

**KLAUS REICHARDT**  
ENGENHEIRO - AGRÔNOMO  
Instrutor junto à 1.a Cadeira  
(Física e Meteorologia)  
E. S. A. «Luiz de Queiroz» - U. S. P.

# **USO DA RADIAÇÃO GAMA NA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE E DA UMIDADE DO SOLO**

Tese de Doutorado  
Apresentada à Escola Superior de Agricultura  
«Luiz de Queiroz», da Universidade de  
São Paulo

PIRACICABA  
ESTADO DE S. PAULO - BRASIL  
OUTUBRO - 1965

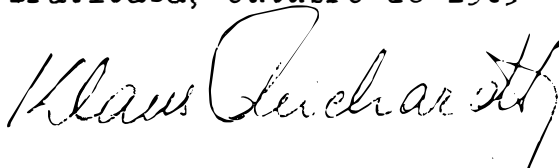
Nossos agradecimentos a todos que colaboraram conosco e, em especial, ao Prof. Admar Cervellini, pela orientação geral deste trabalho, e ao Dr. Eneas Salati, pelas valiosas sugestões apresentadas.

Às entidades,

Conselho Nacional de Pesquisas  
Universidade de São Paulo  
Fundação de Amparo à Pesquisa do  
Estado de São Paulo  
Centro Nacional de Energia Nuclear  
na Agricultura  
Fundação Rockefeller

nossos agradecimentos pe  
los auxílios recebidos.

Piracicaba, outubro de 1965

A handwritten signature in black ink, reading "Klaus Reichardt". The signature is written in a cursive, flowing style with a large initial 'K'.

KLAUS REICHARDT

AQ

## RESUMO

No presente trabalho é apresentado um método de determinação de densidade aparente e teor de água do solo pela absorção da radiação gama. O método parece promissor para o estudo de fluxo não saturado de água no solo, pois podem ser obtidas medidas de densidade aparente e teor de água sem perturbação do sistema. Nas determinações empregaram-se três tipos de solo de características físicas distintas e uma fonte de radiação gama de  $Cs^{134}$ , de 30 mC.

## SUMMARY

A method of using gamma-ray absorption to measure the bulk density and the moisture content of soil is described. The method appears promising in the study of unsaturated water flow, since measurement of both bulk density and water content can be obtained without disturbing the sample. Three soils of different physical characteristics and a  $Cs^{134}$  gamma-ray source of 30 mC were used.

KQ

## CONTEUDO

	Página
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A TEORIA DO MÉTODO .....	4
2.1. LEI FUNDAMENTAL DA ABSORÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA PELO MATERIAL .....	4
2.2. MECANISMOS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA COM O MATERIAL .....	5
2.2.1. Efeito foto-elétrico .....	7
2.2.2. Efeito Compton .....	8
2.2.3. Produção de par .....	9
2.3. TEORIA DO MÉTODO .....	11
3. MATERIAL E MÉTODO EMPREGADOS .....	13
3.1. MATERIAL .....	13
3.1.1. Solos .....	13
3.1.2. Fonte de radiação gama .....	15
3.1.3. Sistema de detecção .....	15
3.1.4. Geometria .....	15
3.2. MÉTODOS .....	15
3.2.1. Coleta e preparo das amostras de solo ..	15
3.2.2. Determinação dos coeficientes de absor- ção de massa dos solos .....	17



AR

	Página
3.2.3. Determinação da densidade aparente do solo .....	19
3.2.4. Determinação da água do solo .....	19
4. <b>DADOS OBTIDOS E ANÁLISE</b> .....	21
4.1. COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DE MASSA DA RADIAÇÃO GAMA PELO SOLO .....	21
4.2. DENSIDADE APARENTE DE SOLOS .....	23
4.3. VARIACÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO LINEAR DO SOLO EM FUNÇÃO DA VARIACÃO DE SEU TEOR DE ÁGUA .....	25
5. <b>APLICAÇÕES DO MÉTODO</b> .....	28
5.1. VARIACÃO DA DENSIDADE APARENTE DE UM PERFIL DE SOLO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE	28
5.2. ESTUDO DA VARIACÃO DO TEOR DE ÁGUA EM SOLOS .....	29
6. <b>CONCLUSÕES</b> .....	30
7. <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	32

KQ

## 1. INTRODUÇÃO

A determinação da densidade aparente de solos pelo uso de radiação gama foi estudada por diversos pesquisadores, entre os quais BELCHER e col., 1950; BERDAN e BERNHARD, 1950; BERNHARD e CHASEK, 1953; CHARLTON e col., 1953; VOMOCIL, 1954; (COMAR, 2); BERNHARD e col., 1956; VAN BAVEL e col., 1957 e 1959; VOLAROVYCH e CHURAEV, 1960; KURANZ, 1960; PHILIPS e col., 1960; MINTZER, 1961; CAREY e col., 1961; CHARLTON, 1961; TROUSE e HUMBERT, 1961 (KIRKHAM e RAYMOND, 10) e DAVIDSON e col. (4, 5).

Três geometrias básicas foram desenvolvidas nas determinações. Em uma delas o detector e a fonte de radiação gama (fig. 1) são assentados na superfície do solo. Nesta geometria, o espalhamento da radiação gama pelo solo seria proporcional à densidade aparente do solo. Em uma segunda geometria, baseada no mesmo princípio da primeira, o conjunto fonte-detector é introduzido no solo (fig. 2). Finalmente, uma terceira geometria permite a determinação da densidade aparente do solo por meio da absorção de um feixe de radiação gama que o atravessa (fig. 3).

No presente trabalho é desenvolvida uma técnica de determinação de densidade aparente de solos, baseada na absorção da radiação gama pelo solo. Esta técnica

KQ

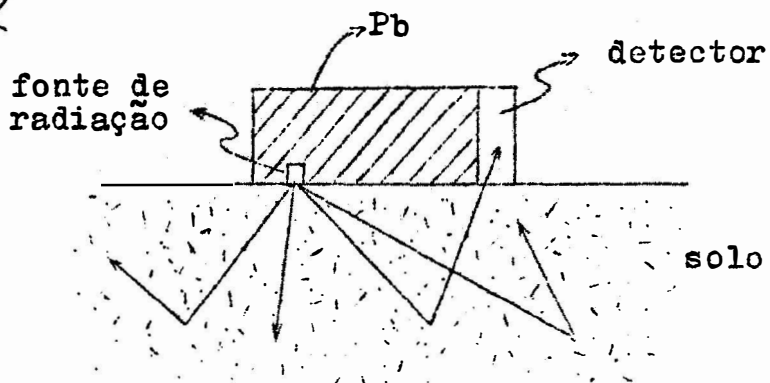


Fig. 1

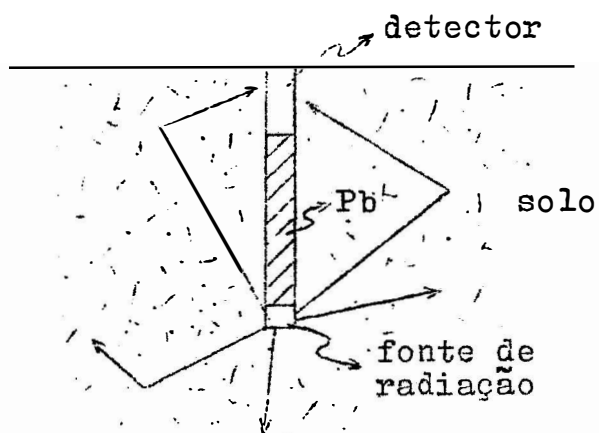


Fig. 2

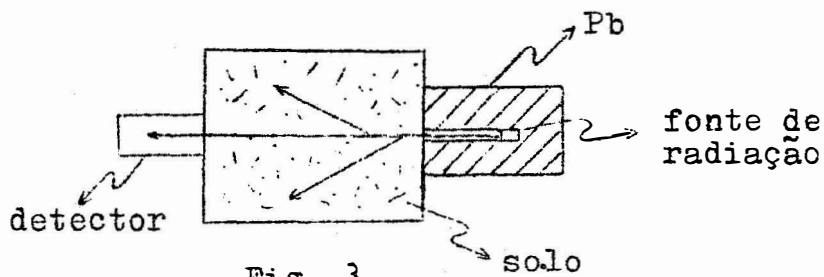


Fig. 3

Três geometrias utilizadas na determinação da densidade aparente de solos.

HR

-3-

nica apresenta a vantagem de não exigir a determinação de curvas de calibragem que, na maioria das vezes, são funções de um grande número de parâmetros. Trata-se de um método que permite o estudo da variação da densidade aparente do solo ao longo de seu perfil, sem produzir modificações na sua estrutura natural.

Por outro lado, técnicas semelhantes têm sido introduzidas recentemente no estudo da água do solo. Estudos desta natureza foram realizados principalmente por FERGUSON e col. (6, 7), GURR (9) e DAVIDSON e col. (4, 5).

O método tem se mostrado promissor no estudo da dinâmica da água do solo e GURR (9) utilizou-o com êxito na determinação da evaporação da água em colunas de solo, em função do tempo.

Da mesma forma, como no caso de determinação de densidade aparente de solos, a técnica de determinação da água do solo, aqui apresentada, não exige a determinação de curvas de calibragem.

KR

## 2. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A TEORIA DO MÉTODO

### 2.1. LEI FUNDAMENTAL DA ABSORÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA PELA MATÉRIA

Sabe-se que, quando um feixe colimado de radiação gama de intensidade  $I$  atravessa um meio material qualquer, de espessura  $dx$ , o número de radiações desviadas de sua trajetória ou absorvidas,  $dI$ , é diretamente proporcional à espessura  $dx$  e à intensidade do feixe incidente.

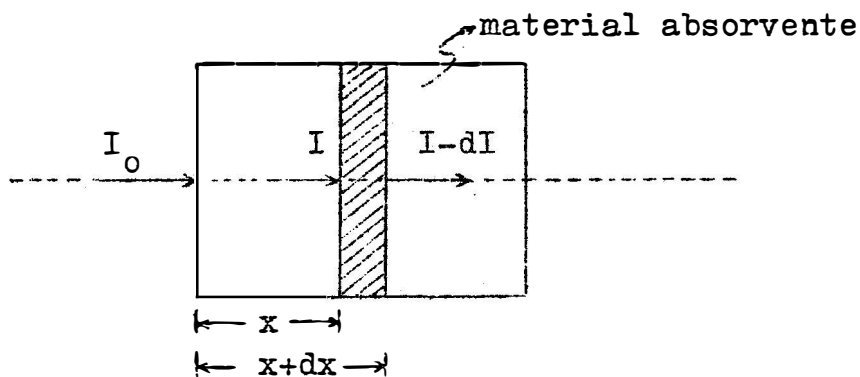


Fig. 4 - Esquema da absorção da radiação gama pela matéria.

Desta forma, pode-se escrever que:

$$dI = - \mu I dx \quad . . . . . (I)$$

onde  $\mu$  é uma constante de proporcionalidade, denominada

HQ

coeficiente de absorção linear. O sinal negativo foi incluído porque, quando dx aumenta, I diminui.

Integrando a equação (I) para variações de intensidade do feixe de radiação de  $I_0$  até I e para variações da espessura do material absorvente de 0 a x, obtém-se a expressão matemática do fenômeno que rege a absorção da radiação gama pela matéria:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \dots \dots \dots (II)$$

O coeficiente de absorção linear  $\mu$  depende da energia da radiação gama, do material absorvente e do estado físico do material absorvente. Dividindo-se  $\mu$  pela densidade do material absorvente, obtém-se outro coeficiente, denominado coeficiente de absorção de massa  $\bar{\mu}$ , independente do estado físico da substância:

$$\bar{\mu} = \frac{\mu}{d} \dots \dots \dots (III)$$

onde d = densidade do material absorvente.

## 2.2. MECANISMOS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA COM A MATÉRIA

Além das reações foto-nucleares que escapam ao escopo do presente trabalho, pode-se distinguir vários mecanismos pelos quais a radiação gama pode interagir com a matéria, segundo CONDON e ODISHAW (3):

- a - Interação da radiação gama com a coroa eletrônica

KQ

- a<sub>1</sub> - Efeito foto-elétrico
- a<sub>2</sub> - Efeito Rayleigh
- a<sub>3</sub> - Efeito Compton
  
- b - Interação da radiação gama com o núcleo ou partículas do núcleo.
  
- b<sub>1</sub> - Efeito Compton nuclear
- b<sub>2</sub> - Difusão nuclear coerente
- b<sub>3</sub> - Efeito foto-elétrico nuclear
  
- c - Interação da radiação gama com o campo elétrico do núcleo ou dos elétrons.
  
- c<sub>1</sub> - Efeito Delbrück
- c<sub>2</sub> - Produção de par
  
- d - Interação da radiação gama com campos de mésons em torno do núcleo.
  
- d<sub>1</sub> - Difusão por produção virtual de mésons
- d<sub>2</sub> - Produção de mésons

A ocorrência de qualquer um desses processos de interação é função da energia da radiação gama e do número atômico do material absorvente; a probabilidade de ocorrência de cada processo é medida pelo coeficiente de absorção ou "secção de choque".

De todos estes processos de interação, apenas são de importância para trabalhos da natureza do presente, o efeito foto-elétrico, o efeito Compton e a produção de par, dada a ordem de grandeza das energias da radiação gama utilizada. Pode-se então, considerar o - coeficiente de absorção  $\mu$  como sendo formado por três

KR

componentes:

$$\mu = \mu_f + \mu_c + \mu_p \dots \dots \dots (IV)$$

onde,

$\mu$  = coeficiente de absorção total

$\mu_f$  = coeficiente de absorção para efeito foto-elétrico

$\mu_c$  = coeficiente de absorção para efeito Compton

$\mu_p$  = coeficiente de absorção para produção de par

### 2.2.1. Efeito foto-elétrico

A radiação gama ou fótons de baixa energia podem interagir com a matéria por colisão direta com elétrons da coroa eletrônica, cedendo a estes toda sua energia. Como resultado da colisão, o elétron é ejetado do átomo, sendo sua energia cinética dada por:

$$E_c = hf - E_i \dots \dots \dots (V)$$

onde,  $hf$  é a energia do fóton e  $E_i$  a energia de ligação do elétron no átomo. O elétron arrancado do átomo recebe o nome de foto-elétron. O processo foto-elétrico ocorre apenas quando  $hf > E_i$ ; desta forma, radiações gama de baixa energia interagem apenas com elétrons fracamente ligados ao átomo. Para energias maiores, há interação com elétrons mais firmemente ligados ao átomo, até que quando  $hf > E_k$ , energia de ligação da camada K, todos os elétrons podem tomar parte no processo.

Por outro lado, pode ser mostrado que o processo foto-elétrico é mais provável quando  $hf$  é pouco



KQ

-8-

maior que  $E_i$  e também que o processo foto-elétrico não pode ocorrer com elétrons livres, pois, neste caso, a conservação de energia e momento é impossível. De uma maneira geral, a absorção de fótons pelo processo foto-elétrico aumenta com o número atômico do material absorvente e diminui com o aumento da energia da radiação. Embora não exista ainda uma teoria satisfatória do fenômeno, pode-se dizer que o coeficiente de absorção linear varia segundo  $Z^5/(hf)^{3,5}$ . A absorção pelo processo foto-elétrico dá-se na frequência de aproximadamente 80% com elétrons da camada K. O coeficiente de absorção para efeito foto-elétrico é o principal componente do coeficiente total de absorção para baixas energias, mas este diminui muito rapidamente com o aumento da energia da radiação.

### 2.2.2. Efeito Compton

Neste processo a radiação gama interage com um elétron livre ou muito fracamente ligado ao átomo, transferindo-lhe parte de sua energia (fig. 5).

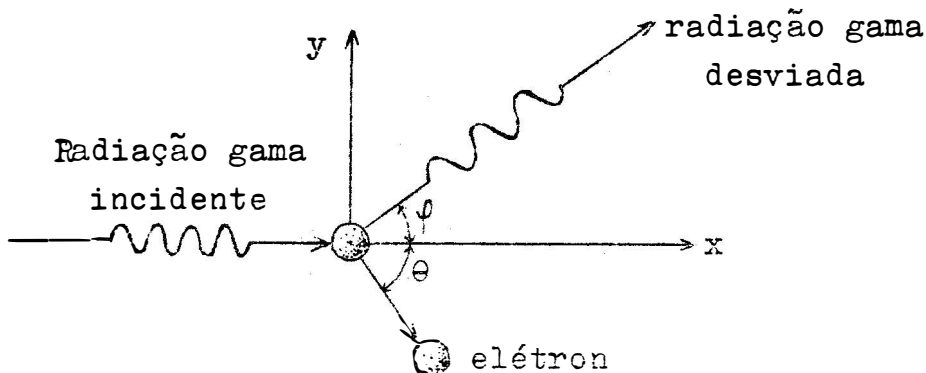


Fig. 5 - Esquema do efeito Compton

HR

Pela aplicação das leis de conservação da energia e de momento à colisão no efeito Compton, pode-se determinar a direção do elétron ejetado e a variação do comprimento de onda da radiação gama. Demonstra-se que esta variação do comprimento de onda é função exclusiva do ângulo segundo o qual ela é desviada de sua direção original, isto é,

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \psi) \dots \dots \dots \text{(VI)}$$

onde,

$\Delta\lambda$  = variação de comprimento da radiação gama

h = constante de Planck

$m_0$  = massa de repouso do elétron

c = velocidade da luz

$\psi$  = ângulo de desvio da radiação gama

Sem considerar o ângulo de desvio  $\psi$ , também chamado ângulo de espalhamento, a variação do comprimento de onda,  $\Delta\lambda$ , é pequena para radiações gama de baixa energia. Para radiações gama de maior energia  $\Delta\lambda$  torna-se considerável e o elétron emitido adquire alta energia.

O coeficiente de absorção de massa para efeito Compton,  $\bar{\mu}_c$ , é praticamente independente do número atômico Z, variando muito pouco com a relação Z/A. Ele é o componente principal do coeficiente de absorção total, no intervalo de energias (0,5 - 5,0 MeV).

### 2.2.3. Produção de par

Os efeitos Compton e foto-elétrico contribuem

QQ

muito pouco na absorção de radiações gama de alta energia. Na região das altas energias, o processo conhecido como produção de par é o responsável pela maior absorção de radiações gama, principalmente em materiais de alto número atômico.

Radiações gama de energias iguais ou superiores a 1,02 MeV podem interagir com o campo elétrico de um núcleo, em cuja interação a radiação gama desaparece, dando formação a um elétron e um pósitron, com energias cinéticas  $E_e$ .

Pela conservação da energia tem-se:

$$hf = 2 (m_0 c^2 + E_e) \dots \dots \dots (VII)$$

sendo que o segundo membro da equação (VII) representa a energia dispendida na formação de dois elétrons de massa de repouso  $m_0$  e com energia cinética  $E_e$ . A energia mínima necessária para a formação de dois elétrons é  $2 m_0 c^2 = 1,02$  MeV e todo excesso de energia além deste limite é transmitido aos elétrons em forma de energia cinética.

O coeficiente de absorção para produção de par,  $\mu_p$ , é nulo para  $hf < 1,02$  MeV e aumenta linearmente para energias maiores. O coeficiente de absorção de massa para este processo varia linearmente com  $Z$ .

Na fig. 6 é apresentada a variação dos coeficientes  $\mu_f$ ,  $\mu_c$  e  $\mu_p$ , segundo LAPP (11).

KQ

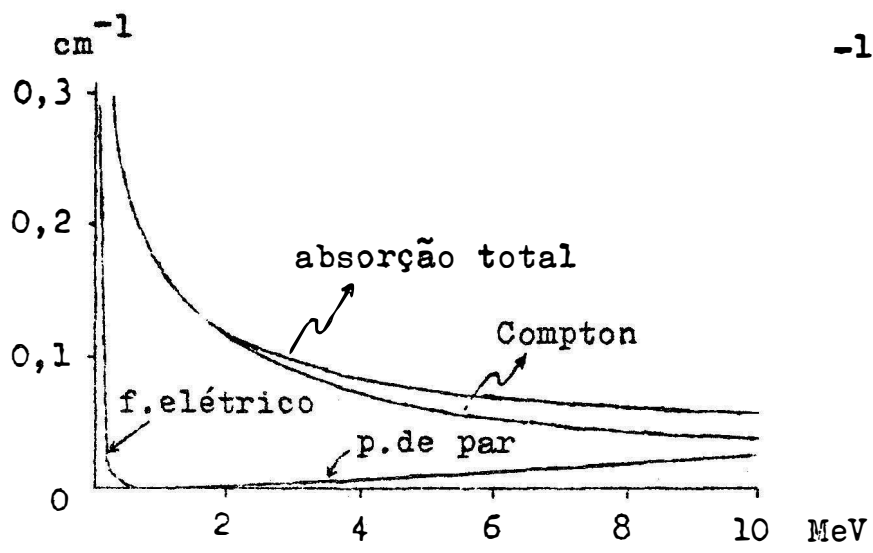


Fig. 6 - Coeficientes de absorção para radiação gama em Alumínio.

### 2.3. TEORIA DO MÉTODO

Pode-se determinar a massa específica aparente<sup>(\*)</sup> ou densidade aparente de uma amostra de solo fazendo-se incidir sôbre esta amostra um feixe de radiação gama e determinando-se os coeficientes de absorção linear e de massa, pois pela equação (III):

$$d = \frac{\mu}{\bar{\mu}} \quad \text{ou} \quad d = f(\mu, \bar{\mu})$$

Se nessas determinações forem utilizadas radiações gama de energias no intervalo 0,5 - 1,0 MeV, a absorção será devida predominantemente ao efeito Compton. Isto porque a probabilidade de ocorrência da produção de par é nula para energias menores que 1,02 MeV

---

(\*) massa específica aparente por tratar-se de um material poroso.

KQ

e porque a probabilidade do efeito foto-elétrico para estas energias e para os elementos normalmente encontrados nos solos, é nula ou muito pequena. Pela análise do Quadro I pode-se verificar a pouca importância do efeito foto-elétrico com relação ao efeito Compton, no intervalo de energias em estudo.

Devido às condições acima mencionadas, a equação (IV) fica:

$$\mu = \mu_c$$

Por outro lado, na absorção da radiação gama de uma determinada energia pelo solo, deve-se esperar que o coeficiente de absorção de massa  $\bar{\mu}$ , seja independente do tipo de solo, pois os principais elementos que constituem o solo possuem praticamente a mesma relação Z/A. No Quadro II são apresentados os valores de Z, A, Z/A e dos coeficientes de absorção de massa para os principais elementos encontrados nos solos, SALATI (15). Pela análise do Quadro II pode-se verificar que o coeficiente de absorção de massa para uma determinada radiação gama, varia muito pouco de elemento para elemento. Desta forma:

$$d = k \mu \quad \text{ou} \quad d = f(\mu) \dots \dots \dots \text{(VIII)}$$

onde,

$$k = \frac{1}{\bar{\mu}}$$

O Hidrogênio, cuja relação Z/A é igual a 1 poderia acarretar uma diferença para solos úmidos ou orgânicos.

KQ

QUADRO I

Material	$(\mu_f/\mu_c) \cdot 100$			
	0,5 MeV	0,6 MeV	0,8 MeV	1,0 MeV
H	0	0	0	0
C	0	0	0	0
N	0	0	0	0
O	0	0	0	0
Na	0	0	0	0
Mg	0	0	0	0
Al	0	0	0	0
Si	0	0	0	0
P	0,23	0	0	0
S	0,43	0,23	0	0
K	0,72	0,39	0,22	0
Ca	0,86	0,56	0,21	0
Fe	2,09	1,42	0,81	0,54

Símbolos utilizados

$\mu_f$  = coeficiente de absorção para efeito foto-elétrico

$\mu_c$  = coeficiente de absorção para efeito Compton

Dados calculados a partir de BLATZ (1).

KQ

QUADRO II

Elemento	Z	A	Z/A	$\bar{\mu}$ (cm <sup>2</sup> /g)				
				Energia da radiação gama em MeV				
				0,5	0,6	0,8	1,0	1,25
H	1	1	1,00	0,173	0,160	0,140	0,126	0,113
C	6	12	0,50	0,0870	0,0805	0,0707	0,0636	0,0568
N	7	14	0,50	0,0869	0,0805	0,0707	0,0636	0,0568
O	8	16	0,50	0,0870	0,0806	0,0708	0,0636	0,0568
Na	11	23	0,48	0,0833	0,0770	0,0676	0,0608	0,0546
Mg	12	24	0,50	0,0860	0,0795	0,0699	0,0627	0,0560
Al	13	27	0,48	0,0840	0,0777	0,0683	0,0614	0,0548
Si	14	28	0,50	0,0869	0,0802	0,0706	0,0635	0,0567
P	15	31	0,48	0,0846	0,0780	0,0685	0,0617	0,0551
S	16	32	0,50	0,0874	0,0806	0,0707	0,0635	0,0568
K	19	39	0,49	0,0852	0,0786	0,0689	0,0618	0,0552
Ca	20	40	0,50	0,0876	0,0809	0,0708	0,0634	0,0566
Ti	22	48	0,46	---	---	---	---	---
Mn	25	55	0,45	---	---	---	---	---
Fe	26	56	0,46	0,0828	0,0762	0,0664	0,0595	0,0531
H <sub>2</sub> O	--	--	--	0,0966	0,0896	0,0786	0,0706	0,0630

Símbolos utilizados

Z = número atômico

A = número de massa do isótopo mais abundante

$\bar{\mu}$  = coeficiente de absorção linear de massa (Reactor - Physics constants, Argonne National Laboratory ANL-5800, 1961).

Kid

Por outro lado, pelo fato de ser o coeficiente de absorção linear uma função da densidade aparente do material absorvente, pode-se afirmar que, para um solo de densidade aparente constante (determinada quando sêco), o coeficiente de absorção linear é uma função de seu teor de água U:

$$U = f(\mu) \dots \dots \dots (IX)$$

sendo,

$$U = g \text{ H}_2\text{O/cm}^3 \text{ solo sêco.}$$

Supondo-se uma amostra de solo de densidade aparente  $d_s$ , quando sêco e  $d_u$  quando possui um teor de água U, tem-se, segundo a equação (III):

$$\mu_u = \bar{\mu} d_u$$

e

$$\mu_s = \bar{\mu} d_s$$

onde,

$\mu_s$  e  $\mu_u$  são os coeficientes de absorção linear do solo quando sêco e quando úmido, respectivamente, e  $\bar{\mu}$  o coeficiente de absorção de massa do solo, tomado como independente de seu teor de água.

Subtraindo uma equação da outra e substituindo  $d_u - d_s$  por U tem-se:

$$U = k(\mu_u - \mu_s)$$

o que indica que a função expressa pela equação (IX) é uma função linear.



42

### 3. MATERIAL E MÉTODO EMPREGADOS

#### 3.1. MATERIAL

##### 3.1.1. Solos

As amostras de solo utilizadas provêm de perfis pertencentes a três Grandes Grupos existentes no município de Piracicaba:

a - Podsolóico vermelho-amarelo, variação Laras , RANZANI (13), sendo as amostras colhidas nas proximidades do Aeroporto de Piracicaba. Neste trabalho chamou-se êste solo de "variação Laras".

b - Latosol roxo, série Iracema, RANZANI (13), sendo as amostras colhidas na Fazenda Areião, pertencente à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Chamou-se êste solo de "terra roxa".

c - Hidromórfico Húmico Gleizado, série Monte Olimpo, RANZANI (14), sendo as amostras coletadas nas proximidades de Dois Córregos, rodovia Piracicaba-Santa Bárbara d'Oeste. Chamou-se êste solo de "Monte Olimpo".

No Quadro III são apresentados os teores de argila, limo, areia e matéria orgânica desses solos.

RR

QUADRO III  
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS SOLOS

Solo	Areia %	Limo %	Argila %	M.O. %
Variação Laras	72,15	6,00	21,85	0,46
Terra Roxa	29,15	16,00	54,85	2,17
Monte Olimpo	85,5	4,5	10,0	5,03

KQ  
3.1.2. Fonte de Radiação Gama

Utilizou-se uma fonte de  $^{55}\text{Cs}^{134}$ , de atividade aproximada de 30 mC (novembro 1964), produzida no Instituto de Energia Atômica de São Paulo. O césio enu contra-se encerrado em uma cápsula cilíndrica de alumínio, cujas dimensões externas são: 22 mm de comprimenuto e 10 mm de diâmetro.

A figura 7 representa o espectro da fonte de Cs obtido experimentalmente pelo autor e o esquema de desintegração do  $^{55}\text{Cs}^{134}$ , segundo FRISCH (8).

Nas determinações utilizaram-se radiações gama de energias  $0,58 \pm 0,01$  MeV.

3.1.3. Sistema de detecção

Para detecção das radiações gama emitidas pelo  $\text{Cs}^{134}$  empregou-se um detector de cintilação (modelo DS-5) e um analisador de impulsos (modelo 132-B), ambos de fabricação da Nuclear Chicago Corporation.

3.1.4. Geometria

Para as determinações dos coeficientes de absorção do solo foi utilizado um feixe colimado de radiações gama obtido com uma geometria que é esquematizada na figura 8. Nesta geometria o orifício de colimação possui um diâmetro de 4 mm.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Coleta e preparo das amostras de solo

Para cada tipo de solo foi feita a reunião de

KQ

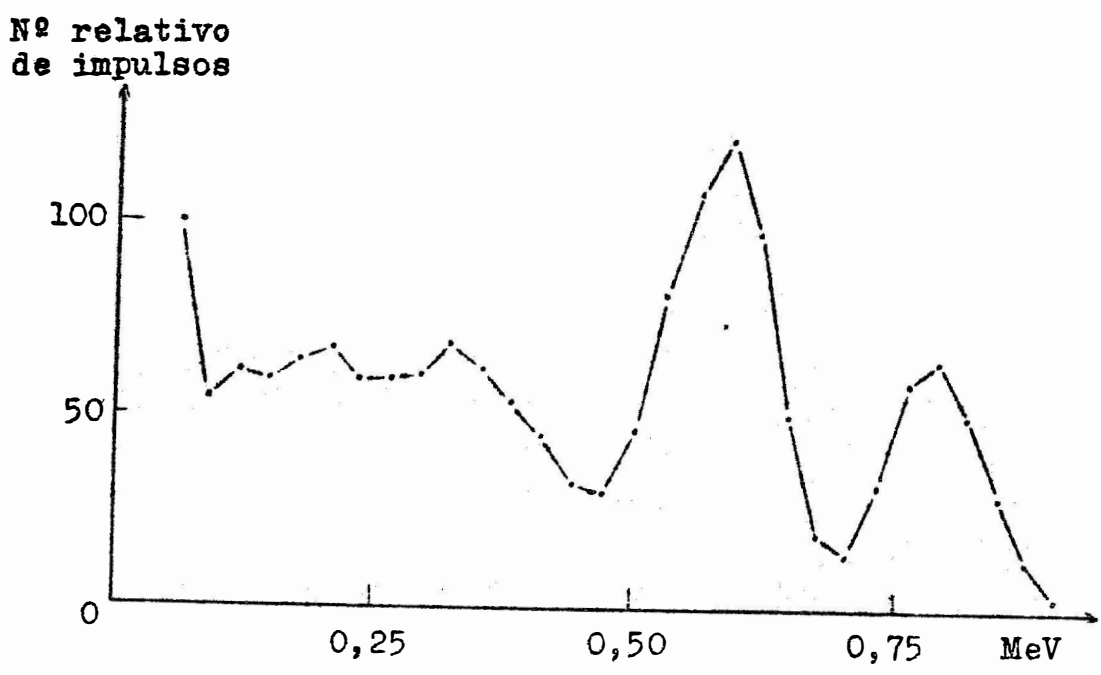
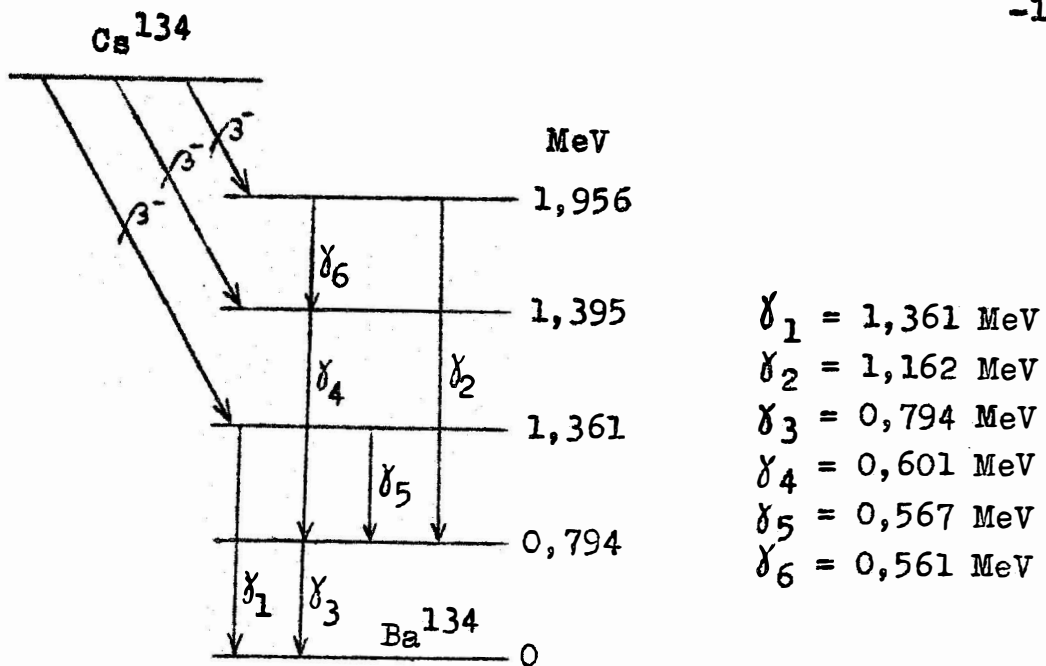


Fig. 7 - Esquema de desintegração e espectro do  $Cs^{134}$ .

KQ

-17-

várias amostras coletadas até 30 cm de profundidade, em uma área de aproximadamente  $2.500 \text{ m}^2$ . O solo foi sêco à sombra e depois peneirado em peneira de 2 mm. As amostras de solo foram levadas à diferentes teores de umidade por adição de água à "terra fina sêca ao ar", tomando-se cuidado para se obter uma homogeneidade completa, obtida por adição lenta da água e uso da peneira de 2 mm.

Os teores de umidade foram determinados em estufa a  $105^\circ\text{C}$ .

### 3.2.2. Determinação dos coeficientes de absorção de massa dos solos

Para a determinação dos coeficientes de absorção de massa o solo foi colocado em um cilindro de alumínio de 150 mm de altura e 47 mm de diâmetro interno, fechado em uma das extremidades com uma chapa, também de alumínio, de 1,5 mm de espessura (fig. 9). O cilindro, contendo o solo, foi colocado em posição horizontal, mantendo-se o solo por intermédio de um disco de lucite, de diâmetro igual ao diâmetro interno do tubo e de 11 mm de espessura.

Para cada tipo de solo, com três teores diferentes de umidade, foram determinadas curvas de absorção, variando-se a espessura  $x$  de solo no intervalo  $0 - 25 \text{ g/cm}^2$ . Todas as curvas de absorção foram traçadas com 12 pontos.

Os coeficientes de absorção de massa  $\bar{\mu}$ , foram determinados a partir dos coeficientes angulares das curvas de absorção, traçados em gráficos semi-logarítmicos.

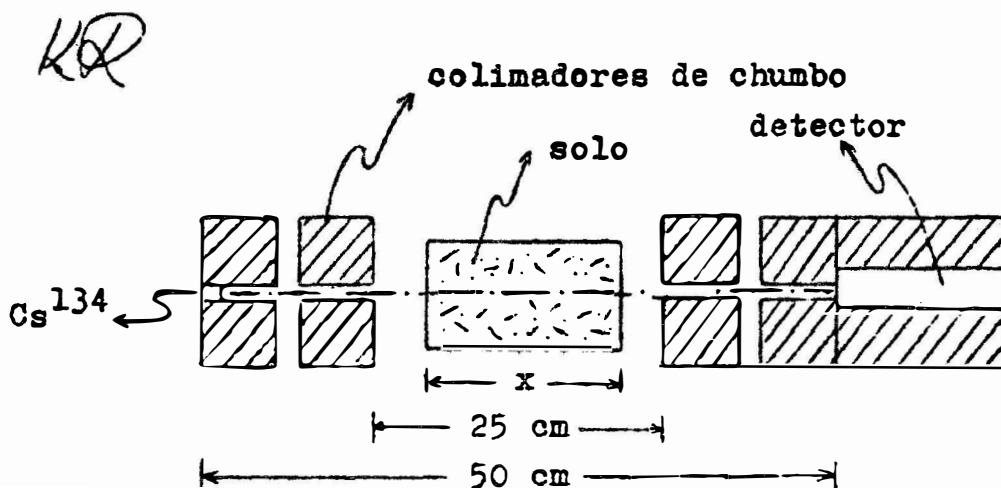


Fig. 8 - Esquema da geometria utilizada na colimação das radiações gama.

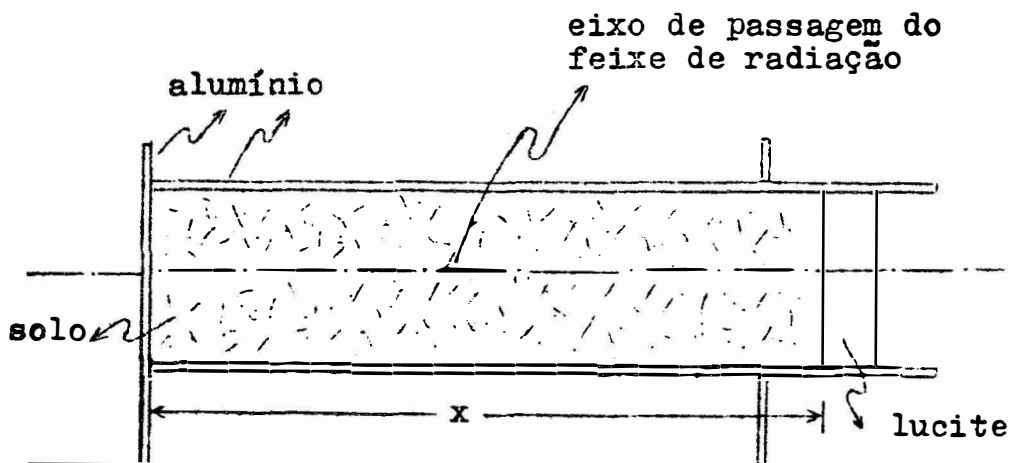


Fig. 9 - Corte longitudinal do cilindro utilizado para a determinação dos coeficientes de absorção de massa do solo.

KQ

### 3.2.3. Determinação da densidade aparente do solo

Sendo o coeficiente de absorção de massa de um solo uma constante independente de sua compactação, procurou-se determinar a densidade aparente de amostras de solo pela determinação de seu coeficiente de absorção linear e aplicação da equação (III):

$$d = \frac{\mu}{\bar{\mu}}$$

O coeficiente de absorção linear  $\mu$  de cada amostra foi determinado pela expressão:

$$\mu = \frac{LI_0 - LI}{x} \dots \dots \dots (X)$$

onde,

$LI_0$  = logaritmo neperiano da intensidade do feixe incidente

$LI$  = logaritmo neperiano da intensidade do feixe emergente

$x$  = espessura da amostra de solo

Procurando verificar a exatidão do método desenvolvido, realizaram-se determinações simultâneas da densidade aparente de várias amostras pelo método aqui apresentado e pelo método clássico, isto é, pela determinação da massa e do volume das amostras.

### 3.2.4. Determinação da água do solo

Estudou-se a variação do coeficiente de absorção linear dos três solos citados em função de seu teor

AQ

-20-

de umidade. Para isto, foram determinados os coeficientes de absorção linear de várias amostras de solo, em duas fases: a primeira determinação foi levada a efeito em amostras cujo teor de água era conhecido e a segunda determinação foi realizada, respectivamente, sobre as mesmas amostras, após terem sido secadas em estufa, a  $105^{\circ}\text{C}$ , até pêsso constante.

Com os dados obtidos, estabeleceu-se uma função que correlaciona a variação do coeficiente de absorção linear com a variação do teor de água do solo.



#### 4. DADOS OBTIDOS E ANÁLISE

##### 4.1. COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DE MASSA DA RADIAÇÃO GAMA PELO SOLO

Fez-se o estudo da regressão linear de cada curva de absorção pelo método dos quadrados mínimos, segundo PIMENTEL GOMES (12).

Os coeficientes de absorção de massa, obtidos para os diferentes tipos de solo, e teores de umidade, com seus respectivos desvios padrões foram:

Solo	Umidade % Pêso	Coefficiente de absorção $\bar{\mu}$ (cm <sup>2</sup> /g)	desvio padrão s ( $\bar{\mu}$ )
var. Laras	0	0,08006	0,00028
var. Laras	8,46	0,07960	0,00109
var. Laras	15,18	0,07849	0,00021
terra roxa	0	0,08136	0,00089
terra roxa	9,57	0,07867	0,00036
terra roxa	27,71	0,07820	0,00072
M. Olimpo	0	0,08139	0,00064
M. Olimpo	20,83	0,07893	0,00062
M. Olimpo	37,07	0,08049	0,00048

Os coeficientes de absorção de massa foram comparados pelo emprêgo do teste Tukey, de acôrdo com PIMENTEL GOMES (12), tomando-se para a análise o contraste representado pelos coeficientes de absorção mais díspares.

Calculou-se a diferença mínima significativa

KGR

pela expressão:

$$\Delta = q \sqrt{\frac{1}{2} \hat{V}(\hat{Y})} \dots \dots \dots (XI)$$

sendo q fornecido por tabela "estudentizada" a um dado nível de probabilidade e  $\hat{V}(\hat{Y})$  a estimativa da variância da estimativa do contraste estudado.

A fim de estimar os graus de liberdade (n') necessários para testar o contraste, utilizou-se a fórmula de SATTERTHWAITTE (16):

$$n' = \frac{[\hat{V}(\mu_i) + \hat{V}(\mu_j)]^2}{\frac{[\hat{V}(\mu_i)]^2}{n_i} + \frac{[\hat{V}(\mu_j)]^2}{n_j}} \dots \dots \dots (XII)$$

sendo  $\hat{V}(\mu_i)$  e  $\hat{V}(\mu_j)$  as estimativas das variâncias dos coeficientes de absorção  $\mu_i$  e  $\mu_j$  utilizados no contraste e  $n_i$  e  $n_j$  seus respectivos graus de liberdade de erro de regressão.

As variâncias dos coeficientes de absorção  $\mu_i$  foram estimadas, segundo PIMENTEL GOMES (12), pela expressão:

$$\hat{V}(\mu_i) = \frac{s^2}{\sum (x - \bar{x})^2} \dots \dots \dots (XIII)$$

sendo,

s = desvio residual da regressão

x = valores das espessuras de solo (g/cm<sup>2</sup>)

142

Os coeficientes de absorção mais díspares foram observados para Monte Olimpo (sêco em estufa) e terra roxa (27,71 umidade % pêsso), sendo o contraste estudado  $\mu_1 - \mu_2 = Y = 0,00319$ . Para êste caso, encontra-se uma diferença mínima significativa  $\Delta = 0,00330$ .

Considerou-se então, o coeficiente de absorção de massa para solos e para radiações gama de energia  $0,58 \pm 0,01$  MeV, como sendo independente do tipo de solo e do teor de água. Para seu valor, tomou-se a média dos valores obtidos, isto é,

$$\begin{aligned} \bar{\mu} &= 0,07969 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} \\ s(\bar{\mu}) &= 0,00022 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} \end{aligned}$$

#### 4.2. DENSIDADE APARENTE DE SOLOS

Foram feitas determinações de densidade aparente em amostras de solo, colocadas no cilindro de alumínio descrito em 3.2.2, com diferentes compactações, simultâneamente por dois métodos:

a - com utilização de radiação gama, de energias  $0,58 \pm 0,01$  MeV, segundo método já mencionado em 3.2.3, tomando o coeficiente de absorção de massa para solos como sendo constante e igual a  $0,07969 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . Neste trabalho, chamou-se êste método de método gama.

b - pela determinação do volume e da massa do solo da amostra. Este trabalho tornou-se fácil porque as amostras possuíam forma geométrica conhecida. Chamou-se êste método de método clássico.

KA

QUADRO IV

DETERMINAÇÃO DE DENSIDADES APARENTES DE SOLOS (g/cm<sup>3</sup>)

método clássico	método gama	método clássico	método gama
1,34	1,34	1,26	1,28
1,47	1,49	1,70	1,69
1,57	1,57	1,82	1,79
1,83	1,81	0,98	0,98
2,08	2,05	1,16	1,16
1,55	1,52	1,28	1,25
1,53	1,51	1,37	1,35
1,21	1,23	1,20	1,19
1,32	1,35	1,39	1,37
1,45	1,46	0,96	0,95
1,64	1,63	1,14	1,13
1,81	1,79	1,13	1,12
1,54	1,53	1,21	1,19
1,52	1,52	1,02	1,01
1,29	1,31	1,18	1,17
1,34	1,35	1,20	1,17
1,91	1,90	1,26	1,24
2,05	2,02	1,18	1,15
1,21	1,23	1,17	1,16
1,05	1,06	1,42	1,40
1,36	1,35		

ANÁLISE DA VARIÂNCIA

Causa de variação	GL	S.Q.	Q.M.	F
Trat. (métodos)	1	0,0010975	0,0010975	0,014
Resíduo	80	6,2442635	0,0780533	
<b>Total</b>	<b>81</b>	<b>6,2453610</b>		

KQ

-24-

Os dados obtidos nestas determinações e sua análise acham-se no Quadro IV. As determinações, pelos métodos clássico e gama, apresentaram, respectivamente, coeficientes de variação não maiores que 1,5% e 1,8%.

Através da análise da variância, pode-se verificar a precisão do método gama.

10  
4.3. VARIACÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO LINEAR DO SOLO EM FUNÇÃO DA VARIACÃO DE SEU TEOR DE ÁGUA

Os dados obtidos no estudo da variação do coeficiente de absorção linear do solo em função de seu teor de água encontram-se nos Quadros V, VI e VII, com as respectivas análises de variância.

Chamou-se de X as variações do teor de água no solo em  $\text{gH}_2\text{O}/\text{dm}^3$  e de Y a variação do coeficiente de absorção linear,  $\Delta_{\mu} = \mu_u - \mu_s$ .

Para os três solos estudados, a análise da variância mostrou alta significância para regressão linear, confirmando o previsto pela teoria.

As equações de regressão obtidas pelo método dos quadrados mínimos, PIMENTEL GOMES (12), foram:

variação Laras:  $Y = 0,0000812 X - 0,00068$  (XIV)

terra roxa :  $Y = 0,0000824 X - 0,00047$  (XV)

Monte Olimpo :  $Y = 0,0000833 X + 0,00011$  (XVI)

Fez-se a comparação dos coeficientes angulares das equações (XIV), (XV) e (XVI), dois a dois, pelo teste Tukey, PIMENTEL GOMES (12). Os graus de liberdade necessários para testar os contrastes foram determi-

12

nados pela fórmula de SATTERTHWAITTE (16).

Os graus de liberdade e os valores de  $\Delta$  encontrados para cada contraste foram:

Contrastes	GL	$\mu_1 - \mu_j$	$\Delta$ (5%)
var. Laras vs. t. roxa	22	0,00000113	0,00000632
t. roxa vs. M. Olimpo	22	0,00000099	0,00000632
M. Olimpo vs. var.Laras	24	0,00000222	0,00000438

Os coeficientes lineares das equações (XIV), (XV) e (XVI) deveriam ser nulos pois quando  $X = 0$ ,  $Y = 0$ . Devido a isto, verificou-se se eles diferem ou não de zero, pela aplicação do teste t, PIMENTEL GOMES (12), utilizando a expressão:

$$t = \frac{a_i - 0}{\sqrt{\hat{V}(a_i)}} \dots \dots \dots (XVII)$$

onde  $a_i$  é o coeficiente angular em estudo e  $\hat{V}(a_i)$  a estimativa de sua variância dada por:

$$\hat{V}(a_i) = \frac{s^2}{N} + \bar{X} \cdot \hat{V}(\mu_i) \dots \dots \dots (XVIII)$$

Solo	Contraste ( $a_i - 0$ )	GL	$\hat{V}(a_i)$	Limites para t		t
				5%	1%	
var.Laras	0,00068	14	0,000165	2,14	2,98	4,12 <sup>XX</sup>
t. roxa	0,00047	14	0,000314	2,14	2,98	1,50
M. Olimpo	0,00011	11	0,000176	2,20	3,11	0,62

KR

QUADRO V

VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO LINEAR EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA DO SOLO

Variação Laras

X (gH <sub>2</sub> O/dm <sup>3</sup> )	Y (μ <sub>u</sub> - μ <sub>s</sub> )
3,1	-0,00046
4,8	-0,00064
16,2	0,00084
18,2	0,00085
43,3	0,00244
52,3	0,00435
77,7	0,00556
81,4	0,00661
82,2	0,00565
82,6	0,00650
125,5	0,00861
156,8	0,01130
189,5	0,01451
213,4	0,01697
236,0	0,01908
269,0	0,02105

ANÁLISE DA VARIANCIA

Causa de variação	GL	S.Q.	Q.M.	F
Regressão linear	1	0,000730611	0,000730611	4272 <sup>***</sup>
Resíduo	14	0,000002394	0,000000171	
Total	15	0,000733005		

$$Y = 0,0000812 X - 0,00068$$



122

QUADRO VI  
VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO LINEAR EM  
FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA DO SOLO  
 terra roxa

X (gH <sub>2</sub> O/dm <sup>3</sup> )	Y ( $\mu_u - \mu_s$ )
16,3	0,00138
18,7	0,00156
25,5	0,00167
83,0	0,00617
106,3	0,00816
122,5	0,00953
123,9	0,00990
124,6	0,00930
142,6	0,01065
143,1	0,01004
163,5	0,01290
164,6	0,01298
175,7	0,01449
178,0	0,01496
210,5	0,01654
250,8	0,02101

ANÁLISE DA VARIÂNCIA

Causa de variação	GL	S.Q.	Q.M.	F
Regressão linear	1	0,000455587	0,000455587	1421 <sup>522</sup>
Resíduo	14	0,000004487		
Total	15	0,000460074		

$$Y = 0,000824 X - 0,00047$$

HR

QUADRO VII

VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO LINEAR EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA DO SOLO

Monte Olimpo

X (gH <sub>2</sub> O/dm <sup>3</sup> )	Y (μ <sub>u</sub> - μ <sub>s</sub> )
5,9	0,00074
7,2	0,00037
22,9	0,00162
26,0	0,00207
74,0	0,00667
76,4	0,00695
91,6	0,00806
119,1	0,00986
133,2	0,01142
189,1	0,01535
225,1	0,01899
245,2	0,02100
254,1	0,02077

ANÁLISE DA VARIANÇIA

Causa de variação	GL	S.Q.	Q.M.	F
Regressão linear	1	0,000679683	0,000679683	4540 <sup>***</sup>
Resíduo	11	0,000001647		
Total	12	0,000681330		

$$Y = 0,0000833 X + 0,00011$$

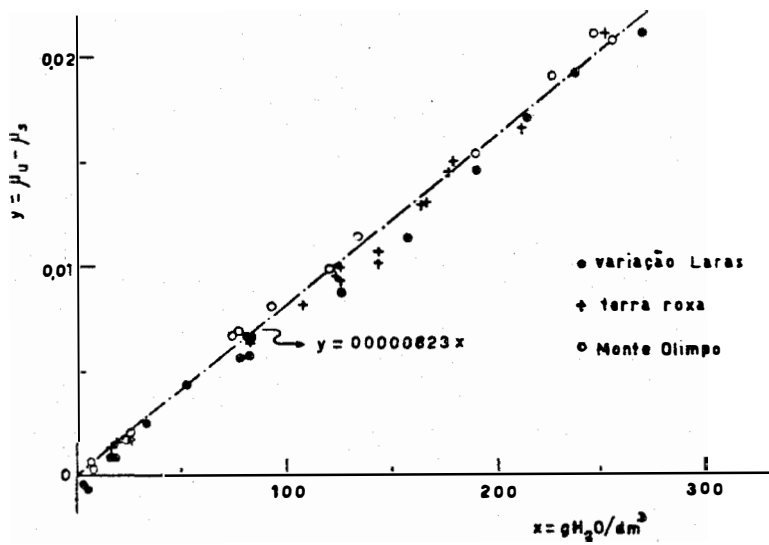


Fig. 10 Variação do coeficiente de absorção linear em função da variação do teor de água do solo.

12

Verificou-se que existe diferença significativa apenas entre o coeficiente angular da equação (XIV) e zero. No presente trabalho, este fato não apresenta grande importância porque seu objetivo principal é o estudo da variação do coeficiente de absorção linear com o teor de água ( $dY/dX$ ), isto é, o coeficiente angular da equação.

Com base nos dados obtidos e sua análise, passou-se a admitir uma única equação de regressão para os três tipos de solo, no que se refere à variação do coeficiente de absorção linear (Y) em função da variação do teor de água no solo (X):

$$Y = 0,0000823 X \dots\dots\dots (XIX)$$

RQ

## 5. APLICAÇÕES DO MÉTODO

### 5.1. VARIAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DE UM PERFIL DE SOLO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE

A fim de demonstrar a versatilidade do método (determinação de densidade aparente de solos) aqui apresentado, foi feito um estudo da variação da densidade aparente de um perfil de Latosol roxo, série Monte Alegre, RANZANI (13), de dimensões 15 x 15 x 90 cm. As determinações foram realizadas com um feixe de radiações gama de  $0,58 \pm 0,01$  MeV sobre o perfil seco ao ar. A figura 11 mostra a montagem completa. Foram realizadas medidas de densidade aparente de 5 em 5 cm de profundidade, a partir da superfície, com 3 repetições.

As densidades aparentes foram determinadas a partir da expressão:

$$d = \frac{\mu}{0,07969}$$

sendo  $\mu$  calculado a partir da equação (X). Os dados obtidos com as respectivas médias acham-se no Quadro VIII.

Na figura 12 são apresentados, grãficamente, os dados obtidos paralelamente com a análise granulométrica do perfil.

R

QUADRO VIIIVARIAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DE UM PERFIL DE SOLO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE

Profundidade	Repetições			Média
	1ª	2ª	3ª	
5	1,372	1,381	1,365	1,373
10	1,339	1,340	1,340	1,340
15	1,397	1,393	1,381	1,390
20	1,394	1,390	1,386	1,390
25	1,374	1,381	1,391	1,382
30	1,215	1,209	1,206	1,210
35	1,216	1,220	1,176	1,204
40	1,221	1,243	1,220	1,228
45	1,279	1,289	1,267	1,278
50	1,327	1,333	1,332	1,331
55	1,399	1,401	1,423	1,408
60	1,338	1,330	1,351	1,340
65	1,446	1,450	1,450	1,449
70	1,504	1,501	1,508	1,504
75	1,539	1,536	1,520	1,532
80	1,353	1,333	1,357	1,348
85	1,310	1,297	1,290	1,299

Profundidade (cm)

Densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>)

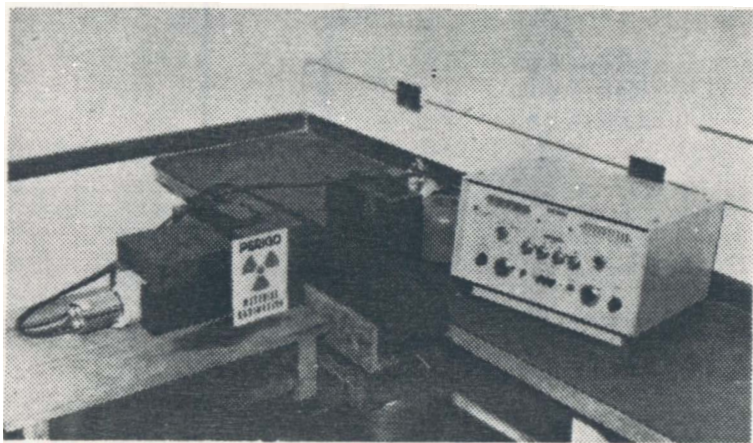


Fig. 11 Aspecto da determinação da densidade aparente de um perfil de solo.

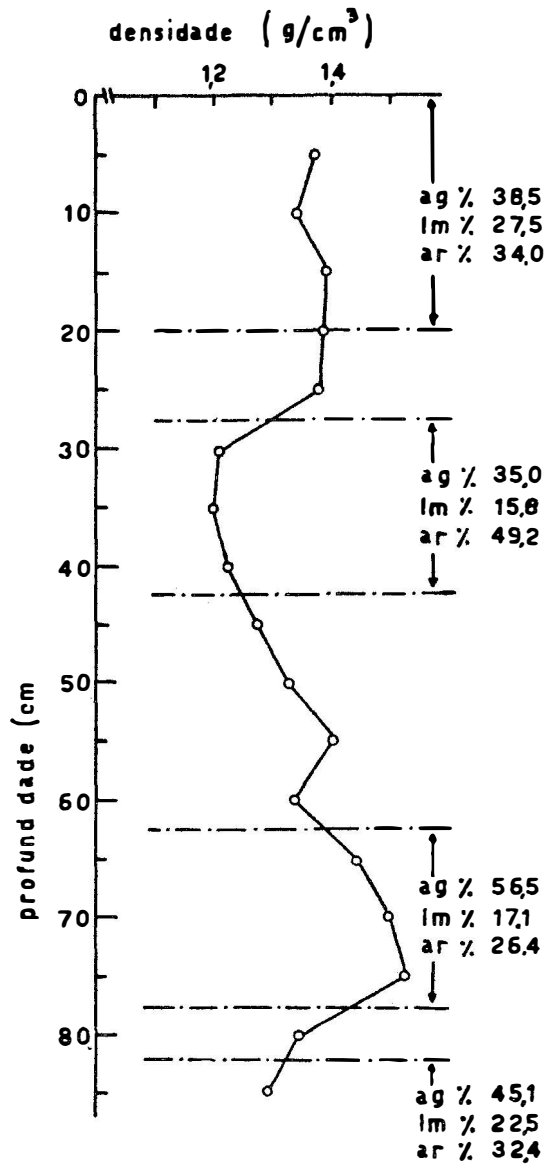


Fig. 12 Variação da densidade aparente de um perfil em função da profundidade. Símbolos utilizados:  
 argila - ag  
 limo - lm  
 areia - ar



KR

## 5.2. ESTUDO DA VARIAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA EM SOLOS

Foi feito o estudo da variação da umidade em uma coluna de solo peneirado por peneira de 2 mm e homogêneo quanto ao teor de água, de 15,5 cm de diâmetro, a qual recebia continuamente 1,2 cal/cm<sup>2</sup>.min, por intermédio de uma lâmpada de infra-vermelho. Verificou-se a variação do coeficiente de absorção linear do solo para radiações gama de 0,58 ± 0,01 MeV em função do tempo de exposição do solo à luz artificial, a três profundidades distintas, a saber: 1,5 ; 3,0 e 4,5 cm, contados da superfície do solo.

A partir dos coeficientes de absorção linear  $\mu_u$  foram determinadas as densidades aparentes  $d_u$  pela aplicação da equação (VIII), tomando o coeficiente de absorção de massa como constante:

$$d_u = \frac{\mu_u}{0,07969}$$

As percentagens de água por peso de solo seco foram determinadas segundo:

$$U\% = \left[ \frac{d_u}{d_s} - 1 \right] \cdot 100 \dots \dots \dots (XX)$$

sendo a densidade aparente do solo seco  $d_s$  determinada também pela utilização da equação (VIII), após a coluna de solo ter sido mantida em estufa a 105°C até peso constante.

Determinaram-se também, as variações do teor de água, em gH<sub>2</sub>O/cm<sup>3</sup>, a partir das variações do coeficiente de absorção linear, pela aplicação da equação (IX). Os dados obtidos encontram-se nos Quadros VIII, IX e X. A fig. 13 representa graficamente estes dados.

RQ

QUADRO IX

VARIAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA EM UMA COLUNA DE SOLO  
A UMA PROFUNDIDADE DE 1,5 CM DA SUPERFÍCIE, EM  
FUNÇÃO DO TEMPO

terra roxa

t	$\mu_u$	$d_u$	U%	U
0	0,09777	1,23	30,9	0,28
1,58	0,09244	1,16	23,4	0,21
3,25	0,08564	1,07	13,8	0,13
4,83	0,08162	1,02	9,0	0,08
6,83	0,08076	1,01	7,4	0,07
8,08	0,07949	1,00	6,4	0,06
9,50	0,07949	1,00	6,4	0,06
10,92	0,07949	1,00	6,4	0,06
22,42	0,07887	0,99	5,3	0,05
27,92	0,07829	0,98	4,3	0,04
33,50	0,07912	0,99	5,3	0,05
35,83	0,07829	0,98	4,3	0,04
46,25	0,07809	0,98	4,3	0,04
---	$\mu_s = 0,07491$	$d_s = 0,94$	0	0

t = tempo em horas

$\mu_u$  = coeficiente de absorção linear do solo (úmido)  
em  $\text{cm}^{-1}$

$d_u$  = densidade aparente do solo (úmido) em  $\text{g/cm}^3$

U% = porcentagem de água por peso de solo sêco

U = teor de água em  $\text{gH}_2\text{O/cm}^3$

Q

QUADRO X

VARIAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA EM UMA COLUNA DE SOLO,  
A UMA PROFUNDIDADE DE 3,0 CM DA SUPERFÍCIE, EM  
FUNÇÃO DO TEMPO

terra roxa

t	$\mu_u$	$d_u$	U%	U
0,17	0,09042	1,13	31,4	0,26
1,83	0,09042	1,13	31,4	0,26
3,42	0,08799	1,10	27,9	0,24
5,00	0,08657	1,09	26,7	0,22
7,00	0,07610	1,08	25,6	0,21
8,34	0,08564	1,07	24,4	0,21
9,75	0,08564	1,07	24,4	0,21
22,67	0,08082	1,01	17,4	0,15
28,17	0,07871	0,99	15,1	0,12
33,75	0,07829	0,98	14,0	0,12
36,17	0,07788	0,97	12,8	0,11
46,59	0,07604	0,95	10,5	0,09
---	$\mu_s = 0,06853$	$d_s = 0,86$	0	0

t = tempo em horas

$\mu_u$  = coeficiente de absorção linear do solo (úmido)  
em  $\text{cm}^{-1}$

$d_u$  = densidade aparente do solo (úmido) em  $\text{g/cm}^3$

U% = porcentagem de água por peso de solo seco

U = teor de água em  $\text{gH}_2\text{O/cm}^3$

K2

QUADRO XI

VARIAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA EM UMA COLUNA DE SOLO  
A UMA PROFUNDIDADE DE 4,5 CM DA SUPERFÍCIE, EM  
FUNÇÃO DO TEMPO

terra roxa

t	$\mu_u$	$d_u$	U%	U
0,42	0,09347	1,17	31,5	0,27
2,09	0,09347	1,17	31,5	0,27
3,67	0,09295	1,17	31,5	0,27
5,26	0,09244	1,16	30,3	0,26
7,09	0,09193	1,15	29,2	0,26
8,44	0,09193	1,15	29,2	0,26
9,84	0,09092	1,14	28,1	0,24
11,27	0,09142	1,14	28,1	0,25
22,77	0,09031	1,13	27,0	0,24
28,27	0,08956	1,12	25,8	0,23
33,84	0,08907	1,11	24,7	0,22
36,27	0,08907	1,11	24,7	0,22
46,77	0,08833	1,10	23,6	0,21
---	$\mu_s = 0,07092$	$d_s = 0,89$	0	0

t = tempo em horas

$\mu_u$  = coeficiente de absorção linear do solo (úmido)  
em  $\text{cm}^{-1}$

$d_u$  = densidade aparente do solo (úmido) em  $\text{g}/\text{cm}^3$

U% = porcentagem de água por pêsco de solo sêco

U = teor de água em  $\text{gH}_2\text{O}/\text{cm}^3$

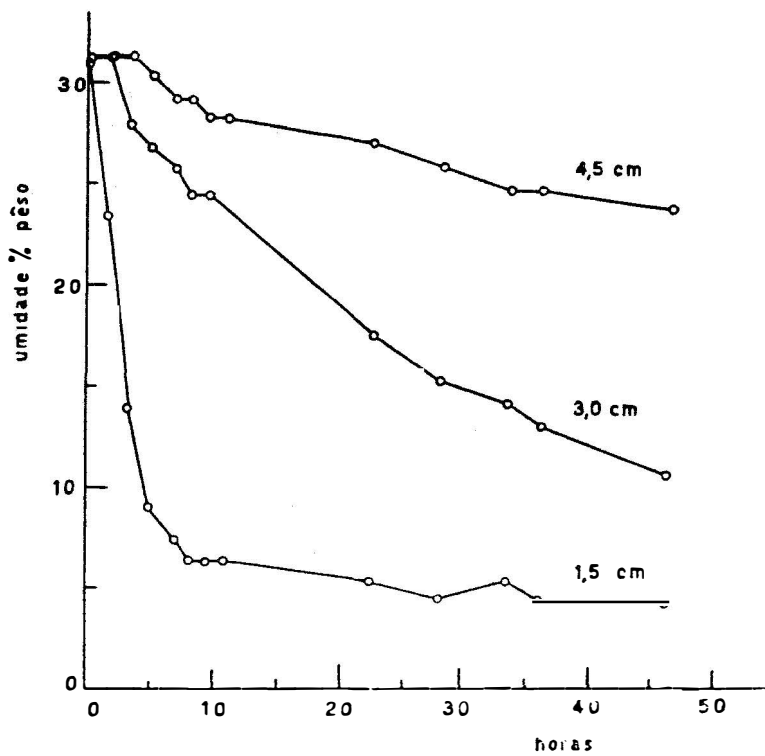


Fig. 13 Variação do teor de água de uma coluna de solo devida à evaporação na superfície.

AR

## 6. CONCLUSÕES

a. Nos estudos do fenômeno da absorção da radiação gama de energia  $0,58 \pm 0,01$  MeV por solos variações Laras, terra roxa e Monte Olimpo pôde-se observar que:

1. O coeficiente de absorção de massa  $\bar{\mu}$  é uma constante independente do tipo de solo e de seu teor de água:

$$\bar{\mu} = 0,07969 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$$
$$s(\bar{\mu}) = 0,00022 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$$

2. O coeficiente de absorção linear  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) pode ser expresso como uma função linear da densidade aparente do solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),

$$\mu = 0,07969 \cdot d$$

3. A variação do coeficiente de absorção linear  $Y$  ( $\text{cm}^{-1}$ ), ocasionada pela variação do teor de água,  $X$  ( $\text{gH}_2\text{O}/\text{dm}^3$ ), retida pelo solo, pode ser expressa pela seguinte equação linear:

$$Y = 0,0000823 X$$

b. Os métodos de determinação de densidade aparente e teor de água do solo, aqui apresentados, possuem a vantagem de não exigir a elaboração de curvas de calibragem, permitindo ainda o estudo da variação daquelas grandezas ao longo de um perfil de solo, sem prejudicar sua

estrutura natural. Outros métodos, baseados no espalhamento da radiação gama pelo solo permitem determinar apenas valores médios de amostras relativamente grandes.

A determinação do teor de água do solo pela absorção da radiação gama parece ser uma técnica promissora para estudos de sua dinâmica em solos.

AR

7. BIBLIOGRAFIA

1. BLATZ, H. Radiation Hygiene Handbook. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, U.S.A., 1959.
2. COMAR, C.L. Atomic energy and agriculture. American Association for the Advancement of Science. Washington, D.C., U.S.A., 1957.
3. CONDON, E.U. e ODISHAW, H. Handbook of Physics. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, U.S.A., 1958.
4. DAVIDSON, J.M. e outros Gamma radiation device aids study of water movement in soil. Calif. Agric. 16(2):8-9; fevereiro 1962.
5. \_\_\_\_\_ Gamma radiation attenuation for measuring bulk density and transient water flow in porous materials. Jour. Geophys. Res. 68(16):4777-4783; agosto to 1963.
6. FERGUSON, H. e GARDNER, W.H. Water content measurement in soil columns by gamma ray absorption. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 26(1):11-14, 1962.
7. \_\_\_\_\_ Diffusion theory applied to water flow data obtained using gamma ray absorption. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 27(3):243-246, 1963.



KR

-33-

8. FRISCH, O.R. The nuclear handbook. Londres, Inglaterra. George Newnes Limited. 1958.
9. GURR, C.G. Use of gamma rays in measuring water content and permeability in unsaturated columns of soils. Soil Sci. 94(4) : 224-229; outubro, 1962.
10. KIRKHAM, D. e RAYMOND, J.K. Isotopes in soil physics research. Advances in Agronomy . Vol. 14:321-357. Academic Press Inc. New York, U.S.A., 1962.
11. LAPP, R.E. e ANDREWS, H.L. Nuclear radiation physics. Prentice-Hall, Inc., New York, USA. segunda edição, 1954.
12. PIMENTEL GOMES, F. Curso de estatística experimental. Publicação da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 2ª edição, 1963.
13. RANZANI, G. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo. Comissão de solos do CNEPA, Rio de Janeiro. Boletim nº 12.
14. \_\_\_\_\_ Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo. Comissão de solos do CNEPA, Rio de Janeiro; em publicação.

RR

-34-

15. SALATI, E. Introdução ao estudo da água do solo pela moderação de neutrons. Tese apresentada para concurso de Livre Docência na Cadeira de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba, São Paulo, Brasil, - 1960.
  
16. SATTERTHWAITTE, F.E. An approximate distribution of estimates of variance components. Biom. Bull., 2:110-114.