



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS**

	<p>PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO <i>INPE-4233-PRÉ/1100</i></p>
TÍTULO/TITLE	<p><i>ESPECTROMETRIA GAMA DE GEOMETRIA 4<math>\pi</math> INFINITA</i></p>
AUTORES/AUTHORSHIP	<p><i>Daniel Jean Roger Nordemann</i></p>



INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO  
AUTHORIZATION FOR PUBLICATION

PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS

**ESPECTROMETRIA GAMA**  
**GEOMETRIA 4 $\pi$  INFINITA**  
**RENDIMENTO DE DETEÇÃO (RADIÇÃO GAMA)**

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY

*M. A. F. F. P.*  
Marco Antonio F. P.  
Diretor Geral

AUTOR RESPONSÁVEL  
RESPONSIBLE AUTHOR  
*D. J. R. Nordemann*  
Daniel J.R. Nordemann

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION  
 INTERNA / INTERNAL  
 EXTERNA / EXTERNAL  
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY  
*E. B. F.*  
Elio B. Ferreira

CDU/UDC

550.3:539.16

DATA/DATE

Julho, 1987

PUBLICAÇÃO Nº  
PUBLICATION NO

INPE-1233-PRE/1108

ORIGEM  
ORIGIN

DGA

PROJETO  
PROJECT

MATERIA

TÍTULO/TITLE

ESPECTROMETRIA GAMA DE GEOMETRIA 4 $\pi$  INFINITA

Nº DE PAG.  
NO OF PAGES

24

ULTIMA PAG.  
LAST PAGE

18

AUTORES/AUTHORSHIP

Daniel Jean Roger Nordemann

VERSÃO  
VERSION

Nº DE MAPAS  
NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Devido à fraca absorção da radiação gama pela matéria, as medidas de espectrometria gama podem ser aplicadas a amostras de grande volume. Um caso de especial interesse é o da espectrometria gama efetuada com geometria 4 $\pi$  sobre uma amostra que cerca o detetor, a qual pode ser considerada de extensão infinita. O método é quantitativo mediante a determinação de rendimentos específicos para este tipo de medida.

OBSERVAÇÕES/REMARKS

Este trabalho será apresentado no 2º Encontro Regional de Geofísica (SBGf), novembro de 1987.

#### ABSTRACT

*Owing to the weak absorption of gamma radiation by matter, gamma-ray spectrometry may be applied to samples of great volume. A very interesting case is that of the gamma-ray spectrometry applied with 4 $\pi$  geometry around the detector on a sample assumed to be of infinite extension. The determination of suitable efficiencies allows this method to be quantitative.*

## LISTA DE FIGURAS

- 1 - Sondas de espectrometria gama submarina (segundo Chesselet, 1966-1969).
- 2 - Curva experimental das variações do rendimento  $R(E)$  de detecção fotoelétrica num meio emissor, absorvedor, homogêneo e infinito, em função da energia  $E$ , para um detetor NaI(Tl) de  $1\ 3/4 \times 2$ " (segundo Chesselet, 1966-1969).
- 3 - Curva experimental das variações do rendimento  $R(E)$  de detecção fotoelétrica num meio emissor, absorvedor, homogêneo e infinito, em função da energia  $E$ , para um detetor NaI(Tl) de  $4 \times 3$ " (segundo Chesselet, 1966-1969).

## LISTA DE TABELAS

- 1 - Exemplos de geometrias de detecção usadas em função das partículas ou radiações detetadas, dos detetores e das amostras (ângulo sólido da detecção:  $\omega$ ).
- 2 - Valores de rendimentos de detecção (expressos em cps/Bq/kg, contagens por segundo por bequerel por quilograma) para um detetor NaI(Tl) de 3"x3" com geometria de detecção  $4\pi$  infinita e para um meio de densidade 1, calculados no presente trabalho a partir das determinações de Chesselet (1966-1969).

## INTRODUÇÃO

As medidas nucleares são feitas em geral sobre amostras pequenas colocadas dentro ou perto do detetor apropriado. Vale salientar a existência de diversas geometrias de detecção que dependem das partículas ou radiações medidas, do detetor do tipo e do volume de amostra analisada. A Tabela 1 mostra alguns exemplos de geometrias de detecção juntas com o detetor empregado e com o tipo de amostra.

A finalidade deste trabalho é apresentar as condições de medida da espectrometria gama aplicada a amostras de grande volume com geometria  $4\pi$ . As condições são tais que a amostra pode ser vista como ocupando o espaço em volta do detetor, tendo dimensões suficientemente grandes para ser consideradas como infinitas (para os efeitos considerados). Os valores dos rendimentos de detecção serão determinados experimentalmente ou calculados a partir de resultados experimentais para condições diferentes, porém semelhantes às consideradas aqui. Diferentes tamanhos de detetores também serão contemplados. O caso particular da geometria  $2\pi$  será também descrito.

## 1. ESPECTROMETRIA GAMA DE GEOMETRIA INFINITA

Dois casos podem servir de exemplo para apresentar a espectrometria gama de geometria infinita: a espectrometria gama de campo ou aérea (geometria 2 $\pi$  infinita) e a espectrometria gama do oceano in situ (geometria 4 $\pi$  infinita).

A espectrometria gama de campo (Nordemann, 1966; Ferreira, 1973) ou aérea é um método bastante divulgado e usado tanto para pesquisas radiogeológicas quanto para a procura de jazidas de minérios radioativos (I.A.E.A., 1979). Devido ao custo relativamente baixo e à facilidade de uso, o cristal cintilador de iodeto de sódio ativado com tálio NaI(Tl) é amplamente usado para estas medidas. Um rendimento de detecção elevado e a possibilidade de construir detetores de grande volume representam vantagens suplementares a favor do uso deste tipo de detector.

Um exemplo menos conhecido de espectrometria gama com geometria infinita é o da espectrometria gama do oceano in situ (Chesselet 1966-1969). Trata-se de um método de medida de produtos de fissão oriundo das explosões nucleares atmosféricas e presentes na camada misturada do oceano acima da termoclina. O detector pode ser um cristal de NaI(Tl) de 4"x3" ou um de 1 3/4"x2" (Chesselet, 1966-1969). O detector completo com a fotomultiplicadora e com o pré-amplificador é colocado num invólucro de aço a prova d'água e mergulhado até profundidades de 120m aproximadamente (Figura 1). Um cabo multicondutor leva ao detector as várias tensões necessárias e transmite ao navio os sinais provenientes da detecção dos emissores gama presentes no oceano, os quais circundam o detector. A camada de água acima do detector representa uma blindagem natural contra a radiação ambiente de origem cósmica. O tratamento dos sinais recolhidos é feito a bordo do navio usando a instrumentação convencional para este tipo de medidas (analisador de pulsos).

## 2. DETERMINAÇÃO DOS RENDIMENTOS DE DETECÇÃO

Quando um detetor de radiação gama é colocado dentro de um meio uniformemente emissor gama, absorvedor para esta mesma radiação e infinito em todas as direções, ele detetará uma parte da radiação que o atingir e atravessar. Dentro de limites razoáveis (taxas de contagem não muito elevadas), as taxas de contagem oriundas da detecção da radiação gama de um emissor dado serão proporcionais à atividade específica (por unidade de volume ou de massa) da matéria que constitui o meio. Para tornar quantitativo o método da espectrometria gama de geometria 4 $\pi$  infinita, há necessidade de conhecer os rendimentos de detecção para a radiação gama proveniente dos emissores de maior interesse. Evidentemente, estes rendimentos serão função dos seguintes fatores: matéria com a qual o detetor é feito, forma e volume do detetor, matéria do meio ambiente (efeito de absorção da radiação) e energia da radiação. Quando se trata da detecção de um certo radionuclídeo, o rendimento sendo expresso em taxa de contagem por unidade de atividade e por unidade de quantidade da matéria do meio; há também necessidade de levar em conta os fatores ("branching ratios") que caracterizam as atividades gama dos descendentes em relação aos decaimentos dos nuclídeos pais.

Os rendimentos podem ser determinados de maneira experimental ou de maneira teórica. As experiências podem usar fontes radioativa distribuídas num volume de matéria sólida ou líquida, com atividades específicas conhecidas. Elas podem usar fontes radioativas sólidas puntiformes que levam à integração de um número suficientemente grande de pontos de medida. As determinações teóricas são baseadas no uso de tabelas de seção de choque para as interações da radiação gama na matéria do detetor e do meio. Havendo no decorrer de qualquer uma destas determinações numerosos motivos de imprecisão, vale salientar a necessidade de usar todos os recursos disponíveis para checar cuidadosamente os resultados, eliminar as discrepâncias e tentar manter as incertezas a níveis razoáveis e compatíveis com as exigências relativas às medidas.



### 3. NOÇÕES TEÓRICAS SOBRE OS RENDIMENTOS DE DETEÇÃO

#### 3.1 - DEFINIÇÃO DOS RENDIMENTOS DE DETEÇÃO PARA FONTES PUNTIFORMES E PARA FONTES UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDAS EM VOLUME

No caso de uma fonte puntiforme de radiação gama, o rendimento de detecção deve caracterizar a aptidão do detetor para detetar, isto é, para identificar e quantificar sinais (pulsos) característicos das emissões da fonte. Por estas razões, o rendimento é definido como a razão entre os pulsos contados dentro de um pico característico e as emissões gama da energia considerada. Neste sentido, o rendimento assim definido é um número puro, inferior a 1. Ele pode ser expresso em pulsos detetados por unidade de tempo e por unidade de atividade gama, esta última sendo expressa com a mesma unidade de tempo.

Esta definição pressupõe a caracterização das condições de integração das contagens: região do espectro, faixa de energia função da resolução, método empregado (contagem total, método da secante, etc.). Este rendimento é evidentemente função da natureza do detetor, do seu volume e formato, da distância entre a fonte e o detetor, do meio absorvedor situado entre a fonte e o detetor. Porém, vale salientar que todos os detetores idênticos, nas mesmas condições geométricas (distância e posição da fonte) e físicas (absorção da radiação entre a fonte e o detetor), têm o mesmo rendimento. Se existe necessidade de avaliar a atividade da fonte em termos de decaimentos, e não apenas em termos de "desexcitações" gama, deverão ser considerados os "branching ratios" específicos dos emissores e das suas respectivas desexcitações gama, como já foi mencionado.

Quando se considera a detecção de raios gama provenientes de uma fonte volumosa, de possível extensão infinita, o rendimento acima definido seria muito pequeno ou valeria zero, uma vez que as emissões da fonte são numerosas ou infinitas. Para as fontes volumosas ou infinitas em volume, introduz-se a seguinte definição: o rendimento é a relação entre a frequência dos sinais característicos detetados e a atividade

de (gama, neste caso) específica (por unidade de volume) do emissor responsável. Este rendimento não é mais um número puro, é homogêneo a um volume, e poderia ser expresso em unidade de volume, uma vez que esta noção de volume tem um significado físico, como será visto mais adiante. Até o presente, várias unidades "funcionais" foram empregadas para expressar este rendimento: pulsos por hora por picocurie por litro (cph/pCi/l) ou pulsos por segundo por bequerel por quilograma. Nos casos específicos, haverá também necessidade de considerar os "branching ratios".

No intuito de simplificar as fórmulas a serem empregadas, os rendimentos poderão ser considerados como as taxas de contagem devidas a uma fonte puntiforme unitária ou a uma atividade específica (por unidade de volume) unitária, dependendo dos casos.

### 3.2 - FÓRMULA BÁSICA DA DETECÇÃO

Considera-se um detetor cilíndrico (área de base S, espessura E) com uma fonte puntiforme de raios gama no eixo cilindro a uma certa distância Y. Em termos simplificados, o rendimento de detecção R é o seguinte:

$$R = \frac{S}{4\pi Y^2} \exp(-\mu'Y) (1 - \exp(-\mu E)) \quad (1)$$

onde  $\mu$  é um coeficiente de absorção para a radiação considerada, para o material do detetor e para o efeito considerado; e  $\mu'$  é o coeficiente de absorção total para a radiação considerada na matéria que circunda o detetor.

O termo  $S/4\pi Y^2$  representa a fração de ângulo sólido dentro do qual o detetor é visto a partir da fonte puntiforme em relação ao espaço total  $4\pi$ . Este termo representa então a fração dos raios gama emitido a distância Y da face de entrada do detetor, os quais conseguiriam atingi-lo se não houvesse absorção na matéria emissora. O termo  $\exp(-\mu'Y)$  representa a fração das emissões gama que atingem o detetor

após atravessar a espessura  $Y$  de matéria absorvedora de coeficiente de absorção  $\mu'$ . O termo  $(1-\exp(-\mu E))$  representa a fração da radiação gama que é absorvida dentro de detetor, a qual dá lugar ao efeito fotoelétrico ou à absorção total.

As considerações mencionadas acima serão usadas mais adiante, porque elas representam uma aproximação razoável dos diversos fenômenos em jogo. Porém vale salientar que um desenvolvimento mais completo e mais rigoroso haveria de levar em conta fatos como as variações de  $Y$  em função das diversas trajetórias possíveis para os raios gama. Da mesma maneira, deve-se constatar que, para cada trajetória a espessura de detetor atravessada não é constante. As seções de choque para as diversas interações mereceriam também maior consideração. O termo da interação da radiação gama com a matéria do detetor deveria levar em conta a absorção da radiação, bem como a fração da radiação absorvida que dá lugar ao efeito fotoelétrico ou à absorção total, o que conduz a detecção do raio gama no pico de absorção total, habitualmente denominado pico fotoelétrico.

No presente trabalho, como no trabalho citado (Chesselet, 1966-1969) que será usado mais adiante, as taxas de contagem para cada pico são determinadas pela avaliação da área total do pico (para a duração da medida) que se encontra acima da colina devida ao efeito Compton. O método empregado para esta avaliação é o método da secante, às vezes denominado método da tangente. Neste método a área da contribuição Compton é considerada como o do trapézio limitado na faixa de energia considerada pela reta que junta os dois "vales" que limitam o pico. Este método é bastante simples, porém apresenta o inconveniente de incertezas estatísticas elevadas para as atividades fracas.

### 3.3 - REGRA DO VOLUME

Para valores  $\mu E$  não muito elevados (detetor não muito ex-presso), pode-se escrever:

$$R = \frac{\mu SE}{4\pi Y^2} \exp(-\mu'Y) = \frac{\mu V}{4\pi Y^2} \exp(-\mu'Y) \quad (2)$$

onde aparece a proporcionalidade do rendimento de detecção com o volume  $V = S E$ .

Enquanto um detetor "superficial" para medidas nucleares de amostras puntiformes ou superficiais, como um detetor alfa, por exemplo, tem o rendimento de detecção geométrico proporcional à sua área, um detetor gama tem o seu rendimento aproximadamente proporcional ao seu volume.

Vale salientar que não se trata de uma regra absoluta, mas sim do resultado de um conjunto de aproximações. Se for usada para avaliar o rendimento de detecção de um detetor a partir do rendimento conhecido de um detetor de outro volume, esta regra acarretará um acréscimo não-desprezível das incertezas.

### 3.4 - DETEÇÃO EM VOLUME

A detecção da radiação gama emitida por emissores distribuídos dentro de objetos que não são puntiformes, mas ocupam volumes importantes, pode ser tratada a partir da fórmula elementar (1) pela integração dos termos relativos aos elementos de volume e às possíveis trajetórias da radiação gama. O caso do meio uniformemente emissor, uniformemente absorvedor e de simetria esférica centrada no detetor é de alto interesse para várias aplicações. Este caso, estendido a um meio infinito, representa tipicamente o caso da espectrometria gama do oceano in situ, onde a geometria de detecção é chamada de  $4\pi$  infinita. Ele representa também a espectrometria gama de campo ao nível do solo, com uma geometria  $2\pi$  infinita.

No caso da simetria esférica centrada no detetor, o volume elementar considerado é uma camada esférica de raio  $x$  e de espessura  $dX$ . Obtém-se então:

$$R = \frac{S}{4\pi} \int_A^B \frac{\exp(-\mu'(X-A)) (1 - \exp(-\mu E))}{X^2} 4\pi X^2 dX. \quad (3)$$

A fórmula torna-se simples e pode ser integrada para o espaço considerado:

$$R = \int_A^B S \exp(-\mu'(X-A)) (1 - \exp(-\mu E)) dX, \quad (4)$$

onde  $A$  é o limite inferior e corresponde ao raio da esfera do invólucro do detetor, e  $B$  é limite superior e corresponde ao limite exterior do meio emissor e absorvedor que circunda o detetor. O valor de  $B$  pode ser infinito no caso de um meio infinito, sem problema de convergência para a integral. Vale salientar o formato do detetor quando se levam em conta as várias hipóteses simplificadoras: ele é esférico, contido numa esfera de raio  $A$ , e visto de todas as direções como tendo uma espessura constante  $E$  para os raios que o atravessam. Este formato hipotético é considerado compatível com os formatos habituais para os detetores gama, por exemplo, os cilindros cujo diâmetro não difere muito da sua espessura.

A integração é fácil:

$$R = S (1 - \exp(-\mu E)) \exp(\mu' A) (\exp(\mu' A) - \exp(-\mu' B)) / \mu'. \quad (5)$$

Estas últimas fórmulas permitem expressar algumas conclusões úteis:

No caso do meio emissor e absorvedor infinito, o rendimento torna-se:

$$R = S (1 - \exp(-\mu E)) / \mu'. \quad (6)$$

Para um detetor pequeno em relação às distâncias características da absorção  $1/\mu$  no detetor e  $1/\mu'$  na matéria,  $\mu E$  e  $\mu' A$  são quantidades pequenas e a Fórmula 6 transforma-se em:

$$R = S E \mu / \mu'. \quad (7)$$

Após certas opções simplificadoras, observa-se então que o rendimento de detecção para a radiação gama proveniente de um meio absorvedor, uniformemente emissor e infinito, é proporcional ao volume do detetor, ao seu coeficiente de absorção  $\mu$  (em primeira aproximação, o coeficiente para o efeito fotoelétrico é a energia considerada) e inversamente proporcional ao coeficiente de absorção da mesma radiação no meio emissor.

Não obstante as aproximações usadas na demonstração da regra do volume no caso da geometria  $4\pi$  infinita, vale salientar uma observação de ordem física a respeito da detecção da radiação gama nestas condições: imagina-se um detetor convexo que ocupa um volume  $V$  delimitado por uma superfície fechada  $S$  dentro de uma matéria homogênea, uniformemente emissora e de extensão infinita. Se não houvesse o detetor no volume  $V$ , mas a mesma matéria emissora, cada elemento da superfície  $S$  seria atravessado nos dois sentidos (de dentro de  $V$  para fora e de fora de  $V$  para dentro) pelo mesmo fluxo de radiação, estatisticamente. Então, a superfície  $S$  por inteiro é atravessada pelo mesmo fluxo de radiação nos dois sentidos. Isto mostra que o detetor de volume  $V$  pode, nestas condições, ser atravessado apenas pela radiação emitida por um volume  $V$  da mesma matéria emissora. Assim sendo, o rendimento, como foi definido, será igual ou inferior (por causa das absorções) ao seu próprio volume  $V$ .

#### 4. RENDIMENTO DE DETEÇÃO PARA UM DETETOR 4"x3" COM GEOMETRIA 4π INFINITA (ESPECTROMETRIA GAMA MARINHA IN SITU)

Para tornar quantitativo o método da espectrometria gama da água do mar empregado in situ, havia necessidade de determinar os rendimentos de detecção para vários detetores e para várias energias, segundo Chesselet et al. (1961) e Chesselet (1966-1969). Após algumas tentativas feitas usando fontes puntiformes e a fórmula da integração, estes autores optaram pelas calibrações feitas dentro de cubas de grande volume (da ordem de 100 litros) com emissores radioativos diluídos. Para avaliar a diferença entre as taxas de contagem obtidas para o volume finito e as que seriam obtidas num meio infinito, eles usaram um cálculo simples, baseado no emprego da mesma fórmula de integração.

As Figuras 2 e 3 apresentam a síntese dos resultados obtidos pelos mesmos autores para detetores de 1 3/4"x2 e de 4"x3", respectivamente. Nestas figuras, os valores dos rendimentos de detecção são expressos em pulsos por hora por picocurie por litro.

#### 5. RENDIMENTO DE DETEÇÃO PARA UM DETETOR 3"x3" E GEOMETRIA 4π INFINITA

Os rendimentos de detecção para o detetor de 3"x3" foram calculados no presente trabalho a partir dos valores medidos anteriormente para o detetor 4"x3", no caso da espectrometria gama marinha in situ. Duas regiões de interesse foram escolhidas no espectro gama: a) a região de 660 keV, com as emissões do Cs137 e do Cs134, os produtos de fissão emissores gama e típicos das contaminações atmosféricas provenientes de explosões nucleares ou de acidente de reator nuclear; b) a região de 1460 keV, característica da emissão gama do potássio 40 presente no potássio natural dos gêneros alimentícios. Os valores para o detetor 4"x3" e para a geometria 4π infinita nas condições da espectrometria marinha in situ são 40 e 30 cph/pCi/litro para estas duas faixas de energia, respectivamente. A conversão em cps/Bq/kg não apresenta dificuldade, uma vez que:

1 cph = 1/3600 cps

e 1 pCi = 0,037 Bq.

Além disto, calcula-se que a relação entre os volumes dos cristais (volume do 3"x3" / volume do 4"x3") vale 0,5635 para a aplicação da regra do volume.

A Tabela 2 apresenta os valores calculados para o detetor 3"x3" numa geometria 4 $\pi$  infinita para um meio homogêneo uniformemente emissor e absorvedor de densidade aproximadamente igual à densidade da água. Dentro das aproximações simplificadoras empregadas, as incertezas associadas a estes valores são da ordem de 30%. Para medidas que usariam estes rendimentos de detecção, haveria necessidade de acrescentar as incertezas associadas à estatística das contagens e às condições geométricas ou físicas das medidas.

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi mostrado como a espectrometria gama pode ser aplicada às amostras de grande volume com geometrias 2 $\pi$  ou 4 $\pi$ . O método se torna quantitativo mediante o emprego de rendimentos adequados. Estes rendimentos são função do tipo e do tamanho do detetor, da geometria da detecção, da natureza da amostra e da energia da radiação gama considerada. Eles podem ser determinados experimentalmente em condições iguais ou semelhantes às das medidas a serem realizadas ou calculadas a partir de rendimentos já publicados. Deve-se dar atenção especial à escolha do método para a determinação das áreas dos picos observados nos espectros líquidos e à subtração da contribuição do efeito Compton, sendo preferidos os métodos de regressão que permitam a determinação simultânea das incertezas estatísticas e sistemáticas.

Nestas condições, a espectrometria gama de geometria 4 $\pi$  infinita representa um método quantitativo de determinação das atividades de emissores gama distribuídos em grandes volumes de matéria absorvedora. Trata-se de um método não-destrutivo; por este motivo, ele per



mite medir a radioatividade natural e/ou artificial em numerosas aplicações de campo, tais como: medidas em sondagens e poços; medidas in situ no oceano, nos rios e nas lagoas; controle de contaminação radioativa de gêneros alimentícios (carne, leite, etc.).

TABELA 1

RADIAÇÃO	DETETOR	GEOMETRIA (OMEGA)	AMOSTRA	OBSERVAÇÃO
alfa	Si barreira de superfície	$<2\pi$	delgada	
alfa	contador de grade	$2\pi$	puntiforme	contida no detetor
beta	Geiger ou cintilador plástico	$<2\pi$	pequena	fora do detetor
beta, X	contador a gás	$4\pi$	gasosa	dentro do contador
n	contador NaI(Tl)	$<4\pi$	ambiente	
gama	Ge(Li) GeHP	$<2\pi$	pequena ou volumosa	fora do detetor
gama	NaI(Tl) Ge(Li) GeHP com poço	$4\pi$	pequena	dentro do poço
gama	NaI(Tl)	$2\pi$	terreno infinito	medida gama aérea ou de campo
gama	NaI(Tl)	$4\pi$	meio infinito	medida in situ ou in loco
gama	Ge(Li) GeHP	pequeno	fontes a grande distância	astronomia gama

TABELA 2

<b>Energia (keV)</b>	<b>660</b>	<b>1460</b>
<b>Rendimento (cps/Bq/kg)</b>	<b>0,168</b>	<b>0,126</b>

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHESELET, R., GRJEBINE, T., LAMBERT, G., NORDEMANN, D. Identification directe des nuclides radioactifs dans l'eau de mer par spectrographie gamma. In: COLLOQUES NATIONAUX DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (C.N.R.S.), Villefranche-sur-mer, France, 4-8 avril 1961. *Océanographie Géologique et Géophysique de la Méditerranée Occidentale*. Paris. Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique, 1962. p. 183-210.
- CHESELET, R. Étude de la radioactivité artificielle du milieu marin par spectrometrie gamma. Thèse de Doctorat d'Université. Paris, Université de Paris, 1966. Publicado também Rapport CEA-R3698, em 1969.
- FERREIRA, C. *Espectrometria gama de campo: determinação das condições de detecção, aplicação ao mapeamento de uma jazida de apatita*. Tese de Mestrado em Geofísica, PPPG-UFBA. Salvador, UFBA, 1973. 75p..
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (I.A.E.A). *Gamma-ray surveys in uranium exploration*. Vienna, I.A.E.A., 1979.
- NORDEMANN, D.J.R. *Emissions gamma de quelques météorites et roches terrestres. Evaluation de la radioactivité du sol lunaire*. Thèse de Doctorat ès-Sciences, Paris, Université de Paris, 1966. Publicado também como Rapport CEA-R3017, em 1966.

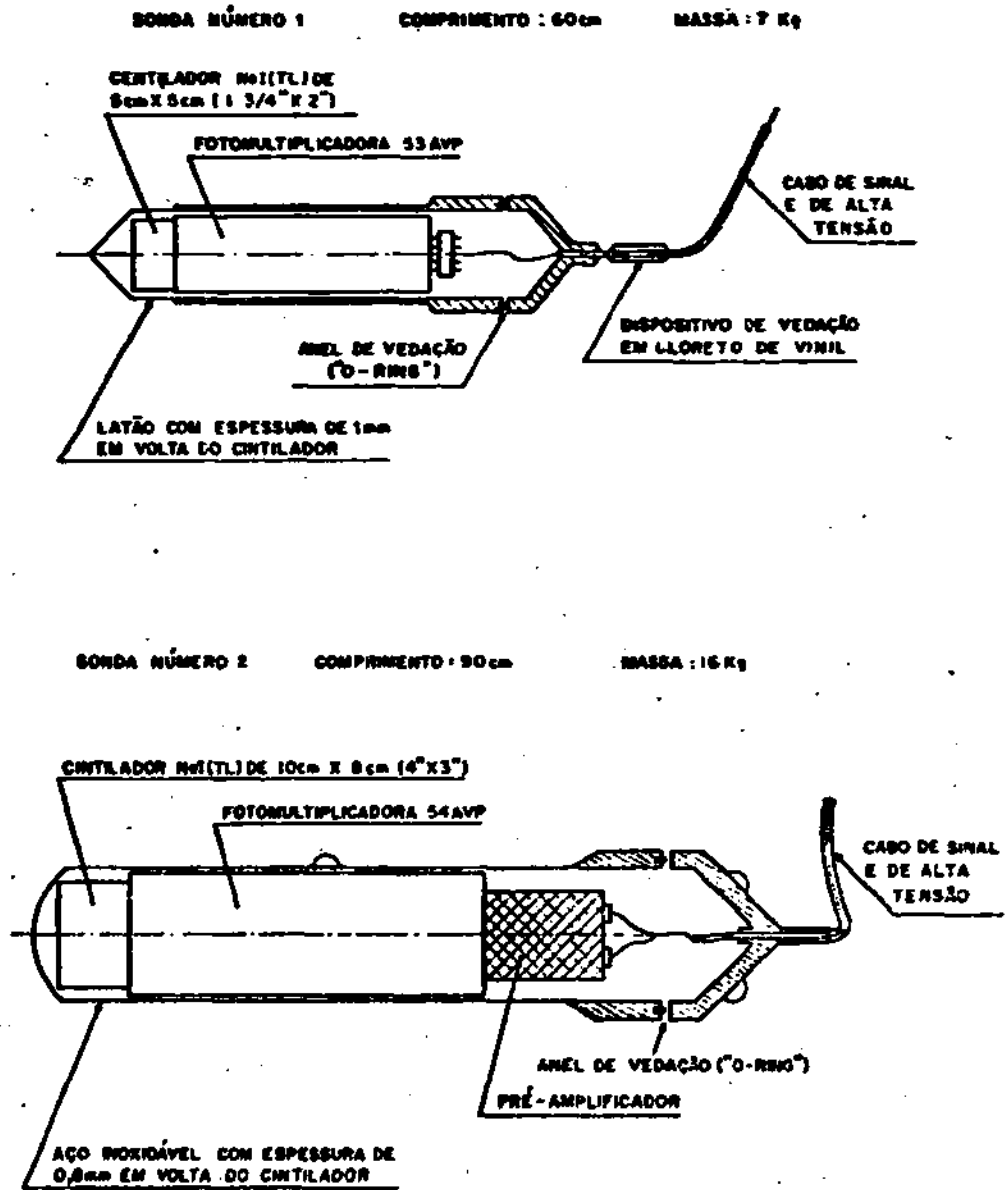


Figura 1

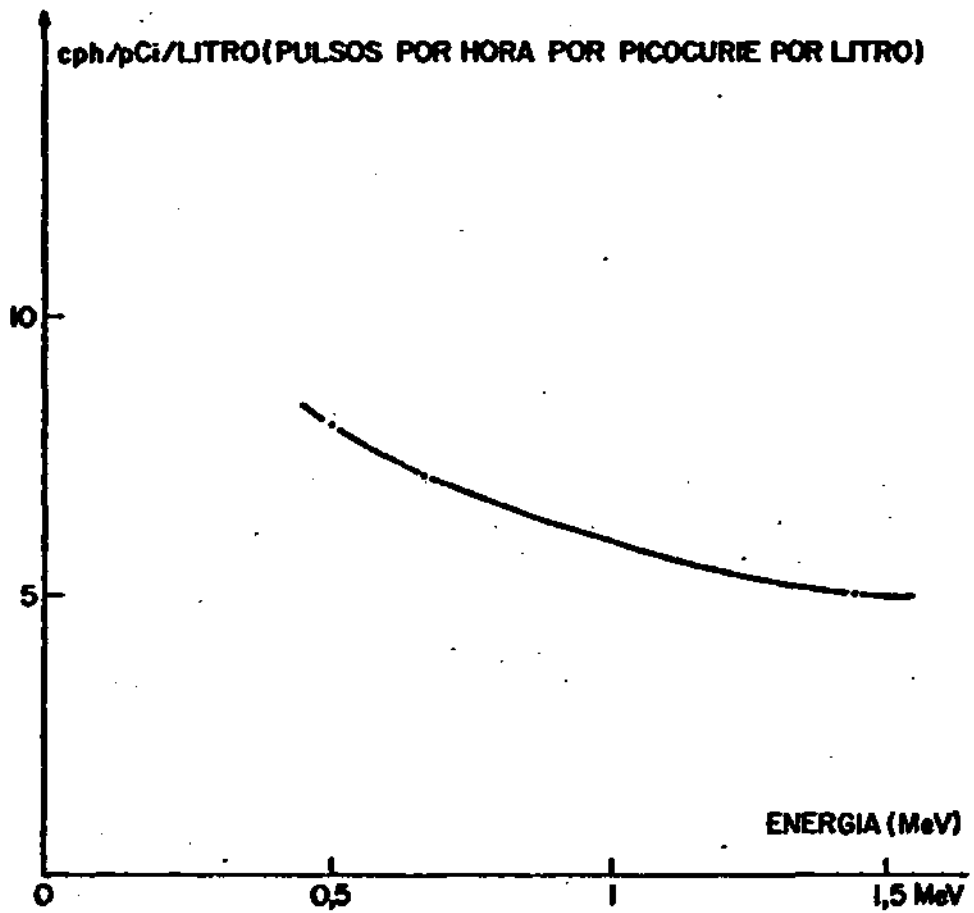


Figura 2

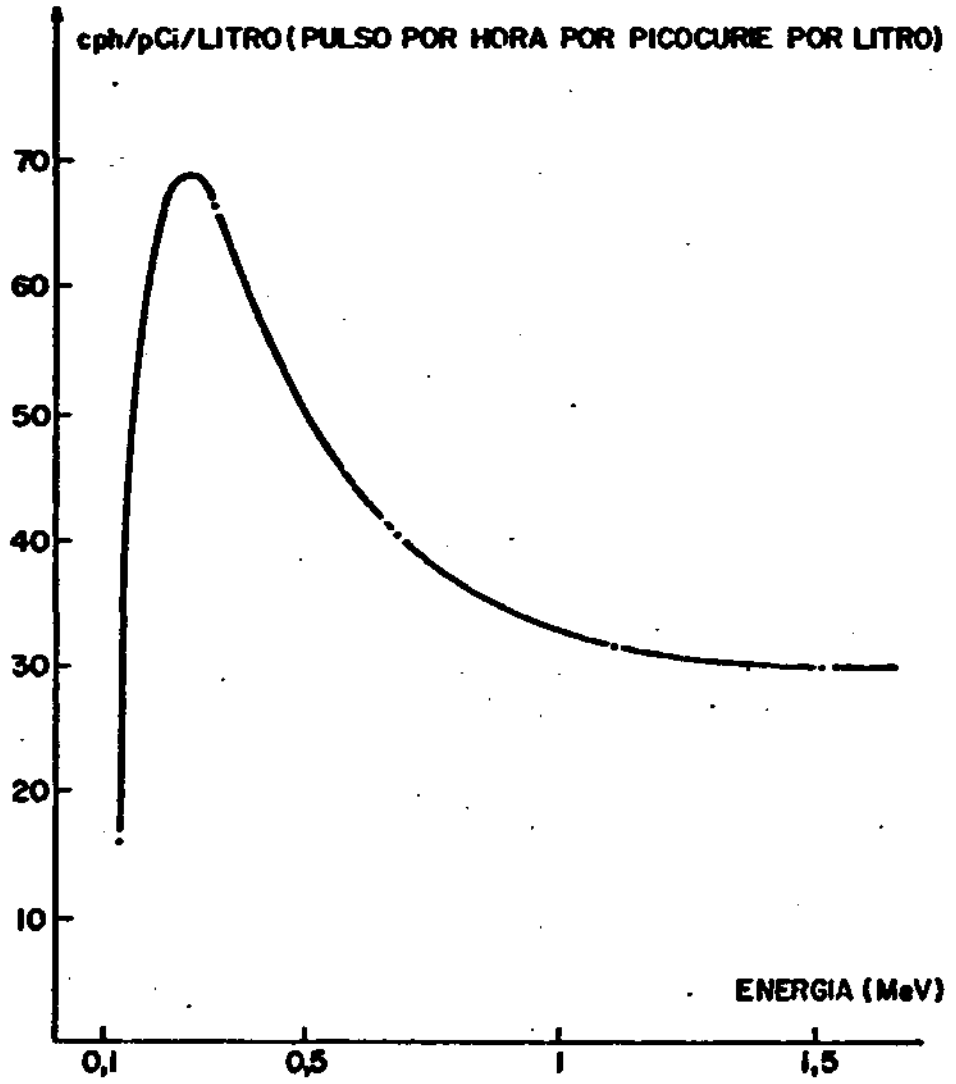


Figura 3