33	0.32	0.30	0.29	0.29
24	0.31	0.34	0.34	0.32	0.32	0.35
25	0.29	0.33	0.32	0.30	0.30	0.31

Tabela 12. Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia
18/7/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.

Pontos	25 Cm	50 Cm	75 Cm	100 Cm	125 Cm	150 Cm
1	0.30	0.34	0.33	0.32	0.30	0.29
2	0.32	0.34	0.33	0.30	0.30	0.31
3	0.31	0.30	0.31	0.31	0.30	0.30
4	0.32	0.33	0.31	0.30	0.30	0.30
5	0.30	0.32	0.32	0.30	0.29	0.29
6	0.31	0.32	0.32	0.30	0.29	0.30
7	0.30	0.34	0.32	0.30	0.30	0.30
8	0.31	0.35	0.33	0.30	0.29	0.29
9	0.31	0.34	0.32	0.30	0.31	0.36
10	0.32	0.35	0.33	0.31	0.31	0.33
11	0.30	0.34	0.33	0.30	0.30	0.29
12	0.31	0.35	0.33	0.30	0.28	0.29
13	0.30	0.34	0.32	0.30	0.31	0.30
14	0.30	0.35	0.31	0.28	0.29	0.28
15	0.28	0.33	0.34	0.30	0.29	0.29
16	0.30	0.35	0.33	0.30	0.30	0.32
17	0.28	0.32	0.32	0.32	0.31	0.31
18	0.29	0.33	0.34	0.34	0.31	0.30
19	0.27	0.35	0.34	0.31	0.30	0.30
20	0.25	0.23	0.31	0.30	0.30	0.28
21	0.29	0.33	0.32	0.30	0.29	0.30
22	0.29	0.34	0.32	0.29	0.29	0.30
23	0.29	0.33	0.32	0.30	0.29	0.29
24	0.29	0.33	0.33	0.30	0.30	0.32
25	0.24	0.34	0.33	0.30	0.30	0.31

Tabela 13 Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia
3/8/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.

Pontos	25 Cm	50 Cm	75 Cm	100 Cm	125 Cm	150 Cm
1	0.34	0.33	0.32	0.31	0.29	0.29
2	0.35	0.33	0.33	0.30	0.30	0.31
3	0.34	0.30	0.31	0.31	0.30	0.30
4	0.34	0.33	0.30	0.28	0.29	0.30
5	0.35	0.33	0.31	0.29	0.29	0.28
6	0.34	0.32	0.31	0.30	0.29	0.30
7	0.31	0.34	0.31	0.29	0.29	0.30
8	0.34	0.34	0.32	0.29	0.29	0.29
9	0.32	0.33	0.31	0.30	0.30	0.34
10	0.34	0.34	0.32	0.30	0.30	0.32
11	0.33	0.33	0.32	0.29	0.29	0.28
12	0.33	0.34	0.32	0.29	0.27	0.28
13	0.32	0.34	0.32	0.29	0.30	0.29
14	0.34	0.33	0.30	0.28	0.28	0.28
15	0.33	0.34	0.33	0.30	0.29	0.29
16	0.31	0.33	0.31	0.29	0.29	0.31
17	0.31	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31
18	0.31	0.32	0.33	0.33	0.30	0.30
19	0.31	0.34	0.33	0.30	0.29	0.29
20	0.26	0.23	0.31	0.30	0.29	0.28
21	0.33	0.33	0.31	0.29	0.28	0.29
22	0.32	0.34	0.30	0.28	0.28	0.29
23	0.31	0.33	0.31	0.30	0.28	0.29
24	0.30	0.32	0.32	0.31	0.32	0.34
25	0.31	0.33	0.32	0.29	0.29	0.30

Tabela 14. Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia 17/8/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.

Pontos	25 Cm	50 Cm	75 Cm	100 Cm	125 Cm	150 Cm
1	0.32	0.33	0.32	0.31	0.29	0.29
2	0.34	0.34	0.33	0.30	0.30	0.31
3	0.33	0.31	0.31	0.32	0.30	0.30
4	0.34	0.32	0.30	0.28	0.30	0.30
5	0.34	0.33	0.32	0.29	0.29	0.29
6	0.33	0.32	0.31	0.30	0.29	0.29
7	0.31	0.33	0.32	0.30	0.29	0.30
8	0.33	0.34	0.32	0.29	0.29	0.29
9	0.33	0.33	0.32	0.30	0.31	0.35
10	0.33	0.34	0.32	0.30	0.30	0.33
11	0.33	0.34	0.33	0.30	0.29	0.29
12	0.33	0.35	0.33	0.30	0.28	0.28
13	0.31	0.34	0.32	0.30	0.30	0.29
14	0.32	0.33	0.30	0.28	0.29	0.28
15	0.31	0.33	0.33	0.30	0.29	0.28
16	0.31	0.34	0.32	0.30	0.29	0.32
17	0.29	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31
18	0.30	0.33	0.34	0.33	0.31	0.29
19	0.30	0.34	0.33	0.30	0.28	0.29
20	0.26	0.24	0.31	0.29	0.29	0.28
21	0.31	0.33	0.31	0.28	0.29	0.29
22	0.30	0.34	0.31	0.28	0.28	0.29
23	0.30	0.33	0.31	0.30	0.29	0.29
24	0.31	0.33	0.32	0.31	0.32	0.34
25	0.30	0.34	0.32	0.30	0.29	0.30

Tabela 15. Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia
6/9/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.

Pontos	25 Cm	50 Cm	75 Cm	100 Cm	125 Cm	150 Cm
1	0.31	0.33	0.32	0.31	0.29	0.29
2	0.32	0.34	0.34	0.30	0.30	0.31
3	0.32	0.31	0.31	0.31	0.30	0.30
4	0.33	0.33	0.30	0.29	0.30	0.29
5	0.32	0.34	0.32	0.29	0.28	0.29
6	0.32	0.32	0.32	0.30	0.28	0.30
7	0.31	0.34	0.33	0.29	0.29	0.30
8	0.32	0.35	0.32	0.30	0.29	0.29
9	0.32	0.34	0.31	0.31	0.31	0.34
10	0.33	0.35	0.32	0.30	0.30	0.32
11	0.32	0.33	0.32	0.29	0.29	0.29
12	0.32	0.34	0.32	0.30	0.28	0.29
13	0.31	0.34	0.32	0.30	0.31	0.29
14	0.31	0.33	0.31	0.29	0.28	0.28
15	0.30	0.33	0.33	0.30	0.29	0.29
16	0.31	0.34	0.32	0.30	0.29	0.32
17	0.28	0.32	0.31	0.31	0.30	0.31
18	0.29	0.32	0.34	0.32	0.31	0.29
19	0.28	0.34	0.33	0.30	0.29	0.29
20	0.26	0.24	0.32	0.30	0.29	0.28
21	0.30	0.33	0.31	0.29	0.29	0.29
22	0.29	0.34	0.32	0.29	0.29	0.29
23	0.30	0.33	0.32	0.30	0.29	0.28
24	0.30	0.33	0.32	0.31	0.32	0.34
25	0.30	0.34	0.32	0.30	0.29	0.30

Tabela 16. Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia
28/9/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.

Pontos	25 Cm	50 Cm	75 Cm	100 Cm	125 Cm	150 Cm
1	0.30	0.33	0.31	0.30	0.30	0.29
2	0.31	0.34	0.32	0.30	0.30	0.31
3	0.31	0.31	0.30	0.31	0.29	0.30
4	0.32	0.32	0.30	0.28	0.29	0.29
5	0.31	0.33	0.31	0.29	0.28	0.28
6	0.31	0.32	0.31	0.29	0.29	0.30
7	0.29	0.33	0.31	0.29	0.29	0.30
8	0.31	0.34	0.31	0.29	0.29	0.29
9	0.31	0.33	0.31	0.30	0.30	0.34
10	0.32	0.34	0.32	0.30	0.31	0.31
11	0.31	0.33	0.32	0.29	0.29	0.28
12	0.31	0.34	0.32	0.29	0.27	0.28
13	0.30	0.33	0.31	0.29	0.30	0.29
14	0.30	0.33	0.31	0.28	0.28	0.28
15	0.29	0.33	0.33	0.31	0.29	0.29
16	0.30	0.34	0.33	0.30	0.29	0.32
17	0.29	0.31	0.31	0.31	0.30	0.32
18	0.29	0.33	0.34	0.32	0.32	0.30
19	0.27	0.35	0.33	0.30	0.29	0.29
20	0.25	0.24	0.31	0.30	0.29	0.28
21	0.29	0.32	0.31	0.29	0.29	0.30
22	0.28	0.35	0.32	0.29	0.29	0.29
23	0.28	0.33	0.33	0.29	0.28	0.28
24	0.29	0.33	0.32	0.31	0.32	0.34
25	0.28	0.33	0.32	0.29	0.29	0.29

Tabela 17. Valores de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$) no dia
12/10/89 para os 25 pontos e 6 profundidades.

Pontos	25 Cm	50 Cm	75 Cm	100 Cm	125 Cm	150 Cm
1	0.37	0.39	0.38	0.34	0.30	0.29
2	0.38	0.39	0.35	0.31	0.30	0.31
3	0.36	0.35	0.33	0.32	0.30	0.30
4	0.38	0.37	0.31	0.29	0.29	0.30
5	0.36	0.35	0.32	0.29	0.28	0.28
6	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.30
7	0.32	0.34	0.32	0.29	0.29	0.29
8	0.36	0.39	0.35	0.30	0.29	0.29
9	0.32	0.33	0.31	0.30	0.30	0.34
10	0.36	0.38	0.36	0.32	0.32	0.33
11	0.36	0.36	0.32	0.29	0.36	0.28
12	0.36	0.37	0.33	0.29	0.28	0.28
13	0.35	0.34	0.32	0.30	0.30	0.29
14	0.35	0.35	0.31	0.28	0.28	0.27
15	0.33	0.34	0.33	0.30	0.29	0.29
16	0.32	0.34	0.32	0.29	0.29	0.32
17	0.29	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31
18	0.33	0.35	0.34	0.32	0.30	0.29
19	0.33	0.38	0.34	0.30	0.29	0.29
20	0.29	0.23	0.31	0.29	0.29	0.28
21	0.34	0.33	0.31	0.29	0.29	0.29
22	0.29	0.34	0.31	0.28	0.29	0.29
23	0.32	0.33	0.31	0.30	0.28	0.29
24	0.30	0.32	0.32	0.31	0.32	0.33
25	0.28	0.33	0.32	0.30	0.29	0.30

Tabela 18. Valores de armazenamento medio ao longo da transeção até 150 cm de profundidade, calculados pelo metodo Trapezoidal, variâncias devido às medidas de θ [$s_1^2(\hat{S})$] e ao metodo de integração [$s_2^2(\hat{S})$], variância total [$s^2(\hat{S})$], desvio padrão [$s(\hat{S})$] e do coeficiente de variação (C.V.), nas datas de 2/3/89 a 12/10/89.

DATA	$\hat{S}$	$s_1^2(\hat{S})$	$s_2^2(\hat{S})$	$s^2(\hat{S})$	$s(\hat{S})$	C V
	m m	m m ²	m m ²	m m ²	m m	%
02/03	544,0	1,48E+02	1,84E+01	1,66E+02	12,9	2,4
16/03	553,6	1,55E+02	3,14E+01	1,87E+02	13,7	2,5
30/03	545,2	1,52E+02	1,30E+01	1,65E+02	12,8	2,3
20/04	526,3	1,23E+02	3,34E+01	1,56E+02	12,5	2,4
04/05	479,8	1,21E+02	1,29E+01	1,34E+02	11,6	2,4
24/05	472,3	9,46E+01	2,86E+01	1,23E+02	11,1	2,4
12/06	475,9	1,18E+02	5,41E+00	1,24E+02	11,1	2,3
29/06	472,0	8,90E+01	1,13E+01	1,00E+02	10,0	2,1
18/07	462,7	1,00E+02	3,44E+01	1,33E+02	11,6	2,5
03/08	466,7	1,01E+02	2,89E+00	1,04E+02	10,2	2,2
17/08	465,3	9,01E+01	9,40E+00	9,97E+01	10,0	2,2
06/09	463,0	8,75E+01	2,11E+01	1,09E+02	10,4	2,2
28/09	457,2	7,92E+01	2,58E+01	1,05E+02	10,2	2,2
12/10	479,9	2,41E+02	1,70E+01	2,58E+02	16,1	3,4

Tabela 19. Valores de armazenamento médio ao longo da transeção até 150 cm de profundidade, calculados pelo método de Simpson, variâncias devido às medidas de θ [$s_1^2(\hat{S})$] e ao método de integração [$s_2^2(\hat{S})$], variância total [$s^2(\hat{S})$], desvio padrão [$s(\hat{S})$] e do coeficiente de variação (C.V.), nas datas de 2/3/89 a 12/10/89.

DATA	$\hat{S}$ m m	$s_1^2(\hat{S})$ m m ²	$s_2^2(\hat{S})$ m m ²	$s^2(\hat{S})$ m m ²	$s(\hat{S})$ m m	C V %
02/03	543,3	1,11E+02	5,33E-04	1,11E+02	10,5	1,9
16/03	552,7	1,21E+02	1,03E-03	1,21E+02	11,0	2,0
30/03	545,0	1,20E+02	5,43E-04	1,20E+02	10,9	2,0
20/04	525,1	9,32E+01	1,31E-03	9,32E+01	9,6	1,8
04/05	478,0	9,64E+01	5,02E-04	9,64E+01	9,8	2,1
24/05	471,0	7,29E+01	1,36E-03	7,29E+01	8,5	1,8
12/06	475,4	9,45E+01	1,59E-04	9,45E+01	9,7	2,0
29/06	471,3	6,79E+01	4,46E-04	6,79E+01	8,2	1,7
18/07	461,2	7,49E+01	1,72E-03	7,49E+01	8,7	1,9
03/08	466,5	7,88E+01	7,19E-05	7,88E+01	8,9	1,9
17/08	466,5	7,09E+01	3,46E-04	7,09E+01	8,4	1,8
06/09	461,9	6,85E+01	1,00E-03	6,85E+01	8,3	1,8
28/09	455,9	6,32E+01	1,25E-03	6,32E+01	8,0	1,8
12/10	479,3	2,06E+02	6,59E-04	2,06E+02	14,3	3,0

medida da umidade do solo [$s_1(\hat{S})$] e ao método de integração [$s_2(\hat{S})$] e os coeficientes de variação, calculados pelos métodos Trapezoidal e de Simpson, respectivamente, para as datas 2/3/89 a 12/10/89.

As Figuras 4 e 5 apresentam a distribuição dos armazenamentos estimados no tempo com os respectivos erros pelos métodos Trapezoidal e de Simpson e a Figura 6 os valores de precipitação + irrigação ocorridas durante o tempo de condução do experimento.

De acordo com as Tabelas 18 e 19 e as Figuras 4 e 5 nota-se que os armazenamentos estimados sofreram pequeno aumento da primeira para a segunda data (2/3 para 16/3) e daí em diante diminuíram até a décima terceira data (28/9) quando em 12/10 voltaram a aumentar. Nestas duas datas, quando o solo apresentava maior teor de água (16/3 e 12/10), a dispersão dos dados em torno da média (desvio padrão) oscilaram entre 13,7 a 16,1 e 11,0 a 14,3 mm, respectivamente, para os métodos Trapezoidal e de Simpson. Estes desvios da média do armazenamento foram os maiores observados, porém, são considerados baixos pois representam coeficientes de variação da ordem de 2,5 e 3,4 e 2,0 e 3,0 %, respectivamente.

Atribui-se este maior afastamento da média à variabilidade da aplicação da água, pois nestas duas datas, o solo foi irrigado (irrigação por aspersão) antes da

Figura 4. Valores de armazenamento médio até 150 cm, com os respectivos desvios da média, calculados pelo método numérico de integração Trapezoidal, durante o período de condução do experimento.

Figura 5. Valores de armazenamento médio até 150 cm, com os respectivos desvios da média, calculados pelo método numérico de integração de Simpson, durante o período de condução do experimento.

Figura 6. Valores de precipitação + irrigação ocorridas durante a condução do experimento.

coleta dos dados de umidade no campo e de acordo com DOURADO NETO (1969) o sistema não distribui a água uniformemente sobre a superfície do solo.

Os baixos valores de CV obtidos em todas as datas são decorrentes do fato de que os armazenamentos estimados até 150 cm são uma média dos 25 valores obtidos ao longo da transeção nas seis profundidades estudadas (Figura 2), o que justifica estes valores de CV baixos e a semelhança dos armazenamentos estimados pelos métodos utilizados (Trapezoidal e Simpson).

É importante ressaltar que, embora os armazenamentos estimados pelos dois métodos sejam muito semelhantes, o método de Simpson é mais preciso, apresentando um menor erro em relação ao armazenamento médio. Deve-se destacar também que o erro de integração do método de Simpson foi cerca de 160 vezes menor que o do método Trapezoidal. Analizando-se as variâncias devido à umidade $s_1^2(S)$ e as variâncias devido ao método de integração $s_2^2(S)$ para ambos os métodos, verifica-se que a contribuição do erro de integração no erro total é insignificante quando comparado ao erro devido à determinação da umidade (Tabelas 18 e 19). Esse fato evidencia a grande importância dos procedimentos de calibração que via de regra é a principal fonte de erro das sondas de neutrons na determinação de θ .

4.2 Número de tubos de acesso de sonda para estimar o armazenamento médio

Para calcular o número de tubos (N) para estimar, com um erro previamente estabelecido, os armazenamentos médios, para diferentes níveis de significância, foi aplicado o Teorema Central do Valor Limite.

As Figuras 7 a 20 apresentam os autocorrelogramas estimados e os diagramas de probabilidade acumulada para os dados de armazenamentos de água para as datas de condução do experimento. Os autocorrelogramas mostram que os dados de armazenamento dos 25 tubos são independentes enquanto que os diagramas de probabilidade acumulada refletem que os dados de armazenamento, apesar de serem apenas 25 tubos, podem ser considerados normais.

Um aspecto que deve ser salientado é o de que esta análise da independência dos dados e da sua distribuição de frequência tem limitações, porque trabalhou-se apenas com 25 dados de armazenamento e, de acordo com JOURNEL & HUIJBREGTS, (1978), são necessários, no mínimo, 50 dados para se trabalhar com segurança e se avaliar a distribuição de frequência. Outros testes foram realizados para verificar a distribuição de frequência (qui-quadrado), usando-se o programa Statgraph, porém sem êxito, devido ao pequeno número de dados disponíveis.

Figura 7. Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 2/3/89.

Figura 8. Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 16/3/89.

Figura 9. Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 30/3/89.

Figura 10. Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 20/4/89.

Figura 11. Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 4/5/89.

Figura 12. Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 24/5/89.

Figura 13. Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 12/6/89.

Figura 14. Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 29/6/89.

Figura 15. Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 18/7/89.

Figura 16. Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 3/8/89.

Figura 17. Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 17/8/89.

Figura 18. Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 6/9/89.

Figura 19. Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 28/9/89.

Figura 20. Autocorrelograma estimado e diagrama de probabilidade acumulada para dados de armazenamento de água até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada. Data: 12/10/89.

Os valores de N são mostrados na Tabela 20 e observa-se que N está diretamente relacionado com a variância dos dados. Assim, nota-se que, para uma probabilidade de 95 %, o número de tubos variou de 79 para uma variância de 464 mm^2 , até 22, para uma variância de 128 mm^2 , correspondentes a 99 % de precisão na estimativa da média. Este decréscimo do número de tubos se mantém a medida que se aumenta o erro na estimativa da média. Desta forma, observa-se que, para uma precisão de 96 %, N passa de 5 tubos, para a maior variância, para 2 tubos nas demais.

Para uma probabilidade de 90 % N variou de 56 a 3 para a maior variância e de 15 a 1 para a menor variância, correspondendo a 99 e 96 % de precisão na estimativa da média, respectivamente.

Este maior número de tubos necessários para a estimativa do armazenamento em função da maior variância dos dados, também foi observado por VILLAGRA et alii (1988), que trabalharam com tensiômetros para estimar a umidade média do mesmo solo em uma profundidade. Convém ressaltar que no presente caso, os dados foram coletados no período de 2/3/89 a 12/10/89. Em 12/10/89 quando da coleta dos dados de umidade no campo com a sonda de neutrons, a parcela experimental havia sido irrigada dois dias antes, e de acordo com o discutido no capítulo 4.1, a irrigação por aspersão leva a obtenção de armazenamentos variáveis ao

TABELA 20. Número de tubos de acesso da sonda para estimar o armazenamento médio até 150 cm de profundidade calculados através da equação (18).

DATA	S mm	s2(S) mm	* t				* * t			
			N 0.01	N 0.02	N 0.03	N 0.04	N 0.01	N 0.02	N 0.03	N 0.04
2/3	538	293	39	10	4	2	27	7	3	2
16/3	547	271	35	9	4	2	25	6	3	2
30/3	537	268	36	9	4	2	25	6	3	2
20/4	523	224	31	8	3	2	22	6	2	1
4/5	479	178	30	7	3	2	21	5	2	1
24/5	473	162	28	7	3	2	20	5	2	1
12/6	474	128	22	5	2	1	15	4	2	1
29/6	470	140	24	6	3	2	17	4	2	1
18/7	464	162	29	7	3	2	20	5	2	1
3/8	463	147	26	7	3	2	19	5	2	1
17/8	463	157	28	7	3	2	20	5	2	1
6/9	462	146	26	7	3	2	19	5	2	1
28/9	457	135	25	6	3	2	17	4	2	1
12/10	475	464	79	20	9	5	56	14	6	3
			* t=1.96 para (1- α)=0.95				* * t=1.645 para (1- α)=0.9			

longo da transeção e com alta dispersão dos dados em torno da média.

4.3 Desvios relativos (D R) dos armazenamentos

Os desvios relativos foram calculados através dos dados apresentados na Tabela 21 de acordo com a equação (13) e seus valores são apresentados na Tabela 22.

A Figura 21 mostra os desvios relativos médios dos armazenamentos e seus respectivos desvios para cada tubo de acesso da sonda de neutrons em todas as datas estudadas, apresentadas em ordem crescente. Através desta Figura pode-se verificar que existe grande variabilidade dos desvios relativos médios, mostrando diferenças marcantes entre os locais de coleta na transeção, indicando que esta quantificação dos desvios é importante quando da sua utilização em aplicações agrônômicas. Desta forma, torna-se imprescindível que se eleja aqueles tubos que menor variação apresentem em torno da média durante um longo período de tempo, ou seja, aqueles que apresentam estabilidade no tempo, para que se possa reduzir o número de observações em futuros experimentos. Esta redução é necessária, primeiro, pelo aspecto econômico, pois o custo dos tubos de acesso da sonda de neutrons é elevado; segundo, pelo aspecto de tempo necessário para manusear a

Tabela 21. Valores de armazenamento médio (6 profundidades) calculados pelo método Trapezoidal simplificado ($\bar{\theta} \times L$) ao longo da transeção no período de condução do experimento.

TUBOS	2/3	16/3	30/3	20/4	4/5	24/5	12/6	29/6	18/7	3/8	17/8	6/9	28/9	12/10
1	533	567	541	525	488	475	481	475	471	473	467	465	459	522
2	566	570	563	550	490	479	482	479	477	478	480	480	471	510
3	519	535	529	519	468	461	463	463	459	463	465	461	456	489
4	509	552	545	530	473	470	471	471	464	460	461	462	454	486
5	536	541	536	518	468	462	463	463	455	463	462	458	451	473
6	527	544	532	514	465	460	471	465	458	462	460	460	454	472
7	530	537	530	525	485	477	472	466	464	461	462	464	454	461
8	533	552	540	536	489	479	477	473	468	467	467	465	459	495
9	566	569	555	545	497	493	489	485	497	478	484	482	473	476
10	542	561	559	543	499	493	495	489	486	483	482	479	472	516
11	536	549	545	536	492	482	479	475	462	457	465	462	455	491
12	543	550	544	528	487	477	482	473	466	457	465	465	452	477
13	535	553	549	528	485	484	479	477	465	467	467	468	457	474
14	525	541	534	510	471	462	469	462	452	452	450	448	445	459
15	526	523	512	509	474	465	476	466	460	469	459	458	459	469
16	562	559	544	524	473	479	471	475	473	465	469	470	471	471
17	558	551	532	520	475	473	469	465	465	464	457	461	460	457
18	549	560	561	530	486	483	486	484	477	473	471	469	472	482
19	545	554	541	527	480	471	475	472	464	466	462	459	454	479
20	487	499	485	475	436	435	437	431	420	419	420	420	413	421
21	530	532	524	515	486	472	471	467	455	460	453	452	449	482
22	536	539	532	516	472	473	471	467	458	454	453	454	454	450
23	523	526	528	511	465	462	463	457	454	456	455	455	450	455
24	568	571	551	539	494	498	488	492	470	478	482	479	476	477
25	531	533	522	512	467	467	465	462	457	461	465	460	453	454

Tabela 22. Desvios relativos dos armazenamentos com os respectivos desvios para cada tubo de acesso da sonda, em todas as datas estudadas.

PONTOS	2/3	16/3	30/3	20/4	4/5	24/5	12/6	29/6	18/7	3/8	17/8	6/9	29/9	12/10	MEDIA	DESVIO
1	-1.0	3.7	0.7	0.5	1.9	0.4	1.4	1.1	1.7	2.1	0.8	0.6	0.1	9.9	1.70	2.52
2	5.1	4.2	4.7	5.1	2.3	1.0	1.7	1.8	2.8	3.2	3.7	3.9	3.1	7.4	3.57	1.62
3	-3.6	-2.1	-1.5	-0.9	-2.3	-2.6	-2.3	-1.4	-1.1	0.0	0.4	-0.2	-0.3	2.9	-1.07	1.55
4	0.1	1.0	1.4	1.3	-1.1	-0.8	-0.6	0.1	0.1	-0.8	-0.4	0.0	-0.8	2.2	0.12	0.96
5	-0.3	-1.0	-0.3	-1.1	-2.3	-2.3	-2.3	-1.5	-1.9	-0.2	-0.3	-1.0	-1.3	-0.5	-1.17	0.78
6	-2.0	-0.5	-1.0	-1.9	-2.8	-2.8	-0.6	-1.1	-1.1	-0.3	-0.7	-0.5	-0.6	-0.6	-1.18	0.80
7	-1.6	-1.8	-1.3	0.3	1.2	0.8	-0.5	-0.8	0.1	-0.4	-0.3	0.3	-0.7	-3.0	-0.55	1.08
8	0.0	1.0	0.5	2.4	2.1	1.0	0.7	0.6	0.9	0.8	0.8	0.6	0.3	4.2	1.13	1.05
9	5.1	4.2	3.4	4.2	3.9	4.1	3.3	3.2	5.0	3.1	4.5	4.3	3.5	0.2	3.71	1.15
10	0.7	2.5	4.0	3.8	4.2	4.3	4.5	4.1	4.9	4.3	4.0	3.6	3.3	3.5	4.04	1.60
11	-0.5	0.4	1.4	2.4	2.7	1.9	1.2	1.0	-0.2	-1.4	0.5	-0.1	-0.5	3.4	0.88	1.34
12	0.9	0.5	1.2	0.8	1.7	0.8	1.8	0.6	0.5	-1.3	0.5	0.6	-1.1	0.5	0.57	0.83
13	-0.5	1.1	2.2	0.9	1.3	2.3	1.2	1.4	0.9	0.8	0.7	1.2	0.1	-0.3	0.95	0.78
14	-2.2	-1.0	-0.6	-2.6	-1.7	-2.3	-1.1	-1.8	-2.5	-2.5	-2.8	-3.1	-2.6	-3.4	-2.16	0.79
15	-2.4	-4.3	-4.7	-2.7	-0.9	-1.7	0.6	-0.8	-0.7	1.2	-0.8	-0.9	0.5	-1.3	-1.35	1.64
16	4.5	2.3	1.3	0.2	-0.1	1.2	-0.5	1.1	2.0	-0.1	1.3	1.7	3.1	-0.9	1.20	1.43
17	3.6	0.7	-1.0	-0.7	-0.8	-0.1	-1.0	-1.1	0.2	0.1	-1.4	-0.4	0.5	-3.9	-0.38	1.54
18	2.0	2.5	4.4	1.3	1.5	2.1	2.6	3.0	2.9	2.1	1.6	1.4	3.3	1.5	2.30	0.85
19	1.3	1.4	0.7	0.7	0.3	-0.5	0.2	0.4	0.0	0.5	-0.3	-0.7	-0.6	0.9	0.30	0.65
20	-9.5	-8.7	-9.8	-9.2	-9.0	-8.1	-7.7	-8.3	-9.5	-9.6	-9.3	-9.1	-8.5	-11.4	-9.11	0.87
21	-1.5	-2.8	-2.5	-1.7	1.6	-0.3	-0.7	-0.7	-1.9	-0.7	-2.3	-2.1	-1.8	-2.8	-1.45	1.15
22	-0.4	-1.5	-1.0	-1.5	-1.4	0.0	-0.6	-0.7	-1.2	-2.1	-2.2	-1.7	-0.6	-5.3	-1.44	1.23
23	-1.9	-3.9	-1.8	-2.4	-2.8	-2.3	-2.3	-2.8	-2.0	-1.6	-1.8	-1.5	-1.5	-4.2	-2.33	0.81
24	5.6	4.5	2.6	2.9	3.2	5.2	3.0	4.6	1.4	3.2	4.0	3.5	4.1	0.5	3.46	1.34
25	-1.3	-2.4	-2.9	-2.1	-2.4	-1.3	-1.9	-1.8	-1.3	-0.6	-0.2	-0.5	-0.9	-4.4	-1.73	1.08

Figura 21. Desvios relativos médios dos armazenamentos calculados através da equação (13) com os respectivos desvios para cada tubo de acesso em todas as datas estudadas.

sonda de neutrons e anotar os dados, pois são necessárias duas pessoas, ocupando, aproximadamente, 4 horas de trabalho para se fazer as leituras nos 25 tubos de acesso da sonda ao longo da transeção, nas seis (6) profundidades estudadas (150 leituras).

Como pode ser visto na FIGURA 21, os tubos cujos desvios médios menos se afastam do armazenamento médio estimado em todo o período são os tubos 4, 19, 17, 7 e 12. Desta forma, estes tubos poderiam ser os escolhidos para, posteriormente, estimar o armazenamento médio daquela área com o menor erro possível.

4.4 BALANÇO HIDRICO

A Tabela 3 mostra os potenciais mátricos (cm de água) a 135 e a 165 cm de profundidade, o potencial médio (cm de água) a 150 cm de profundidade, a condutividade hidráulica do solo (cm/dia), calculada através da equação 14; os potenciais totais (cm de água) a 135 e a 165 cm de profundidade com os gradientes de potencial e os valores de fluxo de água (mm/dia) na profundidade de 150 cm, calculados pela equação 15. Os dados de potenciais mátrico e total estão expressos em valores absolutos (módulo de cm de água).

A Tabela 23 apresenta, para cada data de coleta de dados, os valores de drenagem profunda (DP em mm), a

Tabela 23. Valores usados para a estimativa da evapotranspiração (ET) através da equação (17) e relação entre ET e ECA (R) em cada período de leitura com a sonda de neutrons.

Período	D P (m m)	ΔS (m m)	P+I (m m)	ET c (m m)	E CA (m m)	R
02/03-15/03	-7,053	+8,50	38,8	-23,25	-68,18	0,341
16/03-29/03	-4,699	-9,40	59,2	-63,90	-72,57	0,881
30/03-19/04	-10,322	-13,90	81,8	-85,38	-106,96	0,798
20/04-03/05	-3,000	-44,70	38,8	-80,50	-65,40	1,231
04/05-23/05	-2,067	-5,60	7,6	-11,13	-73,56	0,151
24/05-11/06	-1,154	+0,70	50,7	-48,85	-48,07	1,016
12/06-28/06	-0,533	-3,60	6,0	-9,07	-41,84	0,217
29/06-17/07	-0,441	-6,60	0,0	-6,16	-56,04	0,110
18/07-02/08	-0,558	-0,30	85,2	-84,94	-49,68	1,710
03/08-16/08	-0,434	0,00	0,0	+0,43	-57,22	-0,008
17/08-05/09	-0,590	-1,10	33,6	-34,11	-86,42	0,395
06/09-27/09	-0,630	-5,00	27,5	-31,87	-91,64	0,348
28/09-12/10	-0,502	+18,00	25,2	-6,70	-85,47	+0,078

variação do armazenamento (ΔS em mm) entre duas datas, a precipitação + irrigação ($P + I$ em mm), a evaporação de tanque classe A (ECA em mm), a evapotranspiração (ET em mm) calculada através da equação (17) e a relação entre a evapotranspiração e a evaporação do tanque classe A (R).

A relação R (ET/ECA) na estação chuvosa, quando o solo está coberto de vegetação, normalmente oscila em torno de 0,8. Na Tabela 23 nota-se que R variou bastante e isto foi decorrente das condições climáticas e do solo reinantes nos períodos de condução do experimento. Desta forma, verifica-se que de 2/3/89 a 11/6/89 quando ocorreram precipitações bem distribuídas a relação R esteve dentro da oscilação esperada, com exceção do período de 4/05/89 a 23/05/89 quando R caiu para 0,15 devido a pouca ocorrência de chuva (apenas 7,6 mm). A partir de 12/06/89 até 12/10/89 a precipitação pluviométrica diminuiu bastante (Tabela 22) e R alcançou valores bem baixos em torno de 0,1 a 0,4, indicando a dificuldade do estabelecimento de culturas comerciais na área, porém uma exceção foi registrada no período de 18/07/89 a 2/08/89 quando a precipitação foi alta da ordem de 85,2 mm e a relação R foi igual a 1,7.

Analisando a variação do armazenamento entre o período mais úmido e o mais seco, ou seja, de 16/03/89 a 28/09/89 verifica-se que esta variação ΔS foi de apenas 90 mm até a profundidade de 150 cm (Figura 22), o que

evidencia os baixos valores de R encontrados e mostra que qualquer cultura não suportaria esta condição de estresse hídrico por um período superior a 18 dias sem que fizesse necessário o uso de irrigação.

Na mesma área de condução deste experimento, REICHARDT et alii, 1990 em outros trabalhos verificaram a ocorrência de grande variabilidade do solo, acarretando uma variação no armazenamento de água e nos fluxos de drenagem profunda, promovendo variações no cálculo do balanço hídrico ao longo da mesma transeção em uma determinada data. Esta variabilidade é importante e deve ser levada em consideração quando da elaboração de projetos e ~~tomadas~~ de conclusões dos resultados obtidos.

Figura 22. Variação máxima do armazenamento até 150 cm de profundidade do solo Terra Roxa Estruturada no período de 16/3/89 a 28/9/89.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos propostos no presente trabalho, e em função dos resultados obtidos, pode-se concluir que :

i.) a técnica numérica de integração de Simpson conduz a obtenção de armazenamentos de água pelo solo mais precisos, quando comparada com a técnica Trapezoidal. O erro de integração do método de Simpson foi cerca de 160 vezes menor que o erro de integração do método Trapezoidal.

ii.) o armazenamento de água no solo apresentou uma grande variabilidade ao longo da transeção, porém, se manteve estável no tempo Apesar da grande diferença dos erros dos métodos de integração, os erros totais do armazenamento foram praticamente independentes do método de integração. Isto mostra a importância do erro envolvido na medida da umidade do solo, que foi muito maior que o de integração.

iii.) para uma estimativa de um valor médio de armazenamento de água com um erro pré-fixado de 4 %, a um nível de 95 % de probabilidade, são necessários 5 tubos de acesso de sonda.

iv.) no período de condução do experimento, que abrangeu períodos úmidos e secos, a variação total do armazenamento até 150 cm de profundidade, foi de 90 mm, indicando uma

baixa disponibilidade de água no perfil.

v.) o perfil de solo sempre se apresentou sob condições de drenagem na profundidade de 150 cm, não tendo sido observado nenhum período com ascensão capilar;

vi.) a drenagem profunda representou cerca de 6 % das perdas totais de água no período estudado, enquanto a ET 94 %.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*.
São Paulo, Livroceres Ltda.. 1985. 348 p.
- CARNAHAN, B.; LUTHER, H.A. & WILLES, J.O. *Applied numerical methods*. New York, John Willey & Sons, Inc., 1969. 604 p.
- CARNEIRO, C. & DE JONG, E. In situ determination of the slope of the calibration curve of a neutron probe using a volumetric technique. *Soil Sci.*, Baltimore, 139: 250-254, 1985.
- CERVELINI, A.; SALATI, E.; BARROS FERRAZ, E.S.; VILLA NOVA, N.A.; REICHARDT, K. ; DEDICO, A. OMETTO, J.C. & PEDRO Jr, M.J. *Análise dos dados meteorológicos de Piracicaba*, Piracicaba (SP), ESALQ-USP, Boletim Científico N°36. 1973. 26 p.
- CISSE, L. & VACHAUD, G. Effet d'un amendement organique sur l'infiltration, les coefficients de transferts hydriques, et l'évaporation d'un sol sableux dégradé du Nord-Sénégal. *Hydrol. continent.*, 2 (1) : 15-28, 1987.

CISSE, L. & VACHAUD, G. Influence d'apports de matière organique sur la culture de mil et d'arachide sur un sol sableux du Nord-Sénégal. I. Bilans de consommation, production et développement racinaire. *Agronomie*, Paris, 8 (4) : 315-326, 1988.

CHAWLA, A.S. & TRIPATHI, S.K. Neutron moisture probe calibration for crop water management. In: *Proceedings of International Conference on Measurement of Soil and Plant Status*. Vol. 1- Soils. Logan. 1987. pag. 29-35.

COSTA, A.C.S. & FARIA, R.T. Calibração de duas sondas de neutrons em condições de campo e laboratório para tres latossolos do Estado do Paraná. *R. bras. Ci. Solo*. Aceito para publicação em 1989.

COUCHAT, P. Determination of calibration curve for the neutron moisture meter by chemical soil analysis. In: *Isotopes and radiation techniques in soil physics and irrigation studies*. FAO/IAEA Symp., Istambul, Jan. 12-16. 1967. pag. 67-82.

COUCHAT, P. Les applications de la méthode neutronique dans la recherche agronomique. IAEA Sm-267/42. *Isotope and radiations techniques in soil physics and irrigation studies*. IAEA, Viena. 1983.

DAVIS, J.C. *Statistics and data analysis in geology*. John Willey & Sons, New York. 1973 . 550 p.

DOURADO NETO, D. Variabilidade espacial das alturas de chuva e irrigação e de potenciais da solução do solo. Piracicaba (SP), ESALQ-USP, 1989. 80 p. (Dissertação de Mestrado).

ESTADOS UNIDOS. *Soil Taxonomy: a basic system of soil classification to making and interpreting soil surveys*. Washington, Agriculture Handbook N°436. 1979. 754 p.

GARDNER, W.R. Water Content: an review. In: *Proceedings of International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status*. Vol. 1 - Soils. Logan. 1987. p.7-9.

GREACEN, E.L. Soil water assessment by the neutron method. CSIRO, Division of Soils. Adelaide. 1981. 104 p.

GREMINGER, P.J.; SUD, Y.K. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of field-measured, soil-water characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49 : 1075-1082 . 1985.

HAVERKAMP, R.; VAUCLIN, M. & VACHAUD, G. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 1. Local Standpoint. *Soil Sci.* Baltimore. 137 (2): 78-90. 1984.

HEWLETT, J.D.; DOUGLAS, J.E. & CLUTTER, J.L. Instrumental and soil moisture variance using the neutron scattering method. *Soil Sci.*, Baltimore. 97 : 19-24. 1964.

HOLMES, J.W. Influence of bulk density of soil on the neutron meter calibration. *Soil Sci.*, Baltimore. 102 : 355-360 , 1966.

HOLMES, J.W. & JENQUINSON, A.F. Technique for using the neutron moisture meter. *Jour. of Agril. Engg. Res.* 3 : 199-201. 1959.

JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, Ch.J. *Mining geostatistics*. London, Academic Press, 1978. 600 p.

KACHANDSKI, R.G. & DE JONG, E. Scale dependence and temporal persistence of spatial patterns of soil water storage. *water Resources Research*. 24 (1) : 85-91. 1988.

LAL, R. The effect of soil texture and density on the neutron and density probe calibration for tropical soils. *Soil Sci.*, Baltimore. 177 : 183-190. 1974.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W.

Simple Field Methods for estimating the Unsaturated Hydraulic Conductivity. *Soil Sci Soc. Am. J.*, 44 : 3-7, 1980.

McHENRY, J.R. & GILL, A.C. The influence of bulk density, slow neutron absorber and time on the calibration of neutron soil moisture probes. In: *Isotopes and radiation techniques in soil physics and irrigation studies*, FAO / IAEA Symp., Istambul, Jan. 12-16. 1967. pag. 83- 97.

MOTA, F.S. *Meteorologia Agrícola* . 2^a ed. São Paulo, Nobel S.A. . 1967. 376 p.

MOUTONNET, P.; PLUYETTE, E.; EL MOURABIT, N. & COUCHAT, P.

Measuring the spatial variability of soil hydraulic conductivity using an automatic neutron moisture gauge. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 52 : 1521-1526. 1988.

ORTOLONI, A.A. & CAMARGO, M.B.P. Influência dos fatores climáticos na produção. In: *Ecofisiologia da produção agrícola*. CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O. & YAMADA, T., ed., Piracicaba (SP), Associação Brasileira para pesquisa da Potassa e do Fósforo. 1987. p. 71-81.

PAULETTO, E.A. Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água. Piracicaba (SP), ESALQ-USP . 1986. 133 p. (Tese de Doutorado).

PEREIRA, A.R. Balanço Hídrico de um solo Podzolizado de Lins e Marília cultivado com cafeeiros. *Bragantia*, Campinas, 45 (2) : 239-247. 1986.

RANZANI, G.; FREIRE, O. & KINJO, T. *Carta de solos do município de Piracicaba (SP)* . Piracicaba, ESALQ-USP, 1966. 85 p.

REICHARDT, K. *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. Fundação Cargil, Campinas, 1985. 485 p.

REICHARDT, K. *A água em sistemas agrícolas*. Editora Manole Ltda, São Paulo, 1987. 188 p.

REICHARDT, K.; GROHMANN, F.; LIBARDI, P.L. & QUEIROZ, S.V. *Spatial variability of physical properties of a tropical soil. II. Soil water retention curves and hydraulic conductivity*. CENA (BT 005), Piracicaba(SP). 1976. 24 p.

SCHUDEL, P. The accuracy of measurements of soil-water content made with a neutron-moisture meter calibrated gravimetrically in the field. *J. Hydrol.* 62 : 355-361 . 1983.

SINCLAIR, D.F. & WILLIAMS, J. Components of variance involved in estimating soil water content and water content charge using a neutron moisture meter. *Austr. J. Soil Res.* 17 : 237-247. 1979.

THORNTHWAITE, C.W. & MATHER, J.R. The water balance. *Publs clim. Dextel Inst. Tecnol., Centerton, N.J.* , 8 (1) : 104, 1955.

TURATTI, A.L.; VILLAGRA, M.M.; PONCE, J.E.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Variabilidade espacial do solo e sua implicação na calibração de sondas de neutrons. *R. bras. Ci. Solo. Campinas. Aceito para publicação em 1990.*

VAUCHAUD, G.; PASSERAT DE SILANE, A.; BALABANIS, P. & VAUCLIN, M. Temporal stability of spatial measured soil water probability density functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 49 : 822-827. 1985.

VILLAGRA, M.M.; MATSUMOTO, O.M.; BACCHI, O.O.S.; MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L. & REICHARDT, K. Tensiometria e variabilidade espacial em Terra Roxa Estruturada. *R. bras. Ci. Solo. Campinas*, 12 (3) : 205-210 . 1988.

VILLAGRA, M.M.; TURATTI, A.L. & REICHARDT, K. Estimativa da drenagem profunda em Terra Roxa Estruturada. *R. bras. Ci. Solo*. Campinas. Aceito para publicação em 1990.

VILLA NOVA, N.A. *Dados meteorológicos do município de Piracicaba*. ESALQ-USP-Departamento de Física e Meteorologia, 1989.

WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. Cap. 13 in: "*Application of Soil Physics*". Daniel Hillel (ed). Academic Press. 1980. 385 p.