

CENA - BIBLIOTECA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA
CAMPUS DE PIRACICABA

BOLETIM DIDÁTICO - 022

A SONDA DE NÊUTRONS E SEU USO NA PESQUISA AGRONÔMICA

O.O.S. Bacchi

K. Reichardt

CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR
NA AGRICULTURA - CENA/USP
BIBLIOTECA

Piracicaba

1990

No 9055
USP - Campus de Piracicaba
DIVISÃO DE BIBLIOTECA
E DOCUMENTAÇÃO

BOLETIM DIDÁTICO-022

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Liv
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/

B117s Bacchi, Osny Oliveira Santos
A sonda de nêutrons e seu uso na pesquisa agro-
nômica / Osny Oliveira Santos Bacchi e Klaus Rei-
chardt.-- Piracicaba : CENA, 1990.
84p.-- (Boletim didático, 22)

Bibliografia.

1. Solo - Umidade - Medição 2. Sonda de nêutrons
I. Reichardt, Klaus, colab. II. Título III. Série

CDD 631.432
CDU 631.432.2

ÍNDICE

	Páginas
1. Introdução	01
2. Descrição do instrumento e princípio de funcionamento	04
2.1 Sonda e blindagem	05
2.2 Sistema eletrônico de contagem	07
3. Segurança e Manutenção	12
4. Tubos de acesso e sua instalação	13
5. Calibração	17
5.1 Calibração de laboratório	26
5.2 Calibração de campo	27
5.3 Modelos teóricos	28
6. Esfera de influência	29
7. Erros envolvidos na determinação da umidade e do armazenamento de água no solo com a sonda de neutrons	34
7.1 Erros envolvidos na calibração e erro instrumental	36
7.1.1 Variâncias (s^2) e covariância (Cov) das estimativas dos parâmetros $\hat{a}$ e $\hat{b}$ da regressão	40
7.1.2 Variância total de θ	40

	Páginas
7.2 Erro local	46
7.3 Erros na determinação do armazenamento	52
7.3.1 Método Trapezoidal	53
7.3.2 Método de Simpson	58
8.Aplicações	66
8.1 Armazenamento de água no solo	66
8.2 Curvas de retenção de água no campo	72
8.3 Condutividade hidráulica de solos	74
8.4 Variabilidade espacial de solos	78
8.5 Extração de água por raízes de culturas	80
9.Referências Bibliográficas	83

A SONDA DE NEUTRONS E SEU USO NA PESQUISA AGRONOMICA

O.O.S. Bacchi

Centro de Energia Nuclear na
Agricultura - CENA/USP

K. Reichardt

Depto. de Física e Meteorologia
ESALQ/USP e Centro de Energia
Nuclear na Agricultura, CENA/USP

RESUMO

Este Boletim Didático apresenta informações sobre o uso das sondas de neutrons em projetos de pesquisa que envolvem a medida da umidade do solo. Consta de uma rápida descrição do instrumento, do princípio de seu funcionamento, dos problemas de manutenção e de procedimentos de segurança. É discutida a instalação dos tubos de acesso, a calibração do instrumento e a sua " esfera de influência " que é o volume de " amostragem " durante uma medida. A análise dos erros envolvidos na determinação da umidade e do armazenamento de água é apresentada com detalhes e exemplos reais. Na parte final são apresentados vários exemplos de aplicação do instrumento em pesquisas de campo.

CENA - BIBLIOTECA

THE NEUTRON PROBES AND THEIR USE IN AGRICULTURAL RESEARCH

SUMMARY

This text presents information about the use of neutron probes in agricultural research projects that involve the measurement of soil water content. Includes a description of the equipment, physical working basis, maintenance and security procedures. Access tube installation, calibration and sphere of influence are also discussed. Error analysis is presented in detail. The final part consists of a series of practical examples of neutron probe application in research projects.

A SONDA DE NÊUTRONS E SEU USO NA PESQUISA AGRONÔMICA

Osny O P Bacchi (CENA/USP)

Klaus Reichardt (ESALQ e CENA - USP)

1. INTRODUÇÃO

Embora a umidade do solo se apresente como um conceito físico simples, é uma propriedade difícil de ser medida. Estimativas da umidade dos solos obtidas por diferentes métodos frequentemente apresentam desvios consideráveis em relação ao "verdadeiro" valor, o qual, de qualquer maneira, nunca é conhecido. O principal problema está no procedimento de amostragem. Uma vez tomada a amostra do solo no campo, a sua umidade pode ser determinada com um alto grau de precisão e exatidão mas nunca se sabe, no entanto, se a amostra coletada representa realmente o solo à profundidade desejada, devido a problemas de variabilidade local e de procedimentos de amostragem.

A umidade do solo pode ser expressa com base em massa ou em volume. No presente trabalho serão seguidos os seguintes símbolos e definições:

a) Umidade com base em massa - u (g H₂O/g solo seco)

$$u = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa de solo seco}} = \frac{m_{su} - m_{ss}}{m_{ss}} \dots\dots\dots (1)$$

onde: m_{su} = massa de solo úmido

m_{ss} = massa de solo seco.

b) Umidade com base em volume θ ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O} / \text{cm}^3 \text{solo}$).

$$\theta = \frac{\text{volume de água}}{\text{volume de solo}} = \frac{m_{su} - m_{ss}}{v} \dots\dots\dots (2)$$

onde : $v \Rightarrow$ volume da amostra de solo. Nessa definição assume-se que a densidade da água é $1\text{g}/\text{cm}^3$ e que, portanto, $(m_{su} - m_{ss})$ é igual ao volume de água da amostra.

Pode-se demonstrar que:

$$\theta = u \cdot d_g \dots\dots\dots (3)$$

onde d_g é a densidade global do solo seco (g de solo seco / cm^3 de solo), definida como:

$$d_g = \frac{m_{ss}}{v} \dots\dots\dots (4)$$

Exemplo: Em um perfil de solo foi coletada uma amostra de solo à profundidade de 20 cm, com um cilindro volumétrico de 200 cm^3 , cuja tara era de 105,3 g. Após a eliminação do excesso de solo da amostra e tendo certeza de que o solo ocupava o volume v do cilindro, a mesma foi pesada obtendo-se 395,6 g. A amostra foi levada à estufa à 105°C até peso constante, obtendo-se ao final 335,7 g. Neste caso teremos:

$$u = \frac{395,6 - 335,7}{335,7 - 105,3} = 0,260 \text{ g/g ou } 26,0\% \text{ em peso}$$

$$\theta = \frac{395,6 - 335,7}{200} = 0,300 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \text{ ou } 30\% \text{ em volume}$$

$$d_g = \frac{335,7 - 105,3}{200} = 1,152 \text{ g/cm}^3$$

e pode ser observado que $0,300 = 1,152 \cdot 0,260$ (eq.3)

Existem vários métodos para a determinação da umidade e densidade de solos. Eles diferem principalmente quanto à forma de amostragem, mas as equações 1 e 4 são sempre aplicáveis quando as informações são disponíveis. A maior dificuldade está na determinação do volume v da amostra. A amostragem do solo com um trado provoca destruição da estrutura do solo e a informação sobre o volume da amostra é perdida. No presente texto não serão discutidos todos esses métodos "clássicos" de determinação de umidade de solos. O leitor pode recorrer à textos básicos de física de solos, ou especificamente ao texto *Methods of Soil Analysis - 1986*.

Serão discutidos aqui, no entanto, alguns aspectos dos métodos clássicos para fins de comparação com a sonda de nêutrons, a qual será tratada aqui em detalhes. Uma grande desvantagem dos métodos clássicos é sua natureza destrutiva. As amostras devem ser tomadas em cada evento, o que interfere

severamente na estrutura original do perfil do solo. Mesmo tomando-se as amostras com um pequeno trado, após várias amostragens o campo experimental ou a parcela estará bastante danificada. Outro problema é a variabilidade do solo. À cada evento de amostragem, mesmo tomando-se a amostra à mesma profundidade, um novo ponto é amostrado. Um terceiro problema, que pode não ser de grande importância, é o tempo de medida, que geralmente é maior que 24 horas.

Com a sonda de nêutrons, a qual discutiremos em detalhes nas páginas seguintes, destrói-se menos a estrutura do solo. Isto ocorre apenas uma vez, por ocasião da instalação do tubo de acesso, após o que as medidas são tomadas de forma rápida, a qualquer tempo e a qualquer profundidade, sem novas perturbações no perfil do solo. É evidente que a sonda apresenta também suas desvantagens, as quais serão também discutidas ao longo do texto.

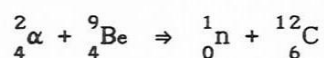
2 - DESCRIÇÃO DO INSTRUMENTO E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO:

A sonda de nêutrons consiste essencialmente de duas partes: a) sonda com blindagem, e b) sistema eletrônico de contagem. Em alguns modelos essas partes são separáveis e em outros não.

2.1) Sonda e blindagem:

A sonda é um cilindro metálico selado de 3 à 4 cm de diâmetro e 20 à 30 cm de comprimento. Este contém uma fonte radioativa que emite nêutrons rápidos, um detector para nêutrons lentos e um pré-amplificador. O sinal do pré-amplificador é conduzido por um cabo de 5 à 20 m de comprimento ao sistema eletrônico de contagem.

A geometria da sonda, tipo e atividade da fonte de nêutrons, tipos de detectores e pré-amplificadores variam consideravelmente de fabricante para fabricante. As fontes de nêutrons são uma mistura de um emissor alfa (Amerício, Rádio) e Berílio em pó. As partículas alfa bombardeiam os núcleos de Berílio ocorrendo a seguinte reação nuclear:



Os nêutrons ${}^1_0\text{n}$, que são o produto da reação, são chamados de nêutrons rápidos, apresentando energias da ordem de 2 MeV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$).

A atividade da fonte é geralmente dada pela atividade do emissor alfa, expressa em (mCi). A maioria das fontes apresenta uma atividade da ordem de 5 à 50 mCi. Uma vez que os emissores alfa geralmente emitem também radiação gama, as fontes de nêutrons emitem portanto: radiação gama, partículas alfa e nêutrons rápidos. Portanto a proteção radiológica é um aspecto de grande importância quando se trabalha com sondas de nêutrons. A blindagem da sonda, que é a sua própria caixa,

deve ser projetada de maneira a garantir a proteção do operador. As sondas fabricadas apresentam uma blindagem que é projetada no sentido de garantir uma exposição nos níveis permissíveis quando a fonte encontra-se dentro da mesma. Quando a fonte está fora da proteção, o operador fica exposto à radiação gama e nêutrons. Isso deve ser terminantemente evitado. As sondas são construídas de forma a permitir que a fonte deixe a blindagem e penetre rapidamente no tubo de acesso, para dentro do perfil do solo, evitando-se assim exposições excessivas nessa operação.

A blindagem de radiação gama é mais eficiente com chumbo enquanto que para nêutrons rápidos é com parafina, polietileno ou qualquer outro material que contenha altos teores de Hidrogênio.

Durante as medições a sonda é baixada à profundidade desejada no perfil do solo através de um tubo de acesso de alumínio. O alumínio é "transparente" para nêutrons rápidos que irão atravessar sua parede e se espalhar pelo solo formando uma nuvem de nêutrons de cerca de 30 à 50 cm ao redor da fonte. Essa interação com o solo (e com a água do solo) é utilizada para se estimar a umidade do solo, como será visto mais adiante.

Próximo à fonte existe um detector de nêutrons lentos, que não é sensível para neutrons rápidos, e que detectará, portanto, somente os nêutrons lentos resultantes da interação

dos nêutrons rápidos com o solo. Existem vários detectores de nêutrons lentos disponíveis, como detectores de trifluoreto de boro, detectores de hélio e detectores cintiladores. Cada fabricante utiliza um ou outro em função de suas vantagens e desvantagens.

Os pulsos que saem do detector são primeiramente pré-amplificados por um amplificador que se localiza próximo ao detector e fonte. Somente estes pulsos ligeiramente amplificados é que são enviados para o sistema de contagem através de um cabo que conecta as duas partes da sonda.

2.2) Sistema eletrônico de contagem:

O sistema eletrônico de contagem varia muito de sonda para sonda. Consiste basicamente de um amplificador, fonte de alta voltagem, contador, relógio, bateria recarregável, microprocessador, etc. Uma vez que o tempo de contagem é muito importante do ponto de vista estatístico, a maioria das sondas apresenta várias opções de tempo de contagem que podem ser selecionadas. O microprocessador já transforma as contagens nos diferentes tempos para contagens por minuto (cpm) ou contagens por segundo (cps). Cada contagem corresponde a um impulso originado de um neutron lento que atingiu o detector.

Sondas modernas podem apresentar um microprocessador que permite a entrada de equações de calibração para diferentes solos e, dessa forma, os resultados são apresentados já em umidade (%, g/g, cm^3/cm^3) ou mesmo em termos de água

armazenada em uma certa camada de solo (mm/10 cm, pol/pé).

Cada fabricante apresenta em detalhes as instruções de operação e, portanto, não serão discutidas aqui. A figura 1 é um diagrama esquemático de uma sonda de nêutrons em posição de operação no campo a uma profundidade z. A figura 2 é um diagrama esquemático de uma sonda de superfície. Estas medem a umidade na camada de solo de 0 à 15 cm e não necessitam de tubo para acesso.

O princípio de funcionamento das sondas de nêutrons é muito simples. A fonte de nêutrons emite nêutrons rápidos (da ordem de 2 MeV) que interagem com a matéria que circunda a sonda. Uma vez que os nêutrons não apresentam cargas, os campos elétricos não contrariam seu movimento. Ocorrem três processos de interação: absorção de nêutrons por núcleos, espalhamento de nêutrons por colisões, e desintegração de nêutrons.

A absorção de nêutrons por núcleos depende muito da sua energia e do tipo de núcleo alvo. A probabilidade desse processo é medida através da secção de choque da reação que, em geral, para a maioria dos elementos presentes no solo, é muito pequena. Se a reação ocorrer, um neutron é absorvido por um núcleo Z_X de acordo com a equação :

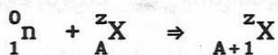


Figura 1 - Diagrama de uma sonda de neutrons em posição de funcionamento.

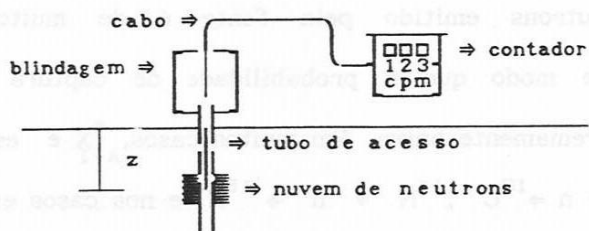
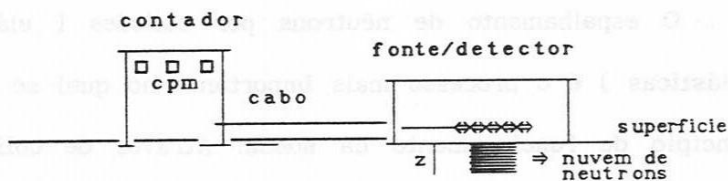


Figura 2 - Diagrama de uma sonda de neutrons de superfície:



onde o núcleo ${}^Z_{A+1}X$ é, em alguns casos, instável, desintegrando-se e emitindo radiação. Este é o mesmo princípio da ativação neutrônica. O processo ocorre, no entanto, somente com alguns poucos núcleos presentes no solo, como, por exemplo: Ag, Au, In, Fe, Al, Mn, etc, a maioria dos quais apresentando-se em baixas concentrações no solo. Além disso, o fluxo de nêutrons emitido pela fonte é de muito baixa intensidade de modo que a probabilidade de captura de um neutron é extremamente baixa. Em muitos casos, ${}^Z_{A+1}X$ é estável (como em: ${}^{12}\text{C} + n \Rightarrow {}^{13}\text{C}$; ${}^{14}\text{N} + n \Rightarrow {}^{15}\text{N}$) e nos casos em que é radioativo (como em: ${}^{23}\text{Al} + n \Rightarrow {}^{24}\text{Al}$, meia vida 2.3 minutos) geralmente sua meia vida é muito curta. Devido a esses fatos pode-se afirmar que não ocorre virtualmente nenhuma ativação dos materiais do solo quando a sonda de nêutrons é colocada no solo. Mesmo o alumínio do tubo de acesso, que pode tornar-se ligeiramente ativado durante uma medida, apresenta um decaimento rápido, desativando-se em poucos minutos.

✓ O espalhamento de nêutrons por colisões (elásticas e inelásticas) é o processo mais importante no qual se baseia o princípio de funcionamento da sonda. Através de colisões, os nêutrons rápidos (de alta energia , cerca de 2 MeV) perdem energia (moderação) e tornam-se lentos ou térmicos (de baixa energia, cerca de 0.025 eV). Se as colisões são elásticas, quanto maior o núcleo alvo menor será a energia

perdida pelo neutron. A tabela 1 ilustra esse fato.

Tabela 1 - Número de colisões necessárias para reduzir a energia de um neutron de 2 MeV para 0.025 eV.

Isótopo alvo	Número de colisões
^1H	18
^2H	25
^4He	43
^7Li	68
^{12}C	115
^{16}O	152
^{238}U	2172

Pela tabela 1 pode-se verificar que o ^1H é o isótopo alvo mais eficiente na redução da energia do neutron rápido. Diz-se que o hidrogênio é um bom moderador de nêutrons. Uma vez que o hidrogênio é um constituinte da água, esta é também um bom moderador para nêutrons. Assim, em um dado solo, quanto maior o seu conteúdo de água, maior a quantidade de nêutrons lentos presentes ao redor da fonte de nêutrons rápidos. Outros componentes do solo também apresentam hidrogênio na sua constituição mas, nesses casos, tais componentes não variam em sua concentração e são levados em conta na calibração do instrumento.

Os nêutrons, quando livres, são instáveis, apresentando

uma meia vida de 13 segundos. Sendo assim, se um neutron não for capturado ele irá desintegrar-se depois de algum tempo. Devido a esse processo, após algumas frações de segundo, uma "nuvem" de nêutrons lentos desenvolve-se ao redor da fonte, apresentando uma forma esférica de diâmetro de cerca de 15 à 30 cm. O número de nêutrons lentos por unidade de volume em cada ponto dessa "nuvem" permanece constante e é proporcional ao conteúdo de água no solo abrangido pela "nuvem". Uma vez que o detector de nêutrons lentos é colocado dentro do volume da "nuvem", a taxa de contagem (cpm ou cps) é proporcional ao conteúdo de água (θ) no mesmo volume de solo. O instrumento é então calibrado através de amostras de solo retiradas do volume abrangido pela "nuvem" de nêutrons nas quais são tomadas medidas de θ por meio do método gravimétrico. Maiores detalhes sobre a teoria e a calibração das sondas de nêutrons podem ser encontrados em GREACEN (1981) e IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY) (1970).

3.SEGURANÇA E MANUTENÇÃO.

Como já foi afirmado, as sondas de nêutrons disponíveis no mercado são testadas para exposição à radiação e o operador é exposto à níveis de radiação inferiores aos permitidos internacionalmente. No entanto, deve-se ter atenção com os seguintes aspectos:

- a) As sondas de nêutrons, como quaisquer outros materiais radioativos, não devem ser operadas por pessoas com

baixo nível de instrução.

b) Durante o uso da sonda o operador deve utilizar um dosímetro para nêutrons e para radiação gama.

c) Cuidado especial deve ser tomado contra exposição no caso da sonda estar fora da blindagem. O manuseio da fonte fora da blindagem deve ser evitada e, quando necessário, ser feita por pessoal especializado.

d) Reparos no equipamento devem ser feitos somente por pessoal autorizado.

e) As sondas devem ser armazenadas em locais apropriados para materiais radioativos, longe de pontos de circulação e de permanência de pessoas e animais.

f) Detalhes de manutenção são fornecidos pelos fabricantes mas é importante que o equipamento seja utilizado com frequência para evitar danos nas baterias. Portanto, mesmo em períodos de não utilização da sonda em trabalhos experimentais deve-se colocá-la em funcionamento pelo menos uma vez por semana por pessoal autorizado, tomando-se sempre algumas medidas padrão para verificação do estado do equipamento.

4. TUBOS DE ACESSO E SUA INSTALAÇÃO

O calibre e o tipo do tubo de acesso dependem do diâmetro da sonda em uso, custo e disponibilidade no mercado. Infelizmente os diâmetros das sondas não estão padronizados

internacionalmente pelos fabricantes, de modo que cada sonda vai requerer uma determinada especificação de tubo de acesso.

O melhor material para os tubos é o alumínio uma vez que ele é muito "transparente" para os nêutrons. Sòmente em alguns solos o alumínio pode apresentar problema de corrosão em experimentos de longa duração. Outros materiais podem também ser utilizados como aço, ferro, latão e também plásticos e polietileno. Deve-se sòmente considerar que esses diferentes materiais apresentam diferentes comportamentos com relação à interação com os nêutrons e que, devido a isso, terão taxas de contagem diferentes. Uma vez que um material e suas dimensões forem escolhidos, a calibração e todo o trabalho experimental deve ser feito com o mesmo material, nas mesmas dimensões (diâmetros internos e externos)

Sabe-se que o aço e o latão afetam ligeiramente a sensibilidade das sondas devido a grande absorção de nêutrons pelo ferro e pelo cobre. Materiais plásticos e outros materiais a base de polietileno apresentam grandes concentrações de hidrogênio e , portanto, resultam em altas taxas de contagem no equipamento.

As dimensões do tubo são geralmente apresentadas pelos fabricantes em termos de diâmetro interno e externo. Deve-se tomar o cuidado de escolher tubos com especificações as mais próximas possíveis das recomendadas, principalmente no que diz respeito ao diâmetro interno. A sonda não deve entrar muito

apertada no tubo e nem muito folgada deixando um espaço muito grande de ar entre a fonte e a parede do tubo o que afetaria a sensibilidade.

O comprimento dos tubos vai depender da profundidade que se deseja trabalhar. Os tubos de acesso devem ser sempre de 10 à 20 cm mais longos do que a maior profundidade de medida uma vez que o "centro ativo" da sonda nunca localiza-se na sua extremidade. Além disso deve-se prever uma extensão de 20 à 40 cm a mais de tubo acima da superfície do solo para evitar a entrada de solo ou sujeira no tubo e facilitar a instalação da caixa de blindagem da sonda sobre o tubo. A extremidade superior do tubo deve ficar coberta por uma tampa (rolha de borracha ou uma lata de cerveja emborcada sobre o tubo) para evitar a entrada de água e sujeira. A extremidade inferior do tubo deve ser preparada antes da instalação de maneira a ficar selada contra a entrada de água de baixo para cima no caso de possibilidade de haver uma lâmina d'água acima da extremidade inferior do tubo. Para perfis de solos muito profundos onde a drenagem é boa essa preocupação não é necessária.

Existem várias maneiras de instalação dos tubos de acesso (GREACEN, 1981) mas essencialmente consistem em se perfurar o solo com um trado e introduzir o tubo até a profundidade desejada. O principal aspecto nesse procedimento é evitar a permanência de bolsas de ar entre o solo e o tubo. Isso pode ser conseguido utilizando-se um trado com diâmetro

ligeiramente menor que o diâmetro externo do tubo. Nesse caso o tubo será introduzido com dificuldade no perfil do solo e, se o tubo for aberto na sua extremidade inferior, poderá entrar solo no tubo durante a operação. Nesse caso, com um segundo trado, com diâmetro menor que o diâmetro interno do tubo, pode-se retirar o material de solo que penetrar no tubo. Alguns preferem introduzir o tubo por impactos, sem a abertura prévia do buraco com o trado, e retirar o solo de dentro do tubo com a ajuda de um trado. Nesse caso o contato do tubo com o solo é perfeito, evitando-se qualquer bolsa de ar. Em casos especiais, no entanto, muitos problemas podem ocorrer. Como exemplo pode-se mencionar o caso dos solos pedregosos, solos expansivos e solos estratificados. Em cada caso o pesquisador deve procurar a melhor solução baseado na sua própria experiência prática. Deve-se ter em mente que a instalação do tubo de acesso é feita apenas uma vez para um dado experimento e, portanto, deve ser executada com todos os cuidados necessários, mesmo que isso demande várias horas de trabalho. Um tubo de acesso mal instalado irá comprometer todas as medidas a serem feitas no futuro. Deve também ser lembrado que uma das grandes vantagens do método da moderação de nêutrons é o fato de que a única perturbação provocada no perfil do solo ocorre durante a operação de instalação dos tubos de acesso e, posteriormente, rápidas medidas podem ser feitas, por longos períodos de tempo, sempre "amostrando" o mesmo "ponto" do

terreno. Enfatizando, deve-se tomar todo o cuidado possível na instalação dos tubos de acesso. Maiores detalhes sobre o assunto pode-se encontrar também em IAEA (1976).

5. CALIBRAÇÃO:

A calibração da sonda de nêutrons consiste em se obter uma relação entre a leitura do aparelho : cpm (contagens por minuto) e a umidade do solo θ (cm^3 de água por cm^3 de solo). Para se fazer isso, amostras de um solo, apresentando uma larga faixa de variação de umidade, são tomadas nos " pontos " de leitura obtidos com a sonda. As medidas de umidade são feitas pelo clássico método gravimétrico. É um procedimento aparentemente simples mas que pode apresentar dificuldades dependendo do delineamento do experimento e das propriedades do perfil do solo. Primeiramente iremos discutir um caso simples de construção de uma curva de calibração para uma profundidade, em um solo homogêneo, e, posteriormente analisaremos outras situações mais complicadas.

A amostragem é o principal problema em uma calibração de sonda. Teoricamente, a mesma amostra deve ser " exposta " à sonda para se obter cpm e ao método clássico para se obter θ . Isso é muito difícil na prática, principalmente porque os nêutrons " amostram " um grande volume de solo, que não é bem definido (assume-se uma esfera de 20 à 30 cm de diâmetro, ver item 6.) e o método clássico para se medir θ amostra um pequeno volume de solo (20 à 50 vezes menor). Esse problema é

minimizado tomando-se várias amostras ao redor do tubo de acesso para a determinação de θ , procurando-se obter um valor de umidade representativo do volume amostrado pela sonda. No entanto, nunca se tem a certeza de que para ambos os métodos o volume amostrado foi o mesmo. Esse fato torna-se mais grave em solos heterogêneos como nos perfis estratificados e pedregosos.

Outro problema é encontrar o mesmo solo com diferentes umidades, com uma ampla variação de θ . Por molhamento (irrigação ou chuva) ou secamento (evaporação ou drenagem) pode-se obter a desejada variação , mas isso vai demandar um longo período de tempo e grande espaço para as amostragens, tornando-se um procedimento bastante trabalhoso. Uma vez amostrada uma dada esfera de influência à uma dada umidade, a próxima amostragem, em outra condição de umidade só será possível em outro ponto do terreno o que pode provocar erros na calibração se o solo não é homogêneo. Outro aspecto é que se a sonda "explora" um grande volume de solo, nunca se sabe se toda a esfera de influência foi submetida uniformemente ao secamento ou ao molhamento.

Considerando que tenhamos feito o melhor e que tenhamos obtido uma boa coleta de pares de dados de θ e cpm, podemos então iniciar a construção da curva de calibração. Primeiramente, para se evitar possíveis distorções causadas por efeitos de variações de temperatura e problemas

eletrônicos, prefere-se trabalhar com a razão de contagem CR e não diretamente com a taxa de contagem obtida, onde:

$$CR = \frac{\text{cpm obtida no solo}}{\text{cpm obtida em um padrão}} = \frac{C}{C_s} \dots\dots\dots(5)$$

Convém aqui ressaltar que no presente trabalho será adotada ainda a seguinte nomenclatura referente à contagens:

N = número de contagens no solo por um tempo T qualquer.

N_s = número de contagens no padrão por um tempo T_s qualquer.

C = taxa de contagem (contagens por unidade de tempo, cpm = por minuto ; cps = por segundo) no solo.

C_s = taxa de contagem no padrão.

Todas as vezes que se utiliza a sonda ela é testada quanto a sua estabilidade através de contagens feitas em um material padronizado que, em muitos casos, pode ser a própria blindagem de proteção da sonda, medida essa tomada com a sonda posicionada sempre no mesmo local. Outros fabricantes recomendam essa operação em um tubo de acesso instalado dentro de um tanque com água. A contagem no padrão C_s (número de contagens tomadas em um dado tempo t_s) deve ser constante por longos períodos de tempo, oscilando somente dentro dos limites dos desvios estatísticos, normalmente tomados como $\pm\sqrt{C_s}$ (distribuição de Poisson). Cada fabricante apresenta detalhes desse procedimento para suas sondas.

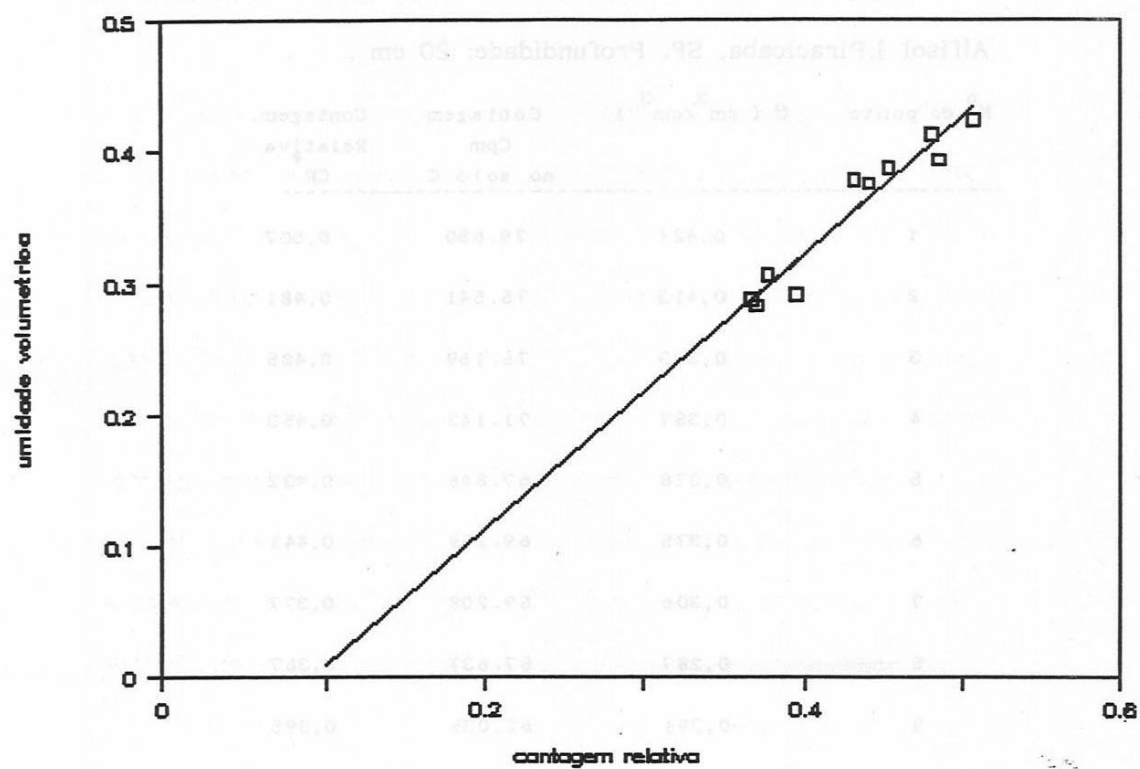
A tabela 2 mostra dados de campo obtidos para calibração de uma sonda, tomados à 20 cm de profundidade. A figura 3 mostra o gráfico de θ versus CR. A linha sólida segue a equação $\theta = -0,09535 + 1,042376 \text{ CR}$ que é obtida por regressão linear, tomando a variável θ como dependente (Y) e CR como independente (X). O coeficiente de determinação linear obtido foi $R = 0,9644$. Detalhes a respeito dos cálculos dos coeficientes da regressão bem como dos erros envolvidos no procedimento de calibração serão apresentados e analisados no item 7.

Tabela 2 - Dados para construção de uma curva de calibração de uma sonda de nêutrons marca SOLO 25 (fabricação francesa) de 40 mCi, fonte de Am/Be. Solo : Terra Roxa Estruturada (Alfisol), Piracicaba, SP. Profundidade: 20 cm .

N ^o do ponto	θ (cm ³ /cm ³)	Contagem Cpm no solo C	Contagem. Relativa CR
1	0,424	79.650	0,507
2	0,413	75.541	0,481
3	0,393	76.169	0,485
4	0,387	71.143	0,453
5	0,378	67.846	0,432
6	0,375	69.259	0,441
7	0,306	59.208	0,377
8	0,287	57.637	0,367
9	0,291	62.035	0,395
10	0,283	58.109	0,370

* Contagem na água (padrão) Cs por 1 minuto = 157.050

Figura 3 - Exemplo de uma curva de calibração (dados da
tabela 2)



A equação da regressão linear apresentada acima segue o modelo $Y = a + b x$, onde :

$Y = \theta$ (umidade volumétrica do solo)
 $X = CR$ (contagem relativa)
 a = coeficiente linear (" intercept ")
 b = coeficiente angular (" slope ")

Como será visto no capítulo 7, as variâncias de $\underline{a}$ e de $\underline{b}$ e a covariância de $\underline{a}$, $\underline{b}$ contribuem para o erro de calibração. Essa é uma das principais fontes de erro no uso de sondas de nêutrons e, portanto, deve ser minimizado. De um modo geral, quanto mais próximo de 1,0 for o valor de $\underline{R}$, menor são essas variâncias. Isso pode ser conseguido aumentando-se o número de pontos de calibração $\underline{n}$, mas tais pontos devem ser "pontos bons", isto é, eles devem apresentar um comportamento linear. A melhor maneira é se aumentar o número de pontos de maneira a ampliar a faixa de valores de θ , tomando-se pontos bem úmidos (perto da saturação) e bem secos.

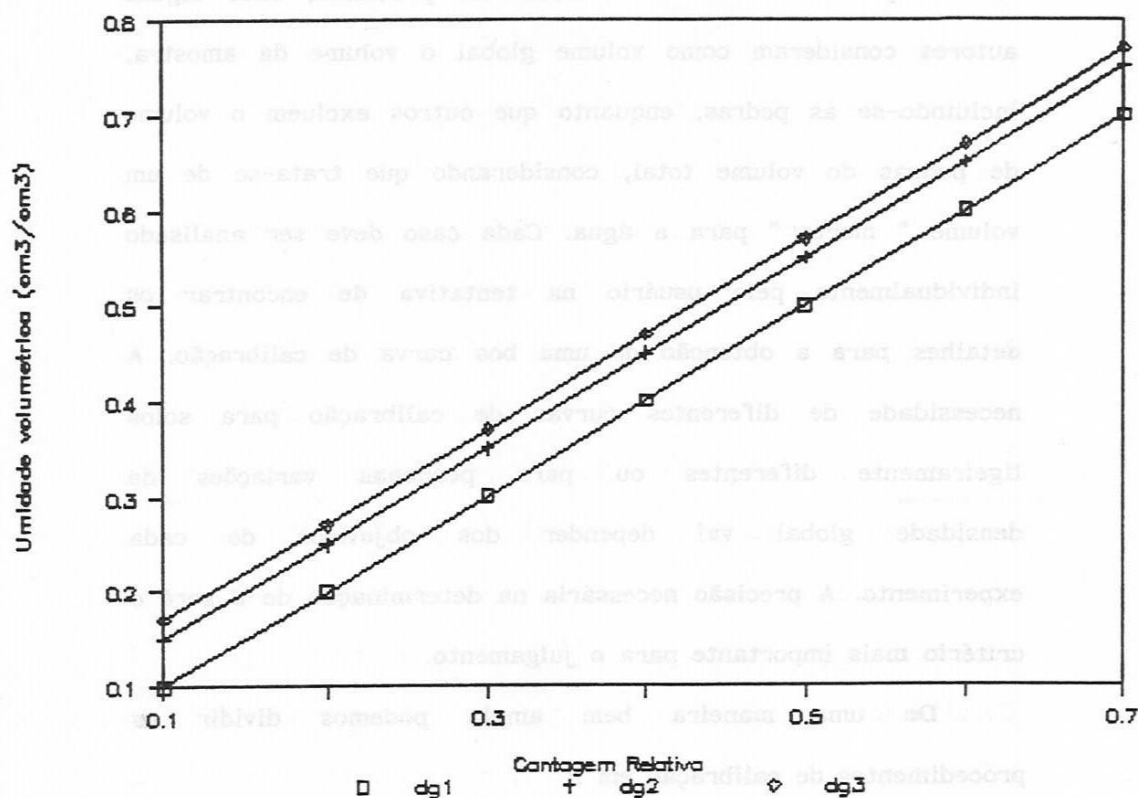
O coeficiente linear $\underline{a}$ da curva de calibração varia de solo para solo e de sonda para sonda. Não é necessário que esse valor seja zero ou próximo de zero. Uma vez que ele é um valor extrapolado, fora da faixa dos dados da calibração, nenhum significado teórico de grande importância deve ser dado a ele.

O coeficiente angular $\underline{b}$ também varia de solo para solo e de sonda para sonda. Ele representa a sensibilidade da sonda, uma vez que representa a derivada da equação de calibração, ou

seja : $b = dy/dx$. Trata-se portanto da variação do conteúdo de água ($dy = d\theta$) por unidade de variação na contagem relativa ($dx = dCR$). Quanto menor o seu valor , maior é a sensibilidade da sonda. Significa que para pequenas variações na umidade do solo tem-se grandes variações na contagem relativa CR, que é a variável que estamos medindo.

Devido aos processos de interação dos nêutrons com os componentes do solo, geometria da sonda, tipo de detector, eletrônica, etc, cada solo apresenta uma curva de calibração específica para cada sonda de nêutrons. As características do solo também afetam a relação de calibração, principalmente a composição química e a densidade global. Portanto, para um solo específico, teremos curvas de calibração diferentes conforme a densidade global do solo (vide figura 4.). Geralmente, as curvas de calibração de um mesmo solo para diferentes densidades tendem a ser paralelas, apresentando portanto coeficientes angulares b similares. Para solos estratificados, com camadas de diferentes composições, como nos solos aluviais, os coeficientes angulares podem ser diferentes.

Figura 4 - Curvas de calibração de um solo com diferentes densidades globais d_g .



Solos pedregosos apresentam problemas especiais. Inicia-se pela dificuldade de instalação dos tubos de acesso. A definição de θ torna-se também um problema, onde alguns autores consideram como volume global o volume da amostra, incluindo-se as pedras, enquanto que outros excluem o volume de pedras do volume total, considerando que trata-se de um volume " morto " para a água. Cada caso deve ser analisado individualmente pelo usuário na tentativa de encontrar os detalhes para a obtenção de uma boa curva de calibração. A necessidade de diferentes curvas de calibração para solos ligeiramente diferentes ou para pequenas variações de densidade global vai depender dos objetivos de cada experimento. A precisão necessária na determinação de θ será o critério mais importante para o julgamento.

De uma maneira bem ampla podemos dividir os procedimentos de calibração em :

5.1. Calibração de laboratório, que envolve o uso de amostras de solo colocadas em reservatórios onde são mantidos valores conhecidos de θ e densidade global. Grandes quantidades de solo são colocadas em tambores de 80 à 120 cm de diâmetro e 100 à 150 cm de altura. A colocação do solo e da água nos tambores deve ser feita cuidadosamente no sentido de se obter um sistema homogêneo tanto em umidade como em densidade global, o que não é uma tarefa fácil. O tubo de acesso para a

sonda é então instalado no centro do tambor onde serão tomadas as medidas.

Muitos fabricantes de sondas têm um conjunto desses tambores selados que são utilizados para a calibração de cada sonda nova. Esses dados são fornecidos ao usuário e, geralmente, denominamos de curva de calibração de fábrica. A sua utilização é muito limitada uma vez que ela feita especificamente para um dado solo. No entanto, esses dados podem ser úteis ao usuário na comparação com os seus próprios dados. Geralmente o coeficiente angular b dessas curvas são muito semelhantes. Sendo assim, muitas vezes pode-se utilizar essas curvas de fábrica como nos casos em que se deseja apenas medir as variações de umidade ($\Delta \theta$) e não os seus valores absolutos.

5.2. Calibração de campo, que envolve a instalação dos tubos de acesso diretamente no campo e onde as medidas são tomadas em diferentes situações de umidade que podem ser provocadas artificialmente ou aguardando-se suas variações naturais. Logo após as medidas com a sonda são tomadas amostras de solo em torno dos tubos de acesso, na mesma profundidade, para a determinação de θ pelo método clássico gravimétrico. Esse procedimento é repetido para se obter o número desejado de repetições e repetido em diferentes situações de umidade para se obter uma ampla faixa de variação de θ . Sob condições de campo é difícil encontrar o solo com umidades muito distintas.

Por irrigação pode-se obter pontos de alta umidade. Pontos de umidade baixa também são difíceis de se obter e muitas vezes requer longos períodos de espera. O maior problema está no fato de que os solos não secam na mesma taxa em todas as profundidades e, portanto, na medida em que o perfil perde água ele torna-se heterogêneo com relação à umidade. Esse fato introduz erros na calibração.

5.3. Modelos teóricos, que se baseiam na teoria da difusão dos neutrons. Um desses modelos recentes (COUCHAT et alii.1975) é baseado na medida das secções de choque para absorção e difusão de neutrons em uma pilha de grafite. Amostras de solo necessitam ser enviadas a laboratórios especializados que tenham a pilha de grafite onde são estabelecidas as equações de calibração que são apresentadas como função da umidade θ e da densidade global d_g .

Outro grande problema é o estabelecimento de curvas de calibração para camadas superficiais de solo. Muitos recomendam a não utilização de sondas de profundidade em medidas muito próximas da superfície e sim a utilização de qualquer outro método clássico. Existem sondas específicas para medidas de superfície, como ilustra a figura 2.

Outra possibilidade é a de se obter curvas de calibração específicas para as camadas de solo mais superficiais que podem levar em conta o escape de nêutrons para a atmosfera. Alguns autores sugerem a utilização de

reflectores/absorvedores, que são blocos de parafina ou polietileno, na forma de discos e com um orifício central, que são colocados na superfície do solo e por cujo orifício é introduzido o tubo de acesso. A calibração é feita então com o refletor que, embora interaja com os nêutrons que escapariam para a atmosfera, é um material padrão e que apresentaria portanto a mesma interação nas futuras medidas na mesma profundidade. A utilização desses refletores, no entanto, tem-se mostrado não muito satisfatória na prática em muitas situações.

6. ESFERA DE INFLUÊNCIA:

A nuvem de nêutrons lentos que se forma imediatamente após a introdução da sonda na profundidade desejada define uma esfera que é o volume de solo que a sonda está amostrando. Essa esfera é chamada de " esfera de influência " ou " esfera de importância " da sonda. Infelizmente essa esfera não é constante, mesmo para o mesmo solo e mesma sonda. Estudos teóricos (IAEA, 1970) mostram que o diâmetro dessa esfera é uma função do conteúdo de hidrogênio (conteúdo de água) do meio. Ele é mínimo em materiais com alto conteúdo de H, como água pura, onde seu valor é da ordem de 10 à 15 cm. Em solos muito secos, nos quais o conteúdo de H é muito baixo, o diâmetro pode alcançar até 80 cm ou mais. O modelo teórico de OLGAARD (1969) sugere que para valores de $\theta = 0,1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (que é extremamente baixo para fins agronômicos) o diâmetro da

esfera não é maior que 90 cm.

Esse fato indica um grande problema de amostragem, tanto na calibração como nas medidas de rotina. Significa que para cada umidade de solo θ a sonda "amostra" diferentes volumes de solo. Isso é um problema com o qual temos que conviver e tomar cuidado, principalmente quando se trabalha com medidas à pequenas profundidades. Recomenda-se portanto conhecer o diâmetro da esfera de influência como função de θ e então colocar a sonda na profundidade certa evitando-se o escape de nêutrons para a atmosfera.

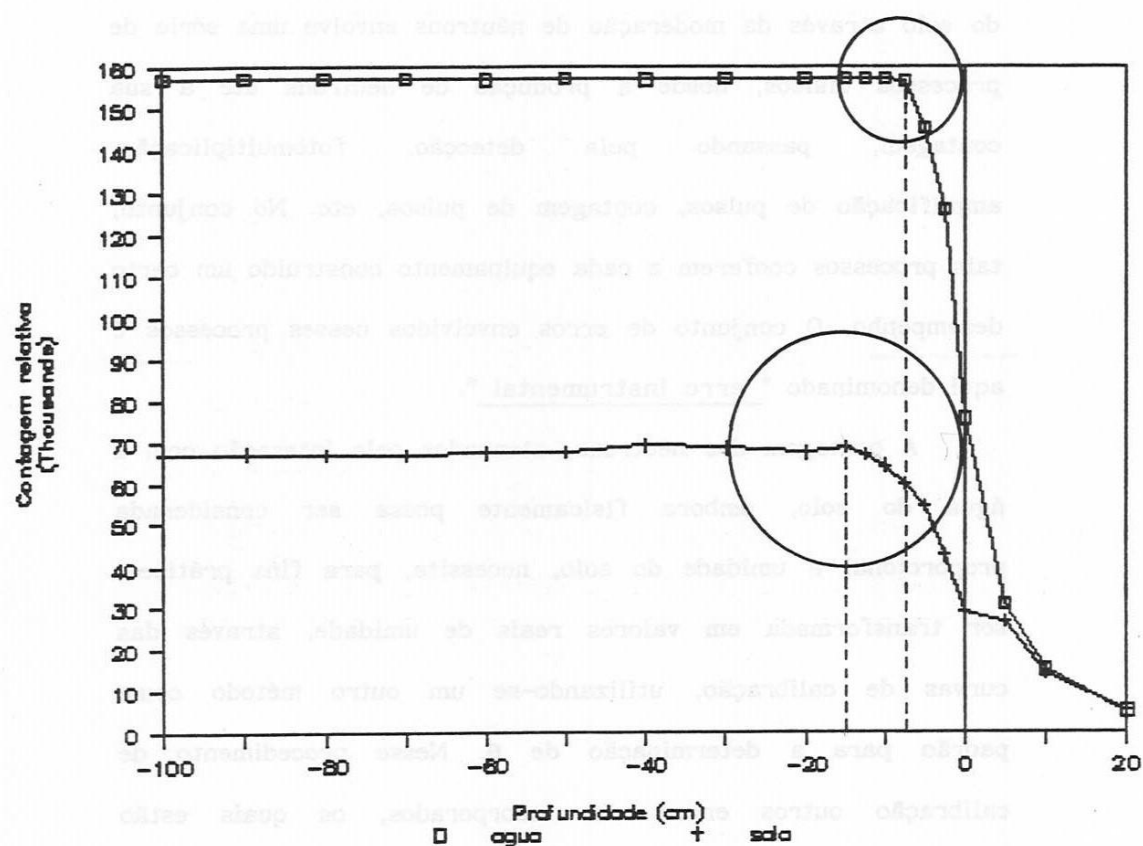
Para se medir o diâmetro da esfera de influência o meio deve ser homogêneo para o que recomenda-se a utilização de solo colocado em tambores. Se o solo em condições de campo for bem homogêneo (inclusive em θ) tal medida poderá ser feita no próprio campo. O procedimento é bastante simples. A sonda é baixada à uma profundidade bem superior ao possível raio da esfera de influência R . Uma vez que R é desconhecido, mas nunca superior à 45-50 cm, deve-se baixar a sonda a uma profundidade superior à 100 cm. São tomadas as contagens a intervalos bem pequenos de profundidade (se possível à cada cm, ou no máximo à cada 5 cm) trazendo-se a sonda em direção à superfície. Enquanto a sonda estiver situada a grandes profundidades, a esfera de influência estará amostrando um meio homogêneo e as contagens nessas profundidades deverão ser bem constantes, flutuando apenas dentro dos desvios

estatísticos permissíveis ($\pm \sqrt{C}$). Na medida em que o centro ativo da sonda aproxima-se da superfície alguns nêutrons começam a escapar para a atmosfera e a contagem começa a decrescer. O decréscimo é inicialmente lento mas rapidamente cai exponencialmente para próximo de zero quando a maior parte da esfera encontra-se no ar. Devido a esse escape de nêutrons para a atmosfera, o operador deve tomar cuidados de proteção ficando o mais longe possível do tubo de acesso. Pelo gráfico da taxa de contagem em função da profundidade é possível estimar o raio da esfera de influência. Na profundidade em que a taxa de contagem começa a decrescer, a esfera de influência está tangenciando a superfície do solo. Essa profundidade é portanto o raio da esfera. A figura 5 e tabela 3 ilustram esse processo.

Tabela 3 - Taxa de contagem em função da profundidade para dois meios homogêneos: água e solo com $\theta = 0,35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Profundidade (cm)	Taxa de contagem (cpm)	
	água	solo
100	157.230	67.100
90	157.110	67.030
80	157.130	66.880
70	157.020	66.950
60	156.890	67.230
50	157.150	67.310
40	156.970	68.910
30	157.080	68.370
20	157.160	67.250
15	157.020	68.630
12,5	157.240	66.870
10	157.000	64.150
7,5	156.540	59.800
5	145.230	54.360
2,5	125.810	42.550
0	75.440	29.120
+5	30.770	26.670
+10	15.300	14.590
+20	5.110	5.670

Figura 5 - Taxas de contagem em função da profundidade, mostrando o raio da esfera de influência para dois meios homogêneos (água e solo) - dados da tabela 3.



7. ERROS ENVOLVIDOS NA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO COM A SONDA DE NÊUTRONS

Como se pode notar, a técnica de determinação da umidade do solo através da moderação de nêutrons envolve uma série de processos físicos, desde a produção de nêutrons até a sua contagem, passando pela detecção, fotomultiplicação, amplificação de pulsos, contagem de pulsos, etc. No conjunto, tais processos conferem a cada equipamento construído um certo desempenho. O conjunto de erros envolvidos nesses processos é aqui denominado "erro instrumental".

A contagem dos nêutrons, atenuados pela interação com a água do solo, embora fisicamente possa ser considerada proporcional a umidade do solo, necessita, para fins práticos, ser transformada em valores reais de umidade, através das curvas de calibração, utilizando-se um outro método como padrão para a determinação de θ . Nesse procedimento de calibração outros erros são incorporados, os quais estão associados principalmente aos próprios erros da regressão e que dependem da qualidade e representatividade dos valores de umidade medidos com o método padrão na esfera de influência da sonda. Como já foi discutido, essa esfera é bastante variável, conforme a umidade do solo, atividade da fonte, variabilidade espacial do solo (estratificação e variações horizontais),

modo de instalação dos tubos de acesso, etc. A esse conjunto de erros introduzidos na regressão pelo procedimento de calibração dá-se o nome de "erros de calibração". Tais erros podem ser minimizados por procedimentos que sejam capazes de melhorar a representatividade dos valores de umidade medidos pelo método padrão em relação às contagens tomadas na esfera de influência.

Feita a calibração, a sonda pode ser utilizada na medição da umidade do solo em diferentes locais, ou diferentes tubos de acesso, o que introduz um novo erro nas medidas devido a variabilidade espacial do solo e diferenças nos procedimentos de instalação dos diversos tubos. Tais erros serão aqui denominados de "erros locais".

Como será visto adiante, cada um desses erros (instrumental, de calibração e local) são compostos de outros erros, alguns dos quais de mais fácil identificação e estimativa, através de modelos conhecidos, e outros de difícil desdobramento.

Determinados os valores de umidade com o auxílio da sonda, com todos os erros envolvidos, tais dados poderão ser utilizados na determinação do armazenamento de água no perfil do solo. Novos erros serão introduzidos no cálculo do armazenamento e suas estimativas podem também ser feitas através de modelos específicos, conforme o método de cálculo adotado. Os erros envolvidos na estimativa do armazenamento

englobam aqueles decorrentes da estimativa das umidades somados àqueles decorrentes do método de integração utilizado no cálculo do armazenamento. Trataremos aqui de apenas dois métodos de integração: Trapezoidal e de Simpson.

7.1 - ERROS ENVOLVIDOS NA CALIBRAÇÃO E ERRO

INSTRUMENTAL:

Com base nos dados apresentados na tabela 2 pode-se construir a tabela 4 que contém todos os valores necessários para a determinação da equação de regressão linear que será a curva de calibração.

Tabela 4- Dados de θ , CR e planilha de cálculos para levantamento da curva de calibração.

Nº	θ	CR	$\theta \times CR$	CR ²	$\frac{1}{q}$	(CR - $\overline{CR}$) ²	($\theta - \overline{\theta}$) ²
1	0.42400	0.50700	0.21497	0.25705	0.17978	0.005806	0.004942
2	0.41300	0.48100	0.19865	0.23136	0.17057	0.002520	0.003516
3	0.39300	0.48500	0.19061	0.23523	0.15445	0.002938	0.001544
4	0.38700	0.45300	0.17531	0.20521	0.14977	0.000493	0.001108
5	0.37800	0.43200	0.16330	0.18662	0.14288	0.000001	0.000590
6	0.37500	0.44100	0.16538	0.19448	0.14063	0.000104	0.000453
7	0.30600	0.37700	0.11536	0.14213	0.09364	0.002894	0.002275
8	0.28700	0.36700	0.10533	0.13469	0.08237	0.004070	0.004448
9	0.29100	0.39500	0.11495	0.15603	0.08468	0.001282	0.003931
10	0.28300	0.37000	0.10471	0.13690	0.08009	0.003697	0.004998
Σ	3.5370	4.3080	1.5486	1.8797	1.2788	0.023806	0.027810

$$Cs = 157.050 \text{ cpm} \quad (\text{contagem padrão na água})$$

$$\overline{\theta} = 0,3537 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$$

$$\overline{CR} = 0,4308 \text{ cpm}$$

CÁLCULO DA REGRESSÃO: $\theta = a + b.CR$

$$a = \frac{(\sum CR^2)(\sum \theta) - (\sum CR) \cdot (\sum CR \cdot \theta)}{n \cdot \sum CR^2 - (\sum CR)^2} \dots\dots(6) \text{ ou:}$$

$$a = \frac{\sum \theta}{n} - b \frac{\sum CR}{n} \dots\dots\dots(7)$$

$$b = \frac{n \sum CR \cdot \theta - (\sum CR)(\sum \theta)}{n \sum CR^2 - (\sum CR)^2} \dots\dots\dots(8)$$

$$r = \frac{\frac{\sum CR \cdot \theta - (\sum CR)(\sum \theta)}{n}}{\sqrt{\left[\sum CR^2 - \frac{(\sum CR)^2}{n} \right] \left[\sum \theta^2 - \frac{(\sum \theta)^2}{n} \right]}} \dots\dots(9)$$

Resultados:

Aplicando-se os valores da tabela 4 às equações anteriores, os seguintes resultados são obtidos para a sonda em questão: (os resultados apresentados na tabela 5 foram obtidos utilizando-se o programa de regressão linear da planilha LOTUS).

Tabela 5: Resultados da regressão linear obtidos pelo programa LOTUS com base nos dados da tabela 4.

```

-----
Regression Output:
Constant          -0.09535 ( a = coeficiente linear )
Std Err of Y Est  0.015589 ( desvio padrao de teta - sc(θ) )
R Squared         0.930091 ( r2 = coeficiente de determinacao )
No. of Observations      10 ( n )
Degrees of Freedom      8 ( GL graus de liberdade do residuo )
X Coefficient(s)  1.042376 ( b = coeficiente angular )
Std Err of Coef.  0.101036 ( desvio padrao de CR - s(CR) )
-----

```

A equação de regressão procurada para a curva de calibração da referida sonda e para o solo em questão é:

$$\hat{\theta} = - 0,09535 + 1,042376 \cdot \hat{CR}$$

onde $\hat{\theta}$ e $\hat{CR}$ são os valores estimados de θ e CR.

Análise da variância da regressão:

Para o caso em questão, a seguinte análise de variância pode ser efetuada: (tabela 6)

Tabela 6 - Análise da variância da regressão.

Causas de variacao	GL	SQ	QM	F
Regressao	1	0.025865	0.025865	106.4359
Residuo	8	0.001944	0.000243	
Total	9	0.027810		

Os valores apresentados na tabela 6 são calculados através das seguintes expressões:

$$SQ_{total} = \sum \theta^2 - \frac{(\sum \theta)^2}{n} \dots\dots\dots (10)$$

$$SQ_{regressão} = \frac{\left[\sum (\theta \cdot CR) - \frac{(\sum \theta \cdot \sum CR)}{n} \right]^2}{\left[\sum CR^2 - \frac{(\sum CR)^2}{n} \right]} \dots\dots (11)$$

$$SQ_{resíduo} = SQ_{total} - SQ_{regressão}$$

Testes de significância da correlação:

Teste t:

$$t = \frac{r}{\sqrt{1 - r^2}} \sqrt{n - 2} \dots\dots\dots (12)$$

No presente caso temos:

$$t = 6,96^{**} > t \text{ (tabela } p/n = 8) \begin{cases} t = 5,05 (0,1\%) \\ t = 3,36 (1,0\%) \\ t = 2,31 (5,0\%) \end{cases}$$

Teste F:

$$F = \frac{QM_{regressão}}{QM_{resíduo}} = \frac{SQ_{regressão}/SQ_{total}}{SQ_{resíduo}/SQ_{total}} \dots\dots (13)$$

No presente caso temos:

$$F = \frac{0,025865}{0,000243} = 106,4359^{**} > F \text{ (tabela)} = 11,26 \begin{cases} \text{graus} \\ \text{de} \\ \text{liberd.} \\ 1 = \text{regr} \\ 8 = \text{res.} \end{cases}$$

Como se observa, tanto o teste t como o teste F foram altamente significativos, indicando que o valor do coeficiente de correlação r é diferente de zero, valor que deveria assumir, teoricamente, na ausência de correlação, isto é, se os valores de CR não tivessem influência sobre θ , ou vice-versa.

7.1.1 - Variância (s^2) e covariâncias (Cov) das estimativas dos parâmetros $\hat{a}$ e $\hat{b}$ da regressão

$$s^2(\hat{b}) = \frac{QM_{res}}{\sum (CR - \overline{CR})^2} = \frac{0,000243}{0,023806} = 0,010208$$

$$s^2(\hat{a}) = \left(\frac{1}{n} + \frac{\overline{CR}^2}{\sum (CR - \overline{CR})^2} \right) \cdot QM_{res} = 0,001918$$

$$Cov(\hat{a}, \hat{b}) = s(\hat{a}, \hat{b}) = \frac{(\overline{CR} \cdot QM_{res})}{\sum (CR - \overline{CR})^2} = -0,00439$$

7.1.2. Variância total de θ :-

Devemos lembrar que a equação obtida trabalha com os valores estimados dos valores reais de θ , CR , a e b , indicados por $\hat{\theta}$, $\hat{CR}$, $\hat{a}$ e $\hat{b}$. Assim temos:

$$\hat{\theta} = \hat{a} + \hat{b} \hat{CR} \quad (\text{estimativa}) \dots\dots\dots(14)$$

$$\theta = a + b CR + e_o \quad (\text{verdadeira}) \dots\dots\dots(15)$$

onde: $E\{\hat{a}\} = a$ e $E\{\hat{b}\} = b$ (esperança matemática)

Assim, para um dado valor de $\hat{CR}_*$ corresponde um certo valor de $\hat{\theta}_*$ na equação (14) que, por diferença com a equação (15) nos dá :

$$\theta - \hat{\theta}_* = a - \hat{a} + b CR - \hat{b} CR_* + e_o$$

$$\theta - \hat{\theta}_* = a - \hat{a} + \hat{b} (CR - \hat{CR}_*) + CR (b - \hat{b}) + e_o \quad ..(16)$$

Elevando-se ao quadrado e tomando-se os valores esperados na equação (8), tem-se:

$$\begin{aligned} E\{(\theta - \hat{\theta}_*)^2\} &= E\{(a - \hat{a})^2\} + E\{\hat{b}^2(CR - \hat{CR}_*)^2\} + \\ &+ E\{CR^2(b - \hat{b})^2\} + E\{e_o^2\} + \\ &+ 2.E\{CR(a - \hat{a})(b - \hat{b})\} \dots\dots\dots(16.a) \end{aligned}$$

A equação 16.a pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} s^2(\hat{\theta}) &= s^2(a) + [\hat{b}^2 + s^2(\hat{b})] \cdot s^2(\hat{CR}_*) + \overline{CR}^2 \cdot s^2(\hat{b}) + \\ &+ s^2(e_o) + 2 \cdot \overline{CR} \cdot s(\hat{a}, \hat{b}) \dots\dots\dots(16.b) \end{aligned}$$

A variância $s^2(\overline{CR}_*)$ pode ser estimada por:

$$s^2(\overline{CR}_*) = \left(\frac{\hat{N}}{\hat{N}_s} \right)^2 \left(\frac{s^2(\hat{N})}{\hat{N}^2} + \frac{s^2(\hat{N}_s)}{\hat{N}_s^2} \right) \dots\dots\dots(17)$$

onde: N e N_s são as contagens no solo e no padrão, por um tempo T e T_s qualquer.

Sabendo-se que a emissão de nêutrons segue a distribuição de Poisson, as variâncias associadas à N e N_s são:

$$s^2(N) = \frac{1}{p} \frac{\hat{N}}{T} \dots\dots\dots(18)$$

$$s^2(N_s) = \frac{1}{q} \frac{\hat{N}_s}{T_s} \dots\dots\dots(19)$$

onde: p e q são os n^{os} de repetições das contagens no solo e no padrão, respectivamente, e T e T_s são os tempos de contagem no solo e no padrão (s = standard), respectivamente.

Substituindo-se as eqs. 18 e 19 em 17, temos:

$$s^2(\hat{CR}_*) = \left[\frac{\hat{CR}^*}{p \cdot T} + \frac{\hat{CR}_s^2}{q \cdot T_s} \right] \div \hat{N}_s \dots\dots\dots(20)$$

Substituindo 12 em 8.b temos:

$$s^2(\hat{\theta}^*) = \left[\hat{b}^2 - s^2(\hat{b}) \right] \cdot \left[\frac{\hat{CR}^*}{p \cdot T} + \frac{\hat{CR}_s^2}{p \cdot T_s} \right] \cdot \frac{1}{\hat{N}_s} + s^2(\hat{a}) + \\ + s^2(\hat{b}) \hat{CR}^* + 2 \cdot \hat{CR}^* s(\hat{a}, \hat{b}) + s(eo) \dots\dots(21)$$

que é a equação geral da variância total da umidade estimada pela sonda. A referida equação é composta de dois termos:

a) Variância da umidade devido à calibração:

$$s_c^2(\hat{\theta}^*) = s^2(\hat{a}) + s^2(\hat{b}) \hat{CR}_s^2 + 2 \cdot \hat{CR}_s s(a, b) + s^2(eo) \dots\dots\dots(22)$$

b) Variância da umidade devido ao erro instrumental:

$$s_I^2(\hat{\theta}) = \left[\hat{b}^2 - s^2(\hat{b}) \right] \left[\frac{\hat{CR}^*}{p \cdot T} + \frac{CR^*}{q \cdot T_s} \right] \cdot \frac{1}{\hat{N}_s} \dots (23)$$

EXEMPLO:

Para a determinação dos dois componentes : $s_c^2(\hat{\theta})$ e $s_I^2(\hat{\theta})$, além dos parâmetros $\hat{a}$ e $\hat{b}$ e suas variâncias e covariâncias, já levantados com base na tabela 4, torna-se necessário o levantamento de dados com a mesma sonda em um único valor de umidade no solo, com várias repetições, para a determinação de $\hat{CR}$ (valor médio estimado), bem como contagens feitas no padrão (no presente caso a água) para a determinação de $\hat{N}_s$ (valor médio estimado), como mostra a tabela 7

Tabela 7 :Dados tomados com a sonda em questão, com 5 repetições no solo por um tempo de 2 min e uma repetição na água por 2 min.

Repetições	Contagen (C)	Tc	N (cpm)	CR
1	140800	2	70400	0.444
2	138200	2	69100	0.436
3	140500	2	70250	0.443
4	139900	2	69950	0.441
5	139100	2	69550	0.439
média	139700	2	69850	0.4406
padrão(água)	317000	2	158500	
	(Cs)	(Ts)	(Ns)	

Pela equações 18 e 19, temos:

$$s^2(\hat{N}) = \frac{1}{5} \frac{69850}{2} = 6985$$

$$s^2(\hat{N}_s) = \frac{1}{1} \frac{158500}{2} = 79250$$

Pela equação 9 temos:

$$s^2(CR) = \left(\frac{69850}{158500} \right)^2 \left(\frac{6985}{69850^2} + \frac{79250}{158500^2} \right) = 8,9 \cdot 10^{-7}$$

Pela equação 9 pode-se verificar que aumentando-se as repetições p e q, bem como os tempos de contagem T e T_s, pode-se diminuir a variância da contagem relativa. A contagem por um tempo maior substitue o número de repetições.

Aplicando-se portanto os dados de $\bar{CR}$, p, q, T, T_s e $\hat{N}_s$ da tabela anterior às equações 22 e 23 teremos, para a sonda em questão e para o nível de unidade correspondente à CR = 0,4406, que é $\hat{\theta}_s = -0,09535 + 1,042376 \cdot 0,4406 = 0,3639$, as seguintes variâncias de θ :

a) Variância da unidade devido à calibração:

$$s^2_c(\theta^*) = 0,001918 + 0,010208 \cdot 0,4406 + 2 \cdot 0,4406 \cdot$$

$$(-0,00439) + s^2(e_o)$$

$$\text{onde } s^2(e_o) = QM_{res} = 0,000243$$

$$s^2_c(\theta^*) = 2,74 \cdot 10^{-4}$$

Portanto o desvio padrão da umidade devido a calibração

$$é: s_c(\hat{\theta}^*) = \sqrt{2,74 \cdot 10^{-4}} = 1,66 \cdot 10^{-2}$$

$$CV\% = \frac{s_c(\hat{\theta}^*)}{\hat{\theta}^*} = \frac{1,66 \cdot 10^{-2}}{0,3639} = 4,5 \%$$

b) Variância da umidade devido ao instrumento:

$$s_I^2(\theta^*) = (1,042376^2 - 0,010208) \left(\frac{0,4406}{5.2} + \frac{0,4406}{1.2} \right) \frac{1}{158500}$$

$$s_I^2(\theta^*) = 9,58 \cdot 10^{-7}$$

Portanto, o desvio padrão da umidade devido ao erro instrumental é:

$$s_I(\theta^*) = \sqrt{9,58 \cdot 10^{-7}} = 9,79 \cdot 10^{-4}$$

$$CV\% = \frac{9,79 \cdot 10^{-4}}{0,3639} = 0,27\%$$

c) Variância total da umidade: para $\theta = 0,3639$

$$\begin{aligned} s^2(\theta^*) &= s_c^2(\theta^*) + s_I^2(\theta^*) = 2,74 \cdot 10^{-4} + 0,00958 \cdot 10^{-4} = \\ &= 2,75 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

Portanto o desvio padrão da umidade é:

$$s(\theta^*) = \sqrt{2,75 \cdot 10^{-4}} = 1,66 \cdot 10^{-2}$$

$$CV\% = \frac{1,66 \cdot 10^{-2}}{0,3639} = 4,56 \%$$

Observar que o coeficiente de variação da umidade devido ao erro instrumental é insignificante se comparado ao do erro de calibração. Isso significa que o instrumento em questão está em perfeita ordem. Qualquer tentativa para se melhorar a variância total da umidade deve ser feita sobre a componente da calibração, aumentando-se o número de repetições e/ou a qualidade dos dados de θ (melhor representatividade de θ em relação à CR).

Observação: Todos esses erros referem-se a várias repetições tomadas em um único tubo e uma única profundidade, não envolvendo, portanto, os erros locais que será visto no próximo item.

7.2 - ERRO LOCAL: (HAVERCAMP et alii. 1984)

Na maioria dos casos o interesse é medir um valor médio de umidade através de repetidas medidas de CR em diferentes tubos de acesso. Essa média de umidade $\bar{\theta}$ apresenta um componente a mais de erro devido à variabilidade espacial do solo.

A variância de umidade devido ao local pode ser expressa pela seguinte relação: (VAUCLIN et alii. 1984)

$$s_L^2(\bar{\theta}) = \left(b^2 - s^2(b) \right) \cdot \frac{s^2(L)}{k \hat{N}_s} \dots\dots\dots(24)$$

onde $s^2(L)$ é a variabilidade espacial do solo.

Como $s^2(L)$ é de difícil determinação, VAUCLIN et alii sugerem que o valor de $s_L^2(\bar{\theta})$ seja calculado por diferença, ou seja:

$$s_L^2(\bar{\theta}) = s^2(\bar{\theta}) - s_c^2(\bar{\theta}) - s_f^2(\bar{\theta}) \dots\dots(25)$$

onde, por analogia com 8.b, temos:

$$s^2(\bar{\theta}) = \left(\hat{b}^2 + s^2(\hat{b}) \right) s^2(\bar{CR}) + s^2(\hat{a}) + (\bar{CR})^2 s^2(\hat{b}) + 2 \bar{CR} s(\hat{a}, \hat{b}) + \underline{s^2(e_o)} \dots\dots\dots(26)$$

Na equação 26, como $s^2(\bar{\theta})$ representa a variância de uma média, o valor de $\underline{s^2(e_o)} = QM_{res}$ é igual a zero, desaparecendo portanto esse termo da referida equação quando comparada com a equação 16.b. Nessa equação, a variância da contagem relativa média $s^2(\bar{CR})$ leva em conta a variabilidade local que é dada por:

$$s^2(\bar{CR}) = \frac{1}{k} s^2(\hat{CR}) \dots\dots\dots(26)$$

onde $\frac{1}{k} s^2(\hat{CR})$ representa uma média da variância de CR no número k de repetições de medidas de CR (nº de tubos).

EXEMPLO:

Na tabela seguinte (Tabela 8) é dado um exemplo que permite o cálculo da variância da umidade devido a variabilidade local. As medidas foram tomadas com a mesma sonda em uma única profundidade (20 cm) em 30 tubos diferentes:

Tabela 8 - Dados de CR tomados em 30 tubos diferentes à 20 cm de profundidade:

Tubo no	CR	Tubo no	CR
1	0.476	16	0.464
2	0.507	17	0.511
3	0.508	18	0.49
4	0.515	19	0.488
5	0.515	20	0.486
6	0.535	21	0.489
7	0.528	22	0.497
8	0.513	23	0.479
9	0.494	24	0.467
10	0.504	25	0.485
11	0.469	26	0.452
12	0.497	27	0.487
13	0.484	28	0.485
14	0.487	29	0.478
15	0.477	30	0.475
$\hat{CR} = 0,4914$			
T = 1	q = 1	Ns = 157050 (água)	
Ts = 1			

Tomando-se, como exemplo, $k = 5$ medidas ao acaso dentre as 30 medidas feitas, (tubos 6, 14, 26, 29 e 30), teremos as seguintes variâncias estimadas:

Tubo	$\hat{C}\bar{R}$	$[\hat{C}\bar{R} - \hat{C}\bar{R}]^2$
6	0,535	$2,46 \cdot 10^{-3}$
14	0,487	$2,56 \cdot 10^{-6}$
26	0,452	$1,12 \cdot 10^{-3}$
29	0,478	$5,48 \cdot 10^{-5}$
30	0,475	$1,08 \cdot 10^{-4}$

$$\sum = 3,74 \cdot 10^{-3}$$

$$s^2(CR) = \frac{\sum [\hat{C}\bar{R} - \hat{C}\bar{R}]^2}{k} = \frac{3,74 \cdot 10^{-3}}{5} = 7,48 \cdot 10^{-4}$$

$$s^2(\langle \hat{C}\bar{R} \rangle) = \frac{1}{5} 7,48 \cdot 10^{-4} = 1,49 \cdot 10^{-4}$$

Variância total da umidade:

$$s^2(\langle \hat{\theta} \rangle) = 22,2 \cdot 10^{-5} \text{ (equação 26)}$$

Variância da umidade devido ao instrumento:

$$s^2_I(\langle \hat{\theta} \rangle) = 2,28 \cdot 10^{-6} \text{ (equação 23)}$$

Variância da umidade devido à calibração =:

$$s^2_c(\langle \hat{\theta} \rangle) = 6,12 \cdot 10^{-5} \text{ [equação 22 sem o termo } s^2(e_0)]}$$

Variância da umidade devido ao erro local:

$$s^2_L(\langle \hat{\theta} \rangle) = s^2(\langle \hat{\theta} \rangle) - s^2_c(\langle \hat{\theta} \rangle) - s^2_I(\langle \hat{\theta} \rangle) \text{ (equação 25)}$$

$$s^2_L(\langle \hat{\theta} \rangle) = 15,9 \cdot 10^{-5}$$

Se repetirmos os mesmos cálculos anteriores para diferentes números de tubos verificaremos que a variância instrumental é muito pequena em relação às demais, que a variância devido à calibração é relativamente constante, uma vez que não é afetada pelo número de locais de medida (k) e que a variância local e, conseqüentemente, a variância total, decrescem exponencialmente com o número de locais de medida, tendo uma tendência de se tornar constante para um número elevado de pontos de medida (Tabela 9 e Figura 6). Baseado nesse fato é que se pode estimar o número necessário de tubos em um dado experimento, tendo-se uma previsão do coeficiente de variação desejado. Para os dados da tabela anterior, onde temos $\langle \hat{CR} \rangle = 0,4914$, que corresponde a um valor de unidade de $\langle \hat{\theta} \rangle = 0,4169$ (pela equação de regressão), se quisermos que esse valor de $\langle \hat{\theta} \rangle$ seja determinado com um CV % = 3, teremos:

$$CV\% = \frac{s(\langle \hat{\theta} \rangle)}{\langle \hat{\theta} \rangle} \cdot 100$$

$$s\langle \hat{\theta} \rangle = \frac{3 \cdot 0,4169}{100} = 0,0125$$

$$\text{portanto: } s^2\langle \hat{\theta} \rangle = 15,6 \cdot 10^{-5}$$

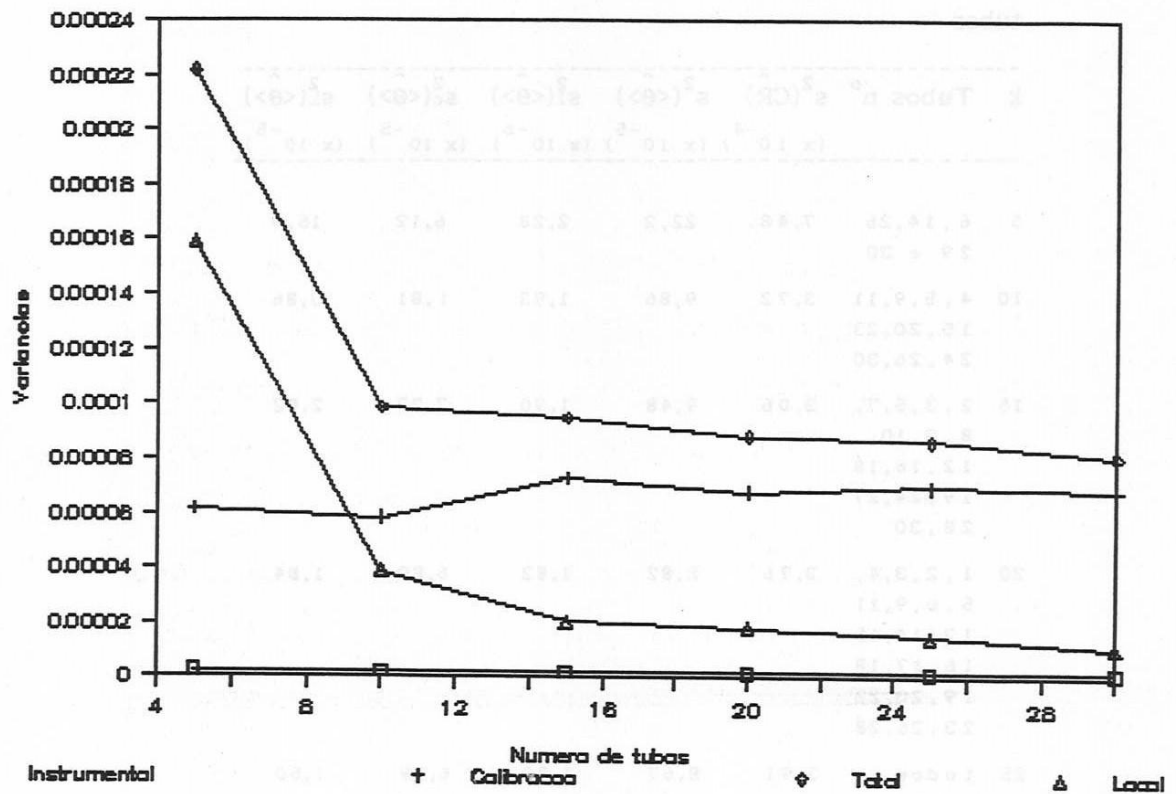
Basta determinar o número de tubos que seriam necessários para se obter uma variância total $s^2\langle \hat{\theta} \rangle$ dessa

ordem. Com base nos dados da tabela anterior, esse número seria de 6 tubos, aproximadamente. (ver tabela 9).

Tabela 9 : Comportamento das variâncias em função do número de tubos

k	Tubos n°	$s^2(\hat{CR})$ (x 10 ⁻⁴)	$s^2(\hat{\langle\theta\rangle})$ (x 10 ⁻⁵)	$s^2(\hat{\langle\theta\rangle})$ (x 10 ⁻⁶)	$s^2(\hat{\langle\theta\rangle})$ (x 10 ⁻⁵)	$s^2(\hat{\langle\theta\rangle})$ (x 10 ⁻⁵)
5	6, 14, 26 29 e 30	7,48	22,2	2,28	6,12	15,9
10	4, 5, 9, 11 15, 20, 23 24, 26, 30	3,72	9,86	1,93	5,81	3,86
15	2, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 16, 18 19, 24, 27 28, 30	3,06	9,48	1,90	7,27	2,02
20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 11 13, 14, 15 16, 17, 18 19, 20, 22 23, 26, 28	3,76	8,82	1,82	6,80	1,84
25	todos menos 1, 3, 13 15 e 28	3,91	8,67	1,80	6,99	1,50
30	todos	3,54	8,12	1,77	6,85	1,09

Figura 6 - Variâncias: Total, instrumental, de calibração e local em função do número de tubos.



7.3 - ERROS NA DETERMINAÇÃO DO ARMAZENAMENTO:

Ao se utilizar os dados de umidade, determinados com a sonda de nêutrons, para o cálculo do armazenamento de água no perfil do solo, é necessário aplicar algum método de integração da umidade em função da profundidade. O armazenamento então calculado apresentará erros que serão

devidos ao próprio método de determinação da umidade, que já foram apresentados, e devidos ao método de integração utilizado.

O armazenamento pode ser representado pela seguinte integral:

$$A = \int_0^z \theta(z) dz \quad \dots\dots\dots(27)$$

Como geralmente não se conhece a função $\theta(z)$, a integração pelo método analítico não pode ser utilizada. Recorre-se, portanto, aos métodos numéricos de integração, dentre os quais os mais utilizados são: Trapezoidal e de Simpson.

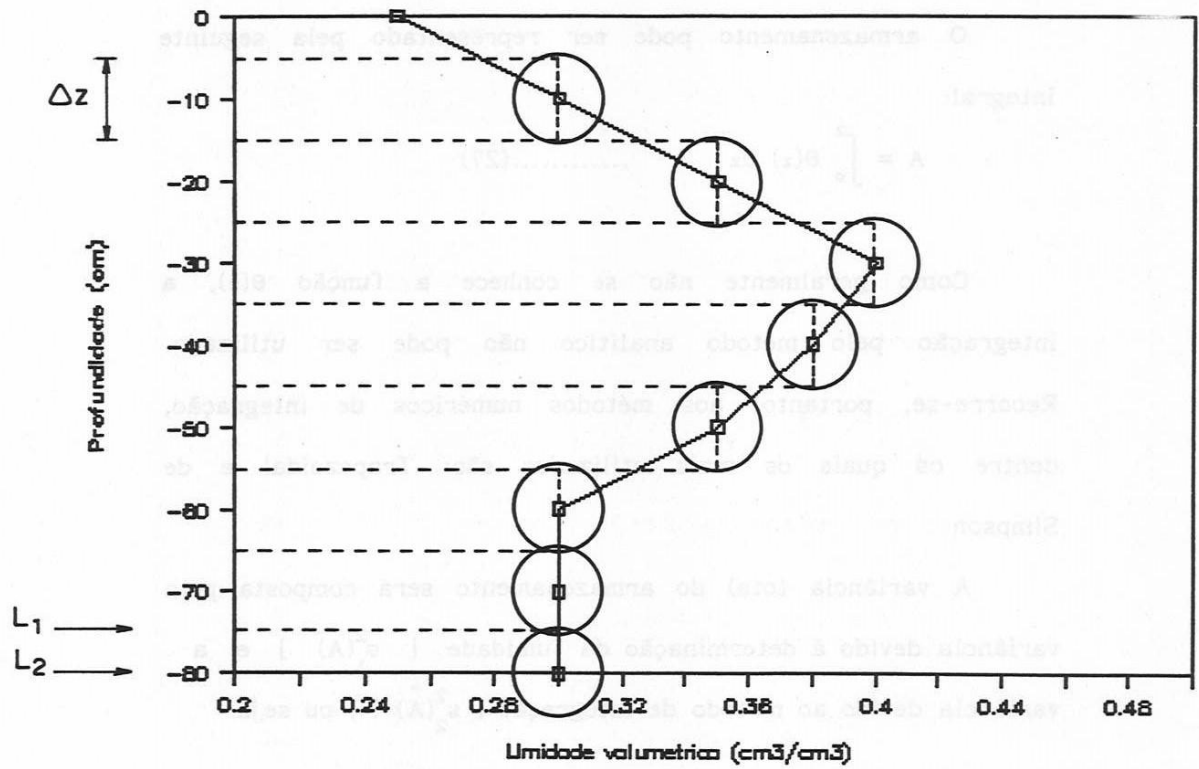
A variância total do armazenamento será composta pela variância devido à determinação da umidade $[s_1^2(\hat{A})]$ e a variância devido ao método de integração $[s_2^2(\hat{A})]$, ou seja:

$$s^2(\hat{A}) = s_1^2(\hat{A}) + s_2^2(\hat{A}) \quad \dots\dots\dots(28)$$

7.3.1 - Método Trapezoidal:

A figura 7 mostra um gráfico de θ versus z para um perfil de solo hipotético no qual se pretende calcular o armazenamento.

Figura 7 - Gráfico θ versus z para um perfil de solo hipotético.



O armazenamento de água no perfil representado pela figura 7 é dado pela expressão:

$$\hat{A} = \int_0^z \theta \, dz \approx \sum \theta_i \Delta z \quad \dots\dots\dots(29)$$

Se a estimativa de A no exemplo da figura 7 for feita até L₁ (centro da esfera de influência da medida mais profunda) teremos:

$$\hat{A}_{L1} = (1,5\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + 0,5\theta_4) \Delta z \dots\dots(30)$$

Se essa estimativa for feita até a profundidade L₂, teremos:

$$\hat{A}_{L2} = (1,5\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + 1 \theta_4) \Delta z \dots\dots(31)$$

Na determinação das variâncias é necessário a aplicação dos teoremas:

- (1) $s^2(a+b) = s^2(a) + s^2(b)$
- (2) $s^2(k.x) = k^2 s^2(x)$, onde k = constante

Portanto, temos, para os dois casos:

$$s^2_1(\hat{A}_{L1}) = [1,5^2 s^2(\theta_1) + s^2(\theta_2) + s^2(\theta_3) + 0,5^2 s^2(\theta_4)] \Delta z^2 \dots\dots\dots(32)$$

$$s^2_1(\hat{A}_{L2}) = [1,5^2 s^2(\theta_1) + \sum s^2(\theta_i)] \Delta z^2 \dots\dots\dots(33)$$

Obs: Essas seriam as variâncias dos armazenamentos devido apenas aos erros de determinação da umidade. A variância do armazenamento devido ao método de integração é dada pela seguinte expressão:(CARNAHAN et alii.1969)

$$s^2_2(\hat{A}) = \frac{L^2 \Delta z^4}{144} \left\{ \theta''(z) \right\}^2 \dots\dots\dots(34)$$

onde $\theta''(z)$ é a derivada segunda de $\theta(z)$.

No método trapezoidal, o cálculo do armazenamento e o erro envolvido, para um segmento Δz da curva $\theta(z)$, é dado por:

$$\int_{z_0}^{z_1} \theta(z) dz = \frac{z_1 - z_0}{2} \left[\theta(z_0) + \theta(z_1) \right] - \frac{(z_1 - z_0)^3}{12} \theta''(z) \dots (35)$$

área do trapézio
erro de
entre z_0 e z_1
integração

De outra forma, pode-se escrever:

$$\int_{z_0}^{z_1} \theta(z) \Delta z = \frac{\Delta z}{2} \left[\theta(z_0) + \theta(z_0 + \Delta z) \right] - \frac{\Delta z^3}{12} \theta''(z) \dots (36)$$

Para n segmentos consecutivos da curva, de 0 à L , temos:

$$A = \int_0^L \theta(z) dz = \frac{n \Delta z}{2} \sum_{i=1}^n \left[\theta(z_{n-1}) + \theta(z_n) \right] - \frac{n \Delta z^3}{12} \theta''(z)$$

área total entre 0 e L
erro total

de

integração

..... (37)

A derivada segunda de $\theta(z) \Rightarrow \theta''(z)$, determinada pela regra de Taylor, tomando-se 3 pontos consecutivos da curva $\theta(z)$, [$\theta(z + \Delta z)$; $\theta(z)$ e $\theta(z - \Delta z)$], será :

$$\theta(z+\Delta z) = \theta(z) + \frac{\Delta z}{1!} \theta'(z) + \left| \frac{\Delta z^2}{2!} \theta''(z) + \dots \right|$$

despreza-se para Δz pequeno

.....(38)

$$\theta(z-\Delta z) = \theta(z) - \frac{\Delta z}{1!} \theta'(z) + \frac{\Delta z^2}{2!} \theta''(z) - \left| \frac{\Delta z^3}{3!} \theta'''(z) + \dots \right|$$

despreza-se para Δz pequeno

.....(39)

Somando-se as duas expressões anteriores, temos:

$$\theta(z+\Delta z) + \theta(z-\Delta z) = 2\theta(z) + \Delta z^2 \theta''(z), \text{ portanto:}$$

$$\theta''(z) = \frac{\theta(z+\Delta z) - 2\theta(z) + \theta(z-\Delta z)}{\Delta z^2} \quad \text{.....(40)}$$

Portanto, o erro total de integração será:

$$s_2(A) = \frac{n \Delta z^3}{12} \theta''(z) \quad \text{.....(41)}$$

$$s_2(A) = \frac{n \Delta z^3}{12} \left[\frac{\theta(z+\Delta z) - 2\theta(z) + \theta(z-\Delta z)}{\Delta z^2} \right] \quad \text{.....(42)}$$

A variância do armazenamento devido ao método de integração será:

$$s_2^2(A) = \left(\frac{n \Delta z \Delta z^2}{12} \right)^2 \left[\frac{\theta(z+\Delta z) - 2\theta(z) + \theta(z-\Delta z)}{\Delta z^2} \right]^2$$

.....(43)

$$s_2^2(A) = \frac{L^2 \Delta z^4}{144} \left[\frac{\theta(z+\Delta z) - 2\theta(z) + \theta(z-\Delta z)}{\Delta z^2} \right]^2 \dots (44)$$

$$s_2^2(A) = \frac{L^2 \Delta z^4}{144} \theta''(z) \dots (45)$$

A derivada segunda de $\theta(z)$ deve ser tomada em cada ponto de medida de z que apresente um valor de θ medido acima e abaixo de z . No exemplo da figura anterior, como temos apenas 4 pontos (z_1, z_2, z_3 e z_4), teríamos apenas 2 derivadas segunda (em z_2 e z_3). Por segurança a variância do armazenamento devido ao método de integração é calculada com o maior dos valores encontrados de $\theta''(z)$.

7.3.2 - Método de Simpson:

No método de Simpson o armazenamento é dado pela seguinte expressão: (CARNAHAN et alii. 1969)

$$\int_0^L \theta(z) dz = \int_z^{2n} \theta(z) dz = \frac{\Delta z}{3} \left[\theta(z_0) + 4\theta(z_1) + 2\theta(z_2) + 4\theta(z_3) + 2\theta(z_4) + \dots + 2\theta(z_{2n-2}) + 4\theta(z_{2n-1}) + \theta(z_{2n}) \right] - \frac{\Delta z^5}{90} \sum_{i=1}^n \theta''''(z_i) \quad \text{onde: } \begin{cases} 2n = n^\circ \text{ de camadas} \\ n = n^\circ \text{ de derivadas de 4ª ordem} \end{cases} \dots (46)$$

a) A variância do armazenamento devido à umidade será:

$$s_1^2(A) = \left(\frac{\Delta z}{3} \right)^2 \left[s^2(\theta_0) + 4^2 s^2(\theta_1) + 2^2 s^2(\theta_2) + 4^2 s^2(\theta_3) + \right. \\ \left. + 2^2 s^2(\theta_4) + \dots + 2^2 s^2(\theta_{2n-2}) - 4^2 s^2(\theta_{2n-1}) + s^2(\theta_{2n}) \right] \\ \dots\dots\dots(47)$$

Tanto na expressão do armazenamento (A) como na expressão da variância do armazenamento $s_1^2(A)$, as constantes que multiplicam $\theta(z)$ são determinadas pela regra de Simpson. Para a determinação dos índices de θ na derivada de 4ª ordem, utiliza-se a regra do triângulo de Pascal:

$\left[\begin{array}{c} N^0 \text{ de pontos} \\ \text{de medida} \end{array} \right]$	$\left[\begin{array}{c} \Delta\theta \text{ de ordem } n \\ \Delta^n\theta \end{array} \right]$	$\left[\begin{array}{c} \text{ordem de } \Delta\theta \end{array} \right]$
1	+1	--
2	+101 -100	1
3	+102 -201 +100	2
4	+103 -302 +301 -100	3
5	+104 -403 +602 -401 +100	4

(e assim sucessivamente)

b) O erro do armazenamento devido à integração pelo método de Simpson será: (CARNAHAN et alii. 1969)

$$s_2(A) = \frac{\Delta z^5}{90} \sum_{i=1}^n \theta''''(z) = \frac{\Delta z \Delta z^4}{90} \sum_{i=1}^n \theta''''(z) \dots\dots\dots(48)$$

Portanto a variância será:

$$s_2^2(A) = \left[\frac{n \Delta z \Delta z^4 \theta''''(z)}{90} \right]^2 = \frac{L^2 \Delta z^8}{(2.90)^2} [\theta''''(z)]^2 \dots (49)$$

Lembrar que $n \cdot \Delta z = \frac{L}{2}$

Portanto:

$$s_2^2(A) = \frac{L^2 \cdot \Delta z^8 \cdot [\theta''''(z)]^2}{32400}, \text{ onde } \theta''''(z) = \frac{\Delta^4 \theta}{4! \Delta z^4} \Rightarrow \begin{matrix} \text{diferença} \\ \text{de} \\ \text{ordem 4} \end{matrix}$$

derivada
de ordem 4

.....(50)

Exemplo de cálculo das variâncias do armazenamento

Na tabela 10 são apresentados dados de umidade medidos com a sonda em questão até a profundidade de 150 cm à intervalos de 25 cm em 25 tubos de acesso.

Com base nos referidos dados serão calculados os armazenamentos pelo método trapezoidal e de Simpson e suas respectivas variâncias:

Método trapezoidal

a) Armazenamento: até 150 cm de profundidade

$$\hat{A} = (1,5 \cdot 0,336 + 0,347 + 0,325 + 0,300 + 0,296 + 0,5 \cdot 0,297) \cdot 25 = 47,99 \text{ cm} = 479,9 \text{ mm} \quad (\text{eq. 30})$$

b) Variância do armazenamento devido à umidade

$$s_1^2(\hat{A}) = [1,5^2 \cdot 0,00086 + 0,00106 + 0,00031 + 0,00019 + 0,00030 + 0,5 \cdot 0,00028] = 2,41 \text{ cm}^2 \quad (\text{eq.32})$$

portanto o desvio padrão é:

$$s_1(\hat{A}) = \sqrt{2,41} = 1,55 \text{ cm} = 15,5 \text{ mm}$$

c) Variância do armazenamento devido ao método de integração.

$$s_2^2(\hat{A}) = \frac{150^2 \cdot 25^4}{144} \left[\theta''(z) \right]^2 \quad (\text{eq.34})$$

Cálculo das derivadas segunda $\theta''(z)$:

$$1- \text{ Derivada à 50 cm} = \frac{0,325 - 2 \cdot 0,347 + 0,336}{25^2} = -5,3 \cdot 10^{-5}$$

$$2- \text{ Derivada à 75 cm} = \frac{0,300 - 2 \cdot 0,325 + 0,347}{25^2} = -4,7 \cdot 10^{-6}$$

$$3- \text{ Derivada à 100cm} = \frac{0,296 - 2 \cdot 0,300 + 0,325}{25^2} = +3,3 \cdot 10^{-5}$$

$$4- \text{ Derivada à 125cm} = \frac{0,297 - 2 \cdot 0,296 + 0,300}{25^2} = +8,0 \cdot 10^{-6}$$

A maior derivada encontrada é à 50 cm (em valor absoluto), portanto:

$$s_2^2(\hat{A}) = \frac{150^2 \cdot 25^4}{144} \left(-5,3 \cdot 10^{-5} \right)^2 = 1,7 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2$$

Portanto o desvio padrão é:

$$s_2(\hat{A}) = \sqrt{1,7 \cdot 10^{-1}} = 0,4123 \text{ cm} = 4,12 \text{ mm}$$

d) Variância total do armazenamento: =

$$s^2(\hat{A}) = s_1^2(\hat{A}) + s_2^2(\hat{A}) = 2,58 \text{ cm}^2 \quad (\text{eq.28})$$

Portanto o desvio padrão total do armazenamento é:

$$s(\hat{A}) = \sqrt{2,58} = 1,606 \text{ cm} = 16,06 \text{ mm}$$

Método de Simpson

a) Armazenamento

$$A = \frac{25}{3} \left[0,336 + 4 \cdot 0,336 + 2 \cdot 0,347 + 4 \cdot 0,325 + 2 \cdot 0,300 + 4 \cdot 0,296 + 0,297 \right] \quad (\text{eq.45})$$

$$A = 47,93 \text{ cm} = 479,3 \text{ mm}$$

b) Variância do armazenamento devido à umidade

$$s_1^2(\hat{A}) = \left(\frac{25}{3} \right)^2 \left(0,00086 + 4^2 \cdot 0,00086 + 2^2 \cdot 0,00106 + 4^2 \cdot 0,00031 + 2^2 \cdot 0,00019 + 4^2 \cdot 0,00030 + 0,00028 \right) = 2,06 \text{ cm}^2 \quad (\text{eq.46})$$

Portanto o desvio padrão é:

$$s_1(\hat{A}) = \sqrt{2,06} = 1,435 \text{ cm} = 14,35 \text{ mm}$$

c) Variância do armazenamento devido ao método de integração

$$s_2^2(\hat{A}) = \frac{150^2 \cdot 25^8}{32400} \left[\theta''''(z) \right]^2 \quad (\text{eq.48})$$

Cálculo da derivada de quarta ordem $\Rightarrow \theta''''(z)$ (eq.50)

$$\theta''''(z) = \frac{(\theta_4 - 4\theta_3 + 6\theta_2 - 4\theta_1 + \theta_0) \theta_0}{4! \Delta z^4} = \frac{\Delta^4 \theta}{4! \Delta z^4}$$

$$\theta''''(z) = \frac{0,300 - 4 \cdot 0,325 + 6 \cdot 0,347 - 4 \cdot 0,336 + 0,336}{4! \cdot 25^4}$$

$\theta''''(z) = 7,89 \cdot 10^{-9} \Rightarrow$ Essa é a maior das derivadas de quarta ordem possível pois o maior valor de θ é o θ_2 que apresenta o maior multiplicador ($= 6$) na equação acima.

Portanto, temos:

$$s_2^2(\hat{A}) = \frac{150^2 \cdot 25^8}{32400} \cdot (7,89 \cdot 10^{-9})^2 = 6,59 \cdot 10^{-6}$$

Portanto o desvio padrão é:

$$s_2^2(\hat{A}) = 2,57 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 = 0,026 \text{ mm}$$

d) Variância total do armazenamento (eq.28)

$$s^2(\hat{A}) = s_1^2(\hat{A}) + s_2^2(\hat{A}) = 2,06 + 2,57 \cdot 10^{-3} = 2,06$$

Portanto o desvio padrão total é:

$$s(\hat{A}) = 1,435 \text{ cm} = 14,35 \text{ mm}$$

Tabela 10: Dados de umidade até a profundidade de 150cm medidos a intervalos de 25cm em 25 tubos de acesso.

TUBOS	25 CM	50 CM	75 CM	100 CM	125 CM	150 CM
1	0.372	0.393	0.383	0.344	0.304	0.293
2	0.378	0.393	0.347	0.308	0.300	0.313
3	0.359	0.352	0.327	0.317	0.300	0.300
4	0.379	0.374	0.309	0.288	0.293	0.299
5	0.362	0.353	0.320	0.288	0.284	0.285
6	0.358	0.336	0.316	0.301	0.281	0.296
7	0.315	0.337	0.316	0.291	0.291	0.293
8	0.365	0.393	0.345	0.298	0.287	0.292
9	0.315	0.334	0.312	0.300	0.305	0.338
10	0.362	0.382	0.355	0.316	0.315	0.332
11	0.357	0.358	0.316	0.291	0.364	0.281
12	0.361	0.370	0.327	0.294	0.276	0.282
13	0.346	0.343	0.317	0.297	0.300	0.290
14	0.348	0.347	0.307	0.278	0.283	0.274
15	0.332	0.335	0.335	0.298	0.288	0.289
16	0.323	0.338	0.323	0.295	0.290	0.315
17	0.291	0.311	0.312	0.310	0.296	0.306
18	0.326	0.345	0.336	0.324	0.303	0.295
19	0.328	0.384	0.336	0.296	0.286	0.286
20	0.285	0.234	0.306	0.291	0.289	0.278
21	0.340	0.334	0.308	0.287	0.286	0.292
22	0.294	0.339	0.310	0.285	0.286	0.287
23	0.315	0.326	0.314	0.295	0.282	0.288
24	0.301	0.325	0.323	0.308	0.317	0.335
25	0.283	0.333	0.319	0.298	0.287	0.297
media	0.336	0.347	0.325	0.300	0.296	0.297
var	0.00086	0.00106	0.00031	0.00019	0.00030	0.00028

L = 150 cm $\Delta z = 25$ cm

RESUMO DAS VARIÂNCIAS DO ARMAZENAMENTO

METODOS	$\hat{A}$	$s_1^2(\hat{A})$	$s_2^2(\hat{A})$	$s^2(\hat{A})$	$s(\hat{A})$
Trapezoidal	47.99	2.41E+00	1.70E-01	2.58E+00	1.61E+00
Simpson	47.93	2.06E+00	6.59E-06	2.06E+00	1.43E+00

8 - APLICACOES:

8.1 - Armazenamento de água no solo:

Embora o assunto já tenha sido tratado no item 7, daremos aqui um exemplo de aplicação prática.

A água armazenada em uma camada de solo entre as profundidades L_1 e L_2 , em um dado tempo é definida por:

$$AL_2-L_1(t) = \int_{L_1}^{L_2} \theta \, dz \quad \dots\dots\dots(51)$$

onde θ é a umidade volumétrica dada pela equação 2, e z é a coordenada de posição vertical, medida da superfície para baixo.

Utilizando θ em cm^3 de água por cm^3 de solo, e z em cm, o resultado de A é uma altura de água, dada em cm. Cada cm de água armazenada corresponde a um volume de 10 litros de água por m^2 de superfície de solo, até a profundidade de

integração. O caso mais comum é quando $L_1 = 0$ (superfície do solo) e a integração é feita até a profundidade total do perfil L_2 .

Uma vez que geralmente desconhece-se a função $\theta(z)$ que descreve a variação de θ com a profundidade, utiliza-se métodos numéricos de integração, como aqueles já apresentados. Para fins agronômicos o método trapezoidal é adequado e de mais fácil aplicação.

De acordo com esse método, a equação 51 pode ser simplificada para:

$$A_{L_2-L_1}(t) = \bar{\theta} (L_2 - L_1) \quad (51.a)$$

onde $\bar{\theta}$ é o valor médio de θ no intervalo $L_2 - L_1$.

A tabela 11 mostra dados de umidade coletados com uma sonda em um tubo de acesso instalado em uma cultura de milho. A sonda é a mesma utilizada no exemplo de calibração da tabela 2 e figuar 3.

Tabela 11 - Contagens relativas e umidades do solo em função da profundidade para uma cultura de milho, setembro de 1988, solo Alfisol, Piracicaba, SP. Brasil.

Profundidade (cm)	Contagem relativa (CR)	Umidade cm^3/cm^3
25	0,494	0,420
50	0,485	0,410
75	0,503	0,429
100	0,473	0,398
125	0,465	0,389
150	0,471	0,396

Utilizando a equação 51.a são encontrados os seguintes valores de armazenamento:

$$A_{0-150} (7/9/88) = 0,407 (150-0) = 611 \text{ mm}$$

$$A_{0-75} (7/9/88) = 0,420 (75-0) = 315 \text{ mm}$$

$$A_{50-100} (7/9/88) = 0,412 (100-50) = 206 \text{ mm}$$

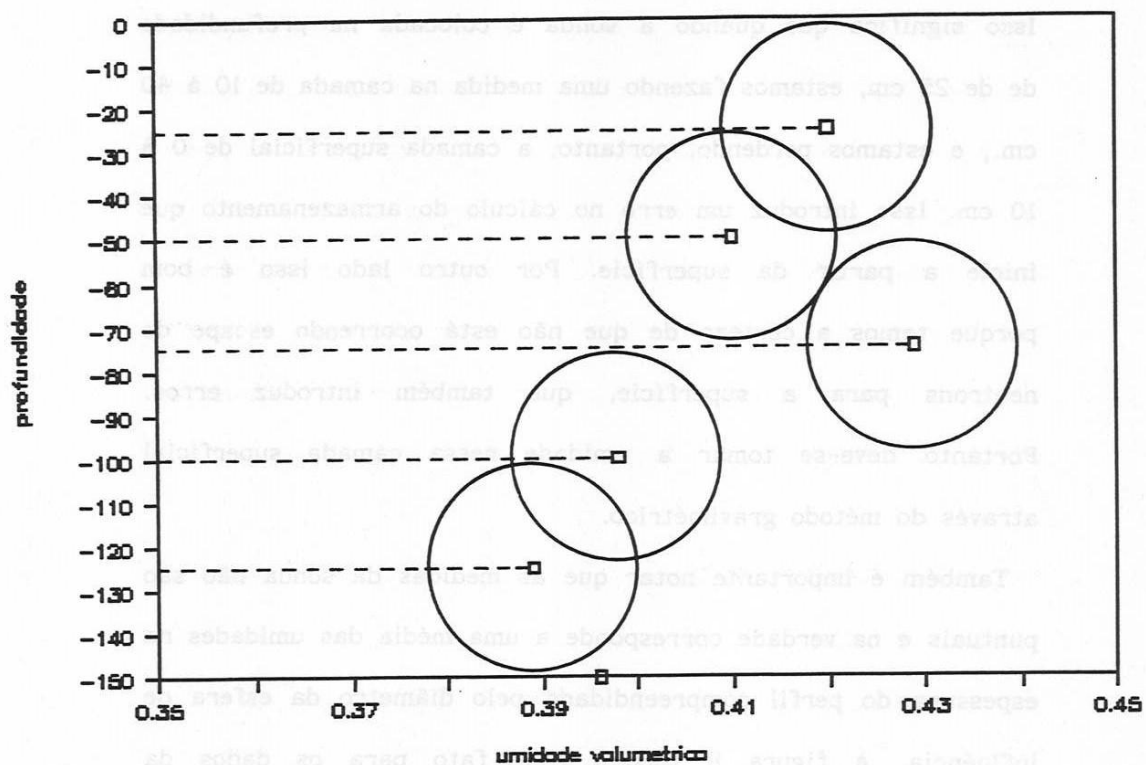
Como já foi discutido no item 6, é importante conhecer a esfera de influência da sonda. Isso é especialmente importante

para medidas próximas à superfície do solo. No caso presente a esfera de influência apresenta um diâmetro da ordem de 30 cm.

Isso significa que quando a sonda é colocada na profundidade de 25 cm, estamos fazendo uma medida na camada de 10 à 40 cm., e estamos perdendo, portanto, a camada superficial de 0 à 10 cm. Isso introduz um erro no cálculo do armazenamento que inicie a partir da superfície. Por outro lado isso é bom porque temos a certeza de que não está ocorrendo escape de neutrons para a superfície, que também introduz erros. Portanto deve-se tomar a umidade nessa camada superficial através do método gravimétrico.

Também é importante notar que as medidas da sonda não são pontuais e na verdade corresponde a uma média das umidades na espessura do perfil compreendida pelo diâmetro da esfera de influência. A figura 8 ilustra esse fato para os dados da tabela 11. Esse fato apresenta vantagens quando se calcula o armazenamento, porque, como mostra a equação 16.a, o cálculo é baseado nas médias. Mesmo havendo sobreposição das esferas de influência não há problemas, e até, pelo contrário, isso melhora a amostragem do perfil.

Figura 8 - Perfil de umidade de solo em cultura de milho
(7/9/88) mostrando os " volumes de amostragem "



No nosso exemplo, se as medidas tivessem sido feitas à intervalos de 10 cm, as sobreposições das esferas de influência seriam maiores e a estimativa do armazenamento seria melhor. Deve-se apenas tomar cuidado com a superfície do solo. Se iniciarmos as medidas à profundidade de 10 cm, parte da esfera de influência estará fora do solo.

Modelos modernos de sonda de neutrons apresentam microprocessadores que calculam automaticamente o armazenamento de água , apresentando o resultado em mm. Outros

modelos, mais sofisticados, movimentam-se para cima e para baixo no tubo de acesso, à velocidades constantes, fazendo uma excelente integração do perfil de umidade.

Muito importante também são as variações do armazenamento de água nos perfis de solo com o tempo. Na medida em que o solo ganha água por chuva ou irrigação, ou perde água por evapotranspiração ou drenagem interna, o armazenamento modifica-se com o tempo. Para a mesma cultura de milho ilustrada anteriormente, medidas tomadas com a sonda em diferentes datas apresentaram os seguintes resultados:

$$A_{0-150} (14/9/88) = 579,5 \text{ mm}$$

$$A_{0-150} (21/9/88) = 543,8 \text{ mm}$$

$$A_{0-150} (28/9/88) = 575,8 \text{ mm}$$

Do dia 7 ao dia 21 não houve chuva nem irrigação. A taxas médias de perda de água pelo perfil foram:

$$\frac{\delta A}{\delta t} = \frac{A_{0-150} (14/9) - A_{0-150} (7/9)}{14 - 7} = - 4,5 \text{ mm/dia}$$

$$\frac{\delta A}{\delta t} = \frac{A_{0-150} (21/9) - A_{0-150} (14/9)}{21 - 14} = - 5,1 \text{ mm/dia}$$

É impossível, no entanto, separar as perdas por evapotranspiração e por drenagem profunda, abaixo dos 150 cm no exemplo anterior. Se o solo estiver inicialmente na capacidade de campo nós podemos ter certeza de que 100 % das perdas ocorreram por evapotranspiração. Se estiver acima desse valor isso não pode ser afirmado uma vez que quantidade significativas de água pode estar sendo perdida por drenagem.

No período de 21 à 28/9 houve chuva e portanto ocorreu aumento no armazenamento de água no perfil.

8.2 - Curvas de retenção de água no campo:

A combinação do uso da sonda de nêutrons com tensiômetros à mesma profundidade permite o estabelecimento de curvas de retenção a nível de campo. Os tensiômetros devem ser instalados o mais próximo possível dos tubos de acesso mas nunca dentro da esfera de influência, uma vez que as cápsulas dos tensiômetros, sendo cheias de água, podem interferir significativamente nas leituras da sonda. Uma distância mínima de 20 - 30 cm deveria ser o ideal para se evitar o problema. Em muitos solos, no entanto, a densidade global e a umidade podem variar significativamente à curtas distâncias. Isso foi observado por GREMINGER et alii.(1985) e VILLAGRA et alii(1988) que obtiveram pontos bastante espalhados em suas curvas de retenção de campo devido à variabilidade espacial dos solos. IAEA (1984) também apresenta curvas de retenção

obtidas com sondas e tensiômetros em solos de diferentes países. As figuras 9 e 10 são exemplos de curvas de retenção obtidas da maneira exposta.

Figura 9 - Curva de retenção para Terra Roxa Estruturada, profundidade 20 cm, Piracicaba, SP, Brasil. VILLAGRA et. alii. (1988)

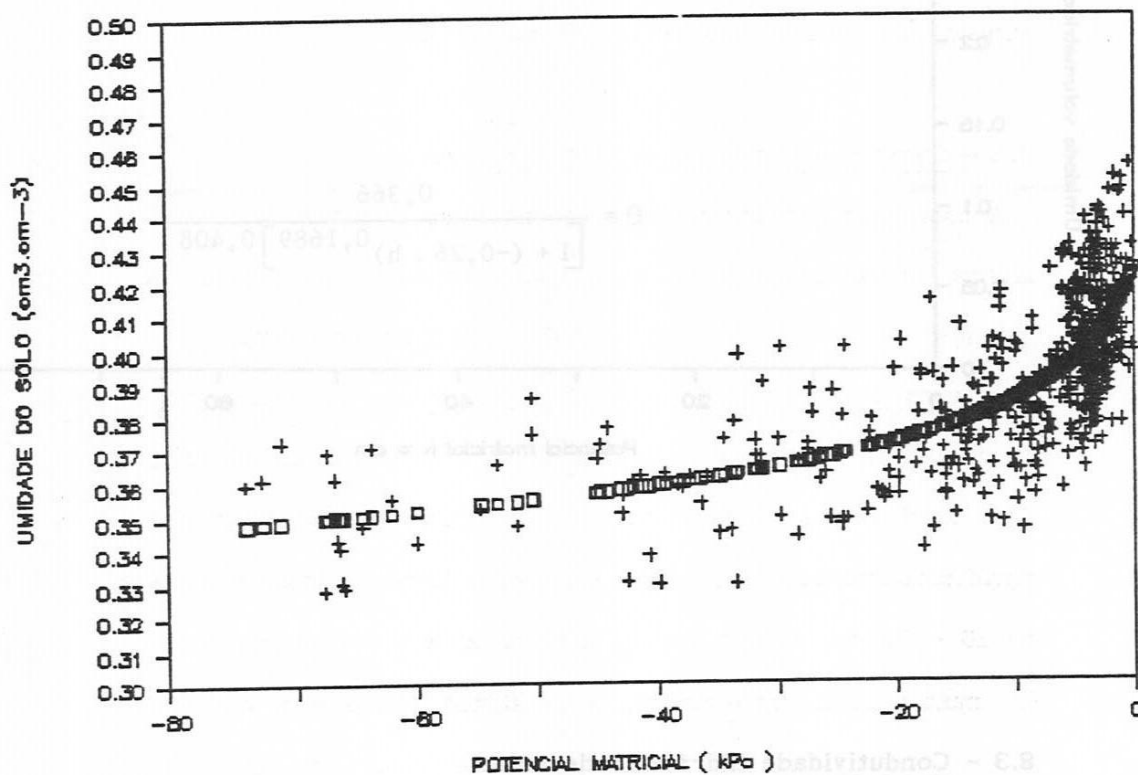
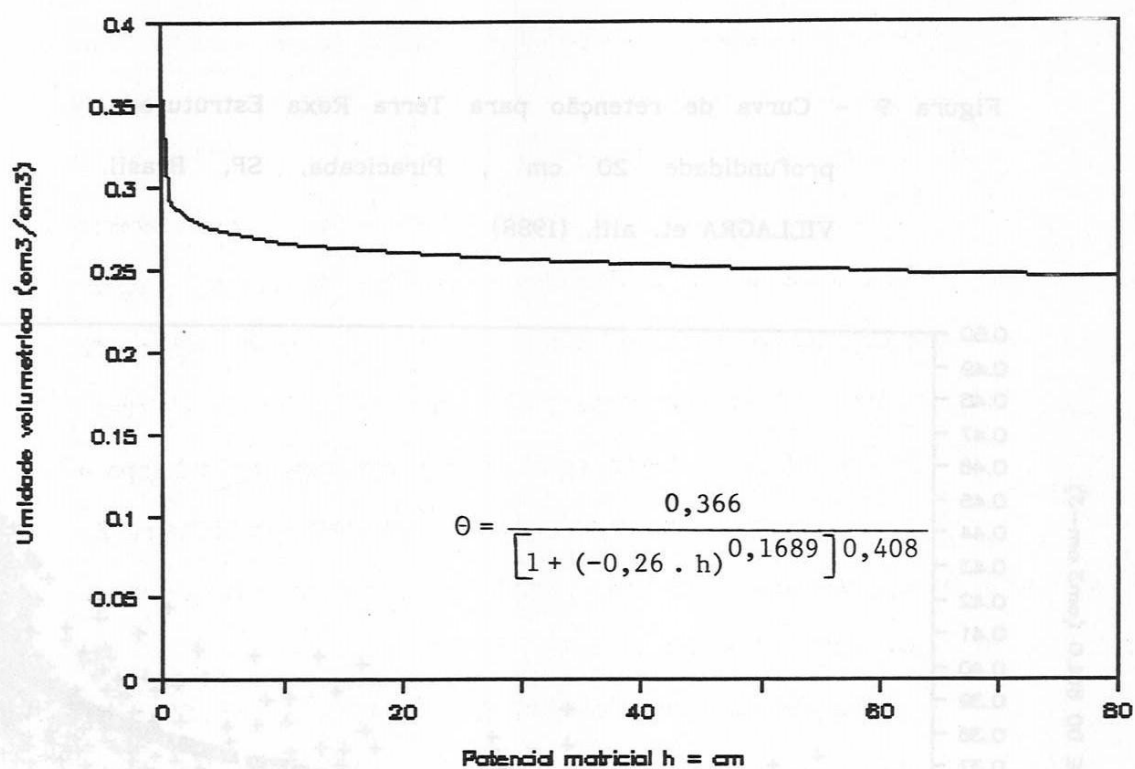


Figura 10 - Curva de retenção com dados médios mundiais
(média de 11 países)



8.3 - Condutividade hidráulica de solos:

A condutividade hidráulica dos solos K sendo um parâmetro que indica a habilidade dos solos em transmitir água, é extremamente dependente da umidade do solo θ . Portanto, para um dado meio poroso define-se uma função $K(\theta)$,

e todos os métodos para a determinação da condutividade envolvem a medição da umidade do solo. Dentre esses métodos, muitos são adaptados para se utilizar a sonda de neutrons, principalmente aqueles utilizados em condições de campo. Como exemplo, ilustraremos este item através de um desses métodos que é apresentado em LIBARDI et alii. (1980).

Em uma parcela de 5 x 5 m, três à cinco tubos de acesso são instalados até a profundidade desejada. A parcela é então inundada até o momento em que se atinge uma infiltração constante (" steady state "), Nesse momento as leituras tomadas com a sonda devem permanecer constantes com o tempo e indicar a saturação do perfil do solo. A taxa de infiltração nesse equilíbrio deve ser registrada, e é tomada como a condutividade hidráulica do solo saturado K_0 .

Após a infiltração da água de inundação, a superfície do solo deve ser coberta com um lençol plástico para evitar a perda de água do perfil por evaporação. A drenagem interna no perfil do solo é então acompanhada através de medidas frequentes da umidade do solo. A frequência de medidas deve ser inicialmente alta (cerca de duas vezes ao dia) e à medida que o tempo passa pode ser diminuída para cerca de duas vezes por semana, terminando-se o experimento com cerca de uma medida mensal. Para esse tipo de experimento a sonda de neutrons é bastante adequada porque sempre os mesmos locais são amostrados à cada medida feita. Utilizando-se trados nessa

operação, a parcela deve ser descoberta em cada amostragem e as amostras são tomadas cada vez em um local diferente. Além disso os buracos deixados em cada tráfegem perturbam significativamente o processo de drenagem do perfil do solo. Durante a inundação e nos primeiros estágios da infiltração, quando o solo está bastante úmido e pastoso, é impossível amostrar o solo com um trado.

A figura 11 mostra gráficos da variação da umidade em função do logarítmo natural do tempo para duas profundidades selecionadas de um Latossol vermelho-amarelo de Piracicaba, SP, Brasil, medido com uma sonda SOLO 25.

De acôrdo com o procedimento proposto por LIBARDI et alii.(1980), regressões lineares de θ versus $\ln t$ permitem a obtenção do coeficiente γ da equação exponencial de $K(\theta)$:

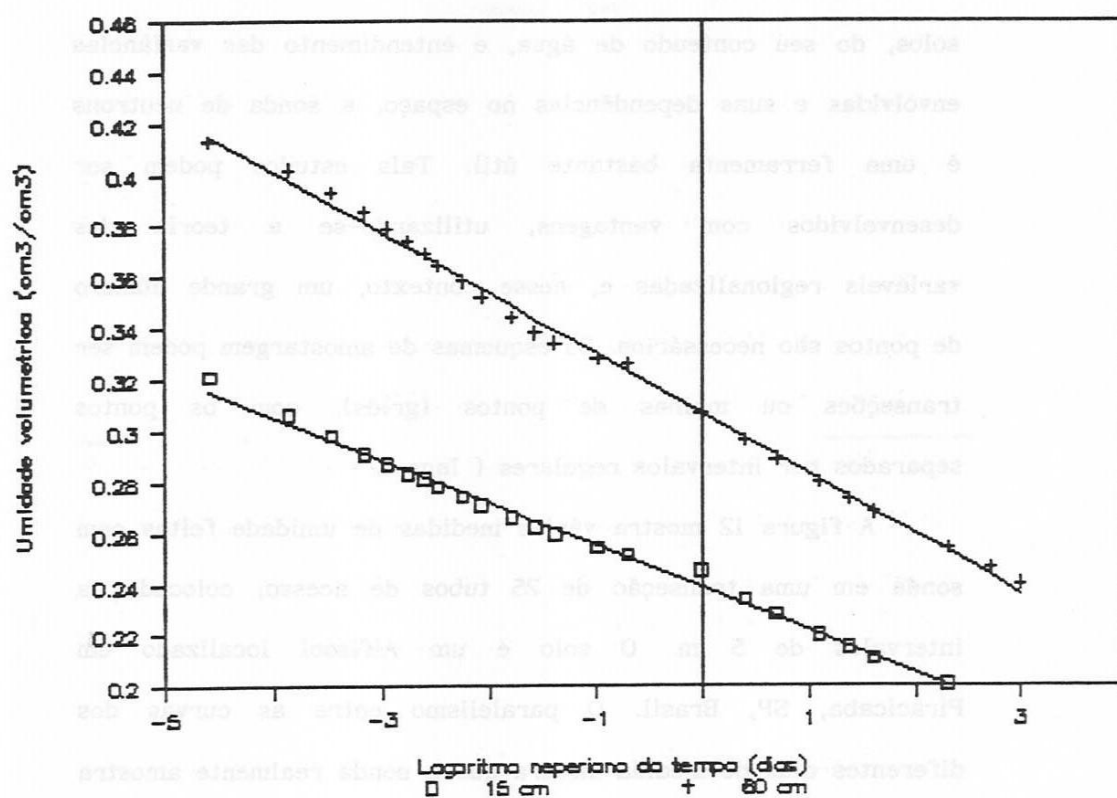
$$K = K_0 e^{\gamma (\theta - \theta_0)} \dots\dots\dots (52)$$

Para os dois exemplos da Figura 11, os valores de γ são: 23,077 e 27,273, o valor de K_0 é 85,6 cm/dia e os valores de umidade de saturação são : 0,481 e 0,439 cm^3/cm^3 . Portanto nós temos:

$$z = 50 \text{ cm} \Rightarrow K = 85,6 e^{23,077 (\theta - 0,450)}$$

$$z = 150 \text{ cm} \Rightarrow K = 85,6 e^{27,273 (\theta - 0,501)}$$

Figura 11 - Gráfico de θ versus $\ln t$ para duas profundidades
de um perfil de Latossol vermelho-amarelo.



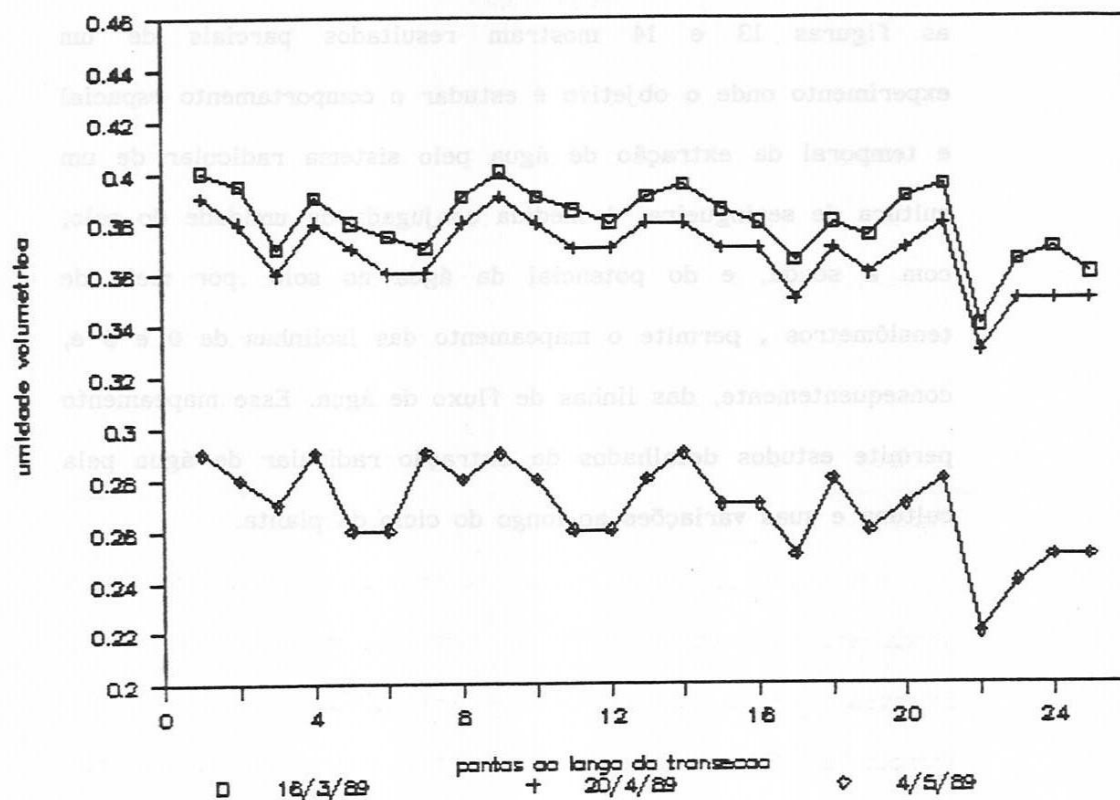
8.4 Variabilidade espacial de solos:

Quando a questão é o estudo da variabilidade espacial de solos, do seu conteúdo de água, e entendimento das variâncias envolvidas e suas dependências no espaço, a sonda de neutrons é uma ferramenta bastante útil. Tais estudos podem ser desenvolvidos com vantagens, utilizando-se a teoria das variáveis regionalizadas e, nesse contexto, um grande número de pontos são necessários. Os esquemas de amostragem podem ser transeções ou malhas de pontos (grids), com os pontos separados por intervalos regulares (lags).

A figura 12 mostra várias medidas de umidade feitas com sonda em uma transeção de 25 tubos de acesso, colocados a intervalos de 5 m. O solo é um Alfissol localizado em Piracicaba, SP, Brasil. O paralelismo entre as curvas dos diferentes dias de medida mostra que a sonda realmente amostra os mesmos pontos em cada tempo.

Figura 12 - Medidas de umidade do solo em uma transeção de 25

tubos de acesso instalados a intervalos de 5 m.



8.5 - Extração de água por raízes de culturas:

Como outro exemplo de aplicação das sondas de neutrons, as figuras 13 e 14 mostram resultados parciais de um experimento onde o objetivo é estudar o comportamento espacial e temporal da extração de água pelo sistema radicular de um cultura de seringueira. A medida conjugada da umidade do solo, com a sonda, e do potencial da água no solo ,por meio de tensiômetros , permite o mapeamento das isolinhas de θ e ψ e, conseqüentemente, das linhas de fluxo de água. Esse mapeamento permite estudos detalhados da extração radicular de água pela cultura e suas variações ao longo do ciclo da planta.

Figura 13 - Isolinhas de potencial da água em um perfil de
solo cultivado com seringueira (23/8/89)

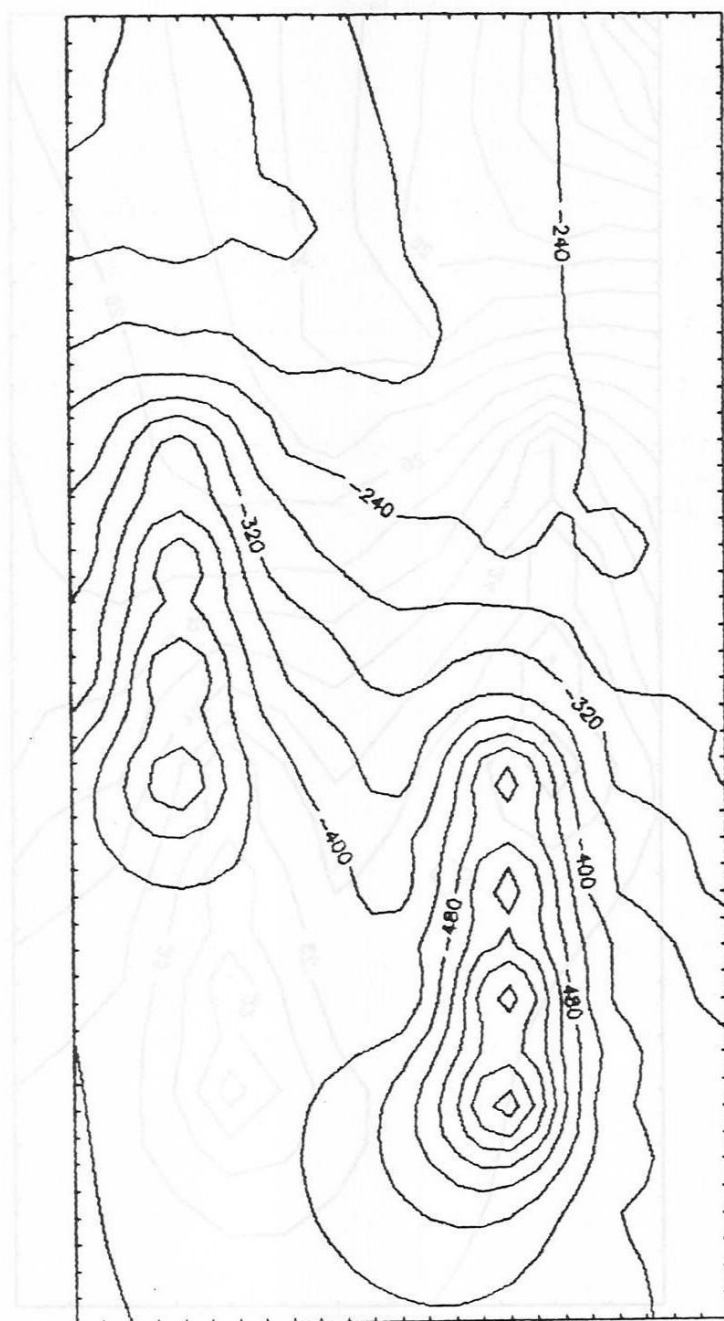
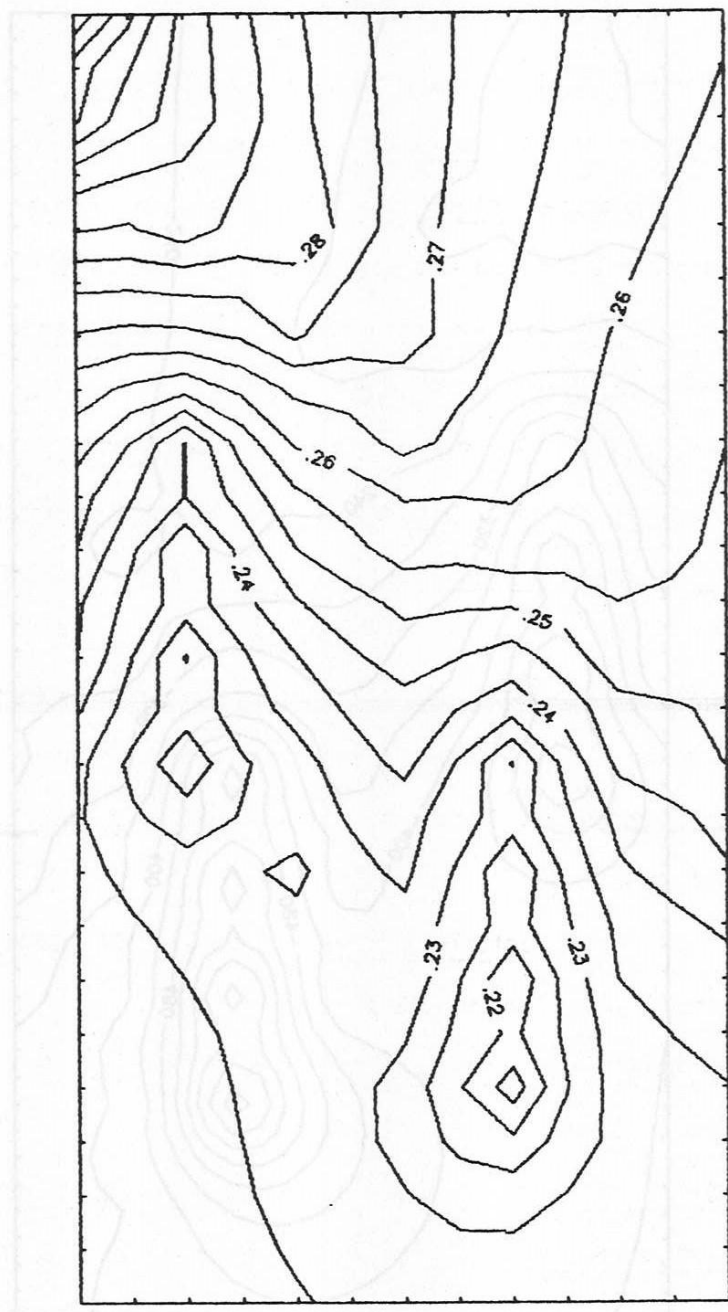


Figura 14 - Isolinhas de umidade em um perfil de solo
cultivado com seringueira (23/8/89).



Referências bibliográficas:

- Caranahan, B.; Luther H.A.; Wilkes, J.O. Applied numerical methods. New York, John Willey, 1969, 604 p.
- Couchat, Ph.; Carre, C.; Marcesse, J.; Leho, J. The measurement of thermal neutron constants of the soil: application to the calibration of neutron moisture and to the pedological study of soil. Nuclear Cross-sections Technology (Schrach and Bowman Eds.), 516, 1975.
- Greacen, E.L. Soil water assesment by the neutron method. Camberra, CSIRO, 1981, 140 p.
- Greminger, P.J.; Sud, Y.K.; Nielsen, D.R.,. Spatial variability of field measured soil water characteristics. Soil Science Society of America Journal, 49(5):1075-82, 1985.
- Havercamp, R.; Vauclin, M.; Vachaud, G. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurement: 1. Local standpoint. Soil Science, 137(2): 78-90, 1984.
- IAEA. Neutron moisture gauges. Vienna, 1970. 137 p. (Technical report series, 112)
- IAEA. Tracer manual on crops and soils. Vienna, 1976. 227 p. (Technical report series, 171)
- IAEA. Field soil-water properties measured through radiation techniques. Vienna, 1984. 122 p. (TECDOC, 312).

- Libardi, P.L.; Reichardt, K.; Nielsen, D.R.; Biggar, J.W.,
Simplified field methods for estimating the unsaturated
hydraulic conductivity. Soil Science Society of America
Journal., 44(1): 3-6, 1980.
- METHODS OF SOIL ANALYSIS; part 1 - physical and mineralogical
methods. 2.ed. Madison, ASA, 1986. 1188 p (Agronomy, 9).
- Olgaard, P.L. Problems connected with the use of subsurface
neutron moisture gauges and their solution. Danish Atomic
Energy Commission. Riso Establishment Riso. Riso-M980 20.
- Vauclin, M.; Haverkamp, R.; Vachaud, G. Error analysis in
estimating soil water content from neutron probe
measurements: 2. Spatial standpoint. Soil Science., 137(3):
141-48, 1984 .
- Villagra, M.M.; Matsumoto, O.M.; Bacchi, O.O.S.; Moraes, S.O.;
Libardi, P.L.; Reichardt, K. Tensiometry and spatial
variability in Terra Roxa Estruturada. Revista Brasileira
de Ciência do Solo, Campinas, 12(3) : 205-10, 1988.