



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

**A INFLUÊNCIA DO PADRÃO DE CALIBRAÇÃO E DA
COMPOSIÇÃO DO RESÍDUO DE AMOSTRAS DE ÁGUA
NA EFICIÊNCIA DE UM CONTADOR PROPORCIONAL
PARA CONTAGEM ALFA E BETA TOTAL.
APLICAÇÃO NO CONTROLE RADIOLÓGICO DO
IPEN-CNEN/SP**

CECILIA MARTINS SANTOS

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Aplicações.**

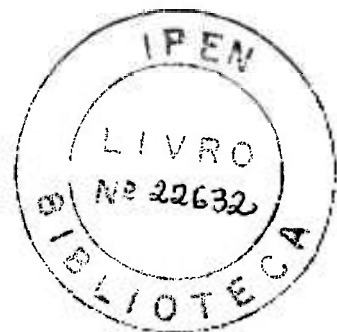
**Orientadora:
Dra. Brigitte Roxana Soreanu Pecequilo**

**São Paulo
2003**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**A INFLUÊNCIA DO PADRÃO DE CALIBRAÇÃO E DA COMPOSIÇÃO DO
RESÍDUO DE AMOSTRAS DE ÁGUA NA EFICIÊNCIA DE UM CONTADOR
PROPORCIONAL PARA CONTAGEM ALFA E BETA TOTAL. APLICAÇÃO NO
CONTROLE RADIOLÓGICO DO IPEN-CNEN/SP**

CECILIA MARTINS SANTOS



**Dissertação apresentada como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências na
Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações.**

Orientadora:
Dra. Brigitte Roxana Soreanu Pecequilo

SÃO PAULO
2003

Dedico esta dissertação, com imenso amor, à minha mãe Maria Francisca e aos meus avós Graça e Milton

AGRADECIMENTOS

À Dra. Brigitte Roxana Soreanu Pecequilo, minha orientadora, pelo grande auxílio, amizade e confiança em mim depositados durante a realização deste trabalho.

À Dra. Adir Janete Godoy dos Santos, M.Sc. Hélio Rissei Nagatomy e Dra. Joselene de Oliveira pela ajuda no desenvolvimento da parte química deste trabalho.

Ao M.Sc. Marcelo Francis Máduar pelo ajuda na parte matemática do trabalho.

A todos os profissionais e amigos do Laboratório de Radiometria Ambiental - LRA (IPEN) pelo auxílio, amizade e outras importantes sugestões.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

Ao Dr. Uriel e Lucia Helena do CEPAS-IG-USP pela realização das análises de ânions nas amostras de água.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

Ao Centro Tecnológico da Marinha (CTMSP) pela concessão do transporte Line Tour.

Aos meus amigos e familiares pelo auxílio, amizade e força nos momentos difíceis.

E acima de tudo, a Deus, pela inteligência dada por Ele aos seres humanos, o que permitiu a geração de inúmeros avanços tecnológicos para o progresso da humanidade.

A todos muito obrigada!

**A INFLUÊNCIA DO PADRÃO DE CALIBRAÇÃO E DA COMPOSIÇÃO DO
RESÍDUO DE AMOSTRAS DE ÁGUA NA EFICIÊNCIA DE CONTADORES
PROPORCIONAIS PARA CONTAGEM ALFA E BETA TOTAL. APLICAÇÃO
NO CONTROLE RADIOLÓGICO DO IPEN-CNEN/SP**

Cecilia Martins Santos

RESUMO

Neste trabalho foram determinadas as curvas de calibração em eficiência de contadores proporcionais de baixa radiação de fundo, de janela fina e fluxo gasoso para padrões de calibração com energias distintas, variando a espessura do absorvedor. Para a contagem alfa total utilizamos padrões de ^{241}Am e U-natural e para a contagem beta total $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs com espessuras de depósito no intervalo de zero a aproximadamente 18 mg/cm^2 . Esta espessura das amostras foi aumentada com solução salina preparada de modo a simular a composição química predeterminada da água subterrânea do IPEN. A eficiência de contagem para os emissores alfa variou de $0,273 \pm 0,038$ para massa zero até $0,015 \pm 0,002$ em plaqueta com 15 mg/cm^2 de resíduo para padrão de ^{241}Am . Para padrão de U-natural a eficiência variou de $0,322 \pm 0,030$ para massa zero até $0,023 \pm 0,003$ em plaqueta com $14,5\text{ mg/cm}^2$ de resíduo. A eficiência de contagem para os emissores beta variou de $0,430 \pm 0,036$ para massa zero até $0,247 \pm 0,020$ em plaqueta com 17 mg/cm^2 de resíduo para padrão de ^{137}Cs . Para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ a eficiência variou de $0,489 \pm 0,041$ para massa zero até $0,323 \pm 0,026$ em plaqueta com 18 mg/cm^2 de resíduo. Estes resultados evidenciam a variação da eficiência de contagem com a energia do emissor alfa ou beta e a espessura do resíduo na plaqueta de contagem. Isto mostra que os fatores padrão de calibração e espessura, além da composição química do resíduo, devem ser sempre levados em conta na determinação da atividade alfa e beta total em amostras de água.

THE INFLUENCE OF THE CALIBRATION STANDARD AND THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE WATER SAMPLES RESIDUE IN THE COUNTING EFFICIENCY OF PROPORTIONAL DETECTORS FOR GROSS ALPHA AND BETA COUNTING. APPLICATION ON THE RADIOLOGIC CONTROL OF THE IPEN-CNEN/SP

Cecilia Martins Santos

ABSTRACT

In this work the efficiency calibration curves of thin-window and low-background gas-flow proportional counters were determined for calibration standards with different energies and different absorber thicknesses. For the gross alpha counting we have used ^{241}Am and natural uranium standards and for the gross beta counting we have used $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ and ^{137}Cs standards in residue thicknesses ranging from 0 to approximately 18 mg/cm^2 . These sample thicknesses were increased with a previously determined salted solution prepared simulating the chemical composition of the underground water of IPEN. The counting efficiency for alpha emitters ranged from $0,273 \pm 0,038$ for a weightless residue to only $0,015 \pm 0,002$ in a planchet containing 15 mg/cm^2 of residue for ^{241}Am standard. For natural uranium standard the efficiency ranged from $0,322 \pm 0,030$ for a weightless residue to $0,023 \pm 0,003$ in a planchet containing 14,5 mg/cm^2 of residue. The counting efficiency for beta emitters ranged from $0,430 \pm 0,036$ for a weightless residue to $0,247 \pm 0,020$ in a planchet containing 17 mg/cm^2 of residue for ^{137}Cs standard. For $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ standard the efficiency ranged from $0,489 \pm 0,041$ for a weightless residue to $0,323 \pm 0,026$ in a planchet containing 18 mg/cm^2 of residue. Results make evident the counting efficiency variation with the alpha or beta emitters energies and the thickness of the water samples residue. So, the calibration standard, the thickness and the chemical composition of the residue must always be considered in the gross alpha and beta radioactivity determination in water samples.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Considerações gerais	9
2 OBJETIVO	11
3 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS	12
3.1 Interação das partículas carregadas com a matéria	12
3.1.1 Mecanismos de interação	12
3.1.2 Perda de energia	13
3.1.3 Alcance e comprimento de caminho	14
3.2 Partículas alfa	15
3.3 Partículas beta	16
3.4 Monitoração ambiental	18
3.5 A água subterrânea	19
3.5.1 Composição química das águas subterrâneas	19
3.6 Determinação alfa e beta total em água e problemas associados	20
3.6.1 Auto-absorção	21
3.6.2 Eficiência	21
3.6.2.1 Padrões alfa recomendados e problemas associados	22
3.6.2.2 Padrões beta recomendados e problemas associados	24
3.6.3 Composição química dos resíduos sólidos das amostras	24
4 MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 Escolha dos padrões de calibração	26
4.2 Cálculos de eficiência e incertezas associadas	26
4.3 Curvas de calibração em eficiência	28
4.3.1 Escolha dos pontos para a curva de calibração	28
4.4 Preparo dos padrões radioativos	31
4.4.1 Preparo da solução estoque padronizada de U-natural	31

4.5 Escolha das plaquetas	33
4.5.1 Descontaminação das plaquetas	33
4.6 Equipamentos	34
4.7 Determinação da tensão de operação do sistema LB 770-2/5	37
4.8 Medida de radiação de fundo	37
4.9 Estabelecimento da metodologia de preparo das amostras	37
4.10 Preparação dos padrões com espessura zero	38
4.11 Medida dos padrões com espessura zero	39
4.12 Determinação da composição química da água subterrânea do IPEN	39
4.12.1 Locais de amostragem de água subterrânea do PMA-IPEN	39
4.12.2 Procedimento de coleta das amostras de água subterrânea	40
4.12.3 Determinação da composição química das amostras coletadas	40
4.12.3.1 Metodologia de análise para os ânions Cl^- , F^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , Br^- , SO_4^{2-} e NO_3^-	40
4.12.3.2 Metodologia para análise dos ânions CO_3^{2-} e HCO_3^-	41
4.12.3.3 Metodologia para análise dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ e do Fe	41
4.12.3.4 Metodologia para determinação de sólidos totais dissolvidos	42
4.13 Preparo da solução padrão salina	42
4.14 Preparação dos padrões com diferentes espessuras	43
4.15 Medida dos padrões com diferentes espessuras	44
5 RESULTADOS	45
5.1 Radiação de fundo do sistema de contagem	45
5.2 Composição química da água subterrânea do IPEN	45
5.3 Eficiências de contagem alfa total	50
5.4 Eficiências de contagem beta total	62
5.5 Teste de proficiência com alfa e beta total em água do PNI-IRD	84
6. DISCUSSÃO	87
7. CONCLUSÃO	89
8. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	90
APÊNDICE A - Contagens alfa médias registradas no sistema de contagem LB 770-2 para padrão de ^{241}Am (em cpm).....	91
APÊNDICE B - Contagens alfa médias registradas no sistema de contagem LB 770-2/5 para padrão de ^{241}Am (em cpm).....	92

APÊNDICE C - Contagens alfa médias registradas no sistema de contagem LB 770-2/5 para padrão de U-natural (em cpm)	93
APÊNDICE D - Contagens beta médias registradas no sistema de contagem LB 770-2 para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (em cpm).....	94
APÊNDICE E - Contagens beta médias registradas no sistema de contagem LB 770-2/5 para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (em cpm).....	95
APÊNDICE F - Contagens beta médias registradas no sistema de contagem LB 770-2 para padrão de ^{137}Cs (em cpm)	96
APÊNDICE G - Contagens beta médias registradas no sistema de contagem LB 770-2/5 para padrão de ^{137}Cs (em cpm).....	97
APÊNDICE H - Eficiências médias para padrão de ^{241}Am em todos os detectores e em várias espessuras para o sistema de contagem LB 770-2	98
APÊNDICE I - Eficiências médias para padrão de ^{241}Am em todos os detectores e em várias espessuras para o sistema de contagem LB 770-2/5	99
APÊNDICE J - Eficiências médias para padrão de U-natural em todos os detectores e em várias espessuras para o sistema de contagem LB 770-2/5	100
APÊNDICE L - Eficiências médias para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ em todos os detectores e em várias espessuras para o sistema de contagem LB 770-2	101
APÊNDICE M - Eficiências médias para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ em todos os detectores e em várias espessuras para o sistema de contagem LB 770-2/5	102
APÊNDICE N - Eficiências médias para padrão de ^{137}Cs em todos os detectores e em várias espessuras para o sistema de contagem LB 770-2	103
APÊNDICE O - Eficiências médias para padrão de ^{137}Cs em todos os detectores e em várias espessuras para o sistema de contagem LB 770-2/5	104
ANEXO A - Série de decaimento do ^{238}U	105
ANEXO B - Série de decaimento do ^{232}Th	105
ANEXO C - Série de decaimento do ^{235}U	105
ANEXO D - Localização dos pontos de coleta do PMA-IPEN	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

A radioatividade ambiental provém tanto de fontes naturais como de atividades humanas (UNSCEAR, 1988, 1993). A radioatividade natural origina-se de fontes extraterrestres (radiação cósmica) e de elementos radioativos na crosta terrestre. Todos os elementos com número atômico maior que 80 têm isótopos radioativos e todos os isótopos dos elementos mais pesados que 83 são radioativos. Os radionuclídeos naturais, que são responsáveis pela maior parte da exposição à radiação para o público, podem ser divididos em: aqueles que não se originam de outros radionuclídeos, tais como ^{40}K , ^3H , ^7Be e ^{14}C , e os membros das três séries radioativas, do ^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U (Eisenbud, 1987; UNSCEAR, 1988, 1993) mostradas nos ANEXOS A, B e C (Pfennig *et al.*, 1995). As atividades humanas que produzem isótopos radioativos incluem operações relacionadas com o ciclo do combustível nuclear, desde a mineração até o reprocessamento; uso de radioisótopos na medicina, na indústria; em pesquisas e outros campos e “fall-out” causado por testes com armas nucleares. Estes usos, além da produção de radionuclídeos artificiais, causam também um aumento da concentração ambiental dos radionuclídeos naturais (Eisenbud, 1987; UNSCEAR, 1993).

A atividade normal de uma instalação nuclear ou radioativa envolve a liberação de efluentes radioativos líquidos e gasosos para o meio ambiente. Portanto, sempre deve ser estabelecido um controle radiológico que envolve o controle de efluentes radioativos (preventivo) e um programa de monitoração ambiental (confirmatório) que deve ser capaz de alertar adequadamente para condições ambientais impróprias para que possam ser tomadas atitudes corretivas (IAEA – SS - 16, 1975). Na maioria das vezes, tanto no controle preventivo quanto no confirmatório, deve ser determinada a atividade alfa e beta total da água e, se os limites estabelecidos forem ultrapassados, deve ser realizada análise para radionuclídeos específicos (Budnitz, 1983). Assim, a medida da atividade alfa e beta total é de fundamental importância dentro de um programa de monitoração ambiental e, portanto, requer boas técnicas científicas (Eaton, 1995).

Um dos métodos mais utilizados para determinação da atividade alfa e beta total em água, por ser barato e rápido, é a evaporação da amostra em plaqueta de aço inoxidável ou alumínio e posterior contagem em contador proporcional de janela fina e fluxo gasoso e baixa radiação de fundo (Budnitz, 1983; Eaton, 1995).

No entanto, as taxas de contagem obtidas para uma amostra são afetadas por vários fatores, incluindo a composição química e a espessura dos resíduos sólidos (Janzer, 1980).

A conversão das taxas de contagem registradas no contador em atividade equivalente total é feita determinando-se previamente a eficiência do contador utilizando padrões radioativos. O valor desta eficiência depende das energias alfa e beta dos padrões de calibração (Janzer, 1980). Foi observado por Janzer (1980) que, para que o resultado final esteja realmente correto, este padrão de calibração deve ter a composição quimicamente semelhante à das amostras a serem medidas posteriormente. Portanto, o padrão de calibração e a composição química de amostras de água influenciam na determinação da eficiência para detectores proporcionais utilizados na contagem alfa e beta total.

Uma aplicação direta do estudo da influência do padrão de calibração e da composição química do resíduo sólido depois da evaporação das águas na eficiência do contador proporcional para contagem alfa e beta total é na determinação da atividade alfa e beta total das águas coletadas no controle radiológico ambiental do IPEN, realizado pelo Departamento de Radiometria Ambiental do IPEN. A água coletada, após pré-filtração e concentração, é evaporada em plaquetas de aço inoxidável e, muitas vezes, os resíduos sólidos que sobram dificultam a medida, por causa da auto-absorção (absorção das partículas alfa e beta nos resíduos das amostras). Então, se estimarmos de antemão a composição química da água coletada, poderemos utilizar o padrão correto de calibração em eficiência para o cálculo da atividade alfa e beta total, já que a solução padrão deve ter a composição química de sólidos similar à daquela existente nas amostras a serem medidas posteriormente (Eaton, 1995).

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi estudar a influência do padrão de calibração e da composição do resíduo de amostras de água na eficiência de um contador proporcional de baixa radiação de fundo, de janela fina e de fluxo gasoso e como isto pode ser aplicado no Programa de Monitoração Ambiental do IPEN.

3 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

3.1 Interação das partículas carregadas com a matéria

Uma partícula carregada interage com o material absorvedor, principalmente através de forças coulombianas com os elétrons e os núcleos dos átomos do absorvedor, sendo que o tipo de interação depende da massa da partícula incidente. As partículas carregadas dividem-se em leves (e^- , e^+ , β^- e β^+) e pesadas (α , p, d, t) dependendo da massa delas ser igual ou maior do que a massa do elétron. Como resultado destas interações, a partícula carregada perde energia continuamente e finalmente pára depois de atravessar uma distância finita, denominada alcance. O alcance depende do tipo e energia da partícula incidente e da densidade e peso atômico do material absorvedor. A probabilidade de uma partícula carregada mover-se através de um material sem que ocorra nenhuma interação é praticamente zero. Este fato é muito importante na operação de detectores de partículas carregadas (Mafra, 1973).

3.1.1 Mecanismos de interação

Os mecanismos mais importantes de interação com a matéria pelos quais partículas carregadas perdem energia são (Marmier e Sheldon, 1970):

- colisões elásticas com elétrons atômicos. A energia da partícula incidente é menor que 100 eV. A interação ocorre com o átomo como um todo, pois a energia transferida pela partícula é menor que o potencial de ionização dos átomos;

- colisões inelásticas com elétrons atômicos. Em cada colisão, um ou mais elétrons sofrem transição para um estado não ligado (ionização) ou para um estado excitado (excitação). Este é o mecanismo dominante na diminuição de energia da partícula incidente;

- colisões elásticas com núcleos atômicos. Nesta interação ocorre deflexão da partícula incidente sem ionização ou excitação dos elétrons atômicos e é mais freqüente para partículas carregadas leves.

- colisões inelásticas com núcleos atômicos. Esta interação ocorre com partículas carregadas leves de alta energia causando sua deflexão e a perda de energia

cinética por radiação, produzindo raios-X de desaceleração de espectro contínuo (bremsstrahlung).

3.1.2 Perda de energia

A perda de energia por unidade de comprimento de caminho percorrido para partículas carregadas em um dado absorvedor é dada pela equação geral de Livingstone e Bethe (Evans, 1982):

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m v^2} N B \quad (1)$$

onde E é a energia cinética da partícula incidente e x é o comprimento de caminho percorrido por esta partícula. O sinal negativo da expressão indica que a partícula perde energia à medida que penetra no absorvedor. Nesta expressão, v e z são a velocidade e a carga da partícula carregada, e e m são a carga e a massa do elétron, respectivamente e N é o número de átomos por cm^3 do absorvedor e, com correções relativísticas,

$$B = Z \left[\ln \frac{2m v^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad (2)$$

é o chamado número de freamento, onde Z é o número atômico do absorvedor, $\beta = v/c$, sendo v é a velocidade da partícula carregada e c é a velocidade da luz no vácuo e I o potencial de ionização atômico (em eV) que tem em geral o valor (Evans, 1982):

$$I = 11,5 Z$$

A perda de energia para partículas beta por meio de colisões inelásticas com os elétrons atômicos do absorvedor segue a mesma equação de Livingstone e Bethe; todavia, o termo B , que é relacionado a um efeito atômico, difere daquele para as partículas alfa. A taxa de perda de energia devido a colisões inelásticas com elétrons atômicos na região relativística é dada por (Marmier e Sheldon, 1970):

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_e = \frac{4\pi e^4}{m v^2} N B \quad (3)$$

e

$$B = Z \left[\ln \left(\frac{2m_e v^2}{I} \right) + \ln(\gamma - 1) + \frac{1}{2} \ln(\gamma + 1) - \left(3 + \frac{2}{\gamma} - \frac{1}{\gamma^2} \right) \ln \left(2^{\frac{1}{2}} \right) + \frac{1}{16} - \frac{1}{8\gamma} + \frac{9}{16\gamma} 2 \right] \quad (4)$$

onde, no termo B, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ e $\beta = v/c$.

No entanto, para partículas carregadas leves, devemos considerar ainda a perda de energia por radiação:

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_r \approx Z^2 EN \quad (5)$$

onde Z e N são o número atômico e a densidade atômica (número de átomos por cm^3), respectivamente, do absorvedor e E é a energia da partícula incidente.

Deve ser notado que a perda de energia (Marmier e Sheldon, 1970):

- É independente da massa da partícula incidente;
- É proporcional a z^2 da partícula incidente;
- É inversamente proporcional à velocidade v da partícula;
- É proporcional a densidade do material absorvedor (N).

3.1.3 Alcance e comprimento de caminho

As partículas carregadas perdem energia durante sua trajetória ($-dE/dx$). Portanto, a partícula incidente em um absorvedor possui determinado alcance. Este alcance de uma partícula em determinado material (R) é medido pela trajetória retilínea traçada a partir do início de sua movimentação no absorvedor até o ponto aonde não mais existe nenhum movimento desta partícula incidente. A distância total atravessada por uma partícula em determinado absorvedor, incluindo suas deflexões, é chamada comprimento de caminho (S). Portanto, o alcance é sempre menor ou igual ao comprimento de caminho da partícula incidente (Mafra, 1973). Na FIG. 1 é mostrado o alcance (R) e o comprimento de caminho (S) de partículas carregadas em um material absorvedor.

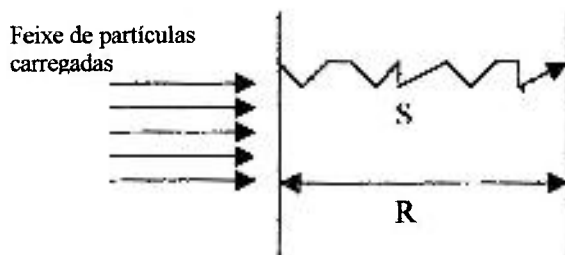
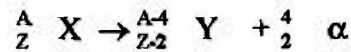


FIGURA 1 – Comprimento de caminho (S) e alcance (R) de um feixe de partículas carregadas incidindo em determinado material absorvedor.

3.2 Partículas alfa

As partículas alfa são partículas pesadas ($m = 4$ u.m.a.) que apresentam duas cargas positivas e quatro unidades de massa atômica (Price, 1964). A desintegração alfa pode ser esquematizada da seguinte maneira:



Onde ${}^A_Z X$ é o radionuclídeo pai emissor alfa e ${}^{A-4}_{Z-2} Y$ é o átomo filho produzido na desintegração alfa.

Estas partículas são emitidas por núcleos radioativos e estiveram entre os primeiros tipos de radiações detectadas. As partículas alfa são monoenergéticas e a energia com a qual são emitidas varia numa faixa de 2 MeV a cerca de 10 MeV (Price, 1964).

Quando partículas alfa passam através de absorvedores, elas perdem energia por excitação e ionização dos átomos absorvedores. O mecanismo responsável por esta perda de energia ($-dE/dx$) são as colisões inelásticas com os elétrons atômicos do material absorvedor. Pela equação (1) vemos que a perda de energia dE/dx depende fortemente da carga da partícula. Como a carga da partícula alfa é 2, a perda de energia por unidade de comprimento de caminho é grande, resultando num poder de penetração pequeno. Assim, as partículas alfa perdem toda sua energia em poucos milímetros de material sólido ou em alguns centímetros de ar. As deflexões em suas trajetórias são negligenciáveis devido à massa da partícula alfa em relação à dos elétrons do meio absorvedor (Price, 1964). Essas trajetórias são portanto retilíneas e seu comprimento, que depende da energia da partícula e do tipo de absorvedor, é praticamente igual ao alcance da partícula (Tsoulfanidis, 1995). Esse alcance (R) é relacionado com a energia das partículas. Existem equações empíricas que permitem calcular o alcance de partículas alfa em diversos materiais absorvedores (Price, 1964). O alcance de partículas alfa no ar pode ser calculado por meio da seguinte expressão (Mafra, 1973):

$$R = (0,005 E + 0,285) E^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

onde R é o alcance da partícula em cm e E é a energia da partícula em MeV.

Para outros absorvedores que não o ar calculamos o alcance da partícula por meio da Regra de Bragg-Kleeman (Marmier e Sheldon, 1970):

$$R = 3,2 \times 10^{-4} \frac{\sqrt{A}}{\rho} R_{ar} \text{ (cm)} \quad (7)$$

onde:

R é o alcance da partícula em cm;

R_{ar} é o alcance da partícula no ar;

A é o peso atômico da substância em questão;

ρ é a densidade do absorvedor em g/cm^3 e

$3,2 \times 10^{-4}$ é o valor numérico calculado para a composição do ar considerando-se seu peso

atômico e sua densidade por meio da fórmula $\frac{\rho_{ar}}{\sqrt{A_r}}$ onde:

$$\rho_{ar} = 1,293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3, \text{ e}$$

A_r = peso atômico do ar

$$\sqrt{A_r} = 3,82$$

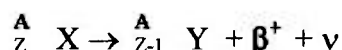
Gráficos e tabelas com valores para os alcances de diversos emissores alfa também são utilizados (Kaplan, 1956; Price, 1964; Marmier e Sheldon, 1970; Evans, 1982; Budnitz, 1983; Knoll, 1989; ICRU, 1993).

3.3 Partículas beta

As partículas beta são elétrons emitidos do núcleo do átomo em um decaimento radioativo. Tem massa de repouso 0,000549 u.m.a. e carga $1 e^-$, possuindo sinal positivo ou negativo (Price, 1964).

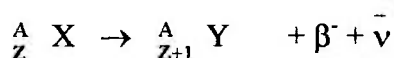
As partículas beta, diferentemente das partículas alfa, são emitidas com um espectro contínuo de energia, variando de zero até um valor máximo, característico do núcleo pai. Esta energia máxima pode alcançar até 3,5 MeV, para os núclídeos emissores beta comuns (Kaplan, 1956).

A desintegração beta positiva (β^+) pode ser assim esquematizada:



Onde ${}^A_Z X$ é o radionuclídeo pai emissor beta; ${}^A_{Z-1} Y$ é o nuclídeo produto da desintegração beta e ν é o neutrino produzido.

A desintegração beta negativa (β^-) pode ser assim esquematizada:



onde ${}^A_Z X$ é o radionuclídeo pai emissor beta; ${}^A_{Z+1} Y$ é o nuclídeo produto da desintegração beta e $\bar{\nu}$ é o anti-neutrino produzido. O anti-neutrino possui as mesmas características do neutrino, mas spin oposto.

Uma partícula beta pode perder energia por colisões inelásticas com os elétrons atômicos do absorvedor ($dE/dx_{\text{colisão}}$). Para partículas beta de alta energia, um mecanismo adicional para perda de energia deve ser levado em conta. Quando uma partícula beta passa através do campo elétrico de um núcleo, ela perde energia por radiação ($dE/dx_{\text{radiação}}$), produzindo raios-X de desaceleração ou "bremsstrahlung" (subitem 3.1.1).

A passagem das partículas beta através da matéria é diferente do caso de partículas alfa. As diferenças são causadas pela menor massa e menor carga das partículas beta. Assim, estas partículas apresentam - dE/dx menor e, portanto, maior alcance do que partículas alfa (equação 3). Para deter partículas beta com energia da ordem de alguns MeV serão necessárias espessuras da ordem de mm de material sólido ou metros de ar (Kaplan, 1956). As deflexões apresentadas em sua trajetória são responsáveis pela diferença entre seu alcance e comprimento de caminho ($R < S$). Além disso, existe uma grande diferença entre seu alcance real (extrapolado, definido experimentalmente) e o teoricamente determinado (médio), diferença esta denominada dispersão. Isto é causado porque as partículas beta podem perder energia por radiação além da perda de energia por ionização. Como as partículas beta possuem massa pequena em relação aos núcleos atômicos, em cada interação podem perder grande fração de energia e apresentar grandes deflexões.

Para o cálculo do alcance médio de partículas beta são utilizadas várias equações empíricas válidas somente em determinado intervalo de energia (Marmier e Sheldon, 1970). Algumas delas são apresentadas a seguir:

$$R \text{ (mg/cm}^2\text{)} = 407 E^{1,38} \quad (0,15 < E < 0,8 \text{ MeV}) \quad (8)$$

$$R \text{ (mg/cm}^2\text{)} = 530 E - 106 \quad (1 < E < 20 \text{ MeV}) \quad (9)$$

O alcance das partículas beta expresso em massa por unidade de área (mg/cm^2) independe do material absorvedor (Evans, 1982). Diversas tabelas e gráficos alcance/energia também são utilizados para partículas beta (Kaplan, 1956; Price, 1964; Marmier e Sheldon, 1970; Pages, 1972; Evans, 1982; Budnitz, 1983; Knoll, 1989).

3.4 Monitoração ambiental

No IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), há um reator nuclear e diversas instalações radioativas como o ciclotron, produção de radiofármacos e outros laboratórios de pesquisa aonde são produzidos diversos efluentes radioativos. Portanto, foi estabelecido um programa de monitoração ambiental e de controle de efluentes a fim de controlar a descarga de material radioativo para o meio ambiente resultante do funcionamento das instalações nucleares e radioativas desta instituição (IAEA – SS - 46, 1978).

A atividade normal de uma instalação nuclear, assim como qualquer outra atividade humana, apresenta um certo risco. A operação da instalação envolve a liberação de efluentes líquidos radioativos, sendo que uma completa remoção dos radionuclídeos contidos nestes efluentes, antes de serem lançados para o meio ambiente, é praticamente impossível (IAEA – SS - 41, 1975).

Cabe à equipe de proteção radiológica da instalação estabelecer um programa de controle de efluentes (IAEA – SS - 46, 1978), para determinar a quantidade de material radioativo (termo-fonte) liberada para o meio ambiente, assim como detectar, imediatamente, uma liberação não planejada, acima dos limites operacionais pré-estabelecidos. O controle de efluentes tem, portanto, um caráter preventivo, já que, conhecendo-se o termo-fonte e as características ambientais do meio receptor é possível avaliar a dose de radiação recebida pelos indivíduos do público, e, em particular, pelo grupo crítico (grupo de indivíduos que recebe a maior dose decorrente da liberação de materiais radioativos no meio ambiente), antes que o material radioativo seja lançado no meio ambiente.

A fim de verificar se estas liberações estão sendo feitas de forma controlada, e que, portanto, resultam em um grau de risco aceitável para a população em geral, deve-se realizar o programa de monitoração ambiental (IAEA – SS - 16, 1975), medindo-se “in-loco” o nível de radioatividade ao qual os membros do público estão expostos. Este controle tem, portanto, um caráter confirmatório e irá avaliar se as suposições feitas no cálculo da dose a partir do termo-fonte estão corretas.

Os programas de controle ambiental das águas devem sempre avaliar realisticamente o grau da contaminação radioativa. No caso da água potável, devem ser observadas as normas vigentes no país que preconizam até 0,1 Bq/L para alfa total e até 1,0 Bq/L para beta total (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2000). O órgão ambiental americano (USEPA, 1991) estabelece os mesmos limites para alfa e beta total. Além deste limite,

devem ser observadas as vias de transferência dos radionuclídeos e o grupo crítico da população (Jacomino e Máduar, 1992).

Os programas de monitoração devem, portanto, ser capazes de alertar adequadamente para condições ambientais impróprias, tal que possam ser tomadas atitudes corretivas, e, ainda, assegurar que as condições ambientais são realmente seguras (IAEA – SS - 16, 1975). Para isto, é preciso determinar os tipos e as quantidades dos radionuclídeos naturalmente presentes e medir o quanto a radiação de fundo é ultrapassada. Na maioria das vezes, primeiramente deve ser determinada a atividade alfa e beta total da água e, se os limites estabelecidos forem ultrapassados, deve ser realizada análise para radionuclídeos específicos (Budnitz, 1983). Assim, a medida da atividade alfa e beta total é de fundamental importância e requer boas técnicas científicas (Eaton, 1995).

Num Programa de Monitoração Ambiental, um dos indicadores é a água subterrânea (IAEA – SS - 41, 1975; Jacomino e Máduar, 1992). No Programa de Monitoração Ambiental do IPEN, o controle é realizado em 6 poços de água subterrânea, com coleta bimensal, num total de 36 amostras anuais.

3.5 A água subterrânea

A água subterrânea constitui um importante recurso que fornece água para o uso doméstico (inclusive água potável), para a indústria e para a agricultura (Bear, 1992). Em alguns países, metade da água potável provém da água subterrânea (Odum, 1988).

A contaminação de aquíferos (reservatórios de água subterrânea) é um fenômeno preocupante, muito mais do que a das águas superficiais, visto que estas rapidamente se renovam após cessar o lançamento de efluentes. No caso de lençóis subterrâneos, pode ser tão demorada e difícil a recuperação de sua potabilidade que muitas vezes se dá o aquífero como perdido (Porto, 1991).

Esta contaminação pode se dar a partir de infiltração de fossas sépticas, disposição de resíduos sólidos, vazamentos em tanques de armazenamento de produtos tóxicos, contaminação por agrotóxicos, por resíduos nucleares, etc (Porto, 1991). Portanto, a monitoração da água subterrânea nos mais diferentes locais é de grande importância.

3.5.1. Composição química das águas subterrâneas

A água subterrânea é abastecida pelo sistema das nuvens, por meio do ciclo hidrológico existente na natureza (Odum, 1988).

No entanto, toda a água que provém das nuvens é uma água praticamente pura. A aquisição da composição química de uma água vem da dissolução dos minerais contidos nas rochas e solos que a água atravessa (Feitosa, 1997). Essa composição química variada surge de acordo com as condições bio-climáticas que ditam diferentes graus de agressividade às águas (Boletim IG-USP nº 5, 1993).

Portanto, a composição química das águas dos aquíferos depende da natureza dos terrenos (Boletim IG-USP nº5, 1993; Feitosa, 1997).

Os mais importantes sais solúveis que ocorrem em quantidades relativamente grandes nas rochas são os carbonatos, os sulfatos e os cloretos. Portanto os íons mais importantes encontrados nas águas são: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^- (Yoshinaga, 1990; Boletim IG-USP nº5, 1993; Feitosa, 1997).

3.6 Determinação alfa e beta total em água e problemas associados

Um dos métodos mais utilizados para a determinação da atividade alfa e beta total em água, por ser barato e rápido, é a evaporação da amostra em plaqueta de aço inoxidável ou alumínio e posterior contagem em contador proporcional de janela fina e fluxo gasoso e baixa radiação de fundo (Budnitz, 1983; Eaton, 1995).

Contudo, há alguns aspectos que devem ser considerados. As partículas alfa e beta são partículas carregadas e o principal meio de interação com a matéria (subitens 3.1.1 e 3.1.2) é a perda de energia por ionização e excitação em colisões inelásticas com os elétrons atômicos, sendo que, no caso das partículas beta, devemos considerar também as perdas de energia por radiação (“bremsstrahlung”) em colisões inelásticas com os núcleos do meio absorvedor (Marmier e Sheldon, 1970; Evans, 1982). As partículas carregadas perdem energia (dE/dx , perda de energia por unidade de comprimento de trajetória) à medida que penetram no absorvedor, sendo dE/dx inversamente proporcional à energia da partícula incidente (Knoll, 1989).

Ainda, dE/dx é diretamente proporcional ao quadrado da carga da partícula incidente (equação 1), o que significa que as partículas alfa ionizam mais que os betas, isto é, o alcance delas é menor ($R_\alpha < R_\beta$).

Isto mostra que a auto-absorção deve ser sempre levada em consideração durante o registro da taxa de contagem de partículas carregadas em amostras radioativas.

3.6.1 Auto-absorção

A perda de energia por unidade de comprimento de caminho ($-dE/dx$) das partículas alfa e beta durante as suas trajetórias (equação 1) pode acontecer dentro da própria espessura da amostra, fenômeno chamado de auto-absorção. Dependendo da espessura da amostra, a auto-absorção pode ser significativa. A auto-absorção é sempre muito maior para partículas carregadas pesadas do que para partículas leves porque o dE/dx das partículas alfa é maior.

Portanto, as taxas de contagem obtidas para uma amostra são afetadas por vários fatores, como a composição química, a espessura dos resíduos sólidos e a energia das partículas incidentes (Janzer, 1980).

As amostras são depositadas sobre suportes em finos depósitos. Mas não importa o quão fino, o depósito tem uma espessura finita e pode causar absorção de algumas partículas emitidas pela fonte. Consideremos uma fonte de espessura t mostrada na FIG. 2. A partícula 1 atravessa o depósito da fonte e entra no detector. A partícula 2 é absorvida dentro da fonte de modo que ela não será contada. Portanto, a auto-absorção na fonte irá produzir um decréscimo na taxa de contagem no detector.

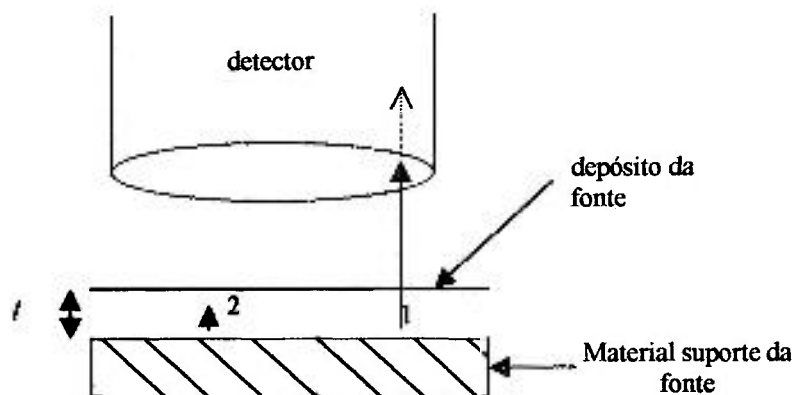


FIGURA 2 – Absorção das partículas na própria fonte (auto-absorção).

A auto-absorção na fonte, em adição à alteração do número de partículas que deixam a fonte, pode também diminuir a energia das partículas que saem dela. A partícula 1 na FIG. 2 consegue deixar o depósito mas ela perde energia enquanto caminha na fonte. Esta perda de energia é importante quando medida a energia da partícula.

3.6.2 Eficiência

É impossível afirmar que toda partícula será registrada quando ela entra no volume ativo do detector. Isto pode depender do tipo e da energia da partícula e do tipo e

tamanho do detector. A partícula pode produzir um sinal tão pequeno que torna impossível seu registro com a eletrônica disponível. A partícula incidente pode não conseguir entrar no volume ativo do detector dependendo da espessura e densidade da janela do detector.

A eficiência válida na geometria de contagem considerada é a eficiência absoluta do sistema de detecção (Knoll, 1989):

$$\varepsilon_{\text{absoluta}} = \frac{\text{número de pulsos registrados}}{\text{número de partículas emitidas pela fonte}} \quad (10)$$

A eficiência absoluta do detector pode ser determinada a partir da seguinte expressão:

$$EF = \frac{\text{Contagem}}{\text{Atividade Absoluta}} \quad (11)$$

lembrando que a radiação de fundo do sistema ("background") deve ser subtraída da contagem registrada no detector. A atividade absoluta é a atividade conhecida da fonte medida no detector.

A conversão das taxas de contagem registradas no contador em atividade equivalente total é feita determinando-se previamente a eficiência do contador utilizando padrões radioativos. Padrões radioativos são fontes radioativas com atividade conhecida. O valor desta eficiência depende das energias das partículas alfa e beta dos padrões de calibração (Janzer, 1980) e, portanto, o resultado deve sempre fazer referência ao padrão utilizado.

3.6.2.1 Padrões alfa recomendados e problemas associados

No caso da atividade alfa, os padrões recomendados no livro *Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Eaton, 1995) para calibrar um detector proporcional são o ^{241}Am e o U-natural. Na TAB. 1 são mostrados os dois padrões com suas respectivas energias e meias-vidas.

TABELA 1 - Radioisótopos recomendados como padrões de calibração para alfa total com suas respectivas energias e meias-vidas (Browne e Firestone, 1986).

Radioisótopo	energia (MeV)	intensidade (%)	T _{1/2} (anos)	
²⁴¹ Am	5,486	86	432,2	
	5,443	12,7		
	5,389	1,3		
U-natural (100%)	²³⁴ U	4,734	2,455 x 10 ⁵	
	(0,005% do U-natural)	4,776		72,5
	²³⁵ U	4,598	7,038 x 10 ⁸	
	(0,72% do U-natural)	4,557		4,6
		4,397		3,7
		4,367		57
		4,392		18
		4,358		54
		4,358	17	
	²³⁸ U	4,196	77	4,468 x 10 ⁹
(99,275% do U-natural)	4,149	23		

No entanto, se utilizarmos o padrão de ²⁴¹Am, cujas energias alfa são mais altas, a eficiência obtida será maior do que para um padrão de urânio natural de mesma atividade que possui energias mais baixas. Isto ocorre porque as partículas alfa do urânio natural, devido a sua menor energia, possuem menor alcance (equações 6 e 7), e, portanto, podem não chegar no volume ativo do detector e depositar sua energia. Isto resulta em contagens menores, e, portanto, eficiências menores para o padrão de urânio natural.

Na determinação da atividade de uma amostra, a contagem registrada no detector é dividida pela eficiência obtida para determinado radionuclídeo padrão. Então, se usarmos um padrão de ²⁴¹Am e a amostra contiver urânio natural, o resultado reportado para a atividade alfa total pode ser menor do que na realidade, devido a maior eficiência do detector para as energias das partículas alfa emitidas pelo ²⁴¹Am. Em águas empregadas no consumo humano isto implicaria em um desvio no padrão de potabilidade para alfa total que poderia comprometer a saúde da população que viesse a consumir desta água. Neste caso, se os limites estabelecidos para alfa e beta total forem ultrapassados devemos fazer uma análise para determinar o radionuclídeo específico, pois a contagem alfa e beta total é uma medida quantitativa global e não expressa necessariamente a atividade em relação a um radionuclídeo específico. Mas ao realizarmos primeiramente análises específicas antes da determinação da atividade alfa e beta total podemos estar errando, pois estas podem ser desnecessárias (Janzer, 1980) além de serem mais custosas.

3.6.2.2 Padrões beta recomendados e problemas associados

No caso da atividade beta, os padrões recomendados no livro *Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Eaton, 1995) para calibrar um detector proporcional são o ^{137}Cs e o $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. No entanto, dependendo do padrão de calibração, as eficiências podem variar (Janzer, 1980) conforme suas energias. Na TAB. 2. são mostrados os dois padrões com suas respectivas energias e meias-vidas.

TABELA 2 - Radioisótopos recomendados como padrões de calibração para beta total com suas respectivas energias e meias-vidas (Browne e Firestone, 1986).

Radioisótopo	Energia (MeV)	intensidade (%)	$T_{1/2}$
^{137}Cs	0,514 - β_{max}	94	30,07 anos
	1,176 - β_{max}	6	
	0,662 - γ	85	
^{90}Sr	0,546 - β_{max}	100	28,78 anos
^{90}Y	2,284 - β_{max}	100	64,1 horas

Se utilizarmos o padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, cujas energias beta são mais altas, a eficiência obtida será maior do que para um padrão de ^{137}Cs de mesma atividade que possui energias mais baixas. Isto ocorre porque as partículas beta do ^{137}Cs , devido a sua menor energia, possuem menor alcance (equação 8) e, portanto, podem não chegar no volume ativo do detector e depositar sua energia. Isto resulta em contagens menores, e, portanto, eficiências menores para o padrão de ^{137}Cs . Além disso, o espectro de energias das partículas β é contínuo, e aquelas de menor energia são absorvidas na entrada do contador.

3.6.3 Composição química dos resíduos sólidos das amostras

Além do problema da variação da eficiência com o padrão de calibração e com a espessura da fonte, um outro problema na determinação da atividade alfa e beta total é a composição química do resíduo sólido que sobra depois da evaporação da amostra. Foi observado por Janzer (1980) que as características da auto-absorção das partículas alfa e beta nos resíduos resultantes da evaporação de uma amostra de água vão variar consideravelmente com sua composição química. Por exemplo, um padrão de urânio para calibração alfa com resíduos compostos por cátions de cálcio (50%) e magnésio (22%) e ânions de bicarbonato (64%) e sulfato (24%) mostrou efeitos maiores de auto-absorção do

que o mesmo padrão radioativo com resíduos compostos predominantemente de cátions de sódio (60%) e ânions de cloreto (65%) e sulfato (35%).

Portanto, a composição química dos resíduos sólidos dissolvidos no padrão de calibração pode influenciar a eficiência para o contador. Se a composição dos resíduos sólidos dissolvidos na amostra for diferente daquela contida no padrão de calibração podem se obtidos resultados errados para atividades alfa e beta total. Isto ocorre porque algumas substâncias químicas têm maior densidade do que outras, o que causa maior auto-absorção das partículas alfa e beta na amostra e, conseqüentemente, menores taxas de contagem são registradas. Portanto, a solução padrão utilizada para a determinação da eficiência do contador deve ter a composição química de sólidos similar à daquela existente nas amostras a serem medidas para que o resultado esteja correto.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Escolha dos padrões de calibração

A escolha de um padrão de calibração pode influenciar os resultados significativamente, pois a auto-absorção das partículas alfa e beta nas amostras depende da energia do padrão de calibração utilizado (subitens 3.6.2.1 e 3.6.2.2). Portanto, os resultados para atividade alfa e beta total não têm nenhum significado a menos que o padrão de calibração seja citado.

Para atividade alfa total, os padrões utilizados foram urânio natural e ^{241}Am (Janzer, 1980; Eaton, 1995).

Para atividade beta, os padrões utilizados foram ^{137}Cs e ^{90}Sr em equilíbrio com seu filho ^{90}Y (Janzer, 1980; Eaton, 1995).

4.2 Cálculos de eficiência e erros associados

Foi estabelecida a medida em triplicata de cada uma das plaquetas preparadas com os padrões radioativos e calculada uma contagem média. Os dados de saída dos detectores são mostrados em cpm.

Para cada detector foi calculada uma contagem média a partir das contagens registradas com as três plaquetas preparadas para cada padrão.

$$C_m = \frac{\sum C_i}{3} \quad (12)$$

A incerteza da contagem média foi obtida pela propagação das incertezas das três contagens de cada plaqueta.

As eficiências e suas incertezas foram calculadas para cada detector usando o programa Mathcad (1997) com base nas expressões de cálculo da eficiência absoluta (equação 10).

Para a eficiência alfa temos:

$$EF_{\alpha} = \frac{(CONT_{\alpha} - BG_{\alpha})}{ATIV_{\alpha} * 60} \quad (13)$$

Onde:

EF_{α} = eficiência para radionuclídeos emissores alfa;

$CONT_{\alpha}$ = contagem média alfa registrada no detector em cpm (equação 12);

BG_{α} = radiação de fundo alfa registrada no detector em cpm;

$ATIV_{\alpha}$ = atividade absoluta alfa.

60 = fator de multiplicação para a transformação de minutos em segundos.

A incerteza foi calculada por propagação conforme a expressão:

$$\sigma_{EF_{\alpha}} = EF_{\alpha} \cdot \left[\left[\frac{\sigma_{CONT_{\alpha}}}{CONT_{\alpha} - BG_{\alpha}} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_{BG_{\alpha}}}{CONT_{\alpha} - BG_{\alpha}} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_{ATIV_{\alpha}}}{ATIV_{\alpha}} \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$\sigma_{EF_{\alpha}}$ = incerteza da eficiência alfa calculada;

$\sigma_{CONT_{\alpha}}$ = incerteza da média das contagens alfa registradas no detector em cpm;

$\sigma_{BG_{\alpha}}$ = incerteza da radiação de fundo alfa registrada no detector em cpm;

$\sigma_{ATIV_{\alpha}}$ = incerteza da atividade absoluta alfa.

Para a eficiência beta temos:

$$EF_{\beta} = \frac{(CONT_{\beta} - BG_{\beta})}{ATIV_{\beta} * 60} \quad (15)$$

Onde:

EF_{β} = eficiência para radionuclídeos emissores beta;

$CONT_{\beta}$ = contagem média beta registrada no detector em cpm (equação 12);

BG_{β} = radiação de fundo beta registrada no detector em cpm;

$ATIV_{\beta}$ = atividade absoluta beta.

60 = fator de multiplicação para a transformação de minutos em segundos.

A incerteza foi calculada por propagação conforme a expressão:

$$\sigma_{EF_\beta} = EF_\beta \cdot \left[\left[\frac{\sigma_{CONT_\beta}}{CONT_\beta - BG_\beta} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_{BG_\beta}}{CONT_\beta - BG_\beta} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_{ATIV_\beta}}{ATIV_\beta} \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Onde:

σ_{EF_β} = incerteza da eficiência beta calculada;

σ_{CONT_β} = incerteza da média das contagens beta registradas no detector em cpm;

σ_{BG_β} = incerteza da radiação de fundo beta registrada no detector em cpm;

σ_{ATIV_β} = incerteza da atividade absoluta beta.

4.3 Curvas de calibração em eficiência

As curvas de calibração são utilizadas para a determinação da eficiência correta em determinada espessura e composição química da amostra em um sistema de contagem.

No presente trabalho foram construídas curvas de calibração em eficiência para cada um dos detectores presentes nos sistemas de contagem utilizados. Para o aumento da espessura nas plaquetas de contagem foram utilizados sais que simularam a composição química da água subterrânea estimada previamente em análises destas águas do IPEN.

4.3.1 Escolha dos pontos para a curva de calibração

Para a construção das curvas de calibração dois fatores devem ser levados em consideração:

- os extremos da faixa de espessuras para calibração devem conter as espessuras das amostras mais freqüentemente medidas;
- os alcances das radiações emitidas pelos radionuclídeos utilizados como padrões de calibração (em mg/cm²).

As espessuras foram escolhidas a partir do cálculo do alcance para as energias dos radionuclídeos utilizados e obedecidas as espessuras para contagem alfa e beta total constantes no *Standards Methods* (Eaton, 1995).

Para a energia mais intensa do ²⁴¹Am que é de 5,486 MeV (Browne e Firestone, 1986), o alcance máximo no ar (R_{ar}), calculado pela equação 6 é igual a:

$$R_{ar} = 4,01 \text{ cm}$$

A partir do alcance máximo do ^{241}Am no ar, foi calculado o alcance máximo do ^{241}Am nos elementos químicos presentes nas águas naturais que foram utilizados como absorvedores (equação 7). As densidades e pesos atômicos dos elementos absorvedores foram extraídos de Vogel (1981) e Pfennig *et al* (1995), respectivamente.

$$R_{\text{Cl}} = 7,65 \text{ mg/cm}^2$$

$$R_{\text{S}} = 7,25 \text{ mg/cm}^2$$

$$R_{\text{K}} = 8,0 \text{ mg/cm}^2$$

$$R_{\text{Na}} = 6,2 \text{ mg/cm}^2$$

$$R_{\text{Ca}} = 8,2 \text{ mg/cm}^2$$

$$R_{\text{Mg}} = 6,3 \text{ mg/cm}^2$$

$$R_{\text{C}} = 4,5 \text{ mg/cm}^2$$

Para partículas alfa do U-natural foi considerado somente o ^{238}U visto que este isótopo possui a quase total porcentagem isotópica no U-natural (99,275%). Para a maior energia do ^{238}U que é de 4,196 MeV (Browne e Firestone, 1986), o alcance máximo no ar (R_{ar}) calculado pela equação 6 é igual a:

$$R_{\text{ar}} = 2,6 \text{ cm}$$

A partir do alcance máximo do ^{238}U no ar, foi calculado o alcance máximo do ^{238}U nos elementos químicos presentes nas águas naturais que foram utilizados como absorvedores (equação 7). As densidades e pesos atômicos dos elementos absorvedores foram extraídos de Vogel (1981) e Pfennig *et al* (1995), respectivamente.

$$R_{\text{Cl}} = 5 \text{ mg/cm}^2$$

$$R_{\text{S}} = 4,7 \text{ mg/cm}^2$$

$$R_{\text{K}} = 5,3 \text{ mg/cm}^2$$

$$R_{\text{Na}} = 4,1 \text{ mg/cm}^2$$

$$R_{\text{Ca}} = 5,4 \text{ mg/cm}^2$$

$$R_{\text{Mg}} = 4,2 \text{ mg/cm}^2$$

$$R_{\text{C}} = 2,9 \text{ mg/cm}^2$$

O *Standards Methods* (Eaton, 1995) afirma que a radiação de emissores alfa que possuem uma energia de 8 MeV não escaparão da amostra se estes emissores são cobertos por uma amostra de espessura de $5,5 \text{ mg/cm}^2$. Esta é a espessura que as partículas alfa com energias de 8 MeV não conseguem atravessar e depositar sua energia no sistema de contagem a fim de serem registradas.

O alcance das partículas beta expresso em massa por unidade de área (mg/cm^2) independe do material absorvedor (Evans, 1982). Os alcances máximos foram calculados por meio das equações 8 e 9. Para o ^{137}Cs temos:

$$E_{\max} = 0,514 \text{ MeV} \Rightarrow R = 162,5 \text{ mg}/\text{cm}^2$$

$$E_{\max} = 1,176 \text{ MeV} \Rightarrow R = 517,3 \text{ mg}/\text{cm}^2$$

A energia do elétron emitido após Efeito Fotoelétrico é calculada por meio da seguinte equação (Evans, 1982):

$$E_e = h\nu - E_{bin} \quad (17)$$

onde $h\nu$ é a energia gama do radioisótopo (em keV) e E_{bin} é a energia de ligação do elétron (em keV) em determinada camada eletrônica. Assim, para o elétron liberado pela radiação gama de 0,662 MeV do ^{137}Cs :

$$E_e = 0,626 \text{ MeV} \Rightarrow R = 213,2 \text{ mg}/\text{cm}^2$$

A energia do elétron atômico foi calculada para a camada K, pois nesta camada a probabilidade de ocorrência do efeito é de 80%.

A energia máxima do elétron emitido após uma interação Compton é calculada por meio das seguintes equações (Evans, 1982):

$$T = \frac{E\gamma}{1 + \frac{1}{\epsilon}} \quad (18)$$

$$\text{onde } \epsilon = \frac{E\gamma}{m_0 c^2},$$

e $E\gamma$ é a energia gama inicial do radioisótopo (0,662 MeV no caso do ^{137}Cs); $m_0 c^2$ é igual a 511,006 keV e T é a energia cinética máxima do elétron (em MeV) emitido após a interação Compton.

$$T = 0,478 \text{ MeV} \Rightarrow R = 146,96 \text{ mg}/\text{cm}^2$$

Os elétrons de conversão interna deste radioisótopo têm energia igual à:

$$E_{ci} = h\nu - E_{bin K} \quad (19)$$

onde $h\nu$ é a energia gama do radioisótopo (em keV) e E_{bin} é a energia de ligação do elétron (em keV) na camada K do átomo.

$$E_{ci} = 0,626 \text{ MeV} \Rightarrow R = 213,2 \text{ mg}/\text{cm}^2$$

A energia do fóton retroespalhado no Efeito Compton é 0,184 MeV e a energia de ligação do elétron na camada K é 35,99 keV. Com o fóton retroespalhado do Efeito Compton, foi calculada a energia máxima do elétron emitido após interação na camada K do elétron:

$$E_{\max} = hv - E_{\text{bin K}} \quad (20)$$

$$E_{\max} = 0,148 \text{ MeV} \quad \Rightarrow \quad R = 29,14 \text{ mg/cm}^2$$

Para o $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ temos:

$$E_{\max} = 0,546 \text{ MeV} \quad \Rightarrow \quad R = 176,6 \text{ mg/cm}^2$$

$$E_{\max} = 2,284 \text{ MeV} \quad \Rightarrow \quad R = 1104,5 \text{ mg/cm}^2$$

O *Standards Methods* (Eaton, 1995) recomenda que a espessura máxima da amostra deve ser de até 10 mg/cm² para atividade beta total. Esta é a espessura na qual as partículas beta dos padrões utilizados conseguem atravessar e depositar sua energia no sistema de contagem a fim de serem registradas.

4.4 Preparo dos padrões radioativos

Os padrões de ^{241}Am , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs foram preparados a partir de soluções estoque padronizadas do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD-CNEN/RJ). Tais soluções estoque possuíam em 10 de abril de 2001 as seguintes atividades específicas e seus respectivos erros constados nos certificados:

- $^{241}\text{Am} \Rightarrow 1348 \pm 11 \text{ Bq/g}$
- $^{137}\text{Cs} \Rightarrow 1339 \pm 12 \text{ Bq/g}$
- $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y} \Rightarrow 1359 \pm 13 \text{ Bq/g}$.

Inicialmente as soluções padronizadas do IRD foram agitadas em agitador magnético da marca Fisatom por aproximadamente 30 minutos antes de cada utilização. A seguir, diluiu-se 100 μL (130 Bq) da solução padronizada em água do sistema de purificação milli-Q (água de elevada pureza: tipo I).

4.4.1 Preparo da solução estoque padronizada de U-natural

A solução estoque padronizada de U-natural foi preparada no Laboratório de Radiometria Ambiental do IPEN. Pesou-se em balança analítica, 0,1g de U_3O_8 nuclearmente puro fornecido pela Johnson Matthey Chemical Limited (U.S.A.). O óxido foi inicialmente dissolvido em HNO_3 65% e teve a concentração final de ácido ajustada

para 1M HNO₃. A solução obteve a concentração de 10 mg U/1mL de HNO₃ 1M. Diluiu-se esta solução 1:100, sendo a concentração final de 100µg U/mL em meio 0,01M HNO₃. Pela atividade específica do U-natural ($A_e = 2,55 \times 10^4$ Bq/g), a concentração final calculada da solução seria de 2,55 Bq/mL.

Contudo, medidas prévias nos detectores proporcionais da solução padrão de U-natural mostraram eficiências altas (45,7%) se comparadas com eficiências de catálogos (BERTHOLD, 1988; BERTHOLD, 1996).

Foram então feitas medidas pelo método da espectrometria alfa desta solução de U-natural para verificação de sua atividade verdadeira usando um carregador de HNO₃ 0,1M. A atividade média calculada por este método foi $3,90 \pm 0,20$ Bq/mL. No U-natural, o ²³⁸U e o ²³⁴U devem estar em equilíbrio como foi observado no espectro da amostra analisada. Na FIG 3 é mostrado esse espectro. Em tais medidas, os três isótopos do urânio natural emissores alfa foram encontrados. Além dos três isótopos do urânio natural apareceu um pico provavelmente relacionado a partículas alfa do ²¹⁰Po que provavelmente estão nas paredes da câmara devido a contagens anteriores realizadas com este radioisótopo.

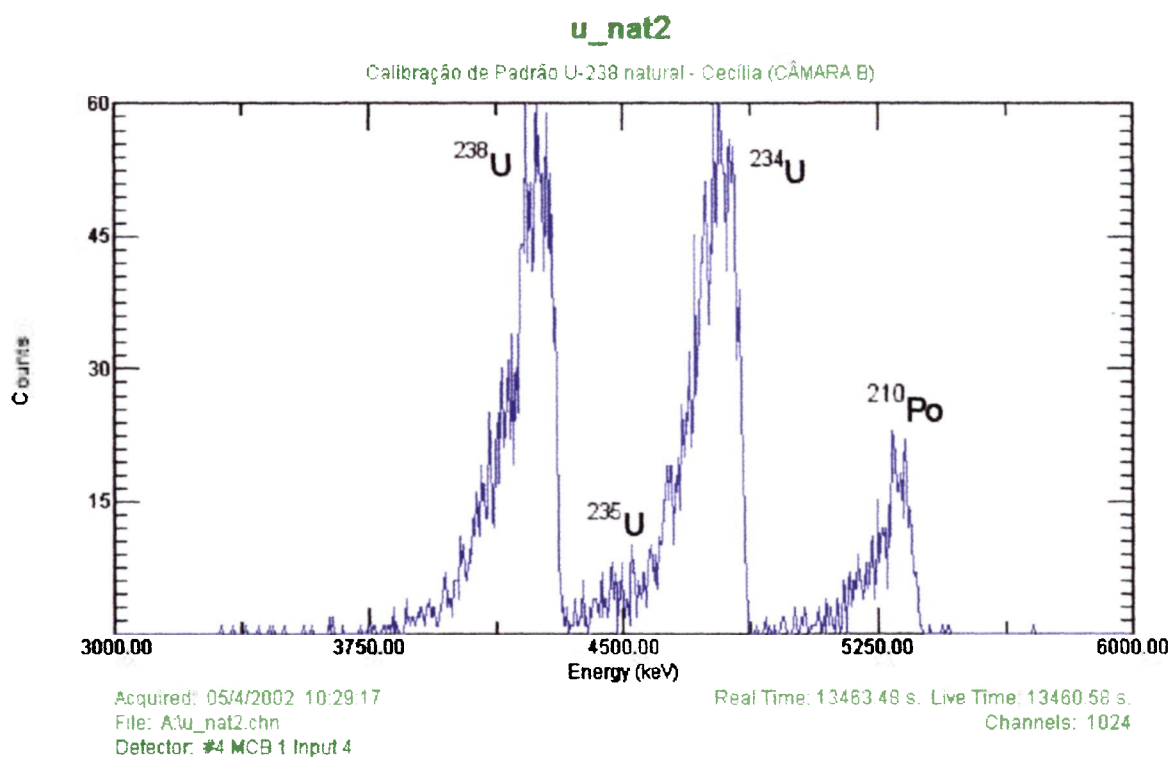


FIGURA 3. Espectro da solução de U-natural mostrando os picos do ²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁴U e das partículas de ²¹⁰Po do carregador de HNO₃.

A atividade calculada por este método foi utilizada para a solução de U-natural, pois a metodologia para determinação de isótopos de urânio por espectrometria alfa foi validada por meio de programas de comparação interlaboratoriais (PNI-IRD, 2000; PNI-IRD 2001; PNI-IRD, 2002).

4.5 Escolha das plaquetas

As plaquetas de contagem devem ser de metal resistente à corrosão e apresentar baixa radiação de fundo. Para a contagem foram utilizadas plaquetas de aço-inoxidável, pois em experimentos prévios no laboratório, as plaquetas de aço-inox mostraram menores taxas de radiação de fundo que as de alumínio (Campos,1999). As plaquetas foram escolhidas na mesma geometria utilizada no Programa de Monitoração Ambiental do IPEN, com diâmetro de 60 mm e altura de 7 mm, possuindo área interna de 26,8 cm².

4.5.1 Descontaminação das plaquetas

Devido ao grande número de medidas, houve necessidade de reaproveitamento das plaquetas. Para tanto, foi desenvolvido um procedimento para descontaminação destas após terem sido utilizadas com os padrões de ²⁴¹Am, ⁹⁰Sr/⁹⁰Y, ¹³⁷Cs e U-natural.

Colocava-se HNO₃ 0,01M no interior de cada plaqueta com um micropipetador P-1000, marca Pipetman. Com esse mesmo micropipetador, no dia seguinte era retirado o ácido das plaquetas. Com este método garante-se que a superfície externa das plaquetas não seja contaminada.

As plaquetas passavam por este processo de colocada e retirada de solução de HNO₃ todos os dias. Ao final de cada semana, as plaquetas eram medidas nos detectores proporcionais a fim de verificarmos se as contagens estavam diminuindo. Como a concentração do ácido utilizado no interior das plaquetas é baixa, estas não necessitam ser lavadas antes da medida nos detectores. Foi verificado que as contagens estavam diminuindo com este procedimento. Depois de aproximadamente 20 dias, verificamos que as plaquetas medidas nos detectores proporcionais mostravam contagens em nível de radiação de fundo, mostrando que a atividade dos padrões havia sido removida pela solução de ácido nítrico. Portanto, o método desenvolvido mostrou-se eficiente na descontaminação das plaquetas de aço-inoxidável, ficando estabelecido o tempo de 20 dias necessário para essa descontaminação.

4.6 Equipamentos

No presente trabalho foram utilizados dois sistemas contadores proporcionais de baixa radiação de fundo, com janela fina e fluxo de gás, com geometria de fonte externa. Os dois sistemas contadores são da marca EG&G-Berthold, sendo um deles modelo LB 770-2 e outro modelo LB 770-2/5, que permitem contar até 10 amostras por vez (10 câmaras contadoras por sistema) sendo que no modelo LB 770-2, o detector dois está inoperante. Estes contadores, mostrados esquematicamente na FIG. 4 são utilizados na determinação da atividade alfa e beta total em água nos trabalhos de rotina e pesquisa do Departamento de Radiometria Ambiental (NA) do IPEN por causa da sua alta sensibilidade na medida alfa e beta na detecção de concentrações muito baixas de atividade de amostras ambientais.

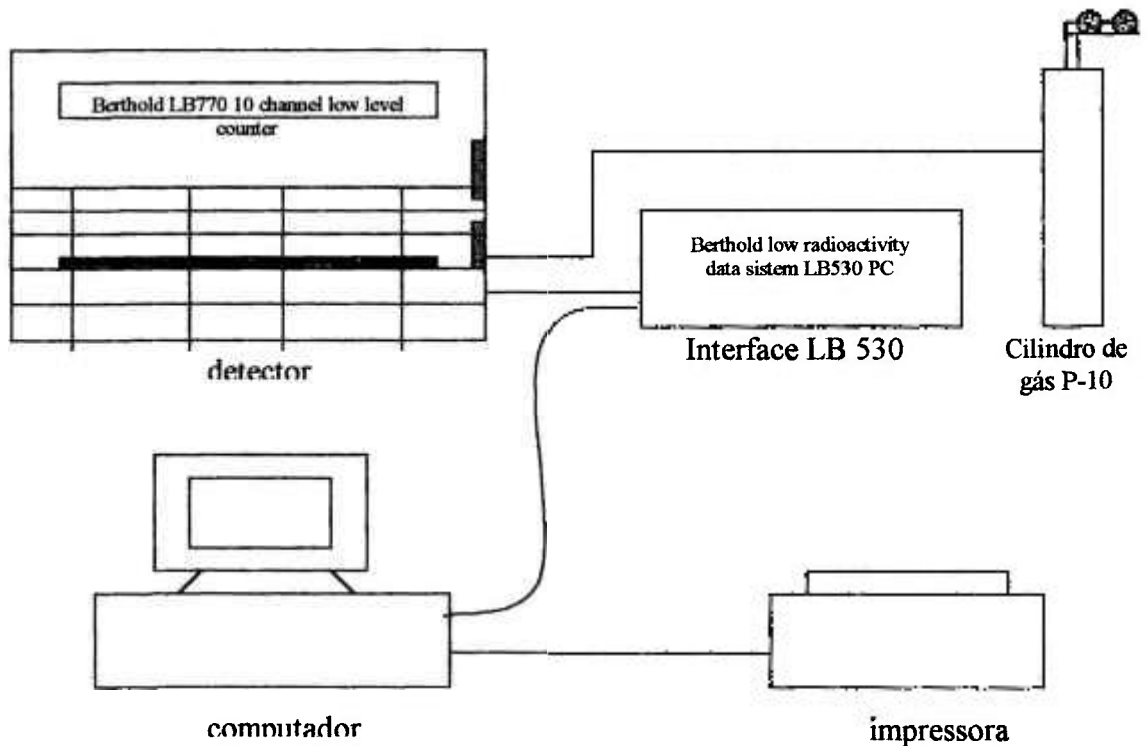


FIGURA 4. Esquemas dos sistemas detectores Berthold LB 770.

O princípio do funcionamento dos contadores proporcionais é a multiplicação no gás que amplifica a carga representada pelos pares de íons criados originalmente dentro do gás. A amplitude dos pulsos resultantes é proporcional à energia da radiação incidente. A multiplicação no gás é consequência do aumento do campo elétrico criado dentro do gás (Knoll, 1989).

A radiação de fundo é mantida baixa devido à espessa blindagem de chumbo envelhecido (10 cm) de baixa radiação de fundo ao redor das câmaras contadoras e ao contador de guarda que conta em regime de anticoincidência em relação às câmaras contadoras para descontar a radiação cósmica ambiental (BERTHOLD, 1988; BERTHOLD, 1996).

O gás utilizado nos contadores é a mistura P-10 (90% argônio e 10% metano) mantida a um fluxo constante de $100 \text{ cm}^3/\text{min}$. Nas FIG. 5 e 6 são apresentadas ilustrações esquemáticas do fluxo de gás no LB 770-2 e LB 770-2/5.

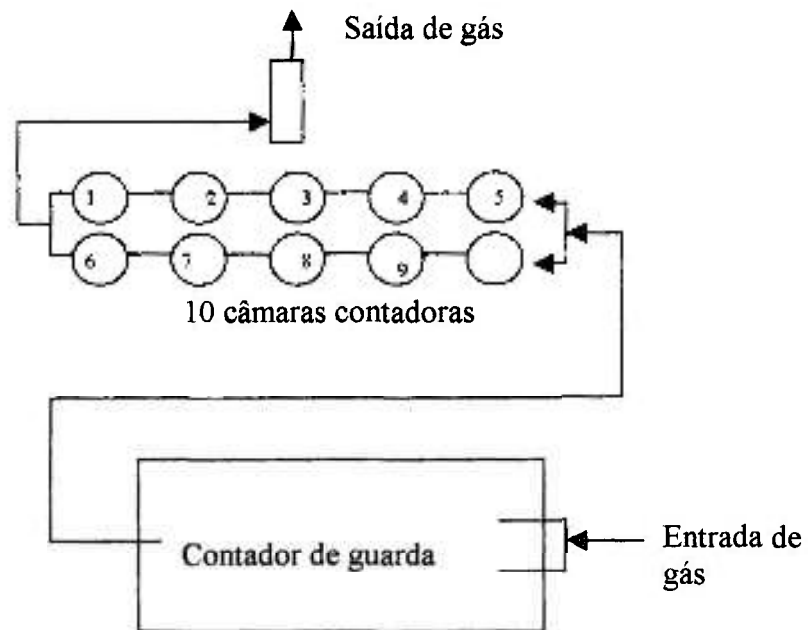


FIGURA 5. Ilustração esquemática do ciclo do gás de contagem no modelo LB 770-2/5.

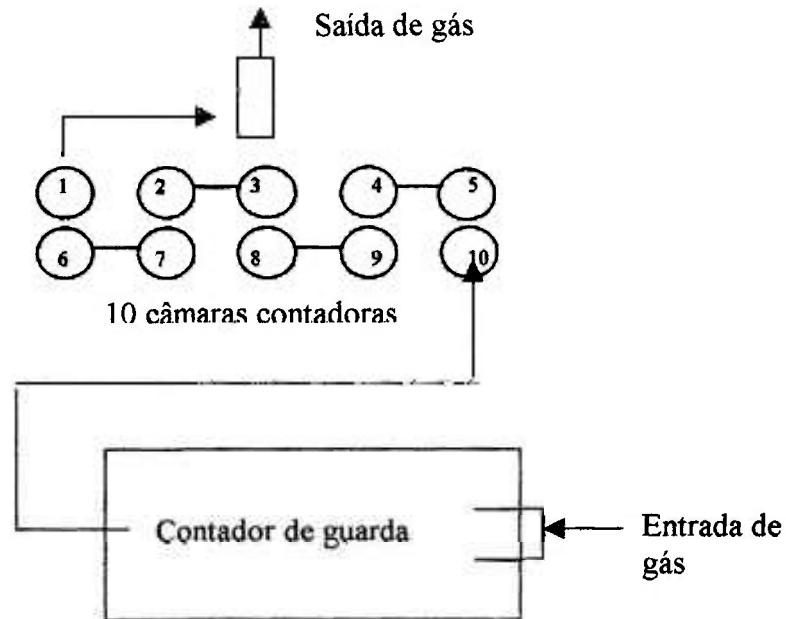


FIGURA 6. Ilustração esquemática do ciclo do gás de contagem no modelo LB 770-2.

Os detectores possuem janela de mylar aluminizado na entrada das câmaras contadoras. Tal janela deve ser fina o suficiente a fim de permitir a passagem de partículas alfa e beta de baixa energia para dentro da câmara contadora. Qualquer material que esteja no caminho da radiação pode espalhar, absorver ou causar perda de energia de partículas carregadas. No caso do modelo LB 770-2 essa janela tem espessura de $0,6 \text{ mg/cm}^2$. No LB 770-2/5 a janela tem espessura de $0,4 \text{ mg/cm}^2$. De acordo com os cálculos dos alcances para todas as energias utilizadas no estudo (equações do subitem 4.2.1) vemos que todas as radiações emitidas por estes radionuclídeos conseguem passar através da janela de mylar utilizada nos sistemas contadores.

A grande diferença entre os dois sistemas contadores é devida ao *software* do fabricante, pois o LB 770-2 opera em duas tensões de operação (uma para contagem alfa e outra para contagem beta) e o LB 770-2/5 em uma só tensão. O LB 770-2/5 também calcula automaticamente a correção para alfa quando contamos beta.

Outra diferença entre os dois modelos estudados é que o LB 770-2 possui bandeja e *software* únicos para contagem das dez plaquetas. O LB 770-2/5 possui cinco bandejas, cada uma com capacidade para duas plaquetas e *softwares* independentes.

4.7 Determinação da tensão de operação do sistema LB 770-2/5

Foram realizadas medidas dos patamares alfa e beta no modelo LB 770-2/5 a fim de determinarmos o ponto de operação utilizado nas contagens posteriores (BERTHOLD, 1996). Para o modelo LB 770-2 a tensão de operação já estava estabelecida em 1000 V para alfa e 1700 V para beta (Pecequilo, 2001).

Para a medida do patamar alfa foram utilizadas fontes de ^{241}Am contadas em ciclos de 5 min com variação de tensão de 1200 a 2000V.

Para medida do patamar beta foram utilizadas fontes de ^{204}Tl contadas em ciclos de 5 min com variação de tensão de 1200 a 2000V.

A tensão de operação estabelecida pelo próprio sistema foi de 1650 V para alfa e para beta. Esta foi armazenada e utilizada em todas as contagens seguintes.

4.8 Medida de radiação de fundo

Foram realizadas medidas da radiação de fundo para cada um dos detectores dos sistemas de contagem utilizados com as plaquetas de aço-inoxidável limpas colocadas na bandeja destes detectores. Estas plaquetas foram as mesmas utilizadas posteriormente para amostras radioativas na mesma geometria de contagem.

As contagens foram registradas por períodos de 900 minutos, sempre antes da medida de um padrão diferente do anterior.

Os resultados das contagens médias obtidas de radiação de fundo (background) em todos os detectores dos dois modelos estudados (em cpm) são mostrados na TAB. 7 (subitem 5.1).

4.9. Estabelecimento da metodologia de preparo das amostras

Inicialmente, as amostras de ^{241}Am foram preparadas colocando-se toda a solução padrão de uma só vez na plaqueta e a seguir, evaporada sob lâmpada de infravermelho. A seguir, as plaquetas foram colocadas para contar nos detectores proporcionais. Nesta metodologia obtivemos eficiências da ordem de 16%, muito abaixo da eficiência de 37%, declarada pelo fabricante no manual de utilização dos equipamentos (BERTHOLD, 1988; BERTHOLD, 1996) e de valores obtidos por outros pesquisadores (Oliveira, 1998; Campos, 1999; Pecequilo, 2001). As plaquetas com padrão de ^{241}Am foram então medidas por espectrometria gama com HPGe e a atividade determinada pela transição gama de 59,5 keV (Eurisys, 2001). Verificamos que a atividade real na plaqueta

era de 60 Bq/plaqueta e não os 130 Bq da solução padrão. Concluímos que a metodologia de preparo das amostras não estava correta e desenvolvemos outra técnica.

Após várias tentativas, estabelecemos a seguinte metodologia para a colocação dos padrões nas plaquetas de contagem. Todo o volume das soluções-padrão foi pipetado em plaquetas de aço-inoxidável em alíquotas de 1 mL (com micropipetador P-1000 marca Pipetman), a partir do centro da plaqueta (a área útil da solução na plaqueta abrange 12,5 cm²). Desse modo admitimos que não haverá perda de atividade nas paredes das plaquetas de contagem pois assim a solução padrão não alcança as paredes da plaqueta.

A seguir, tais soluções eram evaporadas sob lâmpada de infravermelho depois de cada mL colocado nas plaquetas de aço inoxidável.

Depois de toda a solução ser evaporada nas plaquetas, estas eram colocadas em dessecador para que suas temperaturas entrassem em equilíbrio com a temperatura ambiente.

Após o preparo, as plaquetas do ²⁴¹Am foram medidas novamente por espectrometria gama e as atividades determinadas foram de 130 Bq/plaqueta. Isto confirmou que a nova metodologia estabelecida está correta para o preparo das plaquetas para contagem em detectores proporcionais com a mesma geometria.

As plaquetas foram então colocadas para contar nos detectores proporcionais. As eficiências determinadas, mostraram-se dentro do esperado para os radionuclídeos do estudo (26%).

4.10 Preparação dos padrões com espessura zero

As soluções-padrão, preparadas previamente a partir das soluções-estoque do IRD, foram agitadas em agitador magnético por aproximadamente 30 minutos antes de cada utilização.

Foram preparadas 3 plaquetas por padrão (3 para ²⁴¹Am, 3 para U-natural, 3 para ¹³⁷Cs e 3 para ⁹⁰Sr/⁹⁰Y). As plaquetas preparadas com sua respectiva atividade são mostradas na TAB. 3. A atividade de 130 Bq/plaqueta foi estabelecida com base nos cálculos dos erros padrão (Pecequilo, 2000) para contagens previamente registradas no detector para esta atividade (Pecequilo, 2001):

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (21)$$

onde ε é o erro padrão e n é taxa de contagem registrada no detector. Estes erros não mostraram desvios significativos, resultando em 2,2% para o ^{241}Am , 1,6% para o $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e 1,7% para o ^{137}Cs .

TABELA 3 – Atividade de cada radionuclídeo padrão em Bq/plaqueta.

Radionuclídeo	Atividade (Bq/plaqueta)
^{241}Am	$130,0 \pm 1,0$
U-natural	$0,39 \pm 0,02$
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	$130,0 \pm 1,2$
^{137}Cs	$130,0 \pm 1,2$

Os erros das atividades foram determinados a partir da concentração das soluções estoque do IRD.

4.11 Medida dos padrões com espessura zero

Foram medidas amostras em branco (somente com água do milli-Q nas plaquetas) a fim de verificarmos se esta água produz contagens nos detectores, o que poderia causar um aumento no número das contagens registradas nas medidas das amostras.

Foram estabelecidas três réplicas de contagem em cada detector de ambos os aparelhos utilizados. Ambos os sistemas possuem dez câmaras contadoras mas um detector está inoperante no LB 770-2 (detector 2).

As plaquetas foram colocadas nas bandejas dos detectores proporcionais e contadas por 3 ciclos de 5 minutos para os padrões de ^{241}Am , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs e por 3 ciclos de 200 minutos para o padrão de U-natural. A partir das taxas de contagem obtidas e da atividade conhecida por plaqueta foram determinadas as eficiências máximas (com espessura zero) e seus erros utilizando as equações (13-16) para os radionuclídeos de interesse.

4.12 Determinação da composição química da água subterrânea do IPEN

4.12.1 Locais de amostragem de água subterrânea do PMA-IPEN

No Programa de Monitoração Ambiental do IPEN a água subterrânea é coletada para análise em 6 poços discriminados na TAB. 4.

TABELA 4 - Pontos de coleta de água subterrânea do PMA-IPEN.

AP01	Portaria Geral (Setor Esportivo)
AP02	UTERRS (Unidade de Tratamento de Efluentes Radioativos e Rejeitos Sólidos)
AP03	atrás do Reprocessamento - cerca
AP04	atrás do Reprocessamento
AP05	Perimetral
AP06	atrás do UTERRS

A localização dos pontos de coleta dentro do IPEN pode ser visualizada na figura do ANEXO D.

4.12.2 Procedimento de coleta das amostras de água subterrânea

A coleta seguiu os procedimentos padrão do PMA do IPEN (Jacomino e Máduar, 1992; Alencar e Nogueira, 2001).

Foram coletadas três amostras de água de cada um dos seis poços de água subterrânea do Programa de Monitoração Ambiental do IPEN, perfazendo um total de dezoito amostras. As amostras foram acondicionadas em frascos de polietileno de 1 L e medida sua temperatura e pH aproximado com fita indicadora universal. Os poços têm profundidade média de 10 m e as amostras foram coletadas a aproximadamente 5 m da superfície.

4.12.3 Determinação da composição química das amostras coletadas

As amostras foram analisadas quanto aos seguintes elementos: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe , Cl^- , F^- , NO_2^- , Br^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- . Tais íons foram estudados com a finalidade de podermos utilizar uma solução padrão com a composição química correta na construção das curvas de calibração em eficiência dos detectores.

4.12.3.1 Metodologia de análise para os ânions Cl^- , F^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , Br^- , SO_4^{2-} e NO_3^-

Uma alíquota das amostras foi enviada ao Laboratório de Hidrogeoquímica II, do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas - CEPAS, localizado no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo para análise dos ânions Cl^- , F^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , Br^- , SO_4^{2-} e NO_3^- . Estes ânions foram analisados pelo método de cromatografia líquida no

cromatógrafo de íons da DIONEX 2010i. A cromatografia de íons baseia-se no princípio de troca-iônica utilizando-se uma coluna separadora, um sistema supressor químico e uma célula de condutividade. Para a determinação de ânions, utiliza-se frequentemente, um trocador aniônico de base forte de baixa capacidade na coluna separadora e um trocador catiônico do tipo forte de alta capacidade na forma H^+ no sistema supressor (denominado coluna supressora). O eluente, neste caso, é uma solução alcalina de carbonato/bicarbonato de sódio. Os ânions separados são detectados na forma de seus ácidos fortes, em um meio de baixa condutividade. Esta metodologia é indicada para a determinação de íons ao nível de traços ($\mu\text{g/mL}$) em amostras ambientais em soluções aquosas (Oliveira, 1998). As concentrações médias obtidas nas análises dos ânions Cl^- , F^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , Br^- , SO_4^{2-} e NO_3^- (em mg/L) por meio desta metodologia encontram-se na TAB. 8 (subitem 5.2).

4.12.3.2 Metodologia para análise dos ânions CO_3^{2-} e HCO_3^-

A concentração dos ânions CO_3^{2-} e HCO_3^- foi determinada no Departamento de Radiometria Ambiental do IPEN por meio de análise titrimétrica. A análise titrimétrica consiste na determinação da concentração de determinada substância em uma solução (neste caso a água subterrânea) a partir da reação com determinado volume de solução padrão (Vogel, 1981). Neste caso a solução padrão foi HCl 0,1 N adicionada à água com uma bureta de 25 mL até que a reação estivesse completa. O ponto final da reação foi evidenciado com indicador alaranjado de metila em amostras de água de 10 ml (Helrich, 1990). As massas dos ânions foram calculadas através do volume da solução padrão consumida e de sua normalidade aplicando-se as leis da estequiometria (Vogel, 1981). As concentrações médias obtidas nas análises dos ânions CO_3^{2-} e HCO_3^- (em mg/L) por meio desta metodologia encontram-se na TAB. 8 (subitem 5.2).

4.12.3.3 Metodologia para análise dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ e do Fe

A determinação dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ e do Fe foi feita no espectrômetro de absorção atômica da Perkin Elmer, modelo Analyst 100 no Laboratório de Análises Radioquímicas do Departamento de Radiometria Ambiental do IPEN. A espectrometria de absorção atômica baseia-se na medida de luz absorvida do elemento atomizado na chama. Cada metal tem seus próprios comprimentos de onda de absorção característico. A quantidade de energia do comprimento de onda característico absorvido na chama é proporcional a concentração do elemento na amostra (Eaton, 1995). As

concentrações médias obtidas nas análises dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ e do Fe (em mg/L) por meio desta metodologia encontram-se na TAB. 8 (subitem 5.2).

4.12.3.4 Metodologia para determinação de sólidos totais dissolvidos

Foi determinada a quantidade de sólidos totais dissolvidos (S.T.D.) após filtração utilizando-se filtros circulares de microfibras de vidro GF/C Whatman de 150 mm de diâmetro (Cat no. 1822 150) e posterior evaporação das amostras em chapa aquecedora a 180°C (Eaton, 1995). Os resultados encontram-se na TAB. 8 (subitem 5.2).

4.13 Preparo da solução padrão salina

A solução padrão salina foi preparada baseando-se na composição química determinada nas águas subterrâneas do IPEN. Foi preparada uma solução padronizada com os sais que simulassem estas águas visto que a solução padrão deve ter a composição química de sólidos similar à daquela existente nas amostras (Eaton, 1995).

Os sais foram pesados em balança analítica marca Mettler AE50 com precisão de 0,1 mg e os resultados são mostrados na TAB. 5.

TABELA 5 – Sais e respectivas quantidades utilizados no preparo de solução padrão salina.

Sal	Quantidade (g)
CaCO_3	0,090
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,500
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2,500
NaHCO_3	2,500
K_2SO_4	2,000
NaCl	2,400

Estes sais foram colocados em balão volumétrico de 2000 ml preenchido com HCl 0,5mM. No preparo da solução também foram observados os resultados de outros estudos onde foi simulada a composição química das águas naturais (Yoshinaga, 1990; Boletim IG-USP n° 5, 1993; Rand, 1995; Feitosa, 1997). A solução foi preparada respeitando-se o coeficiente de solubilidade dos sais em água a 30°C (Lurie, 1978). A concentração total da solução foi de 5g/L. A acidez empregada (0,5 mM) não causa

corrosão nas plaquetas utilizadas conforme experimentos prévios realizados com ácidos em diversas concentrações.

4.14 Preparação dos padrões com diferentes espessuras

Para a construção das curvas de calibração foram preparadas plaquetas com diferentes espessuras de resíduo utilizando-se a solução padrão salina preparada conforme subitem 4.12.

Inicialmente as plaquetas de aço-inoxidável limpas foram pesadas em balança analítica.

A solução padrão salina foi agitada, com agitador magnético, por aproximadamente 30 minutos.

A seguir, foram preparados vários frascos com a solução salina em ordem crescente de volume conforme mostrados na TAB. 6, adicionando-se a cada um deles os padrões preparados com as atividades conhecidas de 130 Bq para ^{241}Am , 130 Bq para $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, 130 Bq para ^{137}Cs e 0,39 Bq para U-natural.

TABELA 6 - Espessuras geradas nas plaquetas com volumes de solução salina utilizados.

Volume da solução salina (ml)	Massa do resíduo (mg)	Espessura na plaqueta (mg/cm ²)
2	7,5	0,6
4	15,5	1,2
6	24,1	1,9
8	32,5	2,6
10	40	3,2
12	47,4	3,8
14	55,8	4,5
16	63,2	5,1
18	70,3	5,6
20	77,3	6,2
24	93,1	7,4
30	117	9,4
35	137,3	10,9
40	172,3	13,8
45	183	14,6
50	193,5	15,5
55	207,4	16,6
60	231,5	18,5

Os vidros utilizados para a solução salina com os padrões radioativos possuíam tampa com rosca e foram agitados por 30 minutos em agitador magnético da marca Fisatom.

Após essa agitação, todo o volume da solução dos frascos foi pipetado nas plaquetas a partir do centro das mesmas, com um micropipetador P-1000 da marca Pipetman em alíquotas de 1mL.

Depois de evaporada toda a solução sob lâmpada de infravermelho, as plaquetas com o resíduo seco foram colocadas em dessecador a fim da temperatura dos resíduos entrar em equilíbrio com a do ambiente (aproximadamente 2 horas). A seguir as plaquetas eram pesadas novamente a fim de determinarmos a massa do resíduo seco.

4.15 Medida dos padrões com diferentes espessuras

As plaquetas, após preparadas, foram contadas nos detectores proporcionais por 3 ciclos de 5 minutos para os padrões de ^{241}Am , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs e por 3 ciclos de 200 minutos para o padrão de U-natural. A partir das taxas de contagem obtidas e da atividade conhecida por plaqueta foram determinadas as eficiências para os radionuclídeos de interesse (equações 13-16), relacionando-as com as espessuras por área útil da plaqueta (mg/cm^2).

5 RESULTADOS

5.1 Radiação de fundo do sistema de contagem

As contagens obtidas como radiação de fundo dos sistemas de contagens são apresentadas na TAB. 7.

TABELA 7 - Contagens médias obtidas de radiação de fundo (background) em todos os detectores dos dois modelos estudados (em cpm).

	LB 770-2		LB 770-2/5	
	BG alfa	BG beta	BG alfa	BG beta
1	0,051 ± 0,008	0,870 ± 0,033	0,038 ± 0,005	0,720 ± 0,023
2	Fora de operação		0,038 ± 0,005	0,872 ± 0,025
3	0,043 ± 0,007	0,632 ± 0,028	0,033 ± 0,005	0,491 ± 0,019
4	0,049 ± 0,008	0,612 ± 0,028	0,052 ± 0,006	0,471 ± 0,018
5	0,042 ± 0,007	0,810 ± 0,032	0,022 ± 0,004	0,810 ± 0,024
6	0,032 ± 0,006	0,960 ± 0,035	0,048 ± 0,006	0,830 ± 0,024
7	0,024 ± 0,005	0,726 ± 0,030	0,030 ± 0,005	0,548 ± 0,020
8	0,044 ± 0,007	0,702 ± 0,030	0,042 ± 0,005	0,583 ± 0,020
9	0,069 ± 0,009	0,753 ± 0,031	0,024 ± 0,004	0,520 ± 0,019
10	0,040 ± 0,007	0,996 ± 0,035	0,038 ± 0,005	0,769 ± 0,023

5.2 Composição química da água subterrânea do IPEN

A composição química da água subterrânea do IPEN é mostrada na TAB. 8. Parâmetros como pH e temperatura foram registrados em todos os pontos de coleta.

TABELA 8 - Composição química da água subterrânea do IPEN.

Parâmetros	Pontos de coleta					
	AP01	AP02	AP03	AP04	AP05	AP06
pH	6,0	5,5	5,5	5,0	5,5	5,5
T (°C)	21,2	20,9	22	21,7	20,8	21,2
Ca ²⁺ (mg/L)	49,5	1,09	12,58	7,97	1,59	5,11
Mg ²⁺ (mg/L)	6,78	0,239	1,09	0,515	0,816	0,642
Na ⁺ (mg/L)	2,53	2,94	0,259	7,42	0,54	23,6
K ⁺ (mg/L)	2,45	0,681	1,23	1,19	0,59	0,83
Fe (mg/L)	0,60	0,74	1,39	1,40	1,37	1,15
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	91,5	61	61	30,5	61	61
CO ₃ ²⁻ (mg/L)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
F ⁻ (mg/L)	0,004	0,008	0,009	0,010	0,005	0,008
Br ⁻ (mg/L)	0,67	0,02	0,02	0,03	0,41	0,04
NO ₂ ⁻ (mg/L)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cl ⁻ (mg/L)	6,11	5,78	1,50	8,70	8,40	2,95
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	1,25	0,36	5,20	15,54	4,54	1,02
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	0,06	0,07	0,06	0,27	0,04	0,06
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0,07	6,09	0,12	13,12	0,09	5,51
S.T.D. (mg/L)	132	28	58	62	28	40

n.d.: nada detectado.

Os dados obtidos da composição química da água subterrânea do IPEN foram colocados nas FIG. 7-12 onde observamos a quantidade dos sais (mg/L) encontrada em cada ponto de coleta.

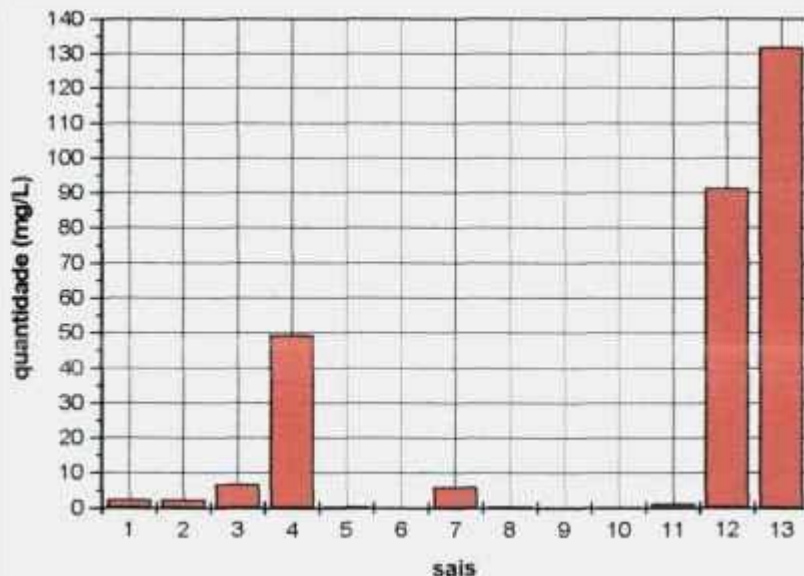


FIGURA 7. Composição química no ponto de coleta AP01.

Legenda válida para todos os pontos de coleta:

1 - Na ⁺
2 - K ⁺
3 - Mg ²⁺
4 - Ca ²⁺
5 - Fe
6 - F ⁻
7 - Cl ⁻
8 - Br ⁻
9 - NO ₃ ⁻
10 - PO ₄ ³⁺
11 - SO ₄ ²⁻
12 - HCO ₃ ⁻
13 - sólidos totais dissolvidos (S.T.D.)

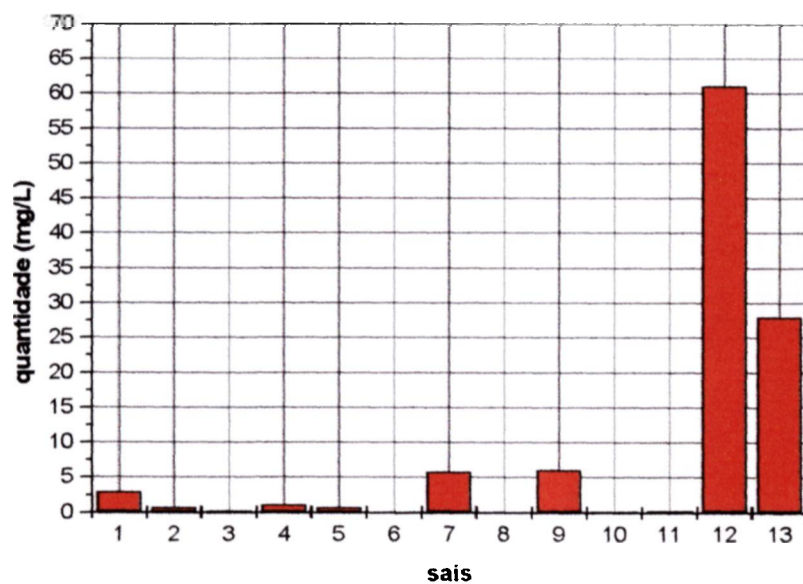


FIGURA 8. Composição química no ponto de coleta AP02.

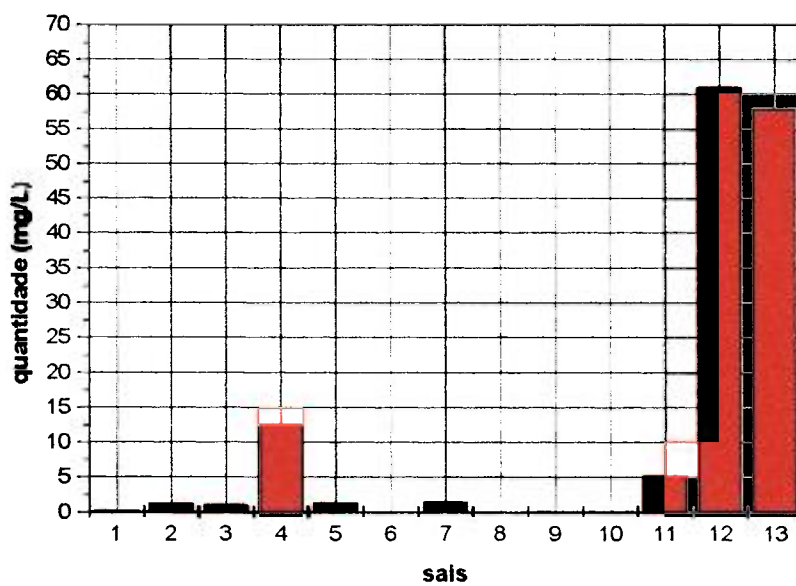


FIGURA 9. Composição química no ponto de coleta AP03.

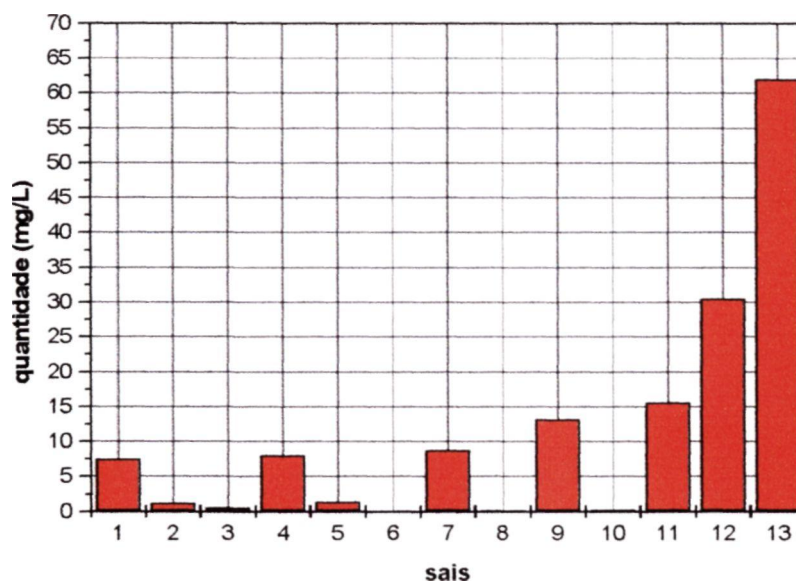


FIGURA 10. Composição química no ponto de coleta AP04.

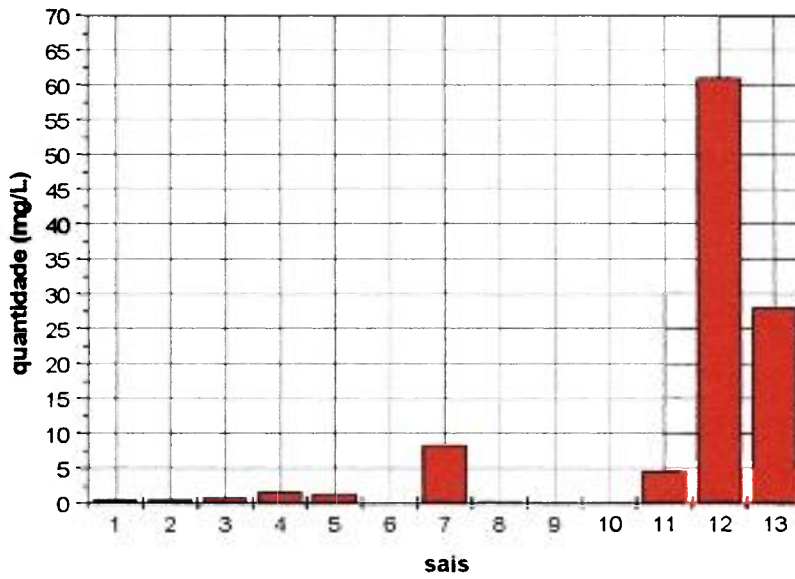


FIGURA 11. Composição química no ponto de coleta AP05.

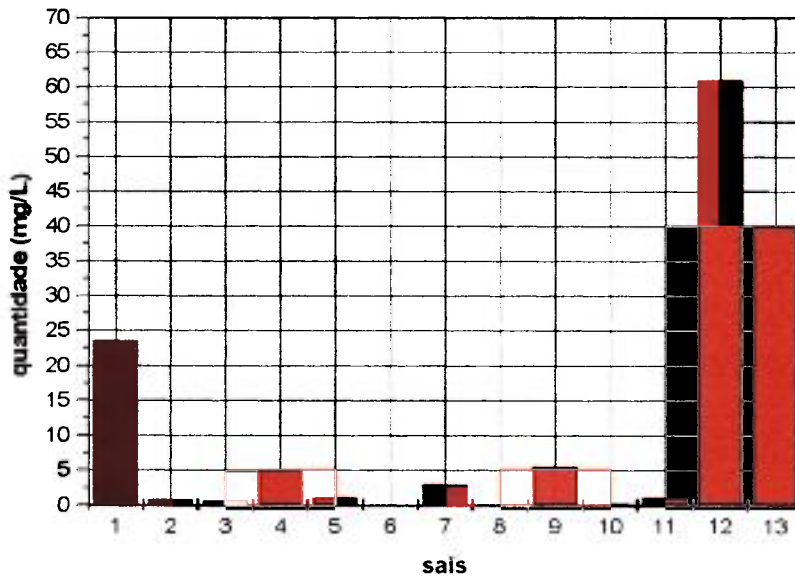


FIGURA 12. Composição química no ponto de coleta AP06.

5.3 Eficiências de contagem alfa total

As contagens alfa calculados com a expressão 12 e seus erros obtidos por propagação para ^{241}Am em todos os detectores e em várias espessuras para o modelo LB 770-2 são mostradas no APÊNDICE A. No APÊNDICE B são mostrados os valores das contagens para ^{241}Am em todos os detectores e em várias espessuras para o modelo LB 770-2/5 calculadas com as mesmas expressões.

A partir das contagens apresentadas para ^{241}Am , foram calculadas as eficiências alfa e seus erros com as expressões 13 e 14 em todos os detectores e em várias espessuras para o modelo LB 770-2. Estas eficiências são mostradas no APÊNDICE H. No APÊNDICE I são mostrados os valores das eficiências e seus erros para ^{241}Am em todos os detectores e em várias espessuras para o modelo LB 770-2/5 calculadas com as expressões 13 e 14 a partir das contagens apresentadas.

As contagens alfa calculados com a expressão 12 e seus erros obtidos por propagação para U-natural em todos os detectores e em várias espessuras para o modelo LB 770-2/5 são mostrados no APÊNDICE C. Não foram realizadas medidas com U-natural no modelo LB 770-2 pois este modelo apresentou problemas no seu funcionamento antes de podermos realizar medidas com este padrão.

A partir das contagens apresentadas para U-natural, foram calculadas as eficiências alfa e seus erros com as expressões 13 e 14 em todos os detectores e em várias espessuras para o modelo LB 770-2/5. Estas eficiências são mostradas no APÊNDICE J.

Os valores obtidos para as eficiências do ^{241}Am foram colocados em gráficos nos quais apresentamos as curvas de calibração em eficiência alfa para este padrão (FIG. 13-21).

As equações de ajuste das curvas de calibração para ^{241}Am encontram-se na TAB. 9.

As incertezas utilizadas nas equações de ajuste associadas ao termo Y são as maiores incertezas calculadas percentualmente em relação aos pontos experimentais das curvas de calibração em eficiência.

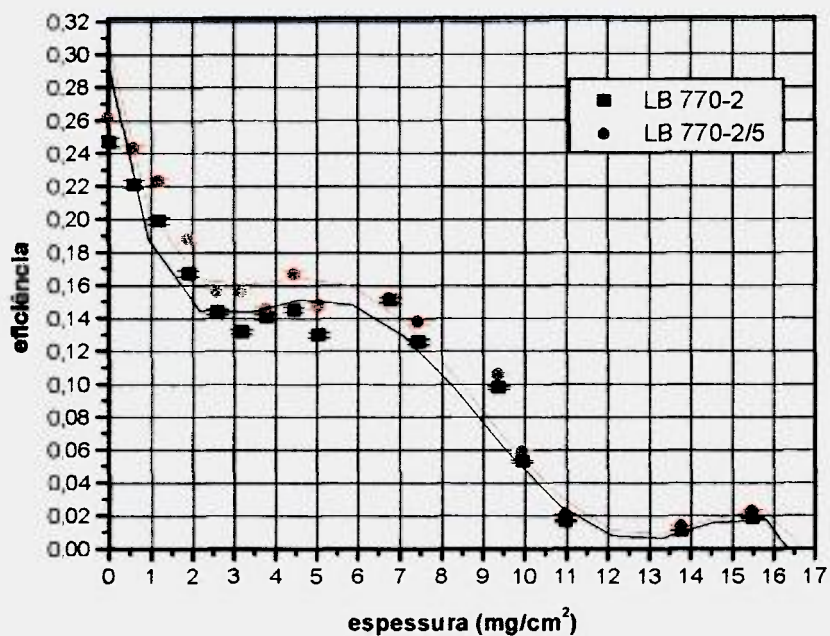


FIGURA 13 - Curvas de calibração em eficiência alfa para padrão de ²⁴¹Am nos detectores # 1 do LB 770-2 e do LB770-2/5.

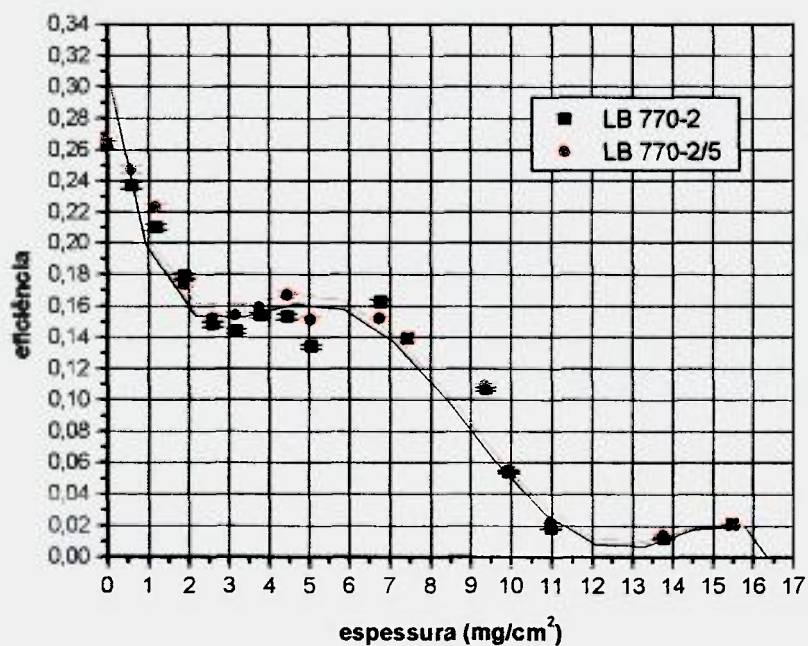


FIGURA 14 - Curvas de calibração em eficiência alfa para padrão de ²⁴¹Am nos detectores # 3 do LB 770-2 e do LB770-2/5.

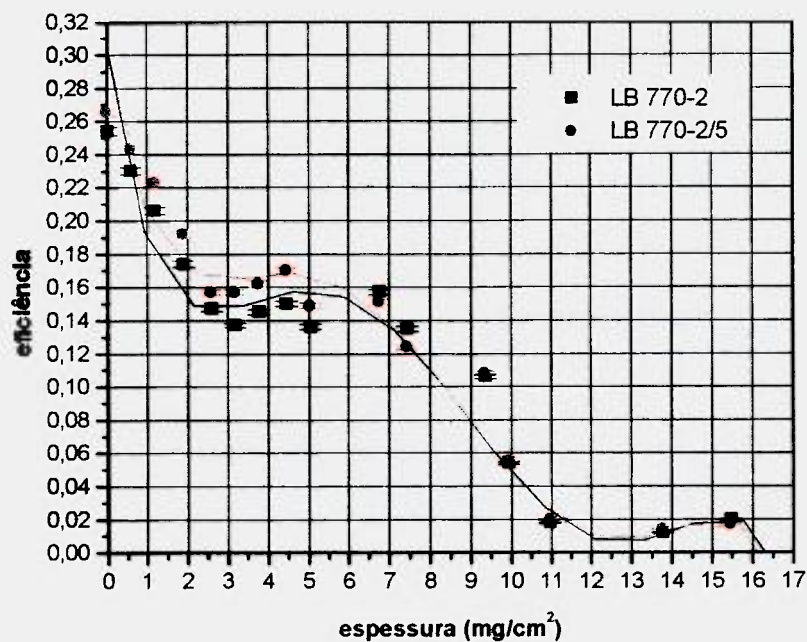


FIGURA 15 - Curvas de calibração em eficiência alfa para padrão de ^{241}Am nos detectores # 4 do LB 770-2 e do LB770-2/5.

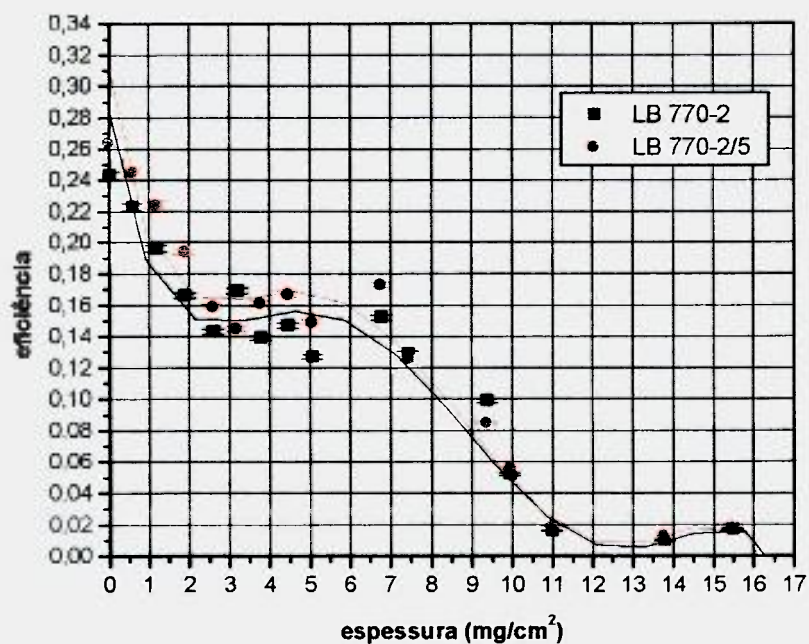


FIGURA 16 - Curvas de calibração em eficiência alfa para padrão de ^{241}Am nos detectores # 5 do LB 770-2 e do LB770-2/5.

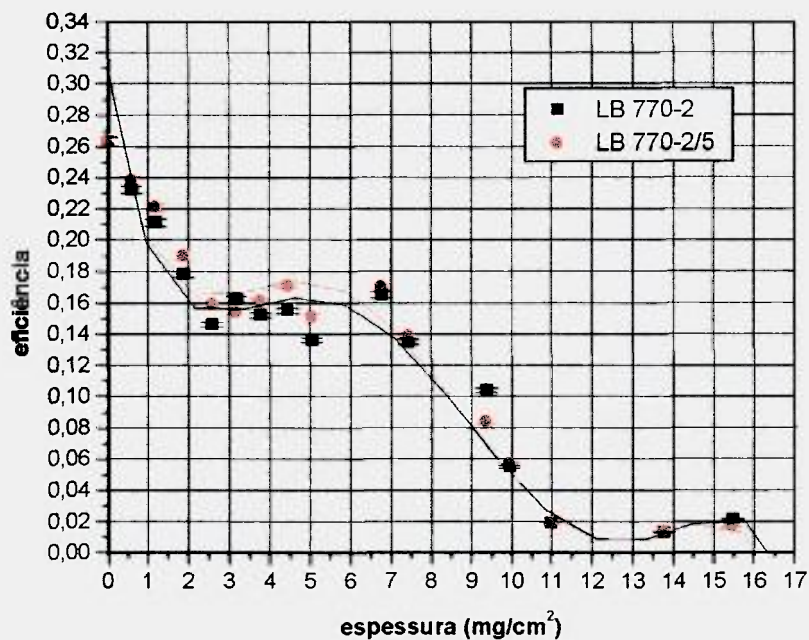


FIGURA 17 - Curvas de calibração em eficiência alfa para padrão de ^{241}Am nos detectores # 6 do LB 770-2 e do LB770-2/5.

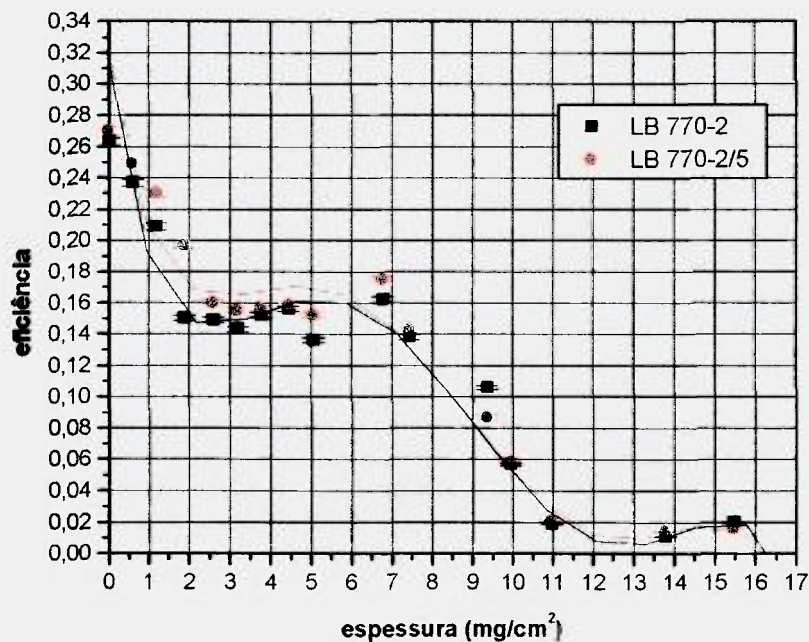


FIGURA 18 - Curvas de calibração em eficiência alfa para padrão de ^{241}Am nos detectores # 7 do LB 770-2 e do LB770-2/5.

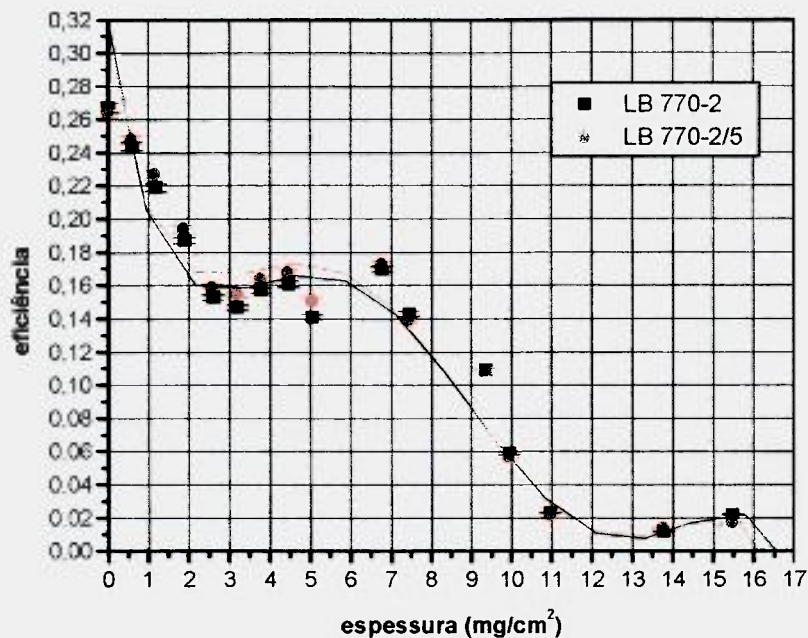


FIGURA 19 - Curvas de calibração em eficiência alfa para padrão de ²⁴¹Am nos detectores # 8 do LB 770-2 e do LB770-2/5.

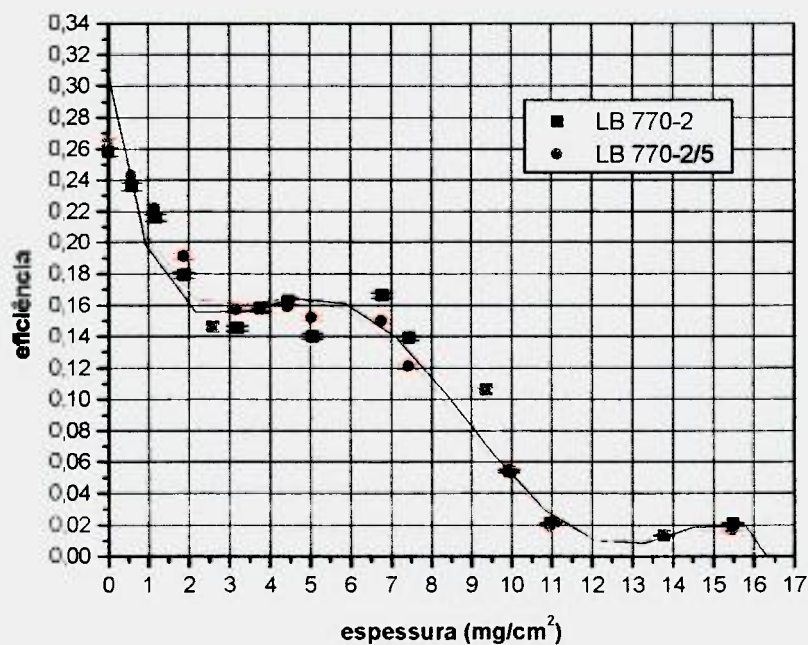


FIGURA 20 - Curvas de calibração em eficiência alfa para padrão de ²⁴¹Am nos detectores # 9 do LB 770-2 e do LB770-2/5.

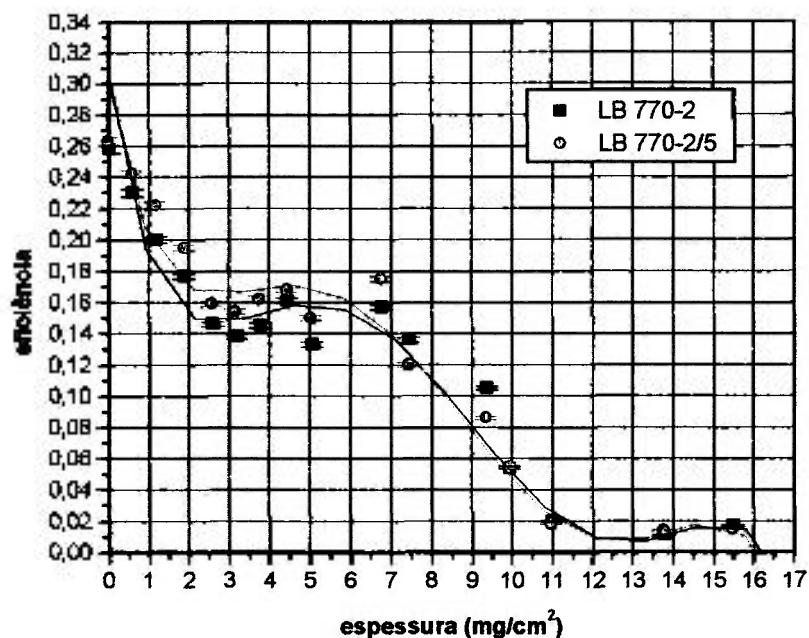


FIGURA 21 - Curvas de calibração em eficiência alfa para padrão de ^{241}Am nos detectores # 10 do LB 770-2 e do LB770-2/5.

As curvas de calibração obtidas com os padrões de U-natural para o sistema de contagem LB 770-2/5 são mostradas nas FIG. 22-31. As equações de ajuste das curvas de calibração para U-natural encontram-se na TAB. 10. Nas mesmas figuras comparamos estas curvas com as curvas de calibração com o padrão de ^{241}Am para o mesmo sistema de contagem.

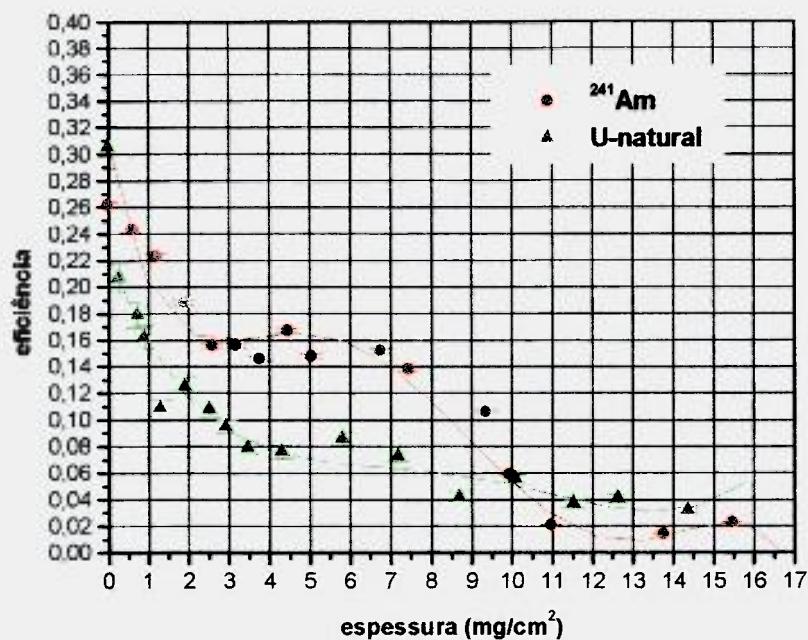


FIGURA 22 - Curvas de calibração em eficiência alfa com padrões de ²⁴¹Am e U-natural no detector # 1 do LB770-2/5.

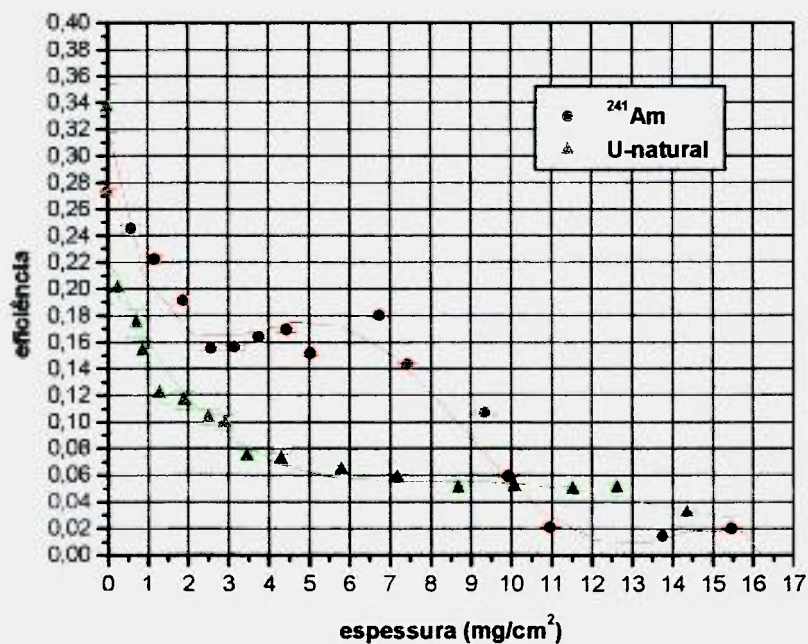


FIGURA 23 - Curvas de calibração em eficiência alfa com padrões de ²⁴¹Am e U-natural no detector # 2 do LB770-2/5.

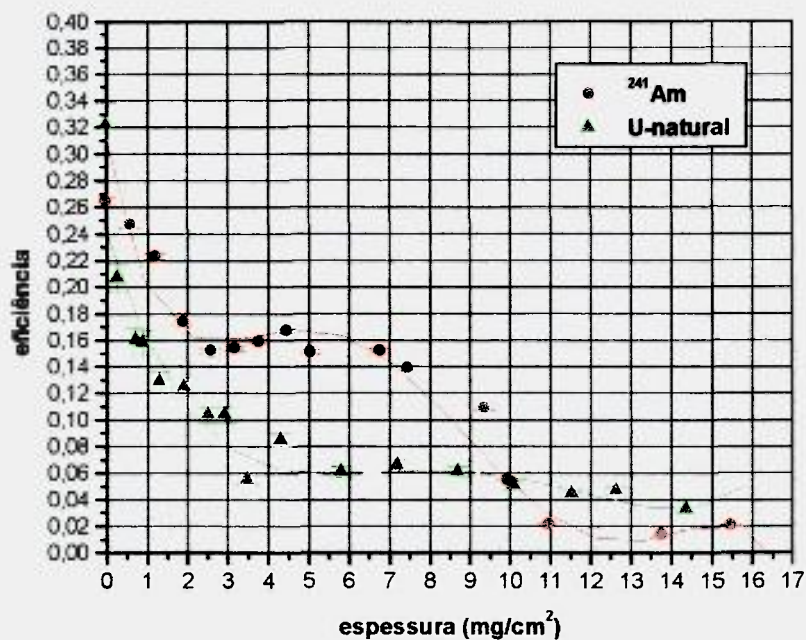


FIGURA 24 - Curvas de calibração em eficiência alfa com padrões de ²⁴¹Am e U-natural no detector # 3 do LB770-2/5.

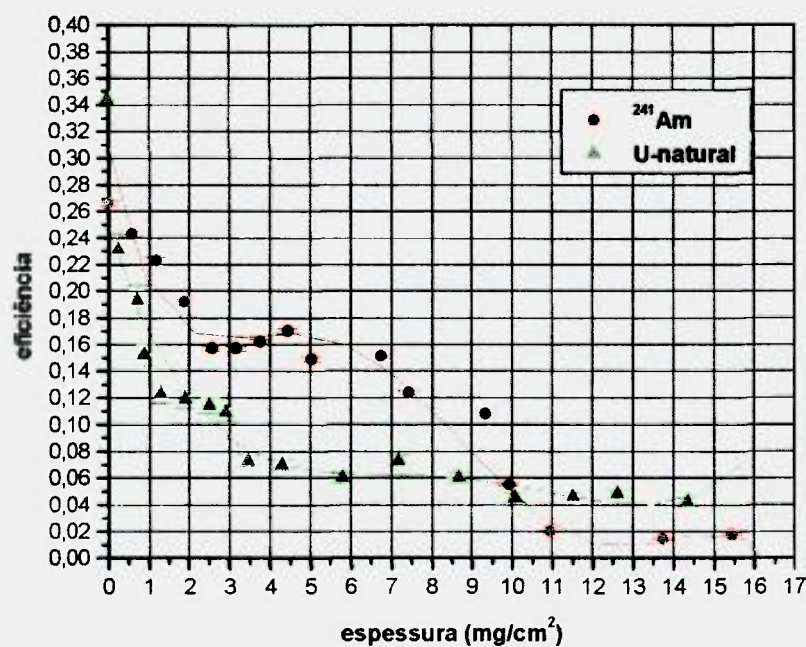


FIGURA 25 - Curvas de calibração em eficiência alfa com padrões de ²⁴¹Am e U-natural no detector # 4 do LB770-2/5.

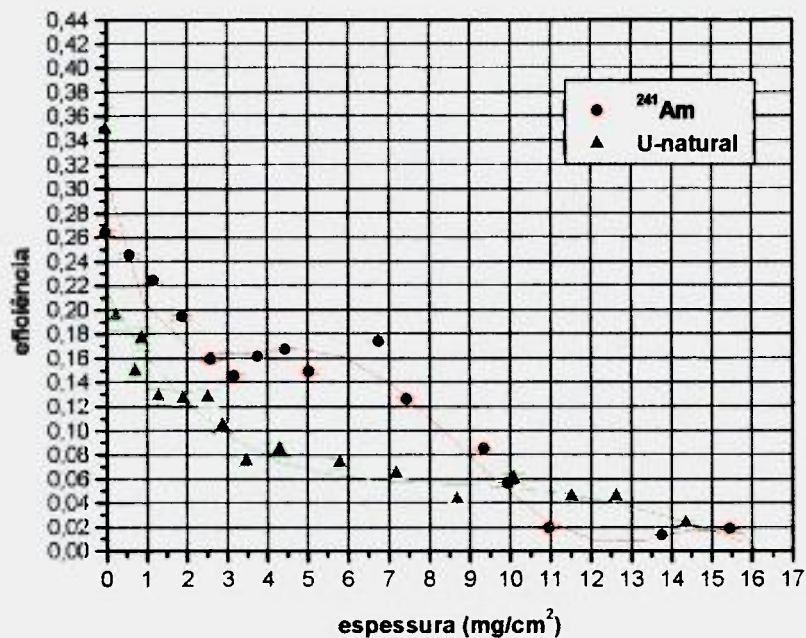


FIGURA 26 - Curvas de calibração em eficiência alfa com padrões de ²⁴¹Am e U-natural no detector # 5 do LB770-2/5.

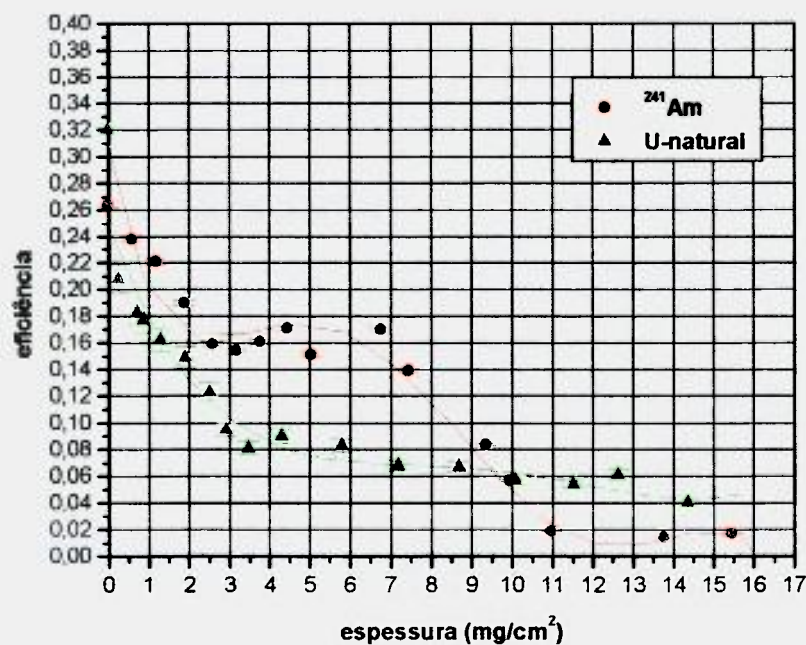


FIGURA 27 - Curvas de calibração em eficiência alfa com padrões de ²⁴¹Am e U-natural no detector # 6 do LB770-2/5.

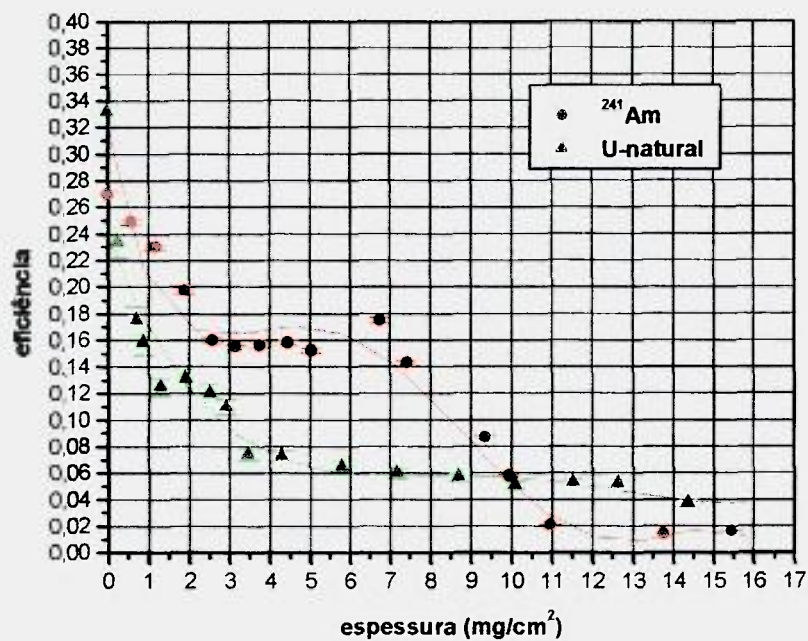


FIGURA 28 - Curvas de calibração em eficiência alfa com padrões de ²⁴¹Am e U-natural no detector # 7 do LB770-2/5.

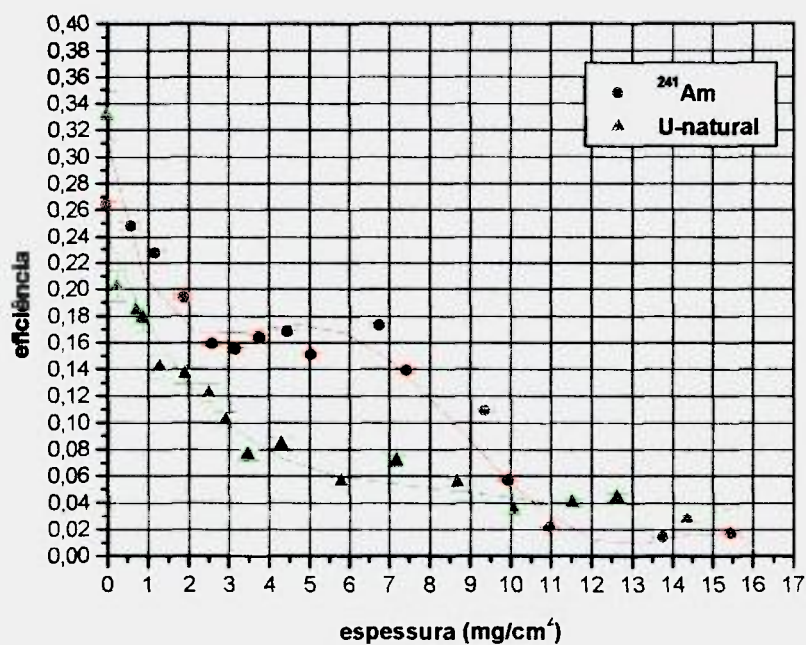


FIGURA 29 - Curvas de calibração em eficiência alfa com padrões de ²⁴¹Am e U-natural no detector # 8 do LB770-2/5.

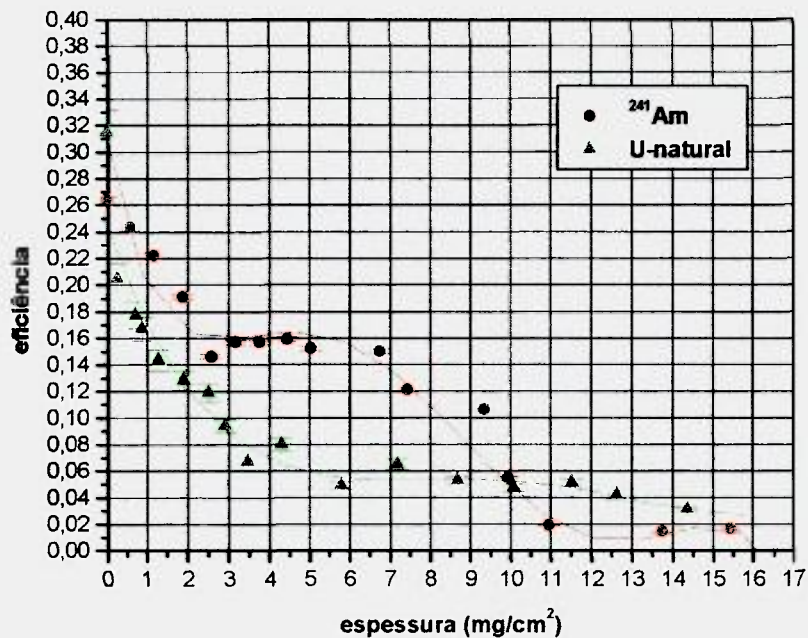


FIGURA 30 - Curvas de calibração em eficiência alfa com padrões de ²⁴¹Am e U-natural no detector # 9 do LB770-2/5.

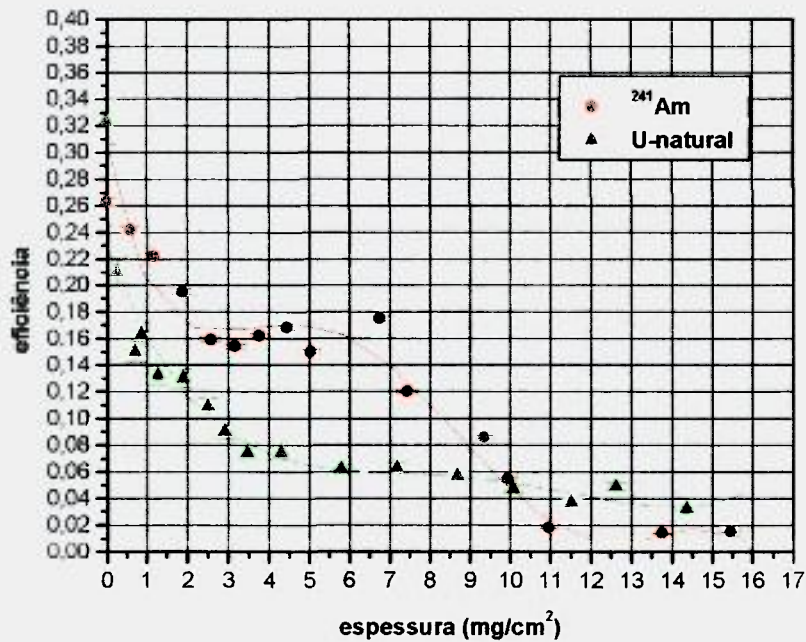


FIGURA 31 - Curvas de calibração em eficiência alfa com padrões de ²⁴¹Am e U-natural no detector # 10 do LB770-2/5.

TABELA 9. Equações de ajuste das curvas de calibração para ^{241}Am .

Radioisótopo	Sistema de contagem	Detector	Figura	Equação de ajuste
^{241}Am	LB 770-2	1	13	$Y = 0,280 \pm 0,028 - 0,139 \pm 0,032 X + 0,049 \pm 0,012 X^2 - 0,007 \pm 0,002 X^3 + 4,605E-4 \pm 1,144E-4 X^4 - 1,026E-5 \pm 2,657E-6 X^5$
		3	14	$Y = 0,299 \pm 0,031 - 0,149 \pm 0,036 X + 0,053 \pm 0,013 X^2 - 0,008 \pm 0,002 X^3 + 4,992E-4 \pm 1,268E-4 X^4 - 1,115E-5 \pm 2,937E-6 X^5$
		4	15	$Y = 0,289 \pm 0,029 - 0,145 \pm 0,034 X + 0,052 \pm 0,013 X^2 - 0,008 \pm 0,002 X^3 + 4,888E-4 \pm 1,224E-4 X^4 - 1,092E-5 \pm 2,840E-6 X^5$
		5	16	$Y = 0,272 \pm 0,029 - 0,126 \pm 0,034 X + 0,045 \pm 0,013 X^2 - 0,007 \pm 0,002 X^3 + 4,362E-4 \pm 1,226E-4 X^4 - 9,789E-6 \pm 2,848E-6 X^5$
		6	17	$Y = 0,294 \pm 0,029 - 0,142 \pm 0,034 X + 0,051 \pm 0,013 X^2 - 0,008 \pm 0,002 X^3 + 4,862E-4 \pm 1,198E-4 X^4 - 1,090E-5 \pm 2,776E-6 X^5$
		7	18	$Y = 0,298 \pm 0,028 - 0,158 \pm 0,033 X + 0,056 \pm 0,012 X^2 - 0,008 \pm 0,002 X^3 + 5,289E-4 \pm 1,159E-4 X^4 - 1,177E-5 \pm 2,685E-6 X^5$
		8	19	$Y = 0,304 \pm 0,029 - 0,146 \pm 0,035 X + 0,051 \pm 0,013 X^2 - 0,008 \pm 0,002 X^3 + 4,755E-4 \pm 1,225E-4 X^4 - 1,052E-5 \pm 2,836E-6 X^5$
		9	20	$Y = 0,295 \pm 0,029 - 0,144 \pm 0,034 X + 0,051 \pm 0,013 X^2 - 0,008 \pm 0,002 X^3 + 4,946E-4 \pm 1,194E-4 X^4 - 1,107E-5 \pm 2,767E-6 X^5$
		10	21	$Y = 0,291 \pm 0,028 - 0,146 \pm 0,033 X + 0,052 \pm 0,012 X^2 - 0,008 \pm 0,002 X^3 + 4,883E-4 \pm 1,164E-4 X^4 - 1,090E-5 \pm 2,700E-6 X^5$
		1	13	$Y = 0,296 \pm 0,028 - 0,133 \pm 0,032 X + 0,046 \pm 0,012 X^2 - 0,007 \pm 0,002 X^3 + 4,315E-4 \pm 1,199E-4 X^4 - 9,555E-6 \pm 2,815E-6 X^5$
	3	14	$Y = 0,299 \pm 0,026 - 0,141 \pm 0,031 X + 0,049 \pm 0,011 X^2 - 0,007 \pm 0,002 X^3 + 4,725E-4 \pm 1,137E-4 X^4 - 1,054E-5 \pm 2,668E-6 X^5$	
	4	15	$Y = 0,296 \pm 0,028 - 0,129 \pm 0,032 X + 0,046 \pm 0,012 X^2 - 0,007 \pm 0,002 X^3 + 4,479E-4 \pm 1,169E-4 X^4 - 1,014E-5 \pm 2,732E-6 X^5$	
	5	16	$Y = 0,300 \pm 0,026 - 0,138 \pm 0,030 X + 0,049 \pm 0,011 X^2 - 0,007 \pm 0,002 X^3 + 4,845E-4 \pm 1,064E-4 X^4 - 1,097E-5 \pm 2,469E-6 X^5$	
	6	17	$Y = 0,296 \pm 0,024 - 0,139 \pm 0,028 X + 0,051 \pm 0,010 X^2 - 0,008 \pm 0,002 X^3 + 5,136E-4 \pm 1,006E-4 X^4 - 1,169E-5 \pm 2,350E-6 X^5$	
	7	18	$Y = 0,309 \pm 0,026 - 0,144 \pm 0,031 X + 0,051 \pm 0,011 X^2 - 0,008 \pm 0,002 X^3 + 4,891E-4 \pm 1,132E-4 X^4 - 1,102E-5 \pm 2,651E-6 X^5$	
	8	19	$Y = 0,301 \pm 0,029 - 0,137 \pm 0,034 X + 0,049 \pm 0,013 X^2 - 0,007 \pm 0,002 X^3 + 4,766E-4 \pm 1,266E-4 X^4 - 1,072E-5 \pm 2,966E-6 X^5$	
	9	20	$Y = 0,297 \pm 0,029 - 0,136 \pm 0,033 X + 0,048 \pm 0,012 X^2 - 0,007 \pm 0,002 X^3 + 4,669E-4 \pm 1,189E-4 X^4 - 1,057E-5 \pm 2,783E-6 X^5$	
	10	21	$Y = 0,295 \pm 0,026 - 0,133 \pm 0,031 X + 0,048 \pm 0,011 X^2 - 0,007 \pm 0,002 X^3 + 4,837E-4 \pm 1,102E-4 X^4 - 1,106E-5 \pm 2,577E-6 X^5$	

Y: eficiência; incerteza: 2,9 %

X: espessura (mg/cm^2)

TABELA 10. Equações de ajuste das curvas de calibração para U-natural.

Radioisótopo	Sistema de contagem	Detector	Figura	Equação de ajuste
U-natural	LB 770-2/5	1	22	$Y = 0,219 \pm 0,023 - 0,073 \pm 0,019 X + 0,013 \pm 0,005 X^2 - 0,001 \pm 4,579E-4 X^3 + 2,988E-5 \pm 1,469E-5 X^4$
		2	23	$Y = 0,219 \pm 0,017 - 0,070 \pm 0,014 X + 0,011 \pm 0,004 X^2 - 7,357E-4 \pm 3,350E-4 X^3 + 1,709E-5 \pm 1,072E-5 X^4$
		3	24	$Y = 0,238 \pm 0,022 - 0,094 \pm 0,017 X + 0,017 \pm 0,004 X^2 - 0,001 \pm 4,399E-4 X^3 + 3,677E-5 \pm 1,419E-5 X^4$
		4	25	$Y = 0,244 \pm 0,021 - 0,091 \pm 0,017 X + 0,017 \pm 0,004 X^2 - 0,001 \pm 4,257E-4 X^3 + 3,683E-5 \pm 1,375E-5 X^4$
		5	26	$Y = 0,214 \pm 0,023 - 0,061 \pm 0,019 X + 0,009 \pm 0,005 X^2 - 5,286E-4 \pm 4,698E-4 X^3 + 1,084E-5 \pm 1,505E-5 X^4$
		6	27	$Y = 0,246 \pm 0,017 - 0,079 \pm 0,013 X + 0,013 \pm 0,004 X^2 - 9,522E-4 \pm 3,482E-4 X^3 + 2,432E-5 \pm 1,131E-5 X^4$
		7	28	$Y = 0,236 \pm 0,019 - 0,078 \pm 0,015 X + 0,012 \pm 0,004 X^2 - 8,384E-4 \pm 3,680E-4 X^3 + 2,011E-5 \pm 1,190E-5 X^4$
		8	29	$Y = 0,238 \pm 0,022 - 0,075 \pm 0,018 X + 0,012 \pm 0,004 X^2 - 8,242E-4 \pm 4,361E-4 X^3 + 2,122E-5 \pm 1,395E-5 X^4$
		9	30	$Y = 0,242 \pm 0,017 - 0,084 \pm 0,013 X + 0,013 \pm 0,003 X^2 - 9,122E-4 \pm 3,232E-4 X^3 + 2,175E-5 \pm 1,034E-5 X^4$
		10	31	$Y = 0,226 \pm 0,017 - 0,077 \pm 0,014 X + 0,013 \pm 0,004 X^2 - 9,869E-4 \pm 3,511E-4 X^3 + 2,611E-5 \pm 1,132E-5 X^4$

Y: eficiência; incerteza: 8,6 %

X: espessura (mg/cm^2)

5.4 Eficiências de contagem beta total

As contagens beta calculadas com a expressão 12 e seus erros obtidos por propagação para $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ em todos os detectores e em várias espessuras para o modelo LB 770-2 são mostradas no APÊNDICE D. No APÊNDICE E são mostrados os valores das contagens para $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ em todos os detectores e em várias espessuras para o modelo LB 770-2/5 calculadas com a expressão 12 e seus erros obtidos por propagação.

A partir das contagens apresentadas para $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, foram calculadas as eficiências beta e seus erros com as expressões 15 e 16 em todos os detectores e em várias espessuras para o modelo LB 770-2. Estas eficiências são mostradas no APÊNDICE L. No APÊNDICE M são mostrados os valores das eficiências para $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ em todos os detectores e em várias espessuras para o modelo LB 770-2/5 calculadas com as expressões 15 e 16 a partir das contagens apresentadas.

As contagens beta calculadas com a expressão 12 e seus erros obtidos por propagação para ^{137}Cs em todos os detectores e em várias espessuras para o modelo LB 770-2 são mostradas no APÊNDICE F. No APÊNDICE G são mostrados os valores das contagens para ^{137}Cs em todos os detectores e em várias espessuras para o modelo LB 770-2/5 calculadas com a expressão 12 e seus erros obtidos por propagação.

A partir das contagens apresentadas para ^{137}Cs , foram calculadas as eficiências beta e seus erros com as expressões 15 e 16 em todos os detectores e em várias espessuras para o modelo LB 770-2. Estas eficiências são mostradas no APÊNDICE N. No APÊNDICE O são mostrados os valores das eficiências para ^{137}Cs em todos os detectores e em várias espessuras para o modelo LB 770-2/5 calculadas com as expressões 15 e 16 a partir das contagens apresentadas.

Os valores obtidos para as eficiências do $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ foram colocados em gráficos nos quais apresentamos as curvas de calibração em eficiência beta para este padrão (FIG. 32-40). As equações de ajuste das curvas de calibração para $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ encontram-se na TAB. 11.

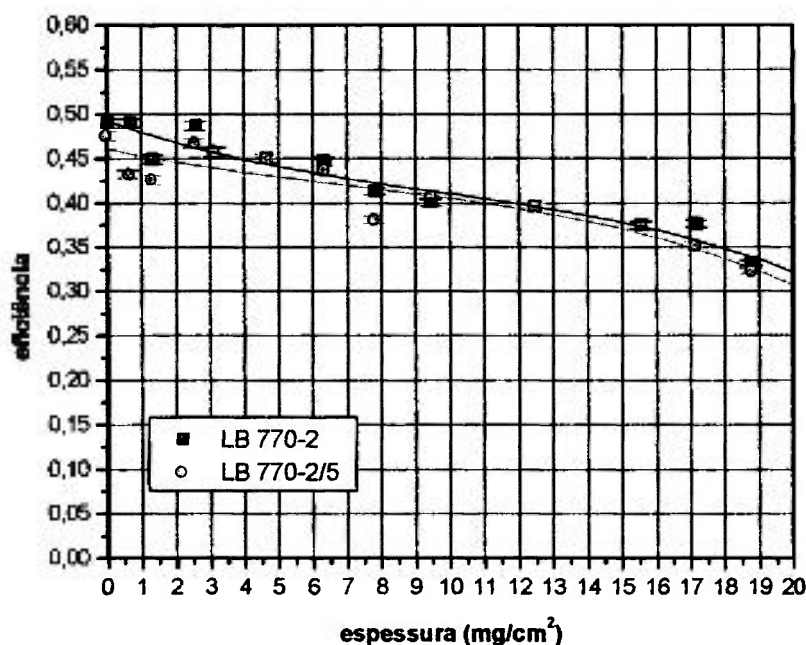


FIGURA 32 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ nos detectores # 1 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

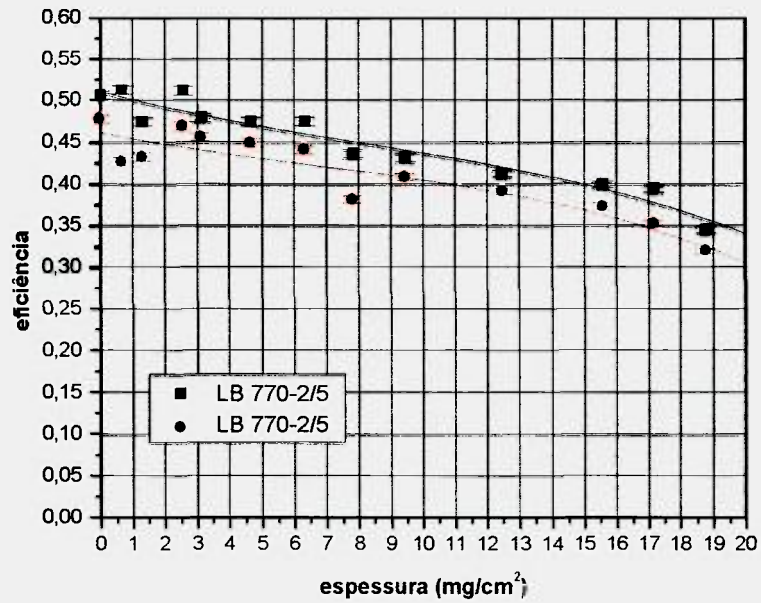


FIGURA 33 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ nos detectores # 3 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

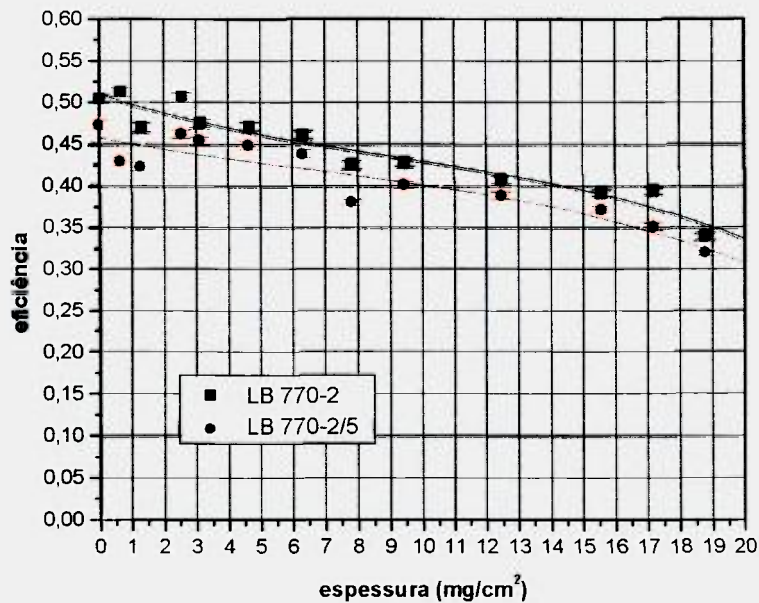


FIGURA 34 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ nos detectores # 4 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

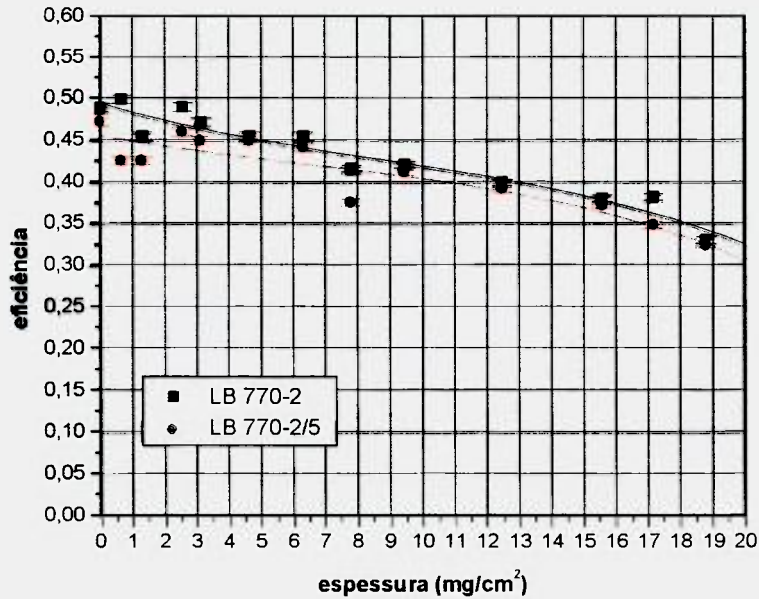


FIGURA 35 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ nos detectores # 5 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

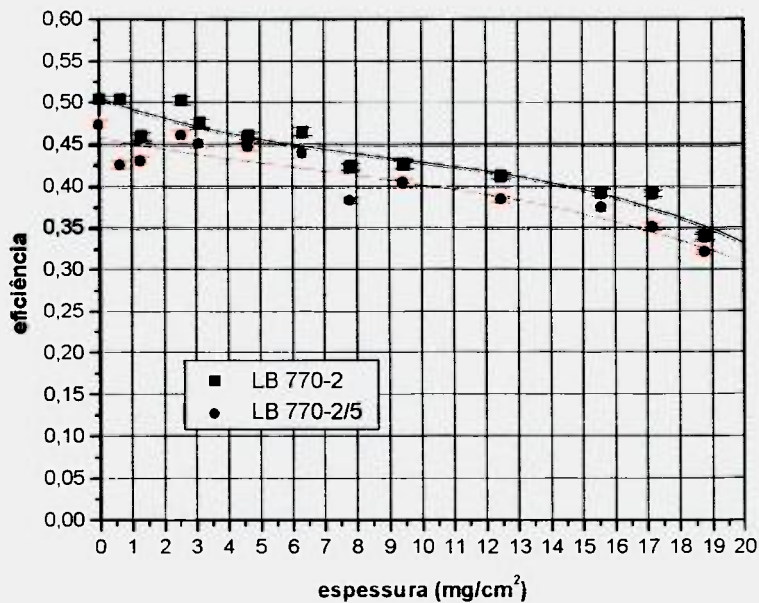


FIGURA 36 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ nos detectores # 6 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

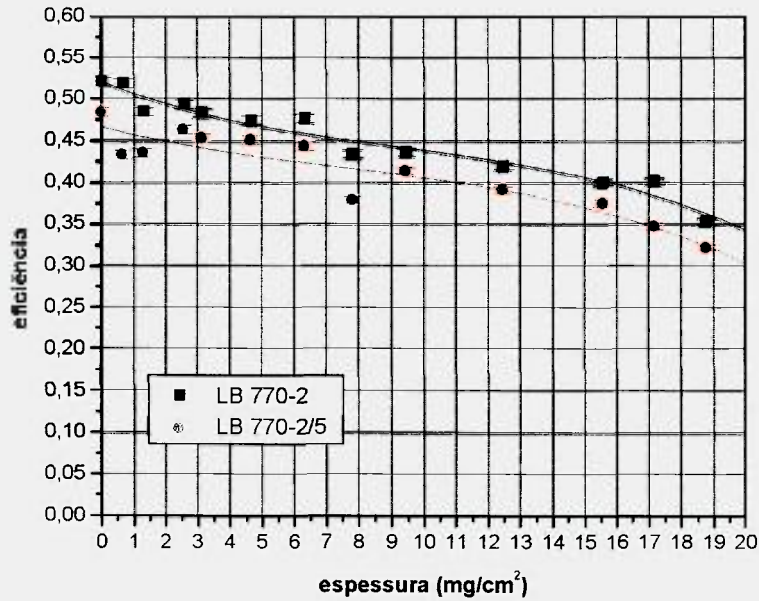


FIGURA 37 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ nos detectores # 7 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

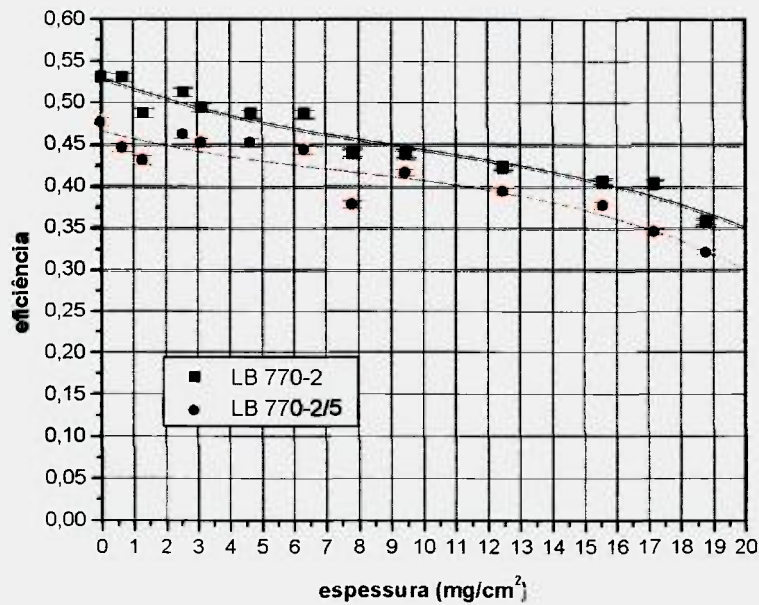


FIGURA 38 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ nos detectores # 8 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

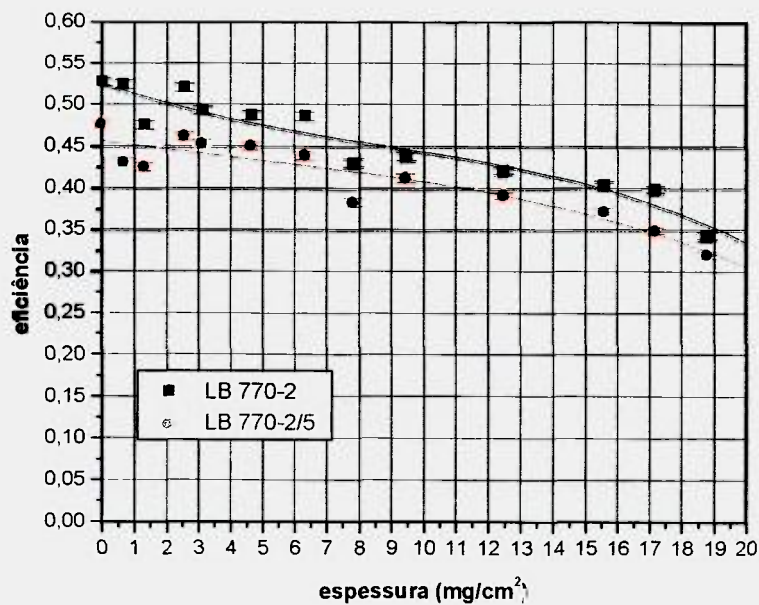


FIGURA 39 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ nos detectores # 9 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

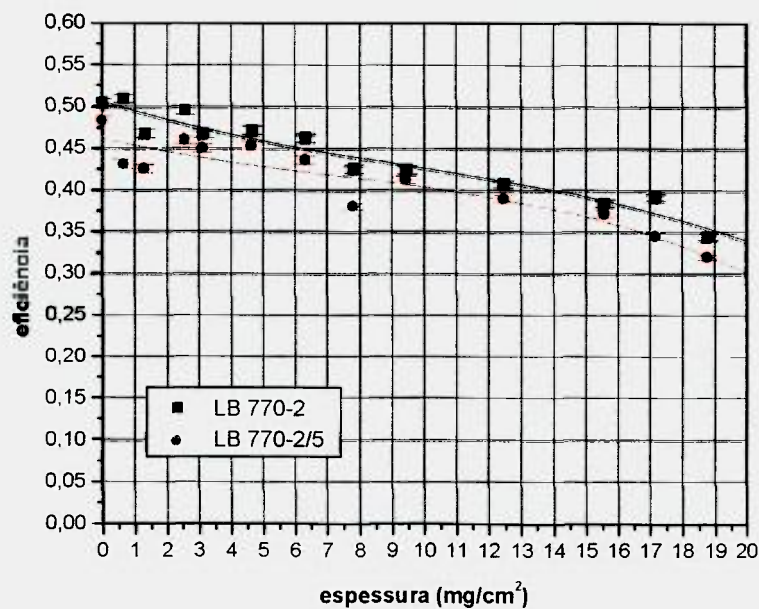


FIGURA 40 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ nos detectores # 10 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

Nas FIG. 41-49 apresentamos as curvas de calibração em eficiência beta para padrão de ^{137}Cs . As equações de ajuste das curvas de calibração para ^{137}Cs encontram-se na TAB. 12.

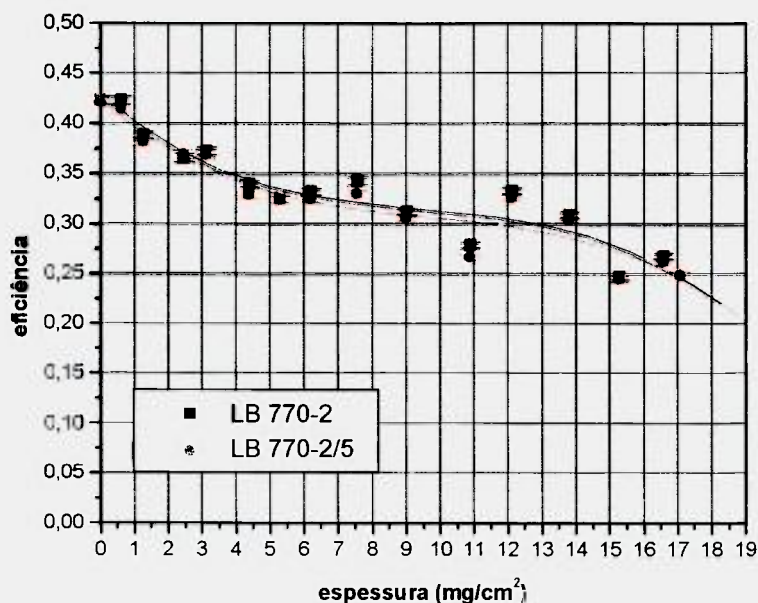


FIGURA 41 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de ^{137}Cs nos detectores # 1 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

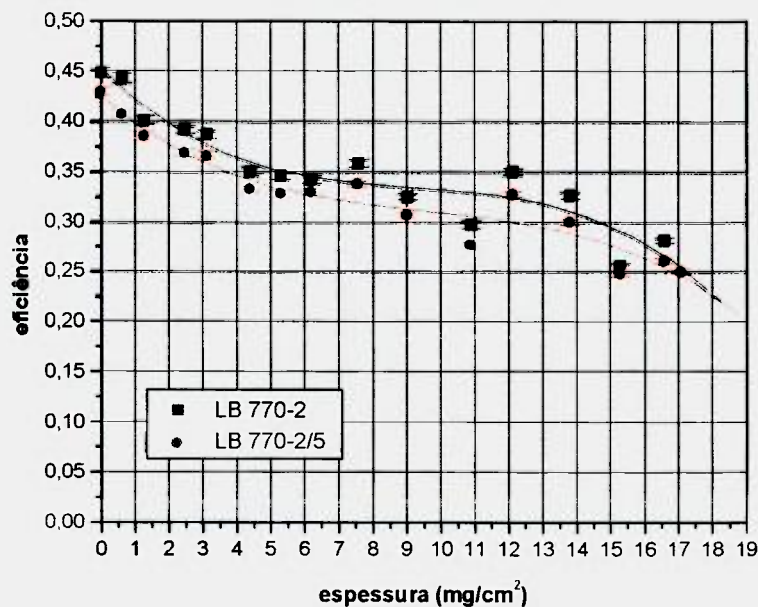


FIGURA 42 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de ^{137}Cs nos detectores # 3 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

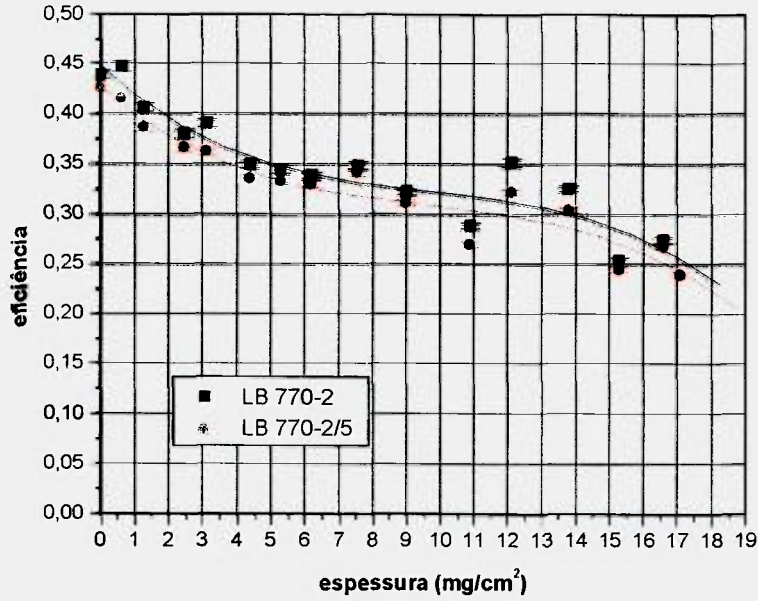


FIGURA 43 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de ¹³⁷Cs nos detectores # 4 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

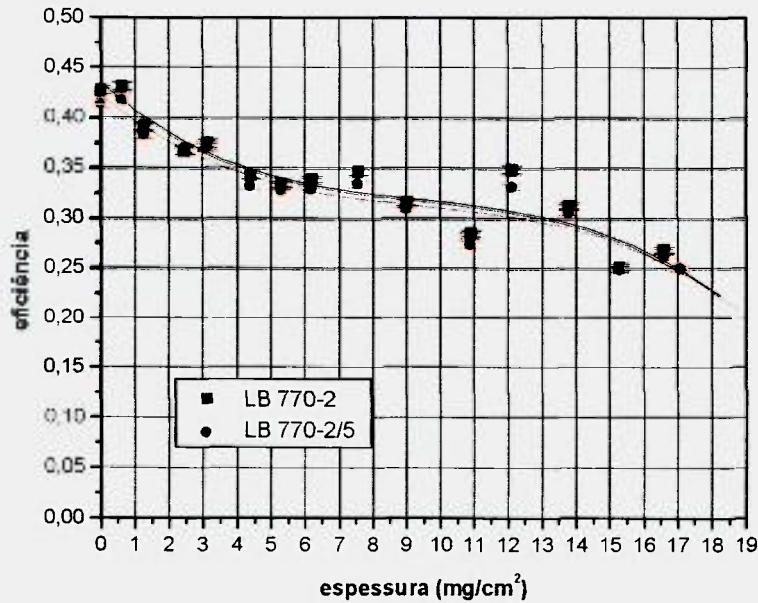


FIGURA 44 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de ¹³⁷Cs nos detectores # 5 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

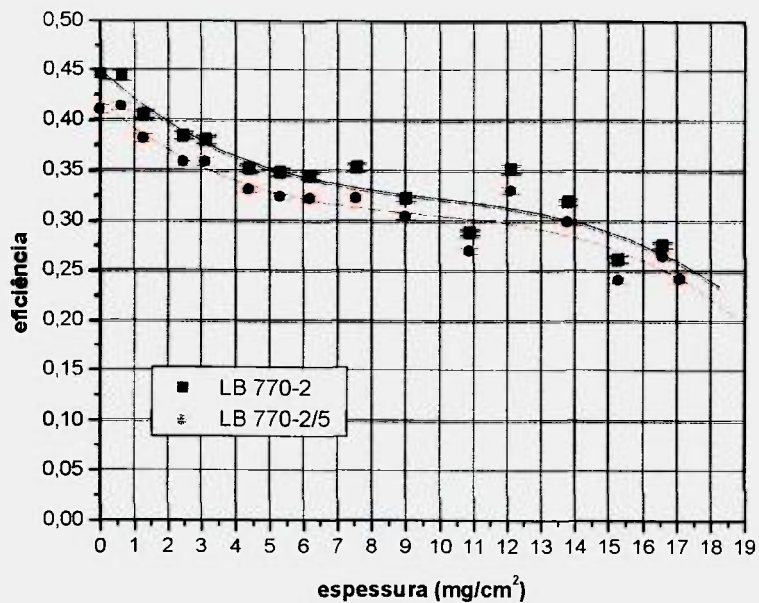


FIGURA 45 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de ^{137}Cs nos detectores # 6 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

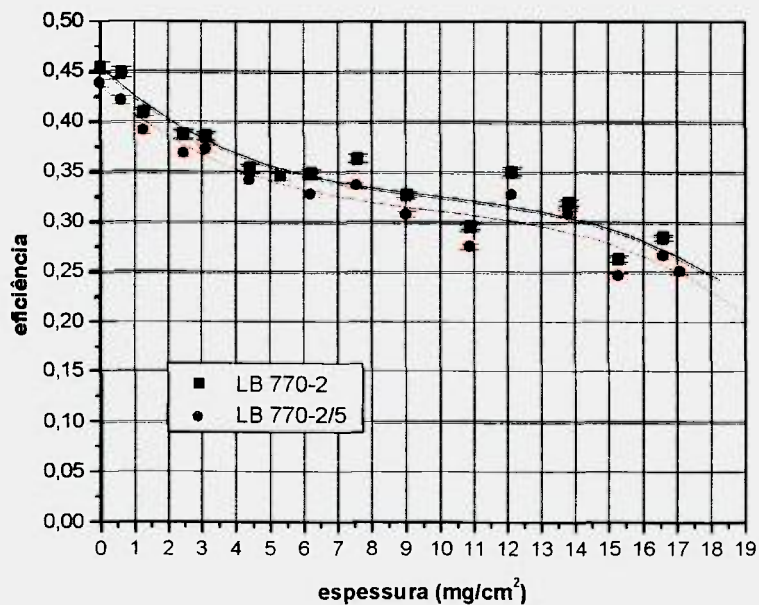


FIGURA 46 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de ^{137}Cs nos detectores # 7 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

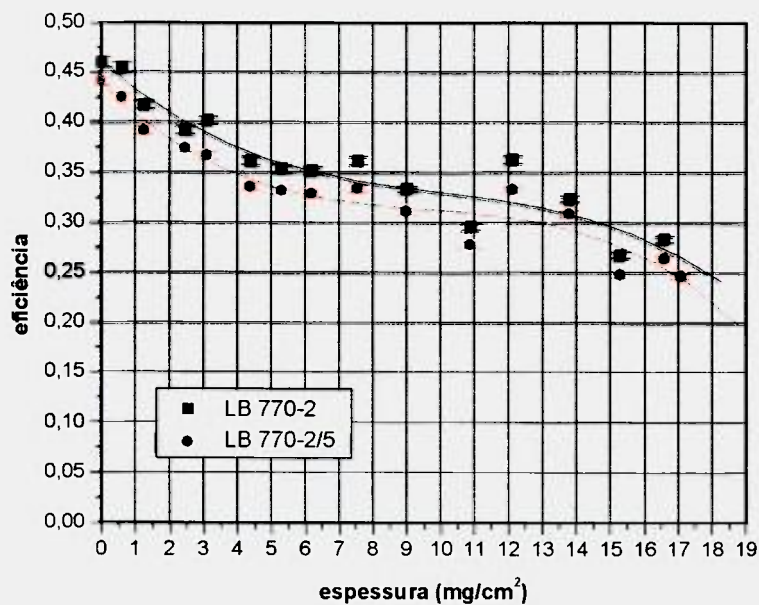


FIGURA 47 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de ¹³⁷Cs nos detectores # 8 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

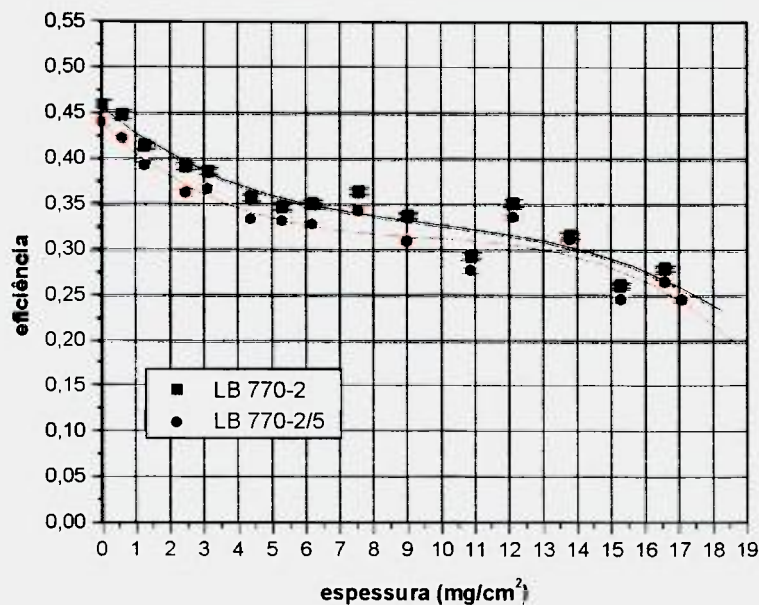


FIGURA 48 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de ¹³⁷Cs nos detectores # 9 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

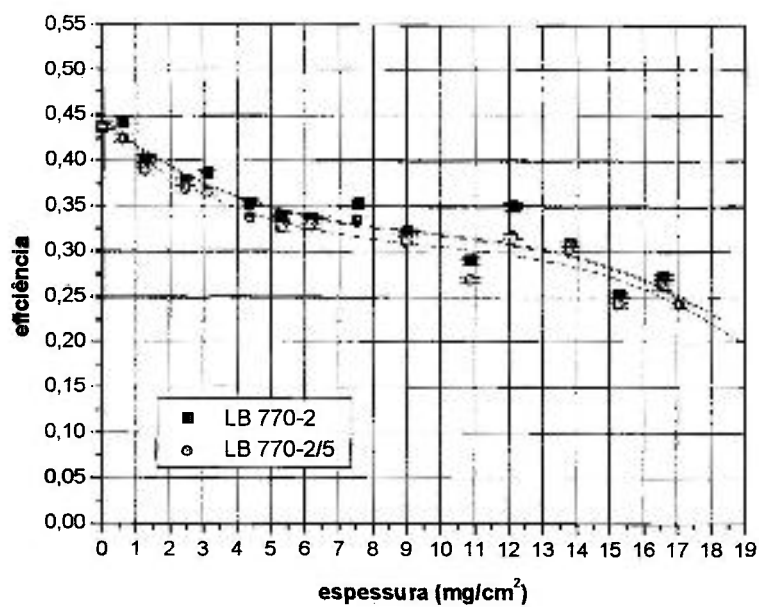


FIGURA 49 - Curvas de calibração em eficiência beta para padrão de ^{137}Cs nos detectores # 10 do LB 770-2 e do LB 770-2/5.

As curvas de calibração obtidas com os padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e de ^{137}Cs foram comparadas quanto a seus resultados nas FIG. 50-68.

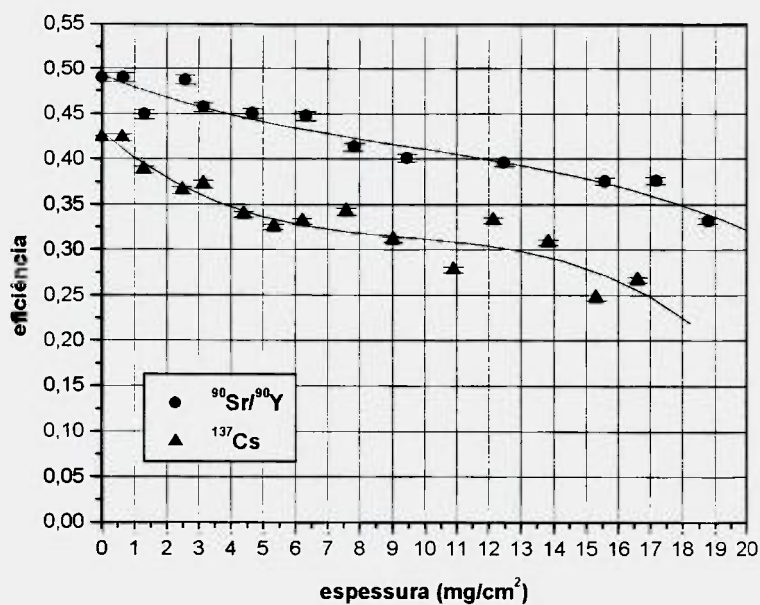


FIGURA 50 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de ⁹⁰Sr/⁹⁰Y e ¹³⁷Cs no detector # 1 do LB 770-2.

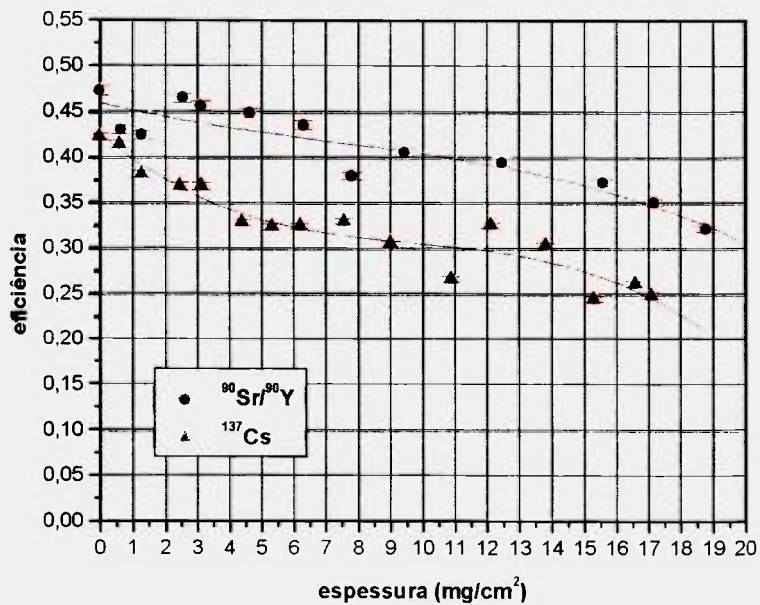


FIGURA 51 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de ⁹⁰Sr/⁹⁰Y e ¹³⁷Cs no detector # 1 do LB 770-2/5.

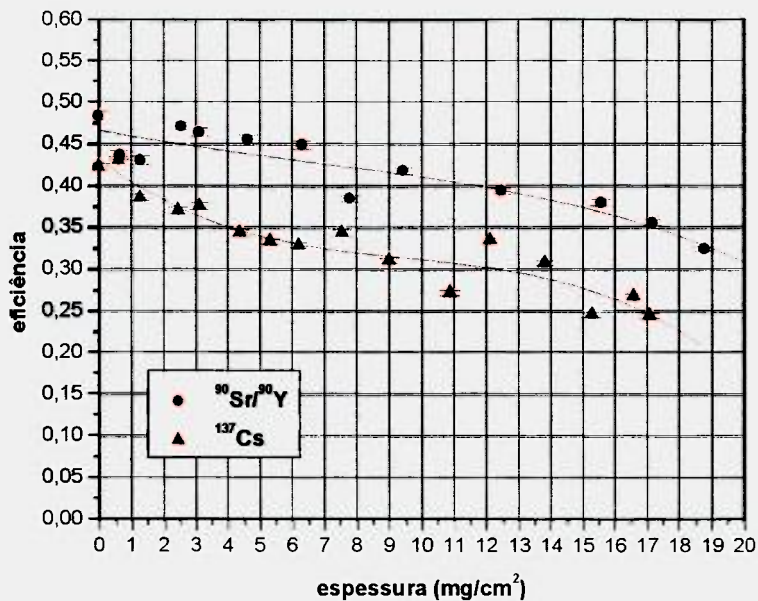


FIGURA 52 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs no detector # 2 do LB 770-2/5.

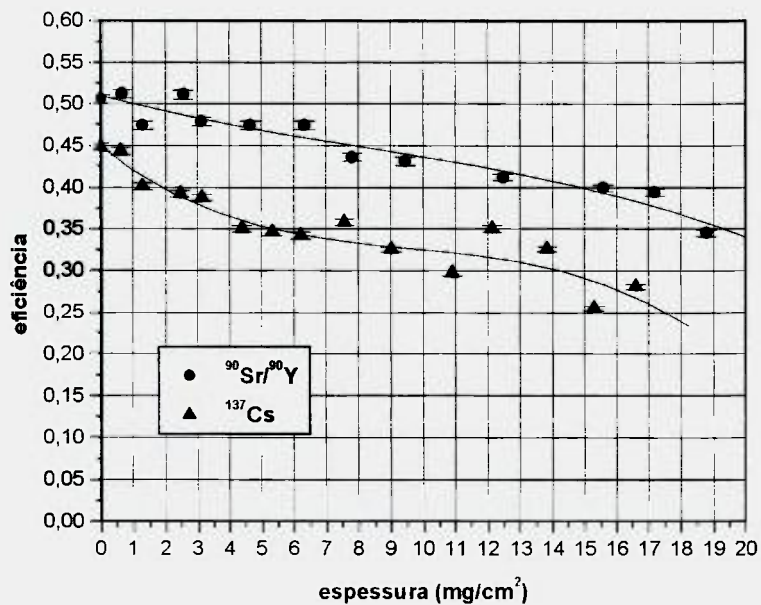


FIGURA 53 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs no detector # 3 do LB 770-2.

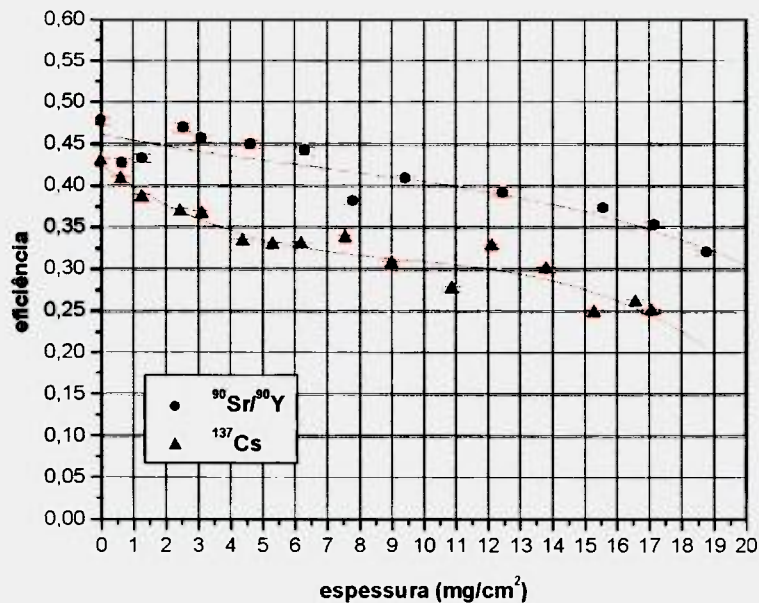


FIGURA 54 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs no detector # 3 do LB 770-2/5.

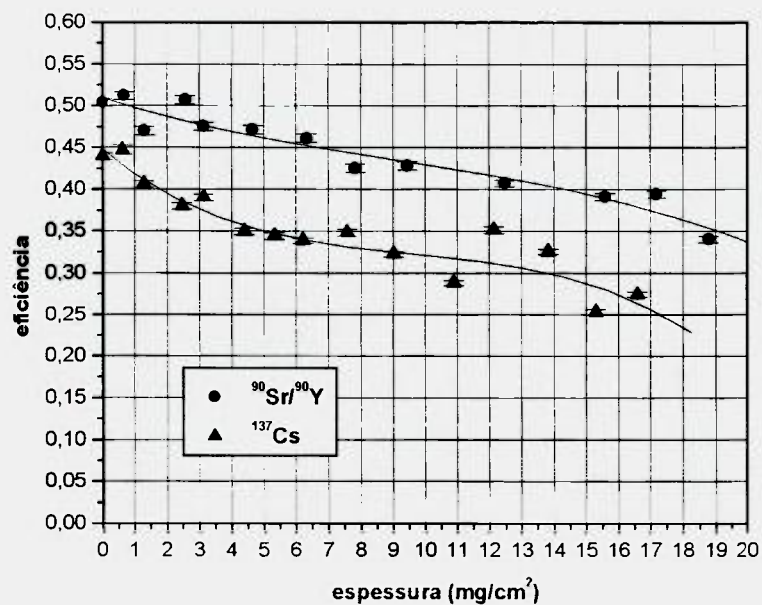


FIGURA 55 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs no detector # 4 do LB 770-2.

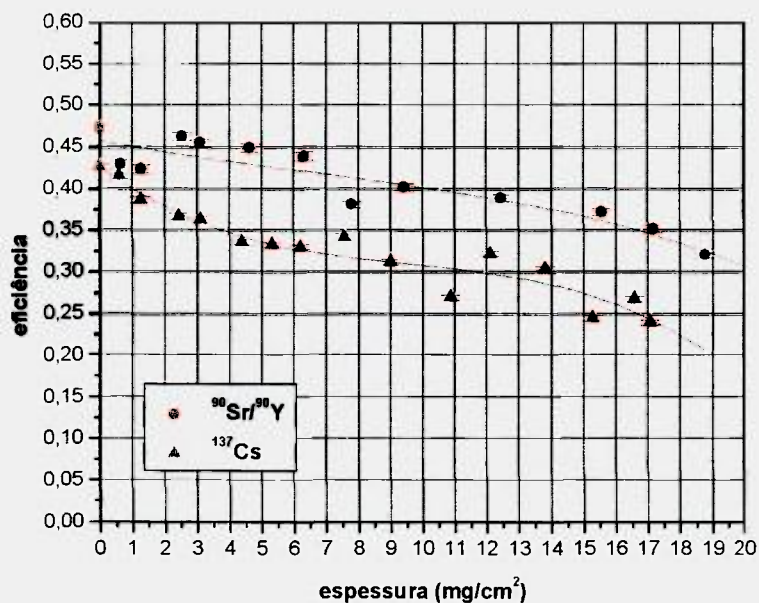


FIGURA 56 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs no detector # 4 do LB 770-2/5.

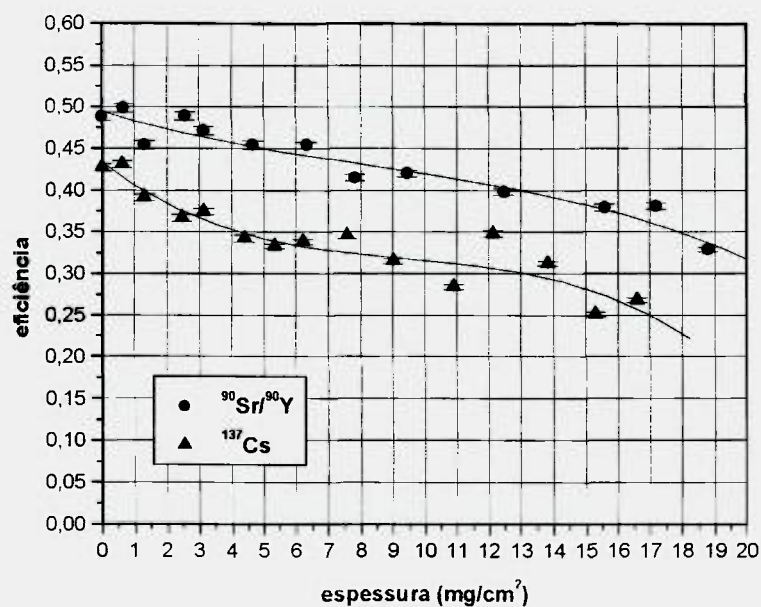


FIGURA 57 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs no detector # 5 do LB 770-2.

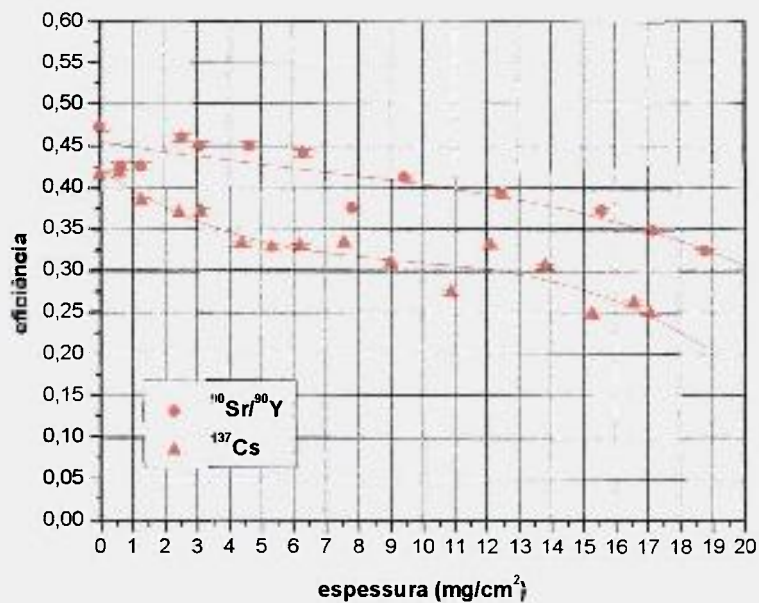


FIGURA 58 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs no detector # 5 do LB 770-2/5.

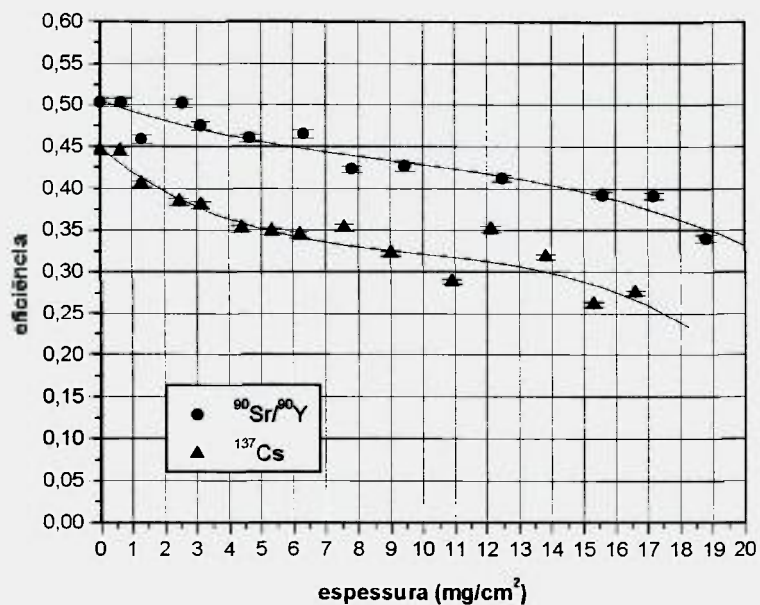


FIGURA 59 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs no detector # 6 do LB 770-2.

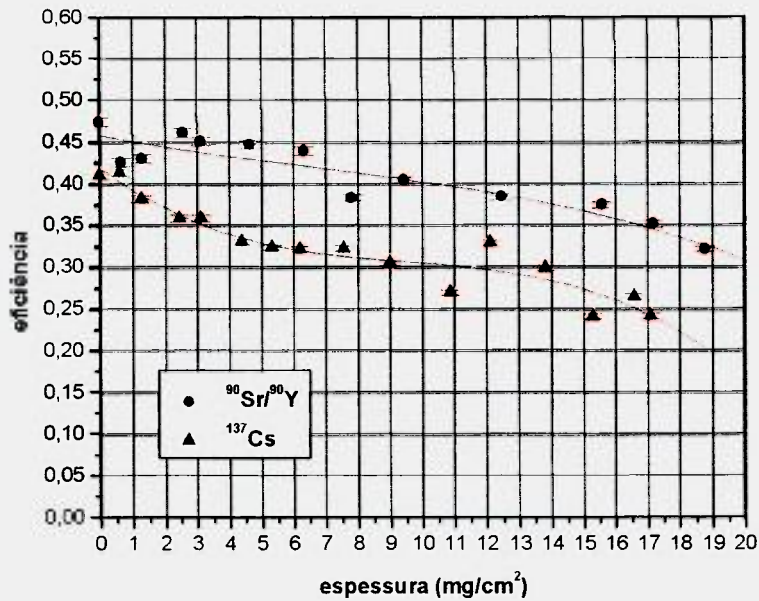


FIGURA 60 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs no detector # 6 do LB 770-2/5.

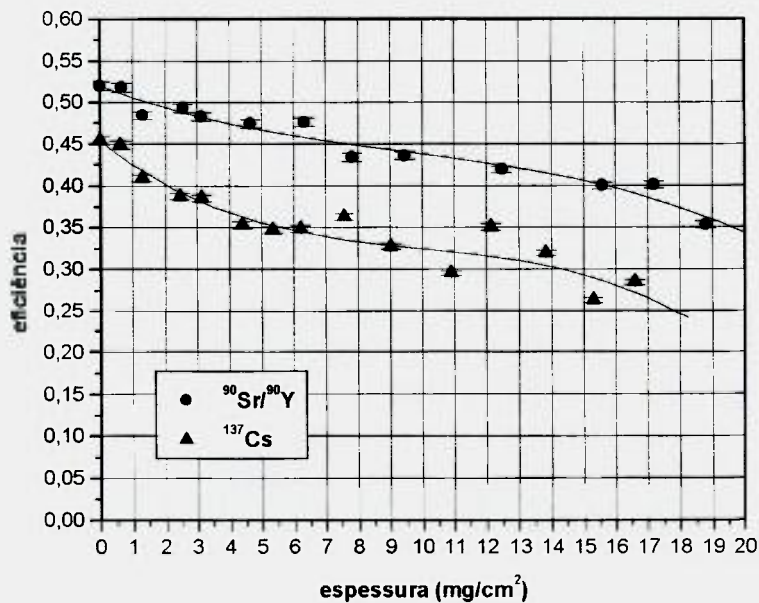


FIGURA 61 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs no detector # 7 do LB 770-2.

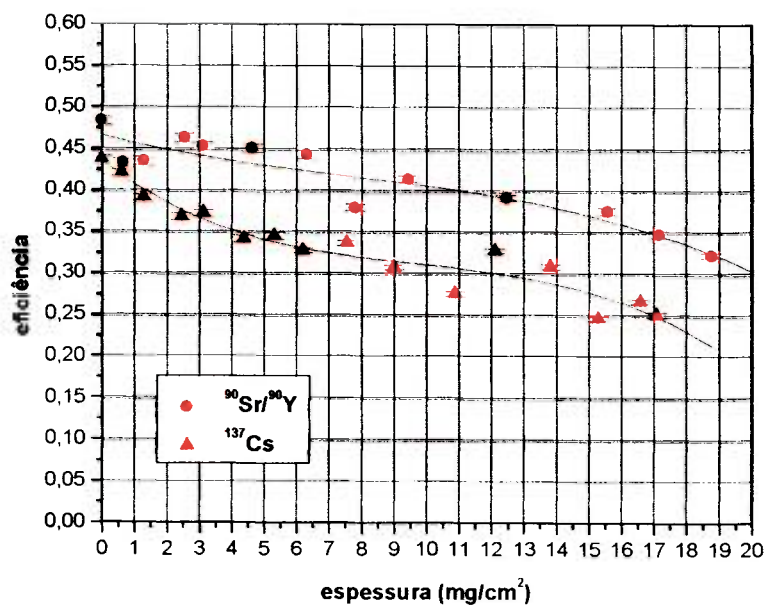


FIGURA 62 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de ⁹⁰Sr/⁹⁰Y e ¹³⁷Cs no detector # 7 do LB 770-2/5.

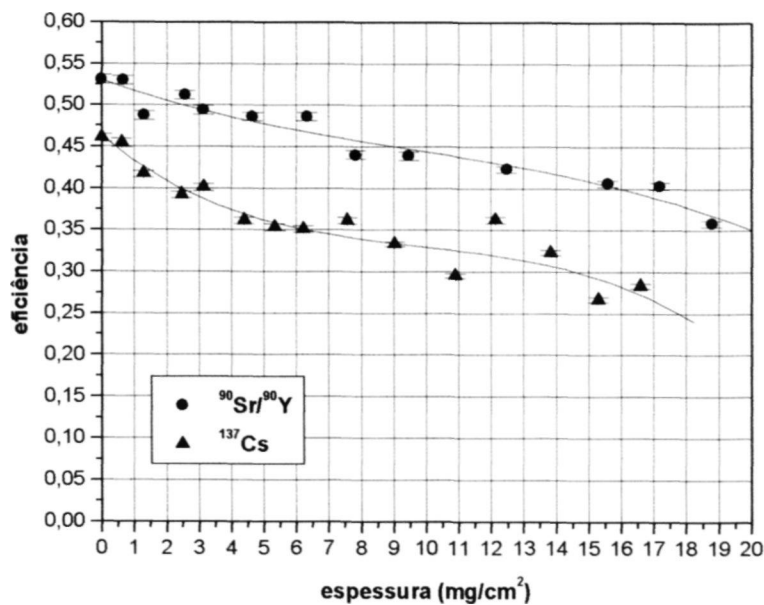


FIGURA 63 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de ⁹⁰Sr/⁹⁰Y e ¹³⁷Cs no detector # 8 do LB 770-2.

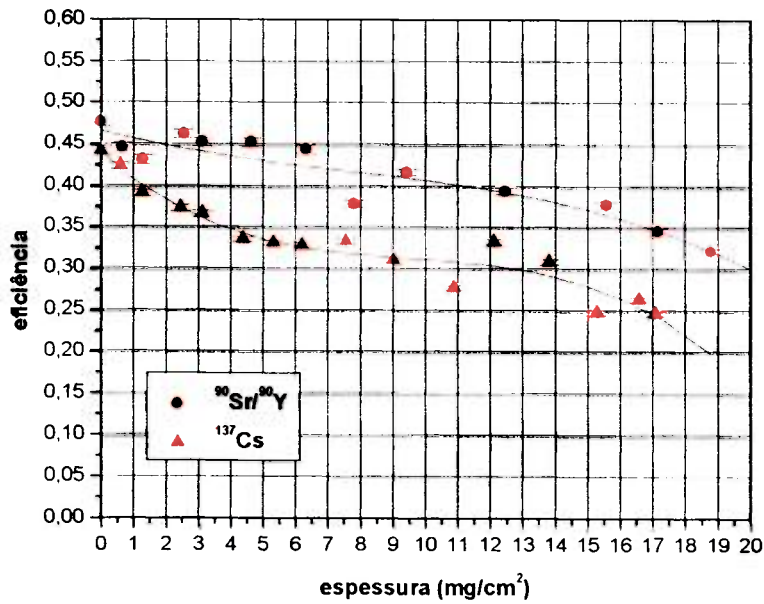


FIGURA 64 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs no detector # 8 do LB 770-2/5.

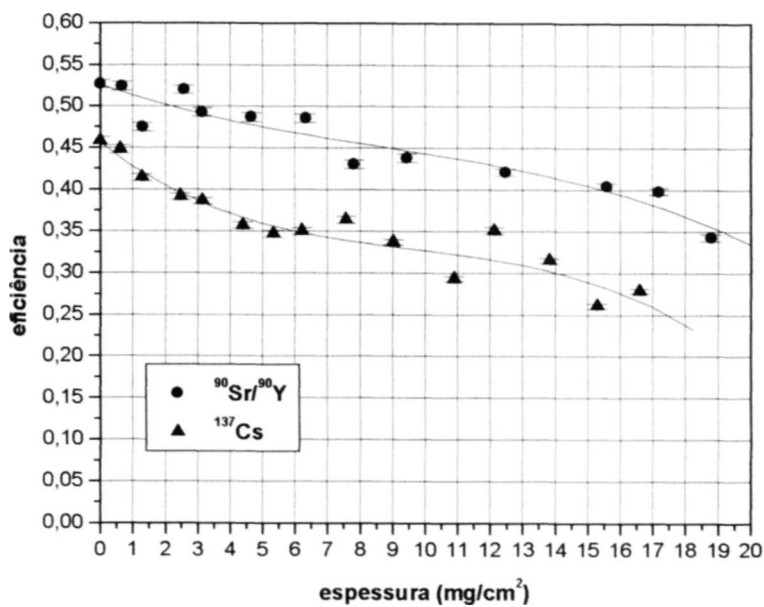


FIGURA 65 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs no detector # 9 do LB 770-2.

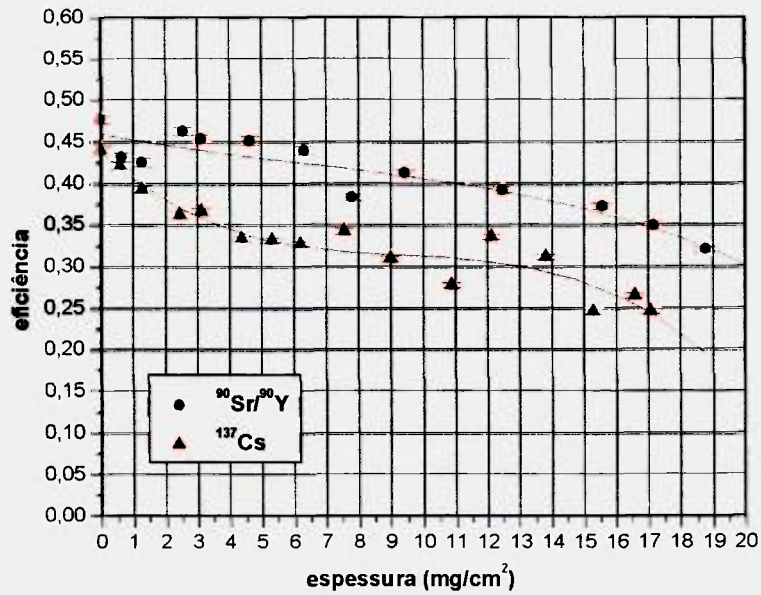


FIGURA 66 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs no detector # 9 do LB 770-2/5.

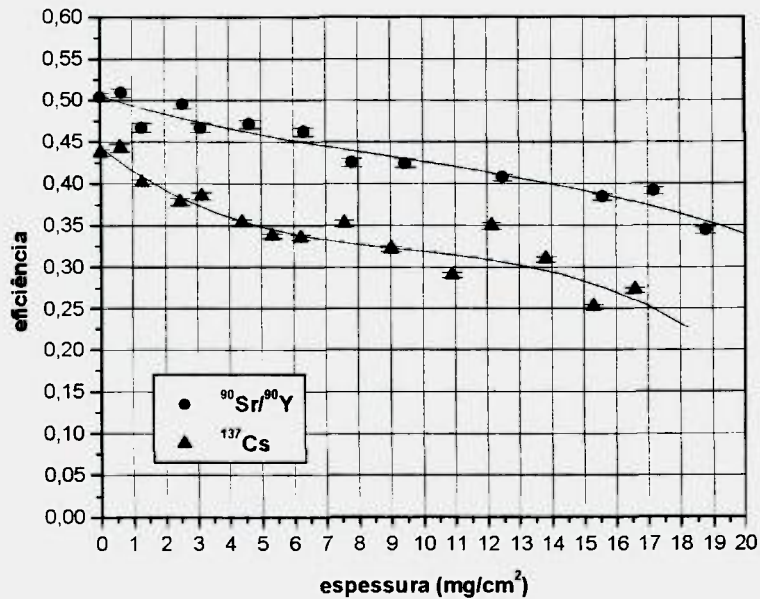


FIGURA 67 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{137}Cs no detector # 10 do LB 770-2.

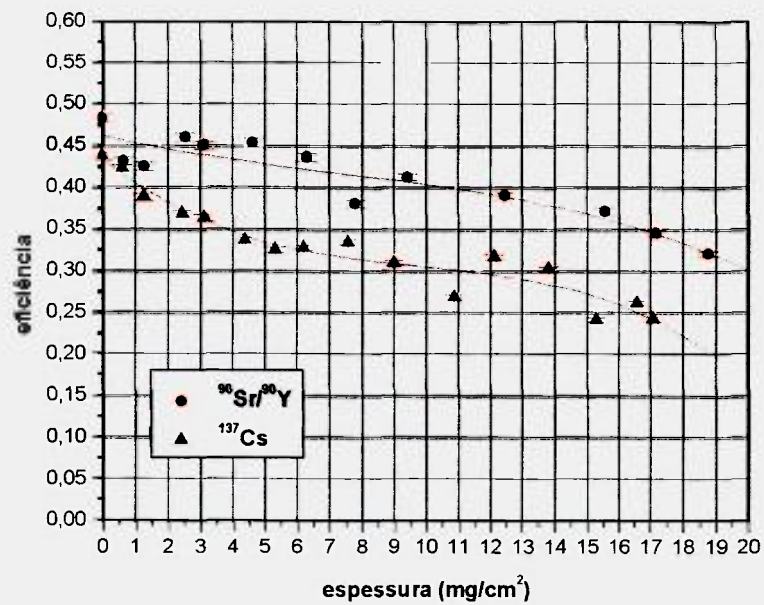


FIGURA 68 - Curvas de calibração em eficiência beta com padrões de ⁹⁰Sr/⁹⁰Y e ¹³⁷Cs no detector # 10 do LB 770-2/5.

TABELA 11. Equações de ajuste das curvas de calibração para $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

Radioisótopo	Sistema de contagem	Detector	Figura	Equação de ajuste
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	LB 770-2	1	32	$Y = 0,492 \pm 0,012 - 0,014 \pm 0,006 X + 8,630E-4 \pm 8,046E-4 X^2 - 2,986E-5 \pm 2,787E-5 X^3$
		3	33	$Y = 0,510 \pm 0,012 - 0,010 \pm 0,006 X + 5,097E-4 \pm 8,237E-4 X^2 - 2,067E-5 \pm 2,896E-5 X^3$
		4	34	$Y = 0,509 \pm 0,012 - 0,013 \pm 0,007 X + 7,208E-4 \pm 8,729E-4 X^2 - 2,602E-5 \pm 3,069E-5 X^3$
		5	35	$Y = 0,494 \pm 0,012 - 0,011 \pm 0,006 X + 6,596E-4 \pm 8,559E-4 X^2 - 2,489E-5 \pm 3,022E-5 X^3$
		6	36	$Y = 0,505 \pm 0,013 - 0,014 \pm 0,007 X + 9,489E-4 \pm 8,981E-4 X^2 - 3,499E-5 \pm 3,173E-5 X^3$
		7	37	$Y = 0,519 \pm 0,009 - 0,015 \pm 0,005 X + 0,001 \pm 6,617E-4 X^2 - 3,671E-5 \pm 2,327E-5 X^3$
		8	38	$Y = 0,530 \pm 0,011 - 0,014 \pm 0,006 X + 8,249E-4 \pm 7,721E-4 X^2 - 2,854E-5 \pm 2,715E-5 X^3$
		9	39	$Y = 0,526 \pm 0,015 - 0,014 \pm 0,008 X + 8,746E-4 \pm 0,001 X^2 - 3,347E-5 \pm 3,592E-5 X^3$
		10	40	$Y = 0,505 \pm 0,011 - 0,012 \pm 0,006 X + 6,066E-4 \pm 7,744E-4 X^2 - 2,142E-5 \pm 2,723E-5 X^3$
		1	32	$Y = 0,461 \pm 0,016 - 0,008 \pm 0,008 X + 5,117E-4 \pm 0,001 X^2 - 2,398E-5 \pm 3,809E-5 X^3$
	3	33	$Y = 0,464 \pm 0,016 - 0,008 \pm 0,009 X + 4,685E-4 \pm 0,001 X^2 - 2,252E-5 \pm 3,891E-5 X^3$	
	4	34	$Y = 0,459 \pm 0,016 - 0,008 \pm 0,008 X + 3,910E-4 \pm 0,001 X^2 - 1,918E-5 \pm 3,753E-5 X^3$	
	5	35	$Y = 0,457 \pm 0,016 - 0,007 \pm 0,009 X + 3,724E-4 \pm 0,001 X^2 - 1,978E-5 \pm 3,955E-5 X^3$	
	6	36	$Y = 0,459 \pm 0,015 - 0,007 \pm 0,008 X + 3,523E-4 \pm 0,001 X^2 - 1,789E-5 \pm 3,580E-5 X^3$	
	7	37	$Y = 0,468 \pm 0,016 - 0,009 \pm 0,008 X + 6,341E-4 \pm 0,001 X^2 - 2,781E-5 \pm 3,811E-5 X^3$	
	8	38	$Y = 0,468 \pm 0,016 - 0,010 \pm 0,008 X + 7,399E-4 \pm 0,001 X^2 - 3,232E-5 \pm 3,697E-5 X^3$	
	9	39	$Y = 0,459 \pm 0,014 - 0,005 \pm 0,008 X + 2,208E-4 \pm 0,001 X^2 - 1,603E-5 \pm 3,571E-5 X^3$	
	10	40	$Y = 0,464 \pm 0,016 - 0,009 \pm 0,008 X + 5,909E-4 \pm 0,001 X^2 - 2,688E-5 \pm 3,792E-5 X^3$	

Y: eficiência; incerteza: 1,2 %

X: espessura (mg/cm^2)

TABELA 12. Equações de ajuste das curvas de calibração para ^{137}Cs .

Radioisótopo	Sistema de contagem	Detector	Figura	Equação de ajuste
^{137}Cs	LB 770-2	1	41	$Y = 0,429 \pm 0,016 - 0,030 \pm 0,009 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 1,006E-4 \pm 4,892E-5 X^3$
		3	42	$Y = 0,451 \pm 0,019 - 0,033 \pm 0,010 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 1,232E-4 \pm 5,574E-5 X^3$
		4	43	$Y = 0,447 \pm 0,018 - 0,031 \pm 0,010 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 9,774E-5 \pm 5,583E-5 X^3$
		5	44	$Y = 0,433 \pm 0,017 - 0,029 \pm 0,009 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 9,678E-5 \pm 5,133E-5 X^3$
		6	45	$Y = 0,448 \pm 0,019 - 0,030 \pm 0,009 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 9,122E-5 \pm 5,236E-5 X^3$
		7	46	$Y = 0,453 \pm 0,018 - 0,030 \pm 0,009 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 8,872E-5 \pm 5,192E-5 X^3$
		8	47	$Y = 0,461 \pm 0,019 - 0,031 \pm 0,010 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 9,148E-5 \pm 5,473E-5 X^3$
		9	48	$Y = 0,455 \pm 0,018 - 0,030 \pm 0,009 X + 0,002 \pm 0,001 X^2 - 8,999E-5 \pm 5,196E-5 X^3$
		10	49	$Y = 0,442 \pm 0,017 - 0,029 \pm 0,009 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 9,193E-5 \pm 4,956E-5 X^3$
		LB 770-2/5	1	41
	3		42	$Y = 0,426 \pm 0,014 - 0,028 \pm 0,007 X + 0,003 \pm 9,961E-4 X^2 - 9,022E-5 \pm 3,779E-5 X^3$
	4		43	$Y = 0,427 \pm 0,015 - 0,028 \pm 0,008 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 8,816E-5 \pm 4,024E-5 X^3$
	5		44	$Y = 0,423 \pm 0,016 - 0,028 \pm 0,008 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 9,017E-5 \pm 4,079E-5 X^3$
	6		45	$Y = 0,419 \pm 0,016 - 0,029 \pm 0,008 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 9,445E-5 \pm 4,153E-5 X^3$
	7		46	$Y = 0,436 \pm 0,015 - 0,029 \pm 0,008 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 8,672E-5 \pm 4,197E-5 X^3$
	8		47	$Y = 0,441 \pm 0,015 - 0,034 \pm 0,008 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 1,156E-4 \pm 3,953E-5 X^3$
	9		48	$Y = 0,439 \pm 0,016 - 0,035 \pm 0,008 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 1,231E-4 \pm 4,281E-5 X^3$
	10		49	$Y = 0,436 \pm 0,015 - 0,032 \pm 0,008 X + 0,003 \pm 0,001 X^2 - 9,566E-5 \pm 3,937E-5 X^3$

Y: eficiência; incerteza: 1,2 %

X: espessura (mg/cm^2)

5.5 Teste de proficiência com alfa e beta total em água do PNI-IRD

A concentração da atividade alfa e beta total em água do Programa Nacional de Intercomparação do Instituto de Radioproteção e Dosimetria, no qual o laboratório tem participação, foi calculada para a rodada de dezembro de 2001 com as eficiências encontradas neste trabalho. Como a massa dos resíduos gerados após evaporação destas águas é praticamente nula, as eficiências utilizadas foram as eficiências máximas ($0,262 \pm$

0,036 para o padrão de ^{241}Am como eficiência para alfa e $0,475 \pm 0,016$ para o padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ como eficiência para beta). As amostras foram contadas por três vezes no detector #1 do sistema proporcional LB 770-2/5 e a partir de cada contagem foi calculada uma atividade.

As atividades foram calculados usando o programa Mathcad (1997) com base nas expressões de cálculo da atividade absoluta.

Para a atividade alfa temos:

$$ATIV_{\alpha} = \frac{CONT_{\alpha} - BG_{\alpha}}{EF_{\alpha} * 60} \quad (22)$$

onde:

$ATIV_{\alpha}$ = atividade alfa da amostra de intercomparação;

$CONT_{\alpha}$ = contagem média alfa registrada no detector em cpm;

BG_{α} = radiação de fundo alfa registrada no detector em cpm;

EF_{α} = eficiência para radionuclídeos emissores alfa;

60 = fator de multiplicação para a transformação de minutos em segundos.

Para a atividade beta temos:

$$ATIV_{\beta} = \frac{CONT_{\beta} - BG_{\beta}}{EF_{\beta} * 60} \quad (23)$$

onde:

$ATIV_{\beta}$ = atividade beta da amostra de intercomparação;

$CONT_{\beta}$ = contagem média beta registrada no detector em cpm;

BG_{β} = radiação de fundo beta registrada no detector em cpm;

EF_{β} = eficiência para radionuclídeos emissores beta;

60 = fator de multiplicação para a transformação de minutos em segundos.

Na TAB. 13 é mostrado o resultado da determinação da atividade alfa e beta total em água do PNI-IRD na rodada de dezembro de 2001 (PNI-IRD, 2001).

TABELA 13. Resultados de análises de atividade alfa e beta totais em água (PNI-IRD) em Bq/L.

ANÁLISE	Xi	X	s	U	su	NA	LC
Alfa total (²⁴¹ Am)	0,586 0,749 1,043	0,793	0,232	0,800	0,160	Dentro	Dentro
Beta total (⁹⁰ Sr, ⁹⁰ Y)	0,854 0,864 0,903	0,874	0,026	0,970	0,194	Dentro	Dentro

Xi: valor obtido em uma análise pelo laboratório participante;

X: valor médio obtido das “n” análises realizadas pelo laboratório participante;

s: desvio padrão em relação à X;

U: valor de referência, considerado como o valor “Verdadeiro” para a grandeza analisada nas amostras;

su: desvio padrão do valor de referência;

NA: Intervalo de valores bons entre os Níveis de Advertência (valores $U \leq \pm 2 su$). Nível de advertência inferior, NAI = $U - 2 su$ e Nível de advertência superior, NAS = $U + 2 su$;

LC: Intervalo de valores aceitáveis entre os Limites de Controle (valores $U < \pm 3 su$).

Limite de controle inferior, LCI = $U - 3 su$ e limite de controle superior LCS = $U + 3 su$.

6. DISCUSSÃO

As curvas de calibração em eficiência, determinadas para os dois detectores proporcionais de fluxo gasoso do Departamento de Radiometria Ambiental do IPEN, mostraram que a eficiência de contagem diminui com o aumento da espessura dos resíduos, para todos os padrões utilizados. A diminuição é mais acentuada para os emissores alfa do que para os emissores beta, porque o poder de freimento para partículas alfa é maior, pois a perda de energia por unidade de comprimento de trajetória é diretamente proporcional ao quadrado da carga da partícula incidente (equação 1).

Analisando os resultados, observamos ainda que o comportamento das curvas é diferente para os dois sistemas contadores. As eficiências alfa são maiores no sistema LB 770-2/5 do que no sistema LB 770-2. Este comportamento é explicado pela espessura diferente da janela de mylar aluminizado dos detectores nos 2 sistemas: 0,4 mg/cm² para o LB 770-2/5 e 0,6 mg/cm² para o LB 770-2. As partículas alfa irão perder menos energia em 0,4 mg/cm² e conseguirão depositar mais energia no gás contador do detector, resultando numa eficiência maior.

Com as eficiências beta ocorre o contrário pelo mesmo motivo: a espessura da janela. Esta sendo maior no LB 770-2 (0,6 mg/cm²) resulta em um aumento da eficiência neste detector, pois aumenta a probabilidade do raio gama do ¹³⁷Cs interagir, originando fotoelétrons e elétrons Compton (Evans, 1982) que irão depositar sua energia no gás contador produzindo assim mais contagens e aumentando a eficiência.

No caso dos padrões emissores beta, analisando as FIG. 52-70, podemos observar que a eficiência para ⁹⁰Sr/⁹⁰Y é maior que para ¹³⁷Cs em todas as espessuras estudadas. Relacionando esta maior eficiência do ⁹⁰Sr/⁹⁰Y com suas energias, vemos que estas realmente são maiores que as energias do ¹³⁷Cs (⁹⁰Sr/⁹⁰Y, energias máximas de 546 keV e 2284 keV, respectivamente e ¹³⁷Cs, energias máximas de 514 keV e 1176 keV).

No entanto, a diferença na eficiência entre os dois emissores beta é menos acentuada que no caso dos emissores alfa, pois o ⁹⁰Sr/⁹⁰Y tem duas energias intensas, sendo que uma delas é próxima à do ¹³⁷Cs. Este último também emite um raio gama de

energia 661,66 keV que interage por efeito fotoelétrico e efeito Compton, dando origem a fotoelétrons de 626 keV e elétrons Compton com energia máxima de 478 keV.

Para os emissores alfa era de se esperar que as eficiências do ^{241}Am fossem mais altas do que as do U-natural, porque sendo as energias alfa emitidas pelo ^{241}Am (5,486 MeV, 5,443 MeV e 5,389 MeV) maiores que as emitidas pelo ^{238}U (99,275% do U-natural, 4,196 MeV e 4,149 MeV), a probabilidade de chegar ao volume ativo do detector é maior.

Contudo, nas FIG. 24-33, observamos que isto é verdade somente para espessuras na faixa de 0,2 mg/cm² a aproximadamente 10 mg/cm², o que indica a possível existência de energias alfa maiores no padrão de U-natural.

A solução de U-natural foi medida por espectrometria gama passiva de alta resolução, tendo sido encontrados os seguintes radioisótopos da série do ^{238}U : ^{226}Ra , ^{214}Pb e ^{214}Bi . Estes radioisótopos indicam a presença dos emissores alfa ^{218}Po ($E_{\alpha} = 6$ MeV), ^{214}Po ($E_{\alpha} = 7,69$ MeV) e ^{210}Po ($E_{\alpha} = 5,3$ MeV) cujos alcances máximos no cálcio calculados pela equação 7, são, respectivamente, 9,4 mg/cm², 14 mg/cm² e 7,7 mg/cm². Como o alcance máximo do ^{241}Am no cálcio é 8,2 mg/cm², é altamente provável que as eficiências maiores do U-natural sejam consequência das energias alfa do ^{218}Po e ^{214}Po .

Nas águas do PNI-IRD foram utilizadas as eficiências máximas, pois estas águas praticamente não contêm sais, isto é, não há geração de resíduos na plaqueta após a evaporação da amostra de água.

Pela literatura (Janzer, 1980), nos poços com cátions de cálcio deveríamos usar um padrão de urânio. Esta é uma conclusão interessante, pois os cátions de cálcio sugerem a presença de ^{226}Ra e ^{238}U , fato este comprovado em análises rotineiras dos poços de lençol freático do PMA do IPEN (Máduar e Moreira, 2001).

7 CONCLUSÃO

Os resultados evidenciam a variação da eficiência de contagem com a energia do emissor alfa ou beta utilizado como padrão de calibração e com a espessura dos resíduos presentes nas amostras a serem medidas nos sistemas detectores. A variação da eficiência também ocorre nos diferentes detectores dentro do mesmo sistema de contagem.

Além destes fatores, outro muito importante e que deve ser sempre levado em consideração é a espessura da janela do sistema para contagem alfa e beta, pois estas partículas são bastante influenciadas por pequenas diferenças nas espessuras de seu meio absorvedor. Isto significa que deve ser feita uma curva de calibração para cada detector.

Isto mostra que os fatores padrão de calibração do detector, espessura do resíduo e modelo de detector utilizado devem ser sempre levados em conta na determinação da atividade alfa e beta total em amostras de água. Nas referências consultadas sobre o assunto foi encontrado que a composição química de amostras de água também influencia na determinação da eficiência de detectores proporcionais utilizados na contagem alfa e beta total. Portanto, as eficiências dos sistemas de contagem foram estabelecidas com soluções padrão que simulassem a composição química das águas subterrâneas.

As curvas de calibração determinadas irão permitir o uso dos detectores nas medidas rotineiras e de pesquisa do PMA e outros serviços do laboratório.

8. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como complementação futura, sugerimos determinar as atividades alfa e beta total dos poços do PMA com as curvas de eficiência determinadas para os 2 padrões e comparar com a atividade do ^{238}U determinada por análise por ativação com nêutrons epitérmicos e com a atividade do ^{226}Ra determinada por espectrometria gama.

Também sugerimos verificar se a composição química da água dos poços varia sazonalmente.

APÊNDICE A - Contagens alfa médias calculadas a partir das triplicatas no sistema de contagem LB 770-2 para padrão de ^{241}Am (em cpm).

espessura (mg/cm ²)	detectores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1929 ± 11	fora de operação	2056 ± 12	1981 ± 11	1896 ± 11	2051 ± 12	2049 ± 12	2082 ± 12	2015 ± 12	2013 ± 12
0,6	1721 ± 10		1848 ± 11	1795 ± 11	1738 ± 11	1812 ± 11	1847 ± 11	1901 ± 11	1843 ± 11	1794 ± 11
1,2	1556 ± 10		1640 ± 11	1607 ± 10	1532 ± 10	1646 ± 11	1633 ± 10	1709 ± 11	1687 ± 11	1563 ± 10
1,9	1305,0 ± 9,3		1404,0 ± 9,7	1355,0 ± 9,5	1297,0 ± 9,3	1391,0 ± 9,6	1169,0 ± 8,8	1458,0 ± 9,8	1399,0 ± 9,7	1380,0 ± 9,6
2,6	1121,0 ± 8,7		1153,0 ± 8,8	1150,0 ± 8,7	1117,0 ± 8,6	1142,0 ± 8,7	1159,0 ± 8,8	1194,0 ± 8,9	1139,0 ± 8,7	1136,0 ± 8,7
3,2	1030,0 ± 8,3		1123,0 ± 8,7	1073,0 ± 8,4	1316,0 ± 9,4	1266,0 ± 9,2	1117,0 ± 8,6	1145,0 ± 8,7	1132,0 ± 8,7	1075,0 ± 8,5
3,8	1101,0 ± 8,6		1201,0 ± 8,9	1128,0 ± 8,7	1083,0 ± 8,5	1184,0 ± 8,9	1183,0 ± 8,9	1229,0 ± 9,5	1234,0 ± 9,1	1134,0 ± 8,7
4,5	1135,0 ± 8,7		1197,0 ± 8,9	1168,0 ± 8,8	1148,0 ± 8,7	1209,0 ± 9,0	1221,0 ± 9,0	1254,0 ± 9,1	1262,0 ± 9,2	1252,0 ± 9,1
5,1	1018,0 ± 8,2		1048,0 ± 8,3	1061,0 ± 8,4	993,0 ± 8,1	1065,0 ± 8,4	1062,0 ± 8,4	1099,0 ± 8,6	1095,0 ± 8,5	1035,0 ± 8,3
6,8	1176,0 ± 8,9		1266,0 ± 9,2	1225,0 ± 9,0	1183,0 ± 8,9	1287,0 ± 9,3	1261,0 ± 9,2	1329,0 ± 9,4	1295,0 ± 9,3	1224,0 ± 9,0
7,5	981,2 ± 8,1		1085,0 ± 8,5	1052,0 ± 8,4	1006,0 ± 8,2	1050,0 ± 8,4	1073,0 ± 8,4	1118,0 ± 8,6	1086,0 ± 8,5	1061,0 ± 8,4
9,4	764,8 ± 7,1		839,0 ± 7,5	826,0 ± 7,4	777,4 ± 7,2	810,6 ± 7,3	830,8 ± 7,4	851,0 ± 7,5	826,4 ± 7,4	817,0 ± 7,4
9,9	418,0 ± 5,3		424,0 ± 5,3	423,0 ± 5,3	407,0 ± 5,2	432,0 ± 5,4	441,0 ± 5,4	458,0 ± 5,5	418,0 ± 5,3	420,0 ± 5,3
10,9	135,0 ± 3,0		143,0 ± 3,1	139,0 ± 3,0	128,0 ± 2,9	152,0 ± 3,2	151,0 ± 3,2	183,0 ± 3,5	168,0 ± 3,3	158,0 ± 3,2
13,8	82,0 ± 2,3		94,8 ± 2,5	93,2 ± 2,5	79,4 ± 2,3	98,0 ± 2,5	88,4 ± 2,4	95,8 ± 2,5	104,8 ± 2,6	89,4 ± 2,4
15,5	145,6 ± 3,1		161,6 ± 3,3	153,0 ± 3,2	136,0 ± 3,0	167,0 ± 3,3	157,0 ± 3,2	171,0 ± 3,4	168,0 ± 3,3	131,0 ± 2,9

APÊNDICE B - Contagens alfa médias calculadas a partir das triplicatas no sistema de contagem LB 770-2/5 para padrão de ^{241}Am (em cpm).

Espessura (mg/cm ²)	detectores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	2041 ± 12	2128 ± 13	2070 ± 12	2077 ± 12	2059 ± 12	2063 ± 12	2104 ± 12	2061 ± 12	2059 ± 12	2054 ± 12
0,6	1896 ± 11	1908 ± 11	1927 ± 11	1898 ± 11	1910 ± 11	1858 ± 11	1944 ± 11	1930 ± 11	1897 ± 11	1888 ± 11
1,2	1739 ± 11	1735 ± 11	1742 ± 11	1741 ± 11	1747 ± 11	1721 ± 11	1793 ± 11	1768 ± 11	1732 ± 11	1733 ± 11
1,9	1466,7 ± 9,9	1490 ± 10	1356,4 ± 9,5	1498 ± 10	1518 ± 10	1483,3 ± 9,9	1537 ± 10	1511 ± 10	1491 ± 10	1523 ± 10
2,6	1214,8 ± 9,0	1213,7 ± 9,0	1184,9 ± 8,9	1223,6 ± 9,0	1239 ± 9,1	1241,6 ± 9,1	1250,3 ± 9,1	1236,9 ± 9,1	1138,3 ± 8,7	1237 ± 9,1
3,2	1215,2 ± 9,0	1218,0 ± 9,0	1199,2 ± 8,9	1228,2 ± 9,0	1132,1 ± 8,7	1200,3 ± 8,9	1207 ± 8,9	1212,9 ± 9,0	1228 ± 9,0	1198,5 ± 8,9
3,8	1141,9 ± 8,7	1277,6 ± 9,2	1240,1 ± 9,1	1262,8 ± 9,2	1258,1 ± 9,2	1258,7 ± 9,2	1218,5 ± 9,0	1276,9 ± 9,2	1222,0 ± 9,0	1262,2 ± 9,2
4,5	1300,3 ± 9,3	1320,3 ± 9,4	1300,8 ± 9,3	1331,7 ± 9,4	1306,5 ± 9,3	1332,6 ± 9,4	1233,0 ± 9,1	1314,0 ± 9,4	1247,1 ± 9,1	1309,9 ± 9,3
5,1	1154,6 ± 8,8	1178,5 ± 8,9	1175,7 ± 8,9	1164,1 ± 8,8	1166,8 ± 8,8	1180,7 ± 8,9	1183,8 ± 8,9	1174,8 ± 8,8	1190,1 ± 8,9	1170,8 ± 8,8
6,8	1184,9 ± 8,9	1406,7 ± 9,7	1184 ± 8,9	1181,7 ± 8,9	1352,5 ± 9,5	1328,4 ± 9,4	1364,6 ± 9,5	1352,7 ± 9,5	1174,5 ± 8,8	1365,4 ± 9,5
7,5	1079,3 ± 8,5	1113,7 ± 8,6	1084,5 ± 8,5	966,9 ± 8,0	981,1 ± 8,1	1082,0 ± 8,5	1114,3 ± 8,6	1082,4 ± 8,5	944,9 ± 7,9	939,8 ± 7,9
9,4	828,6 ± 7,4	837,0 ± 7,5	851,9 ± 7,5	839,5 ± 7,5	666,9 ± 6,7	656,7 ± 6,6	680,5 ± 6,7	854,9 ± 7,5	831,0 ± 7,4	671,5 ± 6,7
9,9	457,0 ± 5,5	463,0 ± 5,5	429,0 ± 5,3	432,0 ± 5,4	435,0 ± 5,4	442,0 ± 5,4	451,0 ± 5,5	449,0 ± 5,5	429,0 ± 5,3	431,0 ± 5,4
10,9	167,0 ± 3,3	164,0 ± 3,3	171,0 ± 3,4	159,0 ± 3,2	153,0 ± 3,2	153,0 ± 3,2	164,0 ± 3,3	169,0 ± 3,4	155,0 ± 3,2	144,0 ± 3,1
13,8	109,3 ± 2,7	111,5 ± 2,7	109,6 ± 2,7	111,4 ± 2,7	103,9 ± 2,6	107,0 ± 2,7	112,0 ± 2,7	107,0 ± 2,7	108,0 ± 2,7	108,1 ± 2,7
15,5	180,0 ± 3,5	157,0 ± 3,2	162,0 ± 3,3	129,0 ± 2,9	141,0 ± 3,1	136,0 ± 3,0	123,0 ± 2,9	137,0 ± 3,0	123,0 ± 2,9	117,0 ± 2,8

APÊNDICE C - Contagens alfa médias calculadas a partir das triplicatas no sistema de contagem LB 770-2/5 para padrão de U-natural.

Espessura (mg/cm ²)	detectores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	7,20 ± 0,11	7,90 ± 0,11	7,57 ± 0,11	8,10 ± 0,12	8,20 ± 0,12	7,53 ± 0,11	7,80 ± 0,11	7,80 ± 0,11	7,40 ± 0,11	7,60 ± 0,11
0,3	4,88 ± 0,09	4,72 ± 0,09	4,88 ± 0,09	5,46 ± 0,09	4,58 ± 0,09	4,91 ± 0,09	5,50 ± 0,09	4,77 ± 0,09	4,83 ± 0,09	4,97 ± 0,09
0,7	4,23 ± 0,08	4,12 ± 0,08	3,77 ± 0,08	4,57 ± 0,09	3,52 ± 0,08	4,33 ± 0,09	4,13 ± 0,08	4,34 ± 0,09	4,18 ± 0,08	3,55 ± 0,08
0,9	3,82 ± 0,08	3,63 ± 0,08	3,73 ± 0,08	3,62 ± 0,08	4,15 ± 0,08	4,20 ± 0,08	3,73 ± 0,08	4,22 ± 0,08	3,93 ± 0,08	3,85 ± 0,08
1,3	2,59 ± 0,07	2,88 ± 0,07	3,05 ± 0,07	2,93 ± 0,07	3,02 ± 0,07	3,83 ± 0,08	2,95 ± 0,07	3,36 ± 0,07	3,37 ± 0,07	3,12 ± 0,07
1,9	2,97 ± 0,07	2,76 ± 0,07	2,97 ± 0,07	2,83 ± 0,07	2,98 ± 0,07	3,53 ± 0,08	3,10 ± 0,07	3,22 ± 0,07	3,02 ± 0,07	3,09 ± 0,07
2,5	2,57 ± 0,07	2,44 ± 0,06	2,46 ± 0,06	2,71 ± 0,07	3,00 ± 0,07	2,92 ± 0,07	2,85 ± 0,07	2,90 ± 0,07	2,82 ± 0,07	2,60 ± 0,07
2,9	2,27 ± 0,06	2,35 ± 0,06	2,47 ± 0,06	2,60 ± 0,07	2,45 ± 0,06	2,27 ± 0,06	2,60 ± 0,07	2,43 ± 0,06	2,22 ± 0,06	2,15 ± 0,06
3,5	1,88 ± 0,06	1,78 ± 0,05	1,31 ± 0,05	1,75 ± 0,05	1,75 ± 0,05	1,95 ± 0,06	1,77 ± 0,05	1,83 ± 0,05	1,60 ± 0,05	1,77 ± 0,05
4,3	1,82 ± 0,05	1,72 ± 0,05	2,03 ± 0,06	1,70 ± 0,05	1,98 ± 0,06	2,15 ± 0,06	1,73 ± 0,05	2,00 ± 0,06	1,90 ± 0,06	1,77 ± 0,05
5,8	2,05 ± 0,06	1,53 ± 0,05	1,47 ± 0,05	1,45 ± 0,05	1,73 ± 0,05	1,98 ± 0,06	1,55 ± 0,05	1,35 ± 0,05	1,18 ± 0,04	1,50 ± 0,05
7,2	1,75 ± 0,05	1,40 ± 0,05	1,58 ± 0,05	1,75 ± 0,05	1,52 ± 0,05	1,65 ± 0,05	1,43 ± 0,05	1,70 ± 0,05	1,55 ± 0,05	1,52 ± 0,05
8,7	1,03 ± 0,04	1,20 ± 0,04	1,45 ± 0,04	1,45 ± 0,05	1,02 ± 0,04	1,62 ± 0,05	1,37 ± 0,05	1,32 ± 0,05	1,27 ± 0,05	1,37 ± 0,05
10,1	1,35 ± 0,05	1,23 ± 0,04	1,22 ± 0,04	1,10 ± 0,04	1,42 ± 0,05	1,38 ± 0,05	1,22 ± 0,04	0,85 ± 0,04	1,13 ± 0,04	1,13 ± 0,04
11,5	0,90 ± 0,04	1,18 ± 0,04	1,08 ± 0,04	1,12 ± 0,04	1,07 ± 0,04	1,32 ± 0,05	1,28 ± 0,05	0,97 ± 0,04	1,22 ± 0,05	0,90 ± 0,04
12,6	1,00 ± 0,04	1,22 ± 0,04	1,13 ± 0,04	1,17 ± 0,04	1,08 ± 0,04	1,48 ± 0,05	1,25 ± 0,05	1,07 ± 0,04	1,01 ± 0,04	1,18 ± 0,04
14,4	0,80 ± 0,04	0,78 ± 0,04	0,80 ± 0,04	1,03 ± 0,04	0,57 ± 0,03	0,99 ± 0,04	0,90 ± 0,04	0,70 ± 0,04	0,76 ± 0,03	0,80 ± 0,04

APÊNDICE D - Contagens beta médias calculadas a partir das triplicatas no sistema de contagem LB 770-2 para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (em cpm).

Espessura (mg/cm ²)	detectores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	3820 ± 16	fora de operação	3950 ± 16	3931 ± 16	3804 ± 16	3924 ± 16	4058 ± 16	4146 ± 17	4108 ± 17	3930 ± 16
0,7	3824 ± 16		3998 ± 16	3996 ± 16	3889 ± 16	3922 ± 16	4043 ± 16	4139 ± 17	4088 ± 17	3972 ± 16
1,3	3499 ± 15		3697 ± 16	3667 ± 16	3544 ± 15	3585 ± 15	3777 ± 16	3802 ± 16	3706 ± 15	3642 ± 16
2,6	3797 ± 16		3987 ± 16	3958 ± 16	3817 ± 16	3919 ± 16	3850 ± 16	3998 ± 16	4061 ± 17	3863 ± 16
3,1	3565 ± 15		3734 ± 16	3704 ± 16	3672 ± 16	3708 ± 16	3766 ± 16	3851 ± 16	3847 ± 16	3645 ± 16
4,5	3512 ± 15		3698 ± 16	3675 ± 16	3541 ± 15	3586 ± 15	3701 ± 16	3791 ± 16	3797 ± 16	3679 ± 16
6,3	3485 ± 15		3699 ± 16	3597 ± 15	3541 ± 15	3631 ± 15	3717 ± 16	3792 ± 16	3792 ± 16	3608 ± 15
7,8	3219 ± 15		3400 ± 15	3339 ± 15	3237 ± 15	3299 ± 15	3389 ± 15	3437 ± 15	3358 ± 15	3316 ± 15
9,5	3132 ± 14		3362 ± 15	3339 ± 15	3279 ± 15	3323 ± 15	3402 ± 15	3429 ± 15	3418 ± 15	3311 ± 15
12,5	3089 ± 14		3213 ± 15	3177 ± 15	3106 ± 14	3216 ± 15	3271 ± 15	3299 ± 15	3286 ± 15	3171 ± 15
15,6	2929 ± 14		3112 ± 14	3052 ± 14	2957 ± 14	3058 ± 14	3121 ± 14	3166 ± 15	3149 ± 15	2993 ± 14
17,2	2938 ± 14		3075 ± 14	3075 ± 14	2973 ± 14	3055 ± 14	3125 ± 14	3146 ± 15	3106 ± 14	3051 ± 14
18,8	2594 ± 13		2692 ± 13	2656 ± 13	2572 ± 13	2656 ± 13	2756 ± 13	2791 ± 14	2679 ± 13	2687 ± 13

APÊNDICE E - Contagens beta médias calculadas a partir das triplicatas no sistema de contagem LB 770-2/5 para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (em cpm).

Espessura (mg/cm ²)	detectores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	3703 ± 16	3790 ± 16	3745 ± 16	3707 ± 16	3698 ± 16	3711 ± 16	3793 ± 16	3743 ± 16	3734 ± 16	3781 ± 16
0,7	3367 ± 15	3418 ± 15	3350 ± 15	3364 ± 15	3330 ± 15	3334 ± 15	3396 ± 15	3495 ± 15	3375 ± 15	3375 ± 15
1,3	3322 ± 15	3369 ± 15	3389 ± 15	3315 ± 15	3332 ± 15	3372 ± 15	3412 ± 15	3382 ± 15	3328 ± 15	3309 ± 15
2,6	3645 ± 16	3692 ± 16	3676 ± 16	3623 ± 15	3602 ± 15	3615 ± 15	3627 ± 15	3622 ± 15	3623 ± 15	3603 ± 15
3,1	3570 ± 15	3637 ± 16	3569 ± 15	3562 ± 15	3523 ± 15	3537 ± 15	3547 ± 15	3541 ± 15	3553 ± 15	3524 ± 15
4,5	3512 ± 15	3570 ± 15	3521 ± 15	3509 ± 15	3517 ± 15	3501 ± 15	3533 ± 15	3541 ± 15	3532 ± 15	3548 ± 15
6,3	3412 ± 15	3510 ± 15	3457 ± 15	3437 ± 15	3454 ± 15	3444 ± 15	3474 ± 15	3477 ± 15	3441 ± 15	3418 ± 15
7,8	2976 ± 14	3015 ± 14	2988 ± 14	2981 ± 14	2939 ± 14	3003 ± 14	2974 ± 14	2962 ± 14	3000 ± 14	2979 ± 14
9,5	3173 ± 14	3272 ± 15	3201 ± 15	3145 ± 14	3234 ± 15	3165 ± 14	3244 ± 15	3259 ± 15	3232 ± 15	3234 ± 15
12,5	3092 ± 14	3080 ± 14	3063 ± 14	3043 ± 14	3064 ± 14	3013 ± 14	3067 ± 14	3090 ± 14	3063 ± 14	3055 ± 14
15,6	2917 ± 14	2974 ± 14	2927 ± 14	2907 ± 14	2920 ± 14	2936 ± 14	2943 ± 14	2956 ± 14	2920 ± 14	2909 ± 14
17,2	2751 ± 13	2782 ± 14	2767 ± 14	2754 ± 13	2732 ± 13	2751 ± 13	2723 ± 13	2718 ± 13	2739 ± 13	2712 ± 13
18,8	2519 ± 13	2540 ± 13	2516 ± 13	2515 ± 13	2535 ± 13	2518 ± 13	2526 ± 13	2521 ± 13	2514 ± 13	2516 ± 13

APÊNDICE F - Contagens beta médias calculadas a partir das triplicatas no sistema de contagem LB 770-2 para padrão de ^{137}Cs (em cpm).

Espessura (mg/cm ²)	detectores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	3299 ± 15	fora de operação	3499 ± 15	3429 ± 15	3332 ± 15	3474 ± 15	3546 ± 15	3592 ± 15	3574 ± 15	3409 ± 15
0,6	3297 ± 15		3459 ± 15	3485 ± 15	3361 ± 15	3463 ± 15	3500 ± 15	3546 ± 15	3494 ± 15	3457 ± 15
1,3	3027 ± 14		3130 ± 14	3167 ± 14	3048 ± 14	3163 ± 14	3189 ± 15	3255 ± 15	3231 ± 15	3125 ± 14
2,5	2849 ± 14		3055 ± 14	2965 ± 14	2862 ± 14	2998 ± 14	3023 ± 14	3061 ± 14	3049 ± 14	2949 ± 14
3,1	2908 ± 14		3023 ± 14	3042 ± 14	2915 ± 14	2963 ± 14	3004 ± 14	3130 ± 14	3014 ± 14	3007 ± 14
4,5	2651 ± 13		2730 ± 13	2723 ± 13	2670 ± 13	2745 ± 13	2757 ± 13	2818 ± 13	2783 ± 14	2757 ± 14
5,3	2533 ± 13		2698 ± 13	2685 ± 13	2598 ± 13	2712 ± 14	2706 ± 13	2753 ± 14	2705 ± 13	2629 ± 13
6,2	2583 ± 13		2666 ± 13	2634 ± 13	2640 ± 13	2681 ± 13	2715 ± 13	2742 ± 13	2730 ± 13	2614 ± 13
7,6	2672 ± 13		2795 ± 14	2719 ± 13	2702 ± 13	2753 ± 13	2831 ± 14	2818 ± 14	2837 ± 14	2754 ± 13
9,0	2425 ± 13		2538 ± 13	2516 ± 13	2458 ± 13	2513 ± 13	2549 ± 13	2598 ± 13	2633 ± 13	2509 ± 13
10,9	2172 ± 12		2318 ± 12	2246 ± 12	2217 ± 12	2245 ± 12	2302 ± 12	2305 ± 12	2288 ± 12	2260 ± 12
12,1	2591 ± 13		2728 ± 13	2738 ± 13	2715 ± 13	2742 ± 13	2732 ± 13	2826 ± 13	2739 ± 13	2723 ± 13
13,8	2401 ± 13		2541 ± 13	2537 ± 13	2434 ± 13	2481 ± 13	2496 ± 13	2518 ± 13	2457 ± 13	2414 ± 12
15,3	1929 ± 11		1994 ± 11	1975 ± 11	1963 ± 11	2039 ± 12	2049 ± 12	2084 ± 12	2038 ± 12	1969 ± 11
16,6	2087 ± 12		2191 ± 12	2141 ± 12	2089 ± 12	2147 ± 12	2214 ± 12	2206 ± 12	2177 ± 12	2126 ± 12

APÊNDICE G - Contagens beta médias calculadas a partir das triplicatas no sistema de contagem LB 770-2/5 para padrão de ^{137}Cs (em cpm).

Espessura (mg/cm ²)	detectores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	3307 ± 15	3309 ± 15	3360 ± 15	3337 ± 15	3245 ± 15	3212 ± 15	3435 ± 15	3453 ± 15	3447 ± 15	3422 ± 15
0,6	3247 ± 15	3373 ± 15	3193 ± 15	3256 ± 15	3271 ± 15	3242 ± 15	3304 ± 15	3322 ± 15	3300 ± 15	3317 ± 15
1,3	2992 ± 14	3018 ± 14	3022 ± 14	3026 ± 14	3007 ± 14	2989 ± 14	3067 ± 14	3068 ± 14	3075 ± 14	3045 ± 14
2,5	2888 ± 14	2904 ± 14	2886 ± 14	2874 ± 14	2893 ± 14	2809 ± 14	2889 ± 14	2930 ± 14	2842 ± 14	2886 ± 14
3,1	2889 ± 14	2941 ± 14	2865 ± 14	2839 ± 14	2904 ± 14	2812 ± 14	2916 ± 14	2871 ± 14	2871 ± 14	2851 ± 14
4,5	2575 ± 13	2696 ± 13	2605 ± 13	2626 ± 13	2600 ± 13	2593 ± 13	2680 ± 13	2628 ± 13	2615 ± 13	2637 ± 13
5,3	2536 ± 13	2617 ± 13	2576 ± 13	2609 ± 13	2568 ± 13	2539 ± 13	2709 ± 13	2600 ± 13	2596 ± 13	2553 ± 13
6,2	2544 ± 13	2576 ± 13	2581 ± 13	2581 ± 13	2575 ± 13	2521 ± 13	2566 ± 13	2579 ± 13	2566 ± 13	2571 ± 13
7,6	2583 ± 13	2692 ± 13	2644 ± 13	2673 ± 13	2615 ± 13	2531 ± 13	2639 ± 13	2618 ± 13	2683 ± 13	2624 ± 13
9,0	2396 ± 13	2436 ± 13	2406 ± 13	2442 ± 13	2424 ± 13	2392 ± 13	2411 ± 13	2437 ± 13	2424 ± 13	2430 ± 13
10,9	2092 ± 12	2128 ± 12	2168 ± 12	2115 ± 12	2150 ± 12	2113 ± 12	2161 ± 12	2178 ± 12	2179 ± 12	2109 ± 12
12,1	2549 ± 13	2621 ± 13	2570 ± 13	2524 ± 13	2588 ± 13	2582 ± 13	2566 ± 13	2607 ± 13	2626 ± 13	2483 ± 13
13,8	2378 ± 13	2408 ± 13	2346 ± 13	2383 ± 13	2399 ± 13	2343 ± 13	2419 ± 13	2422 ± 13	2443 ± 13	2372 ± 13
15,3	1920 ± 11	1927 ± 11	1947 ± 11	1921 ± 11	1954 ± 11	1889 ± 11	1939 ± 11	1946 ± 11	1926 ± 11	1902 ± 11
16,6	2049 ± 12	2103 ± 12	2045 ± 12	2100 ± 12	2053 ± 12	2077 ± 12	2094 ± 12	2070 ± 12	2072 ± 12	2056 ± 12
17,1	1948 ± 11	1918 ± 11	1957 ± 11	1884 ± 11	1958 ± 11	1899 ± 11	1967 ± 11	1937 ± 11	1931 ± 11	1902 ± 11

APÊNDICE H - Eficiências médias para padrão de ²⁴¹Am em todos os detectores e em várias espessuras para o sistema de contagem LB 770-2.

espessura (mg/cm ²)	detectores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,247 ± 0,003	fora de operação	0,263 ± 0,003	0,254 ± 0,003	0,243 ± 0,002	0,263 ± 0,003	0,263 ± 0,003	0,267 ± 0,003	0,258 ± 0,003	0,258 ± 0,003
0,6	0,221 ± 0,002		0,237 ± 0,002	0,230 ± 0,002	0,223 ± 0,002	0,232 ± 0,002	0,237 ± 0,002	0,244 ± 0,002	0,236 ± 0,002	0,230 ± 0,002
1,2	0,199 ± 0,002		0,210 ± 0,002	0,206 ± 0,002	0,196 ± 0,002	0,211 ± 0,002	0,209 ± 0,002	0,219 ± 0,002	0,216 ± 0,002	0,200 ± 0,002
1,9	0,167 ± 0,002		0,179 ± 0,002	0,174 ± 0,002	0,166 ± 0,002	0,178 ± 0,002	0,150 ± 0,002	0,187 ± 0,002	0,179 ± 0,002	0,177 ± 0,002
2,6	0,144 ± 0,002		0,148 ± 0,002	0,147 ± 0,002	0,143 ± 0,002	0,146 ± 0,002	0,149 ± 0,002	0,153 ± 0,002	0,146 ± 0,002	0,146 ± 0,002
3,2	0,132 ± 0,002		0,144 ± 0,002	0,137 ± 0,001	0,169 ± 0,002	0,162 ± 0,002	0,143 ± 0,002	0,147 ± 0,002	0,145 ± 0,002	0,138 ± 0,001
3,8	0,141 ± 0,002		0,154 ± 0,002	0,145 ± 0,002	0,139 ± 0,002	0,152 ± 0,002	0,152 ± 0,002	0,157 ± 0,002	0,158 ± 0,002	0,145 ± 0,002
4,5	0,145 ± 0,002		0,153 ± 0,002	0,150 ± 0,002	0,147 ± 0,002	0,155 ± 0,002	0,156 ± 0,002	0,161 ± 0,002	0,162 ± 0,002	0,161 ± 0,002
5,1	0,130 ± 0,001		0,134 ± 0,001	0,136 ± 0,001	0,127 ± 0,001	0,136 ± 0,001	0,136 ± 0,001	0,141 ± 0,001	0,140 ± 0,001	0,133 ± 0,001
6,8	0,151 ± 0,002		0,162 ± 0,002	0,157 ± 0,002	0,152 ± 0,002	0,165 ± 0,002	0,162 ± 0,002	0,170 ± 0,002	0,166 ± 0,002	0,157 ± 0,002
7,5	0,126 ± 0,001		0,139 ± 0,002	0,135 ± 0,002	0,129 ± 0,001	0,135 ± 0,002	0,138 ± 0,002	0,143 ± 0,002	0,139 ± 0,002	0,136 ± 0,002
9,4	0,098 ± 0,001		0,107 ± 0,001	0,106 ± 0,001	0,099 ± 0,001	0,104 ± 0,001	0,106 ± 0,001	0,109 ± 0,001	0,106 ± 0,001	0,105 ± 0,001
9,9	0,053 ± 0,001		0,054 ± 0,001	0,054 ± 0,001	0,052 ± 0,001	0,055 ± 0,001	0,057 ± 0,001	0,059 ± 0,001	0,054 ± 0,001	0,054 ± 0,001
10,9	0,0170 ± 0,0004		0,0180 ± 0,0004	0,0180 ± 0,0004	0,0160 ± 0,0004	0,0190 ± 0,0004	0,0190 ± 0,0004	0,0230 ± 0,0004	0,0210 ± 0,0004	0,0200 ± 0,0004
13,8	0,0110 ± 0,0003		0,0120 ± 0,0003	0,0120 ± 0,0003	0,0100 ± 0,0003	0,0130 ± 0,0003	0,0110 ± 0,0003	0,0120 ± 0,0003	0,0130 ± 0,0003	0,0110 ± 0,0003
15,5	0,0190 ± 0,0004		0,0210 ± 0,0004	0,0200 ± 0,0004	0,0170 ± 0,0004	0,0210 ± 0,0004	0,0200 ± 0,0004	0,0220 ± 0,0004	0,0210 ± 0,0004	0,0170 ± 0,0004

APÊNDICE I - Eficiências médias para padrão de ^{241}Am em todos os detectores e em várias espessuras para o sistema de contagem LB 770-2/5.

espessura (mg/cm ²)	detectores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,262 ± 0,003	0,273 ± 0,003	0,265 ± 0,003	0,266 ± 0,003	0,264 ± 0,003	0,264 ± 0,003	0,270 ± 0,003	0,264 ± 0,003	0,264 ± 0,003	0,263 ± 0,003
0,6	0,243 ± 0,002	0,245 ± 0,002	0,247 ± 0,002	0,243 ± 0,002	0,245 ± 0,002	0,238 ± 0,002	0,249 ± 0,002	0,248 ± 0,002	0,243 ± 0,002	0,242 ± 0,002
1,2	0,223 ± 0,002	0,222 ± 0,002	0,223 ± 0,002	0,223 ± 0,002	0,224 ± 0,002	0,221 ± 0,002	0,23 ± 0,002	0,227 ± 0,002	0,222 ± 0,002	0,222 ± 0,002
1,9	0,188 ± 0,002	0,191 ± 0,002	0,174 ± 0,002	0,192 ± 0,002	0,194 ± 0,002	0,19 ± 0,002	0,197 ± 0,002	0,194 ± 0,002	0,191 ± 0,002	0,195 ± 0,002
2,6	0,156 ± 0,002	0,155 ± 0,002	0,152 ± 0,002	0,157 ± 0,002	0,159 ± 0,002	0,159 ± 0,002	0,16 ± 0,002	0,159 ± 0,002	0,146 ± 0,002	0,159 ± 0,002
3,2	0,156 ± 0,002	0,156 ± 0,002	0,154 ± 0,002	0,157 ± 0,002	0,145 ± 0,002	0,154 ± 0,002	0,155 ± 0,002	0,155 ± 0,002	0,157 ± 0,002	0,154 ± 0,002
3,8	0,146 ± 0,002	0,164 ± 0,002	0,159 ± 0,002	0,162 ± 0,002	0,161 ± 0,002	0,161 ± 0,002	0,156 ± 0,002	0,164 ± 0,002	0,157 ± 0,002	0,162 ± 0,002
4,5	0,167 ± 0,002	0,169 ± 0,002	0,167 ± 0,002	0,17 ± 0,002	0,167 ± 0,002	0,171 ± 0,002	0,158 ± 0,002	0,168 ± 0,002	0,159 ± 0,002	0,168 ± 0,002
5,1	0,148 ± 0,002	0,151 ± 0,002	0,151 ± 0,002	0,149 ± 0,002	0,149 ± 0,002	0,151 ± 0,002	0,152 ± 0,002	0,151 ± 0,002	0,152 ± 0,002	0,15 ± 0,002
6,8	0,152 ± 0,002	0,18 ± 0,002	0,152 ± 0,002	0,151 ± 0,002	0,173 ± 0,002	0,17 ± 0,002	0,175 ± 0,002	0,173 ± 0,002	0,15 ± 0,002	0,175 ± 0,002
7,4	0,138 ± 0,002	0,143 ± 0,002	0,139 ± 0,002	0,124 ± 0,001	0,126 ± 0,001	0,139 ± 0,002	0,143 ± 0,002	0,139 ± 0,002	0,121 ± 0,001	0,12 ± 0,001
9,4	0,106 ± 0,001	0,107 ± 0,001	0,109 ± 0,001	0,108 ± 0,001	0,085 ± 0,001	0,084 ± 0,001	0,087 ± 0,001	0,104 ± 0,001	0,106 ± 0,001	0,086 ± 0,001
9,9	0,059 ± 0,001	0,059 ± 0,001	0,055 ± 0,001	0,055 ± 0,001	0,056 ± 0,001	0,057 ± 0,001	0,058 ± 0,001	0,057 ± 0,001	0,055 ± 0,001	0,055 ± 0,001
10,9	0,0210 ± 0,0005	0,0210 ± 0,0005	0,0220 ± 0,0005	0,0200 ± 0,0004	0,0190 ± 0,0004	0,0190 ± 0,0004	0,0210 ± 0,0005	0,0220 ± 0,0005	0,0190 ± 0,0004	0,0180 ± 0,0004
13,8	0,0140 ± 0,0004	0,0140 ± 0,0004	0,0140 ± 0,0004	0,0140 ± 0,0004	0,0130 ± 0,0003	0,0140 ± 0,0004	0,0140 ± 0,0004	0,0140 ± 0,0004	0,0140 ± 0,0004	0,0140 ± 0,0004
15,5	0,0230 ± 0,0005	0,0200 ± 0,0004	0,0210 ± 0,0005	0,0170 ± 0,0004	0,0180 ± 0,0004	0,0170 ± 0,0004	0,0160 ± 0,0004	0,0170 ± 0,0004	0,0160 ± 0,0004	0,0150 ± 0,0004

APÊNDICE J - Eficiências médias para padrão de U-natural em todos os detectores e em várias espessuras para o sistema de contagem LB 770-2/5.

espessura (mg/cm ²)	detectores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,305 ± 0,016	0,336 ± 0,018	0,322 ± 0,017	0,344 ± 0,018	0,349 ± 0,018	0,320 ± 0,017	0,332 ± 0,018	0,331 ± 0,018	0,315 ± 0,017	0,323 ± 0,017
0,3	0,207 ± 0,011	0,200 ± 0,011	0,207 ± 0,011	0,231 ± 0,012	0,195 ± 0,011	0,208 ± 0,011	0,234 ± 0,012	0,202 ± 0,011	0,205 ± 0,011	0,210 ± 0,011
0,7	0,179 ± 0,010	0,174 ± 0,010	0,160 ± 0,009	0,193 ± 0,011	0,149 ± 0,008	0,183 ± 0,010	0,175 ± 0,010	0,184 ± 0,010	0,177 ± 0,010	0,150 ± 0,008
0,9	0,162 ± 0,009	0,153 ± 0,008	0,158 ± 0,009	0,152 ± 0,008	0,176 ± 0,010	0,177 ± 0,010	0,158 ± 0,009	0,178 ± 0,010	0,167 ± 0,009	0,163 ± 0,009
1,3	0,109 ± 0,006	0,121 ± 0,007	0,129 ± 0,007	0,123 ± 0,007	0,128 ± 0,007	0,162 ± 0,009	0,125 ± 0,007	0,142 ± 0,008	0,143 ± 0,008	0,132 ± 0,007
1,9	0,125 ± 0,007	0,116 ± 0,007	0,125 ± 0,007	0,119 ± 0,007	0,126 ± 0,007	0,149 ± 0,008	0,131 ± 0,007	0,136 ± 0,007	0,128 ± 0,007	0,130 ± 0,007
2,5	0,108 ± 0,006	0,103 ± 0,006	0,104 ± 0,006	0,114 ± 0,006	0,127 ± 0,007	0,123 ± 0,007	0,120 ± 0,007	0,122 ± 0,007	0,119 ± 0,007	0,109 ± 0,006
2,9	0,095 ± 0,005	0,099 ± 0,006	0,104 ± 0,006	0,109 ± 0,006	0,104 ± 0,006	0,095 ± 0,005	0,110 ± 0,006	0,102 ± 0,006	0,094 ± 0,005	0,090 ± 0,005
3,5	0,079 ± 0,005	0,074 ± 0,004	0,055 ± 0,003	0,073 ± 0,004	0,074 ± 0,004	0,081 ± 0,005	0,074 ± 0,004	0,076 ± 0,004	0,067 ± 0,004	0,074 ± 0,004
4,3	0,076 ± 0,005	0,072 ± 0,004	0,085 ± 0,005	0,070 ± 0,004	0,084 ± 0,005	0,090 ± 0,005	0,073 ± 0,004	0,084 ± 0,005	0,080 ± 0,005	0,074 ± 0,004
5,8	0,086 ± 0,005	0,064 ± 0,004	0,061 ± 0,004	0,060 ± 0,004	0,073 ± 0,004	0,083 ± 0,005	0,065 ± 0,004	0,056 ± 0,003	0,049 ± 0,003	0,062 ± 0,004
7,2	0,073 ± 0,004	0,058 ± 0,003	0,066 ± 0,004	0,073 ± 0,004	0,064 ± 0,004	0,068 ± 0,004	0,060 ± 0,004	0,071 ± 0,004	0,065 ± 0,004	0,063 ± 0,004
8,7	0,042 ± 0,003	0,050 ± 0,003	0,061 ± 0,004	0,060 ± 0,004	0,043 ± 0,003	0,067 ± 0,004	0,057 ± 0,003	0,055 ± 0,003	0,053 ± 0,003	0,057 ± 0,003
10,1	0,056 ± 0,003	0,051 ± 0,003	0,051 ± 0,003	0,045 ± 0,003	0,060 ± 0,004	0,057 ± 0,003	0,051 ± 0,003	0,034 ± 0,002	0,047 ± 0,003	0,047 ± 0,003
11,5	0,037 ± 0,003	0,049 ± 0,003	0,045 ± 0,003	0,046 ± 0,003	0,045 ± 0,003	0,054 ± 0,003	0,053 ± 0,003	0,040 ± 0,003	0,051 ± 0,003	0,037 ± 0,003
12,6	0,041 ± 0,003	0,050 ± 0,003	0,047 ± 0,003	0,048 ± 0,003	0,045 ± 0,003	0,061 ± 0,004	0,052 ± 0,003	0,044 ± 0,003	0,042 ± 0,003	0,049 ± 0,003
14,4	0,032 ± 0,002	0,032 ± 0,002	0,033 ± 0,002	0,042 ± 0,003	0,023 ± 0,002	0,040 ± 0,003	0,037 ± 0,003	0,028 ± 0,002	0,031 ± 0,002	0,032 ± 0,002

APÊNDICE L - Eficiências médias para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ em todos os detectores e em várias espessuras para o sistema de contagem LB 770-2.

espessura (mg/cm ²)	detectores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,490 ± 0,005	fora de operação	0,506 ± 0,005	0,504 ± 0,005	0,488 ± 0,005	0,503 ± 0,005	0,520 ± 0,005	0,531 ± 0,005	0,527 ± 0,005	0,504 ± 0,005
0,7	0,490 ± 0,005		0,512 ± 0,005	0,512 ± 0,005	0,498 ± 0,005	0,503 ± 0,005	0,518 ± 0,005	0,530 ± 0,005	0,524 ± 0,005	0,509 ± 0,005
1,3	0,449 ± 0,005		0,474 ± 0,005	0,470 ± 0,005	0,454 ± 0,005	0,459 ± 0,005	0,484 ± 0,005	0,487 ± 0,005	0,475 ± 0,005	0,467 ± 0,005
2,6	0,487 ± 0,005		0,511 ± 0,005	0,507 ± 0,005	0,489 ± 0,005	0,502 ± 0,005	0,493 ± 0,005	0,512 ± 0,005	0,520 ± 0,005	0,595 ± 0,005
3,1	0,457 ± 0,005		0,479 ± 0,005	0,475 ± 0,005	0,471 ± 0,005	0,475 ± 0,005	0,483 ± 0,005	0,494 ± 0,005	0,493 ± 0,005	0,467 ± 0,005
4,7	0,450 ± 0,005		0,474 ± 0,005	0,471 ± 0,005	0,454 ± 0,005	0,460 ± 0,005	0,474 ± 0,005	0,486 ± 0,005	0,487 ± 0,005	0,471 ± 0,005
6,3	0,447 ± 0,005		0,474 ± 0,005	0,461 ± 0,005	0,454 ± 0,005	0,465 ± 0,005	0,476 ± 0,005	0,486 ± 0,005	0,486 ± 0,005	0,462 ± 0,005
7,8	0,413 ± 0,004		0,436 ± 0,005	0,425 ± 0,005	0,415 ± 0,004	0,423 ± 0,004	0,434 ± 0,005	0,440 ± 0,005	0,430 ± 0,005	0,425 ± 0,005
9,5	0,401 ± 0,004		0,431 ± 0,005	0,428 ± 0,005	0,420 ± 0,004	0,426 ± 0,005	0,436 ± 0,005	0,439 ± 0,005	0,438 ± 0,005	0,424 ± 0,005
12,5	0,396 ± 0,004		0,412 ± 0,004	0,407 ± 0,004	0,398 ± 0,004	0,412 ± 0,004	0,419 ± 0,004	0,423 ± 0,004	0,421 ± 0,004	0,407 ± 0,004
15,6	0,375 ± 0,004		0,399 ± 0,004	0,391 ± 0,004	0,379 ± 0,004	0,392 ± 0,004	0,400 ± 0,004	0,406 ± 0,004	0,404 ± 0,004	0,384 ± 0,004
17,2	0,376 ± 0,004		0,394 ± 0,004	0,394 ± 0,004	0,381 ± 0,004	0,391 ± 0,004	0,401 ± 0,004	0,403 ± 0,004	0,398 ± 0,004	0,391 ± 0,004
18,8	0,332 ± 0,003		0,345 ± 0,004	0,340 ± 0,004	0,329 ± 0,003	0,340 ± 0,004	0,353 ± 0,004	0,358 ± 0,004	0,343 ± 0,004	0,344 ± 0,004

APÊNDICE M - Eficiências médias para padrão de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ em todos os detectores e em várias espessuras para o sistema de contagem LB 770-2/5.

espessura (mg/cm ²)	detectores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,475 ± 0,005	0,486 ± 0,005	0,480 ± 0,005	0,475 ± 0,005	0,474 ± 0,005	0,476 ± 0,005	0,486 ± 0,005	0,479 ± 0,005	0,479 ± 0,005	0,485 ± 0,005
0,7	0,432 ± 0,005	0,438 ± 0,005	0,429 ± 0,005	0,431 ± 0,005	0,427 ± 0,005	0,427 ± 0,005	0,435 ± 0,005	0,448 ± 0,005	0,433 ± 0,005	0,433 ± 0,005
1,3	0,426 ± 0,005	0,432 ± 0,005	0,434 ± 0,005	0,425 ± 0,005	0,427 ± 0,005	0,432 ± 0,005	0,437 ± 0,005	0,433 ± 0,005	0,427 ± 0,005	0,427 ± 0,005
2,6	0,467 ± 0,005	0,473 ± 0,005	0,471 ± 0,005	0,464 ± 0,005	0,462 ± 0,005	0,463 ± 0,005	0,465 ± 0,005	0,464 ± 0,005	0,464 ± 0,005	0,462 ± 0,005
3,1	0,458 ± 0,005	0,466 ± 0,005	0,458 ± 0,005	0,456 ± 0,005	0,451 ± 0,005	0,453 ± 0,005	0,455 ± 0,005	0,454 ± 0,005	0,455 ± 0,005	0,452 ± 0,005
4,7	0,450 ± 0,005	0,457 ± 0,005	0,451 ± 0,005	0,450 ± 0,005	0,451 ± 0,005	0,449 ± 0,005	0,453 ± 0,005	0,454 ± 0,005	0,453 ± 0,005	0,455 ± 0,005
6,3	0,437 ± 0,005	0,450 ± 0,005	0,443 ± 0,005	0,440 ± 0,005	0,443 ± 0,005	0,441 ± 0,005	0,445 ± 0,005	0,446 ± 0,005	0,441 ± 0,005	0,438 ± 0,005
7,8	0,381 ± 0,004	0,386 ± 0,004	0,383 ± 0,004	0,382 ± 0,004	0,377 ± 0,004	0,385 ± 0,004	0,381 ± 0,004	0,380 ± 0,004	0,385 ± 0,004	0,382 ± 0,004
9,5	0,407 ± 0,004	0,419 ± 0,004	0,410 ± 0,004	0,403 ± 0,004	0,414 ± 0,004	0,406 ± 0,004	0,416 ± 0,004	0,418 ± 0,004	0,414 ± 0,004	0,414 ± 0,004
12,5	0,396 ± 0,004	0,395 ± 0,004	0,393 ± 0,004	0,390 ± 0,004	0,393 ± 0,004	0,386 ± 0,004	0,393 ± 0,004	0,396 ± 0,004	0,393 ± 0,004	0,392 ± 0,004
15,6	0,374 ± 0,004	0,381 ± 0,004	0,375 ± 0,004	0,373 ± 0,004	0,374 ± 0,004	0,376 ± 0,004	0,377 ± 0,004	0,379 ± 0,004	0,374 ± 0,004	0,373 ± 0,004
17,2	0,352 ± 0,004	0,357 ± 0,004	0,355 ± 0,004	0,353 ± 0,004	0,350 ± 0,004	0,353 ± 0,004	0,349 ± 0,004	0,348 ± 0,004	0,351 ± 0,004	0,347 ± 0,004
18,8	0,323 ± 0,003	0,326 ± 0,003	0,322 ± 0,003	0,322 ± 0,003	0,325 ± 0,003	0,323 ± 0,003	0,324 ± 0,003	0,323 ± 0,003	0,322 ± 0,003	0,322 ± 0,003

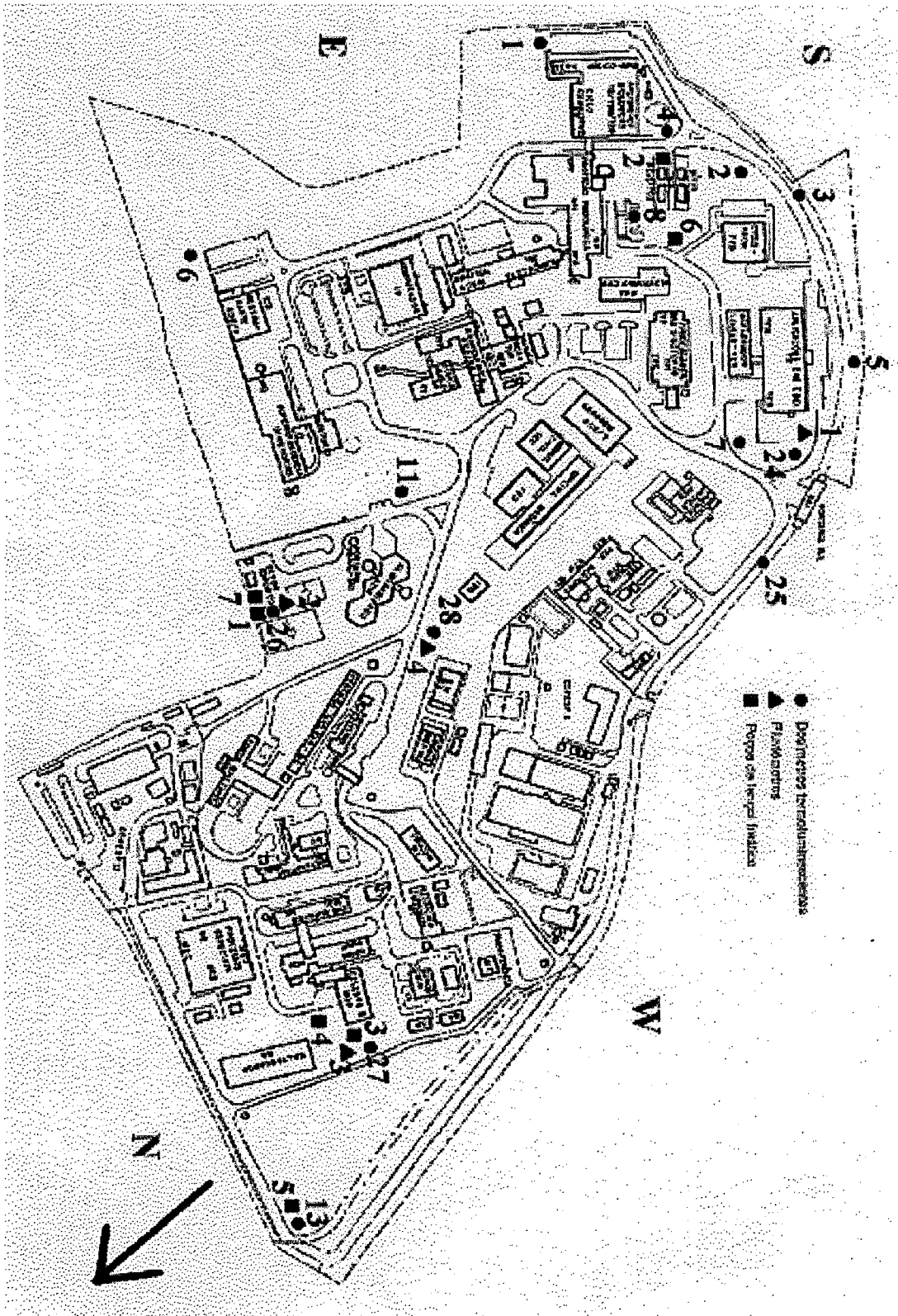
APÊNDICE N - Eficiências médias para padrão de ^{137}Cs em todos os detectores e em várias espessuras para o sistema de contagem LB 770-2.

espessura (mg/cm ²)	detectores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,423 ± 0,004	fora de operação	0,448 ± 0,005	0,439 ± 0,004	0,427 ± 0,004	0,445 ± 0,005	0,454 ± 0,005	0,46 ± 0,005	0,458 ± 0,005	0,437 ± 0,004
0,6	0,423 ± 0,004		0,443 ± 0,005	0,447 ± 0,005	0,431 ± 0,004	0,444 ± 0,005	0,449 ± 0,005	0,454 ± 0,005	0,448 ± 0,005	0,443 ± 0,005
1,3	0,388 ± 0,004		0,401 ± 0,004	0,406 ± 0,004	0,391 ± 0,004	0,405 ± 0,004	0,409 ± 0,004	0,417 ± 0,004	0,414 ± 0,004	0,401 ± 0,004
2,5	0,365 ± 0,004		0,392 ± 0,004	0,38 ± 0,004	0,367 ± 0,004	0,384 ± 0,004	0,387 ± 0,004	0,392 ± 0,004	0,391 ± 0,004	0,378 ± 0,004
3,1	0,372 ± 0,004		0,387 ± 0,004	0,39 ± 0,004	0,374 ± 0,004	0,38 ± 0,004	0,385 ± 0,004	0,401 ± 0,004	0,386 ± 0,004	0,385 ± 0,004
4,5	0,339 ± 0,003		0,35 ± 0,004	0,349 ± 0,004	0,342 ± 0,004	0,352 ± 0,004	0,353 ± 0,004	0,361 ± 0,004	0,357 ± 0,004	0,353 ± 0,004
5,3	0,325 ± 0,003		0,346 ± 0,004	0,344 ± 0,004	0,333 ± 0,003	0,348 ± 0,004	0,347 ± 0,004	0,353 ± 0,004	0,347 ± 0,004	0,337 ± 0,003
6,2	0,331 ± 0,003		0,342 ± 0,004	0,338 ± 0,003	0,338 ± 0,003	0,344 ± 0,004	0,348 ± 0,004	0,351 ± 0,004	0,35 ± 0,004	0,335 ± 0,003
7,6	0,342 ± 0,004		0,358 ± 0,004	0,348 ± 0,004	0,346 ± 0,004	0,353 ± 0,004	0,363 ± 0,004	0,361 ± 0,004	0,364 ± 0,004	0,352 ± 0,004
9,0	0,311 ± 0,003		0,325 ± 0,003	0,322 ± 0,003	0,315 ± 0,003	0,322 ± 0,003	0,327 ± 0,003	0,333 ± 0,003	0,337 ± 0,003	0,321 ± 0,003
10,9	0,278 ± 0,003		0,297 ± 0,003	0,288 ± 0,003	0,284 ± 0,003	0,288 ± 0,003	0,295 ± 0,003	0,295 ± 0,003	0,293 ± 0,003	0,29 ± 0,003
12,1	0,332 ± 0,003		0,35 ± 0,004	0,351 ± 0,004	0,348 ± 0,004	0,351 ± 0,004	0,35 ± 0,004	0,362 ± 0,004	0,351 ± 0,004	0,349 ± 0,004
13,8	0,308 ± 0,003		0,326 ± 0,003	0,325 ± 0,003	0,312 ± 0,003	0,318 ± 0,003	0,319 ± 0,003	0,323 ± 0,003	0,315 ± 0,003	0,309 ± 0,003
15,3	0,247 ± 0,003		0,255 ± 0,003	0,253 ± 0,003	0,251 ± 0,003	0,261 ± 0,003	0,263 ± 0,003	0,267 ± 0,003	0,261 ± 0,003	0,252 ± 0,003
16,6	0,267 ± 0,003		0,281 ± 0,003	0,274 ± 0,003	0,268 ± 0,003	0,275 ± 0,003	0,284 ± 0,003	0,283 ± 0,003	0,279 ± 0,003	0,272 ± 0,003

APÊNDICE O - Eficiências médias para padrão de ^{137}Cs em todos os detectores e em várias espessuras para o sistema de contagem LB 770-2/5.

espessura (mg/cm ²)	detectores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,424 ± 0,004	0,424 ± 0,004	0,431 ± 0,004	0,428 ± 0,004	0,416 ± 0,004	0,412 ± 0,004	0,44 ± 0,004	0,443 ± 0,004	0,442 ± 0,004	0,439 ± 0,004
0,6	0,416 ± 0,004	0,432 ± 0,004	0,409 ± 0,004	0,417 ± 0,004	0,419 ± 0,004	0,415 ± 0,004	0,423 ± 0,004	0,426 ± 0,004	0,423 ± 0,004	0,425 ± 0,004
1,3	0,383 ± 0,004	0,387 ± 0,004	0,387 ± 0,004	0,388 ± 0,004	0,385 ± 0,004	0,383 ± 0,004	0,393 ± 0,004	0,393 ± 0,004	0,394 ± 0,004	0,390 ± 0,004
2,5	0,370 ± 0,004	0,372 ± 0,004	0,370 ± 0,004	0,368 ± 0,004	0,371 ± 0,004	0,360 ± 0,004	0,370 ± 0,004	0,375 ± 0,004	0,364 ± 0,004	0,370 ± 0,004
3,1	0,370 ± 0,004	0,377 ± 0,004	0,367 ± 0,004	0,364 ± 0,004	0,372 ± 0,004	0,360 ± 0,004	0,374 ± 0,004	0,368 ± 0,004	0,368 ± 0,004	0,365 ± 0,004
4,5	0,330 ± 0,003	0,345 ± 0,004	0,334 ± 0,003	0,337 ± 0,003	0,333 ± 0,003	0,332 ± 0,003	0,343 ± 0,004	0,337 ± 0,003	0,335 ± 0,003	0,338 ± 0,003
5,3	0,325 ± 0,003	0,335 ± 0,003	0,330 ± 0,003	0,334 ± 0,003	0,329 ± 0,003	0,325 ± 0,003	0,347 ± 0,004	0,333 ± 0,003	0,333 ± 0,003	0,327 ± 0,003
6,2	0,326 ± 0,003	0,330 ± 0,003	0,331 ± 0,003	0,331 ± 0,003	0,330 ± 0,003	0,323 ± 0,003	0,329 ± 0,003	0,330 ± 0,003	0,329 ± 0,003	0,329 ± 0,003
7,6	0,331 ± 0,003	0,345 ± 0,004	0,339 ± 0,003	0,343 ± 0,004	0,335 ± 0,003	0,324 ± 0,003	0,338 ± 0,003	0,335 ± 0,003	0,344 ± 0,004	0,336 ± 0,003
9,0	0,307 ± 0,003	0,312 ± 0,003	0,308 ± 0,003	0,313 ± 0,003	0,311 ± 0,003	0,306 ± 0,003	0,309 ± 0,003	0,312 ± 0,003	0,311 ± 0,003	0,311 ± 0,003
10,9	0,268 ± 0,003	0,273 ± 0,003	0,278 ± 0,003	0,271 ± 0,003	0,275 ± 0,003	0,271 ± 0,003	0,277 ± 0,003	0,279 ± 0,003	0,279 ± 0,003	0,270 ± 0,003
12,1	0,327 ± 0,003	0,336 ± 0,003	0,329 ± 0,003	0,323 ± 0,003	0,332 ± 0,003	0,331 ± 0,003	0,329 ± 0,003	0,334 ± 0,003	0,337 ± 0,003	0,318 ± 0,003
13,8	0,305 ± 0,003	0,309 ± 0,003	0,301 ± 0,003	0,305 ± 0,003	0,307 ± 0,003	0,300 ± 0,003	0,310 ± 0,003	0,310 ± 0,003	0,313 ± 0,003	0,304 ± 0,003
15,3	0,246 ± 0,003	0,247 ± 0,003	0,249 ± 0,003	0,246 ± 0,003	0,250 ± 0,003	0,242 ± 0,003	0,248 ± 0,003	0,249 ± 0,003	0,247 ± 0,003	0,243 ± 0,003
16,6	0,263 ± 0,003	0,269 ± 0,003	0,262 ± 0,003	0,269 ± 0,003	0,263 ± 0,003	0,266 ± 0,003	0,268 ± 0,003	0,265 ± 0,003	0,266 ± 0,003	0,263 ± 0,003
17,1	0,250 ± 0,003	0,246 ± 0,003	0,251 ± 0,003	0,241 ± 0,003	0,251 ± 0,003	0,243 ± 0,003	0,252 ± 0,003	0,248 ± 0,003	0,247 ± 0,003	0,244 ± 0,003

ANEXO D - Localização dos pontos de coleta do PMA-IPEN.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALENCAR, M.M., NOGUEIRA, P.R., *Comunicação Particular*, 2001.
2. BEAR, J., VERRUIJT, A., *Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Holland: D. Reidel, 1992.
3. BERTHOLD LB 770, *Operating Manual*. Germany. 1988.
4. BERTHOLD LB 770Win-PC, *Operating Manual*. Germany. 1996.
5. BROWNE, E., FIRESTONE, R.B., *Table of Radioactive Isotopes*. CA: John Wiley and Sons, 1986.
6. BUDNITZ, R.J. Lawrence Berkeley Laboratory, Environmental Instrumentation Survey, *Radiation. Instrumentation for Environmental Monitoring*. vol. 1, 2nd ed. USA: John Wiley & Sons. 1983.
7. CAMPOS, M.P. *Tório no ar: avaliação de dose ocupacional*. 1999. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
8. EATON, A.D.; CLESCERI, L.S.; GREENBERG, A.E. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington: Am. Public Health Ass., 1995.
9. EISENBUD, M. *Environmental Radioactivity from Natural, Industrial and Military Sources*, 3rd ed. New York, N.Y.: Academic, 1987.
10. EURISYS. *Análise de espectro de plaqueta com Am-241*. 2001.
11. EVANS, R.D. *The Atomic Nucleus*. Malabar-Krieger, 1982.
12. FEITOSA, F. A.C.; MANOEL FILHO, J. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza: Serviço Geológico do Brasil, 1997.
13. HELRICH, K. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Virginia: AOAC, 1990.

14. IAEA - SS - 16. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Manual on Environmental Monitoring in Normal Operation*. Vienna: 1975.
15. IAEA - SS - 41. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Objectives and Design of Environmental Monitoring Programmes for Radioactive Contaminants*. Vienna: 1975.
16. IAEA - SS - 46. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Monitoring of airborne and liquid radioactive releases from nuclear facilities to the environment*. Vienna: 1978.
17. ICRU. *Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles*. REPORT 49., 1993.
18. IG-USP. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS. *Boletim IG-USP*. N. 5. São Paulo, 1993.
19. JACOMINO, V.M. F.; MÁDUAR, M.F. *Monitoração Ambiental nas Imediações de Instalações Nucleares*. São Paulo: IPEN, fev. 1992 (IPEN-Pub-363).
20. JANZER, V.J., *Discordant Gross Radioactivity Measurements of Natural and Treated Waters*, In: Effluent and Environmental Radiation Surveillances, ASTM STP 698. J. J. Kelly, 1980. p. 327-341.
21. KNOLL, G.F., *Radiation Detection and Measurement*. 2 ed. New York, N.Y.: Wiley, 1989.
22. LEDERER, C.M.; SHIRLEY, V.S., *Table of Isotopes*. CA: John Wiley and Sons, 1978.
23. LURIE, J. *Handbook of Analytical Chemistry*. Translated from the Russian by Nicholas Bobrov. Moscow: Mir, p. 76-99, 1978.
24. MÁDUAR, M.F.; MOREIRA, S.R.D. *Comunicação Particular*. 2001.
25. MAFRA, O.Y. *Técnicas e Medidas Nucleares*. São Paulo: Blücher, 1973.
26. MARMIER, P.; SHELDON, E. *Physics of Nuclei and Particles*. vol. 1. New York, N.Y.: Academic, 1970.
27. MATHCAD POR MATH SOFT. versão 7: programa para cálculos matemáticos, 1997.

28. MICROCAL ORIGIN, version 5,0: Data Analysis and Technical Graphics.
29. MINISTÉRIO DA SAÚDE. *Normas e o padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano*. Brasília, dezembro de 2000. (Portaria nº 1469).
30. ODUM, E.P. *Ecologia*, Rio de Janeiro: Guanabara, 1988.
31. OLIVEIRA, J. *Determinação dos Níveis de Radioatividade Natural em águas utilizadas para abastecimento público no estado de São Paulo*. 1998. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
32. PAGES, L.; BERTEL, E.; JOFFRE, H.; SKLAVENTITIS, L. *Energy loss, range and bremsstrahlung yield for 10 keV to 100 MeV electrons in various elements and chemical compounds*. Atomic Data. Vol. 4. 1972.
33. PECEQUILO, B.R.S. *Notas de aula*. 2000.
34. PECEQUILO, B.R.S. *Comunicação Pessoal*. 2001.
35. PFENNIG, G.; KLEWE-NEBENIUS, H.; SEELMANN-EGGEBERT, W. *Chart of the Nuclides*. Institut für Radiochemie, 6 ed, Germany, 1995.
36. PNI-IRD. PROGRAMA NACIONAL DE INTERCOMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE ANÁLISES DE RADIONUCLÍDEOS EM AMOSTRAS AMBIENTAIS. *Rodada dez/2000*.
37. PNI-IRD. PROGRAMA NACIONAL DE INTERCOMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE ANÁLISES DE RADIONUCLÍDEOS EM AMOSTRAS AMBIENTAIS. *Rodada abr/2001*.
38. PNI-IRD. PROGRAMA NACIONAL DE INTERCOMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE ANÁLISES DE RADIONUCLÍDEOS EM AMOSTRAS AMBIENTAIS. *Rodada dez/2001*.
39. PNI-IRD. PROGRAMA NACIONAL DE INTERCOMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE ANÁLISES DE RADIONUCLÍDEOS EM AMOSTRAS AMBIENTAIS. *Rodada abr/2002*.
40. PORTO, R.L.L. *Hidrologia Ambiental*. São Paulo: EDUSP, 1991.

41. PRICE, W.J. *Nuclear Radiation Detection*. New York, N.Y.: McGraw-Hill, 2 ed, 1964.
42. RAND, G.M. *Fundamentals of Aquatic Toxicology: Effects, Environmental Fate, and Risk Assessment*. Washington: Taylor & Francis, 1995.
43. TSOULFANIDIS, N. *Measurement and Detection of Radiation*. Washington: Taylor & Francis, 1995.
44. UNSCEAR. UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*. New York, N.Y., 1988.
45. UNSCEAR. UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*. New York, N.Y., 1993.
46. USEPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *National Primary Drinking Water Regulations - Radionuclides*. Proposed Rule 40 CFR, 12, Federal Register 56, n. 38, II. jul. 1991.
47. VOGEL, BASSETT, J., DENNEY, R.C., JEFFERY, G.H., MENDHAM, J. *Análise Inorgânica Quantitativa*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
48. YOSHINAGA, S. *Estudos hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos das águas minerais e termais de águas de Lindóia e Lindóia, SP*. 1990. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, São Paulo.