

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DETECÇÃO DE RADÔNIO EM SOLOS POR MEIO DA "TÉCNICA DE
DETECTORES DE TRAÇOS NUCLEARES DE ESTADO SÓLIDO"**

Marco Antonio Proença Vieira de Moraes

**Dissertação apresentada ao Instituto de
Pesquisas Energéticas e Nucleares como
parte dos requisitos para obtenção do
Grau de "Mestre na Área de Concentração
em Tecnologia Nuclear".**

Orientador: Dra. Marília T. F. Cesar Khouri

**São Paulo
1982**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DETECÇÃO DE RADÔNIO EM SOLOS POR MEIO DA "TÉCNICA DE
DETECTORES DE TRAÇOS NUCLEARES DE ESTADO SÓLIDO"

Marco Antonio Proença Vieira de Moraes

Dissertação apresenta ao Instituto de
Pesquisas Energéticas e Nucleares como
parte dos requisitos para obtenção do Grau
de "Mestre na Área de Concentração em
Tecnologia Nuclear".



Orientadora: Dra. Marília T. F. Cesar Khouri

SÃO PAULO
1982

ÍNDICE

Pág.

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO I-	INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II-	DETECTORES DE TRAÇOS NUCLEARES DE ESTADO SÓLIDO...:	4
II.1)	INTRODUÇÃO.....	4
II.2)	PRINCÍPIOS GERAIS.....	4
II.3)	ÂNGULO CRÍTICO PARA A FORMAÇÃO DE TRAÇOS.....	6
II.4)	MATERIAIS EM QUE FORMAM TRAÇOS.....	7
II.5)	MECANISMOS DE FORMAÇÃO DE TRAÇOS.....	8
II.6)	FATORES QUE TORNAM ESTES TIPOS DE DETECTORES ÚTEIS.....	9
CAPÍTULO III-	DETECÇÃO DE RADÔNIO.....	11
III.1)	CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	11
III.2)	MÉTODOS DE DETECÇÃO DE RADÔNIO.....	14
III.3)	MECANISMO DE TRANSPORTE.....	16
CAPÍTULO IV-	DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA.....	19
IV.1)	TIPOS DE FILMES.....	19
IV.2)	REVELAÇÃO E CONTAGEM DOS FILMES.....	19
IV.3)	FILME LR-115 NORMAL.....	21
IV.3.1)	DETERMINAÇÃO DO MELHOR TEMPO DE REVELAÇÃO.....	21
IV.3.2)	VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA EM FUNÇÃO DA ENERGIA DA PARTÍCULA ALFA INCIDENTE.....	25
IV.3.3)	CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO DETECTOR.....	28
IV.4)	FILME CA 8015.....	34
IV.4.1)	DETERMINAÇÃO DO MELHOR TEMPO DE REVELAÇÃO.....	34
IV.5)	FILMES LR-115 PELICULADO.....	36
IV.5.1)	DETERMINAÇÃO DO MELHOR TEMPO DE REVELAÇÃO E DAS MELHORES TENSÕES DE CONTAGEM PARA OS FILMES.....	36
IV.6)	COMPARAÇÕES ENTRE OS TRÊS FILMES.....	40
IV.7)	PARÂMETROS DO DETECTOR.....	43
IV.7.1)	ALTURA DOS COPOS.....	43
IV.7.2)	VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE TRAÇOS EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO DOS FILMES NOS DETECTORES.....	44
IV.7.3)	VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE TRAÇOS EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DOS COPOS UTILIZADOS.....	46

IV.8) VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE TRAÇOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO DOS FILMES.....	48
CAPÍTULO V- MEDIDAS EM SOLOS.....	53
V.1) SIMULAÇÕES EM LABORATÓRIO.....	53
V.1.1) MEDIDAS EM CAIXOTES COM AREIA.....	53
V.1.2) VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE TRAÇOS EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DE AREIA UTILIZADA, PARA A DIFUSÃO DO RADÔNIO-220.....	61
V-2) MEDIDAS DE CAMPO.....	62
V.2.1) VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE TRAÇOS EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE NO SOLO EM QUE FORAM COLOCADOS OS DETECTORES.....	62
V.2) REPRODUTIBILIDADE DO MÉTODO.....	64
V.3) VERIFICAÇÃO DOS SINAIS PRODUZIDOS PELO URÂNIO E TÓRIO SUPERFICIAIS.....	68
V.4) MAPEAMENTO DE UMA REGIÃO.....	70
CAPÍTULO VI- CONCLUSÕES.....	77
REFERÊNCIAS.....	79

A meu pai (em memória),
a minha mãe,
meus irmãos,
e a tia Mila.

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui meu sincero agradecimento à Orientadora Dra. Marília Tereza Freitas Cesar Khouri, que muito contribuiu, através de suas sugestões e estímulo, para a elaboração deste trabalho: Muito obrigado.

Agradeço também

ao Dr. Laercio Antonio Vinhas pela atenção e sugestões recebidas;

aos bolsistas Marcos Antonio Ruggieri Franco e Felícia Costa de Barros pelo trabalho dos gráficos;

ao funcionário Gelson T. Otani, pela ajuda na produção dos mapas de curva de nível;

à Thereza Timo Iaria, pelo trabalho de datilografia;

à Área de Radioquímica deste Instituto, pelas análises efetuadas nas amostras;

à NUCLEBRÁS, ao Dr. John M.A. Forman pela oportunidade das medidas na cidade de Caetité (Ba);

ao COURP, ao Dr. Roberto Fulfaro pela possibilidade da realização desta dissertação.

RESUMO

DETECÇÃO DE RADÔNIO EM SOLOS POR MEIO DA "TÉCNICA DE DETECTORES DE TRAÇOS NUCLEARES DE ESTADO SÓLIDO"

MARCO ANTONIO PROENÇA VIEIRA DE MORAES

Desenvolveu-se neste trabalho a técnica de utilização de detectores de traços para a detecção de radônio, por meio do registro dos traços de partículas alfa, e sua aplicação na prospecção de urânio em solos.

Foram utilizados os filmes de nitrato de celulose, sensíveis às partículas alfa, LR-115 tipo 2 peliculado, LR-115 tipo 2 normal e CA8015 fabricados pela Kodak Pathé, sendo que os dois últimos foram usados nas medidas em solos.

Os filmes foram revelados em NaOH(10%) a $(60,0 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$ por 120 minutos, com agitação da solução.

Foi verificada a influência de alguns parâmetros na eficiência do detector.

Algumas simulações foram feitas em laboratório, com caixotes com areia e fontes de U_3O_8 , para observar a migração do radônio.

Medidas de campo foram realizadas para verificar a reprodutibilidade do método e a separação entre os sinais locais e distantes.

O mapeamento da anomalia nº 9 da região de Caetité(Ba) - (Projeto Lagoa Real) foi feito a partir dos resultados obtidos em 50 detectores colocados em uma malha de pontos distantes entre si (80x100) metros. A região apresenta uma mineralização de uraninita disseminada em albita. As densidades de traços de partículas alfa obtidas foram transformadas em mapa de linhas de contorno, pelo programa de computador SYMAP, mostrando as zonas mais prováveis para a localização do minério. Estes resultados foram comparados com os obtidos por cintilador manual.

O método se mostrou simples e efetivo para auxiliar a exploração de minério de urânio subterrâneo e em algumas circunstâncias mais indicado do que a cintilometria.

ABSTRACT

RADON DETECTION IN SOILS BY SOLID STATE NUCLEAR TRACK DETECTORS TECHNIQUE.

MARCO ANTONIO PROENÇA VIEIRA DE MORAES

The Solid State Nuclear Track Detectors Technique was developed to be used in radon detection, by alpha particles tracks, and its application in uranium prospecting on the ground.

The sensitive films to alpha particles used are the cellulose nitrate films LR-115 type 2 strippable, LR-115 type 2 normal and CA8015, produced by Kodak Pathé; the last two films were used in soils radon concentrations measurements.

The films were etched in NaOH(10%) at $(60.0 \pm 0.5)^{\circ}\text{C}$ for 120 minutes with stirring of the solution.

Several simulation experiments were carried out in laboratory with samples of U_3O_8 buried in sand, to observe the effect of radon migration. Field measurements were made to verify the reproducibility of the method and to separate local and long-distance signals.

A map of the anomalous number 9 in Caetité City region (Projeto Lagoa Real) (Ba) was made with the results obtained in 50 detectors placed in a grid pattern spacing (80x100) meters. In this region, there is a mineralization of uraninite in albite.

The densities of alpha particles tracks obtained were then used as input data to a computer code SYMAP which gives the results as a map of contour lines showing the most promising places for or localization. The results obtained were compared with scintillation counter measurements made in the same area.

The alpha track method is a simple and effective auxiliary technique for the prospection of deeply buried uranium ore bodies and in some cases it is more suitable than scintillometry.

CAPÍTULO I

I. INTRODUÇÃO

O radônio, elemento de símbolo químico Rn e número atômico 86 é um gás inerte constituído por três isótopos principais: o radônio-222 propriamente conhecido como radônio, descoberto em 1900, que tem sua origem na cadeia natural do urânio-238; o radônio 220 também conhecido como torônio, descoberto em 1899, originado na cadeia natural do Tório-232 e o radônio-219 proveniente da cadeia do Urânio-235. São os únicos elementos gasosos radioativos destas cadeias e decaem por meio da emissão de partículas alfa^(23,32).

A importância da detecção destes gases pode ser relacionada à três aplicações distintas:

- 1) As concentrações anormais destes gases, na superfície terrestre, podem ser um forte indício de mineralizações de urânio e/ou tório nas imediações^(9,10,17,22,24,34);
- 2) Concentrações destes gases no ar, dentro de galerias de minas de urânio e/ou tório, devem ser muito bem monitoradas, já que existe uma grande probabilidade da grande taxa de câncer nos pulmões entre os trabalhadores destas minas ser causada pela inalação do radônio e principalmente dos seus filhos⁽¹¹⁾;
- 3) A variação significativa e repentina da concentração destes gases na superfície pode ser utilizada para prever terremotos, já que as mudanças internas da crosta, precedentes a um terremoto, podem liberar quantidades anormais destes gases para a superfície⁽²⁵⁾.

A possibilidade de utilização do radônio como um indicador na prospecção de urânio foi sugerida pela primeira vez em 1927 por Behounek, quando estudava depósitos uraníferos na Tchecoslováquia⁽²⁷⁾.

Nas últimas três décadas intensificaram-se as pesquisas neste setor pois a necessidade de urânio tornou-se cada vez maior, e a utilização de técnicas de detecção de radiação gama para a exploração de depósitos profundos tornou-se cada vez mais cara.

De um modo geral, as primeiras explorações de urânio foram concentradas em depósitos superficiais ou próximos à superfície, onde os métodos de medidas radiométricas puderam ser utilizados aproveitando a radioatividade natural associada ao urânio.

Os contadores Geiger e os cintiladores usualmente utilizados não detectam a radioatividade do urânio diretamente, mas são sensíveis à radiação gama provenientes dos filhos, principalmente do Bismuto-214, que está presente em todas as rochas e solos que contêm urânio⁽¹⁾. Estes instrumentos devem ser utilizados próximos à fonte de radiação, pois a medida pode ser insatisfatória devido a atenuação da radiação pelo material que cobre o depósito. Bastam cerca de 0,75m de solo seco, 1,00m de água ou 30-40cm de granito para atenuar significativamente a radiação gama impedindo assim a utilização, por exemplo, de cintilômetros portáteis de maneira eficiente⁽⁷⁾.

Para a prospecção de minérios a grandes profundidades com instrumentos sensíveis à radiação gama é necessário que se abra um furo exploratório até uma profundidade tal que o detector fique perto do minério. Assim, nota-se o porque da utilização desta técnica em prospecções de mineralizações mais profundas ter se tornado bastante cara.

O urânio tem na sua série diversos produtos radioativos emissores alfa, que não são detectados por instrumentos gama-sensíveis e um destes produtos é o gás radônio. Uma pequena fração de radônio está sendo constantemente liberada para a superfície, podendo migrar através dos solos e rochas, provenientes de grandes profundidades e então ser detectado com o equipamento próprio.

Durante as duas últimas décadas um novo tipo de detectores chamados de detectores de traços nucleares de estado sólido (SSNTD) têm sido desenvolvidos para a detecção de partículas carregadas. Esses detectores são materiais sólidos isolantes como vidro, cristais e plásticos. As partículas carregadas, ao atravessarem estes materiais deixam as suas trajetórias marcadas sob a forma de traços, que são estáveis e que após serem submetidos a um ataque químico especial podem se tornar visíveis em microscópios ópticos. Alguns destes plásticos são sensíveis às partículas alfa e podem, portanto, ser utilizados para a detecção do radônio⁽¹⁵⁾.

A utilização desta técnica pode indicar com grande probabilidade de acerto a localização de mineralizações de urânio até

50m de profundidade, e alguns resultados já obtidos^(12,18), indicaram a localização de mineralizações a aproximadamente 100m de profundidade, sendo que nestes casos ocorreram condições favoráveis no solo, para isto.

A facilidade da utilização desta técnica, associada com o relativo baixo custo da mesma e as possibilidades que ela pode oferecer, estimulam maiores atenções na sua pesquisa.

O objetivo deste trabalho é a otimização da técnica dos detectores de traços para aplicação na detecção de radônio, por meio da sua emissão alfa, visando a localização de mineralizações, de urânio.

CAPÍTULO II

II. DETECTORES DE TRAÇOS NUCLEARES DE ESTADO SÓLIDO

II.1) INTRODUÇÃO

O início da "era" destes detectores ocorreu em 1958, com a publicação dos primeiros resultados de traços nucleares em sólidos feita por Young, onde descreveu traços de fragmentos de fissão em fluoreto de lítio, e, em 1959, com a publicação de micrografias de traços de fragmentos de fissão do Urânio-235 em mica, obtidas num microscópio eletrônico de transmissão⁽¹⁵⁾.

Devido a facilidade de manuseio e do seu baixo custo, esta nova técnica provocou grande interesse na pesquisa fundamental em busca de novos tipos destes detectores e nas suas aplicações nos diversos campos da ciência e tecnologia.

As aplicações são as mais diversas, podendo-se citar estudos de Física Nuclear, principalmente de fissão; radiografias por alfas, nêutrons e partículas carregadas; raios cósmicos e astrofísica; porosidade e microfiltros; dosimetria alfa e de nêutrons; prospecção de urânio e medidas de emissão de radônio; monitoração e proteção radiológica; radiobiologia e medicina nuclear^(10,15).

II.2) PRINCÍPIOS GERAIS⁽⁸⁾

As partículas carregadas ionizantes quando atravessam a matéria perdem sua energia ao longo de suas trajetórias. Em alguns tipos de materiais esta energia cedida cria um cilindro submicroscópico de moléculas danificadas com raio da ordem de 50 a 100Å. A esta região é dado o nome de traço latente, composta de radicais livres ou cadeias de polímeros quebradas no caso dos plásticos, que é invisível em microscópios ópticos.

Se estes materiais forem sujeitos a um ataque químico apropriado, o traço latente pode ser ampliado para a ordem do comprimento de onda da luz visível e portanto ser visualizado num microscópio óptico como um traço, com a forma aproximada de um ci

lindro ou cone com comprimentos entre 1 e 30 mícrons, isto porque a região danificada é atacada preferencialmente e mais rapidamente que as outras regiões do material.

Pode-se então definir duas velocidades de ataque do reagente químico:

V_M = velocidade de ataque na região não danificada pela passagem da radiação.

V_T = velocidade de ataque na região dos traços.

Normalmente V_M é considerada constante durante o processo de revelação, enquanto que V_T depende fortemente da energia depositada pela partícula incidente.

Supondo uma situação em que V_T seja também constante, pode-se visualizar a formação de um traço de forma cônica, provocado pela passagem de uma partícula ionizante, aplicando-se o princípio de Huygens, conforme figura II.2.

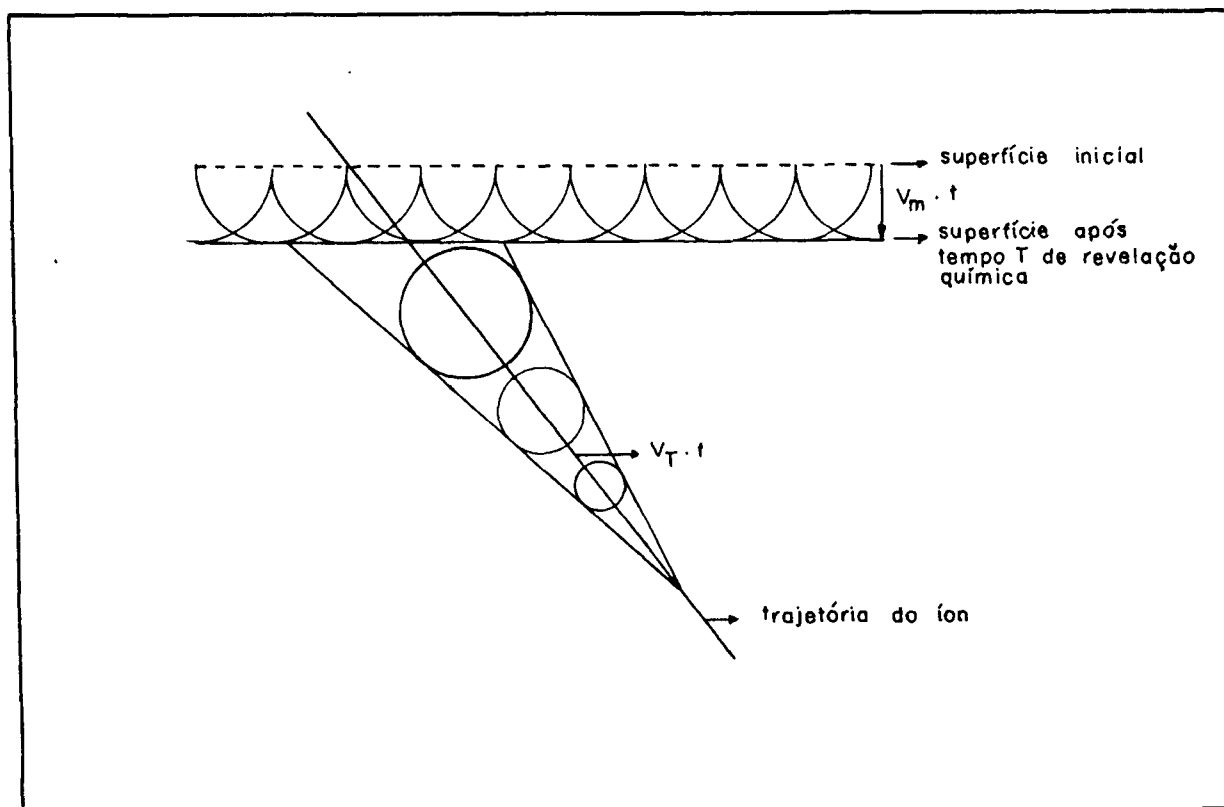


Figura II.2- A figura mostra a formação de um traço cônico devido à passagem de uma partícula carregada, após a revelação química, aplicando o princípio de Huygens, considerando V_M e V_T constantes.

A velocidade de ataque V_M age em todas as direções em cada ponto da superfície, removendo após um tempo t uma superfície igual a $V_M t$ (esferas elementares de raio $V_M t$). O mesmo raciocínio pode ser aplicado na trajetória do íon. O processo de ataque no traço não pode iniciar-se antes que a solução tenha alcançado um dado ponto ao longo do traço. Isto significa que após $1/5$ do tempo de revelação total a extremidade do cone está a uma distância $(1/5)t$ da superfície. Neste ponto o material poderá somente ser revelado durante o tempo subsequente $(4/5)t$ e será removido numa esfera de raio $(4/5)t$.

A forma geométrica dos traços é governada pela resposta do detector à energia do íon depositada no traço latente, sendo função das duas velocidades de ataque. Por meio da forma geométrica dos traços pode-se, sob condições favoráveis, deduzir a velocidade (energia), carga e massa das partículas que o produziram.

II.3) ÂNGULO CRÍTICO PARA A FORMAÇÃO DE TRAÇOS

Considerando ainda V_T e V_M constantes, somente poderão ser visualizados os traços de partículas que penetrarem no material com um ângulo $\phi > \phi_{crit}$ (figura II.3). definido por⁽⁸⁾:

$$\phi_{crit} = \text{arc sen } \frac{V_M t}{V_T t}$$

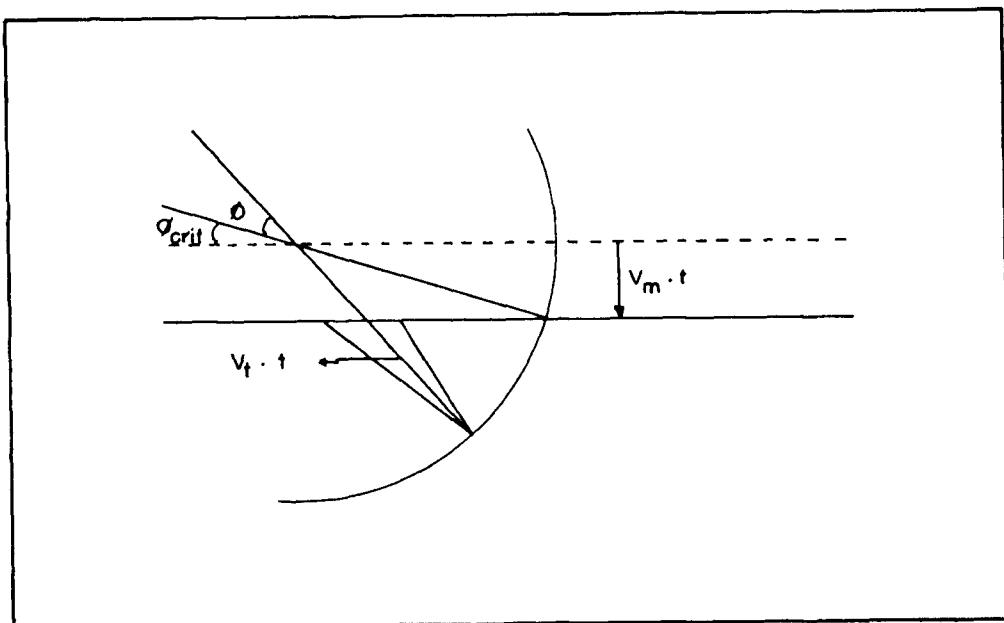


Figura II.3- A figura mostra a existência de um ângulo crítico ϕ_{cr} para a incidência das partículas, abaixo do qual todos os traços são perdidos durante o processo de revelação química. O traço com comprimento $V_T t$ somente será visualizado se a partícula incidir com $\phi > \phi_{crit}$.

Para uma irradiação isotrópica externa, na qual as partículas incidentes possam alcançar a superfície do detector com probabilidades iguais em qualquer elemento de ângulo sólido, dentro de 2π radianos (geometria de irradiação 2π), pode-se definir uma eficiência de detecção da forma $\epsilon = 1 - \text{sen}\phi_{\text{crit}}$ ^(4,15) pois a fração do ângulo sólido na qual traços não são observados é:

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{\phi_{\text{crit}}} 2\pi \cos\phi \, d\phi = \text{sen}\phi_{\text{crit}}$$

Uma outra maneira de representar esta eficiência pode ser feita através da relação:

$$\epsilon = \frac{\text{n}^\circ \text{ de traços revelados}}{\text{n}^\circ \text{ de partículas incidentes}}$$

II.4) MATERIAIS EM QUE SE FORMAM TRAÇOS

De uma maneira geral pode-se dividir os detectores em duas classes, de acordo com os materiais que os compõem:

Orgânicos- formados pelos polímeros, entre eles os polícarbonatos, os acetatos e os nitratos de celulose.

Inorgânicos- representados pelos cristais como a mica, o quartzo e pelos vidros como a sílica e o vidro comum.

Ocorre a formação de traços em materiais isolantes, em alguns semicondutores, mas não em metais e em outros bons condutores elétricos, conforme a tabela II.4.

Inicialmente, a formação dos traços foi atribuída aos deslocamentos dos átomos por colisões diretas entre as partículas incidentes e os átomos do material detector. De fato, estas interações podem ocorrer, porém não é o mecanismo responsável pela formação dos traços, se não, esperar-se-ia que traços se formassem em qualquer material sólido, isolante ou condutor. Assim, a resistividade pode ser utilizada para diferenciar os materiais capazes de registrar traços.

Tabela II.4- Relação Entre a Formação de Traços e a Resistividade Elétrica ⁽¹⁵⁾.

MATERIAIS QUE FORMAM TRAÇOS	RESISTIVIDADE ($\Omega \cdot \text{cm}$)
Isolantes: Minerais Silicatos Vidros Polímeros Haletos Alcalinos Semicondutores: Vidros (V_2O_5)	10^6 - 10^{20} $2 \cdot 10^3$ - $2 \cdot 10^4$
MATERIAIS QUE NÃO FORMAM TRAÇOS	
Semicondutores: Germânio Silício Metais: Alumínio Cobre Ouro	10 - $2 \cdot 10^3$ 10^{-6} - 10^{-4}

II.5) MECANISMOS DE FORMAÇÃO DE TRAÇOS

Quando um átomo rápido penetra num material, ele se torna um íon perdendo alguns ou todos os seus elétrons orbitais. Devido a forças elétricas entre o íon e os elétrons dos átomos do material podem ocorrer dois processos:

- a) excitação dos elétrons a níveis de energias mais altos;
- b) expulsão dos elétrons dos átomos pelo processo de ionização.

Nos polímeros o processo de desexcitação pode provocar a quebra das cadeias e produzir radicais livres. Nos sólidos inorgânicos a ionização cria centros de carga ⁽¹⁵⁾.

Os elétrons expulsos dos átomos, chamados de raios delta podem produzir mais excitação e ionização no material. A ionização primária ocorre junto a trajetória do íon enquanto que a secundária é espalhada a distâncias radiais maiores ⁽¹⁵⁾.

Acredita-se que, nos sólidos inorgânicos, a contribuição dos raios delta secundários possa ser desprezada enquanto que para

os plásticos orgânicos, esta contribuição é de principal importância para a formação dos traços⁽¹⁵⁾.

Existem diversas teorias, com bastante semelhança entre si, que explicam a formação de traços nestes tipos de detectores. Especificamente para os plásticos, uma das teorias mais usadas, a da perda da energia restrita (REL) (Benton-1967), sugere que os raios delta secundários, de energias moderadamente baixas, correspondentes a uma fração restrita da energia total perdida pelo íon, são os responsáveis pela formação dos traços⁽⁸⁾.

II.6) FATORES QUE TORNAM ESTES TIPOS DE DETECTORES ÚTEIS

De um modo geral, pode-se relacionar alguns dos fatores principais que tornam este tipo de detectores úteis:

- os traços podem ser mantidos estáveis sob condições ambientais extremas, suportando temperaturas até a ordem de 140°C, umidade, vibrações mecânicas;
- baixo custo;
- facilidade do manuseio e simplicidade da técnica de contagem dos mesmos;
- possuem uma alta sensibilidade;
- existência de detectores com diferentes sensibilidades, sendo capazes de discriminar várias partículas de acordo com o seu diferente grau de ionização. A figura II.6 mostra estas sensibilidades para diversos detectores, relacionando a ionização primária causada em função da velocidade de diversas partículas carregadas. Cada material detector possui um limite abaixo do qual nenhum traço é revelado e um limite acima no qual todas as partículas criam traços.

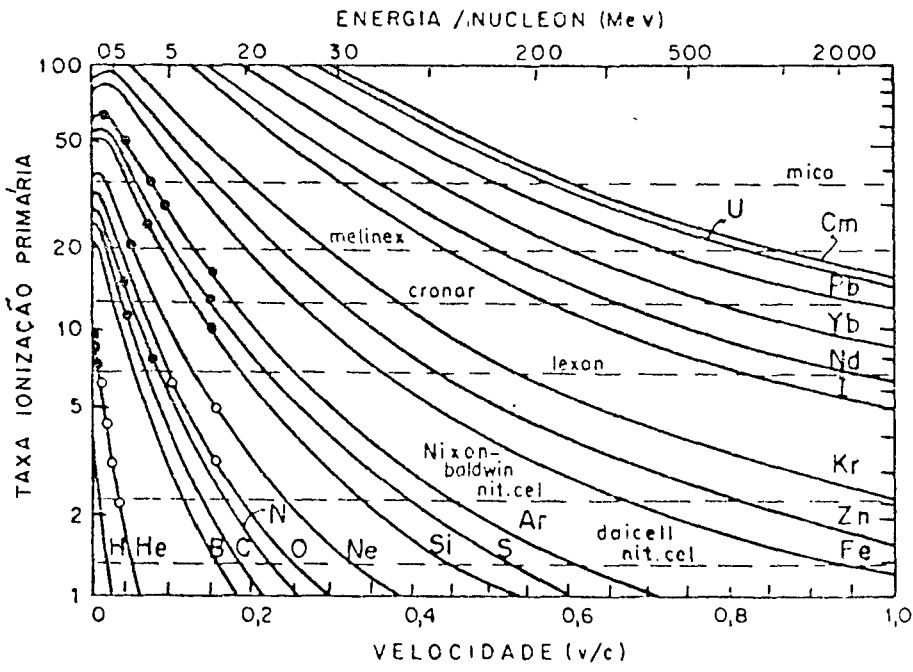


Figura II.6- Relação entre a velocidade e a ionização primária causada por diversos íons em diferentes detectores. Cada um destes detectores apresenta limiares de detecção, abaixo dos quais não ocorre a formação de traços.

CAPÍTULO III

III. DETECÇÃO DE RADÔNIO

III.1) CARACTERÍSTICAS GERAIS

O radônio é um gás radioativo e que portanto, pode ser medido em baixas concentrações, até a ordem de 1 a 2 átomos em 10^{20} moléculas de gás⁽¹²⁾. Fazendo-se uma média global, excluindo áreas com mineralizações de urânio conhecidas, com lavas ou gelo, estima-se que o fluxo de radônio em solos é $0,75 \text{ átomos/cm}^2 \cdot \text{s}$ ⁽⁶⁾.

Os isótopos deste gás estão sendo sempre formados a partir do seu "pai", o rádio, nas três séries radioativas naturais (tabela III.1.1)⁽²¹⁾.

O radônio pode migrar através de fraturas e poros em rochas consolidadas, ser carregado dissolvido em águas subterrâneas ou se difundir no ar através de solo aberto e ser liberado na atmosfera, dependendo da concentração do gás e da distância que ele percorre, que por sua vez são funções do teor do minério de urânio, tipo de mineralização e porosidade da cobertura.

Considerando o processo de difusão, o caminho livre médio dos isótopos(λ), definido como a distância percorrida pelos mesmos durante suas respectivas vidas médias e que pode ser interpretado como a distância percorrida, de modo que a concentração inicial do gás seja diminuída por um fator de $1/e$, é função dos seus coeficientes de difusão nos solos(D) e das suas vidas médias (τ) por meio da relação: $\lambda = \sqrt{D \cdot \tau}$. Valores típicos para λ são apresentados para os três isótopos em diferentes meios na tabela III.1.2⁽¹³⁻³⁵⁾

Devido à sua relativa pequena vida média e devido, principalmente, à pequena porcentagem isotópica do Urânio-235(0,7%) relativamente ao Urânio-238, pode-se desprezar a contribuição do Radônio-219 detectada nos solos. A sua atividade é apenas 4,6% relativa a do Radônio-222⁽¹³⁾.

Por meio de processos de transporte, sinais originados a maiores profundidades, comparando com os valores de λ , podem ser carregados através do solo e chegar até a superfície.

Tabela III.1.1

NUCLÍDIO	TIPO DE DESINTEGRAÇÃO	MEIA-VIDA	CONSTANTE DE INTEGRAÇÃO (s ⁻¹)	ENERGIA DA PARTÍCULA (MeV)
92 ^U -238	α	4.50 x 10 ⁹ a	4.88 x 10 ⁻¹⁸	4.20
90 Th -234	β	24.1 d	3.33 x 10 ⁻⁷	0.20
91 ^{Pa} -234	β	1.18 m	9.77 x 10 ⁻³	2.32
91 ^{Pa} -234	β	6.7 h	2.88 x 10 ⁻⁵	1.2
92 ^U -234	α	2.50 x 10 ⁵ a	6.80 x 10 ⁻¹⁴	4.763
90 Th -230	α	8.0 x 10 ⁴ a	2.75 x 10 ⁻³	4.68 m
88 ^{Ra} -226	α	1620 a	1.36 x 10 ⁻¹¹	4.777 m
86 ^{Rn} -222	α	3.82 d	2.10 x 10 ⁻⁶	5.486
84 ^{Po} -218	α	3.05 m	3.78 x 10 ⁻³	α: 5.998; β: 1
82 ^{Pb} -214	β	26.8 m	4.31 x 10 ⁻⁴	0.7
85 ^{At} -218	α	1.5 - 2.0 m	0.4	6.63
83 ^{Bi} -214	α, β	19.7 m	5.86 x 10 ⁻⁴	α: 5.51 m; β: 13.17
84 ^{Po} -214	α	1.64 x 10 ⁻⁴ s	4.23 x 10 ³	7.680
81 ^{Tl} -210	β	1.32 m	8.75 x 10 ⁻⁴	1.9
82 ^{Pb} -210	β	22 a	1.00 x 10 ⁻⁹	0.018
83 ^{Bi} -210	β	5.0 d	1.60 x 10 ⁻⁶	1.17
84 ^{Po} -210	α	138.3 d	5.80 x 10 ⁻⁸	5.300
81 ^{Tl} -206	β	4.2 m	2.75 x 10 ⁻³	1.31
82 ^{Pb} -206	estável			
90 Th -232	α	1.39 x 10 ¹⁰ a	1.58 x 10 ⁻¹⁸	3.98
88 ^{Ra} -228	β	6.7 a	3.28 x 10 ⁻⁹	0.04
86 ^{Ac} -228	β	6.13 h	3.14 x 10 ⁻⁵	2.14
90 Th -228	α	1.90 a	1.16 x 10 ⁻⁸	5.423 m
88 ^{Ra} -224	α	3.64 d	2.20 x 10 ⁻⁶	5.681 m
86 ^{Ac} -220	α	54.5 s	1.27 x 10 ⁻²	6.282
84 ^{Po} -216	α, β	0.16 s	4.33	6.774
82 ^{Pb} -212	β	10.5 h	1.82 x 10 ⁻⁵	0.58
85 ^{At} -216	α	3 x 10 ⁻⁴ s	2.3 x 10 ³	7.79
84 ^{Po} -212	α, β	47 m	2.46 x 10 ⁻⁴	α: 6.046 m; β: 2.25
81 ^{Tl} -208	α	3.0 x 10 ⁻⁷ s	2.31 x 10 ⁶	8.776
82 ^{Pb} -208	β	2.1 m	3.73 x 10 ⁻³	1.79
82 ^{Pb} -208	estável			
92 ^U -235	α	7.10 x 10 ⁸ a	3.09 x 10 ⁻¹⁷	4.58 m
90 Th -231	β	24.6 h	7.82 x 10 ⁻⁴	0.30
91 ^{Pa} -231	α	3.43 x 10 ⁴ a	6.40 x 10 ⁻¹³	5.042 m
89 ^{Ac} -227	α, β	22.0 a	1.00 x 10 ⁻⁹	α: 4.94; β: 10.04
90 Th -227	α	18.6 d	4.31 x 10 ⁻⁷	6.05 m
87 ^{Fa} -223	β	21 m	3.50 x 10 ⁻⁴	1.2
86 ^{Ac} -223	α	11.2 d	7.16 x 10 ⁻⁷	5.75 m
86 ^{Rn} -219	α	3.93 s	0.177	6.824 m
84 ^{Po} -215	α, β	1.83 x 10 ⁻³ s	3.79 x 10 ⁷	α: 7.365
82 ^{Pb} -211	β	36.1 m	3.20 x 10 ⁻⁴	1.39
85 ^{At} -215	α	10 ⁻⁴ s	7 x 10 ³	8.00
83 ^{Bi} -211	α, β	2.16 m	5.23 x 10 ⁻³	α: 6.621 m
84 ^{Po} -211	α	0.52 s	1.33	7.434 m
81 ^{Tl} -207	β	4.79 m	2.41 x 10 ⁻³	1.64
82 ^{Pb} -207	estável			

SÉRIE DO URÂNIO-238

SÉRIE DO TÓRIO-232

SÉRIE DO URÂNIO-235

Tabela III.1.2-Caminho Livre Médio e Coeficiente de Difusão dos Isótopos do Radônio em Diferentes Meios

MEIO	λ (cm)			D (cm ² /S) *
	²²² Rn	²²⁰ Rn	²¹⁹ Rn	
Ar	220	2,85	0,75	10 ⁻¹
Solo Poroso	155	2,00	0,53	5.10 ⁻²
Água	2,2	0,03	0,008	10 ⁻⁵
Solo Poroso Saturado	1,55	0,02	5,3.10 ⁻³	5.10 ⁻⁶
Vida Média	5,5 d	80 s	5,7 s	

* D - considerada constante

Considerando o modelo unidimensional de Grammakov (1936), a relação entre a concentração inicial de radônio C_0 e a concentração C_z após ter percorrido uma distância Z , pode ser expressa em termos do coeficiente de difusão D , da constante de decaimento λ e da velocidade de transporte v do gás por meio da fórmula⁽¹³⁾:

$$C_z = C_0 \exp^{-Z} \left[\left(\left(\frac{v^2}{4D^2} \right) + \lambda/D \right)^{1/2} - v/2D \right]$$

Observa-se que quanto mais distante da superfície se encontra a fonte, maior deve ser a sua atividade, ou maior deve ser a velocidade de transporte do radônio, para que o mesmo possa ser detectado na superfície.

A figura III.1 relaciona a velocidade mínima de transporte do radônio em função da distância Z percorrida pelo mesmo, para diversos valores da razão de redução na concentração C_z/C_0 .

Por exemplo, para que o radônio seja transportado a uma distância de 100m e tenha sua concentração inicial diminuída por um fator de 1000 é necessário uma velocidade de transporte de pelo menos 3.10^{-3} cm/s.

Considera-se que sob esta velocidade de transporte uma mineralização de 1%, localizada a 100m de profundidade produz um si

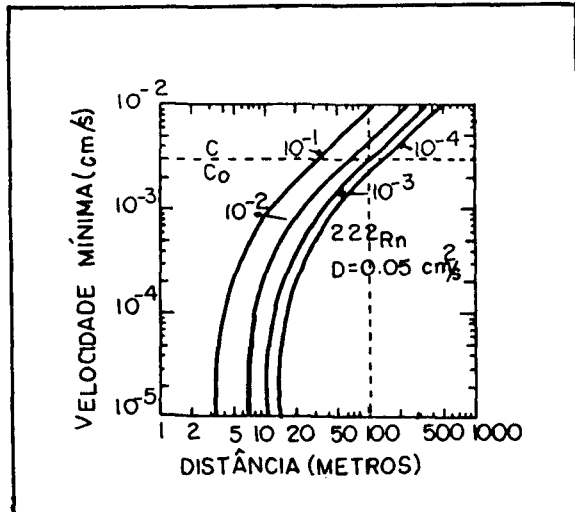


Figura III.1- Velocidade mínima de transporte para o radônio em função da distância Z percorrida pelo mesmo para diversos valores da razão de redução C_z/C_0 .

nal superficial três vezes maior que o valor de "background" do solo produzido pelo valor médio de 3ppm de urânio⁽¹³⁾.

Os parâmetros envolvidos nos mecanismos de difusão e/ou transporte são funções da pressão, temperatura, umidade, etc. Assim, é de se esperar que condições climáticas possam influir significativamente nos dois processos. Estudos relativos à pressão atmosférica indicam que variações de 1-2% podem ser responsáveis por variações no fluxo de Radônio-222 de 20-60%⁽⁶⁾.

III.2) MÉTODOS DE DETECCÃO DE RADÔNIO

O decaimento do radônio ocorre por meio da emissão de partículas alfa com energias iniciais de 5,49 MeV (Rn-222) e 6,28 MeV (Rn-220). Diversos métodos podem ser aplicados para a detecção de partículas alfa. Estes métodos aproveitam as propriedades de alguns materiais, que ao serem atravessados por partículas alfa emitem luz ou pulsos elétricos⁽³²⁾:

Uma das primeiras técnicas de detecção de radônio utilizou os "sniffers" ou emanômetros. A técnica consiste em se obter um pequeno volume do gás do solo por meio de um bombeamento no local. O gás é coletado em recipientes cobertos com uma camada de sulfeto de zinco ativado com prata que ao ser atingido por partículas alfa emite luz. Associado a este recipiente está um sistema de contagem que irá relacionar a quantidade de luz emitida com a concentração de radônio local⁽²⁾. Resultados obtidos por este método tem mostrado uma pobre reprodutibilidade, podendo indicar variações da ordem de 100 vezes nas concentrações do gás em medidas diárias^(3,27).

Em 1972, Alter e Price sugeriram a utilização dos detectores de traços de estado sólido para a detecção de radônio em solos

A idéia do método, que foi utilizada no decorrer de todo este trabalho, consiste em se colocar os filmes detectores em copos invertidos, acomodados em buracos feitos na superfície terrestre. O radônio migra de sua origem através do solo, acumula-se dentro do volume dos copos e ao decair impressiona os filmes, conforme mostra a figura III.2.

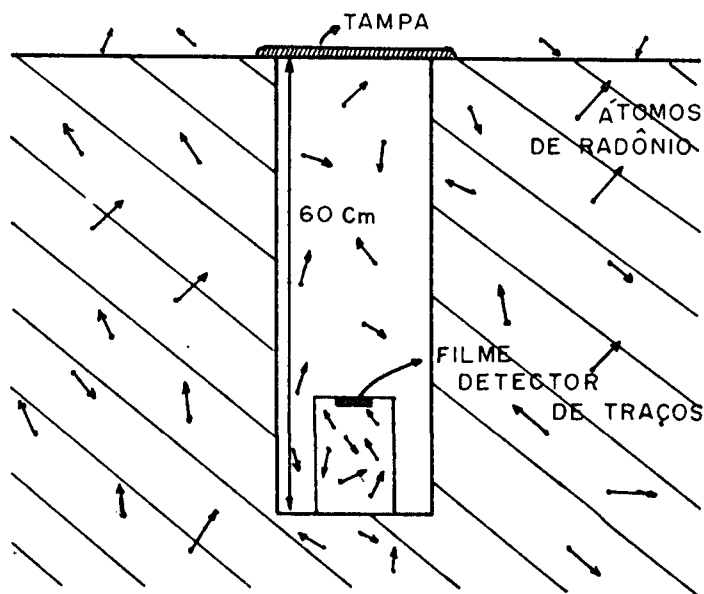


FIG III - 2

Figura III.2- Método de detecção de radônio em solos por meio dos detectores de traços de estado sólido. Os detectores são colocados em buracos feitos na superfície, permanecendo em exposição por algumas semanas. O radônio migra através dos solos, entra nos detectores e ao decair, impressiona os filmes.

A escolha da altura dos copos é importante para se ter certeza de que as partículas alfa que impressionam os filmes são provenientes somente do radônio e filhos. Para isto escolhem-se copos com alturas maiores que o maior alcance no ar das partículas alfa dos elementos das cadeias.

A profundidade dos buracos é de aproximadamente 60cm com a finalidade de se obter medidas da concentração de radônio longe da superfície onde as variações climáticas são mais pronunciadas, minimizando portanto estes efeitos. Após a colocação dos detectores (composto pelo copo com o filme), os buracos são tampados e marcados para uma posterior identificação.

O tempo de permanência dos detectores é da ordem de algumas semanas, permitindo assim, uma melhor avaliação a respeito da concentração local do gás, por meio de dados estatisticamente mais dignos de confiança, principalmente em áreas de baixo fluxo de radônio⁽¹³⁾. Após este tempo de exposição os detectores são retirados, revelados e contados. Supõe-se que a densidade de traços (traços/unidade de área) contida neles seja proporcional à concentração do gás no local.

III.3) MECANISMO DE TRANSPORTE ^(14,28)

Dentre os vários modelos sugeridos para o transporte de radônio, processo este capaz de indicar anomalias até aproximadamente 100m de profundidade, um dos mais promissores é o que considera o fluxo de fluídos causado pela elasticidade induzida tanto na água como no ar pelo gradiente geotérmico dT/dZ , com T representando temperatura e Z a profundidade, capaz portanto de carregar células convectivas dentro da terra.

A convecção poderá ocorrer num meio poroso se a seguinte condição for satisfeita:

$$Kgh^2 \left(\frac{dT}{dZ}\right)_{liq} \frac{d\rho}{dT} > 4\pi^2 D'\eta \quad \text{com}$$

- K - permeabilidade hidráulica
- g - aceleração da gravidade
- h - dimensão vertical da região convectiva
- $\frac{d\rho}{dT}$ - variação da densidade do fluído com a temperatura
- D' - difusividade térmica do meio preenchido com o fluído
- η - viscosidade do fluído
- $\left(\frac{dT}{dZ}\right)_{liq}$ - é o excesso de $\frac{dT}{dZ}$ sobre o valor adiabático.

O modelo prevê a convecção tanto para a água como para o ar, de uma profundidade de $h = 100\text{m}$, para um meio com $K > 3 \cdot 10^{-7} \text{cm}^2$ que corresponde a areia. Para profundidades de $h = 300\text{m}$ ocorreria a convecção para meios com $K > 3 \cdot 10^{-8} \text{cm}^2$ representados por areia, e arenitos de grande permeabilidade, considerando $(dT/dZ)_{\text{liq}} = 30^\circ\text{C/k}$

Para o caso do radônio, uma segunda condição que deve ser satisfeita é que o tempo para o fluido se movimentar através da distância vertical d , não deve ser muitas vezes maior que a vida média do gás. Esta distância d pode ser entendida como a fração do valor de h a partir da qual o radônio será transportado.

O tempo de circulação pode ser expresso aproximadamente por:

$$\frac{nd}{Kgh(d\rho/dZ)}$$

Considerando um meio com $K = 2 \cdot 10^{-6} \text{cm}^2$ que corresponde a areia solta, o tempo de circulação para que o radônio possa ser transportado por 100m é de ~ 20 dias, tanto na água como no ar, valor este suficiente para que 3% da sua concentração inicial chegue à superfície de modo a contrastar com o valor de "background" local.

Assim, este modelo consegue prever que somente sob condições especiais o transporte de radônio de longas distâncias pode ser provocado pela convecção de fluidos subterrâneos. Apesar disto os valores dos parâmetros considerados nos cálculos podem ser bem diferentes em cada região, devido a existência de falhas e irregularidades locais, permitindo que as duas condições para a convecção sejam satisfeitas.

Está implícita nesta teoria a existência de correntes de fluidos ascendentes e descendentes. Assim, para a detecção de radônio proveniente de grandes profundidades, somente serão obtidos bons resultados se os detectores estiverem localizados sobre locais de fluxo ascendente. Trata-se de uma condição difícil de ser vista.

Um outro problema pode ocorrer, decorrente deste modelo: durante o verão; o aquecimento da camada superficial do solo pode provocar uma inversão no gradiente térmico, formando uma camada inativa de solo prejudicando assim as possibilidades de medidas (figura III.3 a e b).

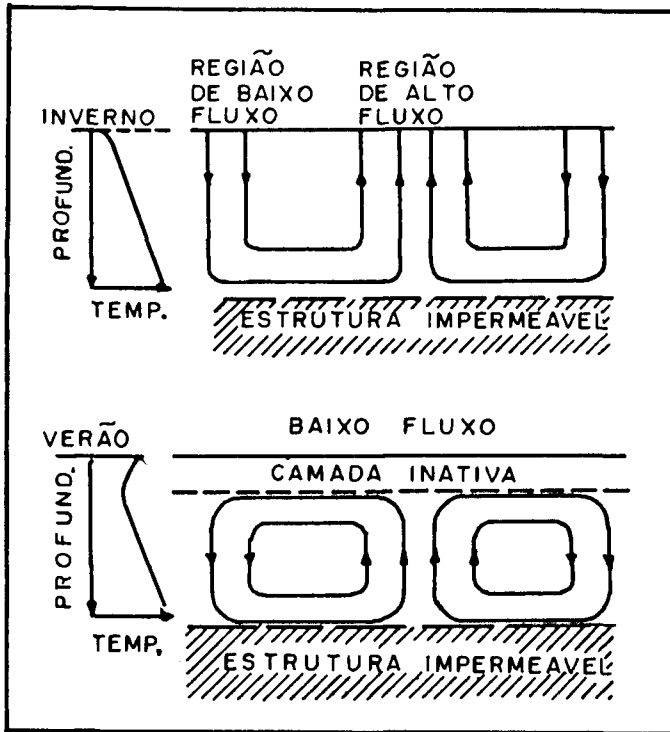


Figura III.3- Exemplos esquemáticos de uma convecção subterrânea hipotética causada por gradientes térmicos durante o inverno(a) e verão(b). No verão pode ocorrer um aquecimento na superfície, originando uma inversão térmica que irá prejudicar o fluxo de radônio para a superfície.

CAPÍTULO IV

IV. DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA

IV.1) TIPOS DE FILMES*

Neste trabalho foram utilizados três filmes diferentes para a detecção do radônio:

- a) LR-115 tipo 2 normal- Os filmes são de cor vermelha, contendo uma camada de 13 microns de espessura de nitrato de celulose ($C_{12}H_{10}O_{18}N_4$) depositados em uma folha de 100 microns de poliéster. A densidade dos filmes é $1,67g/cm^3$.
- b) LR-115 tipo 2 peliculado- Possui as mesmas características que os LR-115 normal, mas possui uma propriedade especial; a película de nitrato de celulose, após ter sido submetida à revelação química, pode ser separada da base e portanto a sua contagem poderá ser efetuada por meio de uma câmara de contagem automática⁽³³⁾.
- c) CA8015- Os filmes são de cor rósea, possuem 100 microns de espessura de nitrato de celulose.

Os três filmes são sensíveis às partículas alfa, sendo insensíveis à radiação gama, luz e elétrons.

IV.2) REVELAÇÃO E CONTAGEM DOS FILMES

Inicialmente os filmes foram cortados em áreas de $(1,5 \times 1,5)$ cm^2 . Após terem sido expostos às partículas alfa provenientes de fontes radioativas ou de ambientes com radônio e filhos, foram submetidos à solução química reveladora.

Em princípio poderia ser usada qualquer solução básica para a revelação dos filmes, mas neste trabalho optou-se pela solução de hidróxido de sódio, à 10% em água desionizada, já utilizada

* Os filmes utilizados são fabricados pela Kodak-Pathé - França.

com sucesso em outros experimentos com estes mesmos tipos de filmes⁽⁵⁾. Esta solução foi mantida a uma temperatura de $(60,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ durante todo o tempo de revelação por meio de um termostato, e mantida sob constante agitação de (20 ± 1) r.p.m. para evitar a presença de gradientes de temperatura na solução e para auxiliar na extração da superfície revelada dos filmes.

A velocidade de ataque no filme, V_M , é função exponencial da temperatura na qual a solução é mantida, podendo ser expressa na forma⁽²⁹⁾: $V_M = A \exp(-E/kT)$ com A representando uma constante, E energia de ativação, k constante de Boltzmann e T temperatura.

Após ter-se alcançado o tempo de revelação, os filmes foram retirados do banho e colocados em água corrente, durante aproximadamente 20 minutos, para interromper o ataque químico. Depois disto os filmes foram colocados para secar.

A leitura dos filmes LR-115 normal e dos CA8015 foi feita num microscópio óptico Reichert, com imagem projetada numa tela, utilizando-se um aumento de 140 vezes. Para separar os filmes em diversas áreas menores e portanto facilitar a contagem, utilizou-se uma grade em plástico transparente colocada sobre os filmes, de modo que nestas condições uma área de 1mm^2 era projetada e contada de cada vez na tela. Nos filmes LR-115 normal os traços se apresentam ao microscópio como pontos brilhantes com diâmetros de 6-14 microns, contrastando bastante com o fundo vermelho do filme. No CA 8015 os traços se apresentam como "bolhas" com diâmetros entre 6-14 microns contrastando com o fundo liso do filme (figura IV.2.1 (a e b)).

Os filmes LR-115 peliculados, após terem sido lavados em água corrente, foram colocados numa solução 1:1 de álcool etílico e água desionizada para auxiliar na extração da película do filme. A contagem deste filmes foi feita por meio da câmara de descarga automática⁽³³⁾ (figura IV.2.2). Este sistema consiste de dois eletrodos conectados a alta tensão sobre um dos quais é colocada a película do filme já revelado. Uma folha de Mylar aluminizada é colocada sobre o filme e o outro eletrodo, de modo a fazer a conexão elétrica. O filme é utilizado como um dielétrico e quando o circuito pulsante da câmara é acionado, estabelece-se uma diferença de potencial entre os eletrodos, ocorrendo descargas elétricas somente onde existem os traços, provocando assim quedas na diferença de potencial. Os pulsos decorrentes destas quedas são então registrados no contador ("scaler") associado ao sistema. Devido à alta temperatura local, ocorre a evaporação do alumínio da folha de Mylar, impedindo uma segunda descarga no mesmo local.

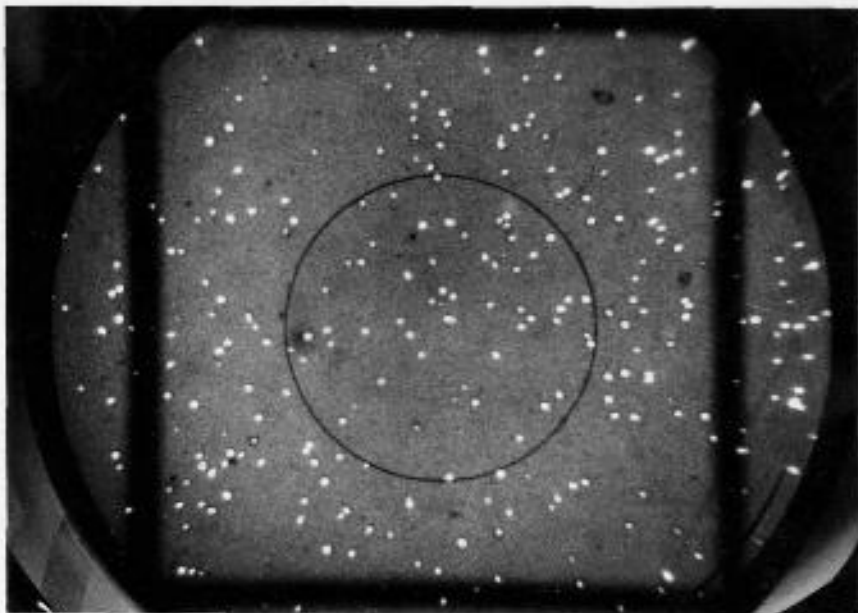


Figura IV.2.1a- Os traços no filme LR-115 normal se apresentam como pontos brilhantes contrastando com o fundo vermelho do filme.

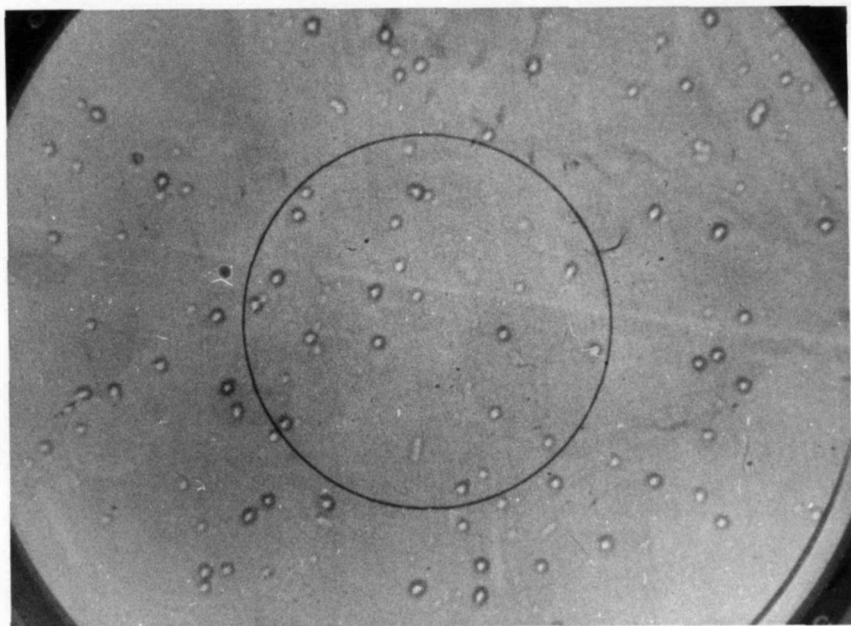


Figura IV.2.1b- Os traços no filme CA 8015 se apresentam com bolhas contrastando com o fundo li
so do filme.

que se formam na superfície do filme. O mesmo é observado quando se coloca um recipiente de vidro conforme mostra a Figura IV.3.1a. Diversas bolhas se acumulam na superfície inferior do recipiente e decaem, impressionando os filmes.

ESQUEMA DA CÂMARA DE CONTAGEM

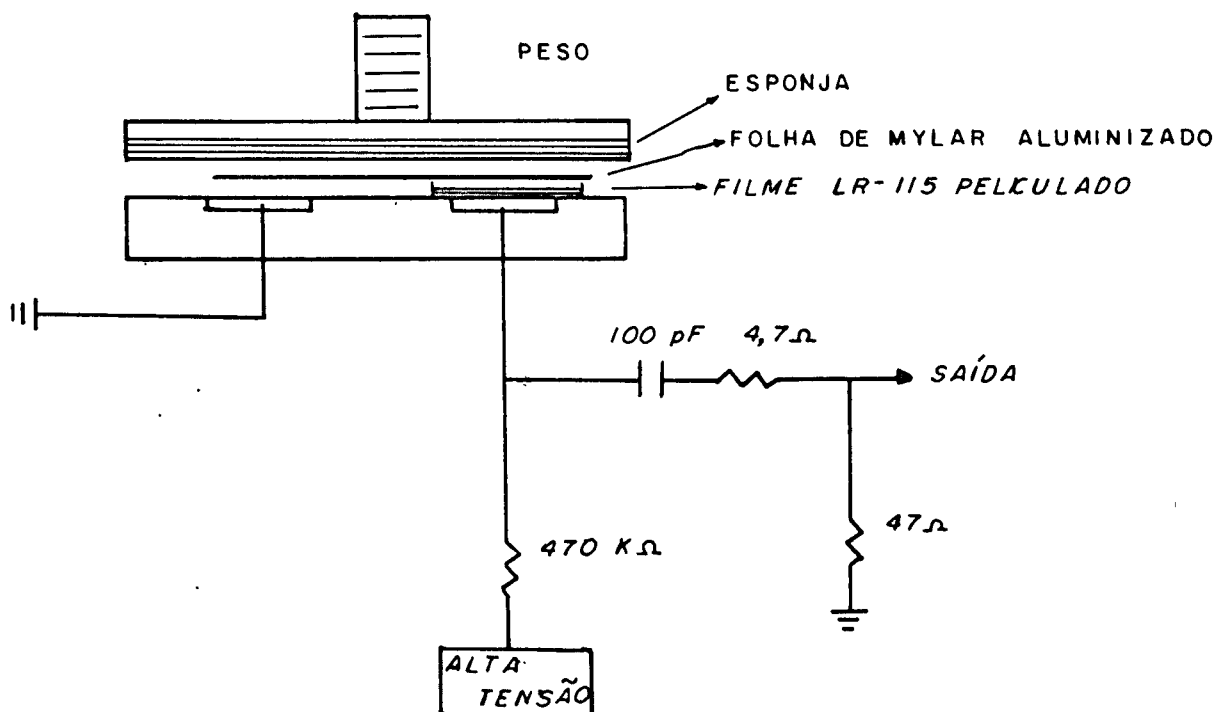


Figura IV.2.2- Esquema da Câmara de Contagem.

IV.3) FILME LR-115 NORMAL

IV.3:1) DETERMINAÇÃO DO MELHOR TEMPO DE REVELAÇÃO

Diversos filmes foram cortados nas dimensões $(1,5 \times 1,5)\text{ cm}^2$, colados em arandelas que por sua vez foram coladas na parte superior periférica de um recipiente de vidro conforme mostra a figura IV.3.1.

Foi colocada uma massa de 10 g de U_3O_8 no interior do recipiente que permaneceu fechado durante 20 dias. O radônio e filhos produzidos por esta massa puderam se difundir no ar contido dentro do recipiente e decair, impressionando os filmes.

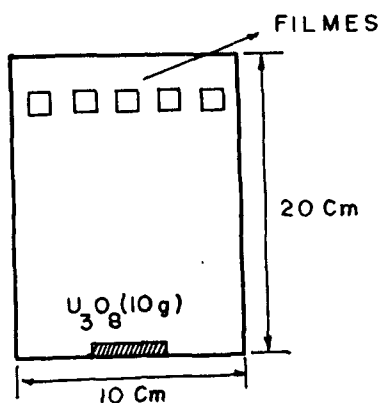


Figura IV.3.1- Filmes LR-115 normal foram colocados na parte superior periférica de um recipiente de vidro, que continha uma massa de 10g de U_3O_8 . Os filmes permaneceram em exposição durante 20 dias.

Depois de retirados, os filmes foram submetidos à revelação química. Cada um dos filmes foi revelado durante um tempo diferente, compreendido entre 60 minutos, quando os primeiros traços definidos começaram a surgir nos filmes observados ao microscópio, e 180 minutos, tempo máximo de revelação que os filmes suportaram. Para tempos superiores observou-se a degradação total dos filmes. Foram feitas revelações de 5 em 5 minutos. Com os resultados das leituras dos filmes, construiu-se o gráfico IV.3.1 relacionando a densidade de traços obtida em função do tempo de revelação.

Os pontos foram ajustados para a melhor reta, indicando um aumento linear da eficiência do filme em função do tempo de revelação.

Uma explicação qualitativa para este fato é que o grau de ionização causado no filme pela passagem da partícula alfa, é função da energia da mesma e pode ser representada por uma curva de Bragg⁽²¹⁾. Assim, dependendo da energia com que a partícula alfa atinge o filme, e nesta geometria utilizada pode-se supor que partículas alfa com energias compreendidas entre 7,6 MeV (^{214}Po) e próximas de zero atingiram o filme, a posição do traço latente é diferente na espessura do filme. Ocorrem duas situações: na primeira os traços superficiais "somem" à medida que o tempo de revelação

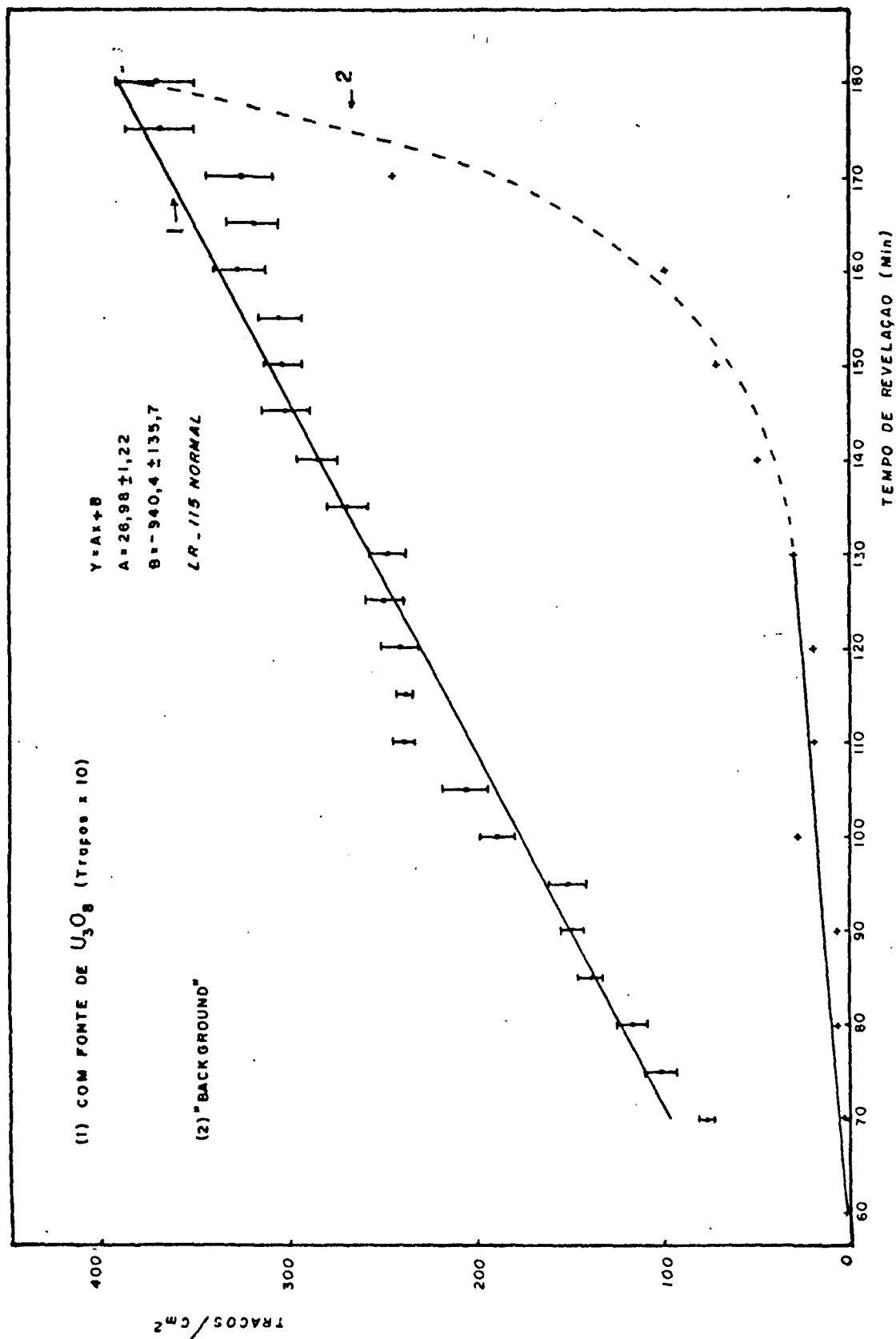


Gráfico IV.3.1- Densidade de traços x tempo de revelação (LR-115 normal) curva 1. Obteve-se um crescimento linear da densidade de traços em função do tempo de revelação. Escolheu-se para o melhor tempo de revelação 120 minutos; curva 2. Variação da densidade de traços de "background" em função do tempo de revelação.

aumenta, diminuindo o número de traços observados, e uma segunda, na qual o número de traços observados aumenta pelo aumento do tempo de revelação (traços não superficiais). Para o LR-115 a contribuição da segunda situação foi maior, conduzindo ao aumento de traços em função do tempo de revelação utilizado.

Da mesma maneira verificou-se os traços de "background", que são traços inerentes dos filmes, também em função do tempo de revelação. Os valores obtidos estão também no gráfico IV.3.1, mostrando um comportamento linear até o tempo de revelação de aproximadamente 130 minutos para depois seguir um caráter exponencial.

De posse destes dois resultados, fez-se a escolha do melhor tempo de revelação para este tipo de filme como sendo 120 minutos, pois:

- a) o tempo escolhido é um valor intermediário entre o tempo mínimo e o tempo máximo permitidos;
- b) para este tempo os traços possuem diâmetros entre 6-14 microns com formas bem regulares e definidos, contrastando bem com o fundo do filme, permitindo uma contagem sem dúvidas na definição de se é traço ou não;
- c) a curva de traços de "background" é ainda linear para este tempo.

Nota-se, apesar de tudo, que para o tempo escolhido a eficiência do filme não é máxima, apresentando uma inclinação de 6% para um intervalo de 10 minutos de revelação, calculado por:

$$\frac{\text{densidade de traços}(125 \text{ minutos}) - \text{densidade de traços}(115 \text{ minutos})}{\text{densidade de traços}(120 \text{ minutos})}$$

O fato dos filmes suportarem somente até 180 minutos está de acordo com o valor de velocidade de ataque obtida por Somogyi⁽³³⁾
 $V_M(\text{micron/hora}) = [4,00 \pm 0,015 \cdot v(\text{min}^{-1})]$; v = agitação da solução onde, após três horas, o ataque corresponderia a uma espessura de 12,9 microns de filme.

Verificou-se também a isotropia na geometria utilizada. Filmes colocados em posições diferentes foram revelados para o mesmo tempo de 120 minutos indicando uma variação de 4% em relação ao valor médio.

Para cada um dos filmes foram feitas leituras de diversas áreas. O resultado final de cada filme é representado pelo valor médio e o desvio padrão da média.

IV.3.1) VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA EM FUNÇÃO DA ENERGIA DA PARTÍCULA ALFA INCIDENTE

A eficiência de detecção dos filmes é função da energia da partícula alfa incidente, pois dependendo da energia a partícula produzirá maior ou menor ionização no material, conforme mostra a curva de Bragg⁽²¹⁾, figura IV.3.1. Assim, é de se esperar que a espessura do filme influencie a eficiência de detecção dos mesmos.

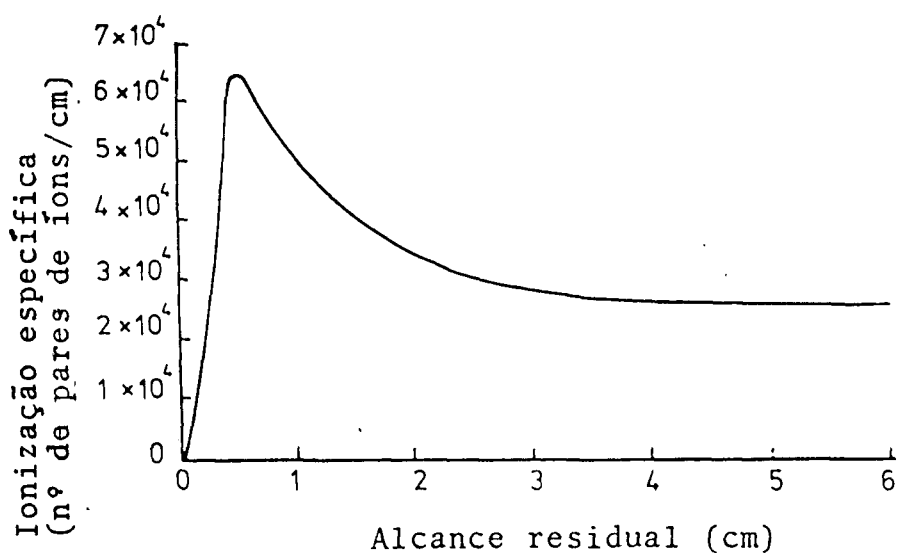


Figura IV.3.2- Curva de Bragg mostrando a ionização de partículas alfa em ar à 15°C e 760mmHg . O alcance residual das partículas alfa pode ser usado como uma medida de sua energia inicial.

Para realizar esta verificação, diversos filmes foram expostos a uma fonte de Amerício-241 (emissor alfa com $E_1=5,48$ MeV (80%) e $E_2=5,44$ MeV (20%)) em geometria 2π , colocando-se entre a fonte e o filme, diferentes camadas de absorvedor, com o objetivo de se conseguir partículas alfa com diferentes energias, funções das espessuras de absorvedor utilizadas. Utilizou-se como absorvedor MAKROFOL, um policarbonato fabricado pela Bayer. A fonte alfa foi calibrada com um detector de barreira de superfície no LMN (Labora

tório de Metrologia Nuclear do COURP/AFN do IPEN) possuindo uma atividade de (680 ± 5) desintegrações por minuto .

Os filmes foram irradiados durante 4 minutos, utilizando-se espessuras de Makrofol de 0 a 32 microns. Depois de revelados, os filmes foram contados e os resultados se encontram no gráfico IV.3.2.

Calculou-se a energia da partícula alfa incidente nos filmes, por meio da fórmula de Bragg-Kleeman⁽²¹⁾, pois sendo

$$R(E_i, E_f) = \int_{E_i}^{E_f} \frac{dE}{dE/dx}$$

a distância percorrida por uma partícula alfa em um meio quando sua energia passa de E_i a E_f e $R(E_i)$ o alcance da partícula alfa de energia E_i , então:

$$R(E_i, E_f) = R(E_i) - R(E_f)$$

Considerando $R(E_i, E_f)$ a espessura de Makrofol utilizada em cada caso, o valor de $R(E_i)$ foi calculado pela fórmula:

$$R(\text{cm}) = \frac{3,2 \cdot 10^{-4} \sqrt{A}}{\rho (\text{g/cm}^3)} R_{ar}(\text{cm})$$

substituindo os valores de $\sqrt{A} = 2,47$, pois a fórmula estrutural do Makrofol é $C_{16}H_{14}O_3$, e $\rho = 1,21 \text{g/cm}^3$ determinando assim $R(E_f)$.

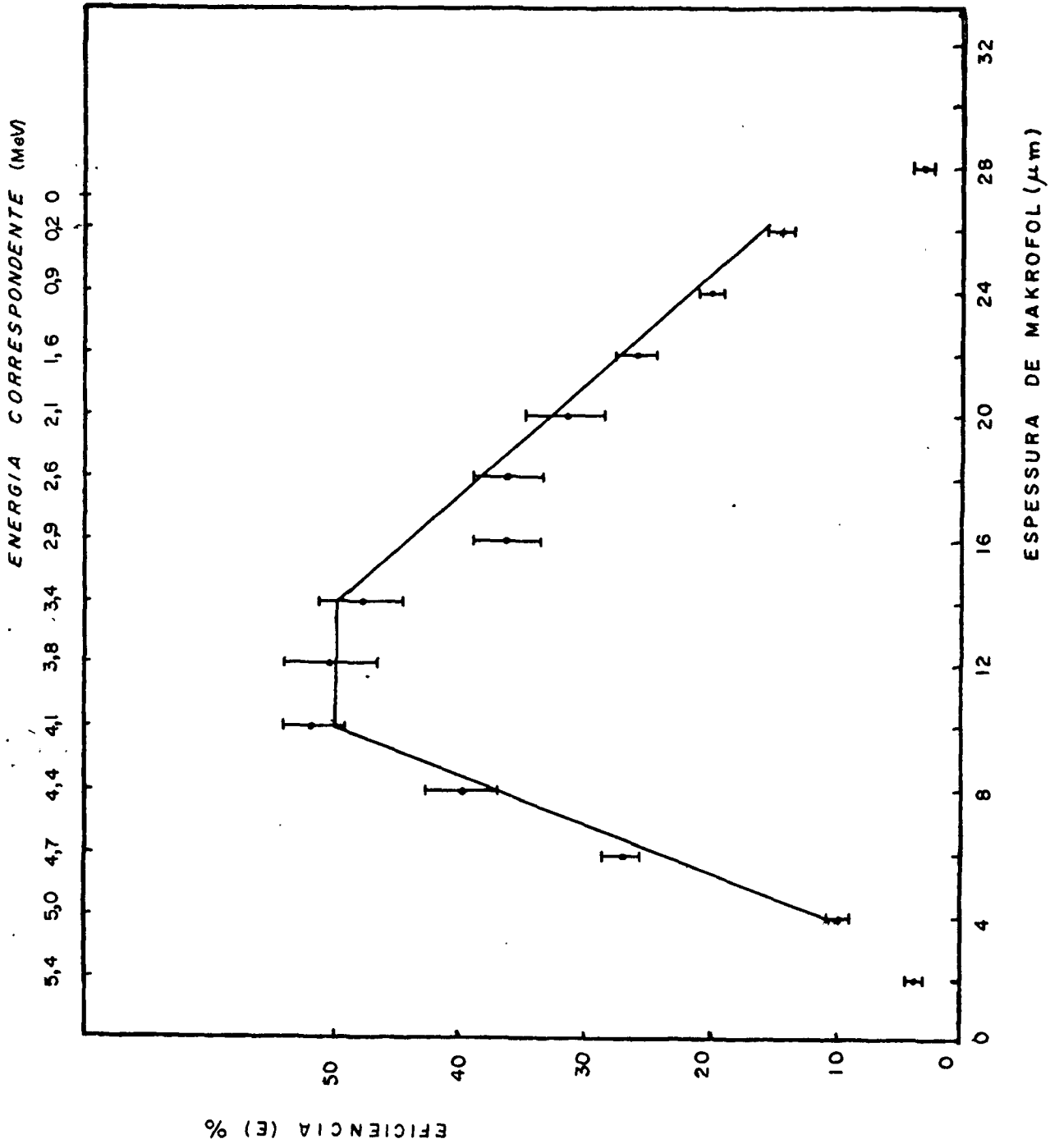
O cálculo prevê que 27 microns de Makrofol são suficientes para barrar as partículas alfa de energia 5,48 MeV.

A maior eficiência obtida foi para partículas alfa com energias entre 3,4 e 4,1 MeV, eficiência esta de 50% em relação ao fator ϵ definido no capítulo II. Pode-se supor que algumas partículas alfa, após atravessarem o Makrofol, tenham penetrado no filme com um ângulo inferior ao ângulo crítico e que, portanto, os seus traços tenham se perdido durante o processo de revelação.

Com estes argumentos pode-se calcular o ângulo crítico de incidência das partículas alfa entre 3,4 e 4,1 MeV que correspondem à eficiência máxima, por meio da fórmula:

$$\phi_{crit} = \text{arc sen}(1-0,5) = 30^\circ$$

Gráfico IV.3.2- Eficiência da detecção dos filmes LR-115 normal em função da energia da partícula alfa incidente. A maior eficiência obtida foi para partículas alfa entre 3,4 e 4,1 MeV correspondentes às espessuras entre 10 e 14 microns de Makrofol.



IV.3.3) CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO DETECTOR⁽¹³⁾

O detector de radônio, que será utilizado nas medidas em solos, composto pelo copo e pelo filme, apresenta uma região denominada de "volume sensível" que representa a região sensível do detector da qual partículas alfa provenientes do radônio e/ou filhos podem alcançar o filme e produzir traços.

Para este tipo de detector pode-se pensar que o volume sensível é a região delimitada pelos alcances das partículas que chegam com maior energia nos filmes, A_{\min} , e com menor energia, A_{\max} , que conseguem deixar traços, conforme figura IV.3.3.

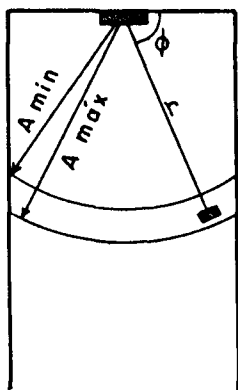


Figura IV.3.3- O volume sensível dos detectores é a região delimitada pelos alcances das partículas que chegam com maior energia nos filmes, A_{\min} , e com menor energia, A_{\max} , capazes de deixar traços.

Supondo que existam N átomos/cm³ de um elemento radioativo, de constante de desintegração λ dentro do copo, a atividade correspondente será $N \cdot \lambda$ (átomos/s.cm³). Quando existirem diversos emissores alfa, como é o caso do radônio e filhos, cada emissor alfa produzirá uma densidade de traços por unidade de tempo:

$$\rho_i = \int \left(\frac{N_i \lambda_i}{4\pi r^2} \right) \text{sen} \phi \, dv$$

Esta integral deve ser calculada sobre o volume sensível.

O termo entre parênteses se refere ao número de partículas por unidade de tempo e de área perpendicular chegando de uma distância r da fonte, e o fator $\sin\phi$ ajusta o ângulo de entrada das mesmas no filme.

Se o gás radônio está homogeneamente distribuído no interior do volume do detector, a equação torna-se $\rho_i = N_i \lambda_i k_i$, com k_i representando uma constante com dimensões de comprimento.

Quando existir um limiar de energia, a integral, no caso de simetria cilíndrica se torna:

$$\rho_i = 2\pi \int_{\phi}^{\pi/2} \left[\begin{array}{c} A_{\max}(\phi) \\ N_i \lambda_i \\ A_{\min}(\phi) \end{array} \right] \frac{r^2 \cos\phi \sin\phi dr d\phi}{4\pi r^2}$$

Fazendo aproximações nas regiões limitantes dos copos, considerando um valor mínimo para $\phi = \phi_{\min}$, obtém-se:

$$\rho_i = \frac{N_i \lambda_i \Delta A \cos^2 \phi_{\min}}{4}$$

com ΔA representando a variação dos alcances. Assim, para cada nuclídeo, a densidade de traços depende da concentração do nuclídeo, via $N_i \lambda_i$, da energia inicial de decaimento, via ΔA , e da geometria espacial via ϕ_{\min} . Esta equação só é válida para os isótopos de radônio e filhos que permaneçam dispersos dentro do espaço de ar dos detectores.

Os filhos com meias vidas suficientemente longas poderão se difundir para a superfície do copo e se depositar, já que os elementos envolvidos Po, Bi e Pb não são gasosos à temperatura ambiente.

Considerando o coeficiente de difusão do radônio no ar (tabela III.1) como uma boa aproximação para os coeficientes de difusão dos seus filhos também no ar⁽¹³⁾, pode-se obter valores estimativos dos caminhos livres médios dos mesmos $\ell = \sqrt{D \cdot \tau}$ (tabela IV.3.3).

Assim, é de se esperar que o Bismuto-212 e o Polônio-218 se depositem nas paredes dos copos, já que os seus caminhos livre

Tabela IV.3.3a- Caminho Livre Médio dos Filhos do Radônio.

NUCLÍDEO	VIDA MÉDIA (s)	CAMINHO LIVRE MÉDIO (cm)
^{212}Bi	4065	20,2
^{212}Po	$4,33 \cdot 10^{-7}$	$2,08 \cdot 10^{-4}$
^{214}Po	$2,36 \cdot 10^{-4}$	$4,86 \cdot 10^{-3}$
^{216}Po	$2,31 \cdot 10^{-1}$	0,15
^{218}Po	$2,65 \cdot 10^2$	5,14

médio são maiores do que 5cm, que por sua vez é maior que o valor dos raios dos copos utilizados ($r = 2,7\text{cm}$).

É razoável ainda admitir que esta deposição irá ocorrer uniformemente pelas paredes, produzindo uma atividade por unidade de área de $N_i \frac{V}{S} \lambda_i$ onde V é o volume total do espaço de ar e S é a área total das paredes, incluindo a área aberta. O cálculo de ρ para os nuclídeos depositados se torna:

$$\rho_i = \int \frac{V}{S} \frac{N_i \lambda_i}{4\pi r^2} \sin\phi \, dS = N_i \lambda_i k_i$$

com

$$k_i = \int \frac{V}{S} \frac{\sin\phi}{4\pi r^2} \, dS \quad \text{e} \quad dS = r \, dr \, d\phi$$

assim,

$$k_i = \frac{V}{S} \frac{1}{4\pi} \int_{A_{\min}(\phi)}^{A_{\max}(\phi)} \left[\int_{\phi_{\min}}^{\pi/2} \frac{dr}{r} \sin\phi \, d\phi \right] = \frac{V}{S4\pi} \ln \frac{A_{\max}}{A_{\min}} \cos\phi_{\min}$$

considerando as mesmas aproximações do caso anterior.

Para medidas realizadas durante tempos que são maiores do que as meias vidas envolvidas, pode-se considerar que os filhos estão em equilíbrio com os pais (radônio) de modo que nenhuma correção com relação a um não equilíbrio entre os nuclídeos precisa ser feita.

Dependendo da concentração de aerossóis dentro do espaço de ar dos detectores, estes podem reter os nuclídeos Bismuto-212 e o Polônio-218 em suspensão, não permitindo que os mesmos se difundam até as paredes.

Considerando os elementos emissores alfa da cadeia do urânio e tório, fez-se o cálculo do valor do coeficiente k para cada um dos nuclídeos. A partir deste cálculo fez-se uma estimativa dos valores de ρ_i para uma concentração de 1 pCi de radônio/litro, conforme mostra a tabela IV.3.3b e a figura IV.3.3.

O Polônio-210, elemento da cadeia do Urânio-238 foi omitido, pois o seu decaimento é precedido pelo Pb-210, com uma meia vida de 22 anos, de modo que somente uma pequena fração de átomos de Polônio-210 será produzida durante os tempos de monitoração usados (- 1 mês).

Nos cálculos efetuados foram considerados: - o valor do ângulo mínimo de 30° foi obtido no item III.2. por meio do valor de ϵ , relacionando o mesmo com o ângulo crítico: $\epsilon = 1 - \sin \phi_{\text{crit}}$ considerou-se $\phi_{\text{min}} = \phi_{\text{crit}}$.

O valor de k para o Polônio-218^(*) só é válido, supondo que o mesmo irá permanecer disperso no volume de ar do copo ligado aos aerossóis, pois se ele se depositar nas paredes este coeficiente será nulo, conforme pode ser visto na figura IV.3.3. Para o caso do Polônio-214^(**), devido ao seu alcance ser grande, houve a necessidade de se considerar um ângulo mínimo diferente, conforme a geometria do copo, tendo-se obtido $\phi_{\text{min}} = \phi_{\text{crit}} = 51,2^\circ$. Empregando o mesmo raciocínio para o Polônio-212^(**) obteve-se $\phi_{\text{min}} = 63^\circ$.

- Os valores de A_i foram obtidos por meio do cálculo da perda de energia⁽²¹⁾, considerando somente o intervalo de energias

Assim:

$$A_{\text{min}} = \int_{E_i}^{3,4 \text{ MeV}} dE / (dE/dx) = \int_{E_i}^0 dE / (dE/dx) - \int_{3,4 \text{ MeV}}^0 dE / (dE/dx) \quad e$$

$$A_{\text{max}} = \int_{E_i}^{4,1 \text{ MeV}} dE / (dE/dx) = \int_{E_i}^0 dE / (dE/dx) - \int_{4,1 \text{ MeV}}^0 dE / (dE/dx)$$

Tabela IV.3.3.b- Valores de k para o radônio e filhos da série do Urânio-238 e do Tório-232.

SÉRIE DO URÂNIO-238							
NUCLÍDEOS	MEIA VIDA	ALCANCE DAS PARTÍCULAS ALFA (cm de ar)	ΔA (cm de ar)	ϕ_{\min}	DISTRIBUIÇÃO	COEFICIENTE k (cm)	(TRAÇOS/CM ² 30d)/(PCI/â)
Radônio-222	3,8 dias	4,08	0,7	30°	Volume (*)	0,1313	12,6
Polônio-218	3,1 min	4,67	0,7	30°	Volume (**)	0,1313	12,6
Polônio-214	0,16 ms	6,91	0,7	51,2°	Volume	0,0687	6,6
SÉRIE DO TÓRIO-232							
Radônio-220	55s	5,01	0,7	30°	Volume	0,1313	12,6
Polônio-216 (***)	0,16s	5,67	0,7	30°	Volume (**)	0,1313	12,6
Polônio-212 (****)	0,30 μ s (64%)	8,53	0,7	63°	Volume (**)	0,0231	2,2
Bismuto-212 (****)	60,6s (36%)	4,73	0,7	30°	Superfície	0,0073	0,7

(*) e (**) - Explicações no texto

(***) e (****) - São determinados pelo decaimento do Pb-212 (meia vida = 10,4h).

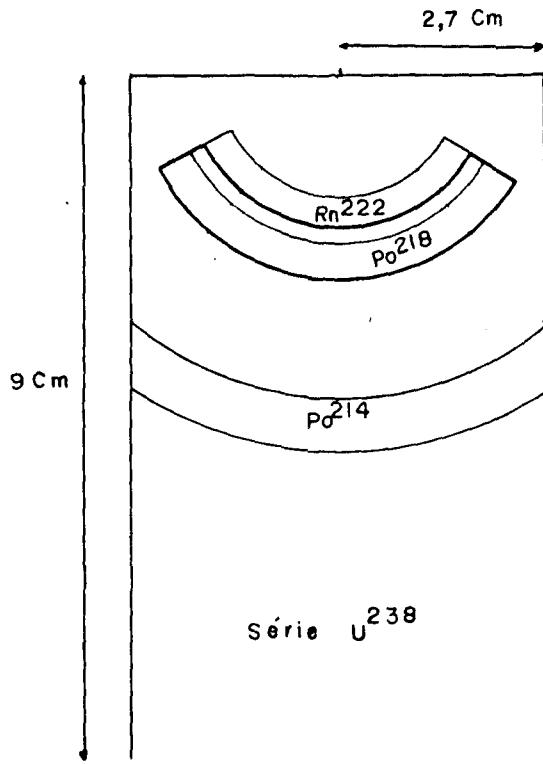


Figura IV.3.3.a

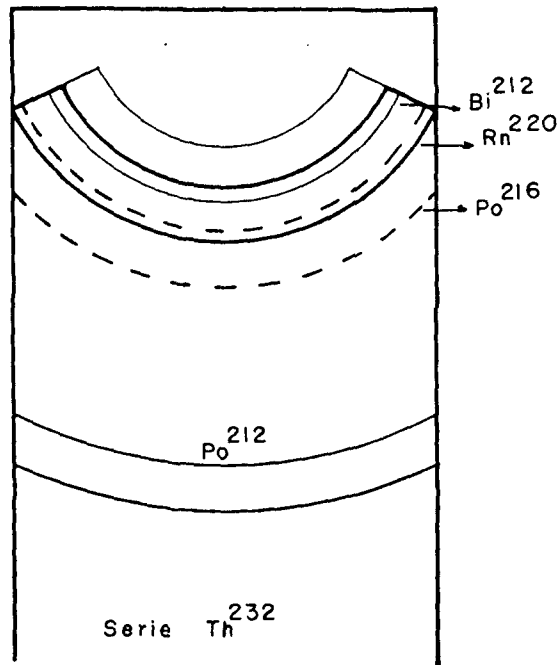


Figura IV.3.3.b

Figura IV.3.3- Volume sensível dos detectores de traços para o radônio e filhos. a) série do Urânio-238; b) série do Tório-232.

E_i é a energia inicial da partícula alfa e A_{max} e A_{min} fornecem os valores para os alcances máximo e mínimos delimitadores do volume sensível.

Os valores dos alcances médios das partículas em ar foram obtidos de tabelas e se referem ao ar à uma temperatura de 20°C à uma pressão de 760mm de mercúrio⁽²¹⁾.

Para o cálculo dos k_i , quando distribuídos no volume utilizou-se:

$$k_i = \frac{\Delta A_i \cos^2 \phi_{min}}{4}$$

Para o cálculo dos k_i , para os elementos distribuídos superficialmente, utilizou-se:

$$k_i = \ln \frac{A_{max}}{A_{min}} \cos \phi_{min} \cdot \frac{1,04}{4\pi}$$

Os valores de A_{min} e A_{max} foram obtidos da mesma maneira descrita anteriormente e o valor de 1,04 representa a razão entre o volume e a área dos copos utilizados: (9cm de altura e 5,4cm de diâmetro)

$$V = 206,12 \text{cm}^3$$

$$S = 198,49 \text{cm}^2$$

Os valores de ρ_i estão relacionados à concentração de 1 pCi/l de Radônio-222 para os elementos da série do Urânio-238 e 1 pCi/l de Radônio-220 para os elementos da série do Tório-232.

IV.4) FILME CA 8015

IV.4.1) DETERMINAÇÃO DO MELHOR TEMPO DE REVELAÇÃO

Da mesma maneira descrita no ítem IV.3.1, diversos filmes CA 8015 foram colocados em ambiente de radônio e filhos produzido por 40g de U_3O_8 , permanecendo expostos durante 23 dias (dimensões do recipiente: 30cm de altura, 15cm de diâmetro). Fez-se a verificação da variação da densidade de traços em função do tempo de revelação, assim como dos traços de "background". Os resultados encontram-se no gráfico IV.4.

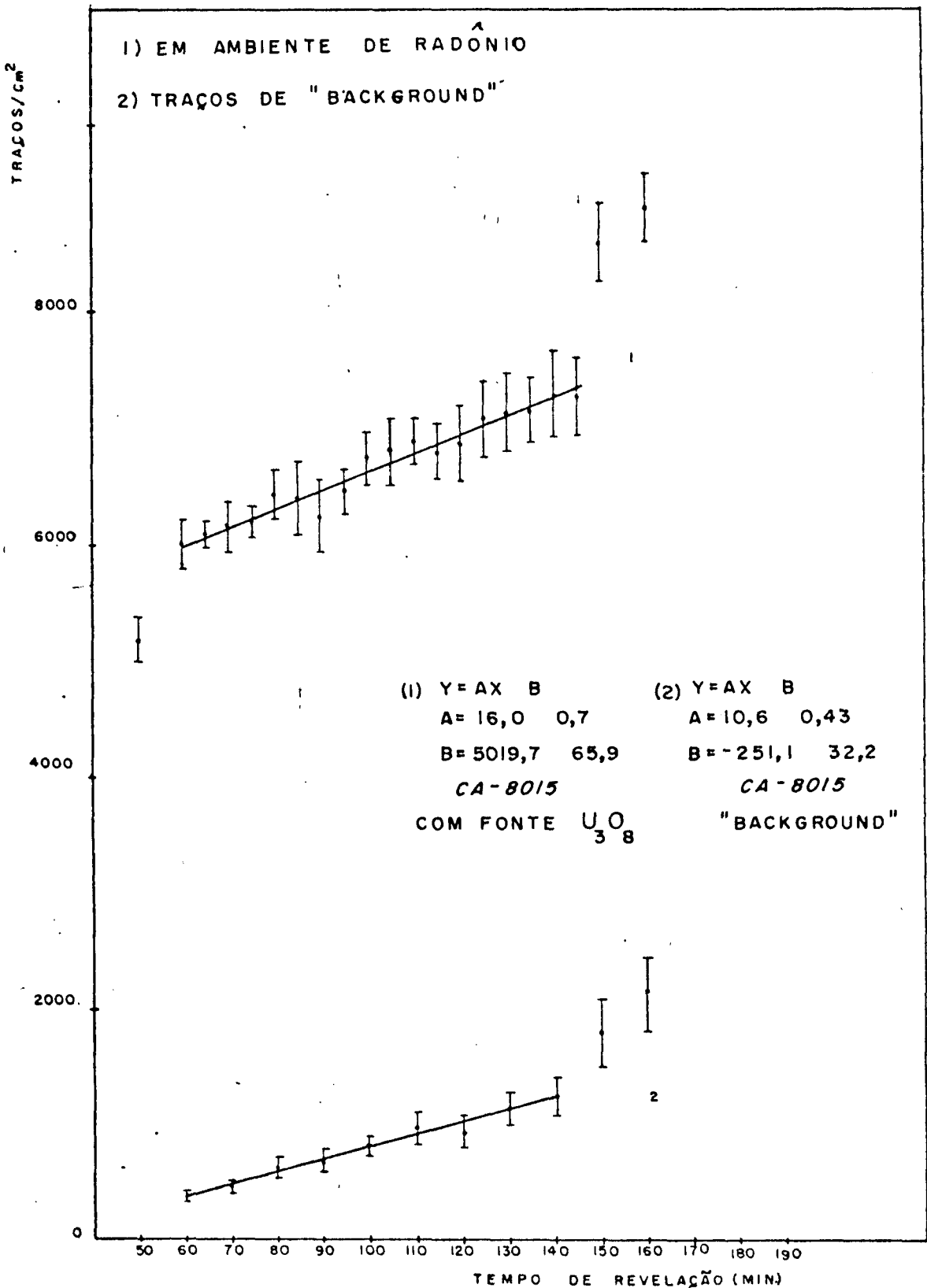


Gráfico IV.4- Densidade de traços x tempo de revelação (CA 8015) (curva 1) - Crescimento linear da densidade de traços em função do tempo de revelação. Escolheu-se para o melhor tempo de revelação 120 minutos. (curva 2) - Variação da densidade de traços de "background" em função do tempo de revelação.

Para este tipo de filme encontrou-se um patamar levemente inclinado, relacionando a densidade de traços e os tempos de revelação, entre 60 e 145 minutos. O comportamento da curva de "background" mostrou-se linear entre 60 e 160 minutos, após este tempo tomou o caráter exponencial.

Observou-se que o número de traços de "background" é muito maior do que os encontrados no LR-115 normal.

De posse destes dois resultados fez-se a escolha do melhor tempo de revelação como 120 minutos, pelos mesmos motivos considerados no caso do filme LR-115 normal. Para este tempo, encontra-se uma inclinação de 2,3%/10 minutos de revelação.

IV.5) FILMES LR-115 PELICULADO

IV.5.1) DETERMINAÇÃO DO MELHOR TEMPO DE REVELAÇÃO E DAS MELHORES TENSÕES DE CONTAGEM PARA OS FILMES

Pelo fato da contagem destes filmes ser feita por meio da câmara de descarga automática, foi necessário estabelecer além do melhor tempo de revelação, as melhores tensões de contagem para os filmes.

Diversos filmes tipo LR-115 peliculado foram colocados num recipiente de vidro (30cm de altura e 15cm de diâmetro), contendo 48g de U_3O_8 , permanecendo expostos durante 19 dias. Em seguida, os filmes foram revelados por tempos diferentes. A partir de 60 minutos os traços começaram a se definir e 120 minutos foi o tempo máximo suportado por este tipo de filme, possibilitando ainda que a frágil película resultante pudesse ser retirada da base de políester, sem ruptura.

Para cada tempo de revelação fez-se o estudo da variação da taxa de contagem em função da tensão de leitura aplicada, variando de 300V a 800V. Os filmes foram previamente submetidos a uma tensão de 800 volts, por três vezes, com a finalidade de "abrir" os traços que foram somente parcialmente abertos durante a revelação.

Os resultados obtidos encontram-se no gráfico IV.5.1.

Esses resultados mostraram a existência de um patamar de contagens para cada tempo de revelação entre 400V e 650V, onde as contagens praticamente mantiveram-se constantes.

Como o melhor tempo de revelação fez-se a escolha de 90 minutos, novamente por ser um valor intermediário entre o tempo mínimo e o tempo máximo. Para a tensão de leitura fez-se a escolha de 525 volts, um valor intermediário do patamar encontrado, apresentando uma inclinação de 6,7%/100 volts, para 90 minutos de revelação.

O gráfico IV.5.2 subsequente mostra a verificação do comportamento dos filmes para três densidades de traços diferentes (obtidas variando a massa de U_3O_8 e o tempo de exposição dos filmes), indicando sempre a mesma extensão de patamar apresentando inclinações que variaram entre (3,6 e 6,7)%/100 volts, confirmando a escolha de 525 volts para tensão de contagem e 90 minutos para o tempo de revelação.

A verificação dos traços de "background" em função do tempo de revelação também foi feita e os resultados encontram-se no gráfico IV.5.3.

O filme mostrou-se com pouquíssimos traços de "background" apresentando até o tempo de 120 minutos um comportamento linear e um comportamento exponencial após este tempo.

Foi feita também a verificação da densidade de traços em função da tensão de abertura, para a tensão de leitura escolhida de 525 volts e o tempo de revelação de 90 minutos. Obteve-se, conforme gráfico IV.5.4 um patamar com o valor central de 800 volts, apresentando uma inclinação de 13,2%/100 volts neste ponto, mostrando que a escolha de 800 volts como tensão de abertura é razoável.

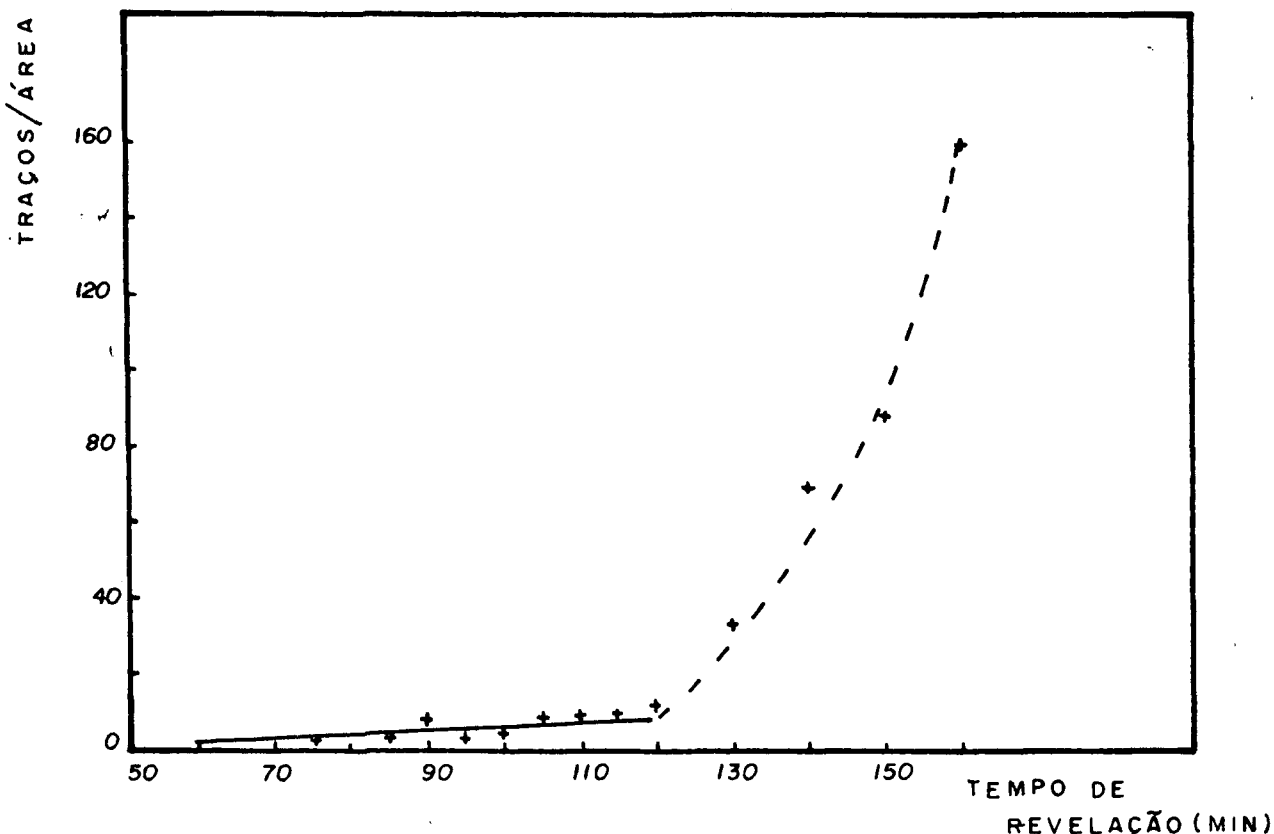
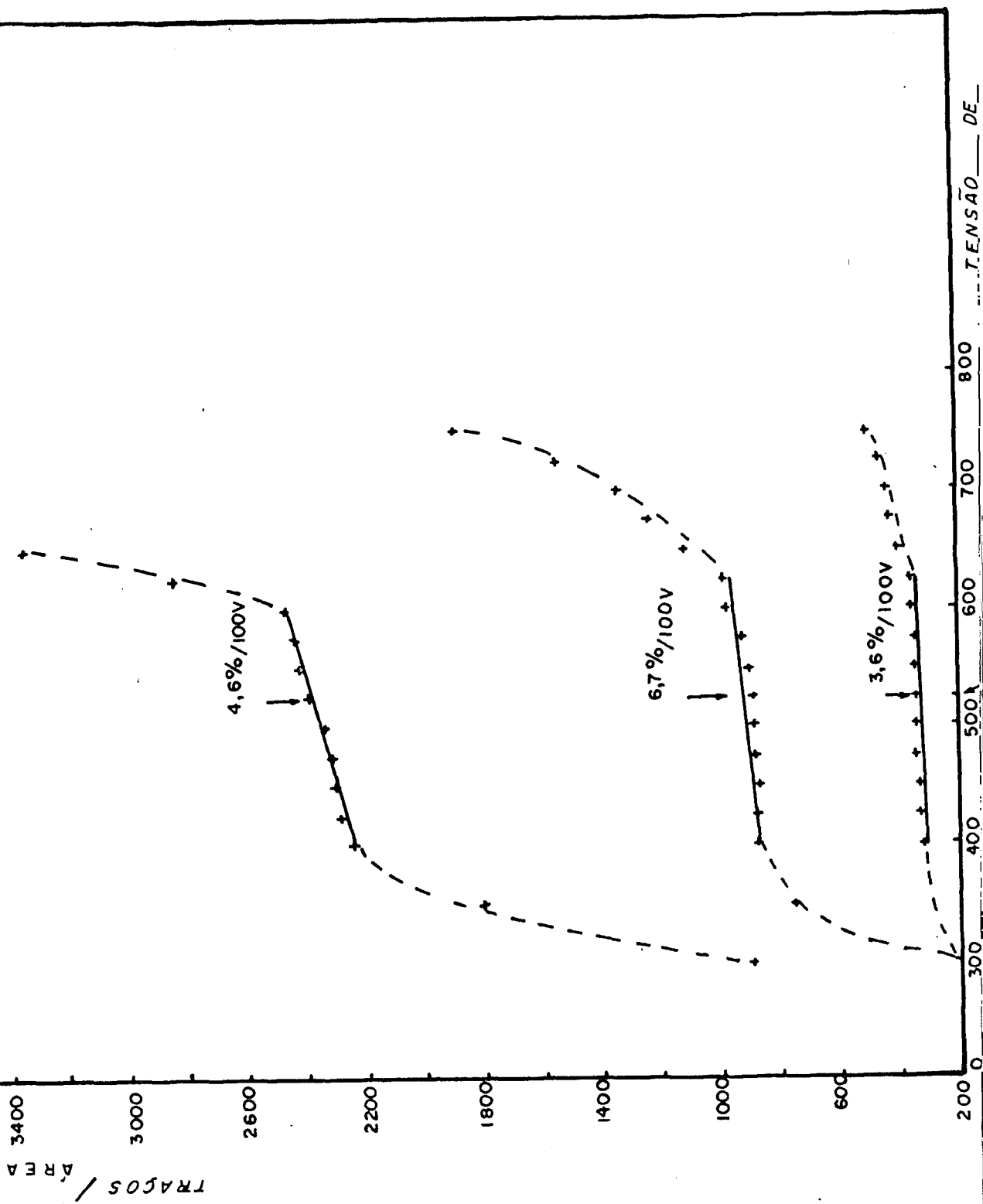


Gráfico IV.5.4- Traços de "background" em função do tempo de revelação.

Gráfico IV.5.2- Densida
de de traços x tensão de
abertura para 3 densida
des de traços diferentes,
confirmando a escolha
de 90 minutos para o tem
po de revelação e 525
volts para tensão de lei
tura.



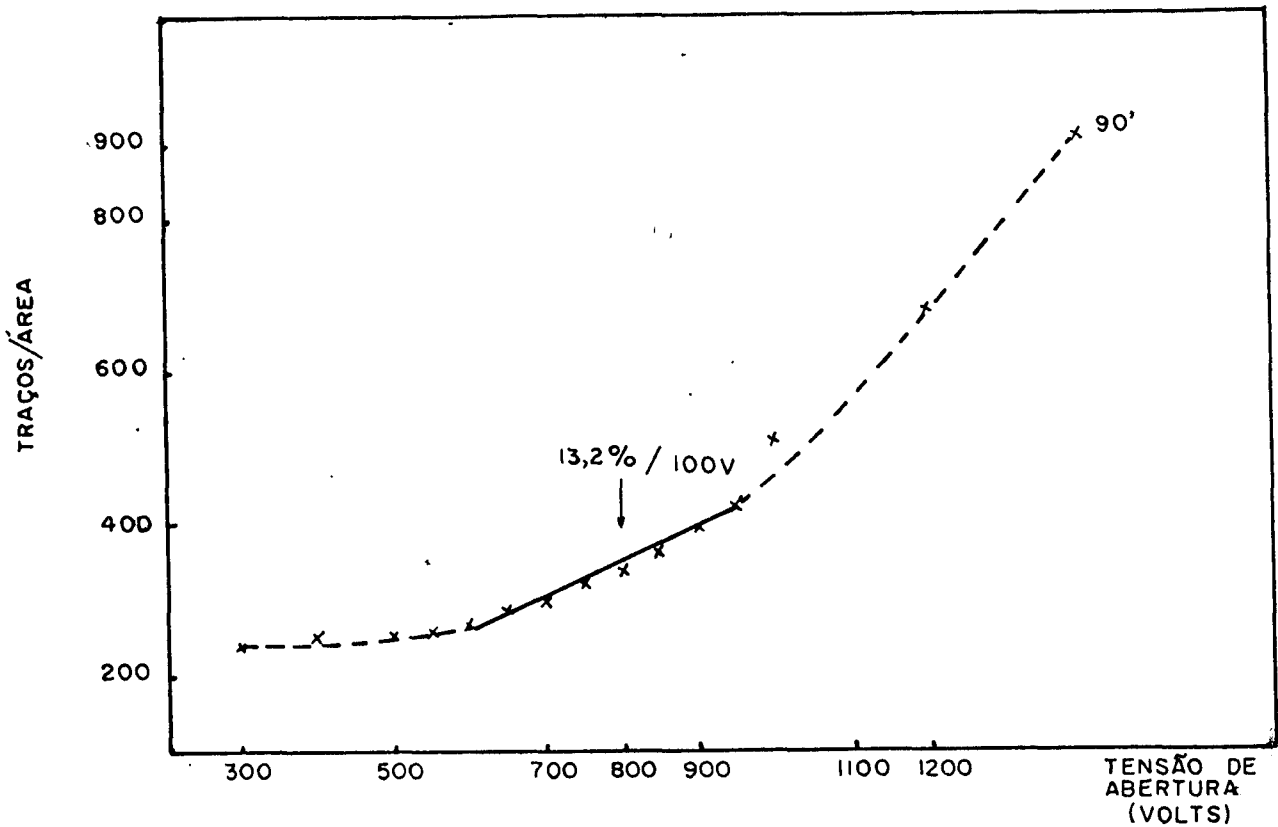


Gráfico IV.5.4- Densidade de traços x tensão de abertura para tensão de leitura de 525 volts e tempo de revelação : 90 minutos.

IV.6) COMPARAÇÕES ENTRE OS TRÊS FILMES

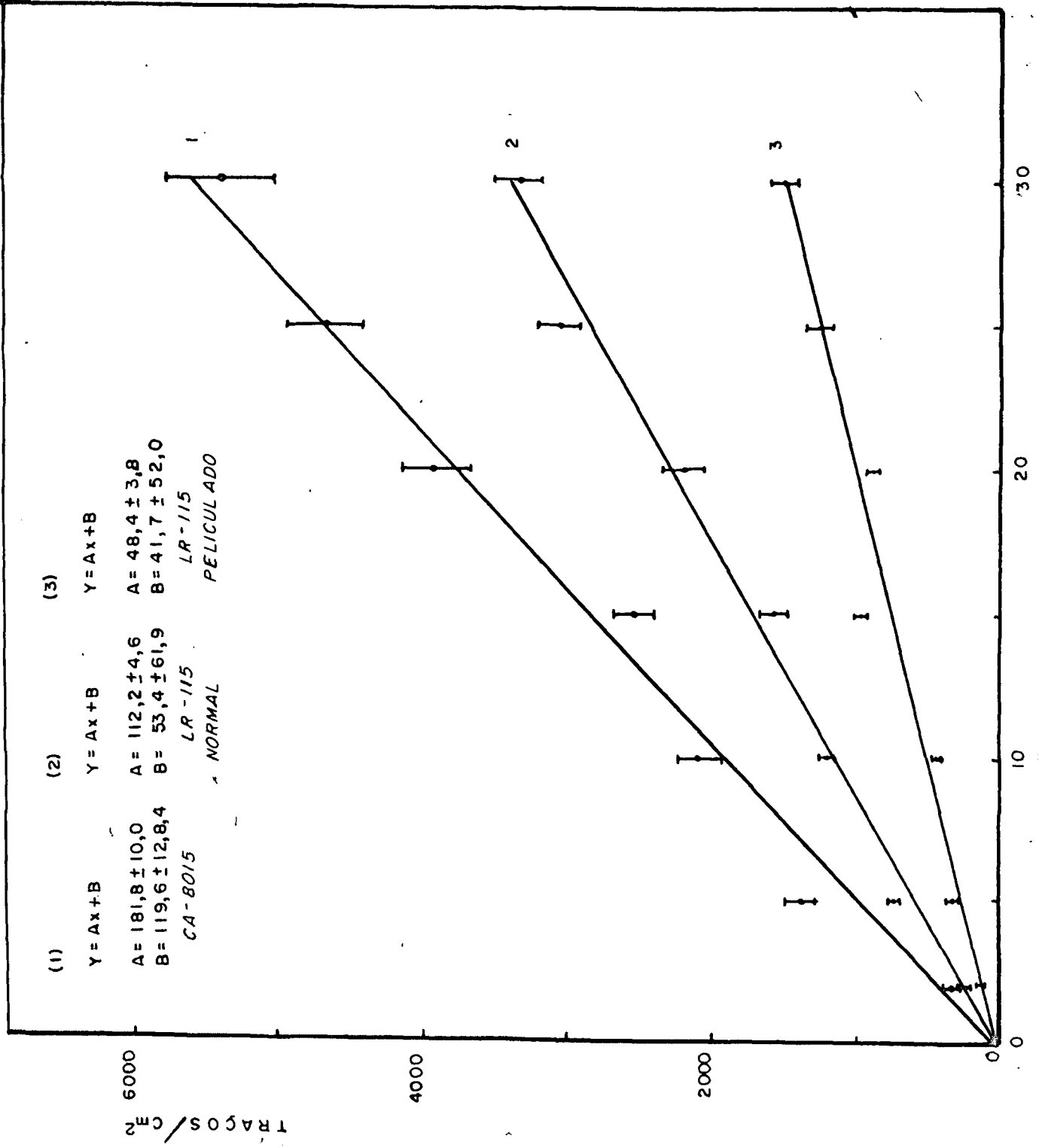
Preparou-se diversos recipientes, cada um deles contendo massas diferentes de U_3O_8 , 0, 2, 5, 10, 15, 20, 25 e 30g. Cada recipiente foi conectado com um copo detector.

O experimento foi feito com os três tipos de filmes que permaneceram em exposição durante 30 dias. Depois disto os filmes foram revelados e a densidade de traços contida em cada um deles foi relacionada com a massa de U_3O_8 que as gerou (gráfico IV.6).

Uma relação linear foi obtida para cada um dos três filmes.

O CA 8015 mostrou-se o mais eficiente dos três, provavelmente por possuir uma espessura bem maior, permitindo assim que

Gráfico IV.6- Densida
de de traços x massas
de U₃O₈ para o três
filmes utilizados. Tem
po de exposição: 30
dias.



partículas alfa com maior energia possam deixar seus traços marcados. Mostrou ser mais eficiente que o LR-115 normal por um fator 1,7. O LR-115 normal, por sua vez, mostrou-se mais eficiente que o LR-115 peliculado por um fator 2,3, provavelmente pelo fato dos tempos de revelação dos dois serem diferentes, além do sistema de contagem empregado em cada um deles ser diferente também.

Este tipo de experimento, além de mostrar as diferentes eficiências dos filmes, permitiu a verificação das possibilidades de uso prático dos mesmos, que podem ser resumidas como:

- Tanto o LR-115 normal como o CA 8015 podem suportar densidades de traços até $400.000 \text{ traços/cm}^2$, e portanto são os mais indicados para trabalhos de campo na prospecção de urânio, onde estas contagens podem ser esperadas;
- O CA 8015 é mais eficiente porém apresenta valores de "background" mais altos, quando comparados com o LR-115 normal, além deste último apresentar uma facilidade de contagem muito maior, devido ao forte contraste dos traços e o fundo vermelho;
- O LR-115 peliculado apresenta valores baixos de "background", além de possibilitar usar um sistema de contagem muito mais rápida que nos anteriores, mas os filmes suportam densidades de traços até $10.000 \text{ traços/cm}^2$, valor bastante inferior àqueles que podem ocorrer em medidas de campo, restringindo assim a sua utilização à do simetria ou ao estudo de reações envolvendo partículas alfa.

Para o LR-115 peliculado, a reprodutibilidade de contagens de uma mesma área foi de (2-3)% e para áreas diferentes de um mesmo filme, entre (4-9)%.

Para o LR-115 normal e o CA 8015, contagens de uma mesma área, feitas diversas vezes e em dias diferentes, mostraram-se reprodutíveis dentro de 3-4%, realizadas sempre por uma mesma pessoa. Quando pessoas diferentes realizaram este tipo de contagem, os valores variaram de (3-20)%, provavelmente devido a definição subjetiva inicial do que foi considerado como traço, e o que não foi.

Todos os resultados deste trabalho foram obtidos com contagens efetuadas pelo autor.

IV.7) PARÂMETROS DO DETECTORIV.7.1) ALTURA DOS COPOS

Para se ter certeza de que as partículas alfa que impressionam os filmes são provenientes somente do radônio e filhos, verificou-se o alcance dos elementos emissores alfa das duas séries.

Na série do Urânio-238 o elemento emissor alfa de maior energia é justamente o Radio-226, elemento "pai" do Radônio-222, com energia de 4,78 MeV e alcance médio no ar a 20°C e pressão de 760mm de mercúrio de aproximadamente 3,5cm⁽²¹⁾.

O alcance das partículas alfa no ar é função da densidade do mesmo, quanto maior a densidade, menor o alcance da partícula. Por sua vez a densidade do ar é função da pressão e da temperatura do local.

Considerando situações diferentes extremas, como o ar úmido a 35°C sob uma pressão de 700mm de mercúrio e ar a 10°C sob pressão de 790mm de mercúrio, teríamos como densidades do ar, respectivamente, 1,0555mg/cm³ e 1,2964mg/cm³⁽²⁰⁾. Para situações intermédias, os valores das densidades se encontram entre estes dois limites.

Pode-se calcular a variação no alcance da partícula alfa para estas duas situações, utilizando-se a fórmula de Bragg-Kleeman⁽²¹⁾:

$$R = \frac{3,2 \cdot 10^{-4} \sqrt{A}}{\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}} R(\text{ar})$$

com

R = alcance no ar (cm) na densidade ρ

R(ar) = alcance no ar a 20°C e 760mm de mercúrio (cm)

e $(\sqrt{A})_{\text{ar}} = 3,82$

Assim, os alcances R das partículas alfa emitidas pelo Radio-226 nestas duas situações seriam:

$$R_{\text{Ra-226}}(35^\circ \text{ e } 700\text{mmHg}) = 4,05\text{cm}$$

$$R_{\text{Ra-226}}(10^\circ \text{ e } 790\text{mmHg}) = 3,30\text{cm}$$

Os elementos posteriores ao radônio, da cadeia, emissores alfa com maiores energias, possuem meias vidas da ordem de minutos e portanto são elementos que praticamente indicam, também, a presença do Radônio-222, excessão feita ao Polônio-210, um emissor alfa de 5,3 MeV e com uma meia vida de 138,3 dias, possuindo um alcance médio no ar (20°C e 760mmHg) de 4cm. Nas condições extremas supostas:

$$R_{Po210}(35^{\circ}C, 700mmHg) = 4,63cm$$

$$R_{Po210}(10^{\circ}C, 790mmHg) = 3,77cm$$

Na série do tório, o elemento precessor ao Radônio-220 emissor alfa de maior energia é o Radio-224, com energia de 5,68 MeV. O seu alcance no ar é de aproximadamente 4,5cm. Considerando as duas condições extremas:

$$R_{Ra224}(35^{\circ}C, 700mmHg) = 5,21cm$$

$$R_{Ra224}(10^{\circ}C, 790mmHg) = 4,24cm$$

Os elementos da série, posteriores ao Radônio-220, emissores alfa, possuem meias vidas da ordem de horas e portanto são elementos que praticamente indicam, também, a presença do Radônio-220.

Optou-se pela escolha de copos com 9cm de altura, portanto suficientes para permitir somente a detecção do radônio e filhos.

IV.7.2) VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE TRAÇOS EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO DOS FILMES NOS DETECTORES

Dois tipos diferentes de geometria foram estudadas para a verificação da eficiência de contagem em função da posição da colocação dos filmes nos detectores. Filmes foram colocados na extensão periférica e na área superior do copo paralela em relação a fonte de U_3O_8 utilizada para produzir radônio (figura IV.7.2).

Os filmes ficaram expostos durante 30 dias a uma massa de 10g de U_3O_8 . Os resultados obtidos encontram-se no gráfico IV.7.2.

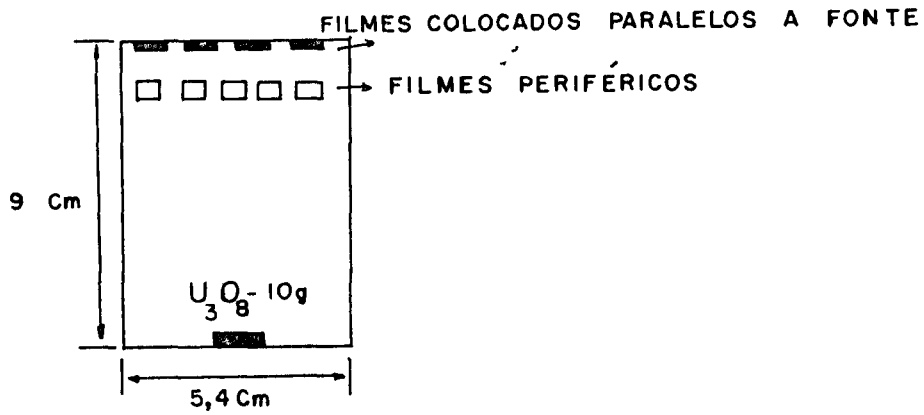


Figura IV.7.2- Duas posições de colocação dos filmes estudadas: filmes colocados na extensão periférica e na parte superior dos copos.

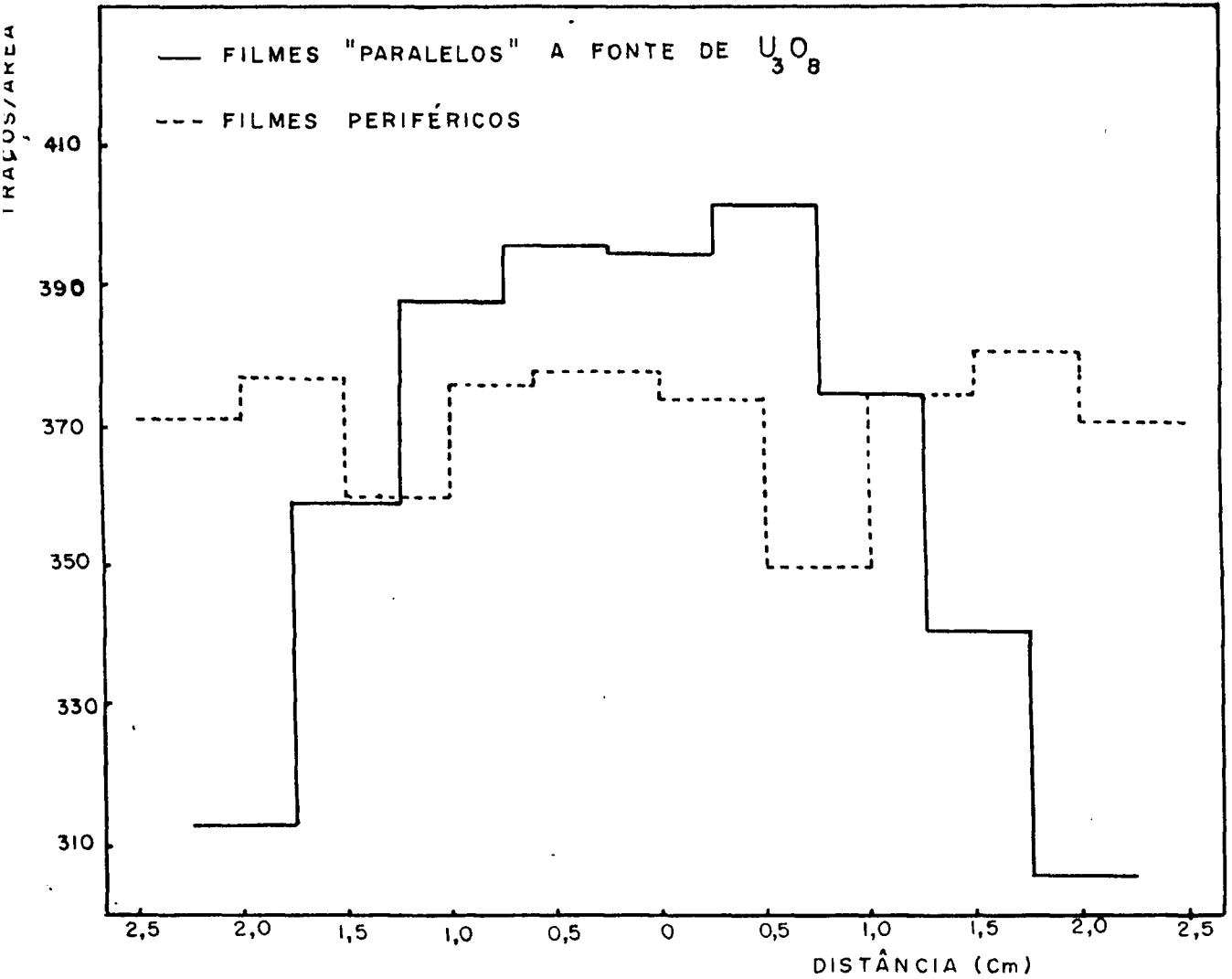


Gráfico IV.7.2- Variação da eficiência de detecção em função da posição de colocação dos filmes nos detectores. A maior eficiência foi obtida nos filmes colocados na parte superior e central dos copos.

Conforme se observa, a maior eficiência foi obtida para os filmes colocados paralelos à fonte, principalmente na sua parte central. Portanto a escolha da colocação dos filmes na parte superior e central dos copos provoca uma maior eficiência na detecção do radônio e filhos. Nesta posição ocorre um aproveitamento total do volume sensível calculado na secção IV.3.

IV.7.3) VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE TRAÇOS EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DOS COPOS UTILIZADOS

Com o objetivo de verificar a variação da densidade de traços, em função do diâmetro dos copos utilizados, preparou-se diversos detectores com altura iguais, 9cm, e diâmetros diferentes 2,0; 3,5; 4,0; 5,4; 6,0; 7,0; 7,5 e 9,0cm colocando-os em exposição para a mesma massa de U_3O_8 (10g) durante o tempo de 30 dias para cada detector. Os resultados obtidos encontram-se no gráfico IV.7.3a.

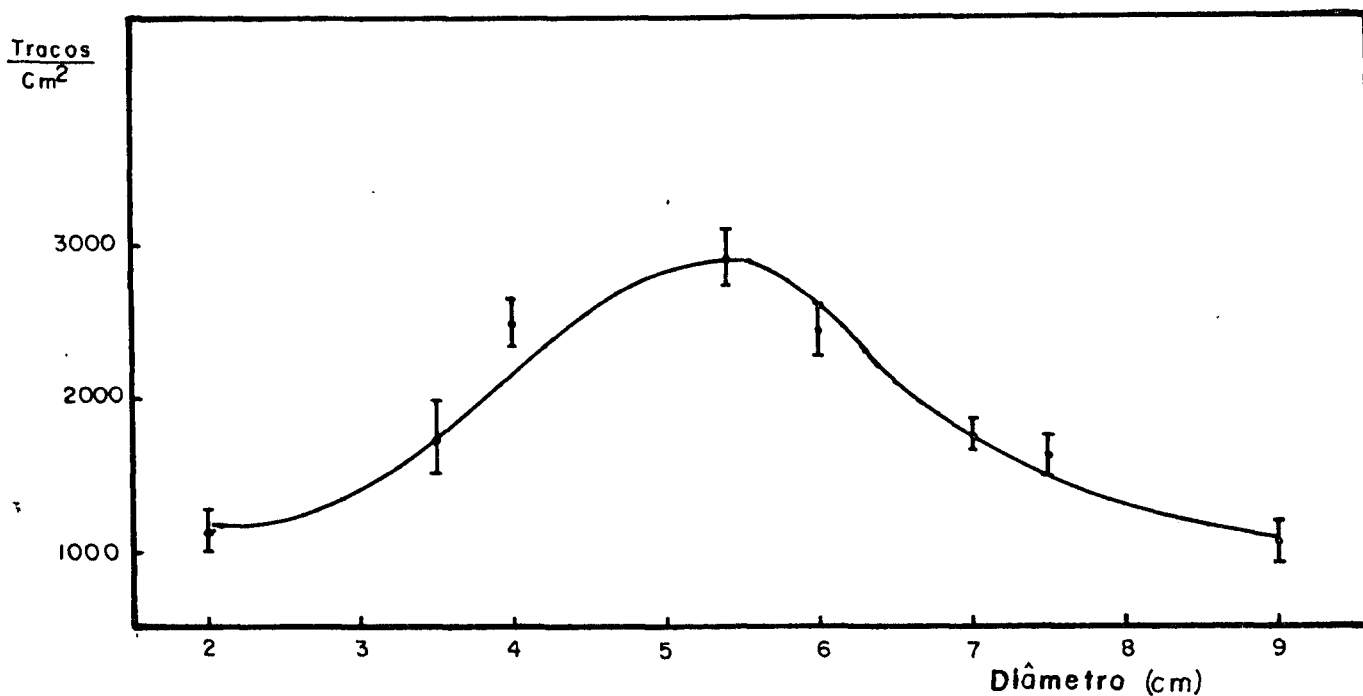


Gráfico IV.7.3a- Variação da eficiência em função do diâmetro dos copos utilizados. Medidas feitas com fontes de U_3O_8 . Obteve-se a maior eficiência para o copo com 5,4cm de diâmetro.

A maior eficiência foi obtida para o copo com 5,4cm de diâmetro, ocorrendo uma diminuição na eficiência tanto para diâmetros maiores como para diâmetros menores.

O mesmo estudo foi feito, colocando-se estes detectores com diferentes diâmetros, diretamente em buracos feitos nos solos. Os detectores ficaram 30 dias em exposição em buracos de 40cm de profundidade, em terreno do IPEN. Os resultados obtidos encontram-se no gráfico IV.7.3b.

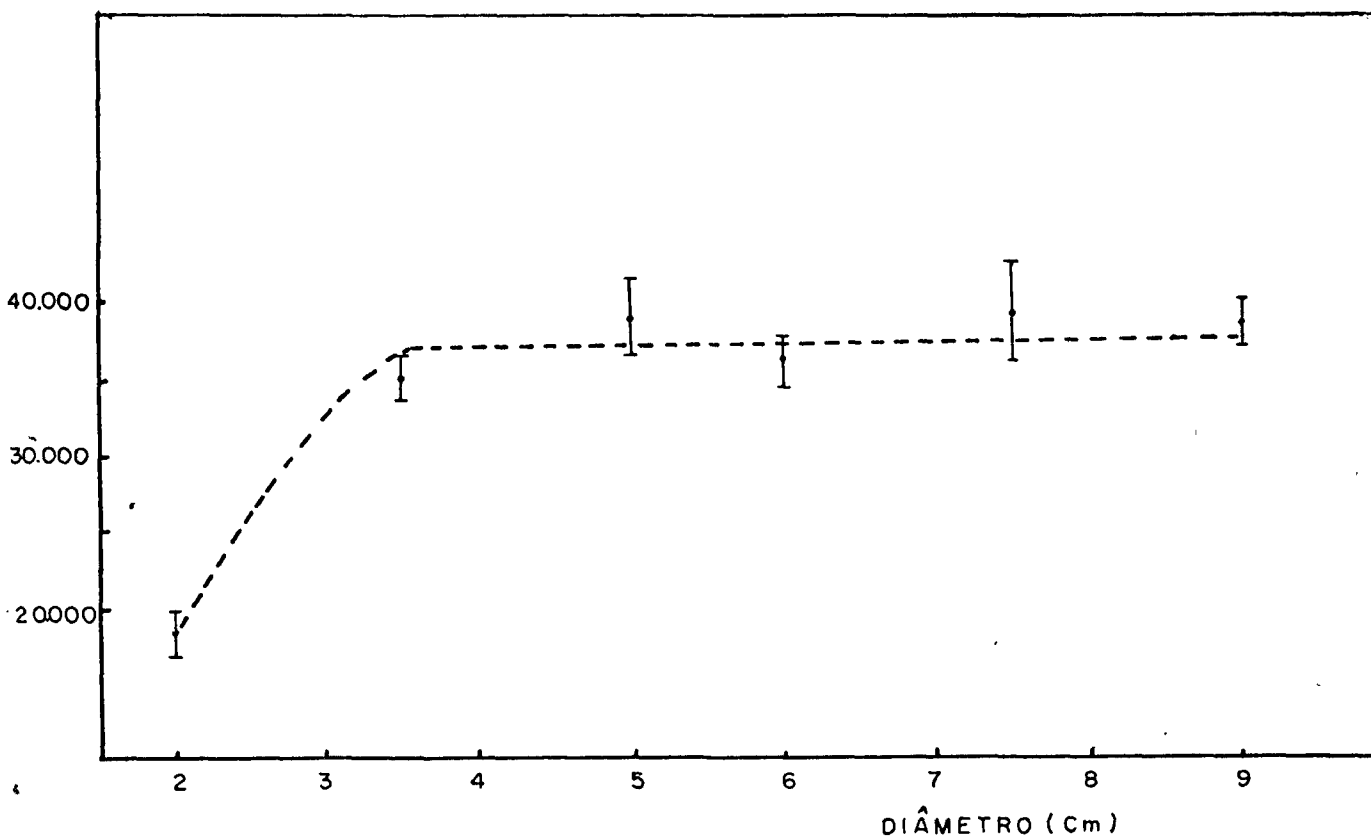


Figura IV.7.3b- Variação da eficiência em função do diâmetro dos copos utilizados. Medidas realizadas em campo: A partir de copos com diâmetros superiores a 4cm a eficiência praticamente tornou-se constante.

Obteve-se um resultado diferente daquele obtido no experimento anterior, mostrando a partir do diâmetro de 4cm até o de 9cm, uma eficiência constante, portanto, independente do diâmetro do copo utilizado.

Observa-se, visualmente, das figuras IV.3.3, que mostram o volume sensível do detector para os elementos da série do urânio e do tório, que uma diminuição do diâmetro dos copos além de 4cm provocaria uma perda do volume sensível, produzindo uma diminuição nos valores de k_j , portanto diminuindo a eficiência do detector. Para diâmetros superiores a 5,4cm ocorreria um aumento nos valores de k

para o caso do Polônio-214 e do Polônio-212, decorrentes da diminuição do ângulo mínimo ϕ .

Apesar do aumento do valor de k total para cada série, o volume do detector aumenta também, oferecendo maiores chances para o gás se localizar fora do volume sensível e portanto não ser detectado.

Dos resultados experimentais pode-se supor que, dependendo da concentração do gás existente, sendo ela pequena como no caso do primeiro experimento, existe um copo de diâmetro adequado para o qual a eficiência de detecção é máxima. A medida que a concentração aumenta, como no caso do segundo experimento, a dependência, a partir de um certo valor para o diâmetro dos copos, desaparece. Assim, para trabalhos de campo na prospecção de urânio, a escolha de detectores com 5,4cm de diâmetro é boa, mostrando uma eficiência máxima de detecção.

IV.8) VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE TRAÇOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO DOS FILMES

Para se obter informações a este respeito, preparou-se diversos copos, contendo em cada um deles a mesma massa de U_3O_8 (10g), conforme figura IV.8.1.

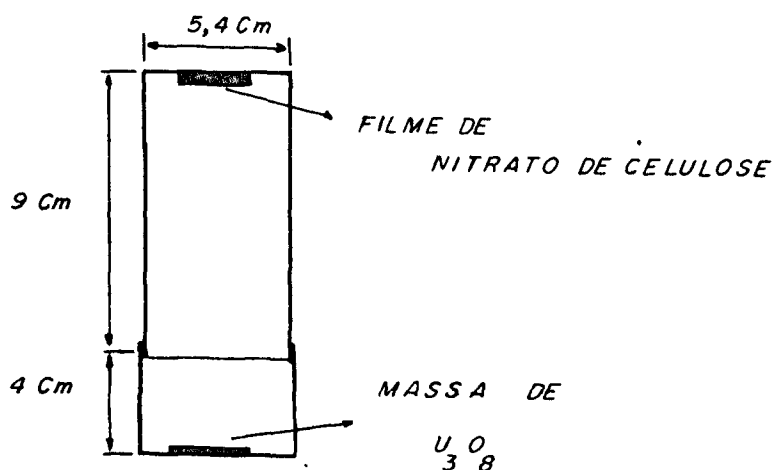


Figura IV.8.1

Os filmes foram retirados em tempos diferentes de exposição e os resultados relacionando a densidade de traços com estes tempos estão representados no gráfico IV.8.1. O experimento foi repetido com uma massa de 5g de U_3O_8 .

Os resultados mostraram um crescimento exponencial da densidade de traços em função do tempo de exposição para as duas massas diferentes de urânio utilizadas. A razão deste fato pode estar relacionada ao fato do não equilíbrio entre a fonte de urânio e o radônio produzido por ela. Deste modo, a comparação de dados obtidos em tempos diferentes de exposição merecem muito cuidado ao ser feita.

Os mesmos resultados, quando colocados em papel monolog, mostraram uma tendência linear de modo a oferecer a seguinte relação (gráfico IV.8.2):

$$C = C_0 e^{\lambda_c t}$$

com

- C = concentração obtida num tempo t (densidade de traços)
- C_0 = concentração num tempo $t = 0$
- λ_c = por definição significa uma constante de crescimento da concentração do gás nos copos
- t = tempo de exposição.

Para as duas massas de U_3O_8 utilizadas obteve-se o valor de $0,04 \text{ dias}^{-1}$ para as inclinações das duas retas, que representam o valor de λ_c e os valores de C_0 mostraram-se proporcionais às concentrações iniciais de U_3O_8 , pois apresentaram também uma razão pelo fator 2. A interpretação de C_0 como a concentração do gás no tempo $t = 0$ é decorrente apenas dos dados experimentais e só é válida para o cálculo após 3 dias de exposição.

Um experimento similar foi realizado para verificar a variação da densidade de traços em função do tempo de exposição em campo. Para isto, diversos buracos de 60cm de profundidade foram abertos no IPEN, onde os detectores foram colocados, permanecendo em exposição por tempos diferentes.

Os dados obtidos encontram-se no gráfico IV.8.3.

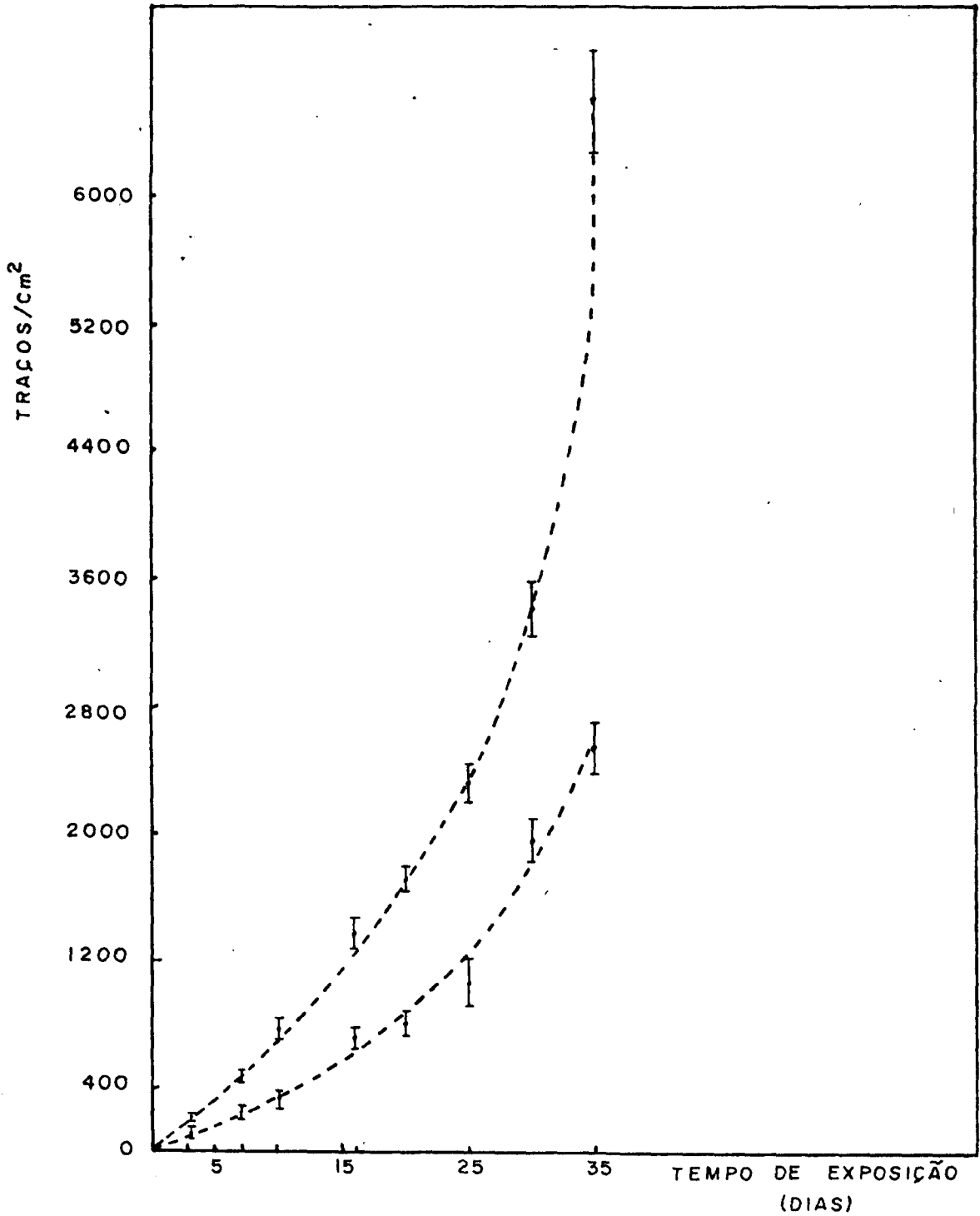


Gráfico IV.8.1- Variação da densidade de traços em função do tempo de exposição. Medidas feitas com massas de U_3O_8 iguais (10g).

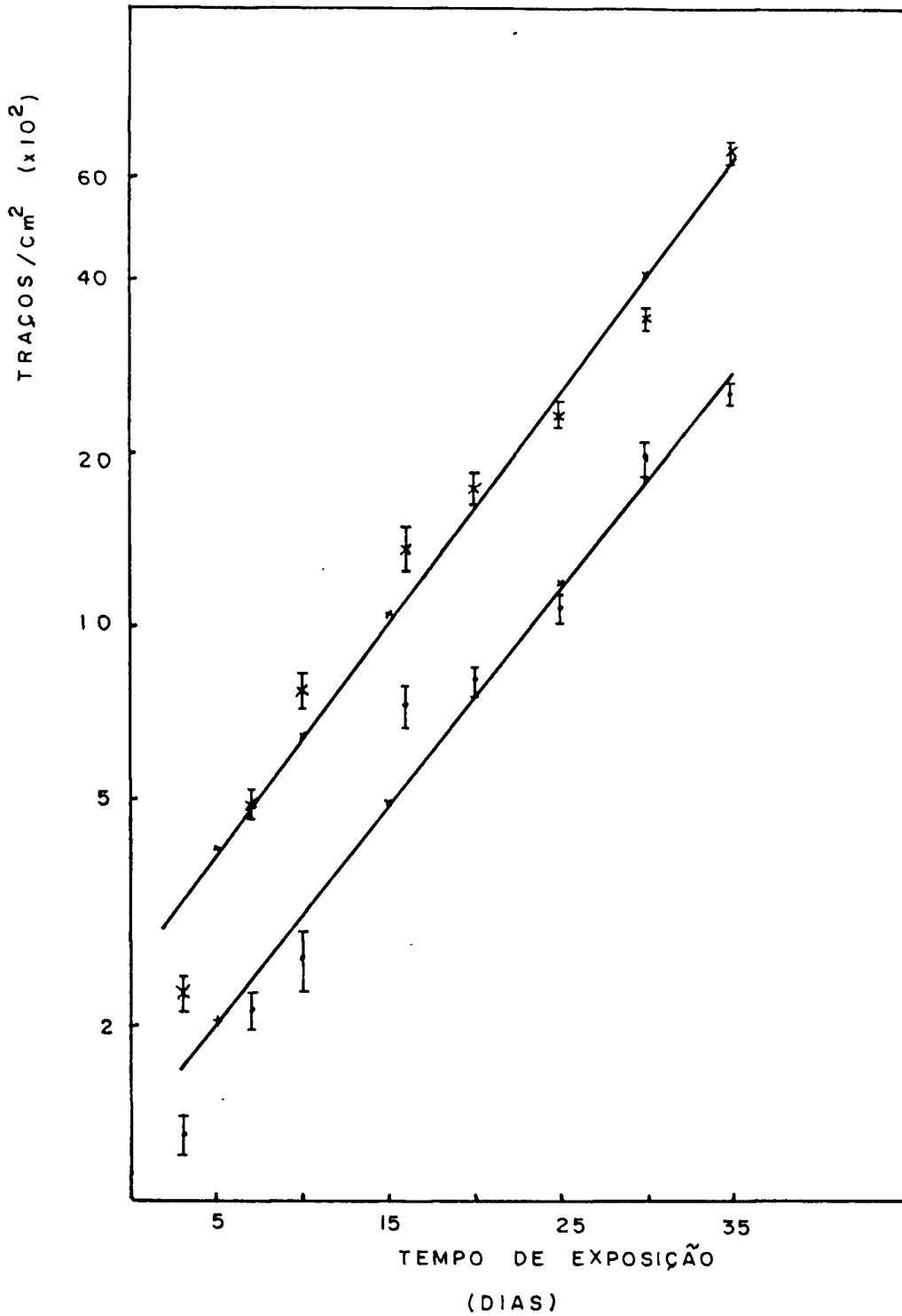


Gráfico IV.8.2- Gráfico log da densidade de traços em função do tempo de exposição. Obteve-se o valor $\lambda_c \approx 0,04 \text{ dias}^{-1}$ nas duas curvas. Os valores de C_0 mostraram-se propporcionais às duas massas de urânio utilizadas.

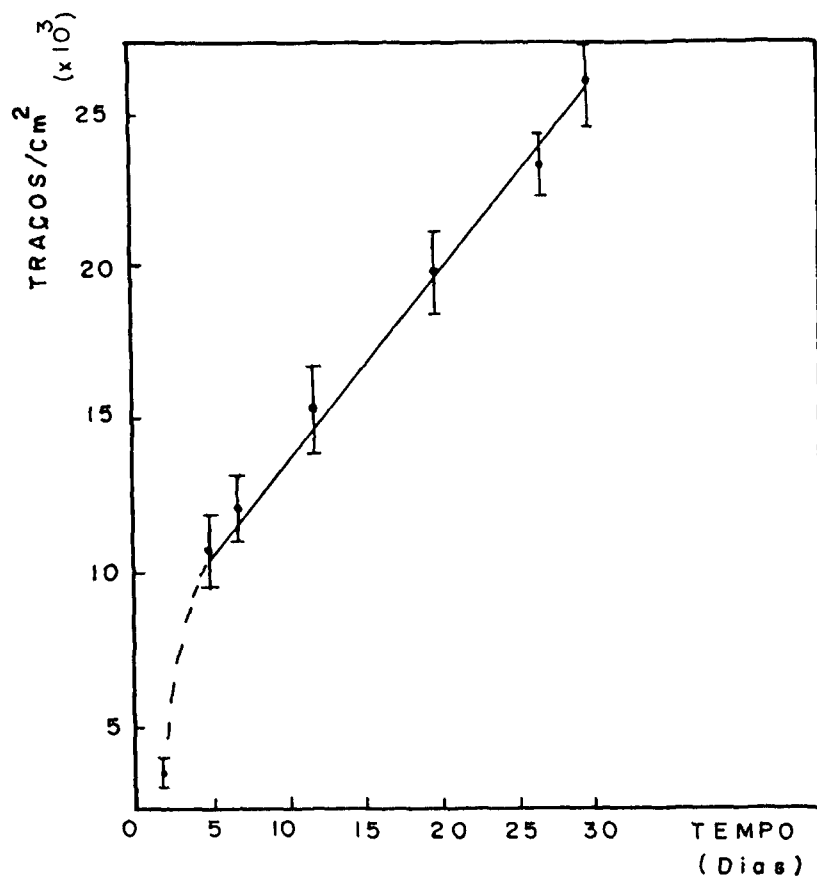


Gráfico IV.8.3- Variação da densidade de traços em função do tempo de exposição. Medidas realizadas em campo. A partir de 5 dias obteve-se um comportamento linear da curva indicando um equilíbrio do gás no solo.

A partir de 5 dias de exposição, o comportamento da curva mostrou-se linear, relacionando a densidade de traços obtida em função do tempo de exposição. Este comportamento linear representa um equilíbrio do gás no solo, situação diferente daquela do estudo anterior. Assim, a partir de 5 dias de exposição ocorre este equilíbrio, que pode ser considerado como um tempo mínimo para a exposição.

CAPÍTULO V

V. MEDIDAS EM SOLOS

V.1) SIMULAÇÕES EM LABORATÓRIO

V.1.1) MEDIDAS EM CAIXOTES COM AREIA

Com o intuito de verificar o comportamento destes detectores para a detecção de radônio em solos com a finalidade de serem usados na prospecção de urânio, foram preparados em laboratório alguns caixotes, contendo massas de U_3O_8 na sua parte inferior, cobertos com areia comum de construção, simulando assim, em pequena escala, uma possível situação de campo. Diversos detectores foram colocados sobre a superfície da areia e deixados em exposição durante 30 dias.

Dois tipos de medidas foram feitas: na primeira delas utilizou-se um caixote contendo, na sua parte inferior central, uma massa de 150g de U_3O_8 coberta com 10cm de areia, figura V.1.1.1.

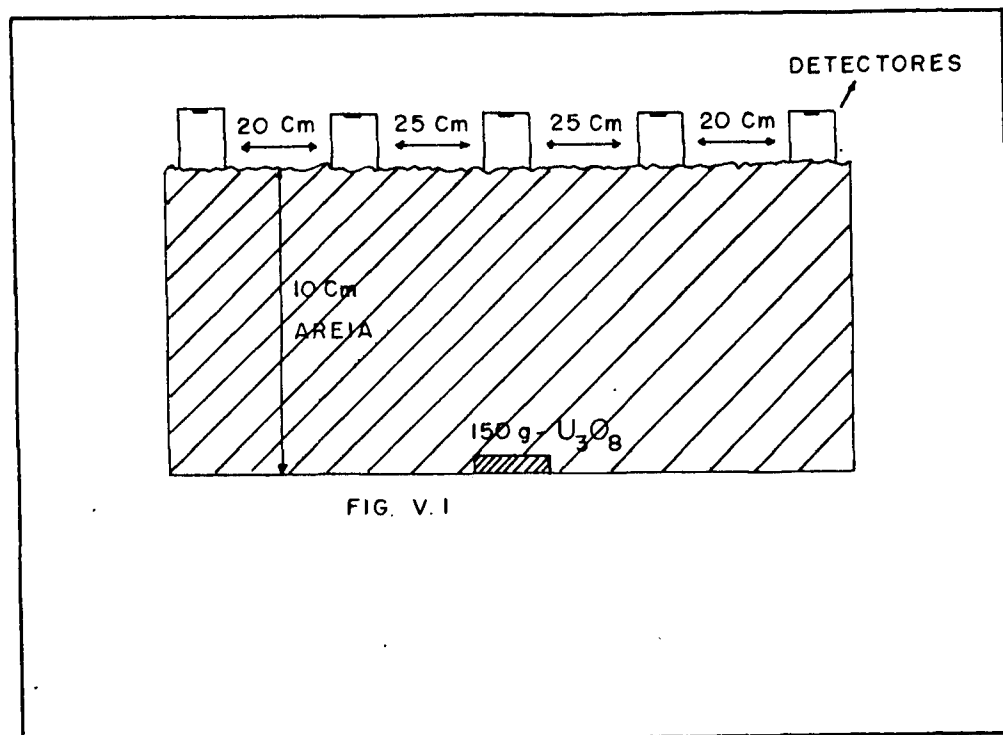


FIG. V.1

Figura V.1.1.1

Os resultados obtidos encontram-se no gráfico V.1.1.1.

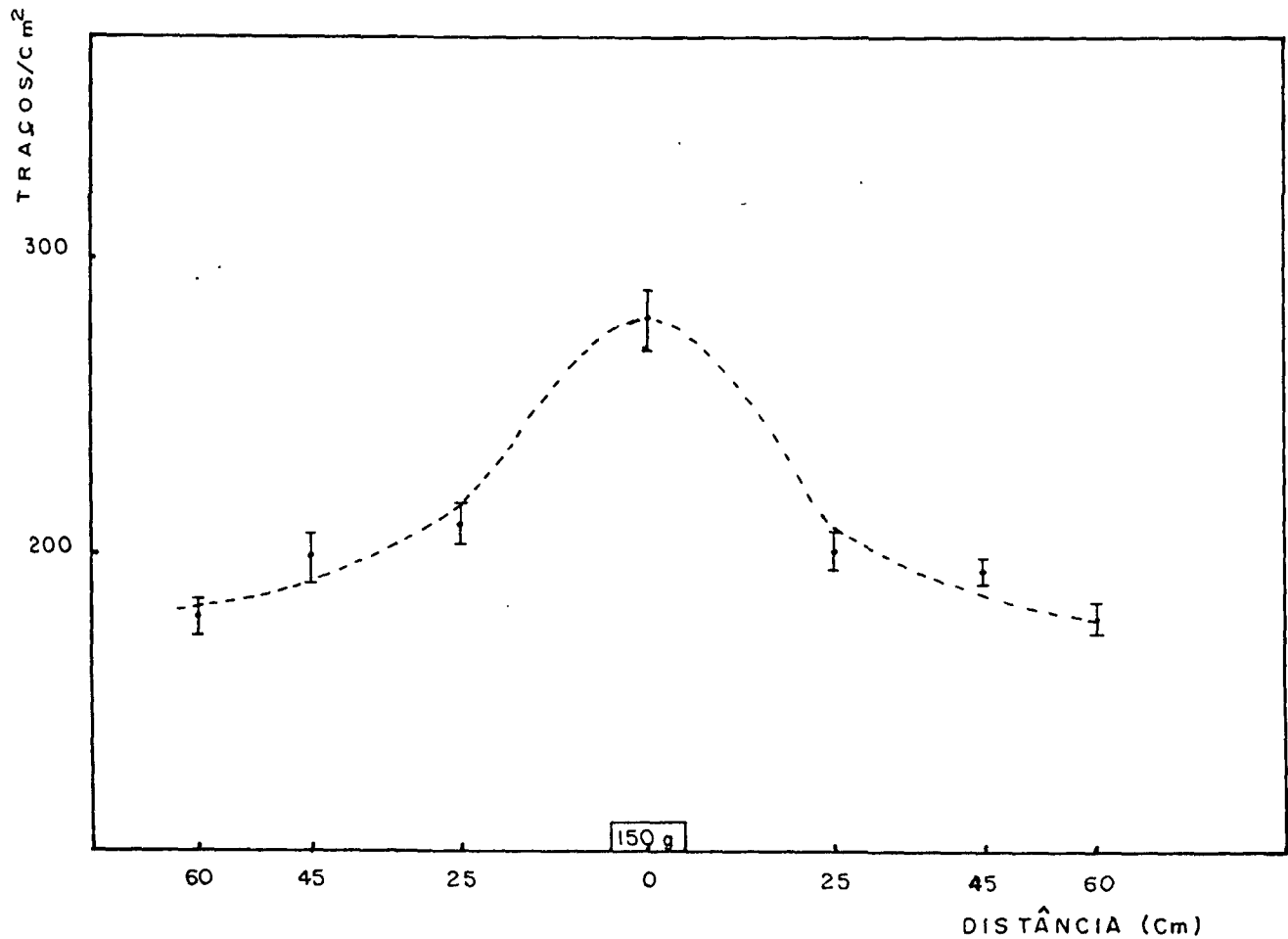


Gráfico V.1.1.1- Densidade de traços em função da posição de colocação dos detectores no caixote de areia, contendo uma massa de U_3O_8 .

Os resultados mostraram-se coerentes, indicando a maior densidade de traços e, portanto, a maior concentração do gás na posição logo acima da amostra de U_3O_8 .

No segundo tipo de medida utilizou-se duas fontes diferentes de U_3O_8 (90g e 50g) na parte inferior do caixote, cobertas com 7cm de areia, para se verificar a possível influência entre estas fontes, na produção da concentração superficial do gás (figura V.1.1.2).

Os resultados obtidos são mostrados no gráfico V.1.1.2.

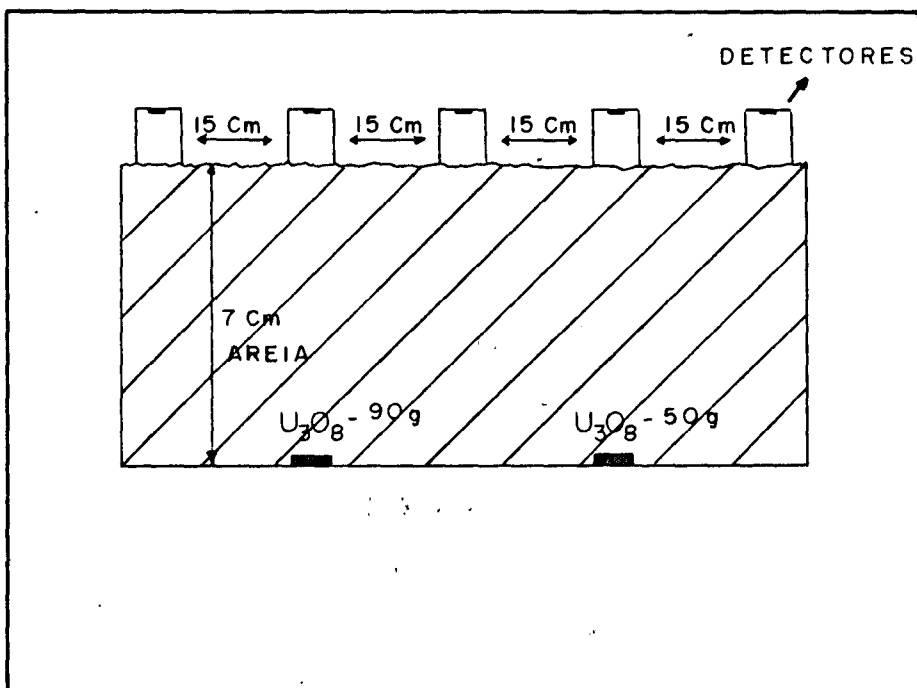


Figura V.1.1.2

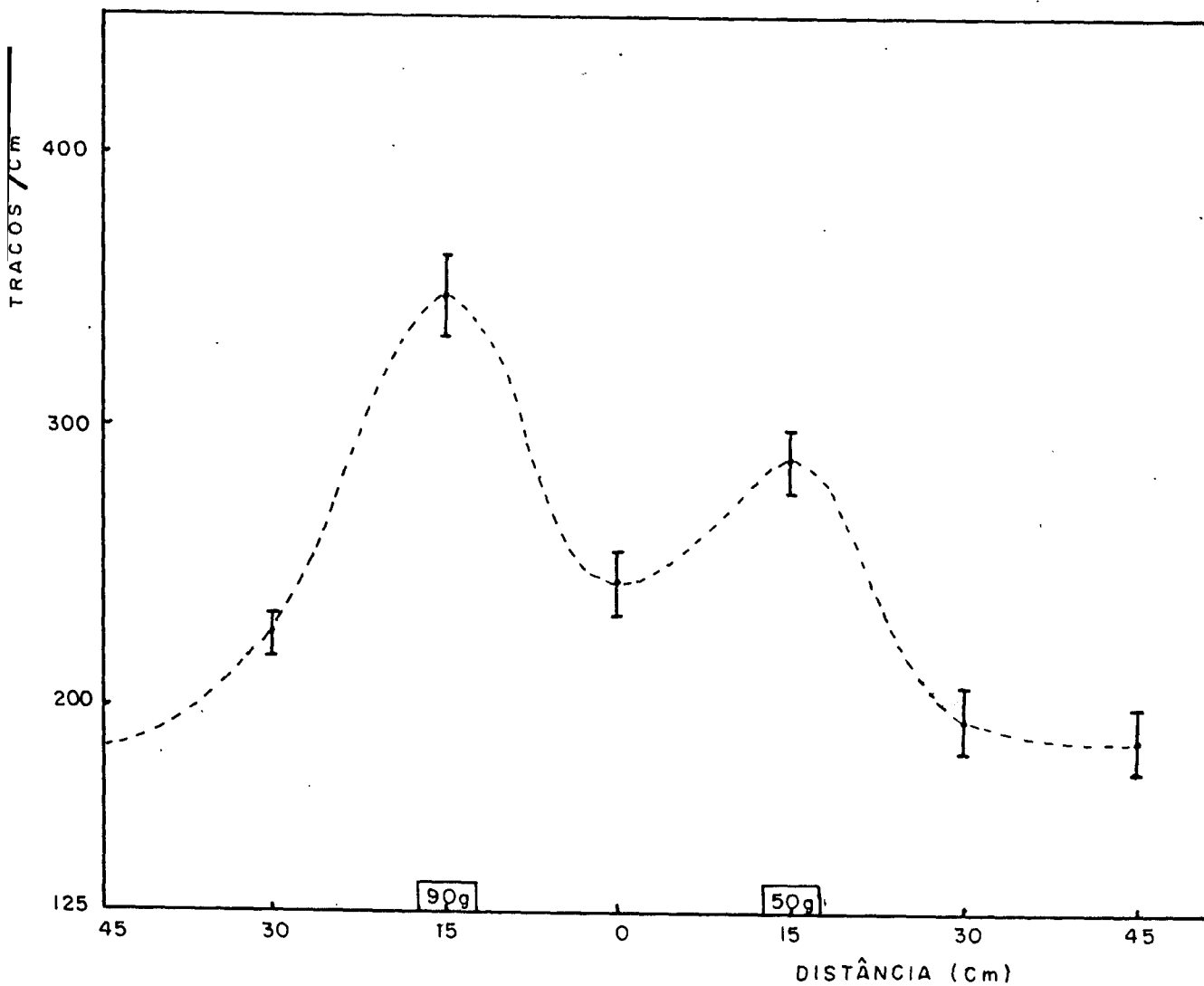


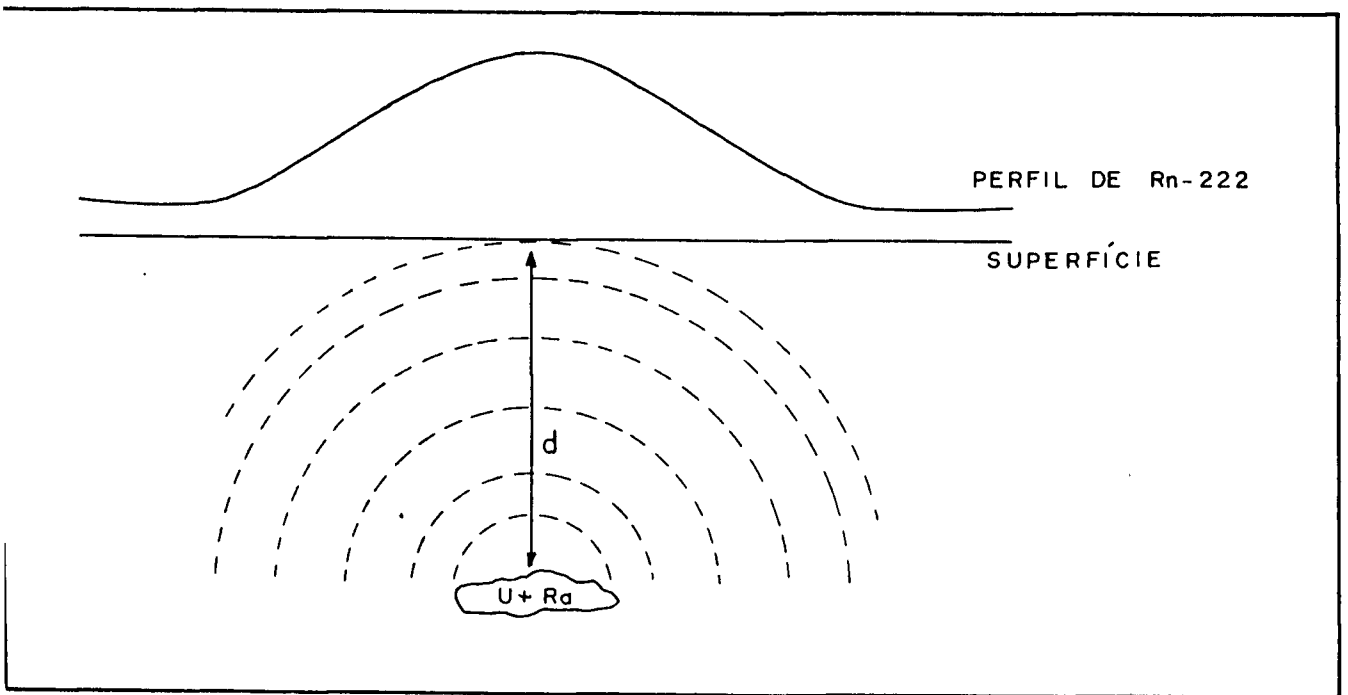
Gráfico V.1.1.2- Densidade de traços em função da posição de colocação dos detectores no caixote de areia, contendo 2 massas de U_3O_8 .

Os resultados foram coerentes, mostrando uma boa resolução entre os dois picos, obtidos nas posições logo acima das duas massas de U_3O_8 utilizadas, considerando a pequena distância existente entre elas. O pico maior correspondeu à posição acima da maior massa, e o valor intermediário entre os dois picos foi maior do que os valores à direita ou à esquerda destes picos, pois recebeu influência das duas massas de U_3O_8 .

Apesar dos dois resultados terem sido satisfatórios, eles são válidos apenas dentro da escala de laboratório utilizada, e, sem dúvida, a interpretação dos resultados, em medidas de campo, pode ser bastante dificultada por condições especiais locais.

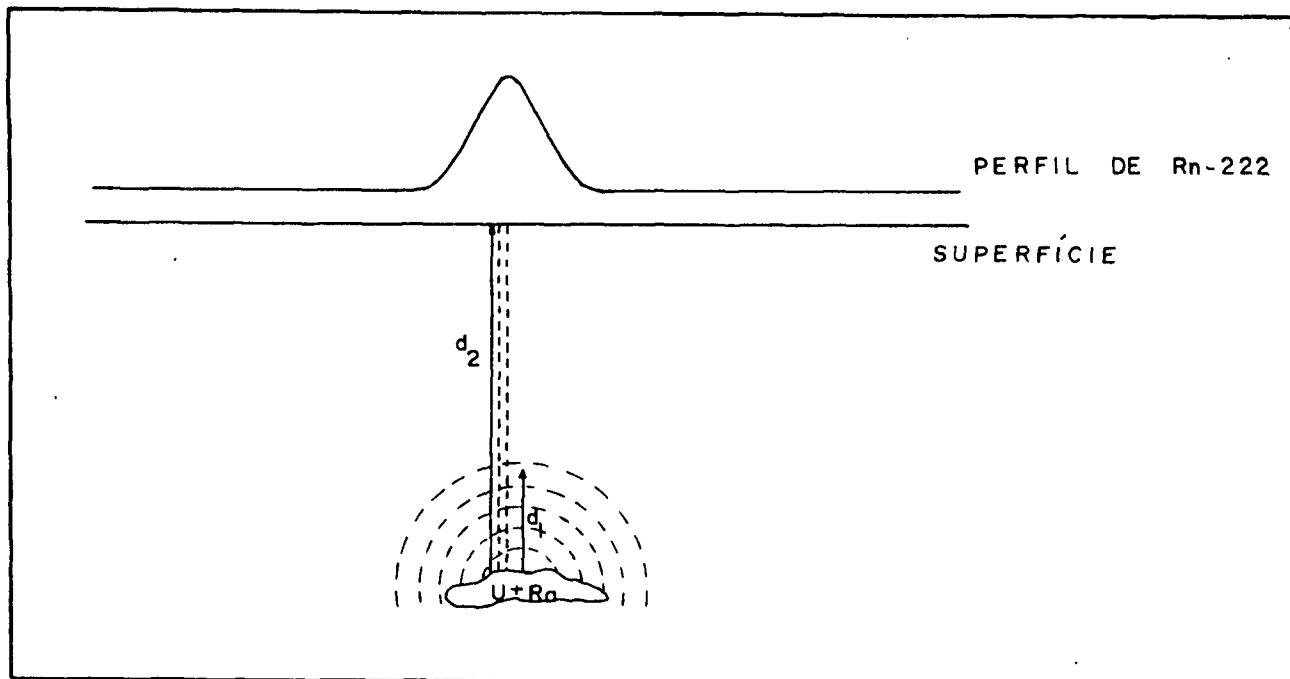
Algumas destas situações estão esquematizadas nos exemplos seguintes. Estes, por sua vez, não têm o objetivo de serem completos, mas servem apenas como uma análise de possíveis situações⁽³²⁾:

a)



Esta é uma situação ideal. A distância percorrida pelo gás por mecanismos de difusão e/ou transporte, d , permite que os sinais oriundos da mineralização de urânio cheguem até a superfície, produzindo um perfil da concentração do gás com um ponto de máximo (maior densidade de traços), que indica a posição da jazida abaixo deste ponto.

b)

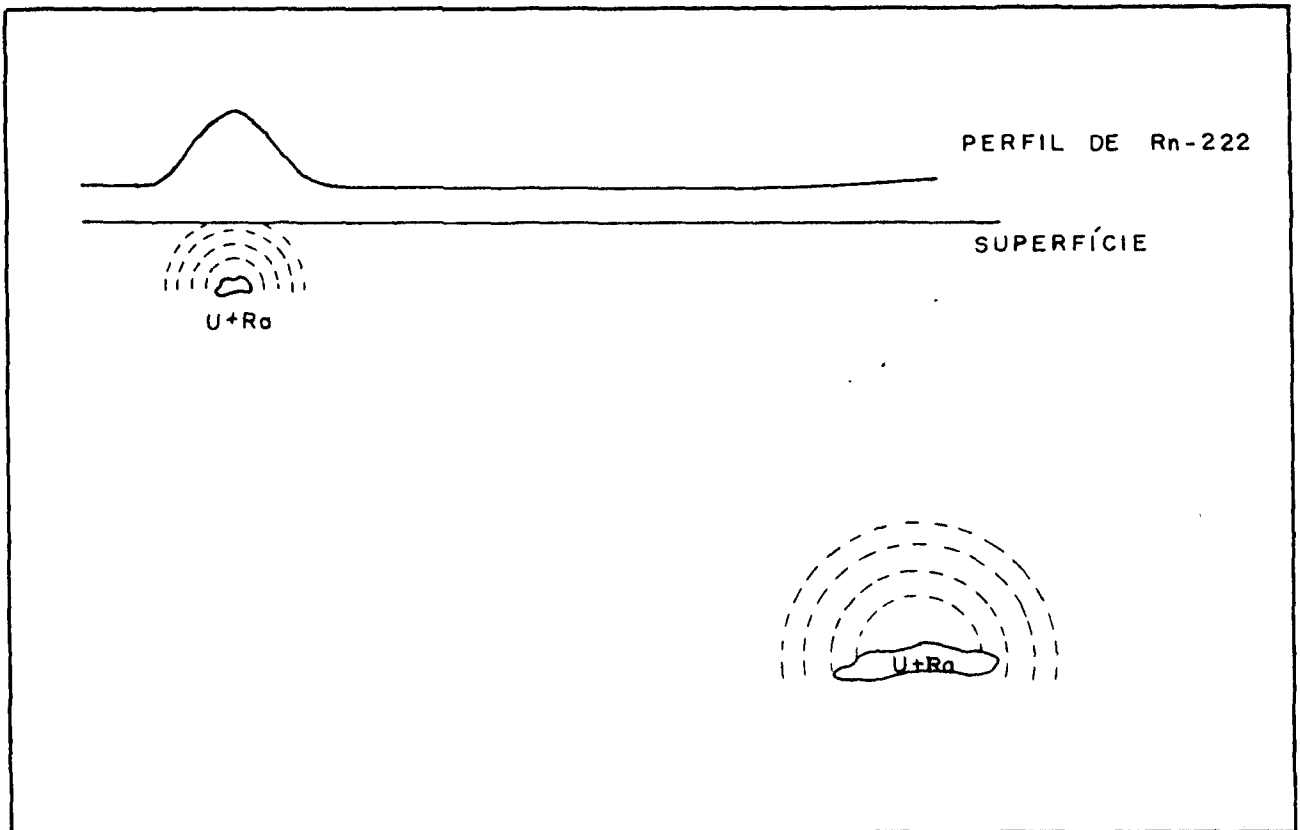


Nesta situação, a distância percorrida pelo radônio por meio de mecanismos de difusão, d_1 , não permite que os sinais liberados pelo minério de urânio cheguem até a superfície, onde estão os detectores. Mas, devido a algum mecanismo de transporte, suficiente para transportar o gás por uma distância d_2 , os sinais são detectados na superfície.

Considerando, por exemplo, o mecanismo de transporte discutido no capítulo III, o ponto de máximo no perfil de radônio estará localizado nas áreas de fluxo ascendente do gás. Pode-se esperar então um perfil menos alargado do que no caso (a).

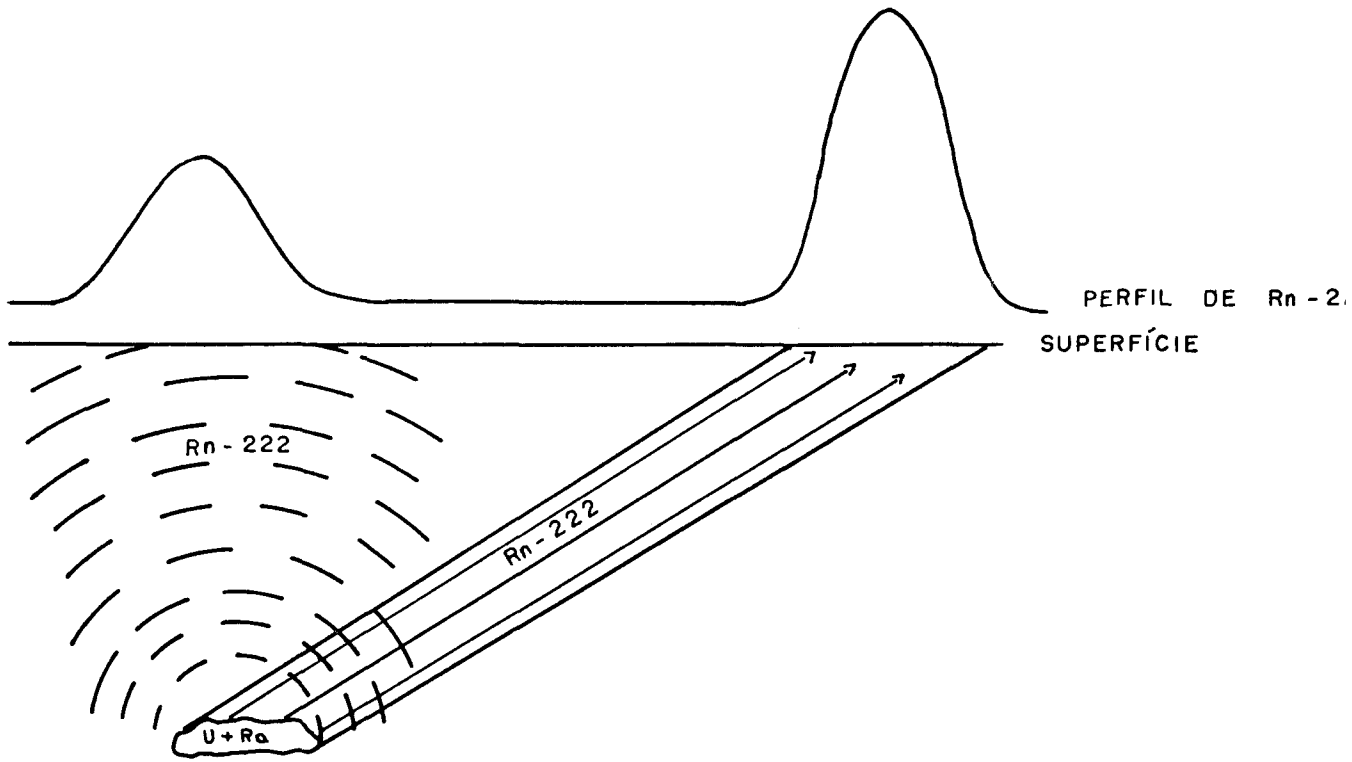
Esta é uma situação bastante interessante pois é neste caso que sinais originados a grandes profundidades, onde os fenômenos de difusão não são importantes para o movimento do gás até a superfície, podem ser detectados na superfície, indicando a posição de mineralizações profundas.

c) (



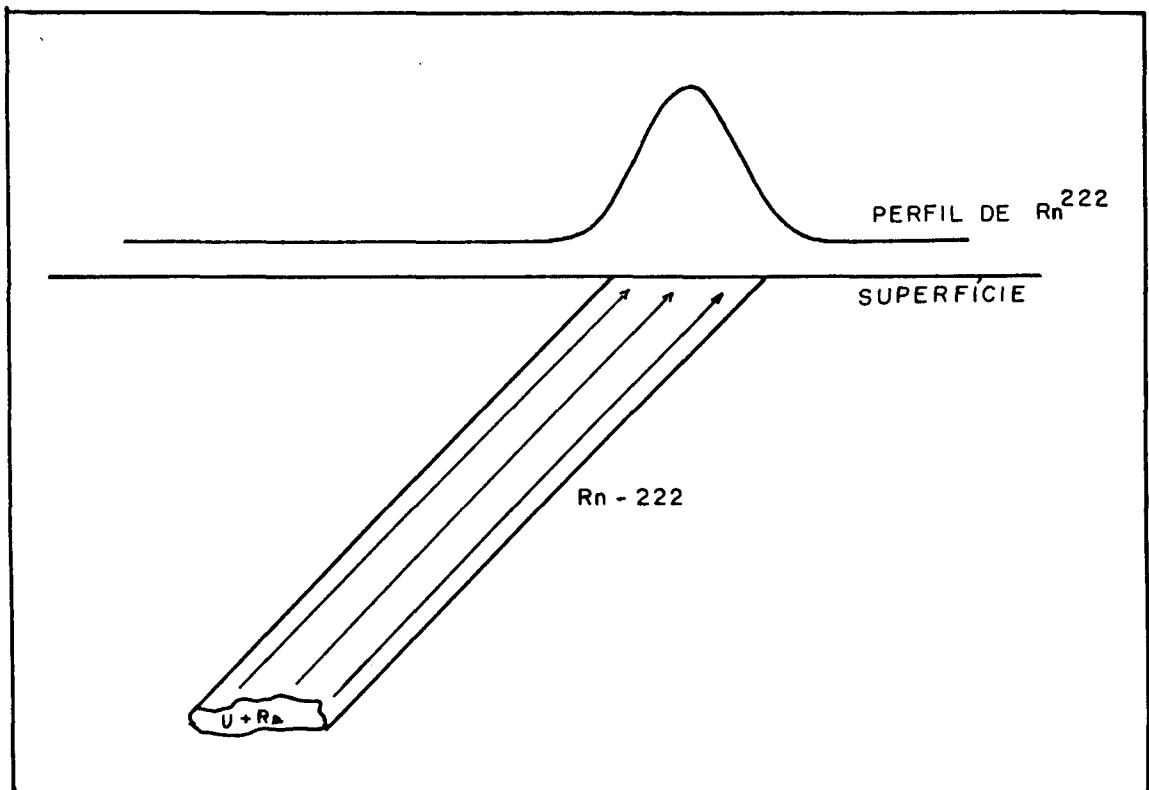
Nesta situação os sinais produzidos pelo minério de urânio não podem chegar até a superfície, nem por processos de difusão nem de transporte.

Pode ter ocorrido por algum processo, por exemplo, transporte através de águas subterrâneas, a migração de uma pequena fração do urânio, alojando-se numa posição capaz de produzir sinais detectáveis na superfície. A distância de migração pode ser bastante extensa, dependendo do processo envolvido. Deste modo, o perfil superficial de radônio não indicará a posição do minério logo abaixo e nem nas imediações, dependendo da distância de migração.



Neste caso as distâncias percorridas pelo gás, por processos de difusão e/ou transporte, são compatíveis com a distância entre o minério e a superfície. Assim, obter-se-á um perfil de radônio logo acima da posição do minério. Devido a presença de uma falha no terreno, provocando variações nos parâmetros do solo (por exemplo, coeficiente de difusão), o fluxo do radônio pode ser favorecido na direção da falha, fornecendo uma concentração superficial do gás muito maior. Deste modo, pode-se julgar de maneira errônea a posição da jazida.

e)



Trata-se de uma situação parecida com a anterior. A obtenção do perfil logo acima da jazida é impossibilitada, pois a distância percorrida pelo gás por difusão e/ou transporte é menor que a profundidade em que se encontra o minério. Novamente a presença da falha no terreno poderá favorecer o fluxo do radônio até a superfície. A interpretação do perfil irá indicar uma falsa localização do minério.

V.1.2) VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE TRAÇOS EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DE AREIA UTILIZADA, PARA A DIFUSÃO DO RADÔNIO-220

Considerando processos de difusão, a distância percorrida pelo radônio pode ser representada pelo seu caminho livre médio λ , definido no capítulo III.

Os valores de λ para o Radônio-220 são da ordem de alguns centímetros nos diversos tipos de solos (tabelas III.2.2).

Para a verificação do valor de λ do Radônio-220 em areia, foram preparados diversos tubos contendo a mesma massa de ThO_2 (3g) e sobre estas massas foram colocadas diferentes espessuras de areia de construção, previamente peneiradas (peneira: USBS=25 TYLER-24). Em um destes tubos não se colocou areia, de modo a fornecer a concentração do gás, em termos de densidade de traços, com espessura zero de areia. Sobre estes tubos foram colocados os detectores que permaneceram 6 dias em exposição.

Os resultados obtidos foram normalizados e encontram-se no gráfico V,1.2.

Os resultados mostraram um decréscimo exponencial na densidade de traços em função da espessura da areia utilizada, ocorrendo uma diminuição de $\frac{1}{e}$ dos sinais com 3,5cm de areia.

Pretende-se pesquisar, futuramente, a construção de membranas, por exemplo, fabricadas com areias puras (sem U ou Th), para a eliminação dos sinais provenientes do tório, permitindo somente que os sinais do Radônio-222 sejam monitorados, aproveitando a diferença entre as meias vidas dos dois isótopos. Desta maneira estas membranas poderiam ser construídas com uma tal impedância de modo a barrar quase todos os sinais do Radônio-220, deixando passar somente sinais do Radônio-222.

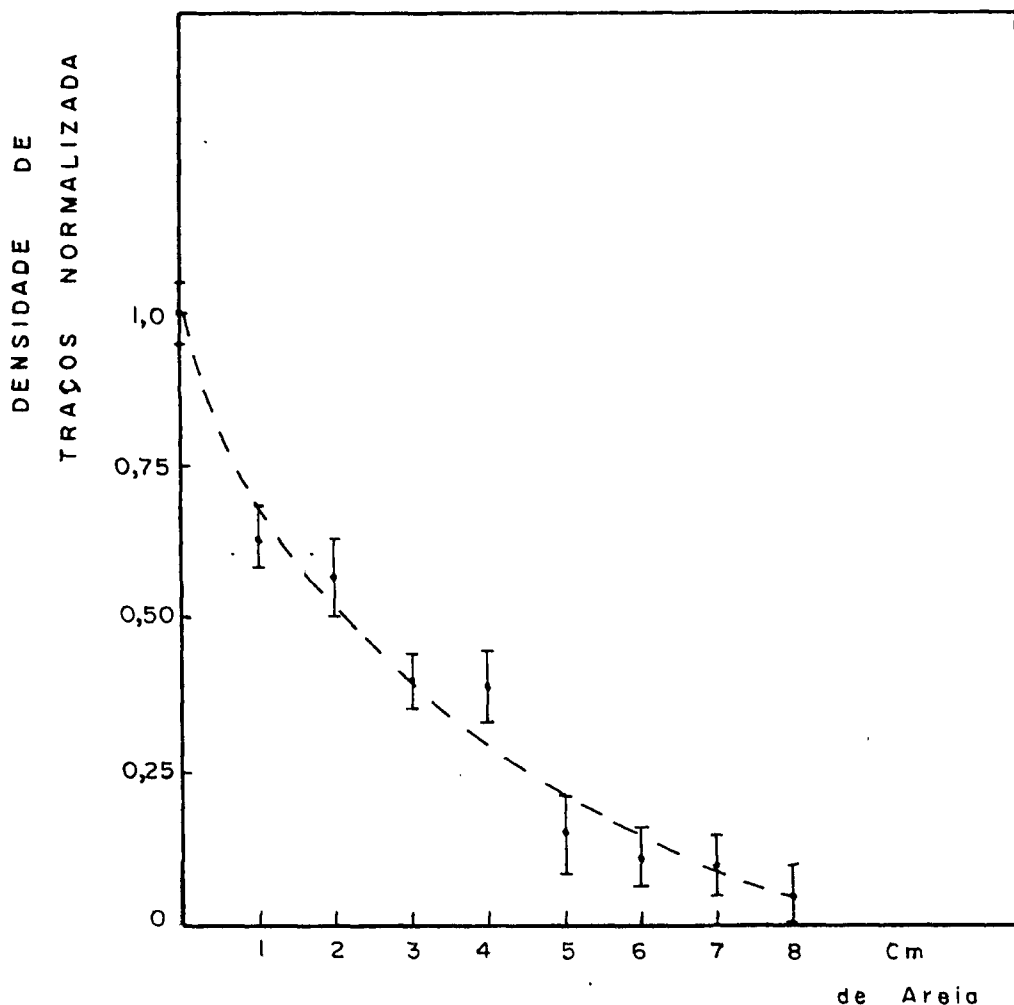


Figura V.1.2- Densidade de traços normalizada em função da espessura de areia utilizada. A concentração inicial de Radônio-220 é diminuída por um fator $1/e$ após atravessar 3,5cm de areia.

V.2) MEDIDAS DE CAMPO

Algumas medidas de campo foram realizadas em terrenos do IPEN e na cidade de Itapeccerica da Serra, para a observação do comportamento dos detectores.

V.2.1) VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE TRAÇOS EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE NO SOLO EM QUE FORAM COLOCADOS OS DETECTORES

Diversos buracos, com profundidades de 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 210cm foram abertos em terreno do IPEN, com o auxílio

lio de cavadeiras, e em cada um deles foi colocado um detector. Os buracos foram tampados para minimizar a influência externa.

Durante a abertura dos buracos foram colhidas amostras dos mesmos (terra) para cada profundidade. Estas amostras foram secas e homogeneizadas para posterior análise do conteúdo de urânio e tório, pelo método da "análise por ativação com nêutrons epitérmicos", feita na Área de Radioquímica do IPEN.

Os detectores permaneceram em exposição durante 30 dias.

Os resultados, tanto das densidades de traços obtidas, como das concentrações de tório e urânio, em função da profundidade dos buracos encontram-se no gráfico V.2.1.1.

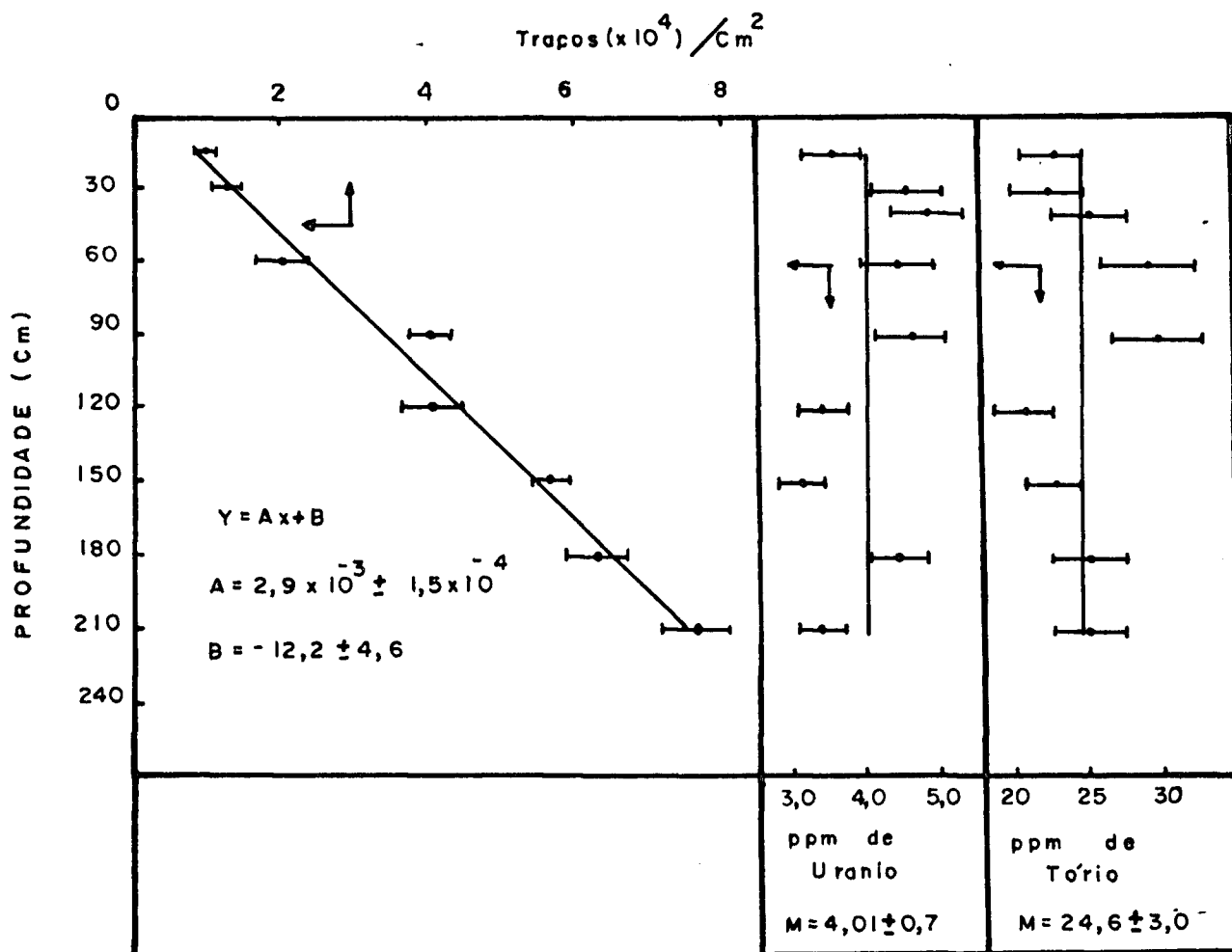


Gráfico V.2.1.1- Densidade de traços e teor de urânio e tório em função da profundidade dos buracos em que foram colocados os detectores.

Verificou-se um aumento da densidade de traços em função da profundidade dos buracos. Não foi possível fazer buracos mais profundos com o equipamento disponível, o que seria interessante para tentar relacionar os resultados obtidos com os modelos de difusão e/ou transporte mencionados no capítulo III. A concentração tanto de urânio como de tório manteve-se constante ao longo da profundidade com um valor médio de 4,0ppm de urânio e 24,6ppm de tório.

Pode-se supor, a partir destes dois resultados, que os sinais de radônio obtidos não devem ser devido somente às concentrações locais de urânio e/ou tório, mas devem estar sendo produzidos a maiores profundidades, o que explicaria o aumento da densidade de traços em função da profundidade.

Aproveitou-se também estes buracos para fazer uma comparação entre os filmes LR-115 normal e os filmes CA 8015, comparação esta que poderia resultar diferente daquela feita em laboratório com fontes de U_3O_8 , descrita no capítulo IV, pois nas medidas de campo existe a presença do Radônio-220 e filhos, já que os dois filmes possuem eficiências que variam diferentemente com a energia das partículas alfa incidentes. Em cada um dos buracos foi colocado um detector com o filme LR-115 e um detector com o filme CA 8015 que permaneceram em exposição durante 30 dias.

O gráfico V.2.1.2 mostra a relação entre as duas densidades de traços obtidas em cada buraco.

A melhor reta obtida mostrou uma eficiência maior para o CA 8015 de 1,45 vezes em relação ao LR-115 normal, valor este não muito diferente de 1,7 obtido no capítulo IV.

V.2.2) REPRODUTIBILIDADE DO MÉTODO

Diversas medidas foram efetuadas em campo ao longo de vários meses, para a verificação da reprodutibilidade dos resultados obtidos.

Foram abertos, em terreno do IPEN, 4 buracos com 60cm de profundidade, distantes entre si 2 metros, formando um quadrilátero. Detectores foram colocados, permanecendo 30 dias em exposição. Após a retirada dos mesmos, novos detectores foram colocados completando medidas ao longo de quatro meses.

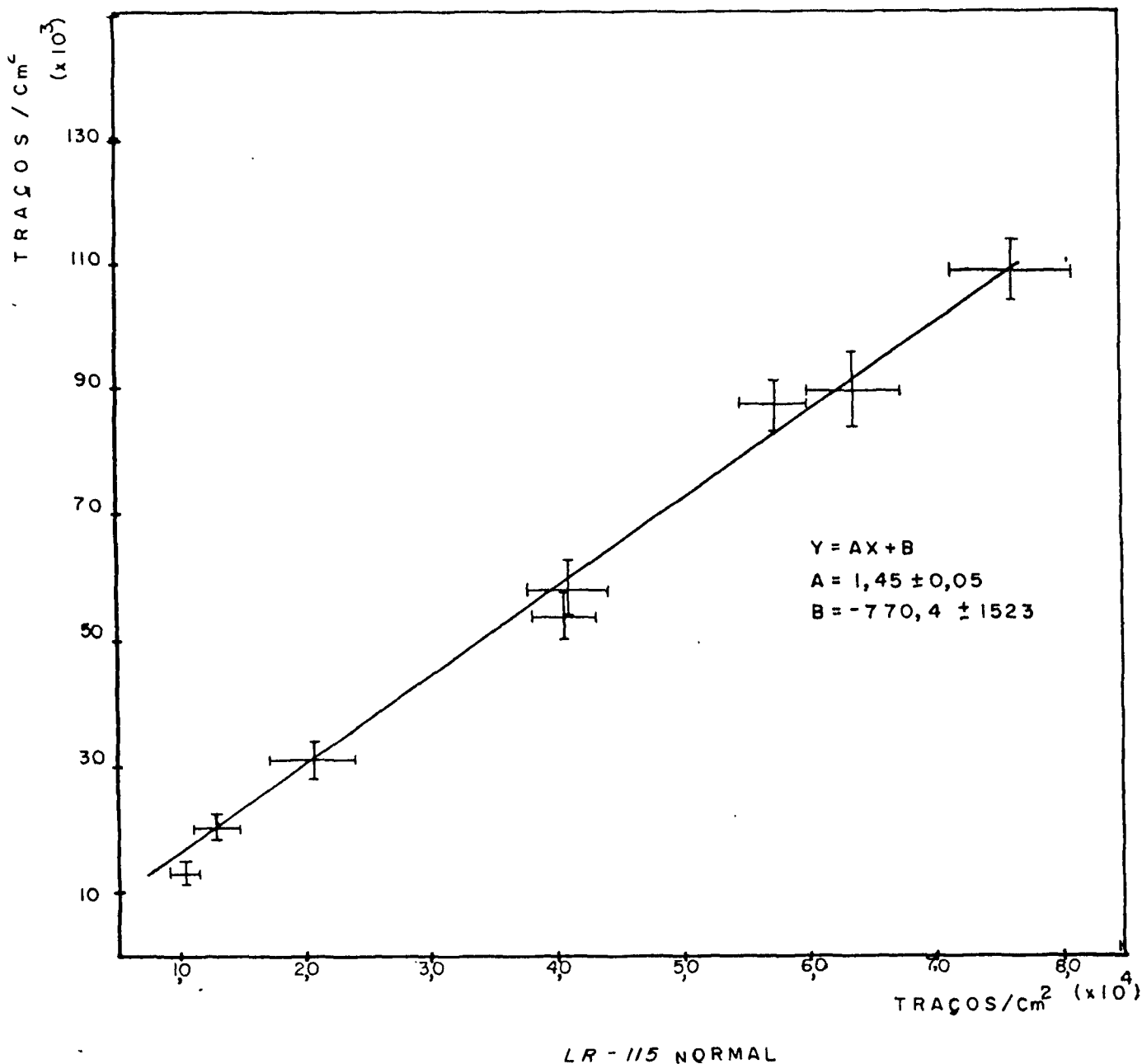


Gráfico V.2.1.2- Comparação entre os filmes LR-115 normal e o CA 8015 em medidas realizadas em campo. O filme CA 8015 mostrou-se mais eficiente por um fator 1,45.

Os resultados destas medidas encontram-se nos gráficos V.2.2a e V.2.2b relacionando respectivamente os resultados de cada buraco, e a média destes 4 buracos em função das datas das medidas. Nestes gráficos estão também colocados os valores médios de temperatura, pressão e chuvas durante o período em questão, na Cidade Universitária (SP)⁽³¹⁾.

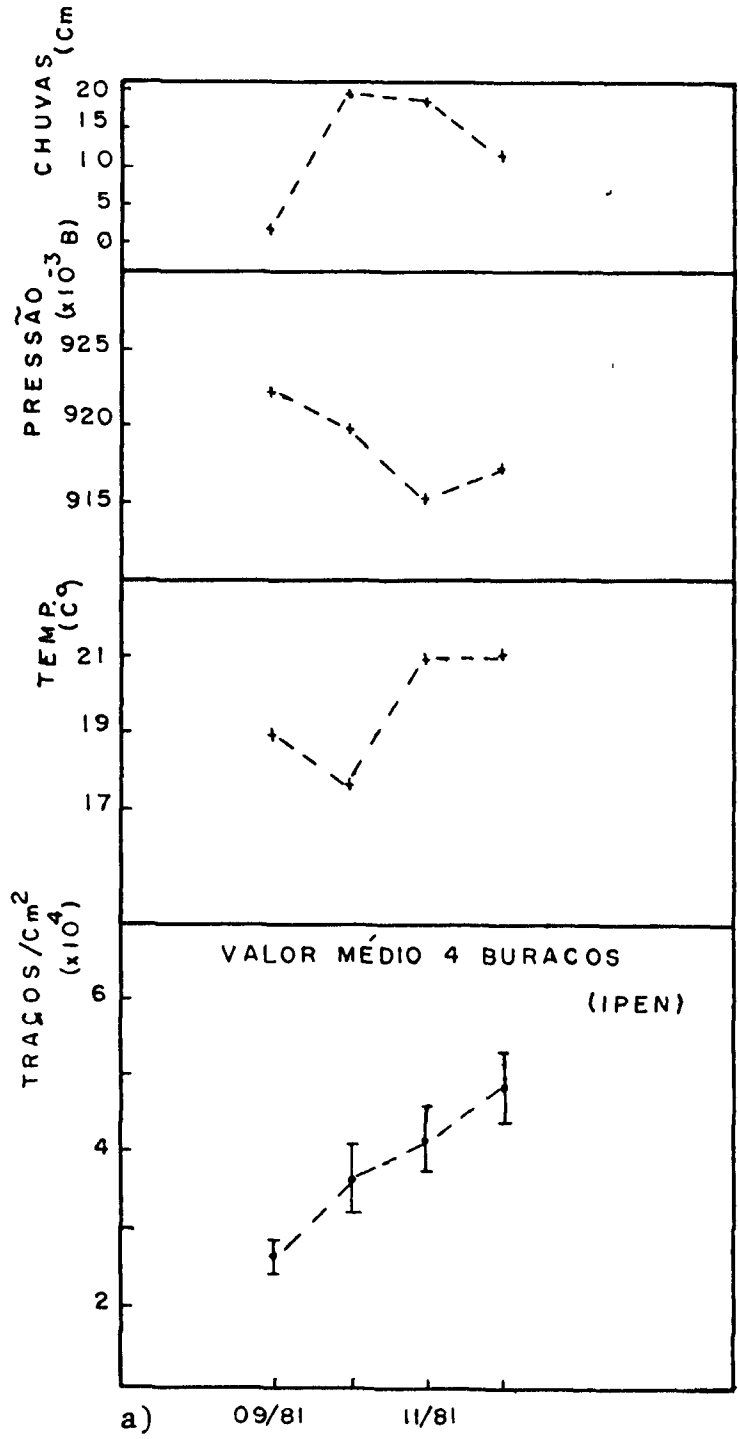
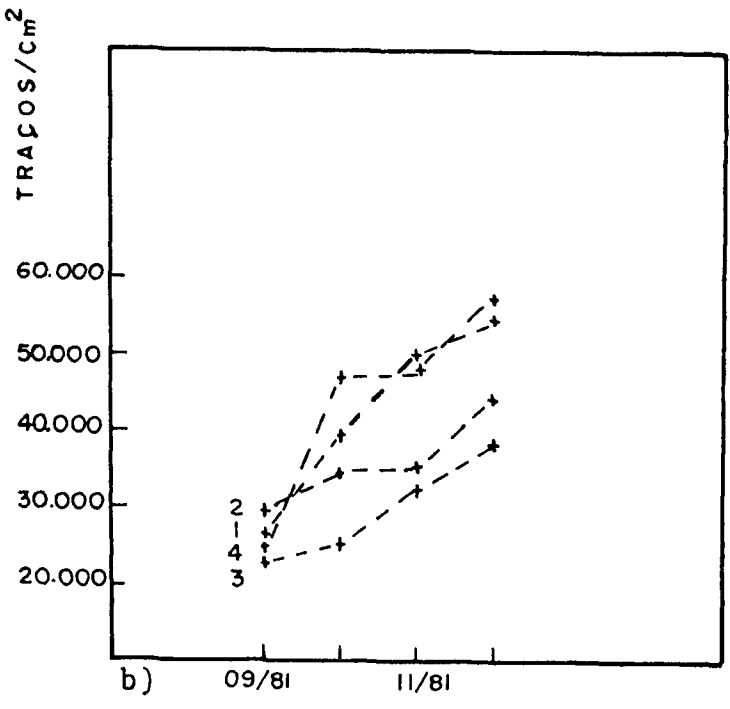


Figura V.2.2-Verificação da reprodutibilidade do método em medições realizadas em terreno do IPEN ao longo de 4 meses. Valores médios de alguns parâmetros climáticos, durante o período de medições estão indicados.

- a) valor médio da densidade de traços dos buracos.
- b) valores individuais das densidades de traços de cada buraco.



Observou-se um aumento crescente da densidade de traços ao longo do período de medidas, ocorrido simultaneamente nos 4 detectores. Nenhum dos parâmetros climáticos considerados por si sô, mostrou um comportamento que permitisse a correlação com os resultados obtidos:

- os valores relacionados à ocorrência de chuvas mostraram primeiro um aumento da ordem de 10 vezes para depois sofrer uma diminuição por um fator de 5 vezes;
- os valores da temperatura sofreram uma diminuição de 7% da primeira para a segunda medida, para depois aumentarem em 9% nas duas medidas seguintes;
- o valor da pressão média decresceu da primeira para a terceira medida, para depois sofrer um ligeiro aumento da terceira para a quarta medida.

Um experimento similar foi realizado na cidade de Itapeçerica da Serra (região esta onde foram detectadas concentrações de radônio em águas⁽³⁰⁾ para a verificação da reprodutibilidade das medidas ao longo do mesmo período.

Os resultados obtidos encontram-se no gráfico V.2.2.2 mostrando a densidade média dos traços dos buracos em função do período das medidas.

Não foi possível obter os valores dos parâmetros climáticos desta região.

O valor médio da concentração de urânio e tório neste local foi de 12,4ppmU e 16ppmTh, maiores que os valores encontrados no IPEN, e que podem explicar as diferenças nas densidades de traços encontradas nas duas regiões.

Observou-se em todos os detectores, a presença de gotículas de água sobre a superfície dos filmes, ao serem os mesmos retirados após o tempo de exposição. Estas gotas certamente prejudicam a eficiência de detecção, pois são suficientes para barrar as partículas alfa emitidas pelo radônio e filhos⁽²⁶⁾.

Assim, verificou-se tanto no terreno do IPEN como em Itapeçerica da Serra uma variação nas medidas da concentração de radônio ao longo dos meses. Conforme se observou, a influência de cada parâmetro climático, separadamente, não pode explicar o comportamento das medidas e, a presença das gotículas de água sobre os detectores parece ser um fator de erro experimental. Deste modo, no

ITAPECERICA DA SERRA

MÉDIA 3 BURACOS

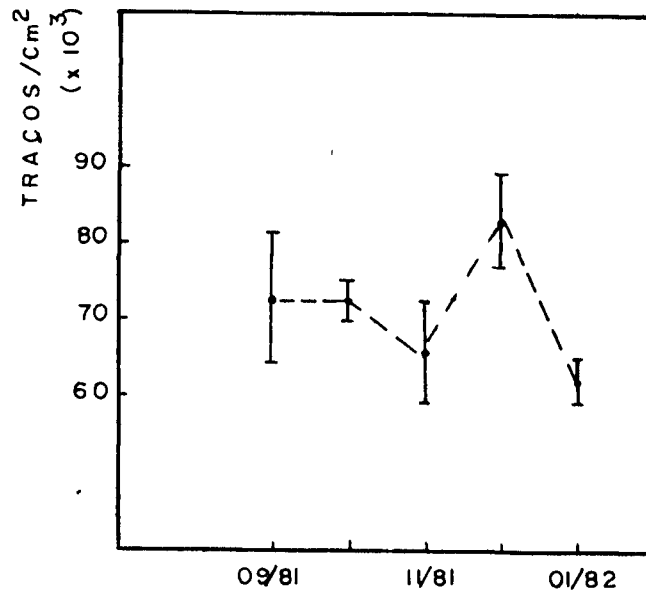


Gráfico V.2.2.2- Verificação de reprodutibilidade do método em medidas realizadas na cidade de Itapecerica da Serra. Os resultados são mostrados em termos da média dos valores dos buracos individuais durante o período de medidas.

ta-se a necessidade, de serem feitos estudos mais completos a respeito da reprodutibilidade do método, incluindo a possibilidade da utilização de membranas que não permitam a entrada de umidade no interior dos copos, garantindo assim um menor erro experimental.

V.3) VERIFICAÇÃO DOS SINAIS PRODUZIDOS PELO URÂNIO E TÓRIO SUPERFICIAIS

Nas medidas realizadas pelo método de detectores de traços, dois tipos de sinais são detectados: sinais distantes produzidos pelo minério de urânio e/ou tório a grandes profundidades, que por meio de processos de difusão e/ou transporte chegam até os detectores, e sinais locais, produzidos pelas concentrações superficiais destes minérios. O termo concentrações superficiais se refere às quantidades de minérios próximos aos detectores.

Pode-se, por meio de medidas feitas em laboratório, verificar a contribuição dos sinais locais, relativamente aos valores dos sinais totais obtidos em medidas de campo. Para isto, coletou-se dos 4 buracos feitos em terreno do IPEN amostras de terra, compactando-as em pequenos potes de plástico de modo a manter a mesma densidade inicial. Em seguida, detectores foram colocados sobre estes potes, ficando em exposição durante 30 dias (figura V.3.1).

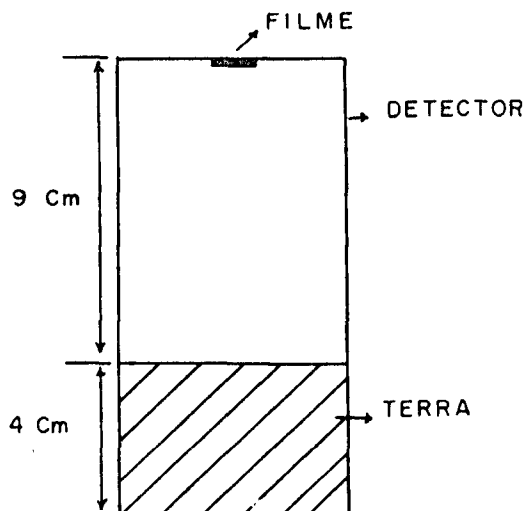


Figura V.3.1- Esquema utilizado para a verificação dos sinais produzidos pelo urânio e tório superficiais em laboratório.

As densidades de traços obtidas desta maneira representam a contribuição total dos traços referentes ao tório, pois os 4 cm de terra utilizados são da ordem dos valores de λ (tabela III) para o Radônio-220, além de representarem a contribuição dos traços referentes ao urânio superficial.

Os resultados obtidos nos 4 buracos foram:

<u>Buraco</u>	<u>Densid. traços (traços/cm²)</u>	<u>% em relação ao total obtido em 11/81</u>
1	5760 ± 721	11,6%
2	5280 ± 579	14,9%
3	2618 ± 471	8,0%
4	3125 ± 876	6,4%

Assim, supõe-se que de 6 a 15% dos sinais totais obtidos nestas medidas de campo são provocados pelo tório e pelo urânio superficial.

V.4) MAPEAMENTO DE UMA REGIÃO

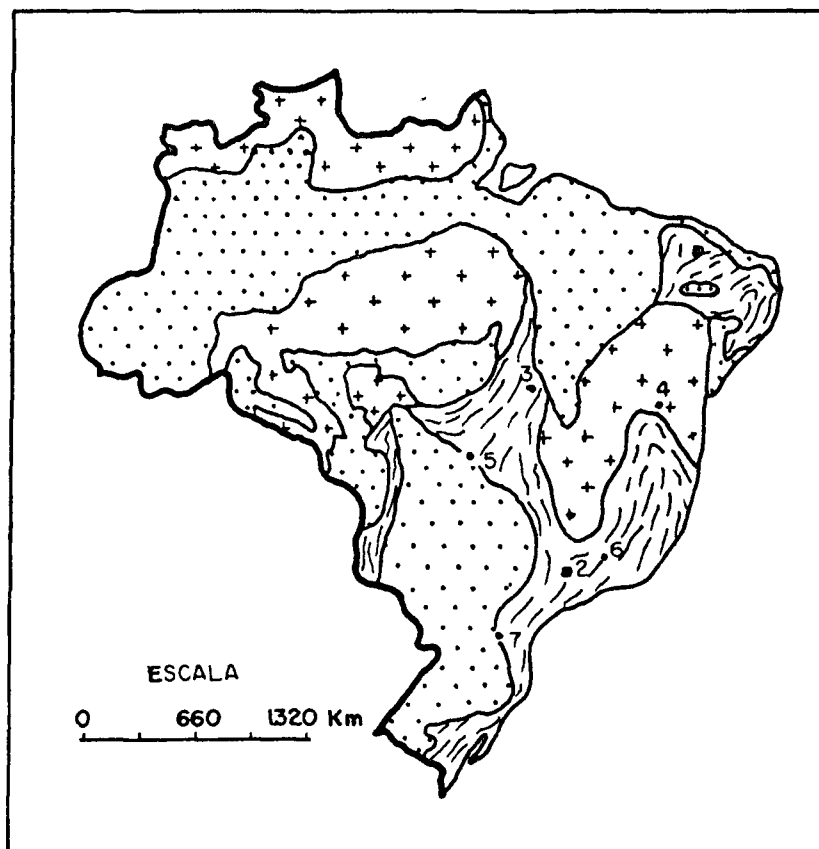
Depois dos experimentos feitos em laboratório e das medidas obtidas em campo, foram realizadas medidas numa região com conhecida mineralização de urânio com o intuito de verificar as possibilidades destes detectores em aplicações práticas na prospecção de urânio.


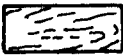
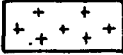
O Brasil possui diversas regiões com conhecidas mineralizações de urânio, conforme mostra o mapa V.4.1.

Foi possível termos acesso à região da cidade de Caetité (Ba), Projeto Lagoa Real, região esta com conhecida mineralização de uraninita associada a uma forte albitização. A formação desta mineralização tem sido atribuída aos fluídos originados durante a fase de reativação de uma plataforma antiga. A idade calculada da uraninita é de 820 milhões de anos, enquanto que as rochas do campo possuem 2.500 milhões de anos⁽¹⁶⁾. Nesta área existem diversas regiões anômalas que estão sendo estudadas pela NUCLEBRÁS.

Para a colocação dos detectores, com a finalidade de realizar o mapeamento de uma região, escolheu-se a anomalia 09 devido a facilidade de se chegar até ela e devido a pequena quantidade de rochas aflorantes portadoras do minério, facilitando a abertura dos buracos.

Para a confecção da malha aproveitou-se a linha de base, assim como as linhas perpendiculares a ela, já existentes no local.



	BACIAS SEDIMENTARES	DEPÓSITOS DE URÂNIO
	CINTURÃO DOBRADO DO BRAZILIANO	1 - ITATAIA
	ÁREAS CRATÔNICAS PRÉ-BRAZILIANAS	2 - POÇOS DE CALDAS
		3 - RIO PRETO
		4 - LAGOA REAL
		5 - AMORINÓPOLIS
		6 - QUADRILÁTERO FERRÍFERO
		7 - FIGUEIRA

Mapa V.4.1- Principais mineralizações de urânio do Brasil.

A distância entre as linhas perpendiculares é de 80 metros. Com o auxílio de uma corda fez-se medidas de 100 em 100 metros em cada uma destas linhas, definindo as posições dos buracos, cinco para cada linha. Foram escolhidas dez destas linhas e, portanto, o número de detectores utilizados foi cinquenta. Com o auxílio de cavadeiras foram abertos os 50 buracos, cada um com 60cm de profundidade, e em cada um deles foi feita uma medida superficial por meio de um cintilador portátil. Em seguida foram colocados os detectores, tampados os buracos e marcados para uma posterior localização (figura V.4.1).

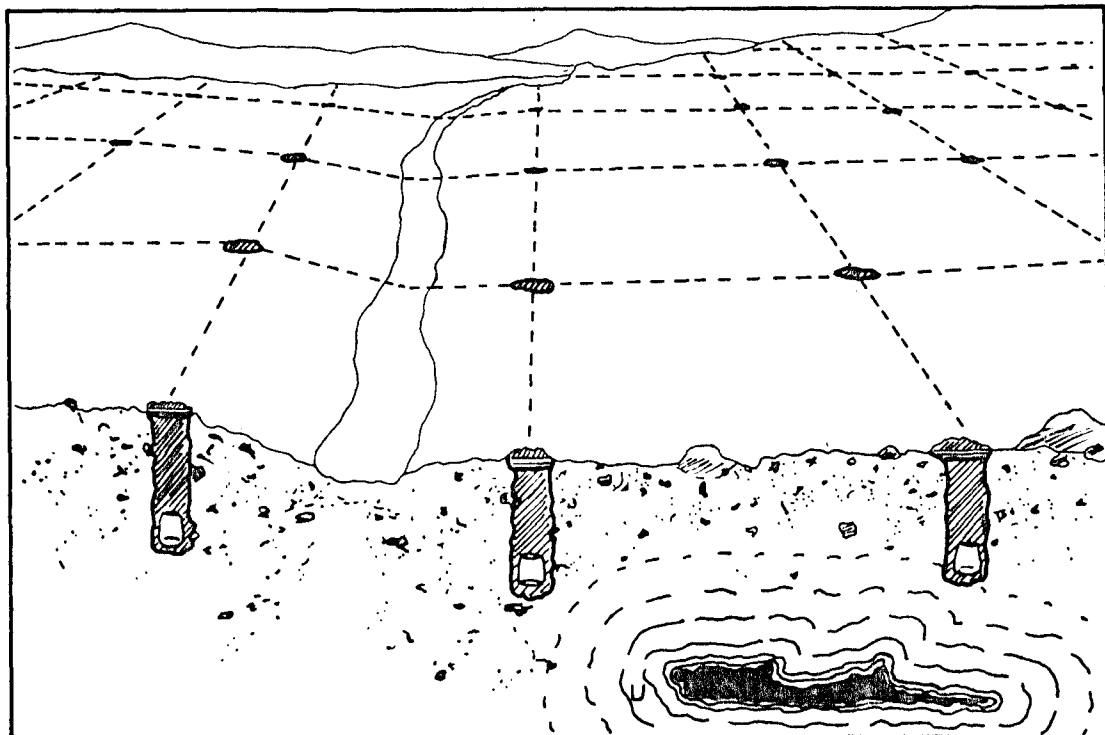


Figura V.4.1- Esquema de uma malha, para a realização do mapeamento de uma região. Os detectores são alojados em buracos abertos nos solos que por sua vez são tampados e marcados para uma posterior localização.

Os filmes utilizados foram do tipo CA 8015 e permaneceram em exposição durante 14 dias (devido a grande quantidade de urânio existente na região este tempo foi o suficiente para não causar valores de densidades de traços superiores ao máximo que pode ser contado, conforme citado no capítulo IV).

Não houve perdas de filmes apesar da ocorrência de chuvas. Quase todos os filmes estavam com gotículas de água quando foram retirados.

Os filmes foram revelados e as densidades de traços contidas em cada um deles estão mostradas na figura V.4.2.

O valor mais baixo da densidade de traços na malha, que corresponde a $166 \text{ traços/mm}^2/14 \text{ dias}$ foi normalizado para 1,000. Os

números colocados entre parênteses servem para localizar a posição do buraco dentro da malha.

Na figura V.4.3 estão colocados os resultados obtidos pelo método cintilométrico. O valor mais baixo encontrado, correspondendo a 80dps foi normalizado para 1,00.

Os resultados dos dois métodos mostraram 5 posições dentro da malha em que ocorreram as mais altas contagens cintilométricas ou mais altas densidades de traços. Estas posições estão localizadas nos pontos: (81), (62), (52), (04) e (03). Pelo método cintilométrico estas cinco posições possuem, respectivamente, os valores normalizados de 5,13; 4,50; 10,63; 4,00 e 4,13. Pelo método dos detectores de traços estes valores são, respectivamente, 17,922; 21,145; 48,193; 14,729 e 9,506.

Observa-se portanto uma variação muito maior, obtida pelo método de detectores de traços entre o menor valor encontrado (normalizado para 1) e os valores dos pontos especiais considerados, realçando-os mais.

Para uma melhor visualização dos resultados, foram construídos mapas, mostrando curvas de nível dos valores obtidos em cada um dos dois métodos empregados, da anomalia estudada. Estes mapas foram feitos com o auxílio do programa de computador SYMAP⁽¹⁹⁾. Pode-se ver claramente nestes mapas a presença de 3 regiões com valores máximos, representados pelos pontos (81); (62)+(52) e (03)+(04).

No caso do método cintilométrico, estas três regiões em questão estão ilhadas por valores entre 1,00 e 2,00.

No caso do método de detectores de traços parece existir uma ligação entre estas três regiões por valores maiores que 4,0 conforme pode ser visto no mapa V.4.2.

Pode-se até supor que esta ligação entre as três ilhas contenha o minério a maiores profundidades, produzindo um perfil de radônio superficial menor, e desta forma o método se mostrou apto para mostrar a silhueta do corpo de minério, o que não ocorreu com o método cintilométrico. Esta suposição não pode ser comprovada por falta de mapas geológicos indicativos da direção e profundidade do minério desta região.

Uma amostra de material foi colhida do buraco (42) para a verificação da contribuição dos traços devida ao urânio e ao tório superficiais, conforme descrito no item V.3. Após o tempo de expo

Figura V.4.2-

ANOMALIA 9

MÉTODO: CINTILOMÉTRICO

		100m						
80m		1,25	1,75	1,38	1,63	1,63	320° AZIM. GEOG.	
	x	x	x	x	x	x		
	(91)	(92)	(93)	(94)	(95)			
	5,13	1,63	1,38	1,63	1,63			
	x	x	x	x	x			
	(81)	(82)	(83)	(84)	(85)			
	1,88	1,63	1,38	1,50	1,75			
	x	x	x	x	x			
	(71)	(72)	(73)	(74)	(75)			
	1,63	4,50	1,50	1,50	1,50			
	x	x	x	x	x			
	(61)	(62)	(63)	(64)	(65)			
	1,63	10,63	1,63	1,38	1,50			
	x	x	x	x	x			
	(51)	(52)	(53)	(54)	(55)			
	1,25	3,25	1,88	1,88	1,50			
x	x	x	x	x				
(41)	(42)	(43)	(44)	(45)				
1,25	1,75	1,88	2,00	2,00				
x	x	x	x	x				
(31)	(32)	(33)	(34)	(35)				
1,25	1,13	2,00	1,88	1,88				
x	x	x	x	x				
(21)	(22)	(23)	(24)	(25)				
1,25	1,25	2,63	2,75	2,00				
x	x	x	x	x				
(11)	(12)	(13)	(14)	(15)				
1,00	1,25	4,13	4,00	2,50				
x	x	x	x	x				
(01)	(02)	(03)	(04)	(05)				

LINHA DE BASE

Figura V.4.3- ANOMALIA 9

MÉTODO: "DETECTORES DE TRAÇOS"

2,199	3,175	3,518	1,524	2,030	↑ 320° AZIM. GEOG.
x	x	x	x	x	
(91)	(92)	(93)	(94)	(95)	
17,922	4,211	1,325	2,952	3,964	
x	x	x	x	x	
(81)	(82)	(83)	(84)	(85)	
2,958	6,976	2,584	2,470	3,078	
x	x	x	x	x	
(71)	(72)	(73)	(74)	(75)	
3,048	21,145	2,633	2,145	4,096	
x	x	x	x	x	
(61)	(62)	(63)	(64)	(65)	
1,657	48,193	3,108	2,247	3,452	
x	x	x	x	x	
(51)	(52)	(53)	(54)	(55)	
1,283	7,331	4,434	4,880	1,675	
x	x	x	x	x	
(41)	(42)	(43)	(44)	(45)	
1,169	1,825	2,530	5,572	1,398	
x	x	x	x	x	
(31)	(32)	(33)	(34)	(35)	
1,524	1,235	4,861	4,899	3,880	
x	x	x	x	x	
(21)	(22)	(23)	(24)	(25)	
1,422	1,000	8,265	7,169	3,398	
x	x	x	x	x	
(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	
1,392	1,542	9,506	14,729	6,169	
x	x	x	x	x	
(01)	(02)	(03)	(04)	(05)	

↑
 LINHA DE BASE

NORMALIZAÇÃO: 166 traços/mm² 14d= 1,00

FILMES CA8015

sição de 14 dias obteve-se o valor normalizado de 0,770 em relação ao menor valor obtido em campo. Assim, os valores das densidades de traços obtidas na anomalia foram causados pelo Radônio-222, produzido em maiores profundidades, confirmando a presença de urânio no local.

A análise do material do buraco(62) mostrou 73,4ppm de urânio e 29,9ppm de tório.

O método mostrou-se, portanto capaz de detectar o radônio nesta região, indicando as melhores posições para a prospecção de urânio. Mostrou-se ainda mais sensível que o método cintilométrico e dentro do campo das suposições, provavelmente foi capaz de fornecer pormenores a respeito da orientação da mineralização dentro da malha.

CAPÍTULO VI

VI. CONCLUSÕES

O método descrito neste trabalho mostrou-se capaz de detectar o gás radônio, tanto em escala de laboratório como na região escolhida de Caetité (Ba), mapeando uma conhecida mineralização de uraninita. De uma maneira geral, o método apresenta algumas vantagens e desvantagens que podem ser relacionadas:

Desvantagens:

- 1) São necessárias pelo menos duas visitas ao local em estudo. O tempo decorrido entre a colocação dos detectores (abertura dos buracos, formação da malha), a posterior retirada e a devida revelação-contagem podem variar entre 4 e 6 semanas, dependendo das condições locais;
- 2) A técnica desenvolvida não distingue os sinais provenientes do Radônio-222 dos provenientes do Radônio-220; Assim, uma grande concentração superficial de tório pode atrapalhar os resultados quando se está interessado somente na busca do urânio. Conforme foi feito nos trabalhos de campo, as medidas dos sinais locais realizadas em laboratório (descritas no capítulo V), podem fornecer resultados que dão uma idéia da contribuição dos sinais do Radônio-220. Quando estes resultados forem surpreendentemente altos, pode-se então com o auxílio de cintilômetros espectrais verificar a origem dos sinais.

O problema dos sinais de torônio pode entretanto ser superado, melhorando a técnica de modo a excluir estes sinais. Isto pode ser feito utilizando membranas permeáveis que permitam somente a passagem de uma grande porcentagem de moléculas de Radônio-220 devido a grande diferença entre as meias vidas dos dois isótopos. Pretende-se, no futuro, realizar experimentos com este intuito, construindo estas membranas que podem ser por exemplo de areia, conforme discutido no capítulo V, melhorando, assim, sensivelmente o método;

- 3) O método pode indicar anomalias em áreas onde existem somente concentrações de rádio, apesar das possibilidades deste rádio não estar relacionado ao urânio serem muito pequenas⁽⁹⁾;
- 4) O uso da técnica deve ser encarada como qualitativa pois não é capaz de diferenciar a relação profundidade-teor do minério, podendo uma jazida rica e profunda produzir o mesmo perfil superficial de radônio de uma pobre e superficial.

Vantagens:

- 1) O método é razoavelmente pouco dispendioso e simples quanto à sua utilização, dispensando equipamentos eletrônicos especiais. A facilidade do uso da técnica permite a instalação dos detectores em áreas de difícil acesso, não havendo a necessidade de pessoal especializado para implantar e retirar os mesmos;
- 2) Obtém-se uma medida integrada média da concentração de radônio no solo, quando os detectores são deixados por algumas semanas em exposição, evitando as variações diárias estabelecidas pelos ciclos meteorológicos;
- 3) As anomalias obtidas podem significar "pontos quentes" já que a quantidade de radônio produzida pelo urânio em equilíbrio com os seus filhos é pequena. Por exemplo, 1 bilhão de gramas de urânio na rocha (650.000ton de minério à 0,2%) pode produzir $\sim 1,2 \cdot 10^{-5}$ g de radônio⁽⁹⁾.
- 4) Ao contrário de outros métodos, permite detectar mineralizações de urânio a grandes profundidades.

O método, quando aplicado numa região com conhecida mineralização de urânio, mostrou-se eficiente, podendo pois, ser aplicado em qualquer outra área em que haja suspeita da ocorrência do minério. A utilização deste método na prospecção de urânio, transformando os resultados obtidos em mapas de contorno indicando as localizações mais prováveis do minério poderá reduzir em muito as explorações por perfuração.

Desta forma, os objetivos iniciais propostos no trabalho, foram concretizados.

REFERENCIAS

- 1) ALTER, H.W.; GINGRICH, J.E. Uranium exploration with the Etch Track Etch Technique (Presented at the 45th annual International Meeting Society of Exploration Geophysicists Denver, Col. October 12-16, 1975).
- 2) BARRETTO, P.M. Recent developments in uranium exploration. In Int. At. Energy Agency Bull., 23(2):18-19, Jun. 1981.
- 3) BHATNAGAR, A.S. A study on the behaviour of radon in soil uranium exploration methods. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Uranium exploration methods: proceedings of a panel on... held in Vienna, 10-14 April, 1972. Vienna, 1973, p.219-35.
- 4) BULL, R.K. The use of solid state track detector in teaching I and II. Nucl. Tracks, 4: 115-22, 1980.
- 5) CESAR, M.F. & GERALDO, L.P. Studies of alpha particle registration in LR-115 type II. A solid state nuclear track detector. São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, jun. 1981 (IPEN-Pub-31).
- 6) CLEMENTS, W.E. & WILKENING, M.H. Atmospheric pressure effects on Rn-222 transport across the earth-air interface. J. Geophys. Res., 79(33):5025-9, Nov. 1974.
- 7) DAVID S. ROBERTSON & ASSOCIATES LIMITED. Study of results of Track Etch surveys at Poços de Caldas MG and Figueiras, PR Brazil. Toronto, Jan. 12, 1977.
- 8) ENGE, W. Introduction to plastic nuclear track detector. Nucl. Tracks, 4(4): 283-308, 1980.
- 9) FISHER, J.C. Application of Track Etch radon prospecting to Uranium deposits, front range, Colorado. Reprinted from: WORLD MINING AND METALS TECHNOLOGY. Joint MMIJ-AINE MEETING: proceedings of the ... Denver, Colo, September 1-3, 1976. v.1 p.95-112.
- 10) FLEISCHER, R.L.; ALTER, H.W.; FURMAN, S.C.; PRICE, P.B.; WALKER R.M. Particle track etching. Science, 178:255-63, Oct. 1972
- 11) FLEISCHER, R.L.; GIARD, W.; MOGROCAMPERO, A.; TURNER, L. Dosimetry of environmental radon methods and theory for low dose integrated measurements. Health Phys. 39:957-62, 1980.
- 12) FLEISCHER, R.L. & HART Jr., H.R.; MOGROCAMPERO, A. Radon emanation over an ore body: search for long-distance transport of radon Nucl. Instrum. Meth., 173:169-81, 1980.

- 13) FLEISCHER, R.L. & MOGROCAMPERO, A. Mapping of integrated radon emanation for detection of long-distance migration of gases within the earth: techniques and principles. J. Geophys. Res., 83(87):3539-48, Jul. 1978.
- 14) FLEISCHER, R.L.; MOGROCAMPERO, A. Radon enhancements in the earth: evidence for intermitten up flows. Geophys. Res. Lett, 6(5):361-4, 1979.
- 15) FLEISCHER, R.L.; PRICE, P.B.; WALKER, R.M. Nuclear tracks in solids - principle and applications. Berkeley, Calif. University of California, 1975.
- 16) FORMAN, J. M.A. & ANGEIRAS, A.G. Poços de Caldas and Itatiaia: two case histories of uranium exploration in Brazil. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Uranium exploration case histories: proceedings of an advisory group meeting on... held in Vienna. 26-29 Nov. 1979. Vienna, 1981 p.99-136.
- 17) GINGRICH, J. Results from a new uranium exploration method. Trans.Am. Inst. Min, Engrs, 258:61-4, 1975.
- 18) GINGRICH, J.E. & FISHER, J.C. Uranium exploration using the track ETCH method. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Exploration for uranium ore deposits:proceedings of a symposium held in Vienna, 29 March-2 April 1976. p.213-25.
- 19) HARVARD UNIVERSITY. SYMAP Manual. Version 5.15. Cambridge, Mas. .1971.
- 20) HODGMAN, C.D.; WEAST, R.C.; SELBY, S.M. Handbook of chemistry and physics. 38 ed. Cleveland, Ohio, Chemical Rubber, 1956. p. 1996.
- 21) KAPLAN, I. Nuclear Physics. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1955.
- 22) KHADDURI, I.Y. On the use of cellulose nitrate film for uranium exploration. Nucl.Tracks, Suppl. 2:785-97, 1980.
- 23) KHAN, H.A.; AKBER, R.A.; AHMAD, I.; BUKHARI, K.M.; MAKHANI, A. S. The measurement of thoron and radon by solid state nuclear track detector. Radiat. Eff., 35, 35-43, 1978.
- 24) KHAN, H.A.; AKBER, R.A.; AHMAD, I. The use of alpha sensitive plastic films (ASPF) for uranium thorium exploration and prospectings. Radiat. Phys. Chem., 11:295-7, 1978.
- 25) KING, C.Y. Radon emanation on San Andrea fault. Nature, 271: 516-9, Feb. 1978.
- 26) LIKES, R.; MOGROCAMPERO, A.; FLEISCHER, R.L. Moisture-insensitive monitoring of radon. Nucl. Instrum. Meth., 159:395-400, 1979.

27) MILLER, J.M. & OSTLE, D. Radon measurement in uranium prospecting. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Uranium exploration methods proceedings of a panel on ... held in Vienna, 10-14 April, 1972, Vienna, 1973.

28) MOGROCAMPERO, A. & FLEISCHER, R.L. Subterrestrial fluid convection: a hypothesis for long-distance migration of radon within the earth. Earth Planet Sci.Lett., 34:321-5, 1977.

29) PAUL, S.N. & BOSE, S.K. Effect of temperature on etching of LR-115 plastic track detector. Nucl. Tracks, 4:187-190, 1981.

30) SAMPA, M.H. (CARREI-IPEN). Comunicação pessoal.

31) SÃO PAULO. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (Dados coletados na fonte, a serem publicados no Boletim Hidrometeorológico).

32) SMITH, A.Y.; BARRETO, P.M.C.; POURNIS, C. Radon methods in uranium exploration. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Exploration for uranium ore deposits: proceedings of a symposium ... held in Vienna, 1976 p.185-209.

33) SOMOGYI, G.; HUNIADY, I.; VARGA, Z. Spark Counting of α -radiograms recorded on LR-115 streppable cellulose nitrate film. Nucl. Track Detect., 2:191-7, 1978.

34) SOMOGYI, G.; MEDVECSKY, L.; VARGA, Z. Field macroradiography measuring radon exhalation. Isotopenpraxis, 14:343-7, 1978.

35) TANNER, A.B. Radon migration in the ground: a review. In: ADAMS J.A.S. & LOWDER, W.M.: eds. The natural radiation environment first international symposium on ... held in Houston, Texas, April 10-13, 1963. Chicago, Ill., Univ. Chicago, 1964.