

VARIABILIDADE DE MEDIDAS DE TENSIOMETRO  
EM TERRA ROXA ESTRUTURADA

MARIA DE LAS MERCEDES VILLAGRA  
Engenheira Agrônoma

Orientador: Prof. Dr. KLAUS REICHARDT

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: Energia Nuclear na Agricultura.

P I R A C I C A B A  
Estado de São Paulo - Brasil  
Agosto - 1988

VARIABILIDADE DE MEDIDAS DE TENSIÔMETRO EM TERRA ROXA ESTRUTURADA

MARIA DE LAS MERCEDES VILLAGRA

Aprovada em: 30.09.1988

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Klaus Reichardt	ESALQ/USP
Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi	ESALQ/USP
Prof. Dr. Antonio Fernando Lordelo Olitta	ESALQ/USP



Prof. Dr. KLAUS REICHARDT

Orientador

VARIABILIDADE DE MEDIDAS DE TENSÍOMETRO EM TERRA ROXA ESTRUTURADA

MARIA DE LAS MERCEDES VILLAGRA

Aprovada em: 30.09.1988

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Klaus Reichardt

ESALQ/USP

Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi

ESALQ/USP

Prof. Dr. Antonio Fernando Lordelo Olitta

ESALQ/USP



Prof. Dr. KLAUS REICHARDT

Orientador

"Hay hombres que de su cencia  
tienen la cabeza llena;  
hay sabios de todas menas;  
mas digo, sin ser muy ducho  
es mejor que aprender mucho  
el aprender cosas buenas."

("Martin Fierro", poema gauchesco argentino)

Autor: José Hernández (1872)

D E D I C A T O R I A

A mis padres, Elsa y Eduardo

## AGRADECIMIENTOS

- Al Profesor KLAUS REICHARDT, quien junto a su equipo de colaboradores, me brindó la oportunidad de compartir sus ideas y experiencias, en la búsqueda de nuevos conocimientos, permitiendo afianzarlos, en un ambiente de cordial informalidad.
- A los Profesores PAULO LIBARDI, SERGIO MORAES y NILSON VILLA NOVA, por su inestimable ayuda.
- Al personal de la Sección de Física de Suelos del CENA: OSNY, OTAVIO, ADEMIR y DUDU, por sus buenos consejos.
- A RAFFAELLA ROSSETTO, por su sincera amistad.
- A mis compatriotas y amigos, CÁRMEN y JOSÉ LUIS ARZENO y SEGUNDO VILLA, por su invalorable apoyo.
- A la UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES, por la posibilidad de realizar este curso.

## S U M Á R I O

	Página
RESUMO .....	v
SUMMARY .....	vii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1. Conceitos teóricos - Potencial da água no solo .....	3
2.2. O tensiômetro - Descrição do aparelho .....	7
2.3. Características dos tensiômetros - Tempo de resposta ..	9
2.4. Outros tipos de tensiômetro .....	11
2.5. Aplicações e desvantagens - Análise de erros .....	13
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	23
4.1. Teste de laboratório .....	23
4.2. Experimento de campo .....	26
4.2.1. Determinação do erro de localização .....	26
4.2.2. Determinação do número de tensiômetros ne- cessários .....	31
4.2.3. Determinação da curva de retenção .....	50
4.2.4. Determinação de umidade com sonda de nêutrons ...	52
5. CONCLUSÕES .....	57
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59

## VARIABILIDADE DE MEDIDAS DE TENSIÔMETRO EM TERRA ROXA ESTRUTURADA

Autora: MARIA DE LAS MERCEDES VILLAGRA

Orientador: Prof. Dr. Klaus Reichardt

**RESUMO**

O uso de tensiômetros para medida do potencial mático da água no solo é analisado em uma transeção de 30 instrumentos, instalados em Terra Roxa Estruturada (Paleudalf óxico), a uma profundidade de 25 cm, com espaçamento de 4 m. Os dados obtidos indicam que a variabilidade espacial do solo não pode ser desprezada na determinação do potencial mático quando são analisadas as variâncias local e instrumental, sendo a primeira mais importante que a segunda.

Os tempos de recuperação dos tensiômetros após um desequilíbrio (fluxagem, chuva ou irrigação) são tanto maiores quanto mais negativo o potencial mático. Demonstrou-se que as características do solo influem diretamente nestes tempos.

Foi também obtida, em condições de campo, uma curva característica de água no solo. A dispersão dos pontos, devida à variabilidade espacial do solo, permite seu uso apenas para estimativa dos valores médios de umidade do solo a partir de leituras de tensiômetros.

A calibração da sonda de nêutrons foi feita através de



amostragem ao longo da transeção e, novamente, a variabilidade do solo foi o principal problema.

A análise também indicou o número de pontos de amostragem para se obter um valor médio de potencial mátrico da água no solo, dentro de um determinado intervalo de confiança.

## VARIABILITY OF TENSIO METER MEASUREMENTS ON AN OXIC PALEUDALF

Author: MARIA DE LAS MERCEDES VILLAGRA

Adviser: Prof. Dr. Klaus Reichardt

**SUMMARY**

The use of tensiometers to measure soil water matric potential is analysed on a transect of thirty points, made across an Oxic Paleudalf soil field. Measurement depth was 25 cm from soil surface and the lag used was 4 m, totaling a strip of 120 m. Data indicate that soil variability cannot be neglected when measuring soil water potentials. Analysis of variance showed that local variability is much more important than instrumental variability.

Recovery times of tensiometers, defined as the time needed to come back to the same potential after a disequilibrium (e.g. flushing operation) are the greater the more negative the potential. It was demonstrated that soil characteristics influence these times.

A soil water retention curve was also obtained with tensiometer and neutron probe data. The dispersion of the points due to soil spatial variability, permits only the estimation of average soil water contents using tensiometer data.

The neutron probe was calibrated in the field, collecting

soil samples along the transect. Soil variability was again the main source of variation that affected the calibration.

The analysis also indicates number of measurement points of tensiometers in order to obtain average soil water potential values within given confidence intervals.

## 1. INTRODUÇÃO

A incorporação de terras irrigadas ao processo produtivo não só aumenta a produção por incremento da área total, mas também aumenta a produtividade pela diminuição do processo degradativo do solo ao permitir rotações com outras culturas anuais ou pela introdução de novas espécies de interesse econômico, cujas limitações sejam as suas necessidades hídricas.

Esta situação necessitará de informações técnicas do manejo de solo, práticas culturais e, principalmente, de técnicas de manejo de irrigação para as diferentes culturas, nas diversas condições edafoclimáticas das áreas em estudo.

O manejo adequado da irrigação consiste em aplicar-se água no solo no momento oportuno e em quantidade suficiente para atender às necessidades hídricas das culturas. Este procedimento é de fundamental importância para a obtenção de altas produtividades com economia de água e de energia.

Na literatura, existem recomendações de frequências fixas de irrigação para cada cultura. Embora possa ser prático, no sentido de programação das operações, este método acarreta déficits e excessos de água, uma vez que as condições climáticas são variáveis de ano para ano.

Deste modo, há necessidade do uso de métodos de campo que determinam, direta ou indiretamente, a disponibilidade de água no solo para as culturas, de acordo com as condições ambientais predominantes durante seu desenvolvimento. O tensiômetro tem sido o instrumento mais utilizado para a determinação do momento oportuno de irrigação, mediante a medição do potencial da água no solo na região das raízes.

Embora apresente grandes vantagens em relação a outros métodos, por ser um aparelho simples, barato, que não requer calibração e que fornece leituras diretas, ainda não tem sido estudada a quantidade destes que possam fornecer dados confiáveis e as fontes de erros mais comuns nas determinações para determinada área.

O objetivo do presente trabalho é quantificar os erros por meio de uma análise da variância total e identificar em que proporção eles se devem ao instrumento ou à localização no terreno. Além disso, procurar estimar que quantidade de tensiômetros seria necessária para uma boa medida de potencial da água no solo, para Terra Roxa Estruturada, levando-se em consideração a variabilidade do solo. Por último, tentar construir a curva de retenção de água no solo a partir de dados de leituras de potencial, efetuadas ao longo do experimento, com os dados de umidade estimada por meio de uma sonda de nêutrons previamente calibrada.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Conceitos teóricos - Potencial da água no solo

Os tensiômetros têm sido utilizados para medir a tensão da água em solos não saturados desde 1922 (GARDNER et alii, 1922).

O tensiômetro utilizado por RICHARDS & GARDNER (1936) é a combinação de uma membrana porosa e um medidor de pressão, para medida da tensão capilar ou a energia com que a água está retida no solo. O termo "energia" pode ser expresso como  $pF$ , definido como o logaritmo da altura da coluna de água (em centímetros) equivalente à tensão da água no solo ou de um potencial (energia por unidade de massa ou volume).

O conceito de potencial de água no solo substitui as categorizações arbitrárias que prevaleceram nas primeiras épocas da Física de Solos e que classificavam as diferentes formas de água no solo como "água gravitacional", "água capilar", "água higroscópica". A definição do Comitê de Terminologia da Física de Solos da Sociedade Internacional de Ciência do Solo é a seguinte: "O potencial total da água no solo é a quantidade de trabalho que deve ser realizado, por unidade de massa, volume ou peso de água pura, para transportar, reversível e

isotermicamente, uma quantidade infinitesimal de água desde um reservatório de água pura num nível determinado e à pressão atmosférica (estado de referência) para o solo no ponto considerado dentro do sistema solo-planta-atmosfera.

A água no solo está sujeita a uma variedade de forças as quais são a causa de seu potencial variar daquele da água pura. Tais forças resultam da atração da água pela matriz do solo, assim como da presença dos sais dissolvidos, da ação da pressão local na fase gasosa do solo e da ação do campo gravitacional. Assim, o potencial total da água no solo pode ser considerado como a somatória das contribuições de vários componentes:

$$\psi_t = \psi_g + \psi_o + \psi_m + \psi_p \dots\dots$$

sendo:  $\psi_t$  = potencial total da água no solo;

$\psi_g$  = potencial gravitacional;

$\psi_o$  = potencial osmótico;

$\psi_m$  = potencial matricial;

$\psi_p$  = potencial de pressão.

As reticências significam que a adição de novos potenciais é, teoricamente, possível.

A maior vantagem do conceito do potencial total está no fato de ser uma medida unificada, pela qual o estado da água pode ser medido em qualquer tempo e lugar dentro do sistema solo-planta-atmosfera (HARTMAN, 1987).

As dimensões do potencial da água no solo são energia por unidade de quantidade de água e as unidades dependem

do modo como essas quantidades são expressas:

- a) energia por unidade de massa:  $\text{joule.kg}^{-1}$ ;
- b) energia por unidade de volume de água (pressão).

Este é o método mais frequente de se expressar potencial e pode ser escrito em unidades como  $\text{joule.m}^{-3}$ , bar, atm, Pascal ( $\text{N.m}^{-2}$ ), etc.

- c) energia por unidade de peso de água (carga hidráulica).

Este método de expressão de potencial é também comum e suas unidades são de altura:  $\text{joule.N}^{-1} = \text{Nm.N}^{-1} = \text{m}$ .

Por facilidade de medida e cálculo, a unidade de energia por unidade de peso é a de maior emprego em cálculos de balanço hídrico, irrigação, etc, pois representa uma coluna (altura) de água no solo (LIBARDI, 1984; ROSE, 1966; REICHARDT, 1975).

O potencial gravitacional da água no solo, em cada ponto, está determinado pela altura desse ponto em relação a um nível de referência arbitrário. Se o ponto considerado está acima da referência, o potencial gravitacional é positivo; se o ponto em questão está abaixo da referência, o potencial gravitacional é negativo. Assim, o potencial gravitacional é independente das propriedades do solo; depende só da distância vertical entre a referência e o ponto em questão.

O potencial osmótico é atribuível à presença de solutos na água do solo. Os solutos diminuem a energia da água do solo. O potencial osmótico da água pura é zero; então, o potencial osmótico de uma solução, à mesma temperatura que a água pura, é negativo.



O potencial osmótico não atua como uma força de condução do fluxo de água, mas é importante em fluxos de água através das raízes, pois aí encontram-se membranas semi-permeáveis.

O potencial matricial é resultado das forças associadas com adsorção e capilaridade. A capilaridade resulta da tensão superficial da água e do ângulo de contato com as partículas sólidas. O solo também mostra adsorção, em formas de capas de hidratação sobre a superfície das partículas.

A presença destes dois mecanismos de interação da água no solo é particularmente importante em solos argilosos, estando influenciados também pela dupla camada elétrica e os cátions trocáveis presentes.

Em solos arenosos, a adsorção é relativamente desprezível e o efeito da capilaridade predomina.

Em geral, sendo o potencial matricial resultado desses dois mecanismos, eles não são facilmente separáveis. Conseqüentemente, o potencial matricial é o efeito total resultante da afinidade da água pela matriz do solo, incluindo os poros e as superfícies das partículas.

Em um solo saturado (abaixo do lençol freático), a água está à uma pressão hidrostática superior à pressão atmosférica; assim, seu potencial é considerado positivo (potencial de pressão hidrostática). Em condições de solo não saturado, acima do lençol freático, a água, submetida a fenômenos capilares, apresenta uma pressão negativa ou potencial matricial. Visto que o solo apresenta os dois potenciais, mas não simultaneamente, pode-se utilizar o termo "potencial de pressão". A vantagem de se unificar o potencial matricial e a pressão hidrostática,

permite considerar o perfil de solo completo em termos de um potencial contínuo, estendendo-se desde a zona saturada até a zona não saturada, acima e abaixo do lençol freático.

## 2.2. O tensiômetro - Descrição do aparelho

O tensiômetro é um instrumento que fornece leituras de potencial matricial da água do solo no campo, tendo sido largamente utilizado em pesquisa e manejo de irrigação.

O instrumento consta de uma cápsula porosa, geralmente de material cerâmico, conectada através de um tubo a um manômetro. Dentro do tubo, uma coluna contínua de água une a cápsula de cerâmica ao dispositivo de medida. Estando a cápsula em contato com o solo, a água no interior do tensiômetro estabelece o contato com a água do solo e, após algum tempo, se estabelece o equilíbrio.

Assim, a cápsula do tensiômetro funciona como uma "membrana", permitindo a livre passagem de água e solutos. Inicialmente, quando a água pura no interior do tensiômetro entra em contato com a água do solo, os solutos começam a difundir-se para o interior do tensiômetro através da cápsula, até que o equilíbrio do soluto seja estabelecido. Além do equilíbrio químico ou "dialítico" (TAYLOR & ACRCROFT, 1972), existem também equilíbrio hidráulico e térmico (ELRICK, 1967).

A cápsula pode ser construída de qualquer material, desde que resista à pressão submetida e permitindo que água e solutos pas-

sem livremente, mas impedindo a passagem de partículas de solo e ar. Geralmente, a cápsula é construída de cerâmica, mas podem ser utilizados outros materiais, como filtros plásticos, fibra de vidro e mesmo rochas porosas que já foram utilizadas com sucesso em certas condições (TAYLOR & ASHCROFT, 1972).

Um contato hidráulico perfeito entre a cápsula e o medidor de sucção precisa ser estabelecido, com a eliminação de todo ar do sistema. O ar dissolvido na água aparecerá quando as leituras estiverem próximas de 0,8 atm, podendo acarretar um atraso na resposta do aparelho (OLITTA, 1974).

Esta defasagem na resposta do aparelho poderá ser minimizada usando-se uma água livre de ar, mas poderá ser também decorrente da resistência hidráulica ao movimento da água no solo ou na parede da cápsula ou mesmo de contato entre o solo e a cápsula. Esta defasagem de tempo desaparece com o uso de tensiômetros em que não ocorre fluxo de água deste ou para o solo em resposta às variações de potencial de água no solo. Esses tensiômetros utilizam indicadores de grande sensibilidade, registrando rapidamente as variações de água no solo (LEONARD & LOW, 1962; MILLER, 1951).

Nos tensiômetros normalmente utilizados, ocorre fluxo para estabelecer a condição de equilíbrio. Assim, pode acontecer um movimento de água do solo para o aparelho ou então que alguma água seja adicionada ao solo, o que deveria causar uma modificação no potencial da água do solo imediatamente adjacente à cápsula. Considera-se que isto não tem significado quantitativo para controle da irrigação. Desde que exista esse movimento de água e solutos no interior do aparelho, o

tensiômetro não mede o potencial osmótico da água do solo, a menos que seja equipado com algum sensor especial para sais (OLITTA, 1974). Desse modo, o tensiômetro é limitado às medidas do potencial matricial até um máximo de 0,8 atm, quando, então, ocorrerá a ruptura da coluna de água ou a entrada de ar no sistema, igualando a pressão interna à atmosférica (HILLEL, 1971). Isto significa que o intervalo de umidade em que o tensiômetro pode ser utilizado é limitado.

RICHARDS (1949), estudando a resposta de tensiômetros em solos arenosos, estabeleceu que este intervalo de medida pode cobrir mais de 90% da água disponível. Ao contrário, em solos argilosos, com aproximadamente 42% de montmorilonita, a tensão pode variar de 200 a 800 cm de água para apenas 1% de variação de umidade (ABELE et alii, 1979).

Como a faixa de resposta é particularmente pequena, o tensiômetro se presta principalmente para controle da irrigação intensiva, sendo os instrumentos colocados em uma ou mais profundidades dentro da zona representativa das raízes (RICHARDS et alii, 1961).

### 2.3. Características dos tensiômetros - Tempo de resposta

A cápsula do tensiômetro deve ser analisada segundo suas características de entrada de ar ou pressão de borbulhamento, cujo valor está em torno de 1 atm para as cápsulas comerciais.

O tensiômetro precisa de tempo para atingir o equilíbrio com a tensão da água no solo. O tempo de resposta do equipamento depende das características do instrumento e da condutividade hidráulica do solo. Essas características são a "sensibilidade de medida" (RICHARDS & NEAL, 1937), que é definida como a variação na pressão registrada pelo dispositivo de medida pelo volume de água transferido de ou para o tensiômetro:

$$s = \frac{\Delta h}{\Delta V} \quad (\text{Pa} \cdot \text{m}^{-3})$$

e a condutância da cápsula, definida como o volume de líquido que atravessa a membrana porosa na unidade de tempo e pela diferença de tensão entre o interior e o exterior da cápsula:

$$k = \frac{\Delta V}{\Delta t \cdot \Delta h} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1})$$

Assim, o tempo de resposta, definido por RICHARDS (1949) é a medida da resposta total do instrumento a uma mudança no potencial da água no solo.

$$T_R = \frac{1}{k \cdot s}$$

Se o tensiômetro funcionasse sem transferência de água através da cápsula, o tempo de resposta seria zero e a condutividade hidráulica do solo não seria considerada.

Poucos instrumentos, no entanto, funcionam sem introduzir modificações dentro do sistema no qual a medida é feita e os tensiômetros não constituem exceção. A água que é transferida através da

câpsula constitui um distúrbio no sistema água-solo. O solo deve ser capaz de armazenar e transmitir a água que provocou o distúrbio suficientemente rápido e, assim, o tensiômetro estará exposto ao verdadeiro valor de tensão. Então, o tempo de resposta deveria ser tão curto quanto possível.

Assim, MILLER (1951) discute uma correção para tensiômetros que funcionam com fluxo de água. KLUTE & GARDNER (1961) mostram como as leituras dos tensiômetros podem ser corrigidas pelo efeito do tempo de resposta e analisam brevemente o efeito da condutividade hidráulica do solo sobre o tempo de resposta.

WATSON (1965,1967) e WATSON & JACKSON (1967) aplicaram a teoria do tempo de resposta considerando o solo como não limitante.

TOWNER (1980) estabelece um critério adequado para analisar o caso geral em que tanto o tensiômetro como o solo controlavam completamente o tempo de resposta.

#### 2.4. Outros tipos de tensiômetros

O custo relativamente baixo destes instrumentos, sua facilidade de instalação e sua condição de obter medidas diretas de potencial da água no solo, tem feito dos tensiômetros os aparelhos mais utilizados para determinação do potencial da água no solo em condições experimentais.

Considerando-se as numerosas vantagens dos tensiômetros,

(SCHMUGGE et alii, 1980), seu uso não tem sido extensivo como era de se esperar. Uma das causas é que o custo se eleva consideravelmente quando os mesmos são utilizados extensivamente a campo; também são facilmente danificáveis e requerem uma manutenção cuidadosa. Os tensiômetros equipados com manômetros de mercúrio, por outro lado, não são tão caros e são bastante sensíveis, mas requerem uma manutenção intensiva nas condições de campo e cuidados no manuseio do mercúrio.

Os transdutores de pressão têm sido utilizados com tensiômetros para determinação de gradientes de potencial no campo (BIANCHI, 1962; WATSON, 1967) e no laboratório (VACHAUD & THONY, 1971). Estudos feitos por KLUTE & PETERS (1962), RICE (1969) e ANDERSON & BURT (1977) mostram as vantagens do uso de transdutores para produzir leituras rápidas. Por outro lado, um bom transdutor de pressão é de alto custo (aproximadamente US\$ 500.00); por isso, apenas um é utilizado para monitorar vários tensiômetros através de uma válvula interruptora e de um sistema de registro automático. Com esse tipo de sistema, não é possível fazer medidas quando os tensiômetros estão muito espaçados uns dos outros, como acontece em campos irrigados. Por outro lado, estes sistemas automáticos são complexos, custosos e mais adequados para aplicações em pesquisa.

WATSON (1966) refere-se aos problemas das mudanças de pressão do ar no sistema do transdutor/tensiômetro, especialmente quando se utiliza solo seco ou em cerâmica fina no laboratório.

BAKKER (1978) utilizou um transdutor de pressão portátil conectado sequencialmente a tensiômetros instalados no campo, por meio de tubos de diâmetro pequeno. As desvantagens descritas por esse autor

foram a ocorrência de vazamentos de ar através da conexão dos tubos e que requer fluxagem para tirar o ar no momento da conexão. Uma conexão mal feita pode causar um dano irreparável no sistema. As leituras dependem da distância vertical entre o transdutor e o tensiômetro. MARTHALER et alii (1983) descrevem um sistema que consiste em um transdutor com o agregado de uma agulha de seringa e uma saída de leitura digital. Este sistema é de fácil uso e requer um mínimo de manutenção.

Com o objetivo de simplificar as leituras nos tensiômetros, PAES DE CAMARGO et alii (1982) apresentam um tensiômetro bastante simples de leitura direta, baseado na expansão de uma câmara de ar deixada propositalmente dentro do equipamento e cujo volume se relaciona com a sucção medida nesse momento.

## 2.5. Aplicações e desvantagens - Análise de erros

As vantagens da simplicidade de desenho e construção, o custo relativamente baixo, fácil instalação e operação dos tensiômetros por longos períodos, com manutenção adequada, fazem deles instrumentos adequados não somente para controle de irrigação mas também para monitorar gradientes de potencial no campo. Estes dados de gradiente podem ser usados em equações de fluxo e, com a determinação prévia de valores de condutividade hidráulica, pode-se calcular o movimento da água no solo.

Podem-se utilizar também sistemas com tensiômetros de



leituras positivas e negativas para ter conjuntamente medidas de elevação do lençol freático (piezométricas) e de potencial de água no solo.

Entre as desvantagens referidas por SCHMUGGE (1980), podem-se citar que os resultados são, geralmente, obtidos no intervalo de tensão que vai de 0 a 800 cm de  $H_2O$ ; que durante a instalação, podem-se quebrar facilmente; que os transdutores de pressão apresentam oscilações eletrônicas. Além disso, os tensiômetros obtêm medidas diretas de potencial da água no solo, mas são medidas indiretas de umidade do solo. Essa transferência requer conhecimento das curvas de retenção de umidade, características para cada solo. Essas curvas podem ser obtidas em laboratório ou no campo.

GREMINGER et alii (1985) evidenciam o papel da variabilidade nas leituras e indicam problemas no estabelecimento de curvas características de água no solo, obtidas em condições de campo, com auxílio da sonda de nêutrons. As observações foram ajustadas, usando-se equação proposta por VAN GENUCHTEN (1980), concluindo que a distância entre os tubos de acesso da sonda e os tensiômetros afetaram as medidas de potencial e de umidade do solo para a curva de retenção de umidade. A maior precisão foi obtida com distâncias inferiores a 10 metros.

Esta variabilidade de medida pode ser devida à variabilidade espacial do solo. A variabilidade espacial do solo não é um problema novo, tendo sido analisada de vários ângulos desde os primeiros anos deste século, como mostram REICHARDT et alii (1986).

A variabilidade espacial é, classicamente, expressa pela variância amostral e os coeficientes de variação. Nesse caso, é importante saber se a variância observada é realmente devida aos erros asso-

ciados à localização, os que podem estar distribuídos ao acaso ou podem ter uma estrutura espacial, ou ser devida aos erros provenientes do uso do instrumento de medição.

SINCLAIR & WILLIAMS (1979) fazem um estudo detalhado sobre os diferentes componentes da variância envolvidos na estimativa da umidade do solo quando se utiliza sonda de nêutrons. Entre outros autores, NIELSEN et alii (1973), CASSEL & BAUER (1975), KEISLING et alii (1977), GUMA'A (1978) e BELL et alii (1980), assumem que todas as medidas de umidade no campo são independentes umas das outras, desconsiderando sua localização. No entanto, com os conceitos estatísticos recentemente introduzidos nos estudos de Física do Solo por CAMPBELL (1978), RUSSO & BRESLER (1981) e VIEIRA et alii (1981), entre outros, é possível validar essa suposição de independência considerando a autocorrelação entre as medidas.

VAUCLIN et alii (1982) apresentam uma análise de variância para identificar os diferentes componentes (instrumental, de calibração e de localização) dos erros envolvidos na estimativa espacial dos valores de umidades médias provenientes das leituras da sonda. Todas as medidas, à uma profundidade específica, estavam normalmente distribuídas e não se observou estrutura espacial.

Em todos os trabalhos sobre tensiometria não se consideraram os erros envolvidos no uso de tensiômetros para medida do potencial matricial da água no solo. Uma exceção é o já mencionado trabalho de GREMINGER et alii (1985), que mostra, através de técnicas geoestatísticas, as variâncias que podem ser obtidas com o uso de tensiômetros no campo.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Com o propósito de determinar os erros envolvidos na medida do potencial mátrico da água no solo, realizou-se uma análise dos componentes de variância dessas medidas. A mesma pode ser dividida em variância instrumental e de localização dos tensiômetros. Assim, são consideradas duas etapas no trabalho: a primeira, realizada em laboratório, e a segunda, no campo. Em ambos os casos foram utilizados tensiômetros com cápsula de cerâmica, com manômetro de mercúrio, para medir o potencial mátrico da água no solo ( $\psi_m = \text{kPa}$ ), com uma aproximação de 1 mm Hg (0,126 kPa).

Os dados de potencial mátrico  $\psi_m$  (kPa) foram calculados a partir da seguinte expressão:

$$\psi_m \text{ (kPa)} = 0,0981 (-12,6 h_m + h_c + z) \quad (1)$$

onde:  $h_m$  é a altura da coluna no manômetro de mercúrio (cm Hg);  $h_c$  é a altura do nível de mercúrio na cuba até a superfície do solo (cm  $\text{H}_2\text{O}$ ), e  $z$  é a profundidade da cápsula (cm  $\text{H}_2\text{O}$ ); 0,0981 é o fator (f) de conversão dos valores de potencial matricial de cm  $\text{H}_2\text{O}$  a kPa.

Inicialmente, 10 dos 30 tensiômetros foram instalados num solo homogêneo, peneirado previamente, acondicionado num vaso, a uma profundidade de 25 cm. Com o intuito de determinar tanto o componente instrumental ( $s_I^2$ ) da variância total, como o tempo de recuperação dos

instrumentos após uma fluxagem, foram feitas leituras de  $\psi_m$  ao longo de um período de várias semanas para vários níveis de potencial mátrico (0 a -70 kPa). Como a perda de água no vaso se verificava lentamente e por evaporação, assumiu-se, em princípio, que a umidade era constante em todos os pontos.

Anteriormente à instalação dos tensiômetros, foi realizado um teste de condutância e borbulhamento, para se determinar a condutância média das cápsulas, segundo a seguinte expressão:

$$c = \frac{a \cdot \ln (2066 + H_1) / (2066 + H_2)}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

onde:  $c$  é a condutância da cápsula ( $\text{cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ ); 2066 surge da aplicação de 2 atm de pressão (1033 cm  $\text{H}_2\text{O}$ );  $H_1$  e  $H_2$  são alturas da coluna de água dentro do tubo de PVC, no início e no fim do teste;  $t_1$  e  $t_2$ , o tempo, em segundos, no início e no fim do teste;  $a$ , o diâmetro do tubo (cm).

A condutividade hidráulica das cápsulas foi calculada a partir de:

$$k = \frac{c \cdot l}{A} \quad (3)$$

onde:  $k$  é a condutividade hidráulica das cápsulas (cm/seg ou cm/h);  $l$  é a espessura da parede da cápsula (cm);  $A$  é a área média das cápsulas ( $\text{cm}^2$ ).

Em seguida, instalaram-se os 30 tensiômetros, como segunda etapa do trabalho, numa parcela localizada junto ao Posto Agro-Meteorológico do Departamento de Física e Meteorologia da Escola Supe-

rior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Nesse local, foi semeada uma cultura de feijão (Phaseolus vulgaris L.), variedade "goiano precoce". Os instrumentos foram instalados numa linha da cultura, distanciados 4 metros entre si, conjuntamente com os 30 tubos de alumínio para acesso da sonda de nêutrons, segundo o esquema da Figura 1. As medidas de precipitação foram obtidas da estação meteorológica já citada.

A calibração da sonda de nêutrons foi feita amostrando-se o solo, em três datas, ao longo da transeção, para determinação da umidade volumétrica ( $\theta$ ,  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) no laboratório. Com estes dados e a razão de contagem (CR) proveniente da relação entre as contagens por segundo a 25 cm de profundidade e as contagens por segundo no padrão (água), foi feita uma regressão linear, ajustando-se os dados pelo método dos mínimos quadrados. Os coeficientes de regressão são os seguintes:

$$\theta(\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}) = -0,0954 + 1,0424 \text{ CR} \quad (4)$$

A sonda de nêutrons, modelo SOLO-25, de fabricação francesa, permite leituras com uma precisão de  $0,01 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ .

Os tensiômetros foram instalados a 25 cm de profundidade, realizando-se as leituras de sonda à mesma profundidade. A escolha dessa profundidade deveu-se a que a maior quantidade de raízes da cultura se encontra nesse perfil. O solo em que se realizou o estudo pertence, segundo a classificação, a uma Terra Roxa Estruturada (Paleudalf óxido), segundo SOUZA et alii (1979), o qual possui as seguintes características morfológicas: horizonte Ap de 0-13 cm, franco-argiloso com estrutura forte, pequena a média, blocos sub-angulares, assentados sobre um horizonte B textural (Bt) de 86-106 cm, ar-

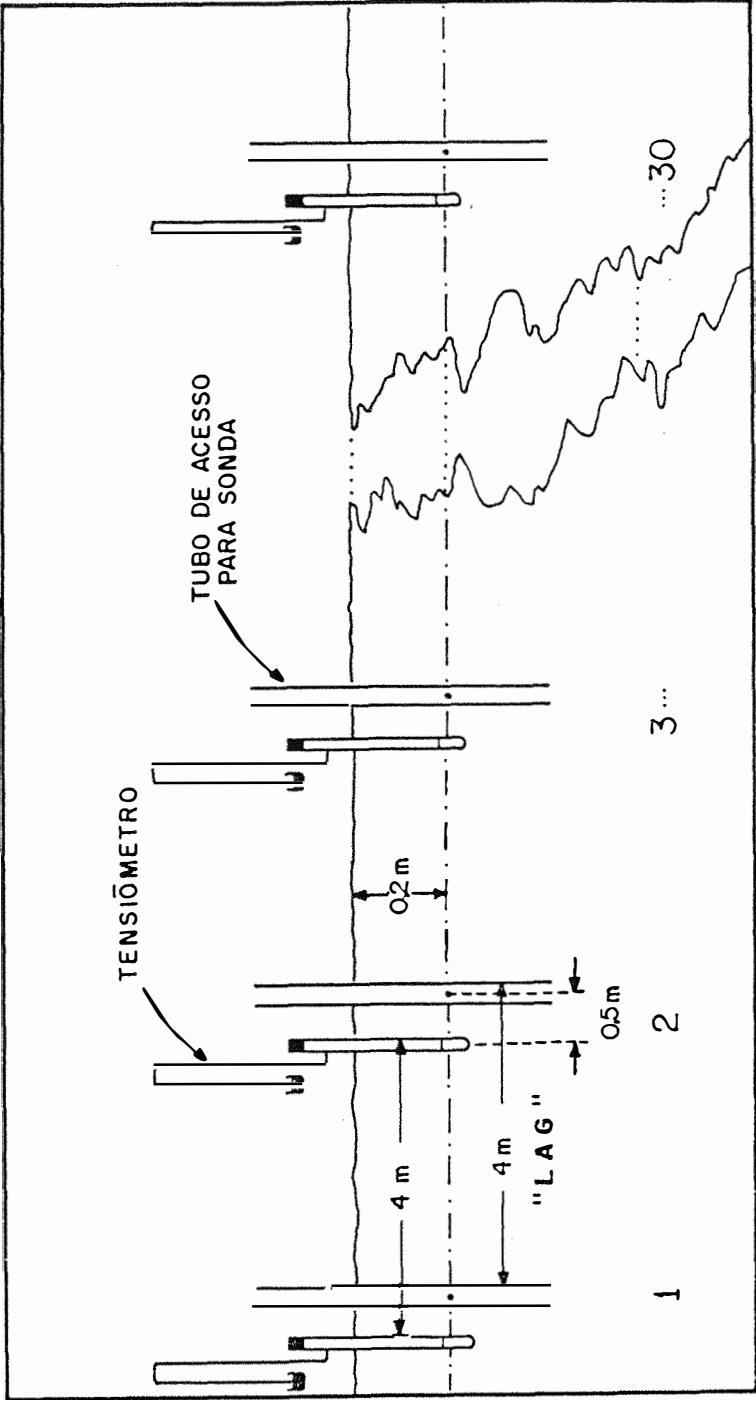


Figura 1 - Esquema do delineamento experimental de campo, indicando o "lag" ou espaçamento dos pontos de medida na transeção de 120 metros.

gilo-limoso com estrutura moderada, grande, prismática que rompe em blocos sub-angulares, forte, pequena a média que, por sua vez, num limite ondulado e difuso tem abaixo um horizonte B latossólico (Bsq), argilo-limoso com estrutura muito fraca, pequena a média, blocos sub-angulares.

As leituras de  $\psi_m$  (-kPa) e de  $\Theta$  ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) foram feitas uma ou duas vezes por semana, durante o ciclo da cultura (abril a julho). Com os dados de  $\psi_m$  assim obtidos, calculou-se a variância local ( $s_L^2$ ) por diferença com a instrumental ( $s_I^2$ ).

$$s_T^2 = s_I^2 + s_L^2$$

Para se determinar a quantidade de tensiômetros a serem instalados, com um erro previamente estabelecido na estimativa da média, aplicou-se o Teorema Central do valor limite, segundo WARRICK & NIELSEN (1980). Como requisitos para esta análise, os dados devem estar normalmente distribuídos e ser independentes entre si.

Para comprovar a primeira hipótese, foram feitos diagramas de probabilidade acumulada (VAUCLIN et alii, 1984; WARRICK & NIELSEN, 1980) e o teste de normalidade de SHAPIRO & WILK (1965).

Ao comprovar-se que os dados não pertenciam a uma distribuição normal e de acordo com a literatura (HAMLETT et alii, 1986), transformaram-se os dados de  $\psi_m$  (-kPa) aplicando-se logaritmo neperiano à equação (1). Na Tabela 4 podem-se observar todos os valores de  $\psi_m$  (-kPa), para todas as datas de leitura e seus respectivos valores médios, desvio padrão e variância. Também são apresentados os valores de  $\ln(\psi_m/f)$ , com seus correspondentes parâmetros estatísticos.

Para determinação da independência dos dados, foram cons-

Tabela 1 - Evolução das observações de  $\psi_m$  (-kPa) em laboratório para todas as datas, com ênfase nas medidas de dispersão que caracterizam o erro operacional.

CARACTERÍSTICAS DAS OBSERVAÇÕES				RELATIVO AS MÉDIAS		
DATA	MÉDIA (A)	D. PADRÃO (B)	VARIÂNCIA (C)	D. PADRÃO (D)	VARIÂNCIA (E)	C.V. (%) (F)
7/08	4.32	0.24	5.7E-02	0.09	8.1E-03	2.1
8/08	6.32	0.22	4.6E-02	0.08	6.6E-03	1.3
9/08	7.80	0.04	1.8E-03	0.02	2.5E-04	0.2
10/08	8.88	0.06	3.5E-03	0.02	5.0E-04	0.3
11/08	9.87	0.09	8.1E-03	0.03	1.2E-03	0.3
12/08	11.30	0.08	6.5E-03	0.03	9.3E-04	0.3
13/08	13.29	0.11	1.1E-02	0.04	1.6E-03	0.3
14/08	15.66	0.11	1.2E-02	0.04	1.8E-03	0.3
15/08	19.30	0.23	5.4E-02	0.09	7.7E-03	0.5
16/08	23.89	0.39	1.5E-01	0.15	2.2E-02	0.6
17/08	28.89	0.51	2.6E-01	0.19	3.7E-02	0.7
18/08	34.89	0.92	8.5E-01	0.35	1.2E-01	1.0
19/08	42.85	1.54	2.4E+00	0.58	3.4E-01	1.4
20/08	50.68	2.61	6.8E+00	0.99	9.7E-01	1.9
21/08	58.53	3.91	1.5E+01	1.48	2.2E+00	2.5
22/08	19.10	0.43	1.8E-01	0.16	2.6E-02	0.8
23/08	24.19	0.49	2.4E-01	0.18	3.4E-02	0.8
24/08	28.22	0.65	4.2E-01	0.24	6.0E-02	0.9
25/08	34.41	1.01	1.0E+00	0.38	1.4E-01	1.1

$$D = ( \sqrt{E^2} )$$

$$E = (1/k \cdot C \text{ (onde } k = 9 \text{ tensiômetros)})$$

$$F = (D/A) \cdot 100$$



truídos semivariogramas para várias datas dos valores de  $\psi_m$  (-kPa) e dos dados de  $\ln(\psi_m/f)$  embora, segundo a bibliografia, o número de dados fosse insuficiente.

A função semivariância  $\gamma(j)$  apresentou variações devido às mudanças nas distribuições. Em alguns casos, os semivariogramas são utilizados para avaliar transformações de dados.

Com os pares de dados de umidade e de potencial mátrico, construiu-se a curva característica de retenção de água para esse solo e profundidade. O ajuste dos dados experimentais foi realizado através do modelo de VAN GENUCHTEN (1978), conforme a expressão:

$$\hat{\theta}(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / \left[ 1 + (\alpha \psi_m)^n \right]^p \quad (5)$$

onde os parâmetros  $\alpha$ ,  $n$ ,  $p$  e as umidades residual ( $\theta_r$ ) e de saturação ( $\theta_s$ ) são estimadas por processo iterativo.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mantendo-se o mesmo esquema proposto no capítulo "Material e Métodos", analisaram-se os resultados separadamente, para ambas as etapas do trabalho.

### 4.1. Teste de laboratório

Dos 10 tensiômetros instalados, um foi descartado por problemas de funcionamento. Desta amostra dos tensiômetros utilizados a campo, obtiveram-se os valores dos parâmetros estatísticos: média, desvio padrão, variância e coeficientes de variação totais e da média, para cada uma das datas de leitura, como pode ser observado na Tabela 1. A partir dos dados, pode-se observar que as variâncias aumentam à medida que o potencial matricio também aumenta (é mais negativo). Isto pode ser devido às características do instrumento, sendo a cápsula do tensiômetro a parte mais determinante do instrumento, no que se refere aos erros cometidos.

Assim, poder-se-ia pensar que, para altos potenciais, a condutividade da cápsula seria limitante quanto à resposta do instrumento. No entanto, pode ser visto que não é assim, na Tabela 2, onde

foram calculados, a partir dos dados de condutância, a condutividade hidráulica das cápsulas para cada um dos tensiômetros. O valor médio de condutividade hidráulica para essas cápsulas foi de  $1,48 \cdot 10^{-3}$  cm/h. Se compararmos esse dado com os de condutividade hidráulica  $K(\theta)$  calculados por SARAIVA DA COSTA (1986) para esse solo e para igual profundidade, dentro do intervalo de umidade de solo registrada durante o experimento de campo ( $0,35$  a  $0,40 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ), estes foram de  $2,28 \cdot 10^{-8}$  cm/h, e  $4,91 \cdot 10^{-6}$  cm/h, respectivamente.

Demonstra-se, assim, que a condutividade hidráulica das cápsulas nunca foi um fator limitante no que diz respeito à medida do potencial mátrico, já que a mesma foi de  $10^5$  a  $10^3$  vezes maior que a do solo, para o mesmo intervalo de umidades ( $0,30 - 0,40 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ), respectivamente.

Na Figura 2, observam-se os diferentes tempos de recuperação dos tensiômetros, definidos por KLUTE & GARDNER (1961), como o tempo que demora o instrumento para atingir o potencial original, após ter sofrido um desequilíbrio (chuva, irrigação ou fluxo).

Pelo que foi anteriormente analisado, este aumento no tempo de recuperação se deve, exclusivamente, à diminuição da condutividade hidráulica do solo  $K(\theta)$  à medida que aumenta o potencial mátrico, e não se deve a uma característica do instrumento.

Assim, pode-se dizer que as variâncias maiores observadas para altos valores de potencial se devem, em grande parte, às características próprias do solo, apesar de ter sido considerado como homogêneo e, em menor parte, a erros operacionais de medição, localização, profundidade da cápsula, altura da cuba em relação à superfície do solo,

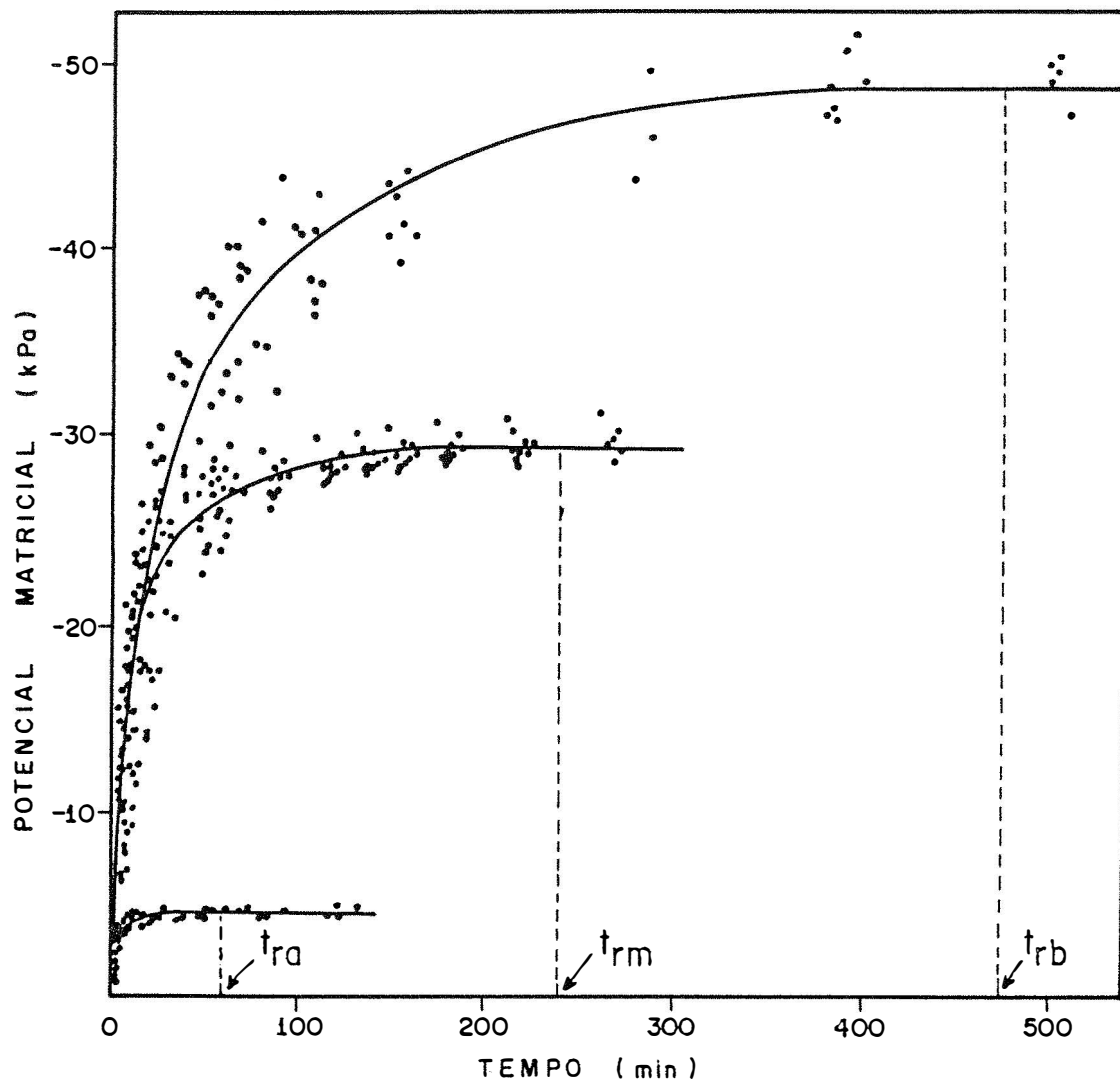


Figura 2 - Tempos de recuperação ( $t_r$ ) de tensiômetros, em função do potencial matricial:  $t_{ra}$ ,  $t_{rm}$ ,  $t_{rb}$ , para potenciais altos ( $\approx -5$  kPa), médios ( $\approx -30$  kPa) e baixos ( $\approx -50$  kPa).

etc. Portanto, não se deve considerar, neste caso, que as variâncias das medidas se devem a erros instrumentais, mas a erros de operação, conjuntamente com as características do solo, o que torna difícil a separação dos dois efeitos.

## 4.2. Experimento de campo

### 4.2.1. Determinação do erro de localização

Através da Figura 3, tem-se uma visão geral e média das condições em que se desenvolveu o experimento, durante todo o ciclo da cultura. Pode-se observar que, praticamente, não se registraram deficiências de água, exceto em uma oportunidade (04/05), na qual o potencial médio atingiu um valor médio de -50 kPa, limitante para a cultura em questão, tendo-se então recorrido à irrigação. A umidade registrada foi razoavelmente alta em todo o período de desenvolvimento da cultura.

Com a finalidade de se determinar o erro de localização ( $s_L^2$ ), foram calculados as variâncias e os coeficientes de variação totais para cada data de leitura e para os 30 tensiômetros. Estes dados estão dispostos na Tabela 3, com as médias dos valores de potenciais mátricos observados segundo cinco intervalos de classe, sendo -2 kPa o valor mínimo e -50 kPa o valor máximo registrado. Também são apresentadas as variâncias  $s_{op}^2$ ,  $s_L^2$  e os respectivos coeficientes de variação C.V. ( $\psi_m$ ) =  $(s/\bar{\psi}_m) \cdot 100$ . Verificou-se, assim, que a variância é função do va-

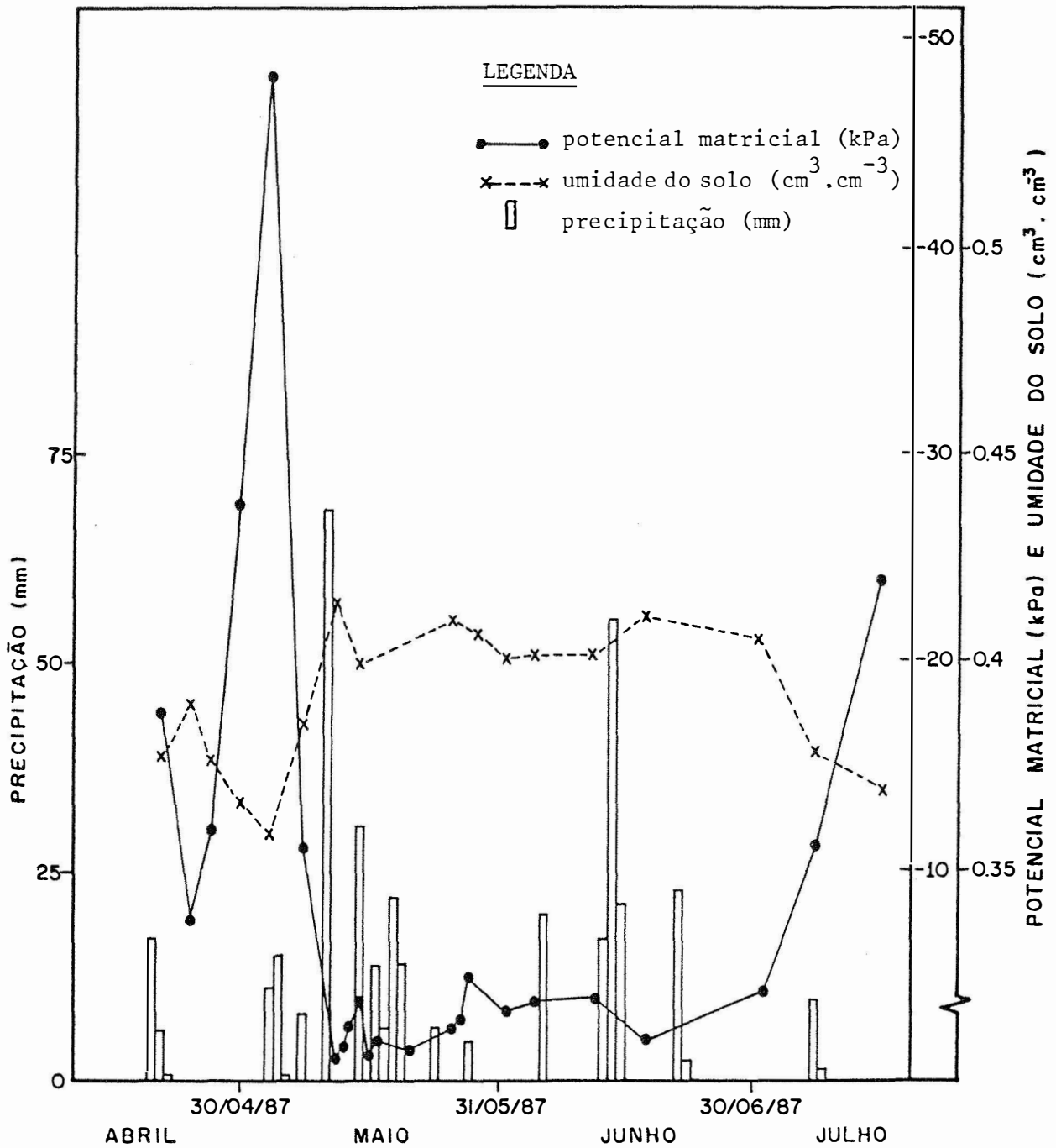


Figura 3 - Precipitação pluviométrica e dados médios de umidade do solo e de potencial matricial da água no solo, durante o período experimental.

Tabela 2 - Valores de condutância e de condutividade hidráulica, estimados mediante as equações (2) e (3), respectivamente, para os 9 tensiômetros testados no laboratório.

TENSIOMETROS	CONDUTANCIA ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	CONDUTIVIDADE HIDRAULICA	
		( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ )
1	8.89E-05	4.36E-07	1.57E-03
2	9.73E-05	4.77E-07	1.71E-03
3	1.17E-04	5.72E-07	2.05E-03
4	7.15E-05	3.51E-07	1.26E-03
5	5.85E-05	2.87E-07	1.03E-03
6	----	----	----
7	7.42E-05	3.64E-07	1.31E-03
8	1.19E-04	5.82E-07	2.09E-03
9	7.27E-05	3.56E-07	1.28E-03
10	5.80E-05	2.84E-07	1.02E-03
MEDIA	8.41E-05	4.12E-07	1.48E-03
D.PADRAO	2.16E-05	1.06E-07	3.79E-04
VAR	4.64E-10	1.12E-14	1.43E-07
k	9	9	9
C.V. (%)	25.6	25.6	25.6

Tabela 3 - Caracterização da dependência dos erros (operacional e de localização) com a variação do potencial matricial mediante variância e coeficiente de variação.

POTENCIAL MATRICIAL (-kPa)	VARIANCIA		COEF. DE VAR. (%)	
	operacional	local	operacional	local
2 a 8	0.057	0.64	5.5	14.7
8 a 12	0.001	11.87	0.9	30.6
18 a 25	0.057	57.51	1.2	31.3
25 a 35	0.257	130.32	1.8	42.9
35 a 50	6.809	339.37	5.2	35.0

lor médio do potencial matricial ( $\psi_m$ ), sendo maior quanto mais negativo é  $\psi_m$ . Assim, também pôde-se observar que as variâncias operacionais são pequenas em comparação às totais e seu incremento em relação ao aumento do potencial dá idéia da influência do solo na sua determinação. Desse modo, se fosse possível separar o efeito do solo na determinação de  $s_{op}^2$ , poderíamos ver que os valores são quase desprezíveis, considerando-se então  $s_T^2 = s_L^2$ .

Com o objetivo de se observar como diminui a variância local ( $s_L^2$ ) quando é aumentado o número de tensiômetros utilizados, para diferentes potenciais médios, foi construído o gráfico da Figura 4, calculando-se o desvio padrão da média  $s(\bar{\psi}_m) = \sqrt{s_T^2(\psi_m) / k}$ , onde  $k$  é o número de observações (tensiômetros) considerados na estimativa de  $s_T(\psi_m)$ , para três valores de potencial: médio, alto médio e baixo, sorteando-se ao acaso, dentro dos 30 tensiômetros, conjuntos de 3, 5, 10, 15, 20 e 25.

No gráfico, figuram os valores de coeficientes de variação das médias, calculados a partir de:

$$CV(\bar{\psi}_m) = s(\bar{\psi}_m) / \bar{\psi}_m \times 100$$

Da observação do gráfico, podemos dizer que os maiores coeficientes de variação se encontram com menos de cinco tensiômetros, diminuindo-se estes valores de CV à medida que  $\psi_m$  é menor (menos negativo). Quando se aumenta o número de tensiômetros, o coeficiente de variação diminui, sendo esta diminuição mais acentuada no caso de baixos potenciais, em que o CV se estabilizou com 15 instrumentos. No caso de potenciais maiores, com 30 equipamentos ainda não se atingiu a estabilidade.



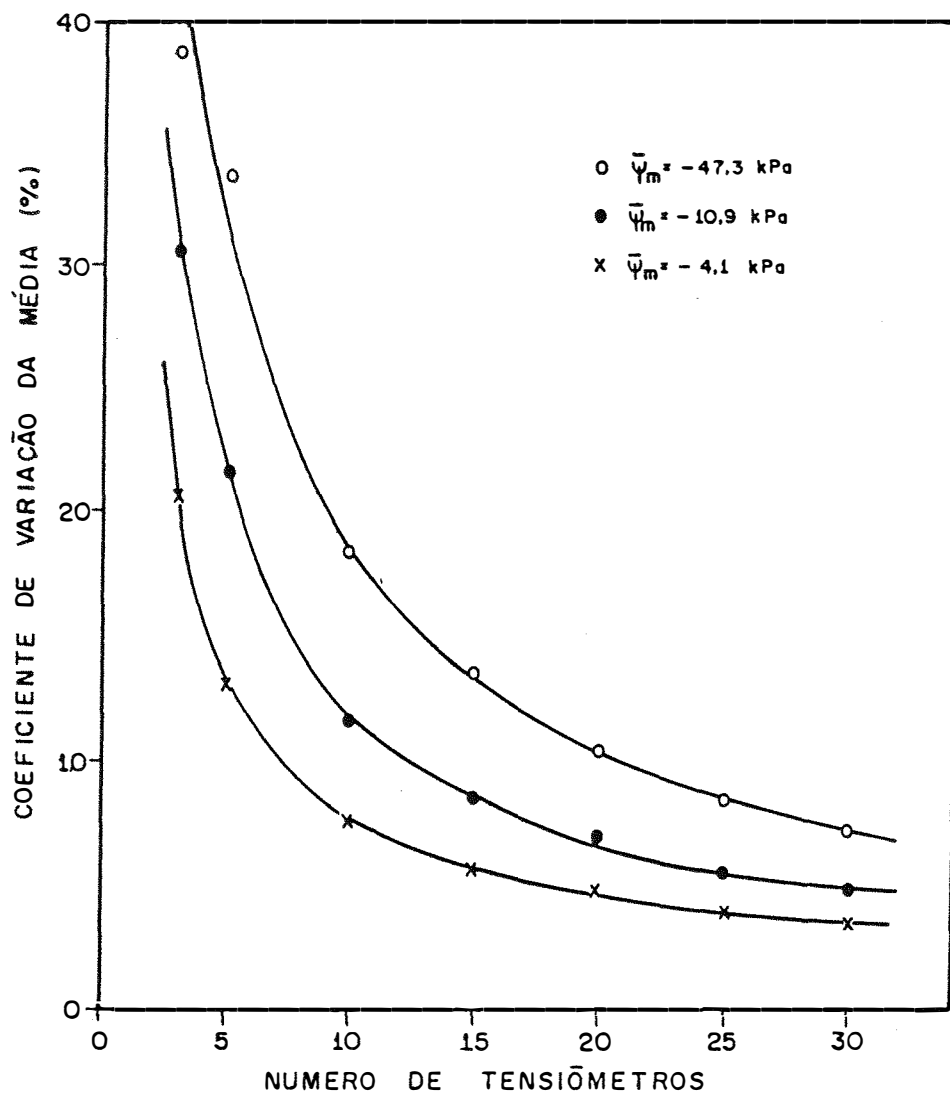


Figura 4 - Coeficiente de variação local do valor médio do potencial matricial da água no solo em função do número de tensiômetros.

#### 4.2.2. Determinação do número de tensiômetros necessários

Para se determinar o número mínimo de tensiômetros, necessário para estimativa do valor da média com um erro pré-estabelecido, recorreu-se ao Teorema Central do Valor Limite. Para aplicação deste, duas premissas devem ser cumpridas (WARRICK & NIELSEN, 1980):

- 1) a população deve estar normalmente distribuída;
- 2) as amostras devem ser independentes entre si.

Para comprovação da primeira hipótese, elaboraram-se os diagramas de frequência acumulada, de acordo com a metodologia descrita por WARRICK & NIELSEN (1980), para três datas sucessivas em que se julgou que o processo de redistribuição tinha acabado, como pode ser observado na Figura 5. Da análise da mesma, devido à linearidade observada, poderíamos considerar que as distribuições dos 30 dados estudados para cada data eram normais.

No entanto, quando se elaboraram os histogramas de frequência, observou-se a assimetria nas distribuições apresentadas pelos dados nas diferentes datas (Figura 6).

Para provar a hipótese de normalidade, os dados foram testados através do coeficiente  $W$ , proposto por SHAPIRO & WILK (1965). O motivo da utilização deste teste foi a quantidade de dados ser relativamente pequena (30), o que fez com que outros tipos de teste, como  $\chi^2$ , Kolmorov-Smirnov, Cramer-Von Mises, não fossem suficientemente precisos.

Os valores de  $W$  encontrados para as diferentes datas de leitura e, conseqüentemente, os diferentes potenciais médios, nunca a-

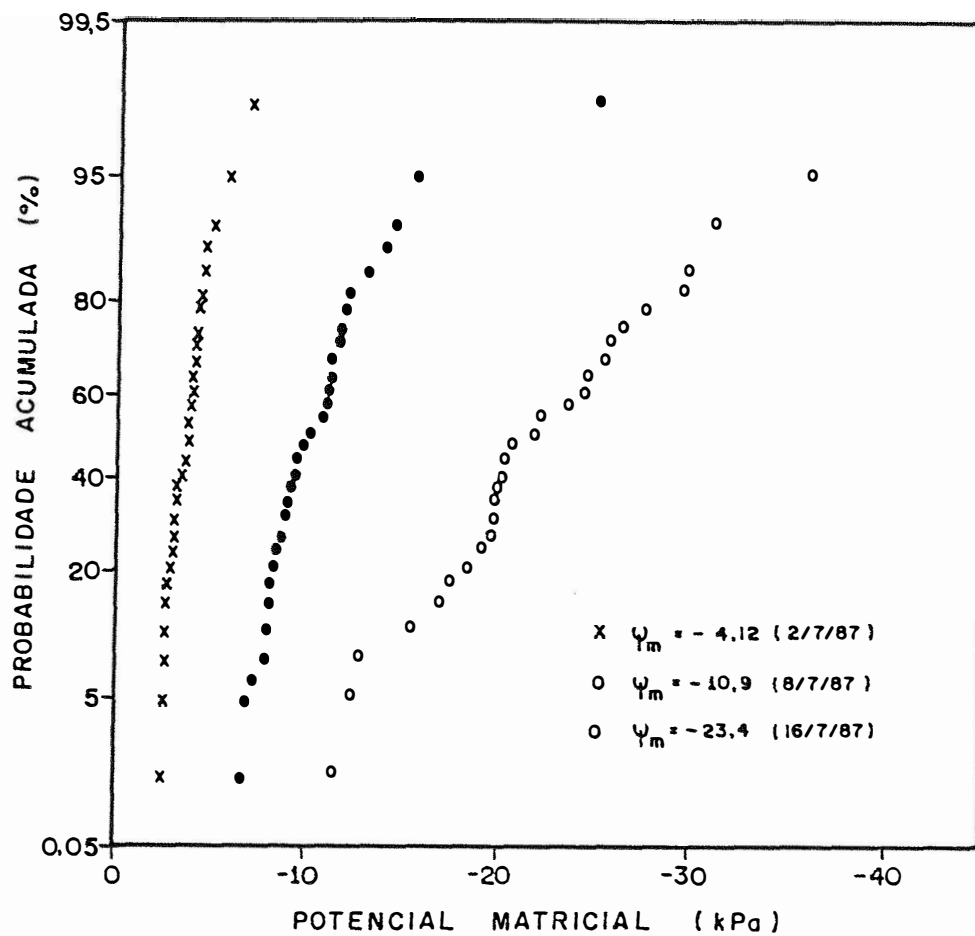


Figura 5 - Diagramas de probabilidade acumulada para dados de potencial matricial da água do solo.

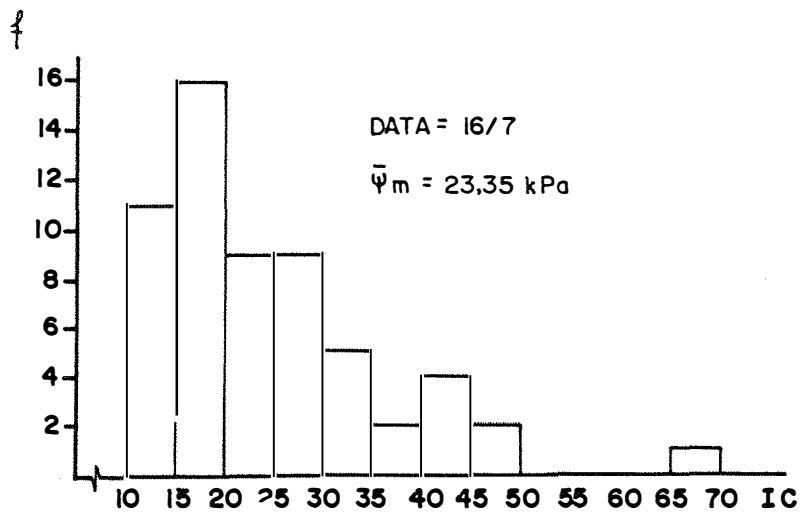
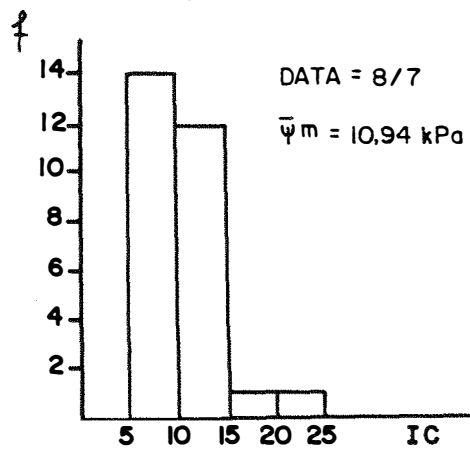
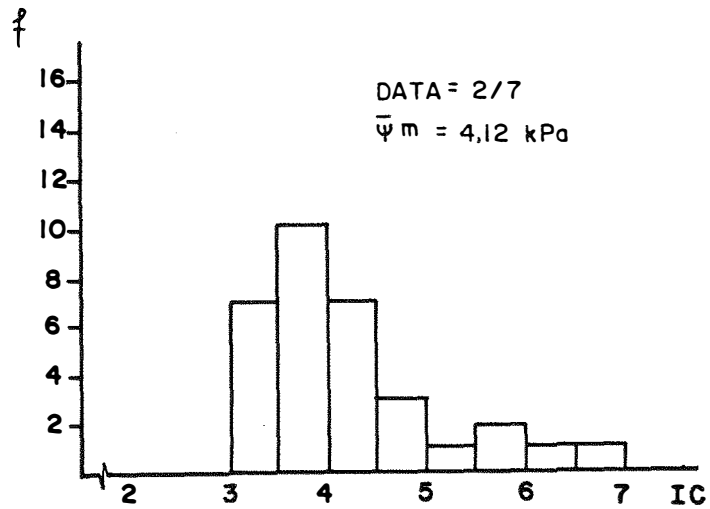


Figura 6 - Histogramas de frequências dos valores de  $\hat{\psi}_m$  (-kPa) para três datas de observação.

tingiram o nível de 0,50 de probabilidade, necessário para comprovar a normalidade das medidas, exceto em três ocasiões, em que se saturou o perfil pelas intensas e frequentes chuvas.

A bibliografia referente à distribuição de dados de potencial mátrico é contraditória. GREMINGER et alii (1985), medindo a umidade e o potencial mátrico durante um processo de redistribuição de água no solo, numa transeção de 100 metros, verificou que a distribuição dos dados é normal.

No entanto, RAO et alii (1979) encontraram que, em geral, as propriedades do solo relacionadas com a capacidade, tendem a seguir uma distribuição normal, enquanto que aquelas relacionadas com o fluxo, seguem distribuições log-normais.

LUXMOORE et alii (1981) e GRAH et alii (1983) encontraram que as transformações logarítmicas eram as mais apropriadas para dados de infiltração.

Segundo a metodologia proposta por HAMLETT et alii (1986), foram transformados todos os dados de potencial mátrico para todas as datas de medida, em logaritmo neperiano de  $kPa/f$ , onde  $f = 0,0981$ , segundo resulta da aplicação de logaritmo na equação (1), sendo estes dados observados na Tabela 4.

Os dados assim transformados, foram testados novamente através do teste de SHAPIRO & WILK (1965), realizando-se a seguinte análise dos valores de  $W$  (coeficiente de normalidade) para as diferentes datas, como pode se observar no gráfico da Figura 7.

Nos dias anteriores à primeira leitura, a precipitação foi de 17,2 mm. No mesmo dia da primeira medida, 5,8 mm; por isso, o

Tabela 4 - (a) Valores de potencial mátrico (kPa) para todas as datas e tensiômetros e parâmetros estatísticos correspondentes.  
 (b) Valores de  $\ln(|kPa|/f)$  para todas as datas e tensiômetros e parâmetros estatísticos correspondentes.

(a)

(A)	DATA	TENSIO METROS									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	21/04	-14.13	-12.94	-4.52	-16.88	-11.90	-9.34	-12.20	-13.69	-6.84	-13.19
2	24/04	-7.09	-5.53	-3.29	-8.60	-5.73	-5.01	-5.28	-5.28	-3.87	-5.53
3	27/04	-8.70	-8.00	-5.76	-11.69	-8.69	-9.83	-8.62	-17.89	-6.84	-8.87
4	30/04	-14.13	-12.70	-10.95	-24.54	-22.04	-27.00	-15.29	-50.51	-15.24	-17.64
5	04/05	-31.18	-28.14	-33.31	-53.33	-11.29	-9.95	-33.58	-72.75	-45.14	-38.40
6	08/05	-6.47	-5.28	-3.78	-10.08	-3.26	-3.40	-6.40	-24.31	-6.10	-6.52
7	12/05	-1.53	-1.70	-0.81	-0.32	-1.03	-0.44	-1.21	-0.71	-0.91	-0.71
8	15/05	-4.00	-4.54	-3.29	-3.78	-3.13	-3.03	-4.42	-4.54	-4.00	-3.68
9	26/05	-3.26	-3.18	-2.30	-2.79	-2.27	-2.17	-3.06	-2.19	-2.27	-2.69
10	29/05	-3.63	-6.13	-4.63	-5.25	-4.35	-4.38	-6.01	-4.16	-4.85	-5.39
11	1/06	-4.00	-4.79	-3.16	-3.78	-2.76	-2.79	-4.79	-3.18	-3.26	-2.69
12	5/06	-4.37	-6.03	-3.53	-3.41	-2.76	-2.91	-5.04	-3.68	-3.63	-2.81
13	12/06	-4.37	-6.03	-3.16	-5.26	-2.89	-2.54	-5.78	-3.18	-2.76	-4.30
14	18/06	-2.52	-2.44	-1.56	-1.56	-1.90	-1.30	-2.81	-1.70	-1.77	-1.70
15	2/07	-4.37	-7.01	-4.15	-4.15	-3.50	-3.28	-5.41	-3.80	-3.38	-3.55
16	8/07	-9.19	-25.30	-14.65	-11.32	-11.04	-11.19	-11.34	-11.83	-8.82	-10.47
17	16/07	-19.69	-50.38	-29.73	-20.09	-27.23	-17.12	-19.49	-31.11	-19.81	-22.21

(b)

(B)	DATA	TENSIO METROS									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	21/04	4.97	4.88	3.83	5.15	4.80	4.56	4.82	4.94	4.24	4.90
2	24/04	4.28	4.03	3.51	4.47	4.07	3.93	3.99	3.99	3.68	4.03
3	27/04	4.49	4.40	4.07	4.78	4.48	4.61	4.48	5.21	4.24	4.50
4	30/04	4.97	4.86	4.72	5.52	5.41	5.62	5.05	6.24	5.05	5.19
5	04/05	5.76	5.66	5.83	6.30	4.75	4.62	5.84	6.61	6.13	5.97
6	08/05	4.19	3.99	3.65	4.63	3.50	3.55	4.18	5.51	4.13	4.20
7	12/05	2.75	2.85	2.12	1.18	2.35	1.50	2.51	1.98	2.23	1.98
8	15/05	3.71	3.84	3.51	3.65	3.46	3.43	3.81	3.84	3.71	3.62
9	26/05	3.50	3.48	3.15	3.35	3.14	3.10	3.44	3.11	3.14	3.31
10	29/05	3.61	4.14	3.85	3.98	3.79	3.80	4.12	3.75	3.90	4.01
11	1/06	3.71	3.89	3.47	3.65	3.34	3.35	3.89	3.48	3.50	3.31
12	5/06	3.80	4.12	3.58	3.55	3.34	3.39	3.94	3.62	3.61	3.36
13	12/06	3.80	4.12	3.47	3.98	3.38	3.25	4.08	3.48	3.34	3.78
14	18/06	3.25	3.21	2.76	2.76	2.96	2.59	3.36	2.85	2.89	2.85
15	2/07	3.80	4.27	3.75	3.75	3.58	3.51	4.01	3.66	3.54	3.59
16	8/07	4.54	5.55	5.01	4.75	4.72	4.74	4.75	4.79	4.50	4.67
17	16/07	5.30	6.24	5.71	5.32	5.63	5.16	5.29	5.76	5.31	5.42

(continua)

Tabela 4 - (a) Valores de potencial mátrico (kPa) para todas as datas e tensiômetros e parâmetros estatísticos correspondentes.  
(cont.)  
(b) Valores de  $\ln(|kPa|/f)$  para todas as datas e tensiômetros e parâmetros estatísticos correspondentes.

(a)

(A)	DATA	TENSIOMETROS									
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	21/04	-18.75	-16.03	-19.42	-62.07	-12.72	-31.89	-17.80	-3.49	-8.00	-13.04
2	24/04	-8.62	-5.28	-9.04	-27.48	-4.19	-14.22	-7.67	-3.25	-6.51	-4.02
3	27/04	-17.02	-9.98	-10.28	-21.18	-7.28	-15.33	-7.92	-7.57	-9.97	-13.53
4	30/04	-42.10	-25.55	-13.98	-28.34	-13.58	-33.87	-16.07	-21.53	-17.51	-44.18
5	04/05	-67.68	-64.47	-33.38	-59.97	-40.77	-66.24	-39.43	-51.68	-44.82	-71.24
6	08/05	-37.90	-8.00	-7.44	-7.09	-5.55	-9.90	-6.68	-7.20	-8.24	-13.04
7	12/05	-1.33	-0.34	-1.13	-1.04	-1.23	-1.49	-1.12	-1.15	-1.32	-0.68
8	15/05	-4.17	-3.68	-3.60	-2.89	-3.70	-3.72	-3.22	-3.74	-4.29	-3.77
9	26/05	-2.69	-2.69	-2.62	-2.27	-2.71	-2.48	-2.36	-2.13	-2.68	-1.67
10	29/05	-5.27	-5.27	-5.20	-4.48	-5.41	-4.94	-4.81	-4.47	-5.26	-3.76
11	1/06	-4.17	-3.80	-3.48	-3.26	-3.95	-3.47	-2.98	-3.25	-4.66	-2.41
12	5/06	-4.79	-4.30	-3.85	-3.01	-3.58	-3.97	-2.98	-3.37	-4.78	-2.79
13	12/06	-4.30	-4.67	-3.98	-2.89	-3.82	-3.84	-3.60	-3.00	-4.04	-4.02
14	18/06	-2.19	-2.07	-2.00	-1.78	-2.46	-2.24	-1.87	-2.13	-2.44	-1.18
15	2/07	-4.17	-4.42	-4.59	-4.37	-4.69	-3.60	-3.84	-3.99	-6.14	-3.28
16	8/07	-8.13	-11.83	-9.54	-9.31	-9.75	-6.93	-12.24	-8.44	-15.78	-9.09
17	16/07	-13.07	-26.54	-19.79	-20.93	-22.36	-15.83	-26.33	-20.54	-31.35	-18.60

(b)

(B)	DATA	TENSIOMETROS									
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	21/04	5.25	5.10	5.29	6.45	4.87	5.78	5.20	3.57	4.40	4.89
2	24/04	4.48	3.99	4.52	5.64	3.76	4.98	4.36	3.50	4.20	3.71
3	27/04	5.16	4.62	4.65	5.38	4.31	5.05	4.39	4.35	4.62	4.93
4	30/04	6.06	5.56	4.96	5.67	4.93	5.84	5.10	5.39	5.18	6.11
5	04/05	6.54	6.49	5.83	6.42	6.03	6.52	6.00	6.27	6.12	6.59
6	08/05	5.96	4.40	4.33	4.28	4.04	4.61	4.22	4.30	4.43	4.89
7	12/05	2.61	1.25	2.45	2.36	2.53	2.72	2.44	2.46	2.60	1.94
8	15/05	3.75	3.62	3.60	3.38	3.63	3.64	3.49	3.64	3.78	3.65
9	26/05	3.31	3.31	3.28	3.14	3.32	3.23	3.18	3.08	3.31	2.84
10	29/05	3.98	3.98	3.97	3.82	4.01	3.92	3.80	3.82	3.98	3.65
11	1/06	3.75	3.66	3.57	3.50	3.69	3.57	3.41	3.50	3.86	3.20
12	5/06	3.89	3.78	3.67	3.42	3.60	3.70	3.41	3.54	3.89	3.35
13	12/06	3.78	3.86	3.70	3.38	3.66	3.67	3.60	3.47	3.72	3.71
14	18/06	3.11	3.05	3.01	2.90	3.22	3.13	2.95	3.08	3.21	2.49
15	2/07	3.75	3.81	3.85	3.80	3.87	3.60	3.67	3.71	4.14	3.51
16	8/07	4.42	4.79	4.58	4.55	4.60	4.26	4.83	4.45	5.08	4.53
17	16/07	4.89	5.60	5.31	5.36	5.43	5.08	5.59	5.34	5.77	5.25

(continua)

Tabela 4 - (a) Valores de potencial m̄trico (kPa) para todas as datas e tensiômetros e parâmetros estatísticos correspondentes.  
(cont.)  
(b) Valores de  $\ln(|kPa|/f)$  para todas as datas e tensiômetros e parâmetros estatísticos correspondentes.

(a)

(A)	DATA	TENSIO METROS									
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	21/04	-13.65	-9.31	-13.62	-14.64	-9.65	-15.00	-15.91	-41.46	-36.42	-27.35
2	24/04	-5.37	-3.50	-5.59	-5.50	-4.46	-6.10	-4.30	-17.98	-15.91	-11.66
3	27/04	-8.71	-6.22	-7.57	-11.92	-11.01	-16.85	-12.08	-31.70	-17.64	-15.86
4	30/04	-20.57	-16.23	-14.73	-34.54	-39.93	-42.55	-34.81	-66.79	-29.74	-43.04
5	04/05	-43.06	-39.46	-37.34	-67.40	-5.45	-66.03	-66.32	-73.96	-54.70	-66.52
6	08/05	-10.69	-4.61	-5.59	-14.03	-4.34	-9.31	-7.63	-63.70	-4.66	-15.74
7	12/05	-1.67	-0.54	-0.52	-1.55	-1.13	-1.16	-0.96	-1.55	-1.08	-0.17
8	15/05	-3.77	-3.50	-3.37	-3.52	-3.48	-4.50	-3.55	-3.78	-3.18	-3.26
9	26/05	-3.02	-2.14	-2.01	-2.41	-2.49	-2.89	-1.82	-2.54	-2.44	-2.39
10	29/05	-5.23	-4.35	-4.34	-4.74	-4.82	-5.47	-3.79	-4.62	-4.65	-4.48
11	1/06	-3.27	-3.13	-2.38	-3.40	-3.48	-4.25	-3.18	-3.78	-3.18	-2.76
12	5/06	-3.39	-3.38	-2.62	-3.77	-3.72	-5.48	-3.18	-3.53	-2.81	-2.39
13	12/06	-4.01	-3.25	-3.37	-3.15	-3.23	-9.31	-2.57	-3.40	-2.56	-2.76
14	18/06	-2.28	-1.89	-1.27	-2.16	-2.12	-2.02	-1.58	-1.80	-1.70	-1.03
15	2/07	-4.75	-4.24	-3.24	-3.89	-3.72	-3.88	-3.43	-3.78	-3.67	-3.38
16	8/07	-14.39	-12.15	-13.37	-8.22	-8.05	-11.41	-7.14	-8.72	-10.10	-8.45
17	16/07	-36.01	-29.82	-24.62	-18.35	-12.62	-24.51	-11.83	-25.89	-20.48	-24.14

(b)

(B)	DATA	TENSIO METROS									
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	21/04	4.94	4.55	4.93	5.01	4.59	5.03	5.09	6.05	5.92	5.63
2	24/04	4.00	3.58	4.04	4.03	3.82	4.13	3.78	5.21	5.09	4.78
3	27/04	4.49	4.15	4.35	4.80	4.72	5.15	4.81	5.78	5.19	5.09
4	30/04	5.35	5.11	5.01	5.86	6.01	6.07	5.87	6.52	5.71	6.08
5	04/05	6.08	6.00	5.94	6.53	4.02	6.51	6.52	6.63	6.32	6.52
6	08/05	4.69	3.85	4.04	4.96	3.79	4.55	4.35	6.48	3.86	5.08
7	12/05	2.83	1.70	1.68	2.76	2.44	2.47	2.28	2.76	2.40	0.53
8	15/05	3.65	3.58	3.54	3.58	3.57	3.83	3.59	3.65	3.48	3.50
9	26/05	3.43	3.08	3.02	3.20	3.23	3.38	2.92	3.25	3.21	3.19
10	29/05	3.98	3.79	3.79	3.88	3.89	4.02	3.65	3.85	3.86	3.82
11	1/06	3.51	3.46	3.19	3.55	3.57	3.77	3.48	3.65	3.48	3.34
12	5/06	3.54	3.54	3.29	3.65	3.64	4.02	3.48	3.58	3.35	3.19
13	12/06	3.71	3.50	3.54	3.47	3.49	4.55	3.26	3.55	3.26	3.34
14	18/06	3.15	2.96	2.56	3.09	3.07	3.03	2.78	2.91	2.85	2.35
15	2/07	3.88	3.77	3.50	3.68	3.64	3.68	3.55	3.65	3.62	3.54
16	8/07	4.99	4.82	4.92	4.43	4.41	4.76	4.29	4.49	4.63	4.46
17	16/07	5.91	5.72	5.53	5.23	4.86	5.62	4.79	5.58	5.34	5.51

(continua)



Tabela 4 - (a) Valores de potencial mátrico (kPa) para todas as datas e tensiômetros e parâmetros estatísticos correspondentes.  
(cont.)  
(b) Valores de  $\ln(|kPa|/f)$  para todas as datas e tensiômetros e parâmetros estatísticos correspondentes.

(a)

(A)	DATA	MEDIA kPa	MAX. kPa	MIN. kPa	N	D.PADRAO kPa	VAR	CVZ
1	21/04	-17.20	-3.49	-62.07	30	11.84	140.21	-68.9
2	24/04	-7.53	-3.25	-27.48	30	5.17	26.72	-68.7
3	27/04	-11.82	-5.76	-31.70	30	5.41	29.30	-45.8
4	30/04	-26.99	-10.95	-66.79	30	13.44	180.67	-49.8
5	04/05	-47.23	-5.45	-73.96	30	18.95	359.26	-40.1
6	08/05	-10.90	-3.26	-63.70	30	11.95	142.68	-109.6
7	12/05	-1.02	-0.17	-1.70	30	0.41	0.17	-40.6
8	15/05	-3.70	-2.89	-4.54	30	0.44	0.20	-12.0
9	26/05	-2.49	-1.67	-3.26	30	0.37	0.14	-15.0
10	29/05	-4.80	-3.63	-6.13	30	0.60	0.36	-12.4
11	1/06	-3.45	-2.38	-4.79	30	0.63	0.40	-18.4
12	5/06	-3.66	-2.39	-6.03	30	0.86	0.74	-23.5
13	12/06	-3.87	-2.54	-9.31	30	1.35	1.81	-34.8
14	18/06	-1.92	-1.03	-2.81	30	0.42	0.17	-21.8
15	2/07	-4.12	-3.24	-7.01	30	0.83	0.69	-20.2
16	8/07	-10.94	-6.93	-25.30	30	3.45	11.88	-31.5
17	16/07	-23.35	-11.83	-50.38	30	7.59	57.56	-32.5

(b)

(B)	DATA	MEDIA $\ln(-kPa/f)$	MAX. $\ln(-kPa/f)$	MIN. $\ln(-kPa/f)$	N	D.PADRAO $\ln(-kPa/f)$	VAR	CVZ
1	21/04	4.99	6.45	3.57	30	0.59	0.34	11.8
2	24/04	4.19	5.64	3.50	30	0.51	0.26	12.2
3	27/04	4.71	5.78	4.07	30	0.39	0.15	8.3
4	30/04	5.50	6.52	4.72	30	0.48	0.23	8.7
5	04/05	6.04	6.63	4.02	30	0.61	0.37	10.1
6	08/05	4.42	6.48	3.50	30	0.66	0.43	14.9
7	12/05	2.22	2.85	0.53	30	0.54	0.30	24.5
8	15/05	3.62	3.84	3.38	30	0.12	0.01	3.3
9	26/05	3.22	3.50	2.84	30	0.15	0.02	4.7
10	29/05	3.88	4.14	3.61	30	0.13	0.02	3.2
11	1/06	3.54	3.89	3.19	30	0.18	0.03	5.1
12	5/06	3.59	4.12	3.19	30	0.22	0.05	6.2
13	12/06	3.63	4.55	3.25	30	0.29	0.08	7.9
14	18/06	2.95	3.36	2.35	30	0.23	0.05	7.9
15	2/07	3.72	4.27	3.50	30	0.18	0.03	4.8
16	8/07	4.68	5.55	4.26	30	0.26	0.07	5.6
17	16/07	5.43	6.24	4.79	30	0.31	0.09	5.6

(\*)  $f = 0.0981$

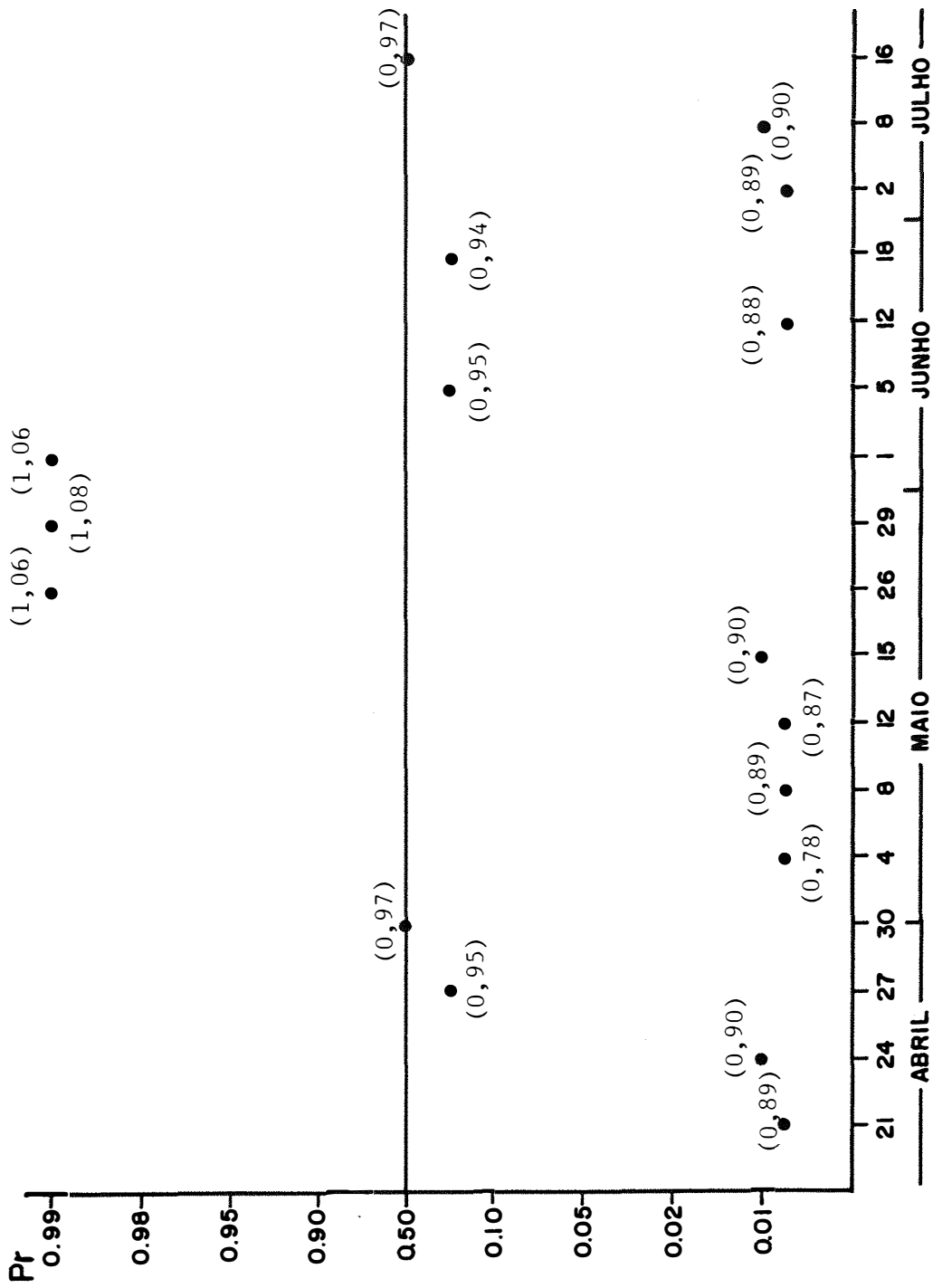


Figura 7 - Valores de  $w$  (SHAPIRO & WILK, 1965) para todas as datas de observação dos dados de  $\psi_m$  transformados em logaritmo neperiano de kPa/f.

processo de infiltração encontrava-se em condição transiente nos dias sucessivos. As pequenas precipitações mantiveram o fluxo de água na camada superficial e, assim, os valores de  $W$ , coeficiente de Shapiro & Wilks, ficaram abaixo dos valores de probabilidade que indicam normalidade; já, na terceira medição, no dia 27/04, o coeficiente começa a se aproximar de 0,50, até que no dia 30/04, atinge 0,50, podendo-se considerar as medidas distribuídas normalmente.

Conclui-se que o processo de redistribuição da água no solo pode ser dado como finalizado três dias após uma chuva.

A partir de 04/05, são registradas novas precipitações, começando um processo transiente no solo, o que leva o valor de  $W$  abaixo de 0,01 de probabilidade.

Nas datas de leitura seguintes, produz-se uma supersaturação do solo por frequentes chuvas e baixa evaporação. Em consequência, nas medidas dos dias 26/05, 29/05 e 01/06,  $W$  alcança um valor máximo, já que não existe fluxo de água dentro do perfil.

Nas datas subsequentes, são efetuadas medidas em que o solo estava em processo de redistribuição, pelas frequentes precipitações, até que, na última data, tendo terminado tal processo, após sete dias da última chuva, o valor do coeficiente  $W$  estava dentro de 0,50 de probabilidade, nível acima da distribuição e considerado normal.

Desta análise, verifica-se que só cinco leituras apresentaram distribuição normal após a transformação dos dados em logaritmo.

Com respeito à segunda premissa a ser cumprida, a de independência dos dados, um possível caminho para analisá-la é através da

função semivariância, definida por:

$$\gamma(j) = \frac{1}{2} E (F(x) - F(x+h))^2$$

onde  $F(x)$  é uma função que representa os valores de uma variável  $f$  para uma dada localização  $x$ ;  $h$  é a distância entre as observações, o "lag";  $j = 0, 1, 2, 3, \dots, k$  é o número de "lags".

$\gamma(j)$  pode ser estimado através da seguinte expressão, segundo JOURNAL & HUIJBREGTS (1978):

$$\gamma(j) = \frac{1}{2 N(j)} \sum_{i=1}^{N(i)} (f_i - f_{i+j})^2$$

onde  $N(j)$  é o número de pares experimentais a serem considerados;  $(f_i, f_{i+j})$  são as variáveis em determinadas localizações  $(i)$  e  $(i+j)$ , considerando-se  $j$  como número de "lag".

A função de semivariância parte de um valor zero quando o número de "lag" ( $j = 0$ ) e vai incrementando seu valor em forma assintótica até chegar a um número de "lag"  $j$  determinado ( $\alpha =$  alcance) em que  $\gamma(j)$  é constante, representando esses valores a maior variabilidade dos valores de  $f_i$ , ou seja, as variações são casuais.

O valor de  $\gamma(j)$  máximo e constante é igual à variância da população. O valor  $\alpha$  é denominado "alcance da dependência espacial". Valores lidos em espaços menores que  $\alpha$  são espacialmente dependentes. Para distâncias maiores que  $\alpha$ , os dados são independentes.

Para nosso caso, a função semivariância é definida como:

$$\gamma(j) = \frac{1}{2 N(j)} \sum_{i=1}^{N(j)} (\psi_{m_i} - \psi_{m_{i+j}})^2$$

Em nossos dados de potencial métrico, como cada data apresenta diferente distribuição, então a variância é distinta. Isto determinaria um semivariograma diferente, com um  $\alpha$  diferente para cada data.

Por outro lado, quando se aplica uma transformação matemática, no nosso caso log, a um conjunto de dados, com o propósito de normalizar sua distribuição, o semivariograma é uma ferramenta para verificação dessa modificação da variância.

Como pode ser visto nas Figuras 8 a 12, onde são representadas as funoes de semivariância  $\gamma(j)$  para os dados de  $\ln(kPa/f)$  de cada uma das cinco datas em que, por meio da transformação, se atingiu a normalidade, todos eles diferem entre si e a transformação "estabilizou" a função de semivariância e aproximou os pontos à variância total em todos os casos. No entanto, em nenhum caso se observou a existência de estrutura espacial, ou seja, que os valores de  $\gamma(j)$  não foram estatisticamente diferentes a variância dos dados. Entretanto, de acordo com JOURNEL & HUIJBREGTS (1978), a estimativa da função  $\gamma(j)$  é pouco confiável para um número de observaoes  $N(j)$  menor que 50.

Se considerarmos um espaçamento (h) menor, poder-se-ia encontrar alguma dependência espacial. Como, em nosso caso, não é possível realizar outro tipo de análise, consideramos os dados como independentes.

Assim, com as duas premissas de normalidade e de independência dos dados, foi aplicado o Teorema Central do Valor Limite para encontrar o número de tensiômetros necessários para estimar, com certa margem de erro, os diferentes potenciais médios, para diferentes ní-

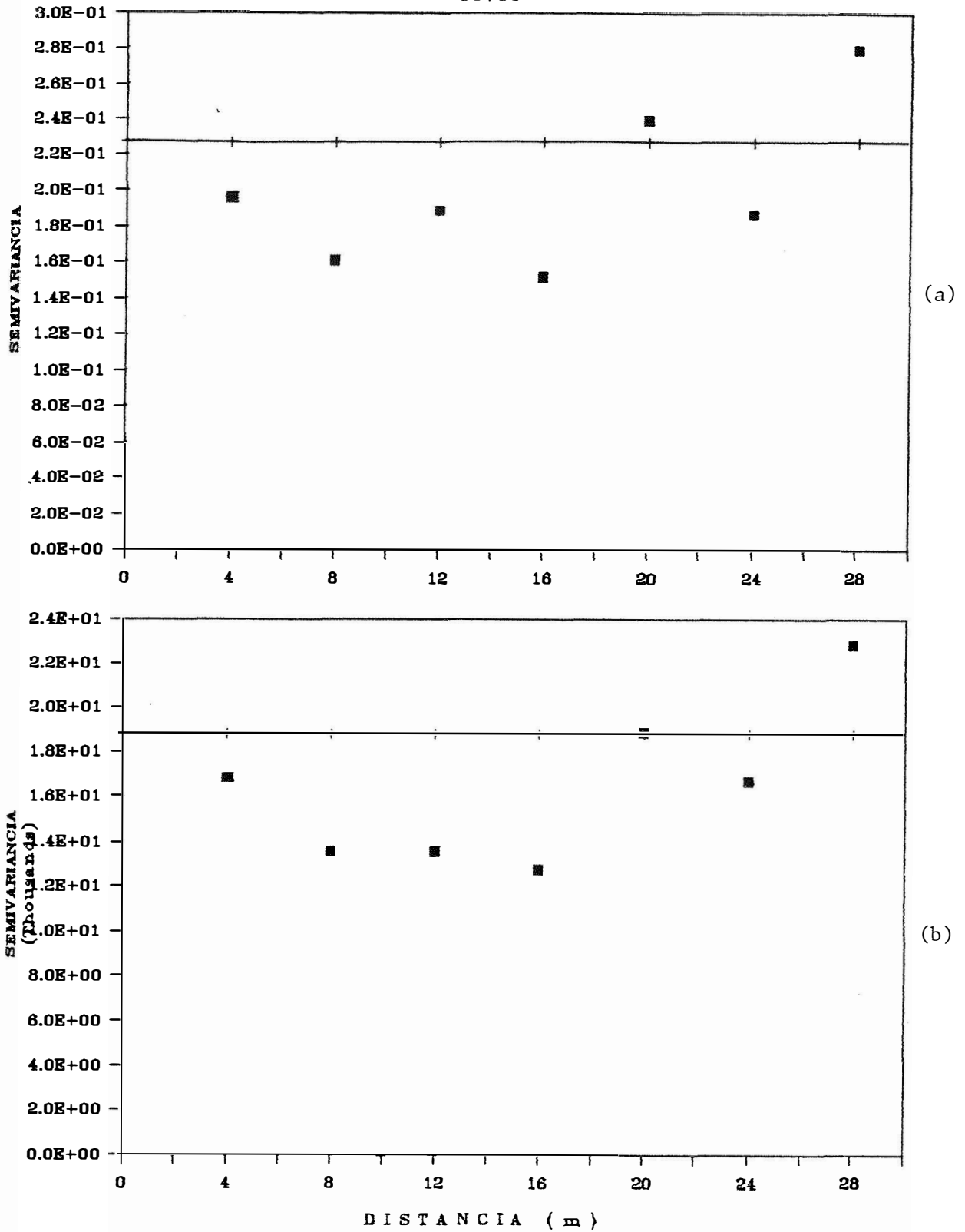


Figura 8 - Semivariâncias dos valores de  $\psi_m$ : kPa (a) e dos valores de  $\psi_m$  transformados em logaritmo neperiano de  $|kPa|/f$  (b).

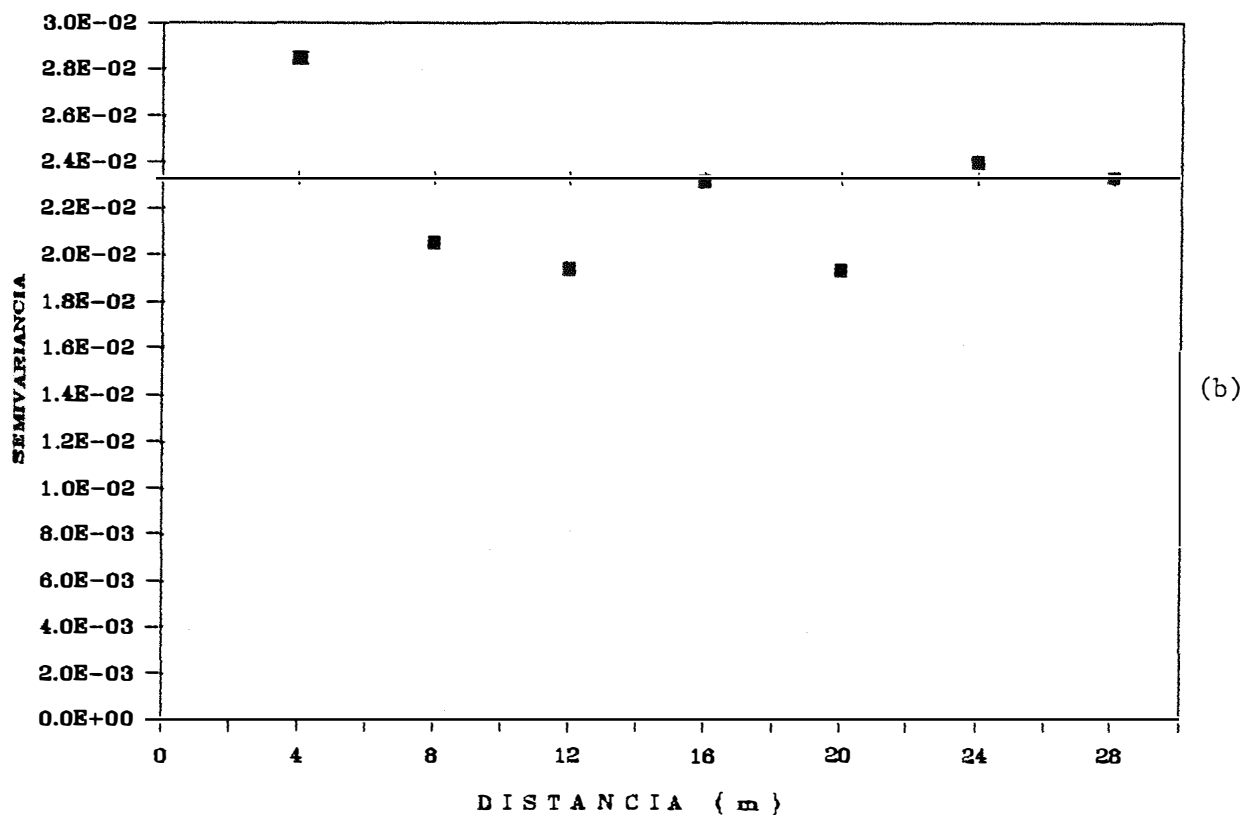
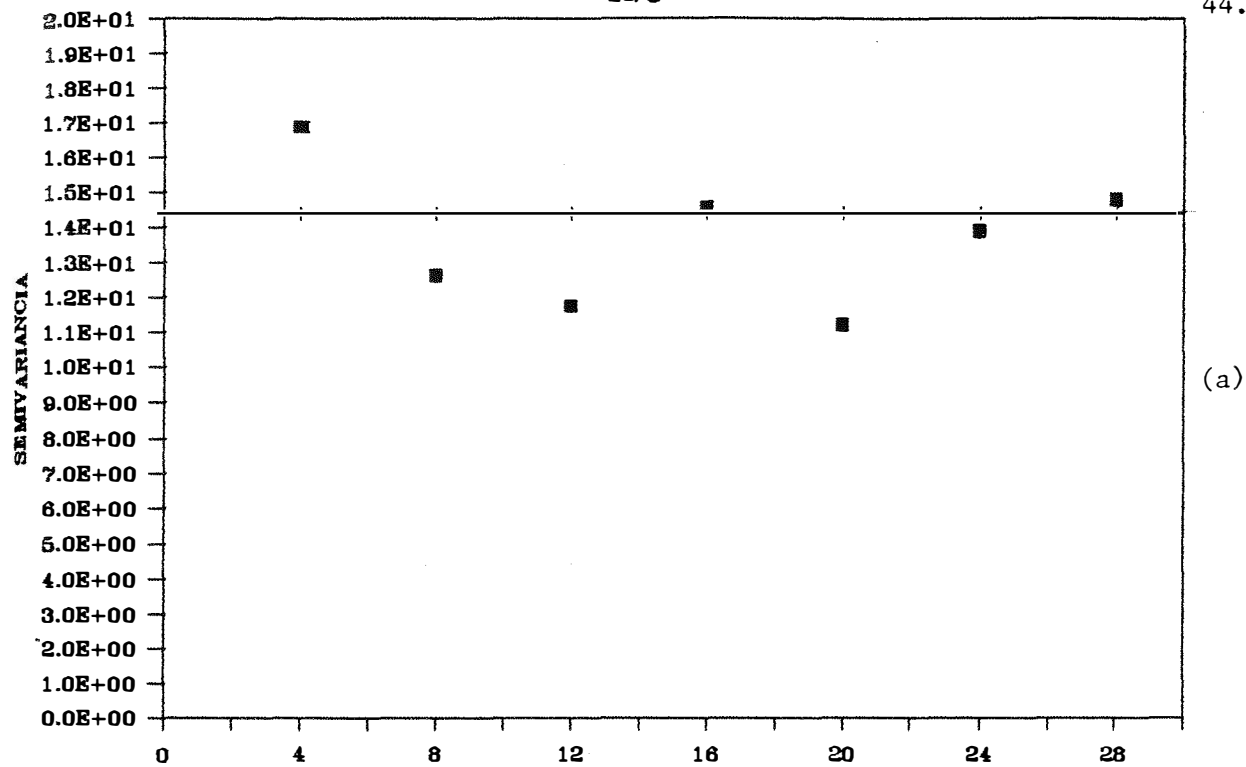


Figura 9 - Semivariâncias dos valores de  $\psi_m$  : kPa (a) e dos valores de  $\psi_m$  transformados em logaritmo neperiano de  $|kPa|/f$  (b).

29/5

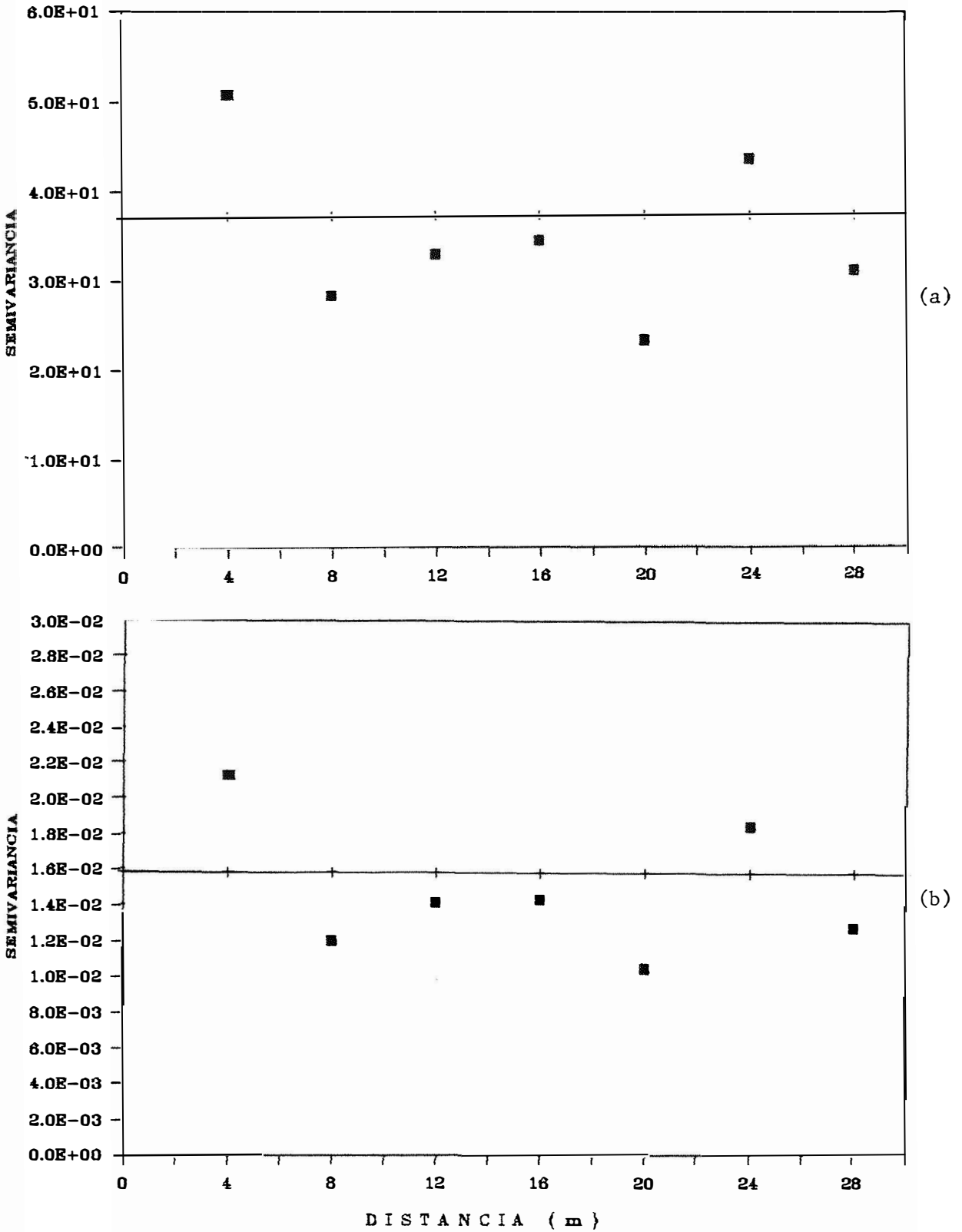


Figura 10 - Semivariâncias dos valores de  $\psi$  : kPa (a) e dos valores de  $\psi_m$  transformados em logaritmo neperiano de  $|kPa|/f$  (b).



1/8

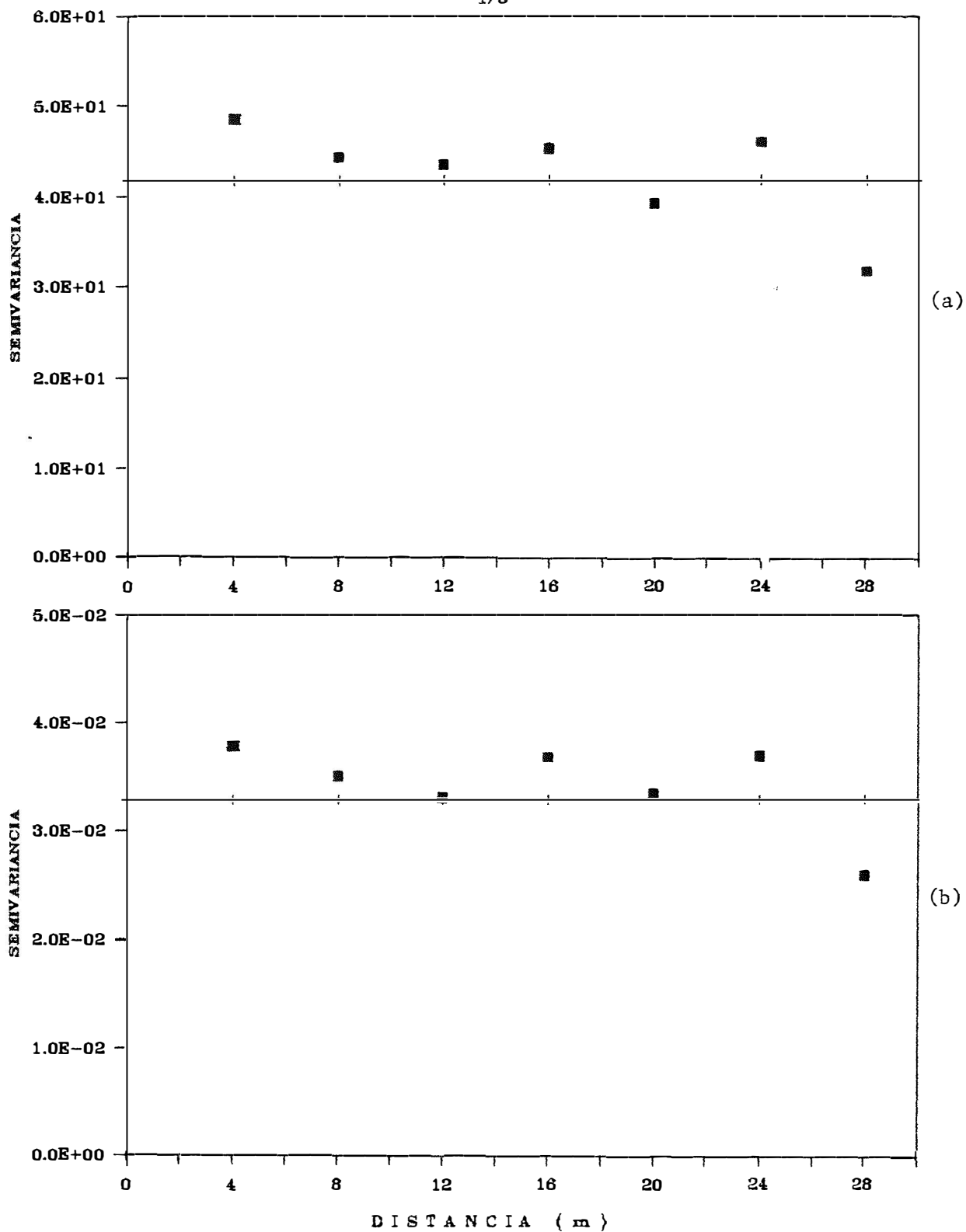


Figura 11 - Semivariâncias dos valores de  $\psi_m$ : kPa (a) e dos valores de  $\psi_m$  transformados em logaritmo neperiano de  $|kPa|/f$  (b).

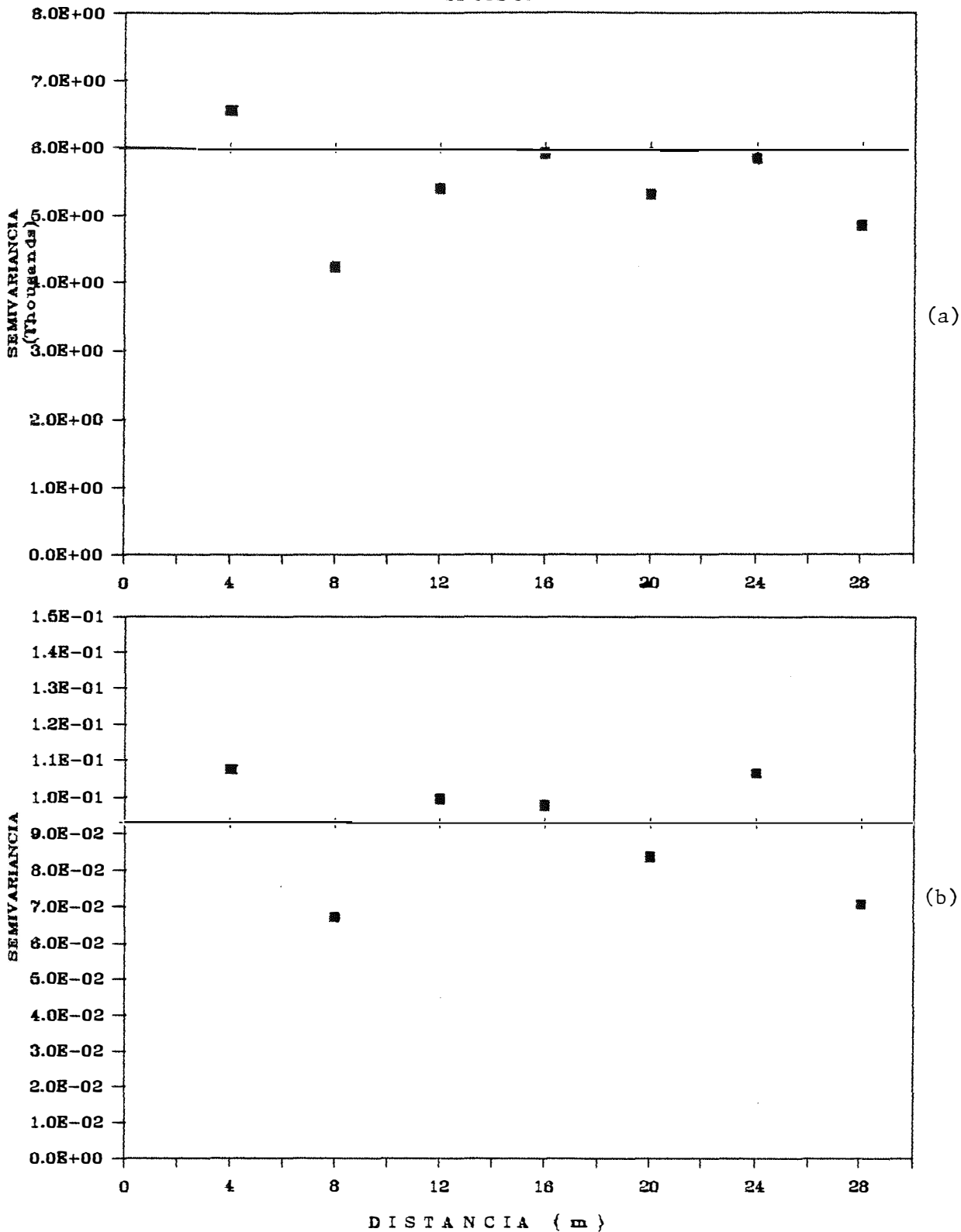


Figura 12 - Semivariâncias dos valores de  $\psi_m$ : kPa (a) e dos valores de  $\psi_m$  transformados em logaritmo neperiano de  $|kPa|/f$  (b).

veis de significância. O cálculo foi realizado pela expressão:

$$N = t_{\alpha}^2 \cdot s^2/d^2$$

onde N é o número de observações requeridas para uma estimativa média, com determinada precisão, dada por um valor  $d = (1 - \alpha') \cdot 100\%$ ;  $s^2$  é a variância dos dados, que reflete o grau de dispersão dos mesmos;  $t_{\alpha}$  é o nível de confiança desejado na estimativa, parâmetro da tabela de t de Student para infinitos graus de liberdade ( $t_{0,05} = 1,96$  e  $t_{0,10} = 1,645$ ).

Os valores de N são mostrados na Tabela 5. Na primeira se observa que N varia de 393 para um valor de potencial mátrico de -24 kPa até 42 tensiômetros para -5 kPa, correspondentes a 99% de precisão na estimativa da média. Esta tendência decrescente das observações se mantém não só à medida que aumenta o potencial, como também se incrementa o erro na estimativa. Ou seja, para um erro de 10% na estimativa da média, o número de tensiômetros vai de 3 a 1 para o maior e o menor  $\psi_m$ , respectivamente. Isto ocorre para um nível de significância de 0,05, enquanto que, na tabela seguinte, com um nível de significância de 0,10, a quantidade de tensiômetros diminui para 206 (precisão na estimativa de 99%), chegando a um valor mínimo de 30, à medida que o potencial médio ( $\bar{\psi}_m$ ) decresce. Esta tendência é mantida quando ampliamos nossa margem de erro, na estimativa da média, a 90%, para os mesmos potenciais médios, a quantidade de tensiômetros varia de 2 a 1.

Tabela 5 - Número de tensiômetros necessários (N) para a determinação de distintos potenciais matriciais médios com diferentes níveis de erro (0,01; 0,05; 0,10).

POTENCIAL MATRICIAL (-kPa)	D.PADRAO ln(kPa/f)	D.PADRAO ln(kPa/f)	* t			** t		
			N 0.01	N 0.05	N 0.10	N 0.01	N 0.05	N 0.10
24	5.5	0.48	393	12	3	206	8	2
22	5.4	0.31	126	5	1	89	3	1
5	3.9	0.13	42	2	1	30	1	1
3	3.5	0.18	102	4	1	71	3	1
2	3.2	0.15	84	4	1	60	3	1

\*t = 1,96 para  $(1 - \alpha) = 0,95$ ; \*\*t = 1,645 para  $(1 - \alpha) = 0,90$

Tabela 6 - Valores de  $\hat{\Theta}$  (cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>) segundo o método de VAN GENUCHTEN (1978) para dados de  $\psi_m$  obtidos em laboratório e no campo e calculados pela calibração da sonda de nêutrons.

DATA	POT.MATRICIAL MEDIO (-cm H2O)	$\hat{\Theta}$ Laborat.	$\hat{\Theta}$ Campo	$\hat{\Theta}$ Sonda
1	21/04	175.3	0.406	0.375
2	24/04	76.8	0.445	0.370
3	27/04	120.5	0.424	0.382
4	30/04	275.2	0.386	0.367
5	04/05	481.7	0.363	0.356
6	08/05	111.1	0.428	0.383
7	12/05	10.4	0.508	0.416
8	15/05	37.8	0.474	0.401
9	26/05	25.4	0.487	0.407
10	29/05	49.0	0.464	0.397
11	1/06	33.2	0.478	0.403
12	5/06	37.3	0.474	0.401
13	12/06	39.4	0.472	0.401
14	18/06	19.5	0.493	0.410
15	2/07	42.0	0.470	0.400
16	8/07	11.5	0.428	0.383
17	16/07	238.0	0.392	0.369
	MEDIA		0.447	0.391
	DEEVID PADRAO		0.041	0.016
	VARIANCIA		1.65E-03	2.68E-04

## 4.2.3. Determinação da curva de retenção

Com todos os valores estimados de umidade do solo ( $\Theta = \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) obtidos por meio da sonda de nêutrons e as leituras de potencialmétrica ( $\psi_m = -\text{cmH}_2\text{O}$ ) para cada local dentro da transeção e para cada data, construiu-se a curva característica de retenção de água para aquele solo e profundidade, mostrada na Figura 13. A grande dispersão dos pontos se deve à variabilidade do solo, já comentada. Estes dados foram ajustados por meio do modelo de VAN GENUCHTEN (1980), mostrando bom ajuste ( $r = 0,955$ ). Os parâmetros obtidos da iteração para a equação (5) foram:

$$\Theta_r (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}) = 0; \quad \Theta_s (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}) = 0,425; \quad \alpha = 0,534; \quad n = 1,0539;$$

$$p = 0,05114$$

resultando:

$$\hat{\Theta}_{\text{campo}} = 0,425 / \left[ 1 + (0,534 \cdot \psi_m)^{1,0539} \right] 0,05114$$

Com intuito de comparar-se a curva de retenção proveniente das medidas de potencial mático com tensiômetro com a obtida por Saraiva da Costa para o mesmo solo e profundidade para amostras analisadas em laboratório, foram estimados, com os valores médios de potencial mático ( $\bar{\psi}_m$ ) obtidos a campo, as umidades ( $\hat{\Theta}_{\text{campo}}$  e  $\hat{\Theta}_{\text{lab}}$ ) por meio das equações de Van Genuchten com parâmetros próprios e da curva de laboratório que foram os seguintes:

$$\Theta_r (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}) = 0,2976; \quad \Theta_s (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}) = 0,5289; \quad \alpha = 0,00972;$$

$$n = 0,88802; \quad p = 0,78780; \quad r = 0,987.$$

Os valores de umidade média ( $\bar{\Theta}$ ) são observados na Tabela

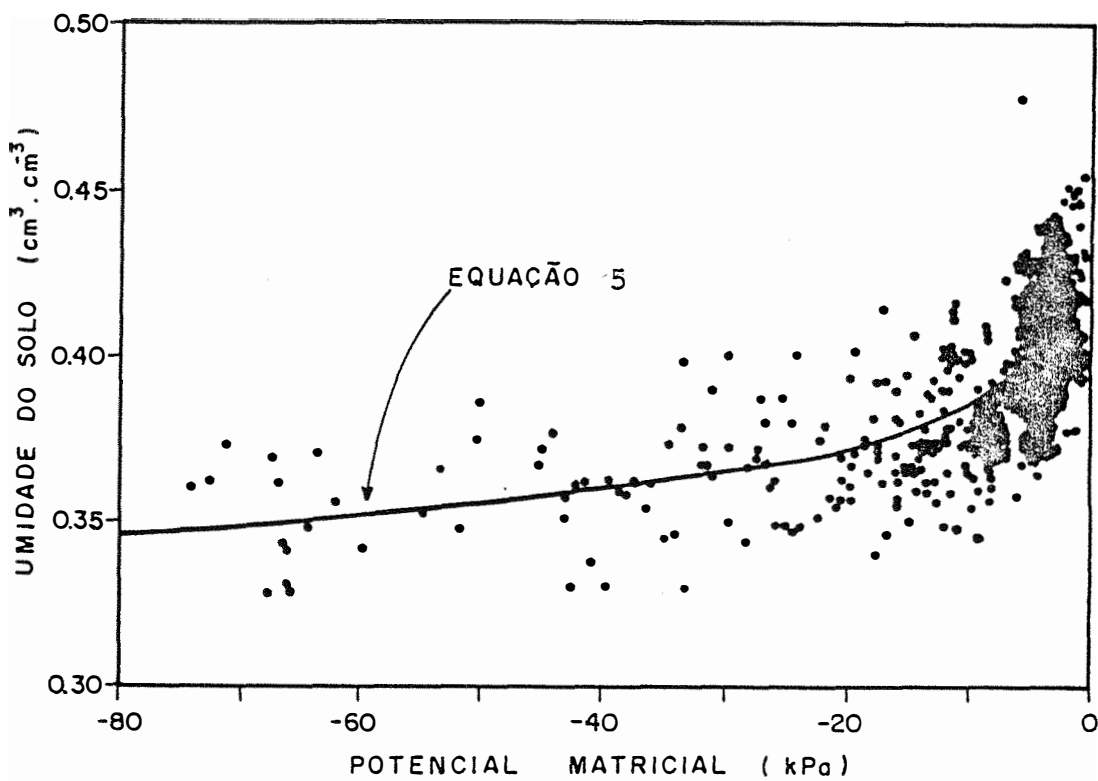


Figura 13 - Curva característica de água no solo, obtida em condições de campo, com dados de tensiômetro e de sonda de nêutrons. A linha cheia (equação 5) segue o modelo de VAN GENUCHTEN (1978).

6. A partir da comparação estatística das médias destas duas séries de valores, conclui-se que as mesmas apresentaram diferenças significativas ao nível de 5%, pertencendo a duas populações diferentes.

No gráfico da Figura 14 são comparados os valores médios de umidade, estimados por meio das duas equações ( $\hat{\Theta}_{\text{campo}}$  e  $\hat{\Theta}_{\text{laboratório}}$ ). A reta de  $45^\circ$  reflete a máxima correlação entre ambas as metodologias, observando-se que todos os pontos se localizam acima da reta. Isto demonstra que a utilização da curva, obtida a partir dos dados analisados em laboratório para estimar umidade, em vez da curva obtida com os dados de tensiômetro, superestimaria esses valores. Isto para o intervalo considerado (para altos valores de  $\Theta$ ), já que para umidades menores, estes valores se aproximam da reta ideal, estabelecendo-se uma melhor correlação entre ambas as metodologias.

#### 4.2.4. Determinação de umidade com sonda de nêutrons

Simultaneamente com as leituras de  $\psi_m$ , foram realizadas medições de umidade do solo com sonda de nêutrons. A partir dos valores de razão de contagem (CR) e as medidas de umidade volumétrica, foi determinada a reta de calibração por meio de um ajuste linear. Assim, se obtiveram os coeficientes de regressão:

$$\hat{\Theta} = -0,0954 + 1,0424 \cdot CR$$

Com a finalidade de se comparar a estimativa da umidade pela sonda de nêutrons e pela curva de retenção obtida com os dados de

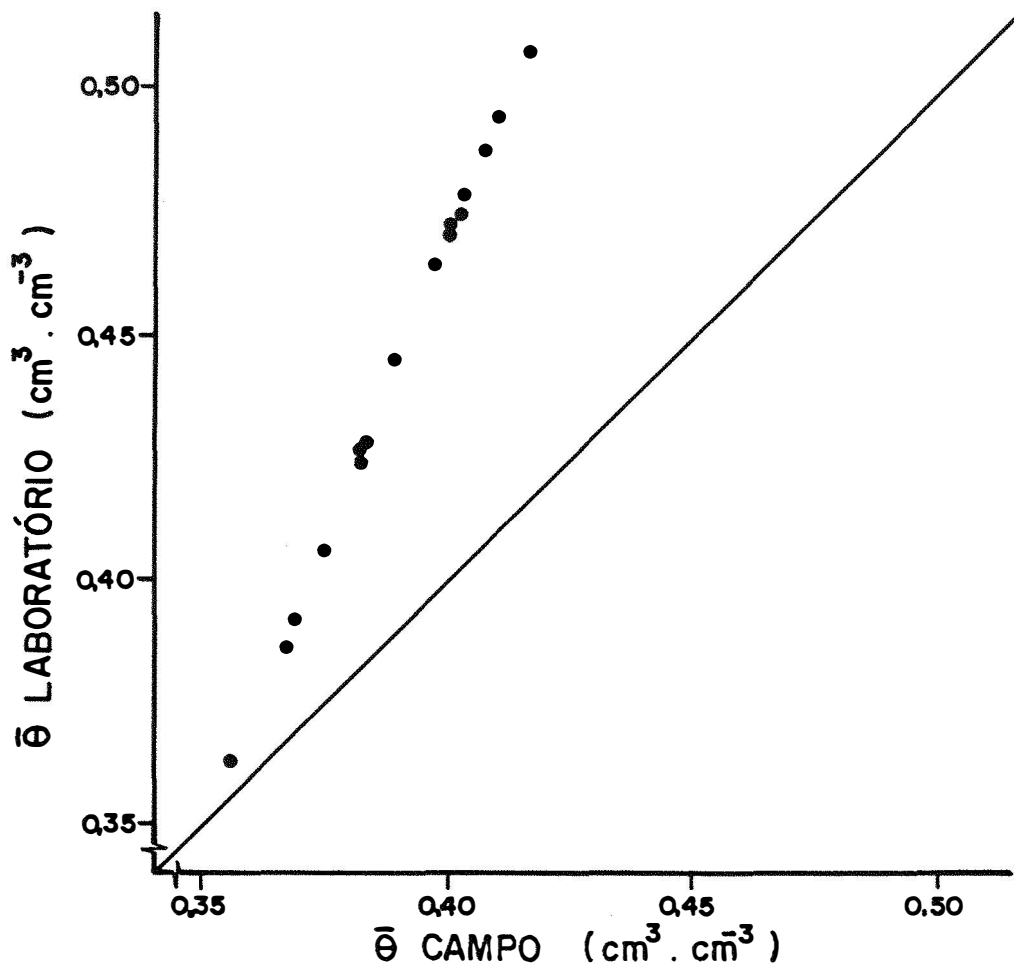


Figura 14 - Comparação dos valores médios de umidade ( $\hat{\theta}$ ,  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ), estimados mediante a equação de VAN GENUCHTEN (1978) com dados de  $\psi_m$  obtidos a campo e em laboratório.



$\psi_m$  no campo, se construiu o gráfico da Figura 15. Nele, observamos que os 17 pares de valores médios de  $\hat{\theta}$  estão sobre a reta de  $45^\circ$ . Demonstra-se, assim, que a estimativa de umidade pode realizar-se indistintamente, por qualquer dos dois métodos.

No entanto, quando se comparou a estimativa da umidade ( $\hat{\theta}_{\text{sonda}}$ ) por meio da sonda e pela curva de retenção ( $\hat{\theta}_{\text{Van Genuchten}}$ ) com os valores de umidade volumétrica amostrados ( $\theta_{\text{obs}}$ ) em uma data determinada (16/07, Figura 16), observou-se que nenhum dos dois métodos seguiram as variações de umidade do solo. Vê-se, também, que a estimativa da sonda de nêutrons mostra uma tendência decrescente até os últimos pontos. Isto pode ser devido à calibração da sonda, que foi feita com amostragens em todos os pontos de leitura, mas só em três oportunidades, com pouca variação de umidade do solo. Isto determinou um ajuste regular da reta de calibração com uma grande dispersão dos pontos devida à grande variabilidade do solo, sendo esta a principal fonte de erro na calibração.

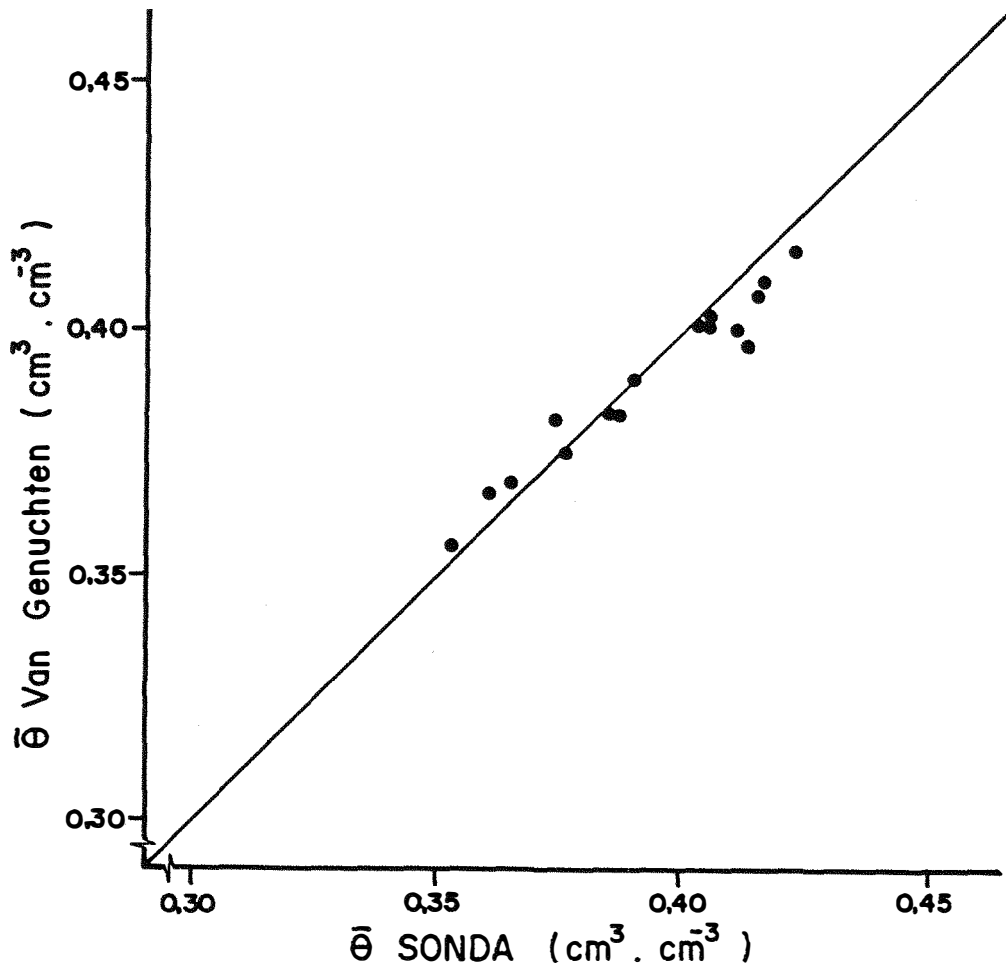


Figura 15 - Comparação dos valores médios de umidade ( $\bar{\theta}$ ,  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ), estimados mediante a equação de VAN GENUCHTEN (1978) com dados de  $\psi_m$  obtidos a campo e mediante a curva de calibração da sonda de nêutrons.

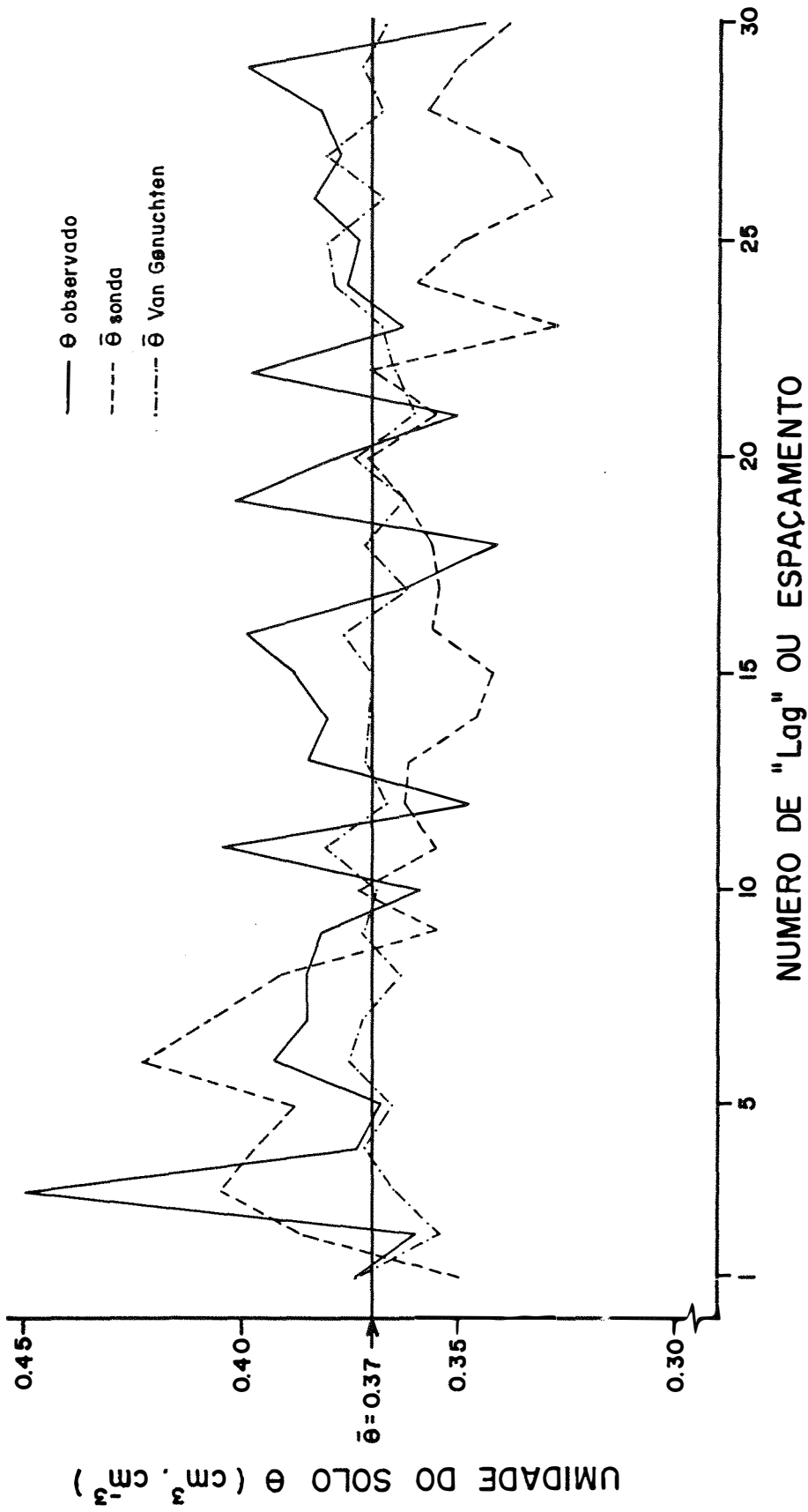


Figura 16 - Comparação entre os dados de umidade do solo ( $\theta_{\text{obs}}$ ), obtidos diretamente por gradagem e estimados mediante sonda de nêutrons ( $\theta_{\text{sonda}}$ ) e utilizando a curva característica para  $\psi_m$  obtido a campo ( $\theta_{\text{Van Genuchten}}$ ).

## 5. CONCLUSÕES

Os testes de laboratório deram como resultado, nas condições em que foram realizados, que os erros encontrados foram de características operacionais, com uma grande participação da variabilidade do solo. Isto fez aumentar a variância à medida que diminuía o potencial matricial. Nas condições em que foi desenvolvido o experimento, foi impossível separar o erro operacional do "efeito solo" para poder quantificá-lo.

Com referência ao erro instrumental, deveria levar-se em consideração, na sua determinação, a variabilidade da condutividade hidráulica das cápsulas, assim como a variabilidade da pressão de borbulhamento e das leituras, instalando-se os tensiômetros num material suficientemente homogêneo para que a variação da condutividade hidráulica ponto a ponto não afetasse as medidas de potencial ou então trabalhar-se com um potencial baixo (menos negativo) e constante. Assim, poder-se-ia determinar, também, os tempos de resposta, os quais dependeriam unicamente das características do instrumento.

Quanto aos erros de localização, conclui-se que são os de maior influência na medida do potencial mátrico, especialmente quando é elevado (mais negativo), ou seja, em situações de estresse hídrico para as culturas. Neste caso, para potenciais mátricos de -33 kPa a

-44 kPa considerados limites na irrigação para a cultura de feijão, os coeficientes de variação correspondentes foram de 35% e 40%.

Os parâmetros estatísticos, como média, variância e coeficiente de variação da média, podem ser utilizados para comparar qualitativamente diferentes situações de uma variável, como o potencial mátrico. No entanto, quando uma variável tem comportamento temporal diferente, como neste caso em que a distribuição dos dados varia com o aumento de potencial, fazer-se uma análise quantitativa é arriscado. Isto se deve ao fato de que todos os testes estatísticos são estabelecidos para distribuições normais e dados independentes. Por esse motivo se recorre a transformações matemáticas que nem sempre resolvem o problema satisfatoriamente.

Por outro lado, quando se planifica um experimento em que se pretende analisar uma propriedade que varia não só temporal, como espacialmente, deve-se encontrar o espaçamento no qual os valores estejam correlacionados, escolhendo-se a distância mínima possível e, assim, poder determinar que dados são independentes ou dependentes.

Outra razão de variação dos valores de potencial foi a distribuição aleatória das precipitações. Conclui-se, então, que, para analisar uma variável temporal, deveria ser deixado de lado o efeito provocado pela chuva.

Por último, a variabilidade do solo afetou tanto a determinação da curva de retenção de água no solo quanto a calibração da sonda de nêutrons, fazendo com que ambas só possam ser utilizadas na estimativa dos valores médios de umidade no solo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABELE, G.; McKIM, H.L.; BROCKETTE, B. Mass water balance during spray irrigation with waste water at Deer Creek Lake land treatment site. Rep. 79-29, U.S. Army Corps of Eng., Hannover, N.H., 1979.
- ANDERSON, M.B. & BURT, T.P. Automatic monitoring of soil moisture conditions in a hill slope spur and hollow. J. Hydrol. 33: 27-36, 1977.
- BAKKER, J.W. Snelle vochts panningen-metingem door tensiometers met elektrische drukopnemers. Miscellaneous Reprint n<sup>o</sup> 216. Institute for Land and Water Management. Wageningen, The Netherlands.
- BELL, K.R.; BLANCHARD, B.J.; SCHMUGGE, T.J.; WITCZK, M.W. Analysis of surface moisture variations within large-field sites. Water Resour. Res., 16(4): 796-810,
- BIANCHI, W.B. Measuring soil moisture tension changes. Agric. Eng., 43: 398-399, 1962.
- CAMPBELL, J.B. Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineations of two soil mapping units. Soil Sci. Soc. Am. J., 42: 460-464, 1978.

- CASSEL, B.K. & BAUER, A. Spatial variability in soils bellow depth of tillage. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 39: 247-250, 1975.
- ELRICK, D.E. Soil water movement: theory and applications. Proceedings of the First Canadian Conference on Micrometeorology, Part II, p. 477-487, Dep. of Trans., Toronto, Canada. 1967.
- GARDNER, W.; ISRAELSEN, O.W.; EDLEFSEN, N.E.; CONRAD, H. The capillary potential function and its relation to irrigation practice. Phys. Rev., Ser. 2, 20, 196, 1922.
- GREMINGER, P.J.; SUD, Y.K.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of field-measured soil-water characteristics. Soil Sci. Soc. Am. J., 49(5): 1075-1081, 1985.
- GUMA'A, G.S. Spatial variability of in situ available water. Ph.D. Dissertation, University of Arizona, Tucson, 1978.
- HAMLETT, J.M.; HORTON, R.; CRESSIE, N.A. Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analyses. Soil Sci. Soc. Am. J., 50: 868-875, 1986.
- HARTMAN, R. Soil water potential - tensiometers. Proc. "College on Soil Physics", Trieste, Italy, 1987.
- HILLEL, D. Soil and water: physical principles and processes. Academic Press, New York, p. 73-77, 1971.
- KIESLING, T.C.; DAVIDSON, J.M.; WEEKS, D.L.; MORRIS, R.D. Precision with which selected soil physical parameters can be estimated.

Soil Sci., 124: 241-248, 1977.

KLUTE, A. & PETERS, D.B. A recording tensiometer with a short response time. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 26: 87-88, 1962.

KLUTE, A. & GARDNER, W.R. Tensiometer response time. Soil Sci., 93: 204-207, 1962.

LEONARD, R.A. & LOW, P.P. A adjusting mull-point tensiometer. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 26: 123-125, 1962.

LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera. Piracicaba, CENA/USP, 1984. 232 p.

MARTHALER, H.P.; VOGELSANGER, W.; RICHARD, F.; WIERENGA, P.J. A pressure transducer for field tensiometers. Soil Sci. Soc. Am. J., 47(4): 624-627, 1983.

MILLER, R.D. A technique for measuring tensions in rapidly changing systems. Soil Sci., 72: 291-301, 1951.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; ERH, K.T. Spatial variability of field-measured soil water properties. Hilgardia, 42: 215-259, 1973.

OLITTA, A.F.L. Construção de tensiômetros para controle da irrigação. IV Congresso de Engenharia Agrícola, SBEA, Viçosa, MG, 1974.

PAES DE CAMARGO, A.; GROHMANN, F.; PAES DE CAMARGO, M.B. Tensiômetro simples de leitura direta. Pesq. agropec. bras., 17(12): 1763-1772, 1982.



- REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. Campinas, Fundação Cargill, 1975. 286 p.
- REICHARDT, K.; VIEIRA, S.R.; LIBARDI, P.L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. R. bras. Ci. Solo, 10: 1-6, 1986.
- RICE, R. A fast response field tensiometer system. Trans. Amer. Soc. Eng., 12: 48-50, 1969.
- RICHARDS, L.A. Methods of measuring soil moisture tension. Soil Sci., 68: 95-112, 1949.
- RICHARDS, L.A. & GARDNER, W. Tensiometers for measuring the capillary tension of soil water. J. Amer. Soc. Agron., 28: 352-358, 1936.
- RICHARDS, L.A. & O'NEAL, R. Some field observations with tensiometers. Proc. Soil Sci. Am., 1: 71-91, 1937.
- ROSE, C.W. Agricultural physics. Oxford, Pergamon Press, 1966. 230 p.
- RUSSO, D. & BRESLER, E. Soil hydraulic properties as stochastic processes. 1. Analysis of field spatial variability. Soil Sci. Soc. Am. J., 45: 682-687, 1981.
- SARAIVA DA COSTA, A.C. Balanço hídrico em culturas de feijão (Phaseolus vulgaris L.) e de milho (Zea mays L.) sob condições de campo. Dissertação de Mestrado, 1986.
- SCHMUGGE, T.J.; JACKSON, T.J.; MCKIM, H.L. Survey of methods for soil moisture determination. Water Resour. Res., 16: 961-979, 1980.

- SHAPIRO, S.S. & WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, 52, 3 e 4, p. 591, 1965.
- SINCLAIR, D.F. & WILLIAMS, Y. Components of variance involved in estimating soil water content and water content change using a neutron moisture meter. Austr. J. Soil Res., 17: 237-247, 1979.
- SOUZA, M.L.P.; LIBARDI, P.L. & REICHARDT, K. Propagação de erros na medida de fluxos de água no solo em condições de campo. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 3: 137-140, 1979.
- TAYLOR, S.A. & ASHCROFT, G.L. Physical edaphology: the physics of irrigated and non-irrigated soils. W.H. Freeman & Co., U.S.A., p. 256-262, 1972.
- TOWNER, G.D. Theory of time response of tensiometers. J. Soil Sci., 31: 607-621, 1980.
- VACHAUD, G.D. & THONY, J. Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents. Water Resour. Res., 7: 111-120, 1971.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 892-898, 1980.
- VAUCLIN, M.; HAVERCAMP, R. & VACHAUD, G. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements. 2. Spatial stand point. Soil Sci., 137(3): 141-148, 1984.
- VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. Soil Sci. Soc. Am. J., 45: 1040-1048, 1981.

- WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. Cap. 13: Applications of Soil Physics, D. Hillel, ed. 385 p. 1980.
- WATSON, K.K. Non-continuous porous media flow. Report 84 - Water Research Laboratory (University of New South Wales). 1965.
- WATSON, K.K. Response behaviour of a tensiometer-pressure transducer system under conditions of changing pore air pressure. Soil Sci., 104: 439-443, 1966.
- WATSON, K.K. A recording field tensiometer with rapid response characteristics. Water Resour. Res., 5: 33-39, 1967.