

Estudo do Acidente Radiológico de Goiânia no Ensino de Física Moderna

(Study of the Radiological Accident at Goiânia in the Teaching of Modern Physics)

R. Meigikos dos Anjos, A. Facure, K. C. Damasio Macario, E. M. Yoshimura²,
J. A. P. Brage, E. M. Terra, H. Tompakow, P. R. S. Gomes, C. E. Alhanati³,
S. N. M. Cardoso³, M. D. N. Santoro³, A. L. Boyd³

Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense (UFF)

Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/no, Gragoatá, 24210-340, Niterói, R.J.

E-mail para contato: meigikos@if.uff.br

²*Laboratório de Dosimetria do Instituto de Física da Universidade de São Paulo,*

C.P. 66318, São Paulo - SP, 05315-970

³*Laboratório de Monitoração Ambiental da Eletronuclear S.A.,*

R. Natal s/n, Mambucaba, Angra dos Reis, RJ, 23908-000

Recebido em 1 de março, 1999

Neste artigo é apresentado um estudo das consequências ambientais do acidente radiológico ocorrido na Cidade de Goiânia em 1987. Esta proposta de ensino foi implementada na disciplina Laboratório Profissional I, do curso de graduação em Física da Universidade Federal Fluminense - UFF, com vistas à melhoria da aprendizagem de fenômenos de Interação da Radiação com a Matéria. Esta proposta faz parte de um plano didático-pedagógico de modernização das disciplinas práticas e teórico-práticas do curso de Física. Além de demonstrar experimentalmente alguns tópicos vistos teoricamente em sala de aula, tem como objetivo despertar o interesse e a motivação dos alunos para assuntos de fronteira nas diversas áreas de pesquisa em Física.

In this paper, a study of the environmental consequences of the radiological accident in Goiânia in 1987 will be presented. This study has been implemented in the class of Advanced Laboratory I, of the Physics course at Universidade Federal Fluminense - UFF, in order to improve the learning of phenomena due to the interaction of radiation with matter, specially γ spectroscopy. This work is part of a modernization plan of Physics teaching. It demonstrates experimentally some of the theoretical topics seen in classroom. The aim of this proposal is to motivate students to ultimate topics in many research fields.

I Introdução

As disciplinas *Laboratório de Física Moderna e Laboratório Profissional I e II* do curso de graduação em Física da UFF, além de demonstrarem experimentalmente alguns tópicos vistos teoricamente em sala de aula, têm como objetivo despertar o interesse e a motivação dos alunos para prosseguirem seus estudos de Pós- Graduação nas várias áreas de pesquisa do *Instituto de Física da UFF*. Um ensino moderno, baseado na aplicação de técnicas experimentais, permite também um contato direto com diversas áreas de ciências tecnológicas, possibilitando motivar, além dos alunos de Física, os alunos de outros cursos, como por exemplo: engenharia, química, biologia, matemática etc.

Dentro deste contexto, existem várias áreas de pesquisa de interesse na UFF. Dentre elas, podemos citar a *Física Nuclear*, que, em adição, permite atuação em várias áreas de fronteira tanto na Física Experimental como em Engenharia (Nuclear, Mecânica, Metalúrgica, Elétrica, Construção Civil), Química, Arqueologia, Geologia, Agricultura etc.

No desenvolvimento de instrumentação nuclear, indo desde a construção e operação de aceleradores (ou reatores) até à detecção de partículas ou radiação, as Engenharias Mecânica, Elétrica e Química e a Informática estão presentes. Não se pode esquecer também as grandes aplicações da instrumentação nuclear nas áreas de Física Médica, Biologia e Ecologia, utilizando a radiação no mapeamento e rastreamento de

diversas doenças em seres vivos e no estudo da evolução do meio ambiente.

A utilização da radiação permite também diagnosticar a composição, estrutura e resistência de materiais, o que interessa às Engenharias Mecânica, Metalúrgica, Civil e Agrícola. Nesta última, a aplicação da radiação se estende ao aumento da produção e à armazenagem agrícola. A datação de materiais é de grande importância para a Geologia e a Arqueologia.

Desta forma, o amplo espectro de aplicações desta área de pesquisa permite elaborar atividades para um novo e moderno programa para as disciplinas englobando, além dos conhecimentos básicos de Física Experimental, conceitos de eletrônica (eletrônica rápida, sistema de aquisição de dados), vácuo, estado sólido (semicondutores), óptica física e uma visão experimental da Mecânica Quântica, permitindo, também, a criação de novas disciplinas, como por exemplo: Tecnologia do Vácuo e *Física Aplicada*, para profissionais nas áreas da Física, Engenharias, Química, Biologia etc.

Este artigo apresentará os resultados de uma aplicação científica, com vistas à melhoria da aprendizagem de fenômenos de interação da radiação com a matéria, mais especificamente espectroscopia γ , na disciplina Laboratório Profissional I, do curso de graduação em Física (Licenciatura e Bacharelado) da UFF. A aplicação consistiu no estudo das consequências ambientais do acidente radiológico ocorrido em Goiânia, GO, em setembro de 1987.

Como objetivo pode ser destacada a complementação de uma experiência didática realizada na UFF [1], baseada na união entre os conceitos teóricos de Física Moderna com a utilização de recursos mais modernos aplicados à análise de espectros de radiação γ emitida por fontes radioativas, culminando numa aplicação de importante interesse tanto da comunidade científica como da população em geral.

Todo este processo é destinado a provocar um maior interesse e motivação aos alunos de graduação, tanto na parte da compreensão fenomenológica dos conceitos, quanto no despertar do interesse científico. Assim, serão apresentados os resultados didáticos, enquanto que na referência [1] é encontrada a descrição dos conceitos teóricos da técnica de espectroscopia γ .

II O Acidente Radiológico de Goiânia

Em setembro de 1987, um cabeçote de uma unidade utilizada em radioterapia, contendo uma fonte radioativa de cério-137 que se encontrava nos escombros do antigo Instituto Goiano de Radioterapia (IGR) foi re-

movido, violado e vendido como ferro velho pelos sucateiros Roberto Santos Alves e Wagner Mota Pereira. Devair e Ivo Alves Ferreira, donos dos ferros-velhos, e Edson Fabiano, vizinho de Devair, transformaram-se involuntariamente em alvos de uma experiência desastrosa. Atraídos pela luminescência do cério, adultos e crianças manipularam e distribuíram entre parentes e amigos cerca de 19 g deste material radioativo ($^{137}\text{CsCl}$, com atividade de 1375 Ci) de alta periculosidade. Desta experiência resultou a morte de quatro pessoas e a contaminação, em maior ou menor grau, de mais de 200 pessoas [2-5].

Após o alarme desencadeado pela Secretaria da Saúde de Goiás, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) assumiu o trabalho de avaliação e descontaminação do local do acidente. A Figura 1 apresenta uma avaliação da concentração de ^{137}Cs (Bq/kg) em solos superficiais do Setor Aeroporto, feita em dezembro de 1987 [2].

Seis meses após o acidente, a maior parte das vítimas já havia retornado às suas casas e os principais locais com focos de contaminação haviam sido descontaminados e/ou removidos. Segundo a CNEN [2], atualmente não há mais riscos para os habitantes, uma vez que as doses registradas na área do acidente não excedem os valores encontrados em Guarapari (ES), cidade com elevada concentração natural de minerais radioativos no solo servindo assim como parâmetro para índices de contaminação radioativa.

De posse dessas informações, um aluno da turma do Laboratório Profissional I realizou em agosto de 1998 um trabalho de campo para a coleta de amostras superficiais do solo da área do acidente em Goiânia em 4 pontos do mapa da figura 1 (casa do Roberto, casa do Wagner, casa do Devair, Ferro Velho do Ivo) e uma no centro da cidade, com o objetivo de obter informações atuais sobre a contaminação ambiental pelo ^{137}Cs .

III Amostras de Solo Coletadas

O trabalho de coleta das amostras de solo foi realizado com a monitoração de um detector de radiação do tipo Geiger-Müller. Foram percorridas algumas ruas do Setor Aeroporto, bairro próximo ao centro da cidade de classe média e média-baixa, urbanizado, constituído essencialmente de casas e sobrados. Foi coletada uma amostra de cada local descrito abaixo:

Casa do Roberto (A) - Rua 57 nº 68, onde morava Roberto dos Santos Alves. A cápsula de ^{137}Cs foi aberta por ele e um amigo no quintal desta casa. O terreno onde existia a casa hoje está coberto por uma camada de concreto. Em frente ao terreno há um bar

Atualmente, Roberto dos Santos Alves, que sofreu sérias queimaduras nos pés e nas mãos e perdeu um braço devido ao acidente, mora em outro local da cidade de Goiânia.

Casa do Wagner (B) - Rua 63 n^o 19, fundos. Segundo local percorrido. Uma parte do césio foi levada e manipulada neste local. Atualmente, outras pessoas moram nesta residência. Wagner Mota Pereira, que sofreu sérias queimaduras, mora em outro local de Goiânia.

Ferro Velho do Devair (C) - Rua 26 A. Considerado o segundo foco principal de contaminação, possui casas velhas adjacentes dos dois lados. Não há construções no terreno. O mesmo também possui uma camada de concreto no chão, mas somente em algumas partes; em outras a terra está exposta. Animais domésticos possuem livre acesso ao interior do terreno, além de crianças que brincam no local. Em frente há um prédio residencial cuja construção precedeu o acidente com o césio. Populares informaram que os moradores deste prédio mudaram-se para lá há pouco tempo, uma vez que, após o acidente, antigos proprietários venderam os seus apartamentos.

Neste local, moravam ou trabalhavam três vítimas fatais, a esposa do Devair (Maria Gabriela Ferreira, 38 anos, falecida em 23.10.87) e dois empregados do ferro velho (Israel Batista dos Santos e Admilson Alves de Souza, 22 e 18 anos, falecidos em 27 e 28 de outubro de 1987, respectivamente). Moradores da proximidade do local informaram que Devair Alves Ferreira veio a falecer em 1994, de "pinga" (alcoolismo). Edson Fabiano, vizinho de Devair, sofreu sérias queimaduras e mora defronte ao local do acidente.

Casa da Fossa (D) - Rua 17 A, quadra 70 A, lote 26 b; o material foi manipulado no local. Atualmente existe uma empresa de equipamentos gráficos no local. Como toda a empresa possui o piso revestido de cerâmica, este foi o único local em que não possível coletar uma amostra de solo.

Aqui morava Ernesto Fabiano, que sofreu uma grave queimadura na coxa, ao transportar parte deste material radioativo no bolso de sua calça.

Ferro Velho do Ivo (E) - Rua 6, quadra Q lote 18. Parte do material foi levado para este local e lá foi manipulado. Este é o único dos locais aqui relacionados que atualmente encontra-se habitado. Lá funciona uma cooperativa de coleta de papel, que também serve de residência para uma família há seis anos. Foi constatada a presença de crianças e muitas aves (galinhas). Nas adjacências, existem terrenos com casas simples construídas de madeira.

Neste local morava a menina de seis anos Leide das Neves Ferreira, vítima fatal do acidente (23.10.87). Em

sua homenagem, o antigo posto da Vigilância Sanitária de Goiânia, que fornece assistência médica, até hoje, às vítimas do acidente radiológico, recebeu o nome de Fundação Leide das Neves Ferreira.

Cidade de Goiânia - A amostra foi coletada próximo ao atual Centro de Cultura e Convenções de Goiânia. Este edifício foi construído no local onde se encontrava o Instituto Goiano de Radioterapia.

IV Arranjo Experimental

a) Preparação das Amostras e Calibração do Arranjo Experimental

O processo de preparação de amostras constituiu-se basicamente das etapas de homogeneização (isto é, de um processo de peneiração para separação das substâncias finas das partes mais grossas: pedras, e materiais orgânicos, etc) e de um processo de secagem num forno a 104°C.

Com o objetivo de calibrar o arranjo experimental utilizado e de participar do aprendizado das técnicas de manipulação e análises de amostras naturais, foram analisadas duas amostras (uma obtida no Ferro velho do Ivo e outra de areia da praia de Guarapari, ES) no Laboratório de Monitoração Ambiental (L.M.A.) da Eletronuclear S.A., em Angra dos Reis. Isto foi possível uma vez que o Grupo de Física Nuclear Experimental do IF-UFF possui intercâmbio científico com pesquisadores do L.M.A.

Lembrando-se que $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10}$ desintegrações/segundo e que $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$, pode-se então escrever a atividade de cada amostra de solo em unidades de Bq/kg, ou seja, a atividade em função da massa da amostra.

As tabelas 1 e 2 apresentam os resultados obtidos da análise realizada pelos pesquisadores do L.M.A. para as amostras de solo de Goiânia e Guarapari, fundamentais para a calibração do arranjo experimental utilizado no IF-UFF.

b) A Experiência Realizada no IF-UFF

As medidas apresentadas neste trabalho foram realizadas no Laboratório de Física Nuclear do IF-UFF. A figura 2 apresenta uma ilustração do arranjo experimental que utiliza a técnica de espectroscopia da radiação γ . Este arranjo é baseado no uso de um detector de iodeto de sódio ativado com tálio - NaI(Tl). Maiores detalhes podem ser encontrados na referências [6] e [7].

Tabela 1. Resultado da análise de uma das amostras de solo do Ferro Velho do Ivo realizada pelo Laboratório de Monitoração Ambiental da Eletronuclear S.A.

Radionuclídeos Encontrados	Atividade (Bq/kg)
^{40}K	$(9,2 \pm 0,8) \times 10^1$
^{137}Cs	$(2,8 \pm 0,1) \times 10^3$
^{208}Tl	$(7,7 \pm 0,9) \times 10^0$
^{212}Pb	$(2,2 \pm 0,2) \times 10^1$
^{214}Bi	$(1,3 \pm 0,1) \times 10^1$
^{228}Ac	$(2,5 \pm 0,2) \times 10^1$

Tabela 2. Resultado da análise de uma das amostras de solo da praia de Guarapari realizada pelo Laboratório de Monitoração Ambiental da Eletronuclear S.A.

Radionuclídeos Encontrados	Atividade (Bq/kg)
^{208}Tl	$(3,0 \pm 0,1) \times 10^2$
^{212}Pb	$(8,0 \pm 0,3) \times 10^2$
^{214}Bi	$(1,0 \pm 0,3) \times 10^2$
^{214}Pb	$(1,2 \pm 0,1) \times 10^2$
^{228}Ac	$(8,0 \pm 0,1) \times 10^2$
^{235}U	$(1,0 \pm 0,1) \times 10^1$

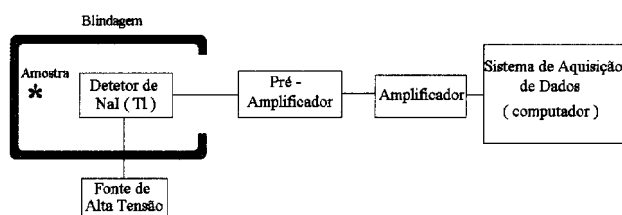


Figura 2. Ilustração do arranjo experimental utilizado para a obtenção dos dados.

Muitos radioisótopos usados para a detecção de radiação γ também emitem radiação β . Um esquema de decaimento típico inclui um decaimento β para um dado nível, seguido de emissão γ para o estado fundamental do isótopo final. Geralmente, utiliza-se um material absorvedor, em geral alumínio, envolvendo o cintilador, de tal modo que as partículas β serão absorvidas e não ultrapassarão este material. Entretanto, para o presente experimento a radiação β não apresenta um problema real, uma vez que as partículas β são praticamente absorvidas pelo protetor de alumínio do tubo da

fotomultiplicadora. Por outro lado, as radiações γ , que possuem alta penetrabilidade, ultrapassam facilmente este protetor de alumínio.

Com o objetivo de minimizar o efeito da radiação de fundo, todo o sistema de detecção e os recipientes que continham as amostras de solo foram isolados do ambiente por uma blindagem de geometria cilíndrica, composta por camadas de Al, Fe e Pb com espessuras de aproximadamente 0,3 cm, 2,0 cm e 2,0 cm, respectivamente.

De acordo com a figura 2, há dois parâmetros que determinam efetivamente os valores ou alturas dos pulsos correspondentes à energia da radiação γ detetada: a alta voltagem que é fornecida ao fototubo e a escala de amplificação (ou ganho) do amplificador linear. O ganho do tubo fotomultiplicador depende fortemente da alta voltagem aplicada. Uma regra geral para a maioria dos fototubos é que uma alteração de 10% na voltagem produzirá uma variação no ganho por um fator 2.

Neste experimento, foram adotados os seguintes parâmetros para a eletrônica analógica: +1000 V para a alimentação do tubo fotomultiplicador; 200 pF para a escala do pré-amplificador de cintilação (modelo 113); 0,5 μs para a escala de "shaping time" do amplificador (modelo 575 A), sendo que o valor do ganho foi ajustado de acordo com o experimento. O sistema multicanal era constituído por uma placa ADCAM para micro-computador, ajustada para 2048 canais. Todos os equipamentos eletrônicos são fabricados pela EG&G ORTEC.

V Resultados

a) A Radiação de Fundo e as Amostras da Superfície do Solo de Goiânia

Desde a sua formação, o planeta Terra tem sido alvo de constante bombardeio de radiações cósmicas que produzem diversas substâncias radioativas na natureza, os chamados radioisótopos cosmogênicos (^{14}C é um exemplo). Além disso, a própria crosta terrestre possui naturalmente diversos isótopos radioativos, geralmente agrupados em séries por decaimentos sucessivos, cujo isótopo chamado pai da série possui meia-vida muito elevada (da ordem de bilhões de anos).

O urânio é o elemento radioativo de ocorrência natural mais conhecido. Entretanto, nas rochas que compõem a crosta terrestre, existem vários outros radionuclídeos tais como o ^{87}Rb , o ^{40}K e os descendentes das séries do urânio (^{238}U e ^{235}U) e do tório (^{232}Th). É comum a presença de ^{40}K em espectros de radiação γ obtidos nos laboratórios, uma vez que este elemento é facilmente encontrado nas paredes de concreto oriundo

do processo de fabricação do cimento, que utiliza rochas minerais.

Com a evolução tecnológica, outras fontes radioativas produzidas pelo ser humano adicionaram-se às fontes naturais. As aplicações médicas e industriais de radioisótopos e os contaminantes ambientais gerados por explosões nucleares são alguns exemplos. Assim, denomina-se radiação de fundo a soma da radiação natural com a artificial que se encontram no ambiente.

A figura 3 apresenta espectros multicanais típicos de radiação gama obtidos para a radiação de fundo (curvas inferiores) e para as amostras de solo de Goiânia estudadas (curvas superiores), onde é possível observar alguns radioisótopos presentes no Laboratório da UFF.

$$\frac{\text{Atividade da Amostra Calibrada}}{\text{Atividade da Amostra de Solo}} = \frac{\text{Área do pico } ^{137}\text{Cs}_{\text{amostra cal.}} - \text{Fundo}}{\text{Área do pico } ^{137}\text{Cs}_{\text{amostra solo}} - \text{Fundo}}$$

O termo “Área do pico de ^{137}Cs ” corresponde à integração da região correspondente às contagens do pico com $E_\gamma = 662 \text{ keV}$, nos espectros multicanais das amostras. O termo “Fundo” representa as contagens do espectro de fundo, correspondentes ao mesmo intervalo de canais onde se encontra o pico do ^{137}Cs ($E_\gamma = 662 \text{ keV}$) no espectro das amostras.

A Tabela 3 apresenta os resultados das atividades do ^{137}Cs das amostras superficiais de solo de Goiânia normalizadas para massa de 1kg de solo seco.

Tabela 3. Valores de atividades e taxas de dose efetiva obtidas no Laboratório de Física Nuclear do IF-UFF para as amostras da superfície do solo de Goiânia.

LOCAL	ATIVIDADE DE ^{137}Cs (Bq/kg)	TAXA DE DOSE EFETIVA ($\mu\text{Sv/h}$)
<i>Casa do Roberto (A)</i>	$(3,2 \pm 0,3) \times 10^3$	$(2,1 \pm 0,2) \times 10^{-1}$
<i>Casa do Wagner(B)</i>	$(5,3 \pm 0,9) \times 10^1$	$(3,5 \pm 0,6) \times 10^{-3}$
<i>Ferro Velho do Devair (C)</i>	$(3,2 \pm 0,6) \times 10^1$	$(2,1 \pm 0,4) \times 10^{-3}$
<i>Ferro Velho do Ivo (E)</i>	$(2,8 \pm 0,2) \times 10^3$	$(1,8 \pm 0,1) \times 10^{-1}$
<i>Cidade de Goiânia</i>	$(1,2 \pm 0,3) \times 10^1$	$(7,9 \pm 0,2) \times 10^{-4}$

b) Radiação de Fundo e a Areia de Guarapari - ES

Como mencionado anteriormente, existem vários radionuclídeos na natureza. Entretanto, dependendo da composição do solo de cada local, a quantidade de radiação proveniente destes radionuclídeos pode variar significativamente.

Em adição pode-se observar que as amostras de solos superficiais coletadas nos terrenos da Casa do Roberto e no Ferro Velho do Ivo apresentam um comportamento anômalo quando seus espectros são comparados com o de radiação de fundo. Analisando-se o espectro de uma fonte de ^{137}Cs (atividade de $1,89 \mu\text{Ci} - 08/98$) (figura 4), pode-se constatar que o pico anômalo observado nas amostras de solo corresponde à presença de ^{137}Cs .

A atividade de cada amostra emissora de radiação γ foi determinada pelo método relativo, que consiste na comparação entre as atividades de amostras calibradas com as do solo de Goiânia, medidas num mesmo intervalo de tempo e sob a mesma geometria, ou seja,

As maiores anomalias nas concentrações de minerais radioativos no solo têm sido encontradas nas areias monazíticas das praias de Guarapari, nas minas de urânio e tório na região de Poços de Caldas e em depósitos monazíticos no estado de Kerala, na Índia [3]. Estes fatos tornam estas regiões verdadeiros laboratórios naturais para investigações de depósitos de alto nível de radiação.

Um critério adotado internacionalmente considera aceitáveis os trabalhos de descontaminação radioativa em que os níveis de radiação são reduzidos a valores da mesma magnitude que os ambientes naturais não contaminados pela ação humana. Assim, se após um trabalho de descontaminação forem alcançados valores de taxa de dose iguais ou inferiores aos níveis de Guarapari ou Poços de Caldas, os resultados são considerados positivos e a área descontaminada pode ser liberada para uso geral. Este foi o parâmetro utilizado pela CNEN no trabalho de descontaminação em Goiânia [2].

Assim, com a finalidade de comparar os resultados para as amostras de solo de Goiânia obtidos neste trabalho, foi realizada a medida da atividade de uma amostra de areia de Guarapari, cujo espectro é apresentado na figura 5. Os valores das atividades dos radionuclídeos encontrados nesta amostra de areia são praticamente idênticos aos encontrados no L.M.A. (Tabela 2). Isto era esperado, uma vez que a amostra medida na UFF fazia parte do mesmo lote analisado no L.M.A., sendo que esta última foi utilizada como amostra calibradora do arranjo experimental para as medidas de Guarapari. Nota-se que os nuclídeos encontrados são alguns dos elementos filhos das séries radioativas do ^{238}U (^{214}Bi e

^{214}Pb) e do ^{232}Th (^{208}Tl , ^{212}Pb e ^{228}Ac) ou o próprio pai da série do ^{235}U .

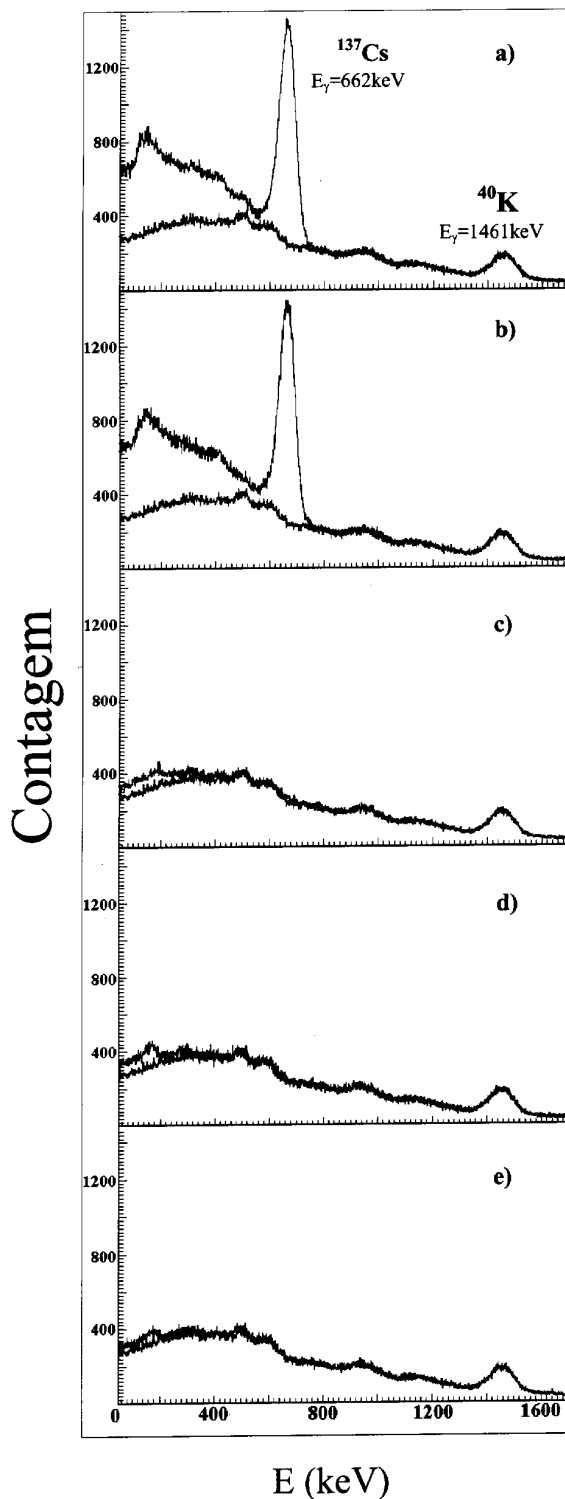


Figura 3. Espectros multicanais típicos de radiação γ obtidos para as amostras atuais de solo de Goiânia para: a) casa do Roberto; b) Ferro Velho do Ivo; c) casa do Wagner; d) Ferro Velho do Devair; e) Região Central da Cidade de Goiânia. As curvas inferiores representam os espectros de radiação de fundo.

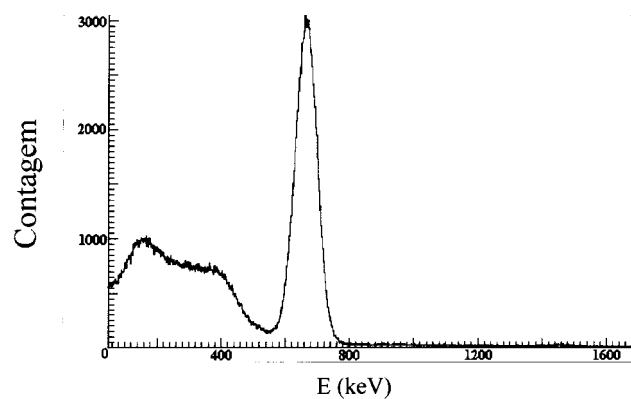


Figura 4. Espectro multicanal de uma fonte de ^{137}Cs (atividade de $1,89 \mu\text{Ci}$ 08/98).

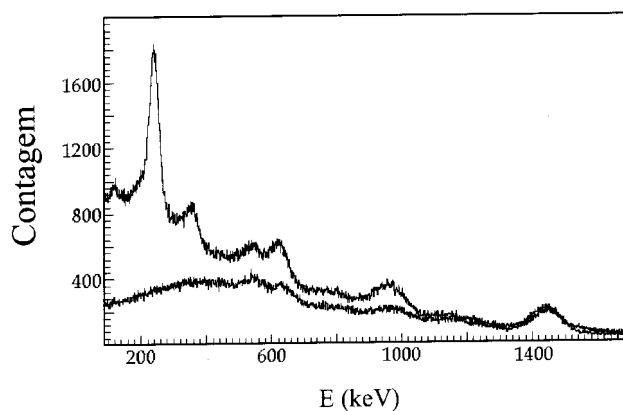


Figura 5. Espectro multicanal obtido a partir da amostra de areia da praia de Guarapari. A curva inferior representa o espectro de radiação de fundo.

Outros elementos das séries devem também estar presentes, mas não se pode identificá-los e/ou quantificá-los somente pela técnica de espectroscopia γ . Em geral, admite-se que toda a série esteja em equilíbrio secular no solo, o que, nesta amostra, resulta nas seguintes atividades por unidade de massa de solo seco dos elementos: urânio natural (110 ± 5) Bq/kg e tório (808 ± 32) Bq/kg.

VI Discussão dos Resultados

A atividade de uma amostra radioativa é o número de desintegrações nucleares de seus átomos, na unidade de tempo. Entretanto, dois materiais radioativos constituídos de radionuclídeos diferentes, com mesma atividade podem provocar efeitos distintos sobre um dado organismo humano. Um exemplo é o caso de fontes radioativas que emitem raios gamas de energias diferentes, e portanto têm diferentes poderes de penetração num determinado organismo.

Uma grandeza que leva em conta procedimentos correntes de proteção radiológica, tendo como base a energia depositada em cada meio para cada tipo de radiação é a dose absorvida. A unidade adotada para essa grandeza no Sistema Internacional é o Joule/kg, que recebe o nome especial Gray (Gy). Outra grandeza importante sob o ponto de vista dos efeitos biológicos que provoca no ser humano é a dose efetiva, calculada a partir das interações que a radiação ionizante sofre ao atravessar os diversos órgãos do corpo. Sua unidade também é Joule/kg, com o nome especial Sievert (Sv).

Para radiação ambiental costuma-se avaliar a taxa de dose absorvida no ar a 1m do solo (por exemplo, em $\mu\text{Gy/h}$), produzida pela radiação gama emitida por radioisótopos presentes no solo e, a partir dela, calcula-se a taxa de dose efetiva para um ser humano adulto utilizando-se o fator 0,7 Sv/Gy [8 e 9].

Para os radioisótopos das séries naturais, supostos homogênea e sim concentrada nas primeiras camadas de solo, ao menos nos primeiros anos após a deposição [10], e é possível também calcular a taxa de dose absorvida no ar a 1m do solo e, conseqüentemente, a taxa de dose efetiva.

Para o cálculo da dose devida à exposição externa de radiação gama proveniente dos radioisótopos das cadeias naturais de urânio e tório utiliza-se a relação a seguir [9], que contém os fatores de conversão entre atividade por unidade de massa da amostra (A) e taxa de dose absorvida no ar a 1m do solo (em nGy/h por Bq/kg):

$$\text{Taxa de Dose Absorvida} = 0,461 \times A_{\text{Urânio}} + 0,623 \times A_{\text{Tório}}$$

Obtém-se assim que a taxa de dose no local de onde se coletou a amostra de areia de Guarapari é de $(0,55 \pm 0,02) \mu\text{Gy/h}$ que equivale a uma dose efetiva de $(0,39 \pm 0,01) \mu\text{Sv/h}$. Por problemas técnicos não foi determinada a atividade de ^{40}K na amostra, que também contribuiria para a taxa de dose absorvida externa. Este resultado é comparável com valores encontrados na literatura para Guarapari. Por exemplo, Sohrabi [11] apresenta uma taxa de dose média de 6,4 mGy/ano, que equivale a $0,73 \mu\text{Gy/h}$, com variações de 1 a 32 mGy/ano, dependendo do local.

Na terceira coluna da Tabela 3 encontram-se as taxas de dose efetiva obtidas a partir das atividades de ^{137}Cs listadas na segunda coluna. Para realizar os cálculos foram utilizados resultados de Wood e colaboradores [10], que estimam uma taxa de dose efetiva

anual de 0,15 mSv para uma atividade superficial de 260 Bq/kg de solo. Comparando-se as taxas de dose encontradas nas amostras de solo da cidade de Goiânia com a taxa de dose para a amostra da areia de Guarapari, pode-se dizer que os locais de onde foram extraídas as amostras de solo não apresentam riscos para os habitantes. No entanto, deve-se ressaltar que a taxa de dose efetiva devida somente aos radioisótopos naturais presentes no solo da cidade de Goiânia é significativamente menor que os valores obtidos para as amostras analisadas A e E. Por exemplo, a partir dos valores das atividades de urânio, tório e potássio da Tabela 1 obtém-se uma taxa de dose efetiva de $0,017 \mu\text{Sv/h}$.

Em adição, estes resultados também estão abaixo do valor de $0,8 \mu\text{Gy/h}$, proposto pelo IRD/CNEN [5] como nível de ação para a taxa de dose medida a um metro de altura de uma camada de solo (com 1,5 cm de profundidade) que apresenta uma distribuição superficial homogênea de atividade de ^{137}Cs .

Por outro lado, é importante mencionar que estas amostras foram coletadas com apenas um evento para cada local e não, necessariamente, são os pontos mais “quentes” de cada local do acidente. Este fato reforça a necessidade de uma análise mais detalhada dos locais atingidos pelo acidente radiológico e de um controle contínuo da atividade de ^{137}Cs na região do Setor Aeroporto de Goiânia.

Em termos didáticos, os resultados da experiência foram extremamente satisfatórios, uma vez que despertaram grande motivação e empenho dos estudantes na realização deste experimento. Gratificante a tal ponto que um dos alunos da turma está bastante motivado para ingressar no programa de Pós-Graduação do IF-UFF, com o objetivo de efetuar sua tese de mestrado na área de Física Nuclear Aplicada com o assunto relacionado à investigação de problemas ambientais através da técnica de espectroscopia γ .

Agradecimentos

À Coordenação do Curso de Graduação em Física, na pessoa da Coordenadora Profa. Lúcia de Almeida, pelo empenho em tentar obter recursos para a realização do trabalho de campo.

À Profa. Isa Costa, pela revisão do texto original.

References

- [1] Paulo R.S. Gomes, Simone B. de Moraes, Marly S. Santos, Isa Costa, Lucia de Almeida, Revista Brasileira de Ensino de Física **18**, 265 (1996).
- [2] Suplemento da Revista Ciência Hoje, vol. 7, n^o 40 (1988).

- [3] Emico Okuno, *Radiação: Efeitos, Riscos e Benefícios*, Ed. Harbra (1988).
- [4] The Radiological Accident in Goiânia, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1988.
- [5] The Goiânia Radiation Accident, Health Physics, Special Issue, vol. 60 (1991).
- [6] Knoll, G.F., *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley and Sons, New York, 1979.
- [7] Experiments in Nuclear Science, AN34, Laboratory Manual, EG&G ORTEC, 1984.
- [8] P. Jacob, H.G. Paretzke, H. Rosebaum and M. Zankl, *Radiation Protection Dosimetry* **14**, 299 (1986).
- [9] Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes.
- [10] J. L. Wood, R. R. Benke, S. M. Rohrer and K. J. Kerarhoff, *Health Physics* **76**, 413 (1999).
- [11] M. Sohrabi, *Appl. Radiat. Isot.* **49** 3, 169 (1998).