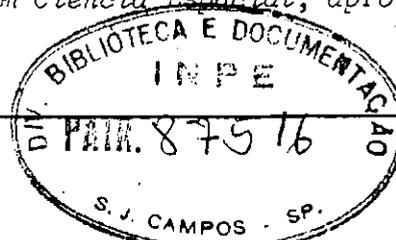


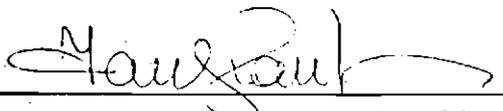
19 6 OUT 1985

1. Publicação nº INPE-3633-TDL/198	2. Versão	3. Data Set., 1985	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem DRH-DGA	Programa FRH/CEA		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) RADÔNIO POLÔNIO-214 ATMOSFÉRICO PRECIPITAÇÃO ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA			
7. C.D.U.: 550.3:539.16			18.150.00
8. Título INPE-3633-TDL/198 OS DESCENDENTES DE CURTO PERÍODO DO RADÔNIO MEDIDOS EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS E CACHOEIRA PAULISTA E SUA CORRELAÇÃO COM DADOS METEOROLÓGICOS		10. Páginas: 121	11. Última página: B.4
9. Autoria Edith Vasconcellos de Andrade Marinho Edith V. de Andrade Marinho.		12. Revisada por Daniel J. R. Nordemann	
Assinatura responsável		13. Autorizada por Marco Antonio Raupp Diretor Geral	
14. Resumo/Notas A existência de elementos radioativos suspensos no ar permite o seu uso como traçadores no estudo de certos problemas da física da atmosfera. No intuito de pesquisar as correlações entre os teores dos descendentes de vida curta do radônio na baixa atmosfera e fenômenos meteorológicos, mediu-se o polônio-214 atmosférico coletando os aerossóis sobre filtros de membrana (diâmetro do poro 0,8 µm), que são posteriormente analisados por espectrometria alfa. Foram feitas medidas em São José dos Campos (23°12'S, 45°51'W) e Cachoeira Paulista (22°41'19"S, 45°00'22"W). Em São José dos Campos analisou-se a influência da pluviometria na concentração do Po ²¹⁴ atmosférico, verificando-se uma alta atividade correspondente a um baixo índice pluviométrico e, inversamente, uma baixa atividade correspondente a um alto índice pluviométrico. Em Cachoeira Paulista estudou-se a variação na concentração de Po ²¹⁴ atmosférico em correlação com a estabilidade do ar, através do número de Richardson, evidenciando a acumulação de aerossóis radioativos naturais no período de maior estabilidade nas camadas inferiores da atmosfera.			
15. Observações Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial, aprovado em 12 de fevereiro de 1985.			



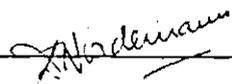
Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Ciência Espacial

Dr. Ivan Jelinek Kantor



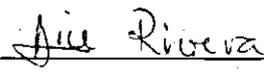
Presidente

Dr. Daniel J.R. Nordemann



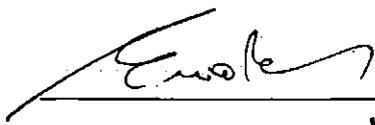
Orientador

Dra. Alice Rivera



Membro da Banca
-convidada-

Dr. Enio Bueno Pereira



Membro da Banca

Candidata: Edith Vasconcellos de Andrade Marinho

São José dos Campos, 12 de fevereiro de 1985

À minha mãe, ao Rubinho e ao Lê.

Nasceu em Itatiba de uma família muito pobre. Dez irmãos. Foi para São Paulo já moço e, trabalhando num escritório de contabilidade, aprendeu muita Matemática, Inglês e Francês, sozinho mesmo.

"-Leandro, sabe que você tem cara de médico!". E que médico. Quem com ele se tratou é que sabe. Me ensinou,guiou,cuidou. Sofreu em silêncio, e se foi ...

Que vazio!

Me ensina ... guia ... cuida ...

AGRADECIMENTOS

- Ao Rubinho, meu marido, que durante os cursos, no "desintegrado", na estadia em Cachoeira Paulista, e quando eu trabalhava nos fins de semana e à noite, sempre me apoiou e incentivou.
- Ao Dr. Daniel Jean Roger Nordemann, meu orientador, que confiou em mim, dando-me a maior força.
- Aos meus colegas, em especial Maria Virgínia Alves Jardim, Odylio Denys de Aguiar, Leonardo Deane de Abreu Sá, Dr. Enio Bueno Pereira, Dra Lycia Maria Moreira Nordemann, pelo apoio e discussões frutíferas.
- Ao pessoal do Laboratório, em especial o Ailton Massayuki Takashima e Sylvio Luiz Mantelli Neto, pelo apoio técnico.
- Ao Paulo Toshio Dozono pelo auxílio na área de química.
- Ao pessoal do INPE de Cachoeira Paulista, em especial o Sr. Julio Lucatto e Eucine Monteiro Scheneider, que me apoiaram e cooperaram comigo quando trabalhei lá.
- Aos membros da Banca Examinadora das apresentações preliminar e final pela gentil atenção a mim dispensada e pela cuidadosa avaliação do trabalho.
- À Lucinda Eugenia de Freitas Duarte e Sueli Felizardo Alves Batista pela atenção e auxílio dispensados a todas as fases deste trabalho. À Marília Prado de Carvalho o cuidado com a revisão da linguagem.
- À Marina Kiyoko Uêda pelo trabalho de datilografia.
- À todos aqueles que com palavras e atos de incentivo e encorajamento me levaram à conclusão deste trabalho.

ABSTRACT

The existence of radioactive elements suspended in the air permit us to use them as tracers in the study of certain problems in the atmospheric physics. With the intention of analyzing the correlations between the activity of the short half-live radon decay products in the low atmosphere and the meteorological parameters, we measured the atmospheric polonium-214 collecting the aerosols on membrane filters (porous diameter = 0,8 μm) that are analyzed later by alpha spectrometry. Measurements have been made in São José dos Campos (23°12'S, 45°55'W) and Cachoeira Paulista (22°41'19"S, 45°00'22"W). At São José dos Campos the influence of the pluviometry on the concentration of atmospheric Po^{214} has been analyzed, showing that high activity correspond to low pluviometry and, inversely, low activities correspond to high pluviometry. At Cachoeira Paulista we studied the variation in the atmospheric Po^{214} activity in correlation with the air stability, measured by the Richardson number, showing the accumulation of radioactive aerosols during the greater stability in the lower atmospheric layers.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	<i>xiii</i>
LISTA DE TABELAS	<i>xv</i>
LISTA DE SÍMBOLOS	<i>xvii</i>
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 - Descendentes do radônio	3
1.2 - O radônio na baixa atmosfera	5
1.3 - Objetivos	7
<u>CAPÍTULO 2 - O RADÔNIO E SEUS PRODUTOS DE DECAIMENTO</u>	9
2.1 - O decaimento radioativo e equilíbrio radioativo secular ..	10
2.2 - Crescimento e decaimento dos descendentes do Rn nos fil tros	12
<u>CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO DA APARELHAGEM UTILIZADA</u>	23
3.1.1 - Duração da amostragem	24
3.1.2 - Medidas de fluxo e volume do ar filtrado	24
3.1.3 - Características dos filtros	25
3.1.4 - Conjunto de filtração	25
3.2 - Conjunto de medição alfa	27
3.2.1 - Detetores usados na espectrometria alfa	27
3.2.2 - Câmara de vácuo	28
3.2.3 - O analisador de pulsos e a impressora	29
<u>CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA E CALIBRAÇÕES</u>	31
4.1 - Primeira fase: São José dos Campos	31
4.2 - Segunda fase: Cachoeira Paulista	36
4.3 - Eficiência de contagem do sistema	39
4.3.1 - Eficiência geométrica de contagem	41
4.4 - Análise de erros	44

	<u>Pág.</u>
<u>CAPÍTULO 5 - INFLUÊNCIAS METEOROLÓGICAS NA CONCENTRAÇÃO DO Po²¹⁴</u>	
<u>ATMOSFÉRICO</u>	47
5.1 - Efeitos das chuvas sobre a concentração do polônio-214 me didos em São José dos Campos	47
5.1.1 - Análise qualitativa dos dados	47
5.1.2 - Processos de migração do radônio e mecanismos de ação da chuva	53
5.1.3 - Correlação entre a atividade do Po ²¹⁴ e a precipitação	
5.2 - Estudo da estabilidade na baixa atmosfera	55
5.2.1 - Aspectos da estabilidade atmosférica	60
5.2 - O critério de Richardson	63
5.2.3 - Comparação do número de Richardson com a quantidade de radônio acumulado na baixa atmosfera	72
5.3 - Conclusão final	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICE A - CÁLCULO DO CRESCIMENTO E DECAIMENTO DOS DESCENDEN TES DE MEIA-VIDA CURTA NO FILTRO	
APÊNDICE B - DESCRIÇÃO GERAL DO EQUIPAMENTO ELETRÔNICO	
B.1 - Descrição de um detetor semiconductor	
B.2 - Eletrônica associada	
B.2.1 - Fonte de polarização	

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1.1 - Esquema de decaimento, a partir de Rn^{222} (gás nobre), que mostra seus descendentes de curta e longa meias-vidas ...	4
2.1a - Crescimento do Po^{218} , Pb^{214} e Po^{214} no filtro durante a amostragem	20
2.1b - Decrescimento do Po^{218} , Pb^{214} e Po^{214} no filtro após o final da amostragem	21
3.1 - Conjunto de filtragem	26
4.1 - Espectro de uma amostra de filtro feita pela manhã (espectro da esquerda) e outra à tarde (espectro da direita) ..	34
4.2 - Esquema de decaimento do Bi^{212}	35
4.3 - Relação da energia versus o número do canal para a 1a. e 2a. fase	38
4.4 - Intervalo de energia das curvas calculadas para diferentes partículas carregadas no silício	40
4.5 - Esquema do ângulo sólido	41
5.1a - Medidas da atividade do Po^{214} (feitas às 8h da manhã) e precipitação em função do tempo obtidas em São José dos Campos no período de 17/05/83 a 31/07/83	50
5.1b - Medidas da atividade do Po^{214} (feitas às 8h da manhã) e precipitação em função do tempo obtidas em São José dos Campos no período de 27/02/83 a 16/05/83	51
5.1c - Medidas da atividade do Po^{214} (feitas às 8h da manhã) e precipitação em função do tempo obtidas em São José dos Campos no período de 30/08/83 a 26/10/83	52
5.2a - Atividade do Po^{214} em função da precipitação que caiu durante o dia da medida	56
5.2b - Atividade do Po^{214} em função da precipitação do dia da medida mais a precipitação da véspera	57
5.2c - Atividade do Po^{214} em função da precipitação que caiu no dia da medida mais a precipitação da véspera e antevéspera	58
5.3 - Atividade do polônio-218 no ar e inversões de temperatura em função dos dias	65
5.4 - Atividade do polônio-218 e o vento sua direção e velocidade	71
5.5 - Número de Richardson e atividade em função do tempo	73
5.6 - Estabilidade atmosférica	74

	Pág.
5.7a - Umidade relativa	77
5.7b - Pressão atmosférica	78
5.8 - Número de Richardson	79
B.1 - Princípio de fundamento do detetor semicondutor (a) e esquema de detecção da partícula alfa pelo detetor semicondutor (b)	B.2
B.2 - Diagrama de blocos do equipamento eletrônico utilizado ..	B.3

LISTA DE TABELAS

	Pág.
4.1 - Porcentagem de pulsos detetados na região dos canais 45 e 72 com relação à soma dos pulsos nas duas regiões	35
4.2 - Características geográficas de São José dos Campos e Cachoeira Paulista e resumo da calibração na 1a. e 2a. fases medidas	42
5.1 - Dados de concentração do Po^{214} e suas respectivas medidas de precipitação em São José dos Campos	49
5.2 - Dados de precipitação no dia de chuva (pppl) e atividade do Po^{214} (Δ) neste dia, utilizados para o cálculo da curva 5.1	59
5.3 - Medidas feitas em Cachoeira Paulista	66
5.4 - Medidas feitas em Cachoeira Paulista, inversões de temperatura e número de Richardson	68
5.5 - Dados de atividades e número de Richardson nas regiões I e III	75
5.6 - Número de Richardson e velocidade do vento	76

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- número de massa
b	- raio do detetor
c	- raio do filtro
C	- número do canal
C_1	- número de contagens do Po^{218}
C_2	- número de contagens do Pb^{214}
C_3	- número de contagens do Po^{214}
cm	- centímetro
d	- dias
D	- profundidade da zona de cargas de espaço
dA	- elemento de área do detetor
$d\vec{s}$	- vetor direção do elemento de área
e	- elétron
E	- campo elétrico
E	- energia
ev	- elétron-volt
FWHM	- largura total a meia altura
g	- aceleração da gravidade
h	- hora
h_i	- funções adimensionais das constantes de decaimento λ_i
kev	- kilo elétron-volt
l	- litros
lim	- limite
m	- metro

mbarr	- mili-barr
MeV	- milhões de elétrons volt
min	- minutos
mm	- milímetros
mV	- mili-volt
M Ω	- mega-ohms
n_i	- concentração de i-ésimo elemento
N_i	- número de átomos do i-ésimo elemento
n_i^t	- número de átomos de i-ésimo elemento no filtro para o instante t após o final da amostragem
nCi	- nanoCurie
p	- duração
ppp	- precipitação
pCi	- picoCurie
q	- fluxo
Q	- carga elétrica
\vec{r}	- vetor posição entre a fonte e o detetor
r	- coeficiente de determinação
r	- distância entre o filtro e o detetor
R	- resolução
R_i	- número de Richardson
Rn	- radônio
s	- segundo
S	- Sul
T	- duração da amostragem
t	- instante de tempo após a amostragem durante o decaimento

t_i	- tempo inicial de contagem
t_f	- tempo final de contagem
$T_{1/2}$	- meia vida ou período do elemento radioativo
Temp	- temperatura ambiente
V	- volts
V_0	- tensão
vel	- velocidade
${}_z^X A$	- elemento x, com número de massa A e número atômico z.
W	- Oeste
Z	- altura
z	- número atômico,
α	- partícula alfa
β	- partícula beta
γ	- relação entre c e r
δ	- ângulo entre a normal do detetor e o vetor unitário
Δ	- atividade
ϵ	- eficiência de filtragem
ϵ_a	- eficiência absoluta de detecção
ϵ_g	- eficiência geométrica de contagem
ϵ_i	- eficiência intrínseca do sistema
θ	- instante de tempo durante a amostragem
λ_i	- constante de decaimento do i-ésimo elemento
μm	- microm
μs	- microsegundo
μv	- microvolt
ρ	- relação entre b e r

- σ - erro na atividade
- τ_i - vida média do i -ésimo elemento
- ω - ângulo sólido
- % - porcentagem
- ∞ - infinito
- \approx - aproximadamente

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Antonie Henri Becquerel descobria em 1896 que um filme fotográfico era velado quando exposto a sais de urânio como, por exemplo, ao sulfato duplo de urânio e potássio, mesmo na ausência da luz. Poucos anos depois, Pierre e Marie Curie conseguiam isolar uma quantidade pequena de um p  branco e opaco, que era aproximadamente 900 vezes mais ativo que o urânio que denominaram rádio. Logo após esta descoberta, em 1901 Elster e Geitel observaram que a atmosfera continha substância radioativas que eram produtos de desintegra o dos gases provenientes da emana o terrestre.

Em toda crosta terrestre encontram-se pequenas quantidades de urânio 238, elemento radioativo com meia vida igual a $4,49 \times 10^9$ anos. Um dos seus descendentes que resulta do seu decaimento   o radônio-222. Este gás raro com uma meia-vida de 3,8 dias está, portanto, também presente no solo e escapa regularmente para a atmosfera (Larson e Bressan, 1978), como resultado de diversos processos, tais como difusão, evapora o da umidade do solo no qual o radônio está dissolvido e exala o devida a varia es na temperatura e pressão ambientes.

A taxa de emissão de Rn medida varia de 0,2 a 2 átomos/ cm^2s^{-1} (Servant, 1964; Wilkening et alii, 1972). A  gua do mar cont m rádio-226 dissolvido cuja desintegra o produz o radônio-222; porém a taxa de emana o deste nuclídeo a partir da superfície dos oceanos   aproximadamente 100 vezes mais fraca que a partir dos continentes (Lambert et alii, 1982; Larson e Bressan, 1978).

A taxa de emana o do radônio-222 depende consideravelmente da natureza geológica do solo e do seu estado físico - superficial e, particularmente, do seu recobrimento eventual por água, vegeta o, etc. A concentra o atmosférica do radônio em um dado instan

te e lugar depende primeiramente de sua taxa de emanação e, em segundo lugar, da velocidade de dispersão do radônio na atmosfera, isto é, da velocidade com que ele é arrastado: horizontalmente das zonas emissoras (continentes) até as zonas fracamente emissoras (essencialmente os oceanos); verticalmente das baixas camadas atmosféricas até as camadas de alturas mais elevadas (Servant, 1964; Israel e Israel, 1966). Estes diversos processos têm como consequência uma grande variabilidade da concentração do radônio em função do tempo, em um certo lugar.

Durante as últimas décadas, técnicas extremamente sensíveis têm sido desenvolvidas para identificar e medir radionuclídeos atmosféricos naturais em concentrações muito pequenas, bem como conhecer o seu comportamento no espaço e no tempo, devido ao fato de estes elementos poderem servir de traçadores naturais que trariam resultados importantes e interessantes em diversos ramos da pesquisa atual. Como exemplo, citam-se abaixo algumas das suas aplicações:

- a) Podem ser feitas pesquisas meteorológicas para estudar: fenômenos micrometeorológicos (Israel et alii, 1966; Fontan et alii, 1966; Malaklov et alii, 1966; Gogolak e Beck, 1978; Hosler e Lockhart, 1965; Subba Ramu e Vohra, 1969; Okabe et alii, 1980; Shapiro e Forbes-Resha, 1975; Schery e Goeddert, 1982); movimentação de massas de ar, circulação atmosférica e processos de mistura (Guedalia et alii, 1973; Jacobi e André, 1963; Birot et alii, 1970; Dörr et alii, 1983; Larson e Bressan, 1978, Lambert et alii, 1970; Lambert et alii, 1982); comportamento dos aerossóis atmosféricos (Porstendörfer e Mercer, 1978; Martell e Moore, 1974; Moore et alii, 1973); e ainda análise da eletricidade atmosférica (Anderson e Larson, 1974; Israelson, 1978; Boeck, 1978).

Uma aplicação destes estudos é a rápida indicação da estabilidade da atmosfera, o que possibilita tomar as precauções necessárias para evitar a poluição atmosférica pelos dejetos de produtos nocivos, como aqueles que podem ser emitidos pelos la

boratórios e instalações de indústrias nucleares. Pode-se também conhecer as influências da poluição radioativa causada pelos testes nucleares que ocorrem principalmente no Hemisfério Norte. Quando se deseja conhecer o teor de urânio no solo através de raios gama emitidos pelo Bi^{214} , por espectrometria gama aérea, a radiação deste elemento presente na atmosfera torna-se devido ao decaimento do Rn^{222} , um ruído de fundo importante e inconveniente, cuja concentração espacial e temporal deve ser bem conhecida (IAEA, 1979; Clayton, 1983).

- b) Na física médica e ambiental a análise do ar de minas uraníferas e de outras rochas radioativas, do ar de residências construídas com material contaminado e da água que se bebe pode auxiliar na prevenção ou recuperação de doenças gravíssimas causadas pela inalação ou ingestão de elementos radioativos (Hötzl e Winkler, 1978; Ruiperez, 1983; Fleischer et alii, 1980; Clements et alii, 1978).
- c) Outras áreas de grande interesse são: exploração de urânio (Jeter et alii, 1977; IAEA, 1976); predição de terremotos (Smith et alii, 1975; Mogro-Campero et alii, 1979; King, 1978); estudo dos dejetos de erupções vulcânicas (Lambert et alii, 1982; Hinchliffe et alii, 1981); e estudos de minerais radioativos presentes em outros corpos celestes (Nordemann, 1966; Gorenstein et alii, 1974).

1.1 - DESCENDENTES DO RADÔNIO

Por desintegração, o radônio dá origem a duas sequências sucessivas (Figura 1.1). A primeira é composta de elementos de curto período: Po^{218} ($T_{1/2} = 3.05$ min), Pb^{214} ($T_{1/2} = 26.8$ min), Bi^{214} ($T_{1/2} = 19.7$ min) e Po^{214} ($T_{1/2} = 1.5 \times 10^{-4}$ seg), onde $T_{1/2}$ é o período radioativo do elemento. A segunda, ao contrário, é composta de elementos de longa vida: Pb^{210} , Bi^{210} e Po^{210} . Todos estes núclídeos são portanto isótopos radioativos de metais.

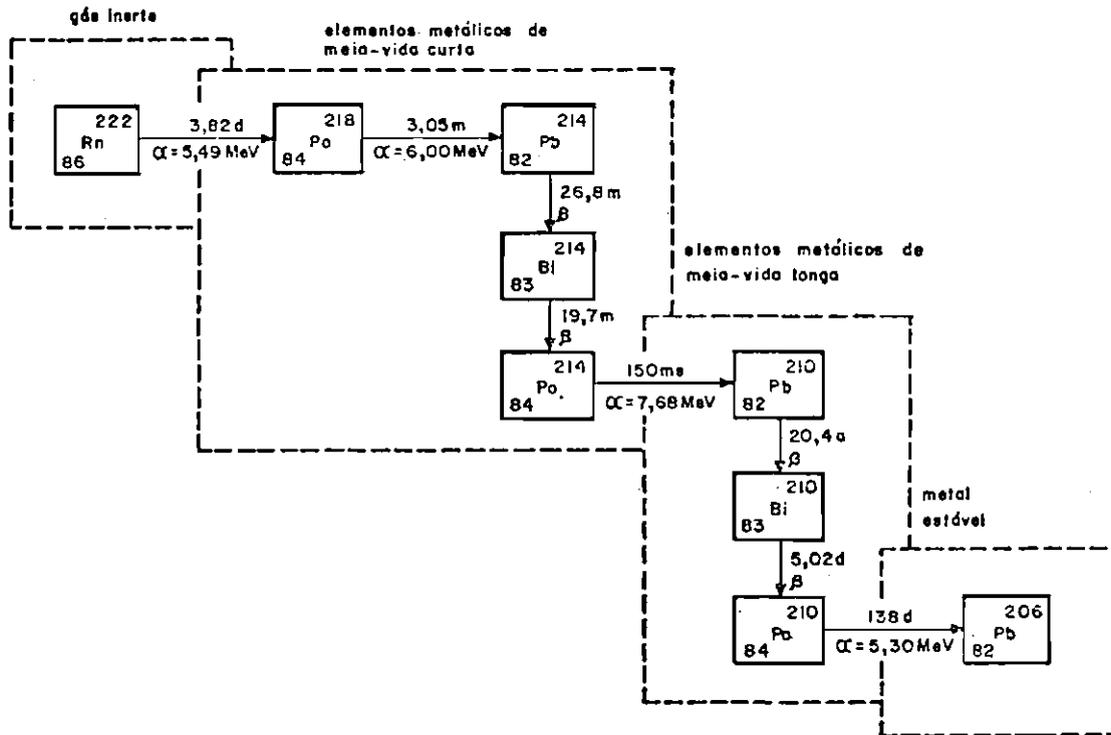


Fig. 1.1 - Esquema de decaimento, a partir do Rn^{222} (gás nobre), que mostra seus descendentes de curta e longa meias-vidas.

FONTE: Pereira et alii (1984).

A existência de ligações físicas entre os átomos metálicos do depósito ativo e os constituintes das rochas e dos aerossóis atmosféricos tem o efeito de impedir, geralmente, a injeção espontânea de todos os descendentes do radônio na atmosfera a partir da superfície do solo: somente o radônio gasoso tem esta propriedade. A energia de recuo que o Rn^{222} adquire por ocasião do decaimento de Ra^{226} está em torno de 100 keV, e é suficiente para que uma porcentagem dos átomos deste elemento possa chegar a uma microfissura existente nos minerais das rochas ou nos constituintes do solo e, por difusão ou por arraste do fluido que preenche o meio, caminhar antes de se desintegrar. Desde que os descendentes isótopos de metais pesados são produzidos no ar por desintegração do radônio, e são inicialmente iões, eles se fixam muito rapidamente sobre os aerossóis (Jacobi e André, 1963; Lambert et alii, 1982; Porstendorfer e Mercer, 1978) e são depositados no solo pela ação da gravidade ou carregados pelas correntes atmosféricas.

A vida média ($\tau_i = 1/\lambda_i$, onde λ_i é a constante de decaimento do i-ésimo elemento) dos descendentes de meia-vida curta do radônio na troposfera é igual a alguns minutos: 4,4 min para o Po^{218} , 38,7 min para o Pb^{214} , 28,4 min para o Bi^{214} e $4,1 \times 10^{-10}$ min para o Po^{214} . Isto faz com que esses elementos decaiam para o Pb^{210} ($T_{1/2} = 22$ anos) antes de serem carregados para longe do seu ponto de formação. O radônio, porém, pode ser transportado por convecção, ventos e massas de ar para longe do seu ponto de emissão devido a sua meia-vida longa ($T_{1/2} = 3,8$ dias) e atingir as altas camadas da troposfera e estratosfera e regiões oceânicas afastadas dos continentes.

1.2 - O RADÔNIO NA BAIXA ATMOSFERA

O comportamento da radioatividade natural na atmosfera tem sido cuidadosamente investigado durante vários anos, em lugares diferentes, e discutido juntamente com os parâmetros meteorológicos.

Diversos autores (Servant, 1964, 1966; Israelsson, 1978; Gogolak e Beck, 1978) observaram a correlação existente entre a concentração da radioatividade natural e a estabilidade atmosférica: um aumento na concentração de radônio corresponde a uma estabilidade maior da atmosfera, enquanto uma diminuição está geralmente relacionada com fenômenos de turbulência. Malakov et alii observaram em 1966 este fenômeno com a ocorrência de um máximo na concentração do depósito pela manhã e um mínimo à tarde.

Como já foi dito anteriormente, o recobrimento superficial do terreno por água diminui o teor de emissão do Rn do solo. Este fenômeno foi comprovado por Israel et alii (1966), que estudaram a influência das chuvas na concentração atmosférica de Rn.

Okabe et alii (1980) confirmaram a relação entre a pressão atmosférica e o teor de Rn em uma galeria de urânio, onde um aumento na pressão atmosférica acarreta uma diminuição no teor de Rn e vice-versa.

Diversas pesquisas têm sido feitas para medir concentrações ambientais do Rn e seus descendentes por medidas locais, bem como para registrar variações diurnas nas suas concentrações. Geralmente os dispositivos adotados consistem em uma câmara de ionização ou numa câmara de cintilação de grande volume (Israelsson, 1978; Israel e Israel, 1966; Israel et alii, 1966; Malakov et alii, 1966; Israelsson et alii, 1973; Fontan et alii, 1966; Servant, 1964), estando o seu limite de detecção em torno de 100 pCi/m³. Além disso, a técnica dos dois filtros pode ser usada (Thomas e Le Clare, 1970). O primeiro filtro que precede o volume de decaimento coleta os produtos de decaimento do Rn. Os descendentes do Rn produzidos dentro da câmara são coletados no segundo filtro, e sua atividade pode ser registrada por um detector de cintilação alfa. Este método é bem simples e sua sensibilidade é alta (limite de detecção 10 pCi/m³). A única desvantagem são as altas taxas de fluxo necessárias. O método da precipitação eletrostática, que também pode ser utilizado para medir a concentração

do radônio atmosférico através de seus descendentes de curta meia-vida, consiste em coletar estes elementos diretamente sobre a superfície ativa de um detetor (Pereira et alii, 1984; Negro e Watnick, 1978).

1.3 - OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é estudar o comportamento do radônio-222 e dos seus descendentes radioativos de curto período na baixa atmosfera, numa região tropical não-costeira típica (Capítulo 4), e realizar as primeiras medidas em São José dos Campos e Cachoeira Paulista usando aparelhos de tecnologia original e recente que foram construídos no Brasil. Para cumprir este programa, o presente trabalho divide-se em duas fases. A primeira delas foi o aprendizado das técnicas de medidas envolvidas, onde foi testada a viabilidade da tecnologia empregada, e uma sequência de medidas feitas em São José dos Campos. A segunda fase constará da calibração do sistema de amostragem e de uma segunda série de medidas feitas na estação meteorológica do INPE em Cachoeira Paulista.

As amostras foram obtidas pelo método de filtragem do ar seguido de espectrometria alfa feita diretamente sobre o filtro de um detetor de diodo semiconductor (Capítulo 3).

O objetivo destas medidas é analisar as variações diurnas dos descendentes de curto período do Rn em correlação com parâmetros meteorológicos que podem influir nelas (Capítulo 5).

Um ponto a destacar no presente trabalho é a utilização de detetores de diodo semiconductor na detecção de partículas alfa. Além de permitir que as medidas sejam feitas no local de amostragem, os detetores possuem diversas vantagens adicionais sobre os outros, os quais estão detalhados no Capítulo 3. Vale salientar também que por serem as amostras fontes de alfa delgadas, não é necessário que seja feito um tratamento químico nas amostras para fazer sua espec

trometria, que é o caso de fontes espessas onde, através de separações químicas, procura-se selecionar o elemento cujo isótopo é emissor alfa.

A proposta da presente investigação é ainda trazer informação experimental adicional sobre a América do Sul, onde foram feitas pouquíssimas medidas da concentração de Rn: Lockhart (1960) em Lima (próximo ao Oceano); Bolívia (17°S, 68°W) (Chacaltaya altitude 5200 m) e por Arfinengo (1967) no Rio de Janeiro (23°S, 43°W).

CAPÍTULO 2

O RADÔNIO E SEUS PRODUTOS DE DECAIMENTO

A radioatividade é o fenômeno da emissão de partículas e radiações pelo núcleo de um isótopo natural ou artificial, na busca de um estado de energia mínima mais estável. Os fenômenos radioativos podem alterar o estado do núcleo e a sua estrutura através de processos de interação forte ou fraca, ou através de excitações crescentes ocorridas no mecanismo de competição entre a tensão superficial do núcleo e repulsão coulombiana o que provoca a sua fissão.

O decaimento alfa foi o primeiro a ser descoberto e investigado, bem como o primeiro a fornecer informações a respeito da estrutura nuclear. Inicialmente acreditava-se que a velocidade em que era emitida uma partícula alfa era uma característica de cada substância. Recentes estudos revelaram que cada núcleo alfa emissor produz um grupo simples de partículas alfa, mas que se observa uma estrutura fina no espectro das velocidades ao deixar o núcleo residual em vários estados de excitação. No presente trabalho as emissões alfa serão consideradas monoenergéticas.

A emissão de partículas alfa é o único tipo de decaimento radioativo espontâneo que emite partículas pesadas, exetutando a fissão. Tal decaimento pode ser descrito pela relação



O elemento pai P dá origem ao elemento filho D e ao núcleo de hélio (partícula alfa = α).

Um núcleo radioativo pode decair para um outro também radioativo, e assim sucessivamente até atingir o estado de um núcleo estável. Esses átomos constituem uma família radioativa. As séries

ou famílias radioativas contêm vários núcleos alfa-emissores, além de beta-emissores, muitos em sequência, que mudam de massa em quatro unidades inteiras em cada transição alfa.

2.1 - DECAIMENTO RADIOATIVO E EQUILÍBRIO RADIOATIVO SECULAR

O acúmulo dos produtos de decaimento em uma série radioativa é descrito considerando que, inicialmente, para $t=0$ têm-se N átomos do elemento N_1 e nenhum átomo de seus produtos de decaimento N_2, \dots, N_{n-2}, N_n , sendo $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}, \lambda_n$ as constantes de decaimento dos elementos $N_1, N_2, \dots, N_{n-1}, N_n$, respectivamente. Para qualquer tempo t , o número de átomos de N_n será então dado pela integração da seguinte equação diferencial:

$$\frac{d N_n}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n, \quad (2.2)$$

onde

$$\frac{d N_{n-1}}{dt} = \lambda_{n-2} N_{n-2} - \lambda_{n-1} N_{n-1}, \quad (2.3)$$

e assim sucessivamente, até chegar ao elemento pai N_1 que será dado por

$$\frac{d N_1}{dt} = \lambda_1 N_1 \quad (2.4)$$

A integração da Equação 2.2 tem como resultado

$$N_n = N(h_1 e^{-\lambda_1 t} + h_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + h_{n-1} e^{-\lambda_{n-1} t} - h_n e^{-\lambda_n t}), \quad (2.5)$$

onde as constantes h_i são funções adimensionais das constantes de decaimento λ_j e têm os seguintes valores:

$$\begin{aligned} h_1 &= \frac{\lambda_1}{\lambda_n - \lambda_1} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \dots \frac{\lambda_{n-1}}{\lambda_{n-1} - \lambda_1}, \\ h_2 &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \frac{\lambda_2}{\lambda_n - \lambda_2} \dots \frac{\lambda_{n-1}}{\lambda_{n-1} - \lambda_2}, \\ &\dots \\ h_n &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_n} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_n} \dots \frac{\lambda_{n-1}}{\lambda_{n-1} - \lambda_n}. \end{aligned} \tag{2.6}$$

Da condição inicial tem-se que $N_i = 0$ para $i > 1$. Obtêm-se então da Equação 2.5:

$$0 = N(h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1} + h_n), \tag{2.7}$$

e

$$h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1} + h_n = 0. \tag{2.8}$$

Se o sistema constituído pelos elementos da série radioativa for fechado e existir por um período muito longo de tempo ($t \rightarrow \infty$), o conjunto de equações diferenciais 2.3 será estacionário se $\lambda_i \gg \lambda_1$. Pode-se então escrever:

$$\begin{aligned} \frac{d N_1}{dt} &= -\lambda_1 N_1, \\ \frac{d N_2}{dt} &= (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) = 0, \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \end{aligned} \tag{2.9}$$

$$\frac{d N_n}{dt} = (\lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n) = 0.$$

Deste modo, o número de átomos que decai na unidade de tempo é igual ao número de átomos formados no mesmo intervalo de tempo. Isto constitui o que se denomina equilíbrio radioativo secular, e pode ser descrito a partir do conjunto de Equações 2.9 como:

$$\Delta = \lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_{n-1} N_{n-1} = \lambda_n N_n, \tag{2.10}$$

onde

$$\Delta = \lambda_i N_i = \text{atividade.}$$

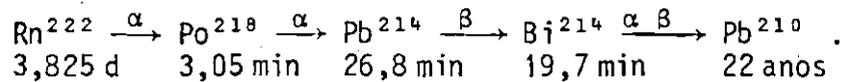
Em outras palavras, num sistema constituído por uma série radioativa em equilíbrio radioativo secular, as atividades dos seus produtos de decaimento são iguais entre si. Este conceito é um dos mais importantes no estudo da radioatividade do meio ambiente.

2.2 - CRESCIMENTO E DECAIMENTO DOS DESCENDENTES DO Rn NOS FILTROS

O radônio, que é um elemento gasoso radioativo, tem como produtos de decaimento isótopos do polônio, do bismuto, do chumbo e do tálio, que são elementos sólidos à temperatura ambiente. Por esta ra

zão, os átomos gerados em voo no ar a partir da desintegração de átomos de radônio têm tendência de se fixar muito rapidamente nos aerossóis presentes na atmosfera e nos obstáculos que encontram em seus caminhos (Lambert et alii, 1982; Lambert, 1964).

Devido ao curtíssimo período do Po^{214} , que é de $1,47 \times 10^{-4}$ s, o esquema de produtos de desintegração de curto período do radônio pode ser simplificado, conforme indicado no esquema abaixo:



O Pb^{210} pode ser considerado praticamente estável no presente caso.

Esses elementos são capturados sobre a superfície de um filtro de membrana e as concentrações de Po^{218} , Pb^{214} e Po^{214} consideradas constantes durante o período de amostragem (Pearson e Moses, 1966; Shapiro e Forbes - Resha, 1975) podem então ser calculadas com a ajuda das correspondentes equações diferenciais. Durante a amostragem e a uma taxa de fluxo constante q , a variação no número de átomos de Po^{218} , Pb^{214} e Po^{214} em um filtro é descrita pelo seguinte conjunto de equações diferenciais

$$\frac{d N_i}{d\theta} = \lambda_{i-1} N_{i-1} + n_i q \varepsilon - \lambda_i N_i, \quad (2.11)$$

$$i = 0, 1, 2, 3,$$

sendo $N_0 = 0$ número de átomos de radônio,

onde:

θ = instante de tempo durante a amostragem;

N_i = número de átomos do i -ésimo elemento no filtro;

- λ_i = constante de decaimento do i-ésimo nuclídeo;
 n_i = concentração atmosférica do i-ésimo elemento (átomos/m³);
 q = fluxo de ar (m³/min);
 ε = eficiência de filtragem.

Os índices 1, 2 e 3 referem-se ao Po²¹⁸, Pb²¹⁴ e Bi²¹⁴, respectivamente.

A solução destas equações diferenciais é bem conhecida e pode ser encontrada em trabalhos que tratam da análise das concentrações dos descendentes do Rn como, por exemplo, Raabe e Wreen (1969), Winkler et alii (1981) e Chunxiang e Daling (1983). A solução destas equações encontra-se no Apêndice A.

Para qualquer tempo de amostragem θ , a atividade $\Delta_i = \lambda_i N_i$ de cada nuclídeo no filtro é dada pelas seguintes equações, com a condição inicial $\Delta_i (\theta=0) = 0$:

$$\Delta_1(\theta) = n_1 q \varepsilon (1 - e^{-\lambda_1 \theta}) \quad (2.12)$$

$$\Delta_2(\theta) = n_1 q \varepsilon \lambda_2 \left[\frac{1 - e^{-\lambda_2 \theta}}{\lambda_2} + \frac{e^{-\lambda_2 \theta} - e^{-\lambda_1 \theta}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right] + n_2 q \varepsilon (1 - e^{-\lambda_2 \theta}), \quad (2.13)$$

$$\Delta_3(\theta) = n_1 q \varepsilon \lambda_3 \left[\frac{1 - e^{-\lambda_3 \theta}}{\lambda_3} + \frac{e^{-\lambda_3 \theta} - e^{-\lambda_2 \theta}}{\lambda_3 - \lambda_2} - \frac{\lambda_2 (e^{-\lambda_3 \theta} - e^{-\lambda_2 \theta})}{(\lambda_3 - \lambda_2) (\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{\lambda_2 (e^{-\lambda_3 \theta} - e^{-\lambda_1 \theta})}{(\lambda_3 - \lambda_1) (\lambda_2 - \lambda_1)} \right] + n_2 q \varepsilon \lambda_3 \left[\frac{1 - e^{-\lambda_3 \theta}}{\lambda_3} + \frac{e^{-\lambda_3 \theta} - e^{-\lambda_2 \theta}}{\lambda_3 - \lambda_2} \right] +$$

$$+ n_3 q \varepsilon (1 - e^{-\lambda_3 \theta}), \quad (2.14)$$

onde Δ_1 , Δ_2 e Δ_3 são respectivamente as atividades do Po^{218} , Pb^{214} e Bi^{214} durante a amostragem.

Para diferenciar o período de amostragem do período de decaimento dos radionuclídeos coletados no filtro, uma nova variável t é definida como $t = 0$ no fim da amostragem e a equação que descreve o decaimento dos descendentes de meia-vida curta do radônio no filtro é obtida depois de terminada a coleta, a qual é dada por:

$$\frac{d n'_i}{dt} = \lambda_{i-1} n'_{i-1} - \lambda_i n'_i, \quad (2.15)$$

onde:

$i = 0, 1, 2, \text{ e } 3;$

$n'_0 = 0$, número de átomos de radônio;

$n'_i(t)$ = número de átomos do i -ésimo tipo no filtro para tempo t após o final da amostragem;

t = instante de tempo após o final da amostragem.

Os índices 1, 2 e 3 referem-se ao Po^{218} , Pb^{214} e Bi^{214} , respectivamente.

A solução da Equação 2.15 será então (Apêndice A):

$$n'_1(t) = N_1(T) e^{-\lambda_1 t}, \quad (2.16)$$

$$n'_2(t) = N_1(T) \left[\frac{\lambda_1 e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} - \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right] + N_2(T) e^{-\lambda_2 t}, \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned}
 n_3'(t) = N_1(T) & \left[\frac{\lambda_1 \lambda_2 e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{\lambda_1 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_1)} + \right. \\
 & \left. + \frac{\lambda_1 \lambda_2 e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} \right] + N_2(T) \left[\frac{\lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_3 - \lambda_2} - \right. \\
 & \left. - \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_3 t}}{\lambda_3 - \lambda_2} \right] + N_3(T) e^{-\lambda_3 t}, \tag{2.18}
 \end{aligned}$$

onde T é a duração da amostragem.

O número de pulsos detetados no intervalo do tempo da medida para cada um dos elementos Po^{218} , Bi^{214} e Pb^{214} é dado então por:

$$C_i(t_i, t_f) = \int_{t_i}^{t_f} \epsilon_g \lambda_i n_i'(t) dt, \tag{2.19}$$

onde t_i e t_f são respectivamente os tempos inicial e final de contagem, ϵ_g é a eficiência geométrica do sistema. Pode-se escrever então:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \int_{t_i}^{t_f} \epsilon_g \lambda_1 n_1'(t) dt = \\
 &= n_1 q \epsilon_g (1 - e^{-\lambda_1 T}) \left(\frac{e^{-\lambda_1 t_f} - e^{-\lambda_1 t_i}}{-\lambda_1} \right),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_2 &= \int_{t_i}^{t_f} \epsilon_g \lambda_2 n_2'(t) dt = \\
 &= \lambda_2 \epsilon_g n_1 q \epsilon \left[\frac{1 - e^{-\lambda_1 T}}{\lambda_1} \right] \left[\frac{(e^{-\lambda_1 t_f} - e^{-\lambda_1 t_i})}{\lambda_1 - \lambda_2} + \frac{\lambda_1 (e^{-\lambda_2 t_f} - e^{-\lambda_2 t_i})}{\lambda_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} \right] - \\
 &+ \left\{ \epsilon_g n_1 q \epsilon \lambda_2 \left[\frac{1 - e^{-\lambda_2 T}}{\lambda_2} + \frac{e^{-\lambda_2 T} - e^{-\lambda_1 T}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right] + \right. \\
 &+ \left. \epsilon_g n_2 q \epsilon \lambda_2 \left[\frac{1 - e^{-\lambda_2 T}}{\lambda_2} \right] \right\} \times \frac{(e^{-\lambda_2 t_f} - e^{-\lambda_1 t_i})}{\lambda_2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_3 &= \int_{t_i}^{t_f} \epsilon_g \lambda_3 n_3'(t) dt = \\
 &= \epsilon_g \lambda_3 \left\{ n_1 q \epsilon \left[\frac{1 - e^{-\lambda_1 T}}{\lambda_1} \right] \left[\frac{\lambda_2 (-e^{-\lambda_1 t_f} + e^{-\lambda_1 t_i})}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} + \right. \right. \\
 &+ \left. \left. \frac{\lambda_1 (e^{-\lambda_2 t_f} - e^{-\lambda_2 t_i})}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{\lambda_1 \lambda_2 (e^{-\lambda_3 t_f} - e^{-\lambda_3 t_i})}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2) \lambda_3} \right] + \right. \\
 &+ \left[n_1 q \epsilon \left(\frac{1 - e^{-\lambda_2 T}}{\lambda_2} + \frac{e^{-\lambda_2 T} - e^{-\lambda_1 T}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) + n_2 q \epsilon \left(\frac{1 - e^{-\lambda_2 T}}{\lambda_2} \right) \right] \times \\
 &\times \left[\frac{(-e^{-\lambda_2 t_f} + e^{-\lambda_2 t_i})}{(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{\lambda_2 (e^{-\lambda_3 t_f} - e^{-\lambda_3 t_i})}{\lambda_3 (\lambda_3 - \lambda_2)} \right] + \\
 &+ \left\{ n_1 q \epsilon \left[\frac{1 - e^{-\lambda_3 T}}{\lambda_3} + \frac{e^{-\lambda_3 T} - e^{-\lambda_2 T}}{\lambda_3 - \lambda_2} - \frac{\lambda_2 (e^{-\lambda_3 T} - e^{-\lambda_2 T})}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_1)} + \right. \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\lambda_2(e^{-\lambda_3 T} - e^{-\lambda_1 T})}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} \Big] + n_2 q \epsilon \left[\frac{1 - e^{-\lambda_3 T}}{\lambda_3} + \frac{e^{-\lambda_3 T} - e^{-\lambda_2 T}}{\lambda_3 - \lambda_2} \right] + \\
 & + n_3 q \epsilon \left[\frac{1 - e^{-\lambda_3 T}}{\lambda_3} \right] \Big\} \times \left\{ \frac{-e^{-\lambda_3 t_f} + e^{-\lambda_3 t_i}}{\lambda_3} \right\}, \quad (2.20)
 \end{aligned}$$

que forma um sistema de 3 equações com 6 incógnitas. C_3 é o número de partículas alfa detetadas entre as que são emitidas pelo Po^{214} e, portanto, é conhecido. A equação de C_1 não será utilizada, pois, devido a fatores que serão analisados detalhadamente no Capítulo 4, considere-se $C_1 = 0$, o que não implica que $n_1 = 0$. O Po^{214} é um emissor β cujas partículas não são detetadas neste sistema. Para resolução deste sistema, supõe-se que há equilíbrio radioativo na atmosfera entre o Po^{218} , Pb^{214} e Bi^{214} (Po^{214}), isto é:

$$\lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2 = \lambda_3 n_3 \quad (2.21)$$

e tem-se então um sistema de 3 equações com 3 incógnitas dado por:

$$\begin{aligned}
 C_3 &= f(n_1, n_2, n_3, t_i, t_f), \\
 0 &= \lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2, \\
 0 &= \lambda_2 n_2 - \lambda_3 n_3.
 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Resolvendo este sistema de equações, obtém-se finalmente

$$n_3 = \frac{f(t_i, t_f)}{q \epsilon_g} C_3, \quad (2.23)$$

isto é, a concentração atmosférica do Po^{214} é proporcional ao número de pulsos detetados deste elemento.

Para exemplificar o que ocorre no filtro deve-se supor que o Po^{218} , o Pb^{214} e Po^{214} encontram-se em equilíbrio radioativo na atmosfera e $n_1 = n_2 = n_3 = 1$. A atividade destes elementos no filtro é descrita pelas equações 2.12, 2.13 e 2.14 e pode-se visualizar o que ocorre na Figura 2.1a. Após o final da aspiração, os elementos presentes no filtro decairão conforme descrito nas Equações 2.16, 2.17, 2.18, que estão representadas graficamente na Figura 2.1b.

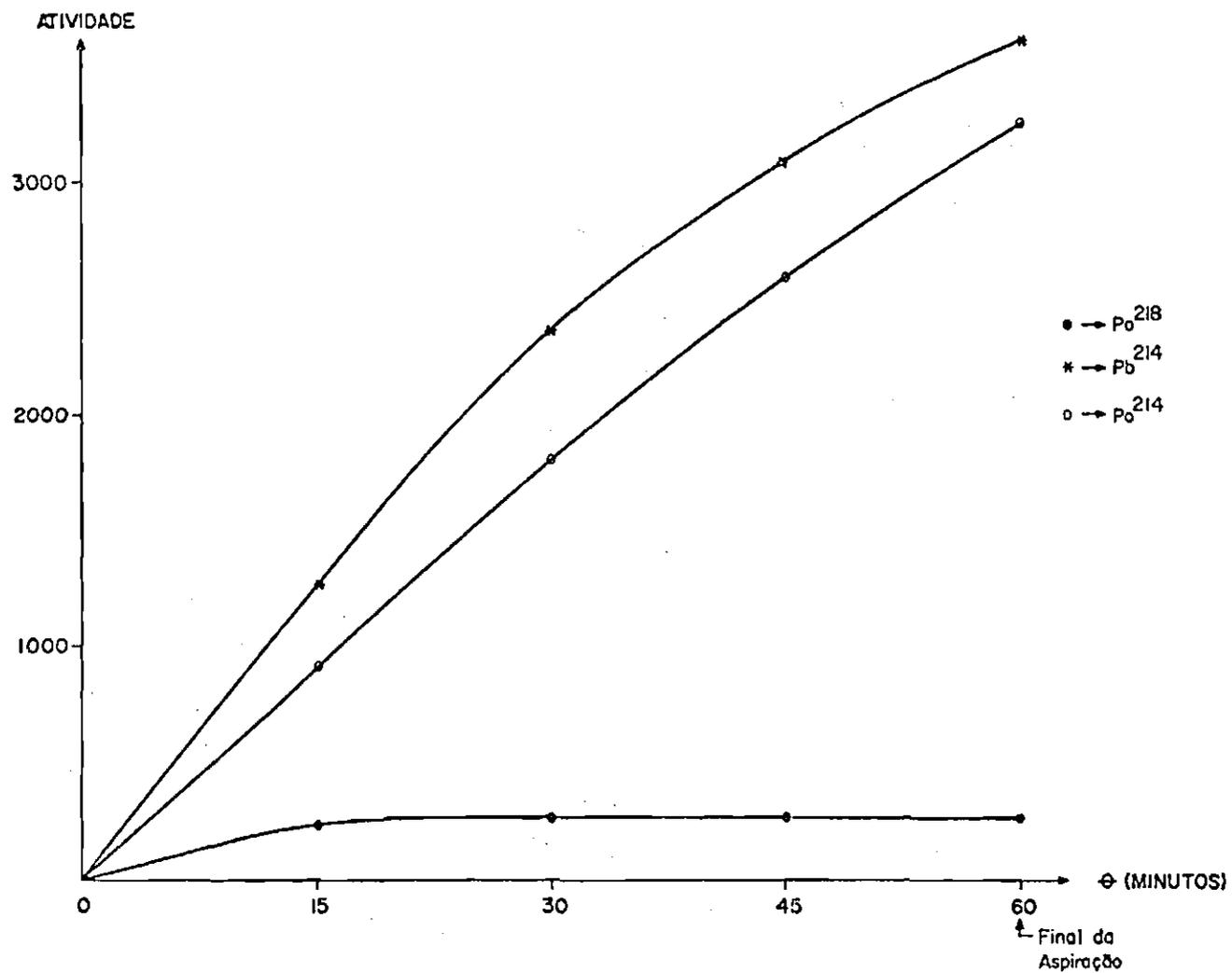


Fig. 2.1a - Crescimento do Po^{218} , Pb^{214} e Po^{214} no filtro durante a amostragem.

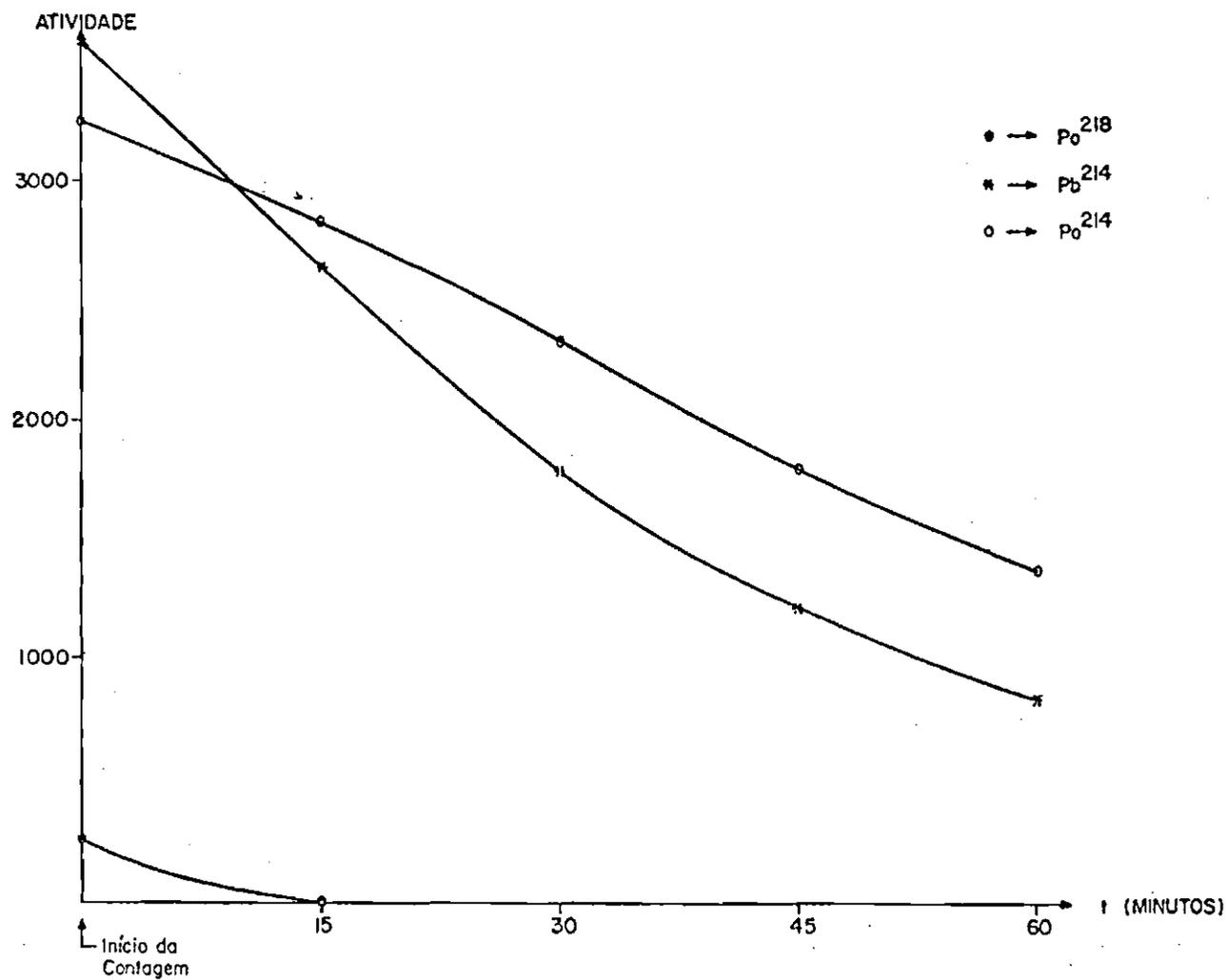


Fig. 2.1b - Decrescimento do Po^{218} , Pb^{214} e Po^{214} no filtro após o final da amostragem.

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DA APARELHAGEM UTILIZADA

O princípio das técnicas de coleção dos aerossóis que carregam os descendentes do radônio (depósito ativo) são as mesmas usadas para coletas de aerossóis e poeiras (Lambert, 1964); algumas delas são as seguintes:

- 1) filtração, que é a retenção das partículas sólidas na superfície de um filtro (Servant, 1966; Gogolak e Beck, 1978);
- b) precipitação eletrostática, a qual consiste na coleção das partículas ionizadas diretamente sobre o detetor por meio de um campo elétrico conveniente (Pereira et alii, 1984);
- c) impactor que é um aparelho que permite uma coleção seletiva de aerossóis.

O primeiro método, que é o mais fácil e simples de ser empregado, permite em geral uma filtração de volumes de ar significativos e tem em princípio uma retenção igual para as mais diferentes partículas, foi o método de coleção do depósito ativo utilizado neste trabalho. Este consiste na aspiração do ar por meio de uma bomba de sucção, através de filtros de membrana que retêm as partículas sólidas em suspensão e deixam passar o gás.

Os diferentes fatores que devem ser considerados no processo de filtração são os seguintes.

- 1) duração da amostragem;
- 2) medida de fluxo e volume de ar filtrado;
- 3) características dos filtros e rendimento de filtração;
- 4) conjunto de filtração.

3.1.1 - DURAÇÃO DA AMOSTRAGEM

O tempo de amostragem foi escolhido levando em consideração dois aspectos mais importantes:

- a) Devido à meia-vida curta do Po^{218} , Bi^{214} e Pb^{214} (Po^{214}), as séries de amostragem contêm atividades representativas destes elementos somente no período de duas a três horas, o qual precede diretamente o término da filtração.
- b) Os fenômenos meteorológicos analisados: variações diurnas da umidade relativa, pressões atmosféricas, direção e velocidade do vento e inversões de temperatura são também de curto período, o que fez com que fosse escolhido um intervalo de tempo conveniente para que não ocorressem mudanças bruscas destes parâmetros. Hosler e Lockhart (1965) amostravam durante 20 minutos ($0,75m^3/min$) enquanto Gogolak e Beck (1978) amostravam durante 15 minutos ($0,53m^3/min$). Os tempos de amostragem adotados foram de 90 minutos e 60 minutos na 1ª e 2ª fase, respectivamente.

3.1.2 - MEDIDAS DE FLUXO E VOLUME DE AR FILTRADO

Na 1ª fase para um tempo de 90 minutos, o fluxo médio foi de $0,04 m^3/min$, e o volume total de ar aspirado foi eventualmente medido com um medidor de volume de ar do Liceu de Artes e Ofícios (São Paulo).

Na 2ª fase para um tempo de amostragem de 60 minutos, teve-se um fluxo de $0,006 m^3/min$. A variação no fluxo de ar (de $0,04 m^3/min$ para $0,006 m^3/min$) foi devida principalmente à mudança do porta-filtros grande para o porta-filtros pequeno. Nesta fase foram usados um fluxômetro CONAUT e um fluxômetro OMEL modelo IP50402 V04.

Em ambas as fases supôs-se que não haveria mudanças significativas nas condições meteorológicas no intervalo de aspiração. Esta afirmação concorda com os dados obtidos por Subba Ramu e Vohra (1969) e Gogolak e Beck (1978).

3.1.3 - CARACTERÍSTICAS DOS FILTROS

Os filtros de membrana utilizados são feitos de uma mistura de ésteres de celulose. A principal característica destes filtros é reter as partículas maiores que os seus poros na sua superfície, o que facilita a análise destes elementos. O filtro de membrana millipore do tipo AA (82% de porosidade com 0,8 μm de diâmetro de poro, 17 mm de diâmetro) foi empregado nas amostragens. Nakatami (1978) e Nazaroff (1983) informaram que o seu rendimento na retenção de partículas radioativas atmosféricas foi de 99%. O raio médio das partículas que agregam descendentes do Rn foi medido por Nakatami (1978) e assume valores no intervalo de $\approx 10^{-1}$ a 10^{-2} μm .

Supôs-se que a eficiência de retenção do filtro e o fluxo de ar durante a amostragem permaneceriam constantes. Para uma aspiração de 5 horas em um dia quente e seco a variação no fluxo foi de 20 l/h, que corresponde a 1,2% do volume de ar aspirado em 1 hora, que é irrelevante.

3.1.4 - CONJUNTO DE FILTRAGEM

O conjunto de filtragem é composto de uma bomba de sucção PRIMAR modelo 141 do tipo 2 V.C., de um porta-filtros de PVC com 47 e 17 mm de diâmetro interno, respectivamente, na 1ª e 2ª fases e, ocasionalmente de medidores de volume de ar e de fluxo (Figura 3.1).

Na 1ª fase a diferença entre o diâmetro interno do porta-filtros (47 mm) e o do filtro (17 mm) foi compensado pela adição de um sanduíche de manta de poliuretano expandido colado à tela que suporta o filtro. Estimou-se que a variação no rendimento de filtragem deste sistema foi de 30%, com relação a 2ª fase.

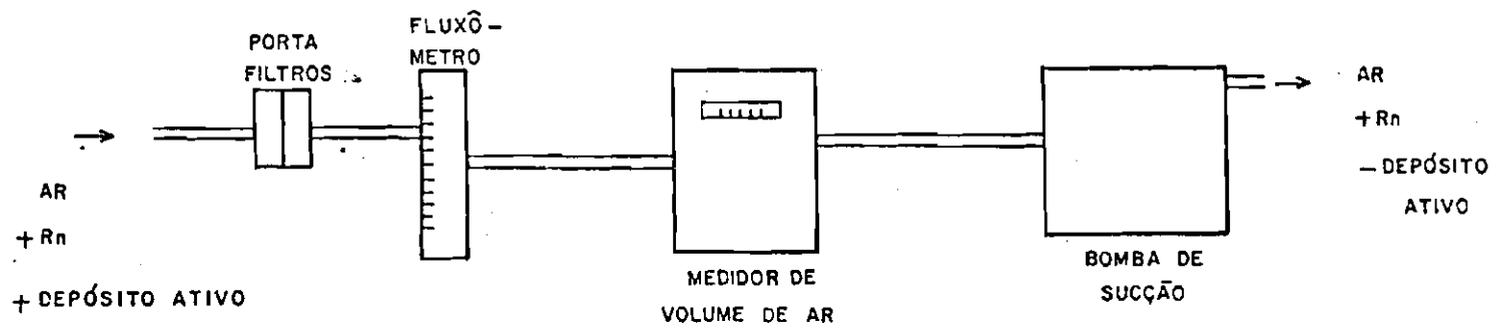


Fig 3.1 - Conjunto de filtragem.

3.2 - CONJUNTO DE MEDIÇÃO ALFA

3.2.1 - DETETORES USADOS NA ESPECTROMETRIA ALFA

Os diferentes tipos de detetores que podem ser usados na detecção de partículas alfa são os cintiladores, câmaras de ionização e diodos semicondutores.

Os cintiladores de sulfeto de zinco ativado com prata, ZnS(Ag), são usados na contagem de partículas α . As câmaras de ionização, apesar de ter um rendimento de quase 100% para contagem de partículas alfa, têm baixa resolução em energia e um ruído de fundo não-desprezível (1 pulso por hora) entre 4 e 8 MeV, o que as destina a amostras cuja atividade é bastante alta.

Os detetores de diodo semicondutor, amplamente usados em pesquisa experimental nuclear nas últimas décadas, revolucionaram a detecção de partículas carregadas neste período de tempo. Além de sua alta resolução em energia, os detetores semicondutores oferecem várias vantagens, tais como: compatibilidade, tempo de resolução (alguns nanossegundos) relativamente curto porque o percurso das partículas alfa é muito curto (16 μm para uma alfa de 5 MeV no silício), o que permite medir atividades elevadas.

Além disso, outras características desse detetor são: a pureza dos materiais usados permite chegar a ruídos de fundo baixíssimos (1 pulso em 10 horas entre 4 e 6 MeV), a sua espessura efetiva pode ser variada para condizer com a necessidade de sua aplicação: tem grande linearidade; é de fácil manuseio; é insensível ao campo magnético e pode ser operado em baixas temperaturas. A descrição geral destes detetores está feita no Apêndice B.

Os detetores semicondutores apresentam dois inconvenientes: o pulso elétrico que ele gera é muito pequeno (tipicamente da ordem de 100 μ V) e necessita, portanto, de um pré-amplificador de carga de sensibilidade elevada (neste caso, de 44 mV/MeV, descrito no Apêndice B), de grande estabilidade e baixíssimo ruído de fundo (um ruído de fundo elevado prejudica a resolução). O rendimento dos diodos semicondutores é menor que o da câmara de ionização (\approx 50%), o fator geométrico é inferior devido ao tamanho limitado do diodo (por exemplo, área sensível = 300 mm²) e a fonte emissora alfa não se aproxima muito do diodo para evitar contaminação.

Estes foram os detetores utilizados nas medidas de espectrometria.

3.2.2 - CÂMARA DE VÁCUO

Assim que termina a aspiração do ar sobre o filtro, este é colocado em uma câmara de vácuo a $5,1 \pm 0,1$ mm da superfície ativa do detetor e feito vácuo da ordem de 10^{-1} a 10^{-2} Torricelli por meio de uma bomba de vácuo Edwards E2M2, medido com um medidor de vácuo da mesma marca modelo PRK/10.

Existem dois fatores principais que justificam o uso deste vácuo relativamente alto: o primeiro é que a perda de energia das partículas alfa no espaço existente entre o filtro e o detetor, quando faz-se vácuo, é praticamente nula. O outro é que o detetor tem melhor desempenho quando não está sujeito a influências externas como a temperatura.

Na 2ª fase deste trabalho foi colocada uma peça entre a fonte emissora alfa e o detetor; deste modo conseguiu-se uma melhoria na eficiência geométrica de detecção (Capítulo 4), o que permitiu uma aproximação maior entre o filtro e o detetor.

3.2.3 - O ANALISADOR DE PULSOS E A IMPRESSORA

Os sinais provenientes dos detetores são convenientemente amplificados (Apêndice B) e as informações são em seguida armazenadas em um analisador de pulsos multicanal NORLAND do tipo 5300, de 1024 canais. No final da acumulação do espectro do filtro no multicanal, a impressora POLYPRINT 90 encarrega-se de imprimir o espectro.

•

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA E CALIBRAÇÕES

O recolhimento de amostras de aerossóis presentes no ar, sobre filtros, constou de duas fases. A primeira delas foi realizada nas dependências do INPE de São José dos Campos (latitude: $23^{\circ}12'S$, longitude: $45^{\circ}51'W$, altitude: 600 m) e a segunda, no INPE de Cachoeira Paulista (latitude: $22^{\circ}41'19"S$, longitude: $45^{\circ}00'22"W$, altitude: 574 m). Estas duas cidades localizam-se no Vale do Paraíba do Sul, Estado de São Paulo. A noroeste do Vale do Paraíba está a Serra da Mantiqueira, com ≈ 1800 m de altura; a sudeste tem-se a Serra do Mar, cuja altura varia, entre 400 m (São José dos Campos) e 1800 m (Cachoeira Paulista). A distância das duas cidades até o mar é de aproximadamente 110 km e a distância entre elas é de 100 km.

4.1 - PRIMEIRA FASE: SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

Amostragens sistemáticas de filtros foram feitas no período de fevereiro a outubro de 1983. O objetivo destas medidas é estudar variações na concentração dos elementos radioativos naturais e correlacioná-los com parâmetros meteorológicos, principalmente a chuva.

Duas séries de amostras foram colhidas, uma pela manhã e outra à tarde. De 28/02/83 a 01/08/83 as aspirações nos filtros tinham início às 08:00 e às 12:00 h, de 03/08/83 a 23/10/83 iniciavam-se às 10:30 e 14:30 h. A duração das amostragens em ambos os períodos foi de 90 minutos. A mudança no horário das medidas ocorreu para que houvesse uma otimização na utilização do sistema de medidas. As amostras foram colhidas nas vizinhanças do antigo Laboratório de Geofísica Nuclear e Geomagnetismo, ao lado do restaurante do INPE em São José dos Campos.

No final da amostragem, o filtro era colocado diretamente 6 mm abaixo da superfície ativa do detetor, segundo uma geometria

padrão. O detetor usado foi um ORTEC modelo A-025-200-100, com resolução de 25 keV FWHM para partículas alfa do Am^{241} e com uma área ativa de 200 mm² e profundidade de depleção de 100 μm. O espectro deste filtro era então registrado no analisador multicanal e, a seguir, impresso.

A calibração em energia foi feita com uma fonte de U^{238} , U^{235} em equilíbrio radioativo. A reta de calibração, que é dada pela relação energia (E) versus número de canal (C), obedece à seguinte equação:

$$C = 9,82 E - 15,06 \quad (E \text{ é expressa em MeV}), \quad (4.1)$$

ajustada aos dados observados pelo método dos mínimos quadrados, cujo coeficiente de determinação é $r=1,00$. Nestas condições a energia por canal é 128 keV e a energia que corresponde ao canal um é 1635 keV.

A verificação da linearidade do sistema foi feita através da comparação do valor experimental (canal 60) com o valor teórico (canal 60) para o pico do Po^{214} . A resolução em energia dada por $R = \Delta E/E \times 100\%$ para partículas alfa do U^{238} é de 7,4%.

O ruído de fundo do sistema foi de 0,2 contagens por hora em todo espectro; foi portanto considerado desprezível em face das atividades relativamente altas medidas.

A duração da acumulação dos dados no analisador multicanal foi de 8000 e 4000 s no primeiro e segundo período de amostragens, respectivamente. Um espectro típico de uma medida feita pela manhã e de outra à tarde está mostrado na Figura 4.1. Nesta figura pode-se observar claramente a presença de três picos que correspondem ao Po^{214} (canal 60), Po^{218} e Bi^{212} (canal 45) e Po^{212} (canal 71). Os dois últimos elementos são descendentes do Rn^{220} (tório) com meias-vidas de 60,5 minutos e $3,04 \times 10^{-7}$ s, respectivamente. O Rn^{220} ($T_{1/2} = 54$ s) pertence à família do Th^{232} ($T_{1/2} = 2 \times 10^{10}$ anos) e é formado pelo

decaimento alfa do Ra^{224} . O Rn^{220} é isótopo do Rn^{222} e tem, portanto, as mesmas características físicas deste elemento, podendo então estar também presente na atmosfera devido à emissão terrestre. A concentração atmosférica de Rn^{220} é muito menor que a de Rn^{222} (Lambert, 1964), pois sua meia-vida de aproximadamente 54 s não é suficiente para que o torônio possa se difundir através do solo de maneira apreciável. A Figura 4.2 mostra o esquema de decaimento do torônio e seus descendentes. Como se verifica, ocorre uma superposição dos picos do Po^{218} e Bi^{212} no canal 45, cujas partículas alfa têm energia de 6,00 MeV e 6,09 MeV, respectivamente.

Porém, considerar-se-á o número de pulsos devidos ao Po^{218} igual a zero, com base nos seguintes fatos:

- 1) A curta meia-vida do Po^{218} ($T_{1/2} = 3,05$ min) faz com que estejam presentes no filtro no instante final de aspiração somente os átomos de Po^{218} coletados durante os 10 minutos finais de aspiração.
- 2) O intervalo entre o final de amostragem e o início da contagem é de 4 minutos, tempo durante o qual a concentração inicial de Po^{218} cai para menos da metade.
- 3) Na Figura 4.2 observa-se que o Bi^{212} decai pela emissão de uma partícula α ou pela emissão de uma partícula β . A probabilidade de decaimento para os dois casos acima é de 33,7% e 66,3%, respectivamente. Para uma série de espectros (Tabela 4.1) fez-se a integral de pulsos detetados na região dos canais 45 e 72. Em seguida calculou-se a porcentagem de pulsos detetados com relação à soma nas duas regiões, obtendo-se $38 \pm 3\%$ e $62 \pm 3\%$, respectivamente.

Pelos três itens acima pode-se afirmar tratar-se do decaimento α do Bi^{212} no canal 45.

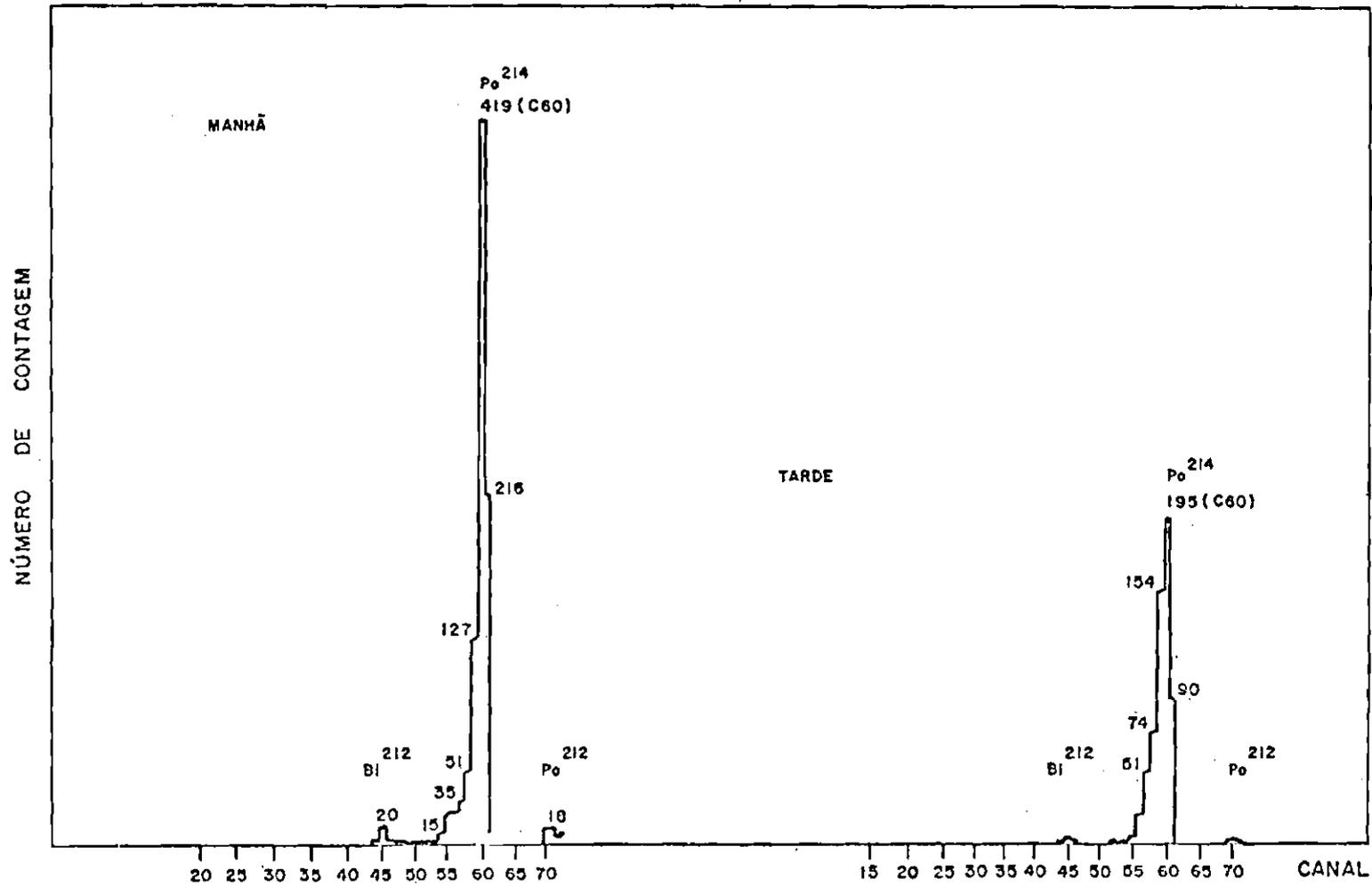


Fig. 4.1 - Espectro de uma amostra de filtro feita pela manhã (espectro da esquerda) e outra à tarde (espectro da direita).

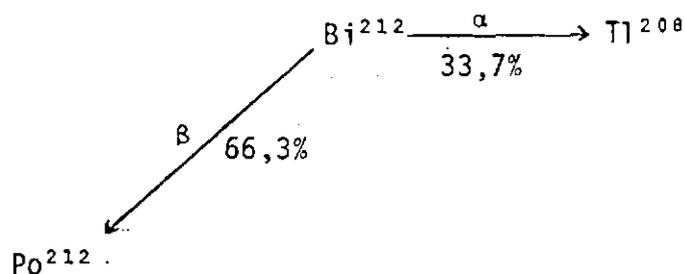


Fig. 4.2 - Esquema de decaimento do Bi^{212} .

Na Figura 4.1 nota-se ainda que o número de contagens no período da manhã é bem mais elevada do que no da tarde, fato que será explicado no Capítulo 5.

A temperatura ambiente foi medida no próprio local da amostragem com erro de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, enquanto os outros dados meteorológicos foram fornecidos pela estação meteorológica do INPE de São José dos Campos.

TABELA 4.1

PORCENTAGEM DE PULSOS DETETADOS NA REGIÃO DOS CANAIS 45 E 72
COM RELAÇÃO À SOMA DOS PULSOS NAS DUAS REGIÕES

NÚMERO DE PULSOS DETETADOS		%	
CANAL 45	CANAL 72	CANAL 45	CANAL 72
52 ± 7	112 ± 11,6	32	68
67 ± 8	102 ± 10	40	60
56 ± 7	97 ± 10	37	63
399 ± 20	643 ± 25	38	62
175 ± 13	270 ± 16	40	60
56 ± 7	93 ± 10	38	62
85 ± 9	136 ± 12	38	62
		Média = 38	Média = 62

4.2 - SEGUNDA FASE: CACHOEIRA PAULISTA

Embora as condições topográficas de São José dos Campos e Cachoeira Paulista sejam semelhantes, como foi visto no início deste Capítulo, o aspecto urbano das duas cidades é totalmente distinto: São José dos Campos é um pólo industrial com 400 indústrias e 300.000 habitantes, enquanto Cachoeira Paulista não possui praticamente nenhuma indústria poluidora do ar e tinha ≈25000 habitantes em 1980.

Além disso, a estação meteorológica de Cachoeira Paulista situa-se em um lugar onde não existem praticamente anteparos artificiais, apenas o prédio térreo do Laboratório, que fica a 50 metros dos equipamentos de medidas meteorológicas. Aproveitou-se também a presença de uma aparelhagem mais completa e precisa para as medidas dos fenômenos meteorológicos e adicionaram-se termômetros a 1, 2 e 4 metros de altura.

Aproveitando-se praticamente da quase ausência de poluição urbana e da maior precisão e facilidade para medidas meteorológicas, fizeram-se mudanças radicais na metodologia de obtenção dos teores de Po^{218} com o objetivo de fazer uma análise quantitativa da estabilidade atmosférica nesta região e estudar flutuações diurnas como a umidade relativa e a pressão atmosférica.

Para isto foram feitas medidas de 23/08/84 a 19/10/84, com intervalo de 4 horas entre as amostragens nos filtros. Os dados meteorológicos: pressão atmosférica, umidade relativa, direção e velocidade do vento, e temperatura medida em três níveis diferentes (1, 2 e 4 m, a partir de 25/09/84) foram obtidos na estação meteorológica de Cachoeira Paulista (mesmo local das amostragens), em intervalos de 15 minutos durante o período de aspiração.

Após a aspiração o filtro era colocado para contagem, a $5,1 \pm 0,1$ mm da superfície ativa do detetor. A distância entre o fil

tro e o detetor pode ser diminuída graças à adição de uma peça. O detetor utilizado foi um ORTEC modelo A-025-300-100, com área ativa de 300 mm².

A calibração do sistema foi refeita, pois além da mudança do detetor foram feitas algumas modificações na eletrônica (como, por exemplo, no ganho do pré-amplificador). A calibração em energia foi feita com a fonte de U²³⁸, U²³⁵ em equilíbrio radioativo, cuja reta de energia (E) versus canal (C) é dada pela equação:

$$C = 26,76E - 13,88 \quad (E \text{ é expressa em MeV}) \quad (4.2)$$

cujo coeficiente de determinação é $r = 0,97$. Esta reta é representada na Figura 4.3, onde se pode notar o aumento de ganho do pré-amplificador da 1ª para a 2ª fase. A energia por canal é de 41 keV e a energia do canal um é de 556 keV.

A resolução em energia para partículas alfa do U²³⁸ é de 1,09%. O ruído de fundo eletrônico em todo o espectro foi de 5 contagens por hora, e o ruído de fundo de um filtro em branco na região do pico do Po²¹⁴ foi de 2 contagens por hora.

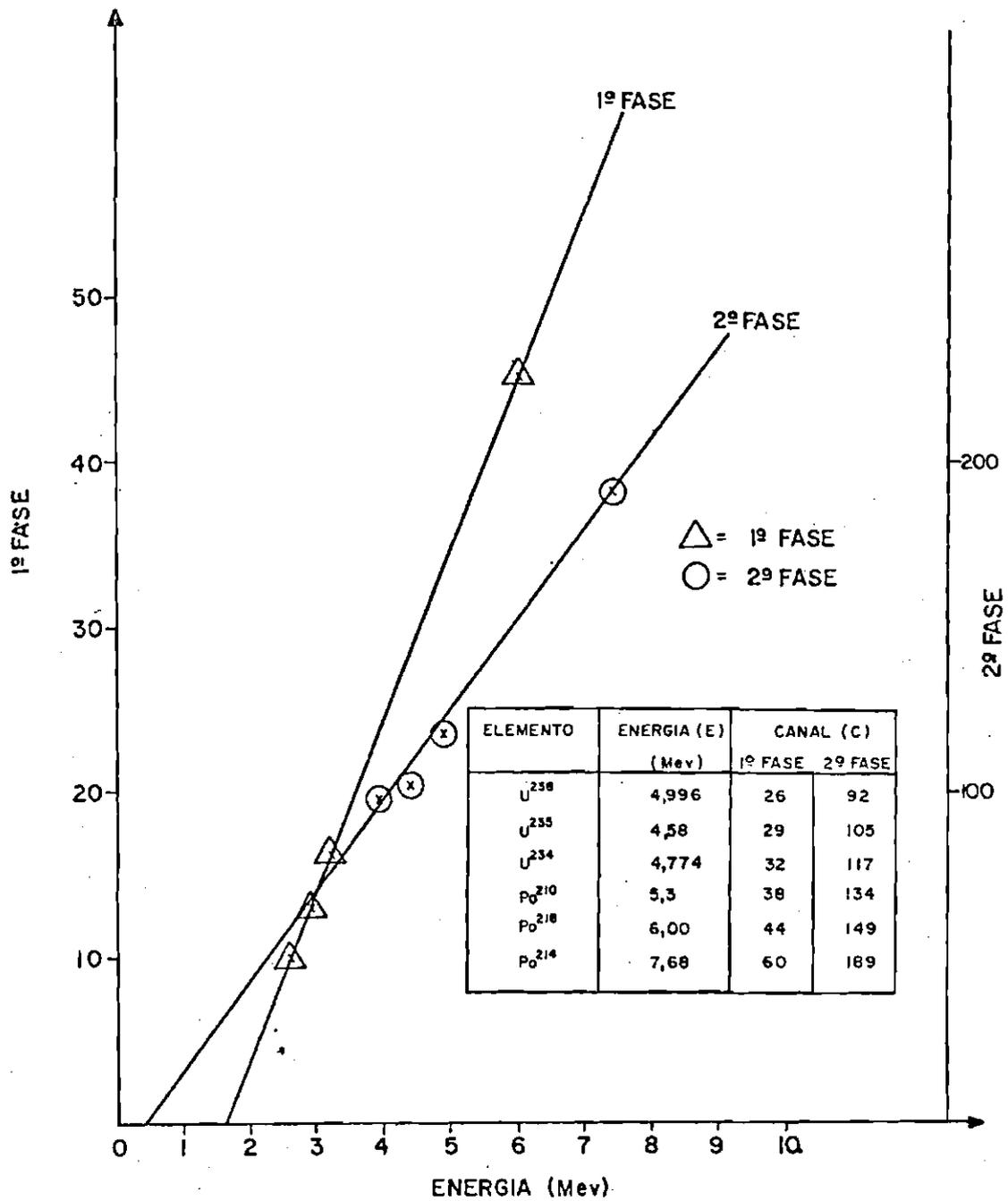


Fig. 4.3 - Relação da energia versus o número do canal para a 1ª e 2ª fase.

Os triângulos e positivo na figura correspondem aos dados obtidos experimentalmente para a 1ª e 2ª fase, respectivamente. A tabela anexa fornece as características da fonte utilizada.

4.3 - EFICIÊNCIA DE CONTAGEM DO SISTEMA

Quando uma fonte radioativa está sendo contada, é imperativo que a eficiência do sistema de medidas seja constante para cada série de medidas e precisamente conhecida. Esta eficiência pode ser avaliada através do conhecimento de diversos fatores que influenciam as medidas e podem ser facilmente calculados quando as características do sistema e o esquema de desintegração dos nuclídeos radioativos são conhecidos.

A taxa de informação útil adquirida por um detetor é determinada por sua eficiência. A eficiência absoluta de detecção (ϵ_a) é definida como:

$$\epsilon_a = \frac{\text{número de pulsos recolhidos}}{\text{número de partículas emitidas pela fonte}}, \quad (4.3)$$

eficiência esta dada pelo produto de eficiência geométrica de contagem (ϵ_g : fator de geometria) e pela eficiência intrínseca do sistema (ϵ_i), a qual é definida como:

$$\epsilon_i = \frac{\text{número de pulsos contados (na faixa de energia considerada)}}{\text{número de partículas incidentes no detetor}}, \quad (4.4)$$

$$\epsilon_a = \epsilon_g \times \epsilon_i. \quad (4.5)$$

No caso da espectrometria alfa, onde a energia da partícula deve ser conhecida, a profundidade sensível do detetor deve exceder o alcance máximo da partícula. Na Figura 4.4 vê-se que o alcance das partículas alfa com energia abaixo de 10 MeV é, no silício, 90 μm e os detetores utilizados têm profundidade de depleção de 100 μm , por tanto, pode-se garantir uma eficiência intrínseca de 100% com os detetores semicondutores. Tem-se então:

$$\epsilon_a = \epsilon_g = \frac{\text{número de pulsos recolhidos}}{\text{número de partículas emitidas pela fonte}} \quad (4.6)$$

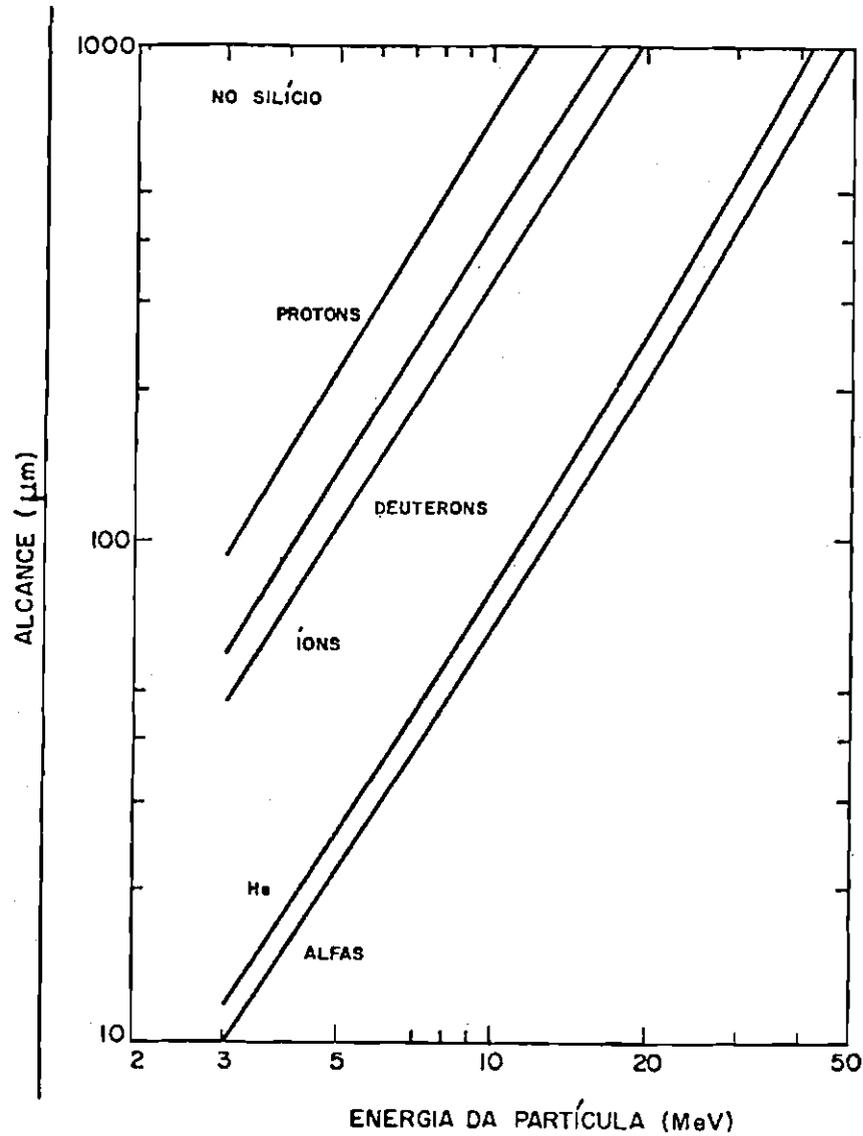


Fig. 4.4 - Intervalo de energia das curvas calculadas para diferentes partículas carregadas no silício.

O comportamento quase linear do gráfico log-log acima do intervalo de energia sugere uma relação empírica da forma $R = aE^b$, onde o parâmetro de inclinação b não é muito diferente para as várias partículas, onde R é a distância E é a energia das partículas, e a e b são os coeficientes da curva.

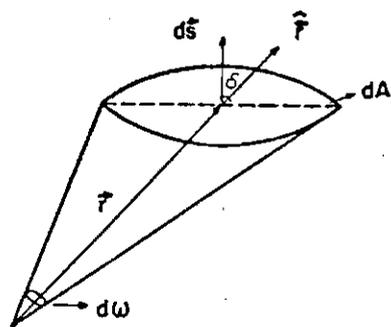
FONTE: Kno11 (1979).

4.3.1 - EFICIÊNCIA GEOMÉTRICA DE CONTAGEM

Após a coleta dos aerossóis do ar o filtro se comporta como uma fonte radioativa em forma de disco, com uma atividade distribuída de maneira uniforme na sua superfície. Embora cada elemento de área (dA) deste disco emita radiação com simetria esférica, somente as partículas emitidas no ângulo sólido (ω) compreendido entre a fonte e o detetor, definido na Figura 4.5, são detetadas.

O ângulo sólido é definido como a integral sobre a superfície do detetor que vê a fonte, integral esta dada por:

$$\omega = \iint_{\text{Area}} \frac{\vec{r} \cdot d\vec{s}}{r^3} = \iint_{\text{Area}} \frac{\cos \delta \, dA}{r^2}, \quad (4.7)$$



FORTE PONTUAL

Fig. 4.5 - Esquema do ângulo sólido.

onde r representa a distância entre a fonte e o elemento de superfície dA ; e δ é o ângulo entre a sua normal e a direção da fonte. A eficiência geométrica é calculada como uma série de c/a desenvolvida por Burtt (1979) e é dada por:

$$\begin{aligned} \epsilon_g = & 0,5 \left[1 - \frac{1}{(1+\rho)^{1/2}} - \frac{3}{8} \frac{\rho\gamma}{(1+\rho)^{5/2}} - \right. \\ & - \gamma^2 \left(-\frac{5}{16} \frac{\rho}{(1+\rho)^{7/2}} + \frac{35}{64} \frac{\rho^2}{(1+\rho)^{9/2}} \right) - \\ & \left. - \gamma^3 \left[\frac{35}{128} \frac{\rho}{(1+\rho)^{9/2}} - \frac{315}{256} \frac{\rho^2}{(1+\rho)^{11/2}} + \frac{1155}{1024} \frac{\rho^3}{(1+\rho)^{13/2}} \right] \right], (4.8) \end{aligned}$$

onde b é o raio do detetor, r é a distância entre o filtro e o detetor, c é o raio do filtro, $\rho = b^2/r^2$ e $\gamma = c^2/r^2$. Esta série convergirá se γ não for muito grande e ρ puder ter qualquer valor.

Para o detetor de 300 mm² de área ativa (raio = 9,77 mm), uma fonte com 5 mm de raio e uma distância de 5,2 mm, a eficiência geométrica calculada através da série acima foi de 0,249. O valor experimental da eficiência geométrica = 0,239 foi obtido com a utilização de uma fonte de Am²⁴¹ (5 mm de raio), cuja atividade é de 1,25 nCi e 1,5% de erro, fonte esta construída pelo IPEN/CNEN/SP. Observou-se uma diferença de 4% entre o valor calculado e o valor experimental para a eficiência geométrica.

Na primeira e segunda fases, os valores de eficiência geométrica calculados para os filtros através da equação 4.8 foram respectivamente 0,138 e 0,252. Na Tabela 4.2 têm-se as características topográficas de São José dos Campos e Cachoeira Paulista e um resumo da calibração do sistema na 1ª e 2ª fases de medidas.

TABELA 4.2

CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS E CACHOEIRA PAULISTA E RESUMO DA CALIBRAÇÃO NA 1ª E 2ª FASES DE MEDIDAS

	1ª FASE	2ª FASE
	São José dos Campos	Cachoeira Paulista
latitude	23°12'S	22°41'19"S
longitude	45°51'W	45°00'22"W
altitude	600 m	574 m
habitantes	≈300000 habitantes pólo industrial	≈25000 habitantes
período	fevereiro a outubro de 1983	agosto a outubro de 1984
distância entre a fonte e o detetor	6 mm	5,1 mm
reta de calibração	$C=9,82E-15,06$ $r = 1,00$	$C=26,76E-13,83$ $r=0,99$
energia por canal	128 keV	41 keV
resolução em energia	7,4%	1,09%
eficiência de contagem (ϵ_g)	0,138	0,252

4.4 - ANÁLISE DE ERROS

Substituindo os valores encontrados nas seções anteriores para t_f , T , ϵ na Equação 2.23, obtêm-se os seguintes valores de atividade do Po^{210} :

$$\Delta_3 = \frac{7,7 \times 10^{-4}}{q \epsilon_g} C_3 \quad \text{no período de fevereiro a agosto de 1983,}$$

$$\Delta_3 = \frac{6,7 \times 10^{-4}}{q \epsilon_g} C_3 \quad \text{no período de agosto a outubro de 1983,}$$

e

$$\Delta_3 = \frac{0,0282}{q \epsilon_g} C_3 \quad \text{no período de agosto a outubro de 1984.}$$

Além da incerteza introduzida quando se admitiu que $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3$ e que as atividades específicas na atmosfera permaneceriam constantes durante a amostragem, a atividade absoluta do Po^{210} está sujeita a três fontes de erro: o erro estatístico no número de contagens, o erro nas medidas do fluxo devidas à imprecisão dos aparelhos utilizados e o erro no cálculo da eficiência geométrica que foi considerado de 4%. Para o cálculo do erro de fluxo foram usadas as medidas de volume total a ser aspirado, calculadas as médias encontradas os desvios padrões. Para a equação geral:

$$\Delta_3 = \frac{a}{q \epsilon_g} C_3.$$

O erro é dado por:

$$\left(\frac{\sigma_{\Delta_3}}{\Delta_3} \right)^2 = \left(\frac{\sigma_q}{q} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\epsilon g}}{\epsilon g} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{C_3}}{C_3} \right)^2$$

$$\sigma_{\Delta_3} = \Delta_3 \left[\left(\frac{\sigma_q}{q} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\epsilon g}}{\epsilon g} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{C_3}}{C_3} \right)^2 \right]^{1/2} .$$

CAPÍTULO 5

INFLUÊNCIAS METEOROLÓGICAS NA CONCENTRAÇÃO DO Po^{214} ATMOSFÉRICO

Como se mencionou anteriormente, a existência de elementos radioativos suspensos no ar, alguns dos quais podem ser facilmente identificados, como o Po^{214} neste caso; sugere o seu uso como traçadores no estudo de certos problemas da física da atmosfera. Os isótopos do elemento 86 e seus produtos de decaimento, os quais são elementos gasosos ou partículas muito finas, difundem-se pela atmosfera como qualquer outro constituinte do ar. Eles podem conseqüentemente ser usados para o estudo de fenômenos meteorológicos.

Com o objetivo de estudar alguns destes fenômenos, realizaram-se duas experiências distintas. A primeira foi realizada em São José dos Campos. Com os dados obtidos procurou-se fazer uma análise tanto qualitativa quanto quantitativa da influência da pluviosidade na concentração do Po^{214} atmosférico.

Na segunda experiência, realizada em Cachoeira Paulista, foi adotada uma metodologia diferente com o objetivo de fazer uma análise da estabilidade atmosférica e de outros parâmetros meteorológicos, como a umidade relativa e a pressão atmosférica.

5.1 - EFEITOS DAS CHUVAS SOBRE A CONCENTRAÇÃO DO POLÔNIO-214 MEDIDOS EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

5.1.1 - ANÁLISE QUALITATIVA DOS DADOS

Devido à metodologia de trabalho adotada na primeira fase, a relação entre a atividade do Po^{214} e a precipitação pode ser analisada, o fator que contribuiu para isto foi a alta taxa de chuvas, com uma média de 151 mm por mês de março a outubro de 1983.

Para o estudo destes efeitos foram coletados dados de concentração do Po^{214} na atmosfera em vários dias chuvosos, bem como as respectivas medidas de precipitação. Coletaram-se também dados da concentração do Po^{214} antes e depois dos dias chuvosos. Estes dados encontram-se na Tabela 5.1.

O objetivo destas medidas foi estudar não apenas o efeito da quantidade de chuva na concentração do Polônio-214 atmosférico, mas também os efeitos observados após as chuvas.

Para esta análise foram utilizados os dados obtidos de manhã entre 28/03/83 e 23/10/83 em São José dos Campos. Os dados de precipitação foram obtidos às 12:00 h do dia da medida, isto é, a quantidade de chuva assinalada corresponde à acumulação de precipitação a partir das 12:00 h do dia anterior à medida de concentração até às 12:00 h do dia da medida.

Nas Figuras 5.1a, 5.1b e 5.1c têm-se a sequência de medidas feitas de atividade do Polônio-218 e a precipitação em função dos dias. Nota-se o aspecto distinto dos três períodos: a Figura 5.1a apresenta vários dias com chuvas fortes; a Figura 5.1b, grande período de chuvas seguido de dias secos e a Figura 5.1c, chuva praticamente constante.

No período de 17/05 a 30/07 (Figura 5.1a) observa-se o efeito de uma sequência de fortes chuvas entre 27/05 a 11/06, a qual perfaz um total de 254,6 mm de precipitação; a concentração do Polônio-218 manteve-se em um nível médio de 140 pCi/m³ nos dias de chuva.

Na Figura 5.1.c, onde a precipitação total foi de 365,6 mm (uma média de 6,5 mm de chuva por dia), a média da atividade do Po^{218} caiu para 70 pCi/m³ nos dias chuvosos.

TABELA 5.1

DADOS DE CONCENTRAÇÃO DO Po^{214} E SUAS RESPECTIVAS
MEDIDAS DE PRECIPITAÇÃO EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

DIA	i.a	f.a	i.c	C_3	A_3	σ_3	ppp1	DIAS DE CHUVA SEM MEDIDAS ppp mm
28/02/83	08:02	09:32	09:36	1245	76,1	4		27/08 - 34
01/03/83	08:10	09:30	09:34	3818	224,0	11	4,5	
02/03/83	08:03	09:35	09:40	1373	86,3	5	0,2	
03/03/83	09:17	10:54	10:57	605	37,8	2	12	
04/03/83	08:06	10:25	10:42	1204	74,3	4	10,8	05/03 - 7,7
07/03/83	08:00	09:33	09:37	1889	41,1	2	8,1	06/03 - 34,0
08/03/83	08:22	09:45	09:49	1791	105,7	5	0,1	
09/03/83	08:03	09:53	09:57	1938	116,3	6		11/03 - 0,2
15/03/83	08:00	09:49	09:53	274	16,7	1	0,1	13/03 - 1,0
16/03	08:00	09:40	09:44	445	6,7	4		18/03 - 0,6
21/03	07:50	09:30	09:34	318	19,1	1	3,8	19/03 - 34,0
22/03	08:05	09:41	09:45	810	48,6	3	0,3	20/03 - 3,8
23/03	08:12	09:30	09:34	283	17,0	1	2,6	26/03 - 2,8
24/03	08:03	09:35	09:34	53	3,7	1		27/03 - 4,6
25/03	08:00	09:33	09:37	1493	81,4	5		
30/03	08:00	09:30	09:34	1934	116,0	6		01/04 - 110
04/04	08:05	09:45	09:44	1103	117,1	6		
05/04	08:04	09:30	09:34	4792	281,2	13	6,3	
06/04	08:05	09:43	09:47	463	27,2	2	73,8	
07/04	08:08	09:46	09:51	181	10,0	1	10,3	
08/04	08:06	10:41	10:46	457	16,8	1		
11/04	08:05	09:34	09:38	1231	46,4	2		
12/04	08:09	09:33	09:37	1115	67,0	4	5,7	
13/04	08:07	09:40	09:44	1163	71,2	4		
14/04	08:04	09:55	09:54	1849	100,4	5		
15/04	08:00	09:30	09:34	2353	141,2	7	16	
16/04	08:00	09:30	09:35	3161	185,8	9		
18/04	08:08	09:35	09:40	959	57,5	3	8,1	21/04 - 34,6
19/04	08:05	09:30	09:35	1814	105,9	5	0,1	22/04 - 1,2
20/04	07:55	09:35	09:41	3363	193,0	9	8,0	24/04 - 35,5
25/04	08:19	09:52	09:59	1238	74,0	4	12,8	
26/04	08:07	09:56	10:02	1542	93,8	5	2,7	
27/04	08:03	09:44	09:46	1730	100,8	5		
28/04	07:40	09:40	09:45	922	55,3	3	0,1	
05/05	08:07	09:35	09:48	588	35,3	2		03/05 - 2,2
06/05	08:08	09:40	09:49	3255	192	9		
09/05	08:05	10:00	10:10	2247	133	7		
10/05	08:05	11:15	11:27	1397	81	4		12/05 - 2,7
11/05	08:08	09:52	10:02	2824	180	8		13/05 - 9,9
16/05	08:04	09:49	09:58	2109	147	7		
17/05	12:00	13:35	13:40	2131	130	6	1,3	
19/05	08:05	09:31	09:37	1181	72	4		
20/05	09:20	11:15	11:20	713	42	2	9,9	
23/05	08:03	09:20	09:24	1665	98	5	24,2	
24/05	07:55	09:51	09:58	518	31	2	2,9	
25/05	08:07	09:47	09:54	2831	173	8	0,3	28/05 - 33,7
26/05	07:57	09:33	09:40	981	57	3		29/05 - 0,5
27/05	08:17	09:30	09:37	862	51	3		
30/05	08:14	09:56	10:20	1468	85	4	56,7	
31/05	08:08	09:49	09:54	1013	64	3	5,7	
01/06	08:10	09:45	09:51	1056	62	3	2,0	02/06 - 5,6
06/06	08:10	09:44	09:55	589	35	2	55,6	03/06 - 21,1
07/06	08:00	09:30	09:39	590	36	2	0,6	04/06 - 7,0

Na
i.a
f.a
i.c
 C_3
 A_3
 σ_3
ppp

24/05	07:55	09:51	09:58	518	31	2	2,9	
25/05	08:07	09:47	09:54	2831	173	8	0,3	28/05 - 33,7
26/05	07:57	09:33	09:40	981	57	3		29/05 - 0,5
27/05	08:17	09:30	09:37	862	51	3		
30/05	08:14	09:58	10:20	1468	85	4	56,7	
31/05	08:08	09:49	09:54	1013	64	3	5,7	
01/06	08:10	09:45	09:51	1056	62	3	2,0	02/06 - 5,6
06/06	08:10	09:44	09:55	589	35	2	55,6	03/06 - 21,1
07/06	08:00	09:30	09:39	590	36	2	0,6	04/06 - 7,0
08/06	08:01	09:35	09:41	740	44	3		05/06 - 12,7
09/06	08:04	09:35	10:00	276	18	1	25,9	
10/06	08:00	09:45	09:50	260	17	1	4,9	11/06 - 23,5
13/06	08:02	08:40	10:09	1385	85	4		
16/06	08:00	09:32	09:37	1962	111	6		
17/06	08:00	09:50	09:56	1145	69	4		
20/06	07:56	09:31	09:37	4948	297	14		
21/06	07:50	09:20	09:25	3418	197	9		
22/06	07:58	09:31	09:36	4456	263	12		
23/06	08:05	09:40	09:45	4819	284	14		
25/06	08:03	10:00	10:05	4438	266	13		
27/06	08:02	09:35	09:40	1144	67	4		
28/06	08:00	09:35	09:40	1437	84	4	8,5	
29/06	07:58	09:31	09:37	766	42	2	2,1	
30/06	07:56	08:41	09:47	1393	87	5		
01/07	07:56	09:35	09:40	4811	289	14		
04/07	07:58	09:45	09:50	4998				
05/07	07:56	09:41	09:48	1082				
02/09	10:35	12:05	12:01	792	43	2	0,9	03/09 - 5,3
05/09	10:00	11:40	11:57	1301	78	4	8,9	04/09 - 24,0
06/09	10:20	11:50	11:55	170	46	3	33,7	07/09 - 7,6
08/09	10:45	12:25	12:30	172	161	9	6,9	08/09 - 7,6
12/09	10:50	12:30	12:34	374	34	2	15,7	11/09 - 1,5
13/09	10:30	11:55	12:00	769	47	3	2,4	
14/09	10:38	11:57	12:05	461	24	2		15/09 - 11,8
16/09	10:36	11:55	12:00	609	40	2		
19/09	10:28	11:55	12:00	695	42	2	38	17/09 - 17,5
20/09	10:39	12:15	12:20	265	16	1		18/09 - 31,5
21/09	10:22	12:07	12:11	596	36	2		
22/09	10:34	12:00	12:09	516	33	2	27,9	
23/09	10:45	11:55	12:02	770	46	3	25,5	24/09 - 21,1
26/09	10:30	11:55	12:00	285	17	1		
27/09	10:38	12:10	12:15	141	8	1		
28/09	10:25	12:08	12:14	227	14	1		
29/09	10:30	11:56	12:01	311	19	1		
30/09	10:36	11:55	12:04	402	24	2		01/10 - 25,9
03/10	10:35	12:08	12:19	257	15	1	4,9	02/10 - 0,9
04/10	09:20	11:00	11:04	367	23	2		
05/10	09:20	10:57	11:04	492	30	2		
06/10	09:25	11:00	11:05	367	22	2		
07/10	09:27	10:56	11:02	718	45	3		
10/10	09:40	11:12	11:19	354	22	1		
11/10	09:20	10:55	10:59	538	33	2		
13/10	09:26	11:09	11:15	564	35	2	8,2	
14/10	09:14	10:50	11:17	311	19	1	7,8	15/10 - 2,2
17/10	09:20	11:00	11:07	880	51	3	0,3	
18/10	09:20	10:48	10:55	847	51	3	23,8	
20/10	09:19	10:55	11:00	318	20	1		
21/10	09:20	11:27	11:33	591	36	2		22/10 - 6,2
25/10	09:05	10:32	10:40	258	7	1		23/10 - 31,5
26/10	09:30	10:50	11:00	328	16	1		24/10 - 3,5
09/11	09:15	10:46	10:53	1118	20	1		31/10 - 4,4
09/11	09:30	14:16	14:26	766				01/11 - 16,0
10/11	09:23	10:51	11:01	905			18,7	02/11 - 29,0
11/11	09:23	10:54	10:58	1472			6,7	04/11 - 12,0
16/11	09:42	10:57	11:03	272				12/11 - 3,8
17/11	09:40	11:08	11:13	526				14/11 - 1,1

49-

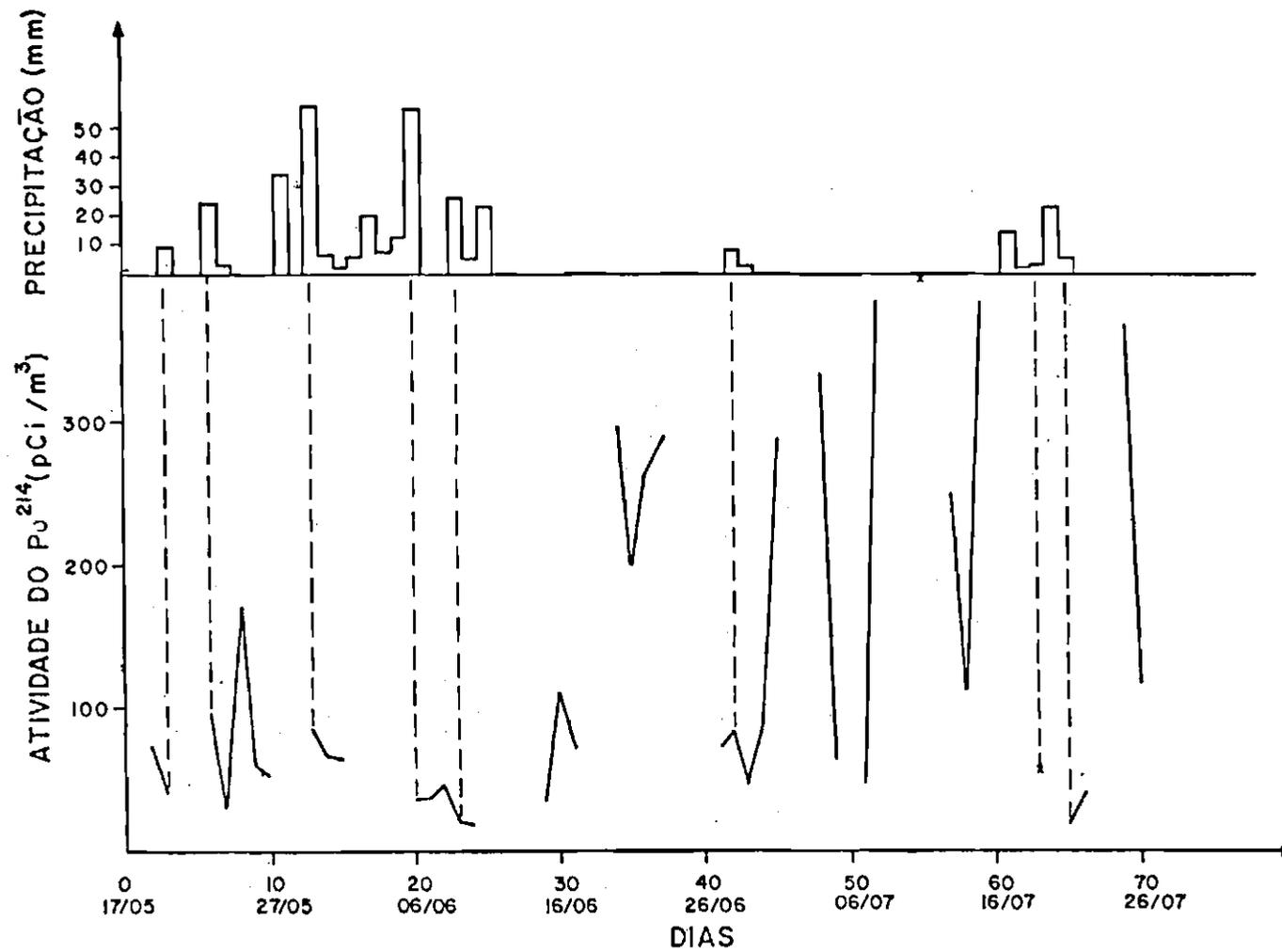


Fig. 5.1a - Medidas da atividades do Po^{214} (feitas à 8 h da manhã) e precipitação em função do tempo obtidas em São José dos Campos no período de 17/05/83 a 31/07/83.

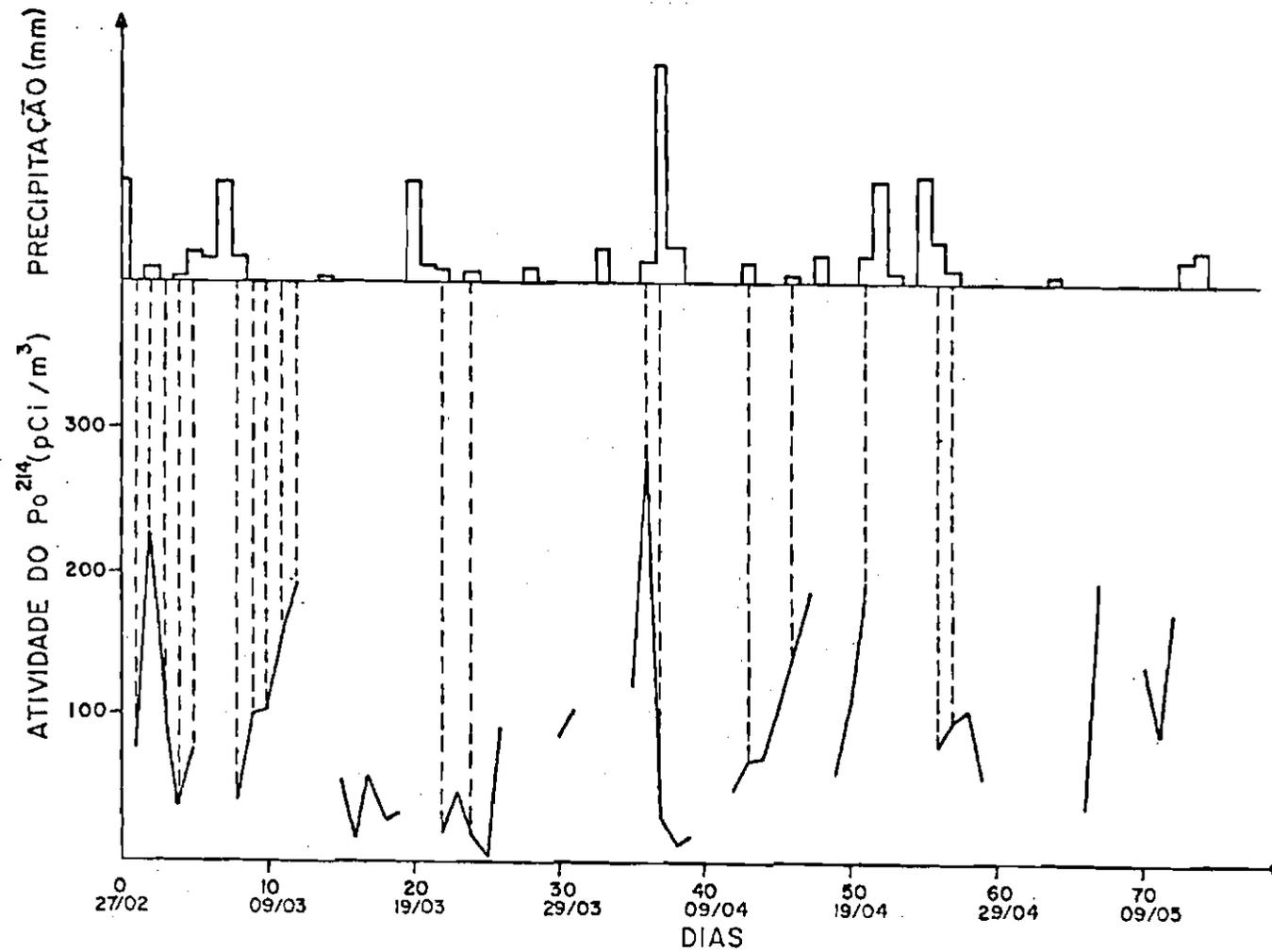


Fig. 5.1b - Medidas da atividade do Po^{214} (feitas às 8 h da manhã) e precipitação em função do tempo obtidas em São José dos Campos no período de 27/02/83 a 16/05/83.

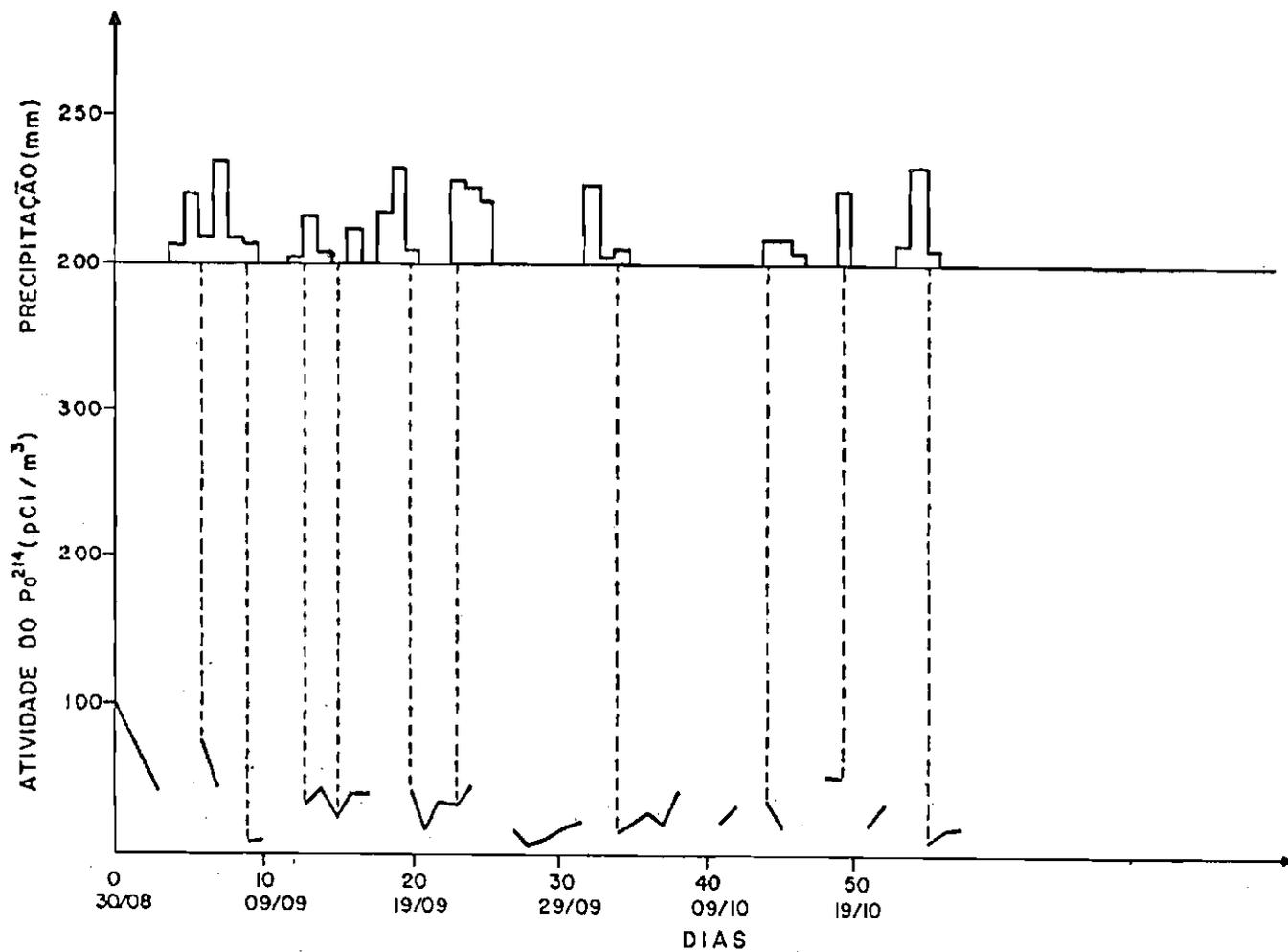


Fig. 5.1c - Medidas da atividade do Po²¹⁴ (feitas à 8 h da manhã) e precipitação em função do tempo obtidas em São José dos Campos no período de 30/08/83 a 26/10/83.

Nas Figuras 5.1a, b e c pode-se verificar que:

- a) A concentração do Po^{214} na atmosfera apresenta uma diminuição durante os períodos de chuva.
- b) A concentração tende a subir novamente nos dias posteriores às chuvas.

Procurar-se-á analisar a seguir os possíveis processos que explicam os fenômenos descritos acima.

5.1.2 - PROCESSOS DE MIGRAÇÃO DO RADÔNIO E MECANISMOS DE AÇÃO DA CHUVA

O Rn formado no solo através da desintegração do Ra^{226} , existente nas rochas, tem um movimento inicial de recuo devido a essa desintegração. Esta energia cinética de ≈ 100 eV é despendida numa trajetória da ordem de 3×10^{-6} cm nas próprias rochas, da ordem de 8×10^{-3} cm no ar e da ordem de 10^{-5} cm na água. Os átomos de Rn podem completar seu recuo nas porosidades do solo, ou podem ficar retidos nos próprios minerais ou moléculas do solo.

Além desse movimento de curto alcance, o Rn, devido a sua natureza gasosa, pode migrar por difusão, que ocorre quando este se move em relação ao fluido que enche os poros do meio, nos quais ele pode penetrar por recuo ou por difusão. Outro processo de migração é denominado transporte quando o próprio fluido se move no meio poroso, levando consigo o Rn.

A queda da concentração do Po^{214} atmosférico pode então ser explicada primeiramente pelo transporte do Rn e de seus descendentes para profundidades maiores pelas águas provenientes da chuva, devido à alta solubilidade do radônio nestas. Com o entupimento dos poros do solo pelas águas das chuvas, há o acúmulo de Rn no solo pois a quantidade que consegue escapar por difusão para a atmosfera é bastan

te pequena com relação à exalada normalmente com o solo seco. Há en tão uma preponderância do mecanismo de transporte sobre o de difusão no solo nestas condições.

Após o término da chuva o bloqueio da saída de Rn vai diminuindo como consequência da penetração das águas em níveis mais profundos, o que permite a saída do gás das camadas superiores por di fusão e pela evaporação das águas superficiais. Há também um outro mecanismo, essencialmente de transporte, que faz com que a radioativi dade atmosférica devida ao Rn e a seus descendentes retorne ao normal (um ou dois dias após o término das chuvas), principalmente quando se têm dias quentes e ensolarados (p. ex.: dia 13/06/83, temperatura de 25°C, céu limpo e Sol; dia 01/07/83 apesar da temperatura de 17,5°C, o rápido aumento na concentração de Po²¹⁸ pode ser explicado pela pre sença de uma espessa neblina), desde que não ocorram ventos fortes (que não foram medidos na ocasião). Esse mecanismo ocorre do seguin te modo: a água, ao penetrar no solo, dissolve os átomos solúveis de Ra neles contidos, e estes passam a fazer parte das águas que enchem os poros. Ter-se-á então, por desintegração radioativa do Ra, o apa recimento do Rn que, apesar do seu recuo, ficará ainda, em sua maior parte, contido nessa porosidade a qual conterá também íons de Rn pro venientes dos átomos de Ra vizinhos. Com o aquecimento do solo e di ferença de temperatura entre solo e ar, há evaporação dessa água, que transporta consigo grande quantidade de Rn e seus descendentes que passam para a atmosfera. Esse mecanismo faz então com que em dias pos teriores às chuvas haja um aumento considerável do Rn atmosférico não só por difusão, mas também por transporte. As variações na pressão atmosférica também podem afetar o teor de emissão de radônio do solo, através do mecanismo de bombeamento.

A análise feita acima concorda com os dados obtidos por Servant (1964) em Saclay, Fontan et alii (1966) em Toulouse, ambas ci dades da França, e Israel et alii (1966) em Aachen, Alemanha. A re

gião de pesquisa destes autores está situada entre 45° e 60° de latitude norte, a uma altitude de aproximadamente 200 m e com clima oceânico (invernos rigorosos com máximos de chuvas no verão e no outono).

De acordo com Servant, uma chuva de 10 mm de altura freiará a emissão de Rn do solo de um fator dois ou três durante três dias se o terreno não for inundado.

5.1.3 - CORRELAÇÃO ENTRE A ATIVIDADE DO Po^{214} E A PRECIPITAÇÃO

Nas Figuras 5.2a, b e c relacionaram-se as atividades do Po^{214} versus a precipitação da chuva. Na Figura 5.2a foi considerada apenas a chuva que caiu no dia correspondente ao dia da medida do Po^{214} , enquanto nas Figuras 5.2b e 5.2c foram adicionadas as chuvas da véspera e da antevéspera, respectivamente. Este procedimento deve-se ao fato (já citado anteriormente) de o radônio levar aproximadamente 3 dias sem chuva (após uma chuva de 10 mm) para atingir seu teor normal de emissão do solo.

Na Figura 5.2a tem-se a curva limitante entre a região I, onde estão concentrados os pontos, e a região II, onde há ausência de pontos. A equação desta curva é dada por:

$$\Delta = 219,74 e^{-0,03 ppp1} \quad r = 0,82 , \quad (5.1)$$

a qual foi obtida pelo método dos mínimos quadrados com dados da Tabela 5.2, que são os pontos limitantes entre a região I e a região II.

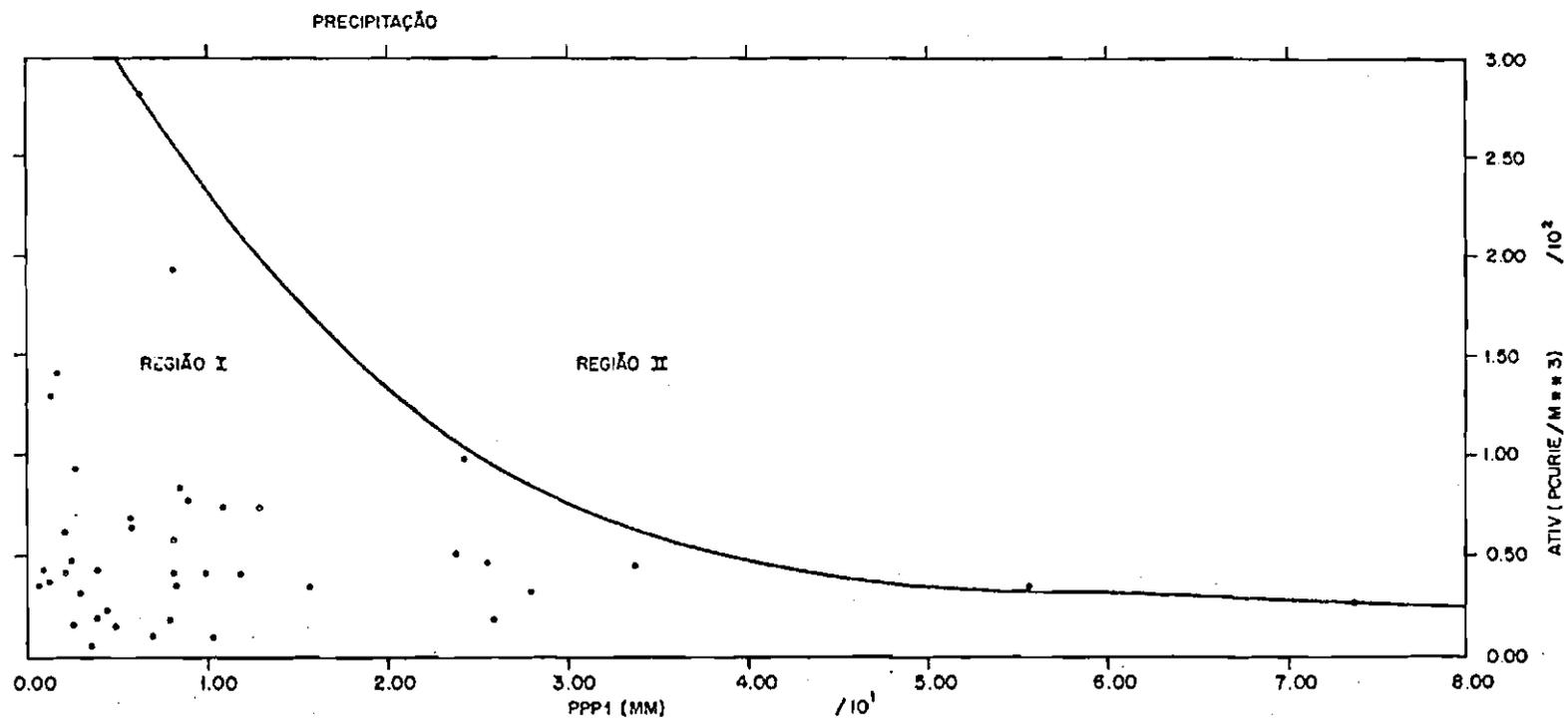


Fig. 5.2a - Atividade do Po^{214} em função da precipitação que caiu durante o dia da medida.

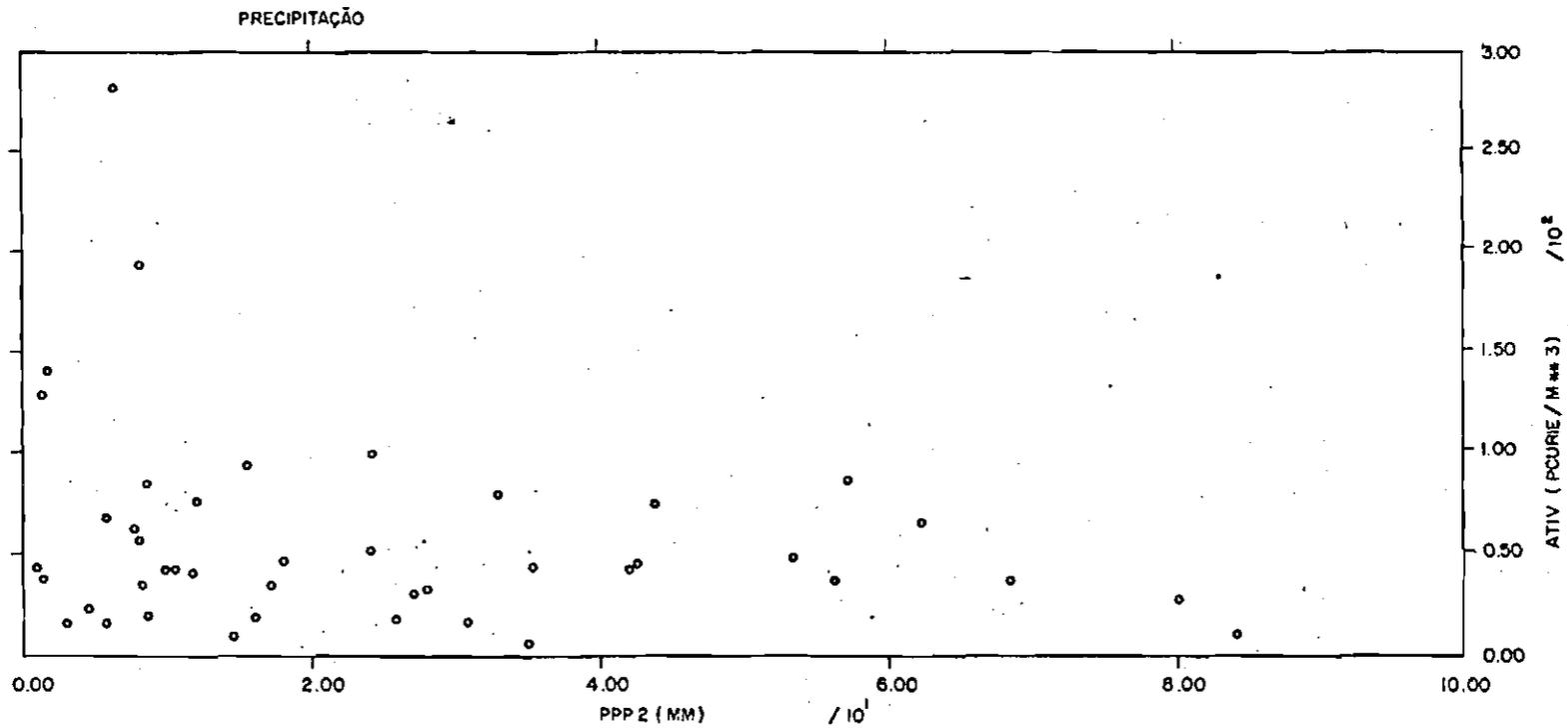


Fig. 5.2b - Atividade do Po^{214} em função da precipitação do dia da medida mais a precipitação da véspera.

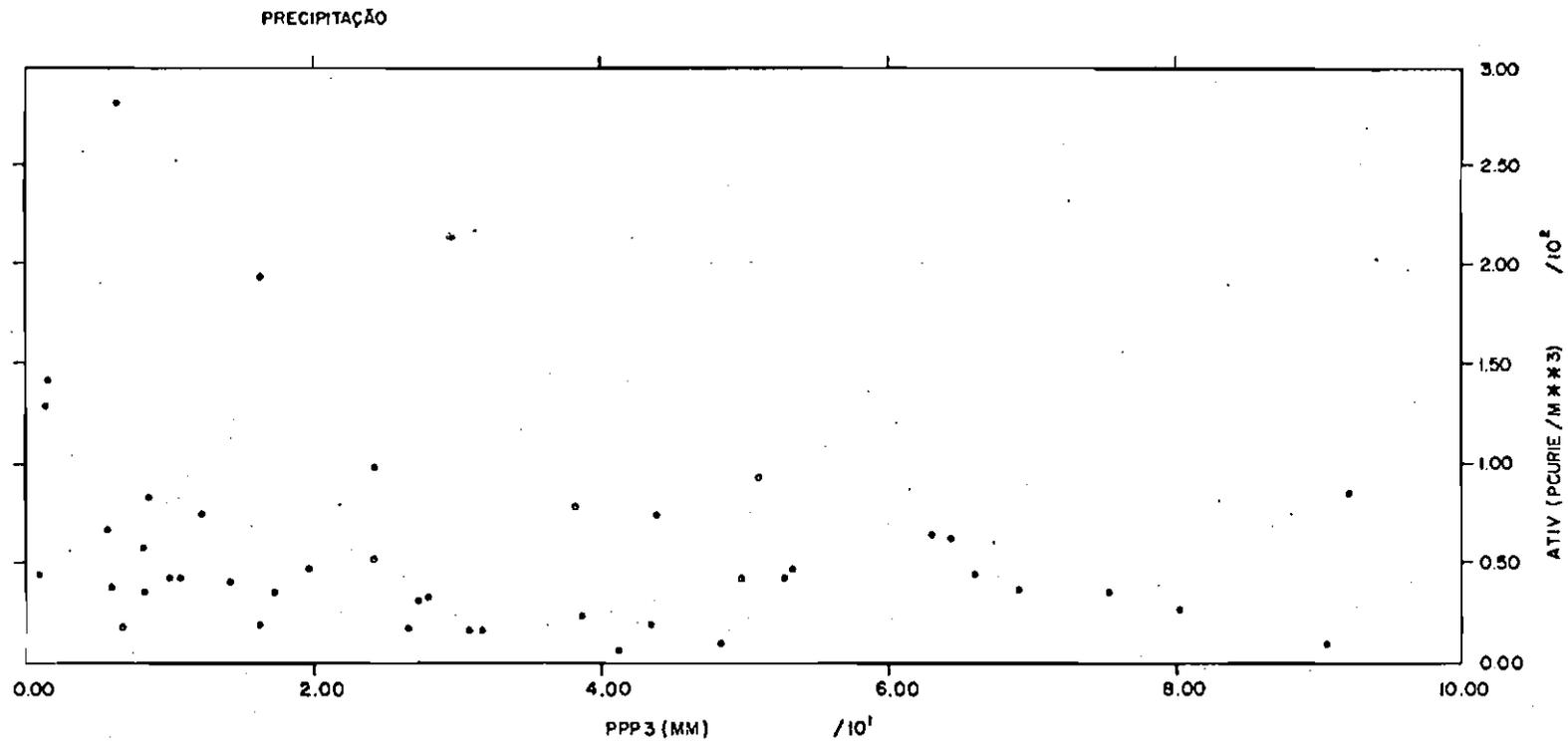


Fig. 5.2c - Atividade do Po^{214} em função da precipitação que caiu no dia da medida mais a precipitação da véspera e antevéspera.

TABELA 5.2

DADOS DE PRECIPITAÇÃO NO DIA DE CHUVA (ppp1) E ATIVIDADE DO Po²¹⁴ (Δ)
NESTE DIA, UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA CURVA 5.1

ppp1 mm	Δ pCi/m ³	dia
6,3	281	05/04
24,2	98	23/05
33,7	45	08/09
55,6	35	06/06
73,8	27	06/04
56,7	85	30/05

Verifica-se pela curva da Figura 5.2a que há uma alta atividade do Po²¹⁴ correspondente a um baixo índice pluviométrico e, inversamente, uma baixa atividade do Po²¹⁴ correspondente a uma alta taxa de chuva. Este fato é evidenciado nas Figuras 5.2b e c.

A investigação do comportamento assintótico da curva 5.1 é feita tomando o limite abaixo:

$$\lim_{ppp1 \rightarrow \infty} 219,74 e^{-0,03 ppp1} = 0.$$

Isto é, a curva 5.1 possui uma assíntota que coincide com o eixo das abcissas, o que significa que para o terreno bastante alagado ter-se-á atividade nula.

Tentou-se fazer um ajuste segundo uma exponencial de crescente para os dados da Figura 5.2c, obtendo-se, no entanto, um baixo coeficiente de correlação, $r=0,3$, fato que é explicado pela alta dispersão dos pontos e pela baixa concentração destes nos extremos da curva.

5.2 - ESTUDO DA ESTABILIDADE NA BAIXA ATMOSFERA

Foi observado que em certas condições pode-se supor que a intensidade da emissão de radônio do solo para a atmosfera é aproximadamente constante (Shapiro e Forbes-Resha, 1975; Jacobi e André, 1963) e que a concentração de radônio no ar a um certo nível é praticamente uniforme em um dado instante (Servant, 1964). As variações no tempo e no espaço do teor de radônio e de seus descendentes durante um período de baixa pluviosidade devem ser devidas principalmente a transportes verticais destes elementos na atmosfera, cuja intensidade depende da estabilidade do ar. O estudo da estabilidade da atmosfera em função das condições meteorológicas é um dos problemas importantes estudado por meteorologistas, climatologistas e físicos que tratam de poluição atmosférica, seja próxima a centros urbanos ou centros atômicos, seja na superfície inteira do globo.

Estudar-se-á em seguida a influência da temperatura e do vento sobre uma camada de ar da baixa atmosfera, onde a presença da terra como parede sólida é primordial. O objetivo é julgar a concentração de Po^{218} e a estabilidade do ar.

5.2.1 - ASPECTOS DA ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA

A expressão para temperatura como uma função da altura acima da superfície é chamada de perfil de temperatura. Variações da temperatura com a altura são os fatores mais importantes em micrometeorologia. É fato conhecido que, em geral, a temperatura diminui com a altura, mas esta afirmação deve ser modificada para condições próximas ao solo. Em um dia quente e claro, a temperatura diminui rapidamente com a altura nas camadas superficiais, mas após o pôr do Sol, especialmente com o céu claro, a temperatura do ar nestas camadas superficiais aumenta do chão para cima, que é um estado conhecido como inversão. A determinação teórica do perfil de temperatura na atmosfera não pode ser alcançada diretamente.

O movimento do ar próximo à superfície da terra não segue, geralmente um modelo estático ou um modelo aerodinâmico reconhecível, a não ser em circunstâncias muito especiais. O fluxo laminar, no qual uma partícula do fluido segue exatamente o mesmo caminho do seu predecessor, é uma idealização matemática, que é uma aproximação útil, porém limitada, do que acontece em certas ocasiões. O estado natural do movimento do fluido atmosférico é aquele no qual o movimento de partículas individuais é extremamente complicado, embora se possa reconhecer um caminho médio razoavelmente simples no meio desta confusão.

Considerem-se, por exemplo, condições próximas ao nível do chão, liso ou coberto com grama curta, durante a tarde e a noite de um dia ensolarado de verão ou outono. Quando o Sol está alto no céu, a temperatura da superfície aumenta consideravelmente acima da temperatura do ar imediatamente em contato com este e o vento é altamente turbulento. Quando o Sol se põe, a temperatura do chão diminui rapidamente abaixo da do ar, com o resultado de que as camadas de atmosfera imediatamente em contato com o chão são esfriadas e tornam-se mais densas que a camada ao redor. A manutenção deste estado turbulento implica que massas de ar estão sendo movidas continuamente na vertical, tal que se a queda de densidade com a altura é muito pronunciada, considerável trabalho deve ser realizado na elevação das massas mais densas no sentido oposto ao campo gravitacional, com o gasto da energia do movimento médio. O resultado inevitável é que, nestas circunstâncias, o movimento turbulento torna-se menos pronunciado e deve acabar completamente. Considerando que o céu permanente claro e que não há grandes gradientes horizontais de pressão, este estado da atmosfera continua até o amanhecer, quando a radiação solar aumenta a temperatura do chão e, em seguida, a das mais baixas camadas de ar. A posição é agora invertida, o ar menos denso está embaixo, e qualquer tendência para movimentos verticais é aumentada pela preponderância da distribuição de densidades. Logo após o amanhecer o fluxo quase laminar dá lugar ao movimento turbulento, o qual continua durante o dia.

A turbulência atmosférica próxima ao chão exibe então uma pronunciada variação diurna, que é alta para grandes gradientes adiabáticos de temperatura (lapse rate) e pequena para grandes inversões.

Em termos gerais o problema deve ser aproximado considerando certos casos limites relativamente simples, o mais importante sendo aquele que introduz um valor particular no gradiente de temperatura conhecido como gradiente adiabático de temperatura.

O problema a ser considerado é o seguinte: uma parcela de ar aquecida se expande e sua densidade diminui fazendo com que esta tenda a subir na atmosfera. Em sua ascensão, a parcela de ar encontrará pressões atmosféricas menores, o que resultará em nova expansão e num decréscimo de temperatura. Neste caso, não há troca de calor da parcela de ar com o seu ambiente, a diminuição de sua temperatura com a altura é uma constante, chamada gradiente adiabático de temperatura dado por $-g/C_p$, onde g é a aceleração de gravidade e C_p é a capacidade calorífica do ar a pressão constante.

Este resultado fornece, um critério de estabilidade para a atmosfera. Se o gradiente de temperatura da atmosfera excede o gradiente adiabático de temperatura, um volume de ar deslocado para cima de uma pequena altura, a partir de um nível no qual ele tinha a mesma temperatura e pressão que a atmosfera ao redor, estará a uma temperatura maior que o ambiente no novo nível e terá, portanto, uma densidade menor que o ar ao redor. A força de sustentação que resulta desta condição significa que o volume deve continuar subindo, devendo esta atmosfera ser classificada como instável. Do mesmo modo, em uma atmosfera cujo gradiente de temperatura é menor que o gradiente adiabático de temperatura, uma massa de ar forçada a subir será mais densa que o seu meio ambiente e tenderá a retornar ao seu antigo nível, uma condição necessária para sua estabilidade. Então pode-se, dizer que uma atmosfera seca encontra-se em equilíbrio neutro, estável ou instável, conforme a taxa de variação de temperatura na verti

cal é igual a, menor ou maior que o gradiente adiabático de temperatura. Quando o céu está completamente coberto com nuvens espessas e há um vento moderado ou forte, o gradiente de temperatura permanece pequeno e estável e, nestas condições, o grau de turbulência mostra pequenas variações do dia para a noite. As horas durante as quais a temperatura diminui rapidamente com a altura e a turbulência é mais pronunciada serão denominados período de queda e, quando se tem a condição inversa (por exemplo, em noites claras), período de inversão. No estudo da turbulência atmosférica o parâmetro básico utilizado é o número de Richardson definido por

$$Ri = \frac{g}{T} \frac{d \text{Temp}}{dz} \frac{1}{\left(\frac{d \text{Vel}}{dz} \right)^2}, \quad (5.2)$$

onde (Sutton, 1953; Kirchhoff, 1978):

g - aceleração da gravidade = $9,8 \text{ m/s}^2$;

$\frac{d \text{Temp}}{dz}$ - gradiente vertical da temperatura do ar entre 1 e 4 m;

$\frac{d \text{Vel}}{dz}$ - gradiente vertical do vento, entre 0 e 10 m, onde foi admitido que para $z = 0$, $\text{Vel} = 0$;

Temp - temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) a 1 m de altura.

5.2.2 - O CRITÉRIO DE RICHARDSON

Para verificar esta estabilidade térmica da atmosfera próxima ao solo, fizeram-se medidas da diferença de temperatura do ar a 1, 2 e 4 m de altura e da radioatividade do ar através do Po^{214} a 3 m. A Figura 5.3 representa um registro das variações diárias da concentração do Po^{214} na época das experiências efetuadas em Cachoeira Paulista cujos dados encontram-se na Tabela 5.3 e 5.4. No período de 24 horas

consecutivas, a radioatividade atmosférica aumenta quando o ar próximo ao solo se esfria (Wilkening, 1972; Pearson e Moses, 1966), isto é, quando há inversão de temperatura do ar (dias 26 e 27 de setembro, 16 e 17 de outubro), à noite, e diminui quando o ar próximo ao solo se aquece sobre a influência dos raios solares, durante o dia. Assim nota-se habitualmente uma alternância de fortes e fracas concentrações da radioatividade do ar ligada às variações de sinal do gradiente de temperatura do ar próximo ao solo.

O exemplo acima coloca em evidência a importância da estabilidade térmica da atmosfera sobre os movimentos verticais desta. As diferenças de temperatura do ar entre 1, 2 e 4 m foram determinadas através de termômetros de mercúrio com precisão de décimo de grau. Esses termômetros ficaram dentro de abrigos especiais, naturalmente arejados pelo ar, os quais protegem os termômetros dos raios solares diretos e da chuva. Os abrigos foram fixados à torre meteorológica. A estabilidade térmica, não implica uma grande estabilidade do ar. A velocidade do vento a alguns metros acima do solo deve permanecer fraca e ser inferior a aproximadamente $1 \text{ m/s} = 1,94 \text{ nós}$ (Servant, 1964) para que se considere o ar estável. Como critério para análise de estabilidade atmosférica, adotou-se o número de Richardson (Equação 5.2).

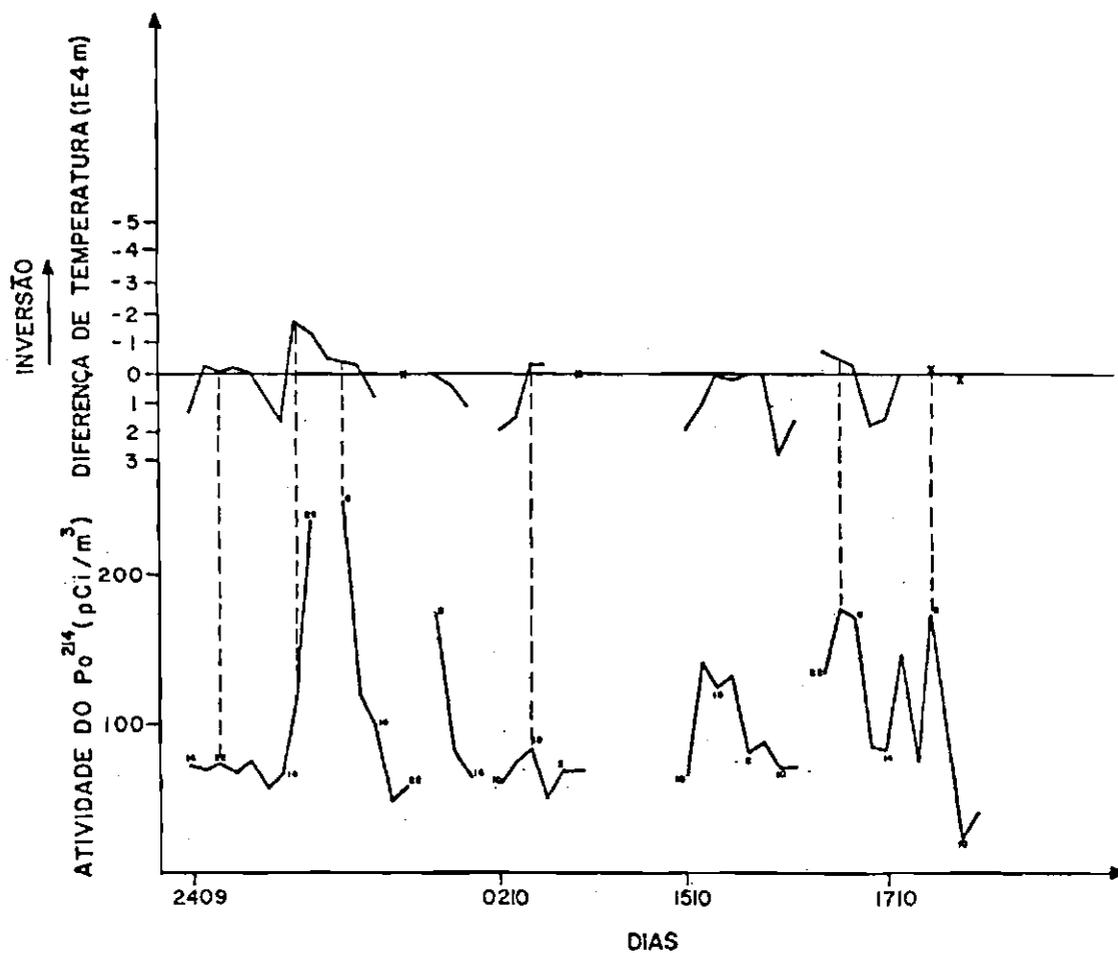


Fig. 5.3 - Atividade do polônio-218 no ar e inversões de temperatura em função dos dias.

Os números que aparecem na figura correspondem ao horário em que foi feita a medida.

TABELA 5.3

MEDIDAS FEITAS EM CACHOEIRA PAULISTA

DIA	HORA LOCAL	TEMP. AMB. °C	VENTO VEL. DIR.		PRESSÃO mbarr	UMIDADE %	i.a	f.a.	i.c.	ΔV $\frac{m}{s}$	C_s	Δ_1 pci/m ²	σ_{Δ_1}
03/09/84	18:00	22,0	3,5	138	952,6	36	18:00	19:00	19:04	271,8	572	101	6
	18:30	21,2	3,4	138	952,7	38							
	18:45	21,4	4,3	144	953,1	38							
	19:10	20,2	2,1	144	953,2	40							
	MEDIA	21,2	3,3	141	952,9	38							
03/09/84	22:00	17,2	0,5	156	955,1	57	22:00	23:00	23:04	175,6	1441	255	13
	22:15	16,2	1,2	348	955,2	61							
	22:30	16,2	1,7	66	955,3	62							
	22:45	16,0	1,8	72	955,4	63							
	MEDIA	16,4	1,3	-	955,2	60,7							
04/09/84	02:08	11,4	1,4	168	955,0	90	02:08	03:08	03:12	167,2	3611	639	31
	02:25	11,2	1,7	162	955,0	90							
	02:40	11,2	1,4	168	955,0	93							
	02:55	11,4	1,6	168	955,0	94							
	MEDIA	11,3	1,5	166,5	955,0	91,7							
04/09/84	06:14	12,0	0,8	150	955,0	100	06:14	07:14	07:19	169,0	2424	429	21
	06:30	11,8	1,0	150	955,1	100							
	06:45	11,8	1,3	162	955,2	100							
	07:00	12,0	1,6	168	955,3	100							
	MEDIA	11,9	1,2	157,8	955,2	100							
04/09/84	10:00	19,6	1,7	300	956,2	67	10:00	11:00	11:04	167,4			
	10:15	20,0	2,4	318	956,2	65							
	10:30	20,6	1,7	318	956,2	60							
	10:45	22,0	2,0	306	956,2	52							
	MEDIA	20,5	1,9	310,5	956,2	61							
04/09/84	14:00	26,4	4,0	36	954,1	25	14:00	15:00	15:04	166,2	439	78	5
	14:15	27,0	2,1	318	951,6	25							
	14:30	26,6	1,4	30	950,6	25							
	14:45	26,4	3,7	48	950,5	25							
	MEDIA	26,6	2,8	38	951,7	25							
04/09/84	18:00	22,2	1,9	54	950,5	27	18:00	19:00	19:04	168,8	755	134	8
	18:15	22,2	2,1	60	950,5	27							
	18:30	21,6	2,4	90	950,5	28							
	18:45	21,3	2,1	48	950,5	29							
	MEDIA	21,8	2,1	34,5	950,5	27,7							
04/09/84	22:00	11,0	4,0	84	952,5	46	22:00	23:00	23:04	172,4	517	92	6
	22:15	11,0	3,4	84	952,5	50							
	22:30	11,0	4,2	78	952,6	55							
	22:45	11,0	4,4	84	952,6	60							
	MEDIA	11,0	4,0	82,5	952,6	52,7							
05/09/84	02:05	14,2	1,8	108	951,7	88	02:05	03:05	03:09	168,2	1393	247	13
	02:20	13,8	2,3	102	951,7	88							
	02:35	13,7	1,3	108	951,6	87							
	02:50	13,4	2,3	108	951,4	87							
	MEDIA	13,7	1,9	106,5	951,6	87,5							
05/09/84	06:07	12,2	1,6	138	951,5	95	06:07	07:07	07:11	164,5	2255	399	20
	06:21	12,4	2,7	114	951,5	95							
	06:36	12,4	1,5	150	951,7	95							
	06:51	12,4	1,7	138	951,7	95							
	MEDIA	12,4	1,7	132	951,6	95							

- 66 -

03/09/84	22:00	17,2	0,5	156	955,1	57	22:00	23:00	23:04	175,6	1441	255	13
	22:15	16,2	1,2	348	955,2	61							
	22:30	16,2	1,7	66	955,3	62							
	22:45	16,0	1,8	72	955,4	63							
	MEDIA	16,4	1,3	-	955,2	60,7							
04/09/84	02:08	11,4	1,4	168	955,0	90	02:08	03:08	03:12	167,2	3611	639	31
	02:25	11,2	1,7	162	955,0	90							
	02:40	11,2	1,4	168	955,0	93							
	02:55	11,4	1,6	168	955,0	94							
	MEDIA	11,3	1,5	166,5	955,0	91,7							
04/09/84	06:14	12,0	0,8	150	955,0	100	06:14	07:14	07:19	169,0	2424	429	21
	06:30	11,8	1,0	150	955,1	100							
	06:45	11,8	1,3	162	955,2	100							
	07:00	12,0	1,6	168	955,3	100							
	MEDIA	11,9	1,2	157,8	955,2	100							
04/09/84	10:00	19,6	1,7	300	956,2	67	10:00	11:00	11:04	167,4			
	10:15	20,0	2,4	318	956,2	65							
	10:30	20,6	1,7	318	956,2	60							
	10:45	22,0	2,0	306	956,2	52							
	MEDIA	20,5	1,9	310,5	956,2	61							
04/09/84	14:00	26,4	4,0	36	951,1	25	14:00	15:00	15:04	166,2	439	78	5
	14:15	27,0	2,1	318	951,6	25							
	14:30	26,6	1,4	30	950,6	25							
	14:45	26,4	3,7	48	950,5	25							
	MEDIA	26,6	2,8	38	951,7	25							
04/09/84	18:00	22,2	1,9	54	950,5	27	18:00	19:00	19:04	168,8	755	134	8
	18:15	22,2	2,1	60	950,5	27							
	18:30	21,6	2,4	90	950,5	28							
	18:45	21,3	2,1	48	950,5	29							
	MEDIA	21,8	2,1	34,5	950,5	27,7							
04/09/84	22:00	11,0	4,0	84	952,5	46	22:00	23:00	23:04	172,4	517	92	6
	22:15	11,0	3,4	84	952,5	50							
	22:30	11,0	4,2	78	952,6	55							
	22:45	11,0	4,4	84	952,6	60							
	MEDIA	11,0	4,0	82,5	952,6	52,7							
05/09/84	02:05	14,2	1,8	108	951,7	88	02:05	03:05	03:09	168,2	1393	247	13
	02:20	13,8	2,3	102	951,7	88							
	02:35	13,7	1,3	108	951,6	87							
	02:50	13,4	2,3	108	951,4	87							
	MEDIA	13,7	1,9	106,5	951,6	87,5							
05/09/84	06:07	12,2	1,6	138	951,5	95	06:07	07:07	07:11	164,5	2255	399	20
	06:21	12,4	2,7	114	951,5	95							
	06:36	12,4	1,5	150	951,7	95							
	06:51	12,4	1,7	138	951,7	95							
	MEDIA	12,2	1,9	138	951,6	95							
05/09/84	10:17	22,4	2,3	66	952,2	54	10:17	11:17	13:21	159,1			
	10:32	23,4	4,4	84	952,2	51							
	10:47	23,8	2,4	45	952,0	48							
	11:00	24,4	2,3	24	951,4	45							
	MEDIA	23,5	2,8	54,7	951,9	49,5							
05/09/84	14:00	27,8	0,2	336	948,0	31	14:00	15:04	15:08	166,8	540	95	6
	14:15	28,0	1,6	36	948,0	30							
	14:30	28,2	2,1	6	948,0	30							
	14:45	28,4	1,3	234	948,0	30							
	MEDIA	28,1	1,3	-	948,0	30							
05/09/84	18:04	24,0	1,3	48	947,7	33	18:04	19:04	19:08	171,4	1209	214	11
	18:19	24,0	1,1	36	947,8	35							
	18:34	23,0	1,5	90	948,0	38							
	18:49	21,0	2,0	114	948,0	45							
	MEDIA	23,0	1,5	72	947,8	37,7							
05/09/84	22:00	17,2	0,3	84	949,1	70	22:00	23:00	23:04	197,5	2496	442	22
	22:15	17,2	1,0	84	949,4	70							
	22:30	17,4	1,0	90	949,5	70							
	22:45	17,2	2,1	0	949,5	70							
	MEDIA	17,2	1,1	-	949,4	70							
06/09/84	02:03	17,0	2,7	-	948,5	86	02:03	03:03	03:07	184,4	3126	553	27
	02:18	14,6	2,3	180	948,5	90							
	02:33	14,2	2,2	168	948,5	90							
	02:48	14,6	1,5	180	948,5	91							
	MEDIA	15,1	2,1	176	948,5	89,2							
06/09/84	06:06	12,8	1,1	246	948,9	99	06:06	07:06	07:10	180,4	3966	702	33
	06:21	13,0	1,1	246	948,9	99							
	06:36	13,2	0,5	222	949,0	99							
	06:51	13,4	0,5	-	949,0	100							
	MEDIA	13,1	0,8	238	948,9	99							
06/09/84	10:00	21,7	2,1	66	950,0	71	10:00	11:00	11:04	180,4	863	153	9
	10:15	22,0	3,4	72	950,0	69							
	10:30	22,6	4,0	90	950,0	65							
	10:45	23,2	3,1	66	949,1	60							
	MEDIA	22,4	3,1	73,5	950,0	66,2							
06/09/84	14:00	27,0	3,0	36	946,0	40	14:00	15:00	15:04	181,6	713	126	7
	14:15	26,8	3,1	90	946,0	40							
	14:30	27,0	3,0	72	946,0	40							
	14:45	26,8	2,5	108	945,7	40							
	MEDIA	25,9	2,9	90	946,0	40							
11/09/84	10:00	18,7			953,5	54	10:00	11:00	11:04	183,9	522	92	6
	10:15	18,7			953,5	54							
	10:30	19,2			953,5	50							
	10:45	20,0			953,0	46							
	MEDIA	19,15			953,4	52							
11/09/84	14:00	24,2			949,3	30	14:00	15:00	15:04	185,6	295	52	4
	14:15	24,0			949,1	30							
	14:30	24,0			948,9	30							
	14:45	24,2			948,9	30							
	MEDIA	24,1			949,0	30							

Conclusão - TABELA 5.3

DIA	HORA LOCAL	TEMP. AMB. °C	VENTO VEL. DIR.	PRESSÃO mbarr	UMIDADE %	i.a	f.a.	i.c.	ΔV l	C_3	Δ_3 pCi/m ³	σ_{Δ_3}
	22:15	17,4	0,7 102	947,5	62							
	22:30	17,4	1,1 114	947,5	69							
	22:45	17,4	0,1 162	947,5	71							
	MÉDIA	17,5	0,8 104	947,5	66							
14/09/84	06:09	11,2	0,8 180	947,5	97	06:09	07:09	07:13	181,7	3495	619	30
	06:25	11,2	1,2 190	947,7	98							
	06:40	11,4	1,5 234	947,8	98							
	06:55	11,6	0,9 264	948,1	98							
	MÉDIA	11,3	1,1 217	947,8	97,8							
14/09/84	10:05	21,6	1,4 270	949,0	58	10:05	11:07	11:10	182,9	1479	262	14
	10:20	22,0	1,6 336	948,9	56							
	10:35	23,1	1,6 282	948,7	56							
	10:50	23,8	1,0 258	948,8	47							
	MÉDIA	22,6	1,4 286,5	948,8	54,2							

temp amb - temperatura ambiente obtida à 1 m de altura através de termômetro de mercúrio dentro do abrigo meteorológico (°C);

Vento { Vel - velocidade do vento (nós);
Dir - direção do vento (°);

umidade - umidade relativa (%);

i.a - início da aspiração;

f.a - final da aspiração;

i.c - início da contagem;

ΔV - volume de ar amostrado (l);

C_3 - contagem do Po^{214} ;

Δ_3 - atividade do Po^{214} (pCi/m³);

σ_{Δ_3} - erro da atividade (pCi/m³).

Conclusão - TABELA 5.3

DIA	HORA LOCAL	TEMP. AMB. °C	VEL. VENTO DIR.	PRESSÃO mbarr	UMIDADE %	S.A.	F.A.	S.C.	ØV L	C ₂	Ø ₂ pC1/20°	Ø ₂₁	
11/09/84	18:00	20,0		948,5	33	18:03	19:01	19:05	179	391	69,2	5	
	18:15	19,4		948,5	33								
	18:30	19,0		948,7	40								
	18:45	18,4		948,8	48								
	MEDIA	19,2		948,6	38,5								
11/09/84	22:00	13,8		950,1	80	22:00	23:00	23:04	185	299	52,9	4	
	22:15	13,6		950,5	82								
	22:30	13,6		950,6	84								
	22:45	13,2		950,7	85								
	MEDIA	13,5		950,5	82,7								
12/09/84	02:00	13,4		949,5	90	02:00	03:00	03:04	190	261	46,2	4	
	02:15	13,2		943,3	90								
	02:30	13,2		943,3	90								
	02:45	13,2		943,3	89								
	MEDIA	13,2		943,3	90								
12/09/84	06:10	13,0		950,0	87	06:11	07:11	07:15	186	589	104,3	6	
	06:25	13,0		950,0	89								
	06:40	13,0		950,4	89								
	06:55	13,4		950,5	90								
	MEDIA	13,1		950,2	88,7								
12/09/84	10:00	20,0	0,3	12	950,9	54	10:00	11:00	11:04	183	457	80,9	5
	10:15	20,6	1,7	90	950,3	50							
	10:30	21,7	2,8	0	950,3	48							
	10:45	21,8	2,7	0	950,1	47							
	MEDIA	21,0	1,9	0	950,4	49,7							
12/09/84	14:00	27,0	1,8	252	946,6	31	14:00	15:00	15:04	173	405	71,7	5
	14:15	27,4	2,6	270	946,6	30							
	14:30	27,2	1,9	306	946,6	30							
	14:45	28,1	2,6	270	946,5	29,7							
	MEDIA	27,4	2,2	274,5	946,6	30,1							
12/09/84	18:46	22,0	0,1	180	947,1	39	18:46	19:46	19:50	181	1042	184,5	10
	19:00	21,2	1,4	42	947,2	42							
	19:15	21,3	0,9	0	947,3	43							
	19:30	21,2	0,9	180	947,5	48							
	MEDIA	21,4	0,8	180	947,3	43							
12/09/84	22:00	17,2	2,7	72	949,0	67	22:00	23:00	23:04	182,4	801	142	8
	22:15	17,0	1,8	72	949,4	69							
	22:30	17,0	1,8	72	949,4	69							
	22:45	17,0	0,3	12	949,7	69							
	MEDIA	17,0	2,1	72	949,4	69							
13/09/84	02:00	12,5	1,1	156	948,8	89	02:00	03:00	03:04	183,6	3355	594	28
	02:15	12,5	1,1	132	948,8	90							
	02:50	12,0	1,5	162	948,8	91							
	MEDIA	12,3	1,2	150	948,8	90							
13/09/84	06:15	10,1	0,9	168	949,2	97	06:15	07:15	07:18	179,4	4481	793	37
	06:30	10,4	0,9	156	949,5	98							
	06:45	10,5	1,2	162	949,5	98							
	07:00	11,4	0,7	132	949,5	98							
	MEDIA	10,6	0,9	154,5	949,4	98							
13/09/84	10:10	22,6	1,1	270	950,0	50	10:10	11:10	11:04	177,2	970	172	9
	10:30	24,2	0,7	294	949,8	48							
	10:45	24,4	1,9	318	949,5	45							
	MEDIA	23,7	1,2	294	949,8	47,6							
13/09/84	14:00	29,4	3,6	228	946,0	22	14:00	15:00	15:03	183,5	392	69	6
	14:15	29,6	4,9	270	945,5	22							
	14:30	29,8	2,7	246	945,5	22							
	14:45	30,0	4,8	252	945,5	22							
	MEDIA	29,7	4,0	249	945,5	22							
13/09/84	18:00	24,4	3,1	252	945,1	27	18:00	19:00	19:04	178,1	747	132	8
	18:30	23,8	1,0	18	945,5	29							
	18:45	23,4	0	0,9	945,8	31							
	MEDIA	23,9	1,4	18	945,5	29							
13/09/84	22:00	18,0	1,4	96	947,4	61	22:00	23:00	23:04	175,9	1534	272	14
	22:15	17,4	0,7	102	947,5	62							
	22:30	17,4	1,1	114	947,5	69							
	22:45	17,4	0,7	162	947,5	71							
	MEDIA	17,5	0,8	104	947,5	66							
14/09/84	06:09	11,2	0,8	180	947,5	97	06:09	07:09	07:13	181,7	3495	619	30
	06:25	11,2	1,2	190	947,7	98							
	06:40	11,4	1,5	234	947,8	98							
	06:55	11,6	0,9	264	948,1	98							
	MEDIA	11,3	1,1	217	947,8	97,8							
14/09/84	10:05	21,6	1,4	270	949,0	58	10:05	11:07	11:10	182,9	1479	262	14
	10:20	22,0	1,6	336	948,9	56							
	10:35	23,1	1,6	282	948,7	56							
	10:50	23,8	1,0	258	948,8	47							
	MEDIA	22,6	1,4	286,5	948,8	54,2							

TABELA 5.4

MEDIDAS FEITAS EM CACHOEIRA PAULISTA, INVERSÕES
DE TEMPERATURA E NÚMERO DE RICHARDSON

DIA	HORA LOCAL	TEMP. AMB (°C)	1 m	2 m	4 m	UMI DADE	ppp mm	VENTO VEL(m/S) DIR.(°)		PRESSÃO mbarr	i.a	f.a	i.c	ΔV	C _s	h ₁	h ₂	Ri
24/09/84	14:20	30,0				37,0		5,0	72,0	946,5	14:20	15:20	15:24	176,1	423	75	5	-0,43
	14:43	30,2	31,2	30,4	29,9	35,0		6,0	72,0	945,7								
	15:05	30,2	30,7	29,8	29,5	35,0		5,5	90,0	945,4								
	MEDIA	30,1	30,9	30,1	29,7	35,7		5,5	72,0	945,9								
24/09/84	18:38	24,6	24,0	24,25	24,35	50,0		1,2	90,0	947,0	18:38	19:17	19:21	114,21	411	73	5	2,8
	19:02	23,6	23,5	23,7	23,8	54,0		1,2	90,0	948,0								
	MEDIA	24,1	23,8	23,98	24,08	52,0		1,2	90,0	947,0								
24/09/84	22:00	20,8	20,9	20,95	21,0	72,0		5,3	90,0	949,0	22:00	23:00	23:04	169,5	430	76	5	0,1
	22:20	20,4	20,45	20,53	20,65	75,0		3,4	72,0	949,0								
	22:40	20,2	20,20	20,25	20,30	75,0		4,5	90,0	948,9								
	MEDIA	20,5	20,52	20,58	20,65	74,0		4,4	90,0	949,0								
25/09/84	02:00	18,4	18,3	18,55	18,65	90,0		5,3	72,0	946,3	02:00	03:00	03:04	173,9	402	71	5	0,2
	02:20	18,4	18,3	18,55	18,65	90,0		5,2	72,0	946,0								
	02:40	18,4	18,5	18,65	18,80	90,0		4,2	90,0	946,0								
	MEDIA	18,4	18,47	18,58	18,7	90,0		4,9	72,0	946,2								
25/09/84	06:12	18,2	18,15	18,42	18,50	90,0		5,0	90,0	945,5	06:12	07:12	07:16	174,8	449	80	5	0
	06:32	18,6	18,8	18,8	18,9	88,0		5,4	90,0	945,8								
	06:52	19,2	19,52	19,45	19,40	85,0		7,7	90,0	946,0								
	MEDIA	18,7	18,83	18,89	18,93	87,7		6,0	90,0	945,8								
25/09/84	10:17	28,2	28,1	28,1	27,7	42,0		9,0	180,0	946,0	10:18	11:18	11:22	180,4	244	62	5	0
	10:37	28,4	28,8	28,6	28,2	40,0		9,6	90,0	946,0								
	10:57	27,8	28,5	27,5	27,2	40,0		12,8	180,0	946,0								
	MEDIA	28,1	28,5	28,0	27,7	41,5		10,5	180,0	946,0								
25/09/84	14:00	31,4	32,35	31,2	30,8	30,0		5,8	0,0	942,4	14:00	15:00	15:04	152,6	400	71	5	-0,5
	14:20	31,3	32,5	31,3	30,9	30,0		8,6	0,0	942,4								
	14:40	31,0	32,4	30,9	30,6	30,0		3,2	72,0	942,4								
	MEDIA	31,2	32,42	31,13	30,77	30,0		5,7	0,0	942,4								
25/09/84	18:00	28,0	26,8	27,85	28,2	32,0		1,5	18,0	941,5	18:00	19:00	19:04	160,1	660	117	7	9,2
	18:20	28,0	26,5	27,9	28,2	33,0		1,8	18,0	941,5								
	18:40	27,6	25,0	26,2	26,9	35,0		1,1	0	941,5								
	MEDIA	27,9	26,1	27,3	27,87	33,0	9,1	1,5	18,0	941,5								
25/09/84	22:00	22,3	21,7	22,4	23,2	57,0		1,1	108,0	943,0	22:00	23:00	23:04	150,4	1352	-	-	11,1
	22:30	23,0	22,3	23,2	23,6	54,0		1,6	90,0	943,4								
	MEDIA	22,6	22,0	22,8	23,8	55,0		1,4	99,0	943,2								
25/09/84	06:19	21,2	21,2	21,2	21,4	68,0		1,8	180,0	942,5	06:19	07:19	07:23		1427	253	17	0,5
	06:40	21,4	21,4	21,2	21,9	68,0		1,4	108,0	942,5								
	07:00	21,1	21,5	22,0	22,3	68,0		2,4	90,0	942,5								
	MEDIA	21,5	21,4	21,5	21,4	68,0		1,4	108,0	942,5								
26/09/84	10:20	24,1	23,4	24,2	24,3	60,0		5,8	0	944,2	10:03	11:03	11:07		679	120	7	2,1
	10:40	23,6	23,5	23,7	23,8	60,0		4,0	18,0	944,5								
	MEDIA	23,9	23,7	23,4	24,0	60,0		4,9	18,0	944,3								
26/09/84	14:00	25,8	26,4	25,8	25,6	56,0		4,0	0	942,4	14:00	15:00	15:04	159,1	678	102	6	0,2
	14:20	26,4	27,1	26,4	26,3	55,0		2,8	72,0	941,8								
	14:40	25,8	26,5	25,9	25,8	55,0		3,5	0	941,1								
	MEDIA	26,0	26,7	26,0	25,9	55,0		3,4	0	941,8								
26/09/84	18:00						13,5	12,0	270,0	943,5	18:00	19:00	19:04	164,1	298	53	4	
	18:20						13,5	11,0	270,0	944,0								
	18:40						13,5	8,0	252,0	944,0								
	MEDIA						13,5	10,3	264,0	944,0								
26/09/84	22:00	18,4	17,3	17,3	17,3	100,0		2,2	108,0	945,9	22:00	23:00	23:04	158,9	346	61	4	0
	22:20	18,4	17,3	17,3	17,3	100,0		1,7	103,0	945,5								
	22:40	18,4	17,3	17,3	17,3	100,0		2,4	103,0	945,5								
	MEDIA	18,4	17,3	17,3	17,3	100,0		2,1	103,0	945,6								
27/09/84	06:13	18,4	17,5	17,7	17,6	100,0		0	0	945,0	06:13	07:13	07:17		987	175	11	-0,2
	06:33	18,7	17,6	17,7	17,6	100,0		1,3	0	945,5								
	06:53	18,6	17,7	17,7	17,6	100,0		1,6	0	945,5								
	MEDIA	18,6	17,6	17,7	17,6	100,0		1,4	0	945,5								
27/09/84	10:03	19,4	19,9	19,8	19,6	96,0		0	198,0	946,6	10:03	11:03	11:07		471	83	5	
	10:40	20,6	20,4	20,3	20,1	94,0		0	288,0	946,8								
	MEDIA	20,0	20,2	20,0	19,9	95,0		0	243,0	946,7								
27/09/84	14:00	20,3	24,5	23,3	23,5	70,0		3,0	70,0	944,5	14:00	15:00	15:04	175,4	394	70	5	-3,0
	14:20	23,2	24,6	23,4	23,5	70,0		2,5	70,0	944,4								
	14:40	23,2	24,4	23,6	23,3	70,0		1,5	90,0	944,5								
	MEDIA	22,2	24,5	23,4	23,4	70,0		2,3	57,0	944,5								
02/10/84	10:08	24,2	26,5	25,1	24,9	53,0		1,1	0	965,0	10:08	11:03	11:12	155,2	366	65	4	-2,9
	10:50	25,0	27,4	25,6	25,3	50,0		4,6	72,0	964,0								
	MEDIA	24,6	26,4	25,4	25,1	52,0		2,9	36,0	964,5								
02/10/84	14:00	29,0	30,4	30,3	29,9	37,0		1,8	0	948,5	14:00	15:00	15:04	170,4	446	174,0	11	-3,8
	14:20	28,0	32,1	30,8	30,7	36,0		2,5	72,0	948,2								
	14:40	28,0	32,1	30,1	29,9	35,0		1,6	0	948,0								
	MEDIA	28,7	31,5	30,4	30,2	36,0		2,0	0	948,3								
02/10/84	18:03		24,8	25,0	25,2	46,0		8,2	90,0	947,8	18:03	19:03	19:07	165,6	486	86,0	5	0
	18:40		24,0	24,2	24,3	46,0		7,8	90,0	947,8								
	MEDIA		24,4	24,6	24,8	46,0		8,0	90,0	947,8								
02/10/84	22:00		18,4	18,8	18,8	82,0		2,7	90,0	950,5	22:00	23:01	23:05	175,4	311	55,1	4	0,3
	22:20		18,2	18,4	18,4	85,0		4,8	90,0	950,5								
	MEDIA		18,3	18,6	18,6	84,0		4,9	72,0	950,5								
03/10/84	02:00		17,2	17,2	17,2	95,												

Conclusão - TABELA 5.4

DIA	HORA LOCAL	TEMP. AMB (°C)	1 m	2 m	4 m	UMIDADE	PPP mm	VENTO		PRESSÃO mbarr	i.a	f.a	i.c	ΔV l	C ₃	Δ_3	σ_{Δ_3}	Ri
								VEL (m/s)	DIR. (°)									
16/10/84	02:03	18,8	19,0	18,8	18,4	96,0		1,7	90,0	949,7	02:03	03:03	03:07	373,5	479	84,8	5	0
	02:20	18,8	19,3	18,4	19,4	96,0		2,6	90,0	949,6								
	02:40	18,6	19,8	18,8	19,8	96,0		2,8	90,0	949,5								
	MEDIA	18,7	19,8	18,8	18,9	96,0		2,4	90,0	949,6								

1m, 2m e 4m - medidas de temperatura feitas nessas alturas;

Ri - número de Richardson;

temp amb - temperatura ambiente obtida a 1 m de altura através de termômetro de mercúrio dentro do abrigo meteorológico (°C);

Vento { Vel - velocidade do vento (nós);
Dir - direção do vento (°);

umidade - umidade relativa (%);

i.a - início da aspiração;

f.a - final da aspiração;

i.c - início de contagem;

ΔV - volume de ar amostrado (l);

C₃ - contagem do Po²¹⁴;

Δ_3 - atividade do Po²¹⁴ (pCi/m³);

σ_{Δ_3} - erro da atividade (pCi/m³).

Conclusão - TABELA 5.4

DIA	HORA LOCAL	TEMP. AÉR (°C)	1 m	2 m	4 m	UMI DADE	ppp mm	VENTO		PRESSÃO mbarr	i.a	f.a	i.c	V _t	C _s	Δ _s	Δ ₃	R _i
								VEL (m/s)	DIR. (°)									
16/10/84	02:03	18,8	19,0	18,8	18,4	96,0		1,7	90,0	949,7	02:03	03:03	03:07	373,5	479	84,8	5	0
	02:20	18,8	18,9	18,4	18,4	96,0		2,6	90,0	949,6								
	02:40	18,6	18,8	18,8	18,8	96,0		2,8	90,0	949,5								
	MEDIA	18,7	18,8	18,8	18,9	96,0		2,4	90,0	949,6								
16/10/84	06:16	13,6	18,7	18,7	18,7	98,0		2,3	90,0	950,2	06:16	07:16	07:20	863,0	517	92	4	-0,1
	06:35	18,6	18,9	18,8	18,8	98,0		1,9	18,0	950,3								
	06:55	18,8	19,0	18,9	18,9	95,0		5,6	90,0	950,5								
	MEDIA	18,6	18,9	18,8	18,8	97,0		3,3	60,0	950,4								
16/10/84	10:10	23,8	26,0	23,7	23,3	65,0		5,6	72,0	951,0	10:10	11:10	11:14	330,3	427	76	1	-1,0
	10:55	24,8	27,0	24,6	24,2	61,0		4,5	72,0	950,5								
	MEDIA	24,3	26,5	24,1	23,8	63,0		5,0	72,0	950,5								
16/10/84	13:56	28,0	29,4	28,0	27,6	45,0		6,0	72,0	948,0	13:56	14:56	15:00	337,4	431	86	5	-0,4
	14:25	28,6	29,8	28,3	27,8	45,0		6,3	72,0	947,6								
	14:40	27,2	28,1	27,2	26,8	47,0		7,5	72,0	947,5								
	MEDIA	27,9	29,0	27,8	27,4	46,0		6,6	72,0	947,7								
16/10/84	21:10	26,2	25,9	26,6	26,8	46,0		8,0	12,0	946,0	21:10	21:59	22:03	284,8	764	135	1	0,2
	21:30	26,2	26,2	26,5	26,7	46,0		5,5	12,0	946,0								
	21:50	25,8	25,6	26,0	26,2	46,0		5,0	12,0	946,2								
	MEDIA	26,0	25,9	26,4	26,6	46,0		6,2	12,0	946,0								
17/10/84	02:03	23,8	23,5	23,8	23,9	57,0		4,4	72,0	946,0	02:03	03:03	03:07	348,7	1009	178	10	0,3
	02:23	23,6	23,4	23,8	23,9	58,0		4,3	72,0	947,0								
	02:40	23,2	23,0	23,3	23,4	59,0		3,6	72,0	946,0								
	MEDIA	23,5	23,4	23,7	23,7	58,0		4,1	72,0	946,1								
17/10/84	06:05	21,8	21,6	22,1	22,3	73,0		4,5	72,0	946,2	06:05	07:05	07:09	357,5	972	172	9	0,2
	06:25	23,0	23,2	23,3	23,3	68,0		5,5	72,0	946,3								
	06:45	23,0	23,4	23,3	23,3	67,0		3,5	72,0	946,2								
	MEDIA	22,6	22,8	22,9	22,9	69,0		4,5	108,0	947,0								
17/10/84	10:08	29,2	30,1	28,7	28,2	45,0		7,5	90,0	947,0	10:08	11:08	11:12	372,4	507	90	0	-0,2
	10:30	29,0	30,1	28,7	28,2	45,0		10,5	12,0	947,1								
	10:50	29,8	30,8	29,9	29,2	43,0		11,2	12,0	947,0								
	MEDIA	29,3	30,3	29,1	28,6	44,0		9,7	12,0	945,0								
17/10/84	14:00	30,4	31,5	30,0	29,6	38,0		6,4	0	945,0	14:05	15:05	15:09	358,4	488	86	5	0,5
	14:20	31,0	31,6	30,4	30,1	38,0		6,7	342,0	945,0								
	14:40	30,4	31,0	30,1	29,8	39,0		3,6	342,0	945,4								
	MEDIA	30,6	31,4	30,2	29,9	38,0		5,6	342,0	944,8								
17/10/84	18:08	27,4	27,1	27,2	27,3	45,0		3,8	282,0	945,0	18:08	19:08	19:12	356,4	834	149	8	-
	18:30	27,0	26,9	26,9	26,9	47,0		3,6	282,0	945,0								
	18:50	25,8	25,7	26,7	25,5	55,0		4,7	252,0	945,5								
	MEDIA	27,7	26,6	26,6	26,6	49,0		4,0	282,0	945,5								
17/10/84	20:56							0,8	174,0	948,2	20:56	21:56	22:00	358,4	436	77	5	-
	21:50							1,3	186,0	948,5								
	MEDIA						54,7	1,0	180,0	948,3								
17/10/84	02:00	19,4	19,2	19,4	19,4	100,0		0,4	258,0	947,2	02:00	03:00	03:04	382,8	1000	177	10	-
	02:20	19,4	19,2	19,3	19,3	100,0		1,1	252,0	947,2								
	02:40	19,4	19,3	19,4	19,4	100,0		0,4	264,0	947,2								
	MEDIA	19,4	19,3	19,4	19,4	100,0		0,6	258,0	947,2								
17/10/84	06:20							2,8	252,0	948,1	06:20	07:20	07:24	395,1	621	109,9	7	-
	06:40							4,3	276,0	948,5								
	MEDIA						7,3	3,5	264,0	948,3								
17/10/84	10:17	19,0	18,8	18,8	18,8	100,0		8,0	252,0	949,6	10:17	11:20	11:24		152	26,9	3	-
	10:30	19,0	18,8	18,8	18,8	100,0		5,0	252,0	949,9								
	MEDIA	19,0	18,8	18,8	18,8	100,0		6,5	252,0	949,7								

O critério de Richardson está baseado no princípio de que no estágio em que o movimento do fluido está na fronteira da não-turbulência, a energia cinética das flutuações aumenta ou diminui de acordo com a taxa com que a energia extra fornecida pelas forças de viscosidade é maior ou menor que a necessária para compensar a energia absorvida pela força peso.

As velocidades e as direções do vento foram medidas através de anemômetros colocados sobre a torre meteorológica a 10 m de altura do solo.

Os registros de velocidade do vento e sua direção estão representados na Figura 5.4. Em todos os casos a velocidade do vento diminui à noite. Nota-se que no período de 03/09/84 a 14/09/84, os limites para a velocidade do vento foram de 1 a 7,5 nós, correspondentes a altas atividades do Po^{214} , enquanto no período de 24/09/84 a 19/10/84 ocorreram ventos de até 20 nós. Este último período corresponde a diminuição de radioatividade ambiente.

Não foi verificada nenhuma relação entre a direção do vento e a concentração de radioatividade do ar, o que era de esperar devido à ausência de afloramentos de rochas ricas em urânio e rádio nas proximidades do lugar de medidas.

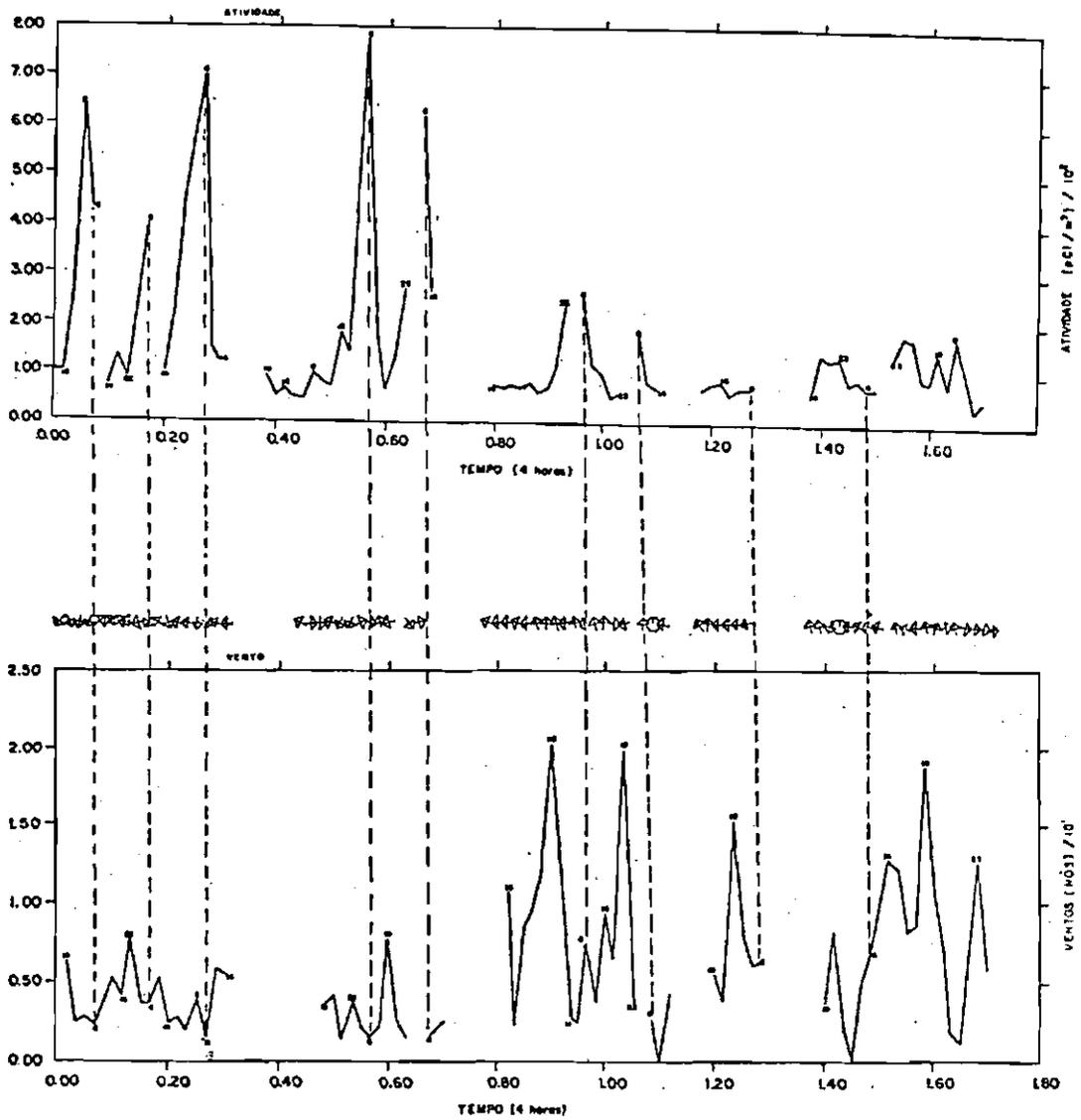


Fig. 5.4 - Atividade do polônio-214 e vento (direção e velocidade).

Os números que aparecem na figura correspondem aos horários em que foram feitas as medidas.

5.2.3 - COMPARAÇÃO DO NÚMERO DE RICHARDSON COM A QUANTIDADE DE RADÔNIO ACUMULADA NA BAIXA ATMOSFERA

Os dois parâmetros, velocidade do vento e temperatura, são essenciais no estudo da estabilidade (difusão turbulenta fraca do ar) e serão analisadas através do número de Richardson (Ri). Para valores do número de Richardson positivos e superiores a 0,5, a energia turbulenta diminui e a estabilidade do ar aumenta; e para valores inferiores a -1,0, a energia turbulenta aumenta e a estabilidade diminui.

A Figura 5.5 permite uma comparação dos valores do número de Richardson na camada de ar próxima ao solo com a quantidade de Po^{214} acumulada nesta camada. Nesta figura verifica-se um nítido aumento da estabilidade no dia 26/09/84 às 22 e às 6 h da manhã e no dia 17/10/84 às 2 h da madrugada, correspondentes a um visível aumento na concentração de Po^{214} .

Na Figura 5.6 tem-se a atividade do Po^{214} em função do número de Richardson. Esta figura foi dividida em 3 regiões distintas. A região I, na qual o número de Richardson varia de -10,0 a -1,0, corresponde à instabilidade atmosférica. Verifica-se que apesar do Ri variar consideravelmente, a atividade do Po^{214} permanece em um nível praticamente constante de 70 ± 6 pCi/m³.

A região III é aquela onde $Ri > 0,5$, que implica estabilidade atmosférica. Nesta região, a atividade do Po^{214} assume valores superiores as da região I. Os dados de número de Richardson e atividade do Po^{214} encontram-se na Tabela 5.5.

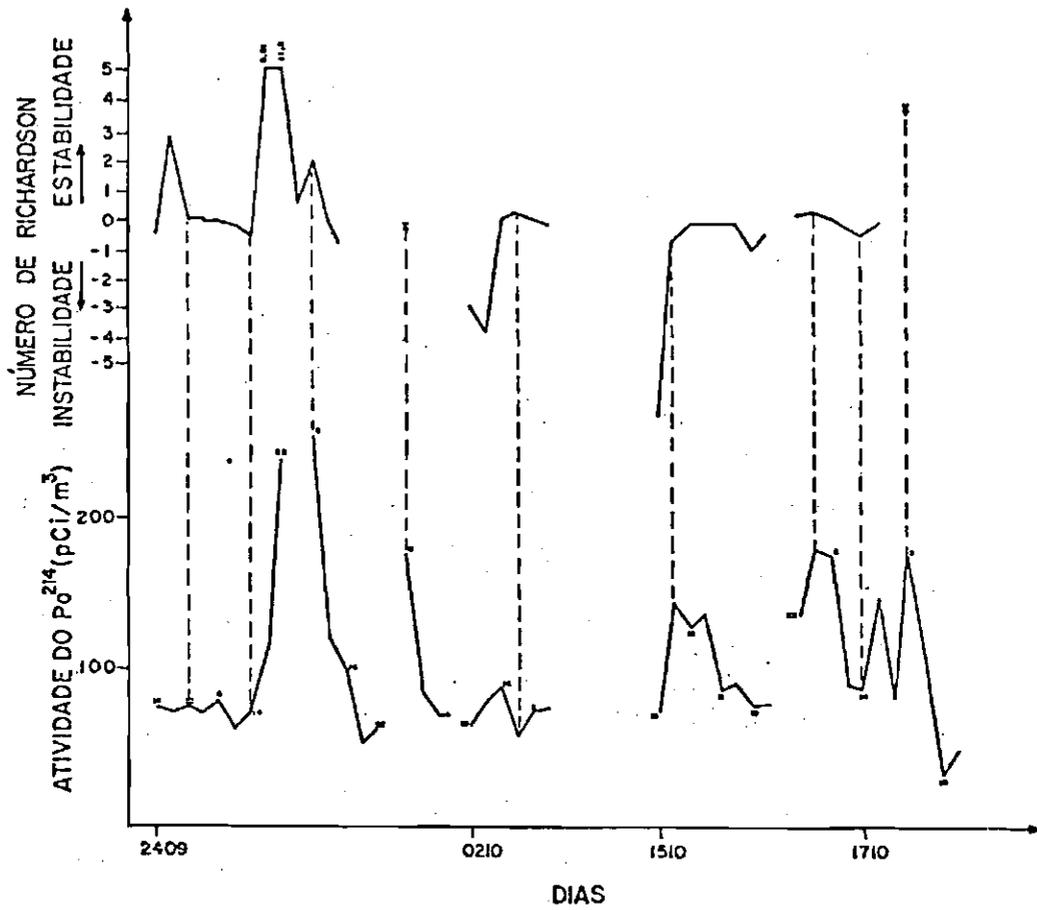


Fig. 5.5 - Número de Richardson e atividade em função do tempo.

Os números que aparecem na figura correspondem aos horários em que foram feitas as medidas.

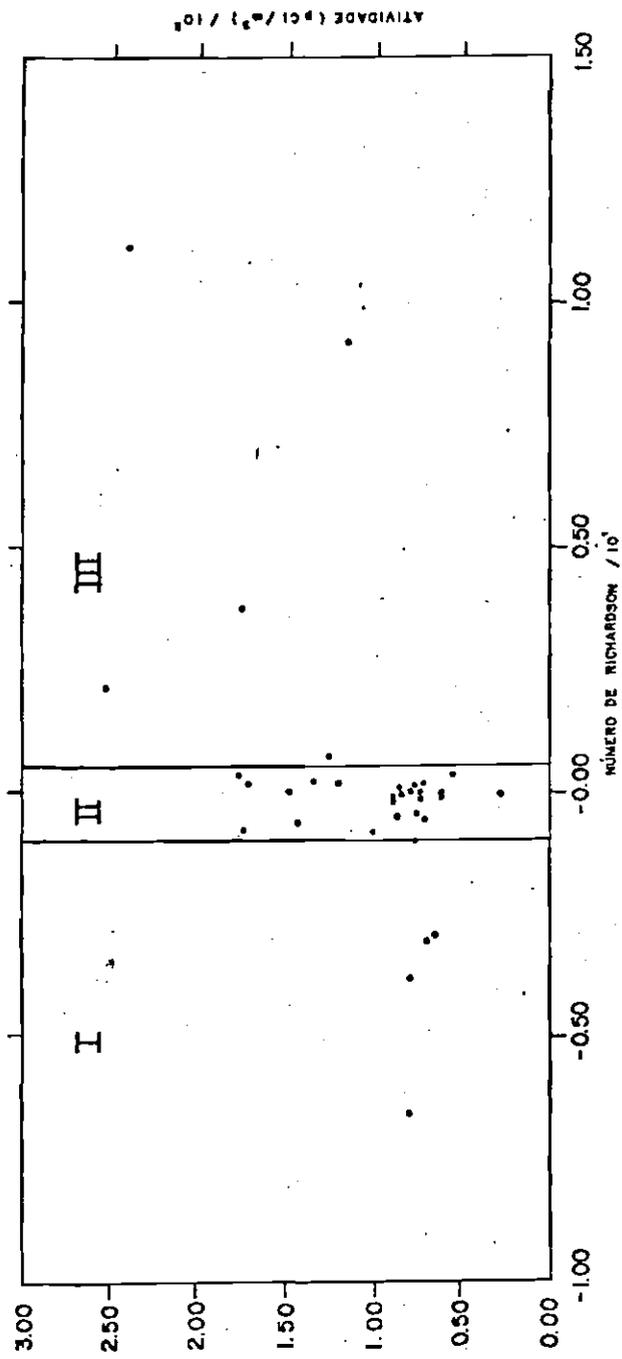


Fig. 5.6 - Estabilidade atmosférica.

TABELA 5.5

DADOS DE ATIVIDADE E NÚMERO DE RICHARDSON NAS REGIÕES I E III

INSTABILIDADE $Ri < -1.0$	
Ri	Δ_3 (pCi/m ³)
-3	68
-2.9	65
-3.8	79
-6.6	69
ESTABILIDADE $Ri > 0.5$	
Ri	Δ_3 (pCi/m ³)
2,7	72
9,2	117
11,2	241
2,1	252
3,8	177

A região II foi classificada como região de neutralidade térmica, pois como se pode constatar pelo número de Richardson, quando $\Delta Temp \rightarrow 0$ (diferença de temperatura entre 1 e 4 m de altura), $Ri \rightarrow 0$, isto é, não há troca de calor entre os níveis de medidas, o que não implica porém que a velocidade do vento deva ter um valor baixo. Na Tabela 5.6 têm-se a velocidade do vento e o Ri correspondente para alguns casos onde $\Delta Temp \rightarrow 0$.

TABELA 5.6

NÚMERO DE RICHARDSON E VELOCIDADE DO VENTO

DATA	HORA	Ri	Vel (NÓS)	Δ Temp °C (1 e 4 m)
24/09/84	22:00	0,11	8,5	0,13
25/09/84	06:12	0,05	11,7	0,1
26/09/84	22:00	0,0	4,0	0
27/09/84	06:13	0,04	2,7	0,02
03/10/84	02:00	0,02	6,2	0,01

Um exame desta tabela mostra que a estabilidade da atmosfera deduzida a partir do número de Richardson ou da quantidade de radônio mostra uma concordância excelente. Note-se o caráter quase periódico destes dados, com máximos de madrugada e mínimos durante o dia.

O fato de os dados apresentados neste trabalho não apresentarem este tipo de comportamento pode ser devido à diferença de clima, visto que Servant fez suas medidas na França, com clima bem diferente da região tropical de São José dos Campos e Cachoeira Paulista.

Não foram observadas correlações entre a umidade relativa e a pressão atmosférica (Figuras 5.7a e b) e a radioatividade atmosférica.

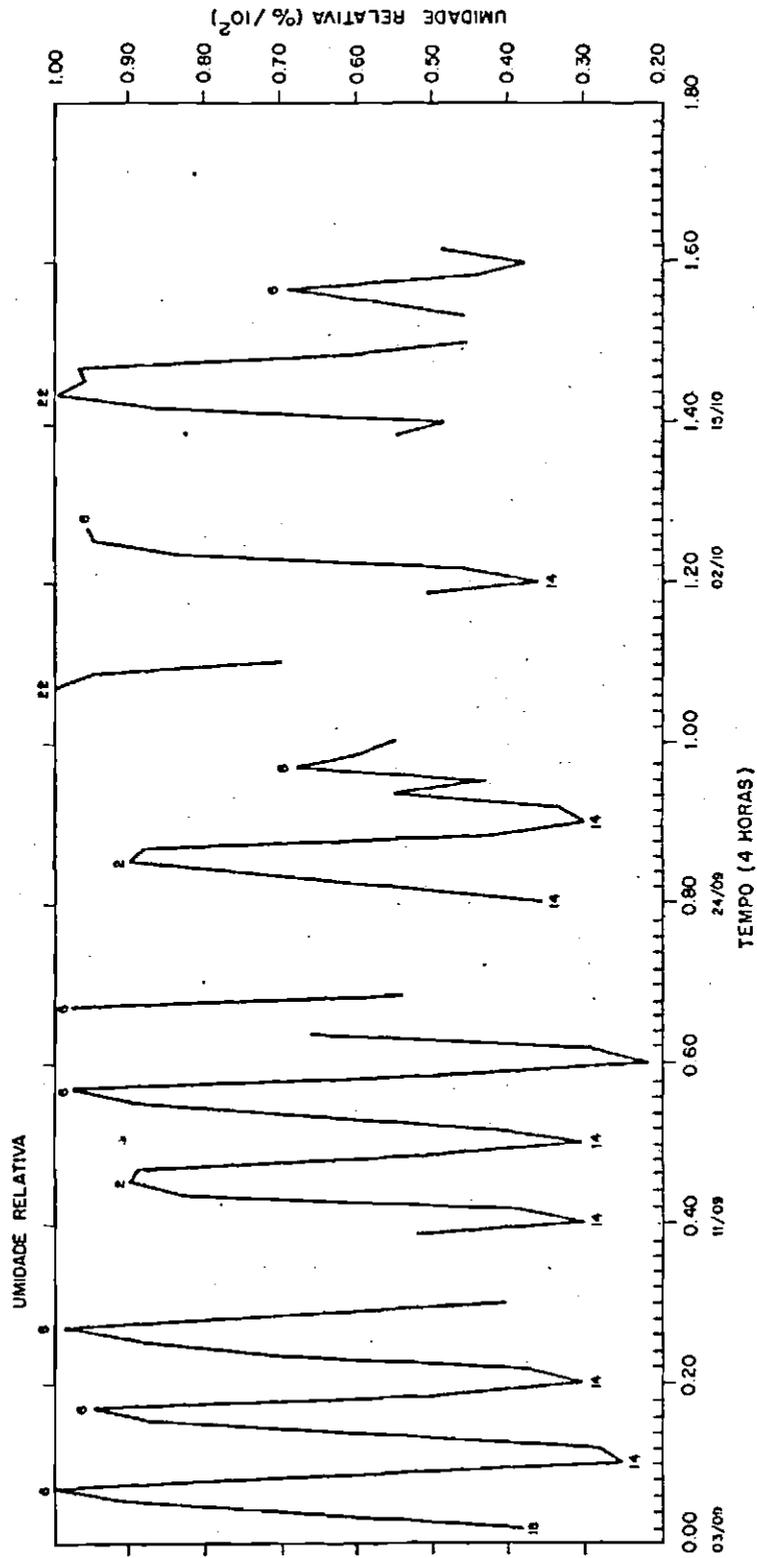


Fig. 5.7a - Umidade relativa.

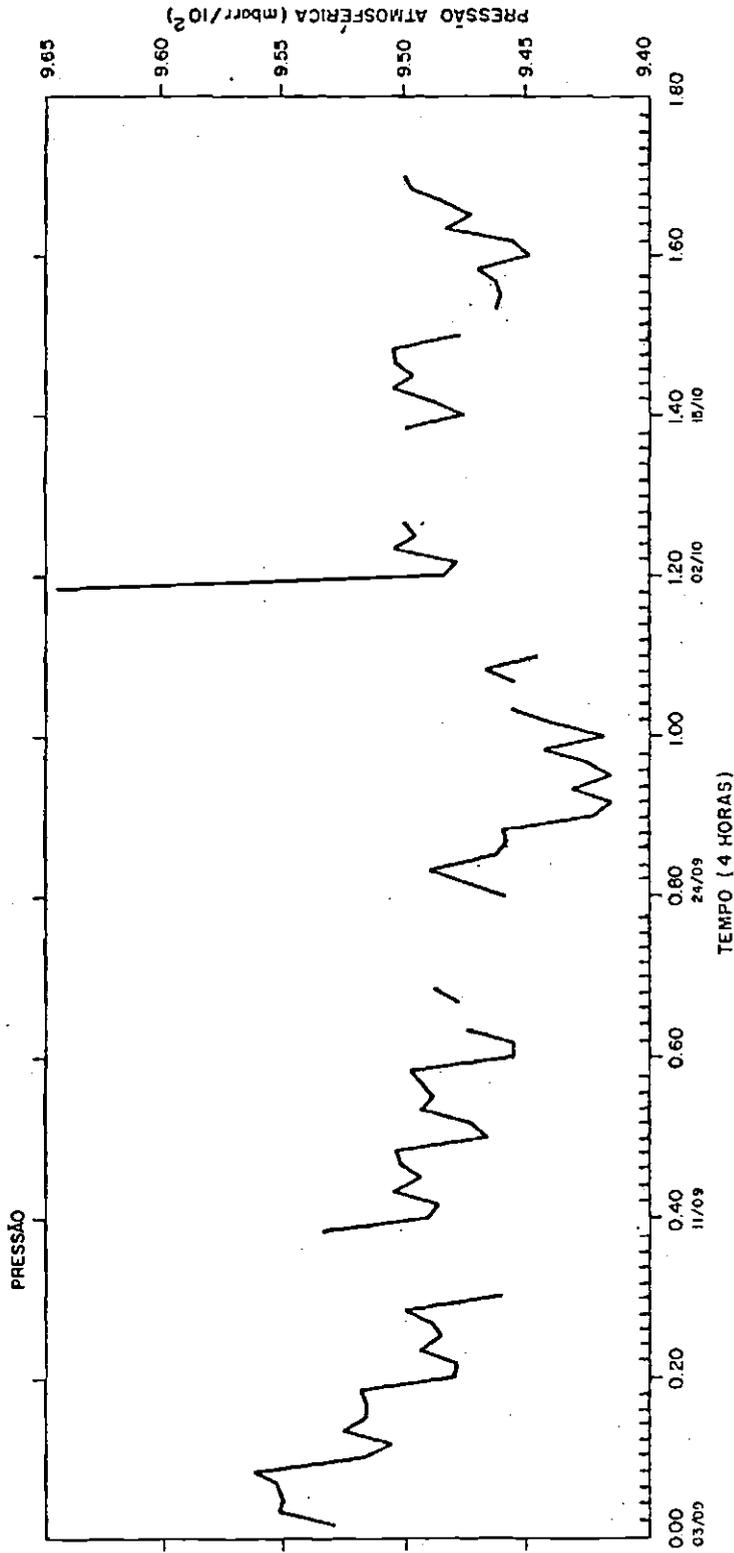


Fig. 5.7.b - Pressão atmosférica.

Servant (1964) realizou um estudo comparativo entre os valores do número de Richardson numa camada de ar com espessura de 100 m e a quantidade de radônio acumulada nesta camada. Na Figura 5.8 tem-se um exemplo dos dados obtidos por Servant.

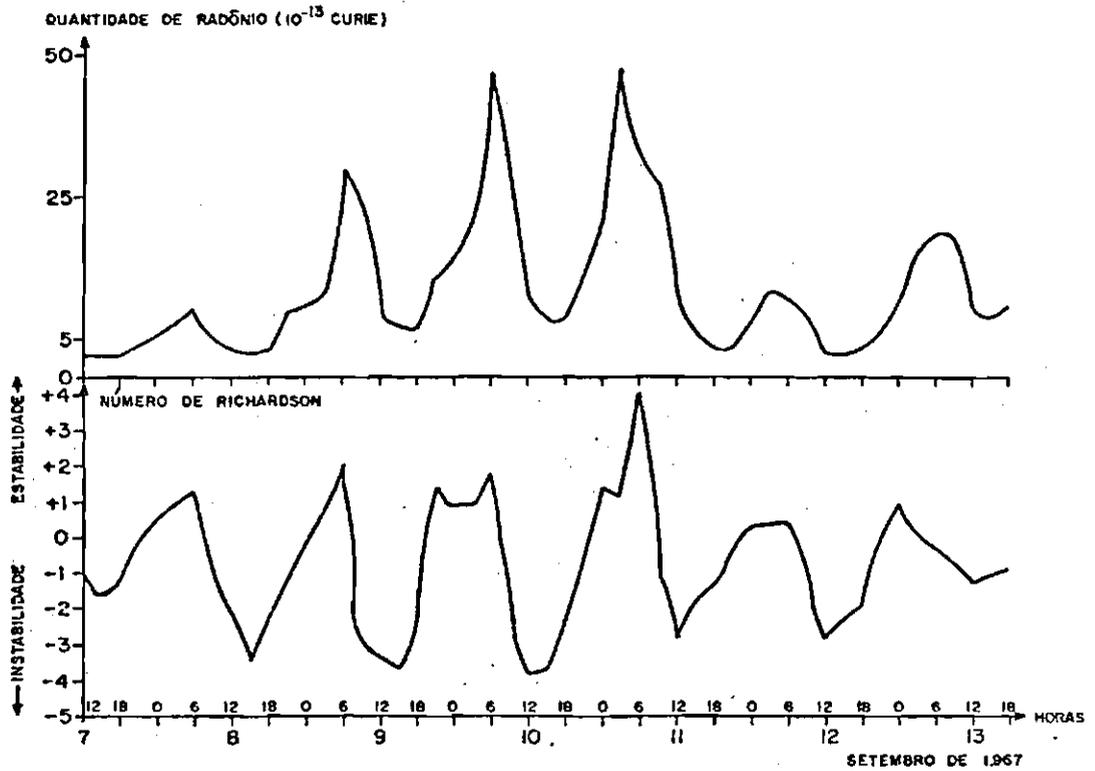


Fig. 5.8 - Número de Richardson

Quantidade de radônio na baixa atmosfera acima de 1m² do solo.

FONTE: SERVANT (1964).

5.3 - CONCLUSÃO

Durante o desenvolvimento deste trabalho testou-se a possibilidade de medir os elementos de vida curta do depósito ativo do radônio na atmosfera usando a filtragem do ar seguida de medida de espectrometria alfa do filtro de membrana onde foram recolhidos os aerossóis. Trata-se de um método novo com o qual a espectrometria alfa permite identificar o Po^{214} sem tratamento químico e sem necessidade de contagens sucessivas. Esta parte incluiu a determinação do ruído de fundo da aparelhagem e do rendimento de detecção, bem como o cálculo dos erros associados às medidas.

Foram realizadas duas séries de medidas em São José dos Campos e Cachoeira Paulista, para pesquisar a variabilidade das atividades do depósito ativo do radônio nestes lugares, em função das suas causas. O objetivo principal foi estudar a correlação entre os resultados experimentais obtidos nestas duas localidades e a pluviometria local e a estabilidade do ar qualitativamente e, quando foi possível, quantitativamente. Até hoje pouquíssimas medidas de radônio e dos seus descendentes foram feitas na América Latina e no Brasil.

Este trabalho representa os primeiros passos numa pesquisa que visa estudar os fenômenos da baixa e média atmosfera usando os traçadores radioativos naturais, que são o radônio e o torônio e seus descendentes. Esta pesquisa compreenderá medidas em outras regiões do Brasil, tais como as regiões amazônicas, uma correlação mais completa com os fatores meteorológicos e micrometeorológicos e uma análise das diferenças oriundas das variações de latitude e do conjunto das condições ambientais (geologia, natureza do solo, vegetação, etc.).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, R.V.; LARSON, R.E. Atmospheric electric and radon profiles over a closed basin and the open ocean. *Journal of Geophysical Research*, 79(24):3235-3432, Aug. 1974.
- ARFINENGO, J.V. *Influências meteorológicas sobre o conteúdo de radônio na atmosfera*. Tese de Mestrado em Ciências. São José dos Campos, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1967.
- BIROT, A.; ADROUGUER, B.; FONTAN, J. Vertical distribution of radon ²²² in the atmosphere and its use for study of exchange in the lower troposphere. *Journal of Geophysical Research*, 75(12):2373-2383, Apr. 1970.
- BOECK, W.L. Effect of increased ionization on the atmospheric electric field. In: NATURAL RADIATION ENVIRONMENT, 3., Houston, TX, 1978. *Proceedings*. Houston, TX, Technical Information Center /V.S. Department of Energy, v.1, p. 201-209, 1978.
- BURTT, B.P. Absolute beta counting. *Nucleonics*, V5:28-43, Aug. 1949.
- CHUNXIANG, Z.; DALING, L. Measurement of mixed radon and thoron daughter concentrations in air. *Nuclear Instruments and Methods*, 215(3):481-488, 1983.
- CLAYTON, C.G.* *Nuclear geophysics: selected Papers on Applications of Nuclear techniques in Mineral Exploration, Mining and Process Control*. Oxford, Pergamon, 1983.
- CLEMENTS, W.E.; BARR, S.; MARPLE, M.L. *Uranium mill tailings piles as sources of atmospheric ²²²Rn*. Los Alamos, NM, Los Alamos Scientific Laboratory of University of California, 1978 (LA-VR 78-828).

- DÖRR, H.; KROMER, B.; LEVIN, I.; MÜNNICH, K.O.; VOLPP, H.J. CO₂ and radon 222 as tracers for atmospheric transport. *Journal of Geophysical Research*, 88(C2):1309-1313, Feb. 1983.
- FLEISCHER, R.L.; GIARD, W.R.; MOGRO-CAMPERO, A.; TURNER, L.G.; ALTER, H.W.; GINGRICH, J.E. Dosimetry of environmental radon methods and theory for low-dose, integrated measurements. *Health Physics*, 39: 957-962, Dec. 1980.
- FONTAN, J.; BIROT, A.; BLANC, O.; BOUVILLE, A.; DRUILHET, A. Measurements of the diffusion of radon, thoron and their radioactive daughter products in the lower layers of the Earth's atmosphere. *Tellus*, 18(2):623-632, 1966.
- GOGOLAK, C.V. and BECK, H.L. Diurnal variations of radon daughter concentrations in the lower atmosphere. In: NATURAL RADIATION ENVIRONMENT, 3, Houston, TX, 1978. *Proceedings*. Houston, TX, Technical Information Center/U.S. Department of Energy, v.1, p.259-279, 1978.
- GORENSTEIN, P.; GOLUB, L.; DJORKHOLM, P. Detection of radon emission at the edges of Lunar Maria with the Apollo alpha-particle spectrometer. *Science*, 183(4123):411-413, Feb. 1974.
- GUEDALIA, O.; ALLETT, C.; FONTAN, J.; DRUILHET, A.; ASSAF, G. Lead-212, radon and vertical mixing in the lower atmosphere (100-200)m., *Tellus*, 25(4):381-385, 1973.
- HINCHLIFFE, R.L.; FRANKLIN, H.I.F.; OLDEN, E.K.M. Measurements of the stratospheric plume from the mount St. Helens eruption: radioactivity and chemical composition. *Science*, 214(4523):904-907, Nov. 1981.
- HOSLER, C.R.; LOCKHART, L.B.Jr. Simultaneous measurements of Rn²²², Pb²¹⁴, and Bi²¹⁴ in air near the ground. *Journal of Geophysical Research*, 70(18):4537-4546, Sep. 1965.

- HÖTZL, H.; WINKLER, R. Large area guided ionization chamber and electrostatic precipitator. Application to low-level alpha spectrometry of environmental air samples, *Nuclear Instruments and Methods*, 150(2):177-181, 1978.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). *Exploration for uranium ore deposits*. Vienna, 1976.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Gamma-ray surveys in uranium exploration*. Vienna, 1979. 89p. (Technical Reports Series n° 186).
- ISRAEL, H.; HORBERT, M.; ISRAEL, G.W. Results of continuous measurements of radon and its decay products in the lower atmosphere. *Tellus*, 18(2):639-641, 1966.
- ISRAEL, H.; ISRAEL, G.W. A new method of continuous measurements of radon (Rn^{222}) and thoron (Rn^{220}) in the atmosphere. *Tellus*, 18(2): 557-561, 1966.
- ISRAELSSON, S. Meteorological Influences on Atmospheric radioactivity and its effect on the electrical environment. In: NATURAL RADIATION ENVIRONMENT, 3, Houston, TX, 1978. *Proceedings*: Houston, TX, Technical Information Center/U.S. Department of Energy, v.1, p:210-225, 1978.
- JACOBI, W. and ANDRÉ, K. The vertical distribution of radon 222, radon 220 and their decay products in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 68(13):3799-3814, July, 1963.
- JETER, H.W.; MARTIN, J.D.; SCHUTZ, D.F. *The migration of gaseous radionuclides through soil overlying a uranium ore deposit: a modeling study*. Prepared for the United State Departmente of Energy grand Junction, Colorado, CO, Bendix Field Engeneering Corporation, 1977.
- KING, C. Radon emanation on San Andreas fault. *Nature*, 271(5645): 516-519, Feb., 1978.

- KIRCHHOFF, V.W.J.H. *Curso de Aeronomia Bsica*. São José dos Campos, INPE, dez. 1978. (INPE-1403-AMD/02).
- KNOLL, G.L. *Radiation detection and measurement*, N.Y., John Wiley, 1979.
- LAMBERT, G. *tude du comportement des aérosols radioactifs artificiels Applications  quelques problèmes de circulation atmosphérique*. Thèse d'Etat, Paris, Université de Paris, 1964.
- LAMBERT, G.; ARDOUIN, B.; POLIAN, G. Volcanic output of long-lived radon daughters. *Journal of Geophysical Research*, 87(13):11103-11108, Dec., 1982.
- LAMBERT, G.; POLIAN, G.; SANAK, J.; ARDOUIN, B.; BUISSON, A.; JEGOU, A., et LE ROULLEY, J.C. Cycle du radon et de ses descendants: application  l'étude des changes troposphre-stratosphre. *Annales Gophysique*, 38(4):497-531, 1982.
- LAMBERT, G.; POLIAN, G.; TAUPIN, D. Existence of periodicity in radon concentrations and in the large-scale circulation at lower altitudes between 40^o and 70^o South. *Journal Geophysical Research*, 75(12): 2341-2345, April, 1970.
- LARSON, R.E.; BRESSAN, D.J. Radon 222 as an indicator of continental air masses and air mass boundaries over ocean areas. In: NATURAL RADIATION ENVIRONMENT, 3., Houston, TX, 1978. *Proceedings*, Houston, TX, Technical Information Center/U.S. Department of Energy, v.1, p.308-326, 1978.
- LOCKHART, L.B. Jr. Atmospheric Radioactivity in South America and Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 65(12):3999-4005, Dec. 1960.

- MALAKHOV, S.G.; BAKULIN, V.N.; DIMITRIEVA, G.V.; KIRICHENKO, L.V.; SSISSIGNA, T.I.; STARIKOV, B.G. Diurnal variations of radon and thoron decay product concentrations in the surface layer of the atmosphere and their washout by precipitations. *Tellus*, 18(2): 643-654, 1966.
- MARTELL, E.A.; MOORE, H.E. Tropospheric aerosol residence times: a critical review. *Journal de Recherches Atmosphériques*, 8:903-910, 1974.
- MOGRO-CAMPERO, A.; FLEISCHER, R.L.; LIKES, R.S. *Changes in subsurface radon concentration associated with earthquakes*. New York, General Electric, Corporate Research and Development, 1979 (Technical Information Series Class 1).
- MOORE, H.E.; POET, S.E.; MARTELL, E.A. ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Bi and ^{210}Po profiles and aerosol residence times versus altitude. *Journal of Geophysical Research*, 78(30):7065-7075, Oct. 1973.
- NAKATAMI, S. The mean size among the particles of short-lived radon daughter products in the atmosphere. In: NATURAL RADIATION ENVIRONMENT, 3., Houston, TX, 1978. *Proceedings*. Houston, TX, Technical Information Center, V.S. Department of Energy, v.1, p.294-307, 1978.
- NAZAROFF, W.W. Radon daughter carousel: An automated instrument for measuring indoor concentrations of ^{218}Po , ^{214}Pb , and ^{214}Bi . *Review of Scientific Instruments*, 54(9):1227-1233, Sept. 1983.
- NEGRO, V.C.; WATNICK, S. *Fungi* - a radon measuring instrument with fast response, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, NS-25, (1):757-761, Feb., 1978.
- NORDEMANN, D.J.R. *Emissions gamma de quelques meteorites et roches terrestres; evaluation de la radioactivité du sol lunaire*. Thèse d'État, Paris, Université de Paris, 1966.

- OKABE, S.; KITAMOTO, A.; SASAGAWA, S. Relation between atmospheric pressure and radon content in air. *Annual report of the radiation Center of Osaka Prefecture*, 21:15-19, 1980.
- PEARSON, J.E. and MOSES, H. Atmospheric radon-222 concentration variation with height and time. *Journal Applied Meteorology*, 5(2):175-181, 1966.
- PEREIRA, E.B.; NORDEMANN, D.J.R.; TAKASHIMA, A.M.; DUTRA, L.S.V.; MANTELLI NETO, S.L. Um sistema para monitoração do radônio e seus produtos de decaimento na atmosfera. São José dos Campos, INPE, abr. 1984. (INPE-3085-PRE/494).
- PORSTENDÖRFER, J. and MERCER, T.T. Diffusion coefficient of radon decay products and their attachment rate to the atmospheric aerosol. In: NATURAL RADIATION ENVIRONMENT, 3., Houston, TX, 1978. *Proceedings*: Houston, TX, Technical Information Center/U.S. Department of Energy, v.1, p.281-293, 1978.
- RAABE, O.F.; WRENN, M.E. Analysis of the activity of radon daughter samples of weighted least squares, *Health Physics*, 17(sf):593-605, 1969.
- RUIPEREZ, G. Yacimientos de uranio y radon atmosférico. Dosis absorbidas. *Energia Nuclear Española*, 27(143):253-263, Mayo-Junio, 1983.
- SCHERY, S.D.; GAEDDERT, D.H. Measurements of the effect of cyclic atmospheric pressure variation on the flux of Rn²²² from the soil, *Geophysical Research Letters*, 9(8):835-838, Aug. 1982.
- SERVANT, J. Temporal and spatial variations of the concentration of short lived decay products of radon in the lower atmosphere, *Tellus*, 18(2):663-671, 1966.
- SERVANT, J. *Le radon et ses dérivés à vie courte dans la basse atmosphère*. Thèse d'Etat, Paris, Université de Paris, 1964.

- SHAPIRO, M.H.; FORBES-RESHA, J.L. $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ ratios in air at a height of 20m, *Journal of Geophysical Research*, 80(12):1605-1613, Apr. 1975.
- SMITH, A.R.; BOWMAN, H.R.; MOSIER, D.F.; ASARO, F.; WOLLENBERG, H.A.; KING, C. Investigation of radon-222 in subsurface waters as an earthquake predictor. *IEEE Nuclear Science Symposium*, Nov. 19-21, 1975. 12p.
- SUBBA RAMU, M.C.; VOHRA, K.G. Investigations on radioactive equilibrium in the lower atmosphere between radon and its short-lived decay products. *Tellus*, 21(3):395-403, 1969.
- SUTTON, O.G. *Micrometeorology*, New York, McGraw-Hill, 1953.
- THOMAS, J.W.; LE CLARE, P.C. A study of the two-filter-method for Radon-222, *Health Physics*, 18:113-122, 1970.
- WINKLER, R.; HÖTZL, H.; CHATTERJEE, B. Analysis of Pb^{210} and Po^{210} concentrations in surface air by an α spectrometric method, *Health Physics*, 41(3):495-503, 1981.
- WILKENING, M.H.; CLEMENTS, W.E.; STANLEY, D. Radon 222 flux measurements in widely separated regions. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE NATURAL RADIATION ENVIRONMENT, 2., Houston, Tx, Aug. 7-11, 1972. *Proceedings*. Springfield, VA, NTIS, 1972, p.717-730. (CONF-720805-P2).

APÊNDICE A

CÁLCULO DO CRESCIMENTO E DECAIMENTO DOS DESCENDENTES DE MEIA-VIDA CURTA NO FILTRO

Durante a amostragem e a uma taxa de fluxo constante q , a variação no número de átomos do Po^{218} , Pb^{214} e Bi^{214} em um filtro é descrita pela seguinte equação diferencial:

$$\frac{dN_i}{d\theta} = \lambda_{i-1} N_{i-1} + n_i q \epsilon - \lambda_i N_i,$$

$$i = 1, 2, 3; N_0 = 0 \text{ (radônio)},$$

onde:

- N_i = número de átomos do i -ésimo elemento no filtro;
- λ_i = constante de decaimento do i -ésimo nuclídeo;
- n_i = concentração atmosférica do i -ésimo elemento átomos/ m^3 ;
- q = fluxo de ar (m^3/min);
- ϵ = eficiência de filtragem;
- θ = tempo em minutos a partir do início de amostragem,

os índices 1, 2 e 3 referem-se ao Po^{218} , Pb^{214} e Bi^{214} , respectivamente.

Para $i = 1$

$$\frac{dN_1}{d\theta} = n_1 q \epsilon - \lambda_1 N_1,$$

$$dN_1 + \lambda_1 N_1 d\theta = n_1 q \epsilon d\theta$$

$$N_1 e^{\int \lambda_1 d\theta} = n_1 q \epsilon \int e^{\int \lambda_1 d\theta} d\theta + C_1,$$

$$N_1 e^{\lambda_1 \theta} = n_1 q \epsilon \frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 \theta} + C_1 ,$$

$$N_1 = \frac{n_1 q \epsilon}{\lambda_1} + C_1 e^{-\lambda_1 \theta} ,$$

condição inicial para $\theta = 0 \implies N_1(0) = 0$

$$C_1 = - \frac{n_1 q \epsilon}{\lambda_1} ,$$

$$N_1(\theta) = n_1 q \epsilon \left[\frac{1 - e^{-\lambda_1 \theta}}{\lambda_1} \right] .$$

Para $i = 2$

$$\frac{dN_2}{d\theta} = \lambda_1 N_1 + n_2 q \epsilon - \lambda_2 N_2 ,$$

$$dN_2 + \lambda_2 N_2 d\theta = \lambda_1 N_1 d\theta + n_2 q \epsilon d\theta$$

$$N_2 \cdot e^{\int \lambda_2 d\theta} = \int \lambda_1 N_1 d\theta \cdot e^{\int \lambda_2 d\theta} + n_2 q \epsilon \int e^{\int \lambda_2 d\theta} d\theta + C_2 ,$$

$$N_2 \cdot e^{\lambda_2 \theta} = n_1 q \epsilon \left[\int e^{\lambda_2 \theta} d\theta - \int e^{(\lambda_2 - \lambda_1) \theta} d\theta \right] + \frac{n_2 q \epsilon}{\lambda_2} e^{\lambda_2 \theta} + C_2 ,$$

$$N_2 e^{\lambda_2 \theta} = n_1 q \epsilon \left[\frac{e^{\lambda_2 \theta}}{\lambda_2} - \frac{e^{(\lambda_2 - \lambda_1) \theta}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right] + \frac{n_2 q \epsilon}{\lambda_2} e^{\lambda_2 \theta} + C_2 ,$$

$$N_2 = n_1 q \epsilon \left[\frac{1}{\lambda_2} - \frac{e^{-\lambda_1 \theta}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right] + \frac{n_2 q \epsilon}{\lambda_2} + C_2 e^{-\lambda_2 \theta} .$$

Condição inicial para $\theta = 0$ $N_2(0) = 0$

$$C_2 = -n_1q\epsilon \left[\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right] - \frac{n_2q\epsilon}{\lambda_2},$$

$$N_2 = \frac{n_1q\epsilon}{\lambda_2} - n_1q\epsilon \frac{e^{-\lambda_1\theta}}{(\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{n_2q\epsilon}{\lambda_2} - \frac{n_1q\epsilon}{\lambda_2} e^{-\lambda_2\theta} +$$

$$+ \frac{n_1q\epsilon}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_2\theta} - \frac{n_2q\epsilon}{\lambda_2} e^{-\lambda_2\theta},$$

$$N_2(\theta) = n_1q\epsilon \left[\frac{1 - e^{-\lambda_2\theta}}{\lambda_2} + \frac{e^{-\lambda_2\theta} - e^{-\lambda_1\theta}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right] + n_2q\epsilon \left[\frac{1 - e^{-\lambda_2\theta}}{\lambda_2} \right].$$

Para $i = 3$

$$\frac{dN_3}{d\theta} = \lambda_2 N_2 + n_3q\epsilon - \lambda_3 N_3,$$

$$dN_3 + \lambda_3 N_3 d\theta = \lambda_2 N_2 d\theta + n_3q\epsilon d\theta$$

$$N_3 e^{\lambda_3\theta} = \lambda_2 \int N_2 e^{\lambda_3\theta} d\theta + n_3q\epsilon \int e^{\lambda_3\theta} d\theta + C_3,$$

$$N_3 e^{\lambda_3\theta} = \lambda_2 \left\{ \left[n_1q\epsilon \int \left(\frac{1 - e^{-\lambda_2\theta}}{\lambda_2} \right) e^{\lambda_3\theta} d\theta + \int \left(\frac{e^{-\lambda_2\theta} - e^{-\lambda_1\theta}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) e^{\lambda_3\theta} d\theta \right] + \right.$$

$$\left. + \left[n_2q\epsilon \int \left(\frac{1 - e^{-\lambda_2\theta}}{\lambda_2} \right) e^{\lambda_3\theta} d\theta \right] \right\} + \frac{n_3q\epsilon}{\lambda_3} e^{\lambda_3\theta} + C_3,$$

$$\begin{aligned}
 N_3 e^{\lambda_3 \theta} = & \lambda_2 \left\{ n_1 q \epsilon \left[\left(\frac{e^{\lambda_3 \theta}}{\lambda_2 \lambda_3} - \frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_2) \theta}}{\lambda_2 (\lambda_3 - \lambda_2)} \right) + \left(\frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_2) \theta}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} - \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. - \frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_1) \theta}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} \right) \right] + \left[n_2 q \epsilon \left(\frac{e^{\lambda_3 \theta}}{\lambda_2 \lambda_3} - \frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_2) \theta}}{\lambda_2 (\lambda_3 - \lambda_2)} \right) \right] \right\} + \\
 & + \frac{n_3 q \epsilon}{\lambda_3} e^{\lambda_3 \theta} + C_3 ,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_3 = & n_1 q \epsilon \left(\frac{1}{\lambda_3} - \frac{e^{-\lambda_2 \theta}}{\lambda_3 - \lambda_2} \right) + n_1 q \epsilon \left(\frac{\lambda_2 e^{-\lambda_2 \theta}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} - \right. \\
 & \left. - \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_1 \theta}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} \right) + n_2 q \epsilon \left(\frac{1}{\lambda_3} - \frac{e^{-\lambda_2 \theta}}{(\lambda_3 - \lambda_2)} \right) + \frac{n_3 q \epsilon}{\lambda_3} + C_3 e^{-\lambda_3 \theta}
 \end{aligned}$$

Condição inicial para $\theta = 0 \implies N(0) = 0$

$$\begin{aligned}
 C_3 = & n_1 q \epsilon \frac{1}{\lambda_3 - \lambda_2} - \frac{1}{\lambda_3} + n_1 q \epsilon \left(\frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} - \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} \right) \\
 & + n_2 q \epsilon \left(\frac{1}{\lambda_3 - \lambda_2} - \frac{1}{\lambda_3} \right) - \frac{n_3 q \epsilon}{\lambda_3} ,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_3 = n_1 q \epsilon & \left[\frac{1}{\lambda_3} - \frac{e^{-\lambda_2 \theta}}{\lambda_3 - \lambda_2} + \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_2 \theta}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} - \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_1 \theta}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \right. \\
 & \left. + \frac{e^{-\lambda_3 \theta}}{\lambda_3 - \lambda_2} - \frac{e^{-\lambda_3 \theta}}{\lambda_3} + \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_3 \theta}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} - \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_3 \theta}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} \right] + \\
 & + n_2 q \epsilon \left[\frac{1}{\lambda_3} - \frac{e^{-\lambda_2 \theta}}{(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 \theta}}{\lambda_3 - \lambda_2} - \frac{e^{-\lambda_3 \theta}}{\lambda_3} \right] + \\
 & + \frac{n_3 q \epsilon}{\lambda_3} - \frac{n_3 q \epsilon}{\lambda_3} e^{-\lambda_3 \theta},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_3(\theta) = n_1 q \epsilon & \left[\frac{1 - e^{-\lambda_3 \theta}}{\lambda_3} + \frac{e^{-\lambda_3 \theta} - e^{-\lambda_2 \theta}}{\lambda_3 - \lambda_2} - \frac{\lambda_2 (e^{-\lambda_3 \theta} - e^{-\lambda_2 \theta})}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_1)} + \right. \\
 & \left. + \frac{\lambda_2 (e^{-\lambda_3 \theta} - e^{-\lambda_1 \theta})}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] + n_2 q \epsilon \left[\frac{1 - e^{-\lambda_3 \theta}}{\lambda_3} + \frac{e^{-\lambda_3 \theta} - e^{-\lambda_3 \theta}}{\lambda_3 - \lambda_2} \right] + \\
 & + n_3 q \epsilon \left[\frac{1 - e^{-\lambda_3 \theta}}{\lambda_3} \right].
 \end{aligned}$$

Para diferenciar o período de amostragem do período de decaimento dos radionuclídeos no filtro, uma nova variável t é definida com $t = 0$ no fim da amostragem. A equação que descreve o decaimento dos descendentes de meia-vida curta do Rn é dada por:

$$\frac{dn_i^t}{dt} = \lambda_{i-1} n_{i-1}^t - \lambda_i n_i^t,$$

onde $i = 1, 2, 3$. $n_i^t(t)$ é o número de átomos do i -ésimo tipo no filtro para tempo t após o final da amostragem.

Para $i = 1$

$$\frac{dn_1^i}{dt} = -\lambda_1 n_1^i ,$$

$$\frac{dn_1^i}{n_1^i} = -\lambda_1 dt ,$$

$$n_1^i = n_1^i(0) e^{-\lambda_1 t} ,$$

mas

$$n_1^i(0) = N_1(T) ,$$

$$\therefore \boxed{n_1^i(t) = N_1(T) e^{-\lambda_1 t} .}$$

Para $i = 2$

$$\frac{dn_2^i}{dt} = \lambda_1 n_1^i - \lambda_2 n_2^i ,$$

$$dn_2^i + \lambda_2 n_2^i dt = \lambda_1 n_1^i$$

$$n_2^i e^{\lambda_2 t} = \lambda_1 \int n_1^i e^{\lambda_2 t} dt + C_4$$

$$n_2^i e^{\lambda_2 t} = \lambda_1 \int N_1(T) e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} dt + C_4$$

$$n_2^i = \lambda_1 N_1(T) \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} + C_4 e^{-\lambda_2 t} ,$$

para isto $t = 0 \implies n_2^i(0) = N_2(T)$.

$$N_2(T) = \lambda_1 N_1(T) \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} + C_4,$$

$$C_4 = N_2(T) - \frac{\lambda_1 N_1(T)}{\lambda_2 - \lambda_1},$$

$$n_2^i = N_1(T) \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)} + N_2(T) e^{-\lambda_2 t} - N_1(T) \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1},$$

$$n_2^i(t) = N_1(T) \left[\frac{\lambda_1 e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} - \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right] + N_2(T) e^{-\lambda_2 t}.$$

Para $i = 3$

$$\frac{dn_3^i}{dt} = \lambda_2 n_2^i - \lambda_3 n_3^i,$$

$$n_3^i e^{\lambda_3 t} = \lambda_2 \int n_2^i e^{\lambda_3 t} dt + C_5,$$

$$n_3^i e^{\lambda_3 t} = \lambda_2 N_1(T) \int \left[\frac{\lambda_1 e^{(\lambda_3 - \lambda_1)t}}{\lambda_2 - \lambda_1} - \frac{\lambda_1 e^{(\lambda_3 - \lambda_2)t}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right] dt +$$

$$+ \lambda_2 N_2(T) \int e^{(\lambda_3 - \lambda_2)t} dt + C_5,$$

$$n_3^i e^{\lambda_3 t} = \lambda_2 N_1(T) \left[\frac{\lambda_1 e^{(\lambda_3 - \lambda_1)t}}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{\lambda_1 e^{(\lambda_3 - \lambda_2)t}}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] +$$

$$+ \lambda_2 N_2(T) \frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_2)t}}{\lambda_3 - \lambda_2} + C_5,$$

- A.8 -

$$n'_3 = \lambda_2 N_1(T) \left[\frac{\lambda_1 e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] +$$

$$+ \lambda_2 N_2(T) \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_3 - \lambda_2} + C_5 e^{-\lambda_3 t} .$$

Para $t = 0 \implies n'_3(0) = N_3(T)$

$$N_3(T) - N_1(T) \left[\frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] - N_2(T) \frac{\lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} = C_5$$

$$n'_3(t) = N_1(T) \left[\frac{\lambda_1 \lambda_2 e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{\lambda_1 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{\lambda_1 \lambda_2 e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} \right] +$$

$$+ N_2(T) \left[\frac{\lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_3 - \lambda_2} - \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_3 t}}{\lambda_3 - \lambda_2} \right] + N_3(T) e^{-\lambda_3 t} ,$$

onde T é o tempo de duração da amostragem.

APENDICE B

DESCRIÇÃO GERAL DO EQUIPAMENTO ELETRÔNICO

B.1 - DESCRIÇÃO DE UM DETETOR SEMICONDUTOR

Um detetor de diodo semiconductor geralmente é constituído por uma placa de silício ou germânio, sobre a qual é criada uma zona de alta concentração de impurezas do tipo p (buracos) ou n (elétrons), obtendo-se deste modo uma junção semicondutora (Figura B.1a).

A placa semicondutora do tipo n, por exemplo, tem uma resistividade elevada. Em uma das faces faz-se uma camada o mais fina possível com forte concentração de impurezas do tipo p, enquanto a outra face torna-se condutora através de uma forte dopagem de impurezas n. Quando a junção é inversamente polarizada por uma tensão exterior, obtém-se uma zona de cargas de espaço de profundidade D, praticamente vedada aos portadores de carga e sobre a qual domina um campo elétrico E.

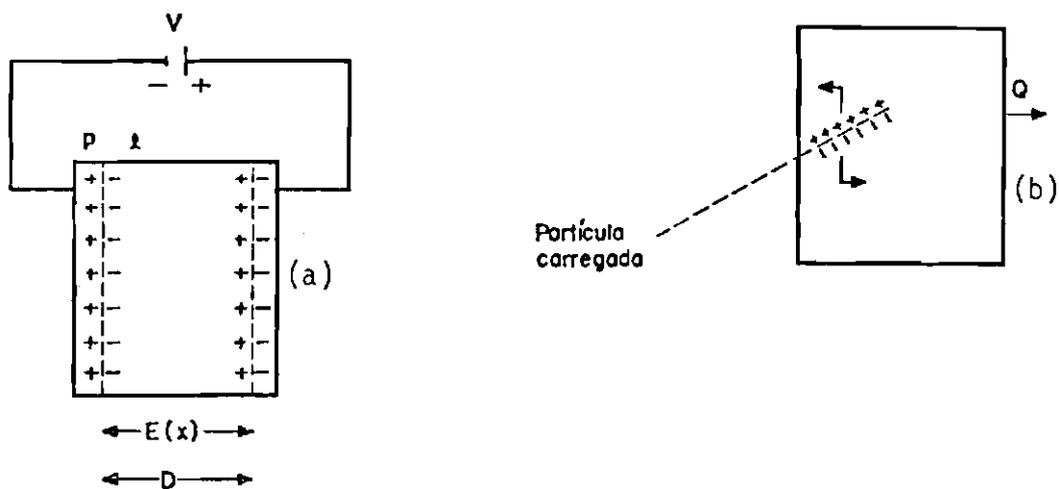
O detetor pode então ser comparado a um condensador plano cujo dielétrico será a região do semiconductor onde dominam as cargas de espaço e cuja distância entre as placas é igual a D. Neste tipo de detetor surge uma corrente geradora de ruído que cresce com a tensão inversa de polarização.

Do ponto de vista de detecção de uma partícula nuclear, o detetor semiconductor pode ser esquematizado conforme mostra a Figura B.1b.

Quando uma partícula carregada penetra o detetor, ela forma elétrons livres e buracos positivos que provocam uma reação em cadeia sob a ação do campo elétrico de algumas dezenas de volts (50V, neste caso, o qual domina na região de cargas de espaço. As cargas

B.2 -

produzidas coletadas num intervalo de tempo muito pequeno (alguns μs) resultarão em um pulso de carga (Q) na saída do detetor como mostra a Figura B.1b.



V - tensão reversa de polarização.

$E(x)$ - campo elétrico.

D - profundidade de depleção.

Fig. B.1 - Princípio de funcionamento do detector semicondutor (a) e esquema de detecção da partícula alfa pelo detector semicondutor (b).

B.2 - ELETRÔNICA ASSOCIADA

A carga Q (Figura B.2) na entrada do pré-amplificador é convertida em tensão (V_0) na sua saída, independente da capacidade do detector. Esta é a razão pela qual este amplificador é denominado pré-amplificador sensível a carga. Como o nível do sinal V_0 é muito baixo, ele é amplificado de modo a definir a região de utilização do multicanal (por exemplo, para uma tensão de saída de 1V no amplificador tem-se um sinal correspondente ao canal 100 do multicanal). Em seguida o espectro do multicanal é impresso.

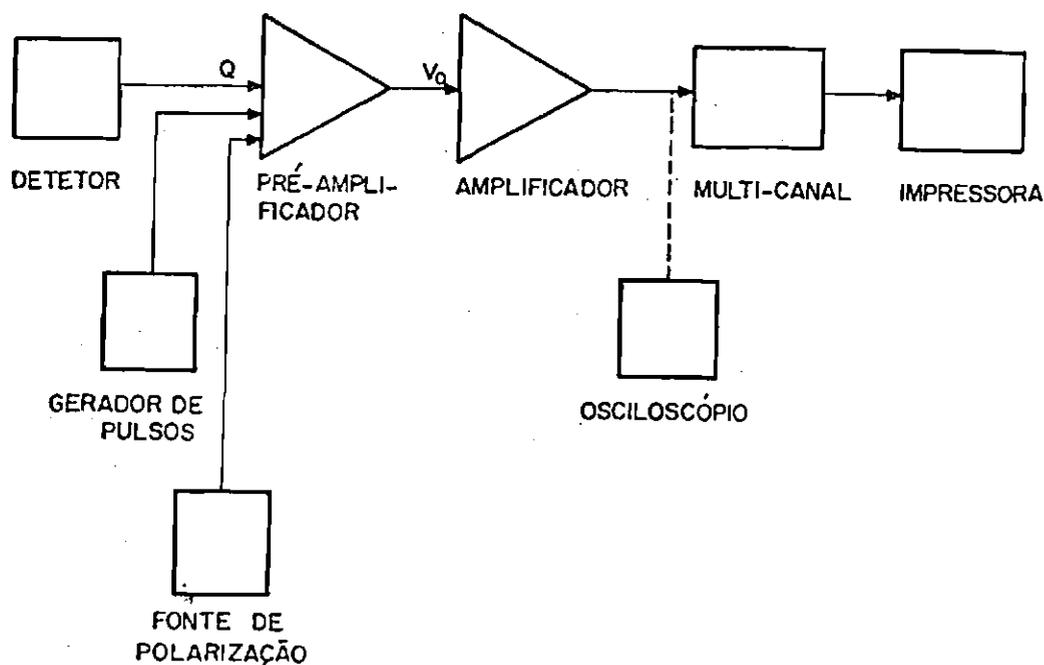


Fig. B.2 - Diagrama de blocos do equipamento eletrônico utilizado.

Os outros elementos do sistema, osciloscópio e gerador de pulsos, são utilizados para fazer alguns testes ou calibrações no sistema; portanto, estes elementos são usados eventualmente.

B.2.1 - FONTE DE POLARIZAÇÃO

Este elemento polariza o detetor. Note-se que existe uma resistência de carga entre a fonte de polarização e o detetor, que tem a finalidade de permitir recolher um pulso elétrico devido à liberação das cargas elétricas no detetor durante a passagem da partícula alfa. No caso, seu valor é de 22 M Ω . Portanto, ao polarizar o detetor, deve-se levar em conta a queda de tensão na resistência de carga. No caso presente, a fonte deve fornecer uma tensão de 55V para que se tenha uma tensão de polarização de 50V no detetor, especificada pelo fabricante.