**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

**RADIONUCLÍDEOS NATURAIS E ^{137}Cs EM COGUMELOS COMESTÍVEIS
COMERCIALIZADOS EM SÃO PAULO-BRASIL**

LILIAN PAVANELLI DE CASTRO

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

**Orientadora:
Dra. Vera Akiko Maihara**

SÃO PAULO

2008

Deus,
aos meus pais
e ao Alexandre.

AGRADECIMENTOS

À Dra. Vera Akiko Maihara, pela confiança, carinho, ensinamentos, incentivo e amizade demonstrados ao longo da orientação deste trabalho.

Ao Dr. Rubens César Lopes Figueira pela amizade e inúmeras contribuições, mas principalmente pelo auxílio no estabelecimento da metodologia aplicada.

Ao Alexandre Santos, grande amigo e companheiro, a quem agradeço pelo seu amor, paciência e compreensão, que estiveram presentes em todos os momentos e foram imprescindíveis.

Aos meus pais, irmãos, cunhados, sobrinhos, avó e primos por serem fontes de renovação das minhas energias e exemplos de lealdade e amor, me auxiliando a transpor todas as barreiras.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e aos funcionários e companheiros da Divisão de Radioquímica, que possibilitaram as análises e o desenvolvimento deste trabalho.

Às amigas Paola, Patrícia e Selma por todo companheirismo, pelas horas de estudo que passamos juntas e também pelas horas de conversas e momentos de descontração.

À Dra. Andreza Portella, pela ajuda para uma melhor análise estatística dos resultados obtidos.

A todos os produtores de cogumelos que gentilmente nos cederam amostras para que fossem analisadas.

A todos amigos que estiveram presentes em minha vida e que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

E, mais uma vez, agradeço a Deus por absolutamente tudo.

*A diferença entre o possível e o impossível
está na vontade humana.(Louis Pasteur)*

RADIONUCLÍDEOS NATURAIS E ^{137}Cs EM COGUMELOS COMESTÍVEIS COMERCIALIZADOS EM SÃO PAULO-BRASIL

Lilian Pavanelli de Castro

RESUMO

Os radionuclídeos artificiais e naturais podem ser comumente encontrados em diversos compartimentos da crosta terrestre. Algumas espécies de cogumelos têm uma alta capacidade em absorver radionuclídeos e elementos tóxicos vindos do solo. A dieta alimentar destaca-se como uma das principais vias de contaminação radioativa. Portanto, a medida da radioatividade no ambiente e em alimentos é extremamente importante para monitorar os níveis de radiação aos quais o homem possa estar exposto de forma direta ou indireta. A biomonitoração ambiental tem demonstrado que diversos organismos como os crustáceos, peixes e cogumelos são usados para avaliar a contaminação e a qualidade dos ecossistemas. Existem vários radionuclídeos que podem ser acumulados por cogumelos, incluindo ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U . No entanto há poucos estudos em países do hemisfério Sul, sobre os níveis de radioatividade natural e artificial em cogumelos. Este trabalho consistiu na determinação das atividades específicas de elementos radioativos naturais e ^{137}Cs em cogumelos comestíveis comercializados em São Paulo-Brasil. As amostras de cogumelos comestíveis foram adquiridas em diferentes pontos comerciais da cidade de São Paulo, especialmente em mercados municipais, porém algumas foram adquiridas diretamente de produtores de algumas regiões como Mogi das Cruzes, Mirandópolis, Suzano e Juquitiba. Cerca de 400 g de cada espécie de cogumelos comestíveis foram coletadas, incluindo *Agaricus sp*, *Lentinula sp* e *Pleurotus sp*. Todas as amostras foram preparadas e acondicionadas em recipientes de polietileno, seladas e armazenadas por aproximadamente 35 dias, para que fosse estabelecido o equilíbrio radioativo secular, antes que se iniciassem as contagens. As atividades gama do ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U foram medidas por espectrometria gama. O equipamento utilizado consistiu de um detector de Germânio Hiperpuro conectado a um sistema eletrônico. As medidas foram de aproximadamente 200000 segundos. A eficiência do detector foi medida utilizando os materiais de referência: IAEA-300, IAEA-327 e IAEA-375. Os resultados obtidos para as amostras de cogumelos comestíveis variaram de 461 a 1535 Bq kg⁻¹, 1,4 a 10,6 Bq kg⁻¹, 6,2 a 54,2 Bq kg⁻¹ e 14 a 66 Bq kg⁻¹ em peso seco, para ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U , respectivamente. Os níveis de ^{137}Cs estão de acordo com o fallout radioativo do hemisfério Sul, apresentando concentrações abaixo dos níveis máximos estabelecidos pela CNEN. Comparando os resultados obtidos com outros trabalhos da literatura, comprovou-se que os valores das atividades encontradas para os radionuclídeos naturais estão dentro dos níveis normais de radioatividade para este produto. As espécies de cogumelos analisadas podem ser consumidas sem riscos de contaminação. O método de análise empregado neste estudo demonstrou-se adequado para estimar a atividade ^{232}Th e ^{238}U e determinar as atividades de ^{40}K e ^{137}Cs , em amostras biológicas. Este estudo assinala a primeira vez em que cogumelos comestíveis, no Brasil foram estudados para avaliar o conteúdo radioativo e, como tal, é uma contribuição para investigações futuras nesta área.

NATURAL RADIONUCLIDES AND ^{137}Cs IN COMMERCIALIZED EDIBLE MUSHROOMS IN SÃO PAULO-BRAZIL

Lilian Pavanelli de Castro

ABSTRACT

Artificial and natural radionuclides are commonly found in several compartments of the earth's crust. Some mushroom species have a high capacity to absorb radionuclides and toxic elements from the soil. Diet is considered as one of the main routes of radioactive contamination. Therefore, radioactivity measurements in the environment and in food are extremely important to monitor the radiation levels that human can be exposed to either directly or indirectly. Environmental biomonitoring has demonstrated that diverse organisms such as crustaceans, fish and mushrooms are useful when evaluating both the contamination and the quality of the ecosystems. There are actually several radionuclides that can be accumulated in mushrooms, including ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th and ^{238}U . There are few studies in the Southern hemisphere countries, on the natural and artificial radioactivity levels in mushrooms. The present study evaluated ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th and ^{238}U in commercialized edible mushrooms in the state of São Paulo, Brazil. The edible mushroom samples were acquired in different commercial establishments in the São Paulo metropolitan region, specifically in Municipal Markets. Some samples were acquired directly from producers located in the cities of Mogi das Cruzes, Mirandópolis, Suzano and Juquitiba. About 400g were collected for each edible mushroom species, which included *Agaricus sp*, *Pleurotus sp* and *Lentinula sp* species. All the samples were prepared and stored in polyethylene bottles for approximately 35 days, so that secular equilibrium could be established before counting. The ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th and ^{238}U gamma activities were measured by gamma spectrometry. The equipment consisted of a Hiperpure Germanium detector connected to an electronic system. The detector efficiency was obtained from measurements of reference materials: IAEA-300, IAEA-327 and IAEA-375. The results for the specific activities in edible mushrooms samples ranged from 461 to 1535 Bq kg⁻¹, 1.4 to 10.6 Bq kg⁻¹, 6.2 to 54.2 Bq kg⁻¹ and 14 to 66 Bq kg⁻¹ d.w., for ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U , respectively. The ^{137}Cs levels are in accordance with the Southern hemisphere radioactive fallout, the concentrations are below the maximum levels established by CNEN. Comparing the result values with these found in published literature, the values of the activities found for natural radionuclides are within the normal radioactivity levels for this kind of food. Hence, the studied mushroom species can be consumed without risk of contamination. The employed methodology in this study showed adequate to estimate ^{232}Th and ^{238}U specific activities and to determine ^{40}K and ^{137}Cs activities in biological samples. This study marks the first time that edible mushrooms in Brazil have been studied to evaluate their radioactivity contents and as such is a contribution for future research in this area.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Cogumelos.....	5
1.2.1 Características gerais	5
1.2.2 Cogumelos comestíveis	7
1.2.3 Consumo de cogumelos no Brasil	10
CAPÍTULO 2	12
2.1 Objetivos.....	12
CAPÍTULO 3	13
3.1 Revisão bibliográfica	13
3.1.1 Radiatividade natural	13
3.1.2 Potássio-40	14
3.1.3 Urânio-238	16
3.1.4 Tório-232	19
3.2 Radioatividade artificial	21
3.2.1 “Fallout” radioativo	23
3.2.2 Césio-137	26
3.3 Espectrometria Gama	28
3.3.1 Propriedades dos espectros de raios gama	29
3.3.2 Detectores de radiação gama.....	31
CAPÍTULO 4	36
4.1 Parte experimental	36
4.1.1 Materiais e métodos	36
4.1.2 Equipamentos	36
4.1.3 Amostras e locais de aquisição	37
4.1.4 Preparação das amostras	39
4.1.5 Determinação do teor de umidade das amostras	41
4.1.6 Determinação dos radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U	42
CAPÍTULO 5	55
5.1 Resultados e discussão	55
5.1.1 Validação da metodologia	55
5.1.2 Concentração Mínima Detectável	56
5.1.3 Atividades específicas dos radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U , presentes nas amostras de cogumelos	57
5.1.4 Análise dos resultados	59
5.1.5 Discussão e comparação dos resultados obtidos com dados da literatura	67

CAPÍTULO 6	74
6.1 Conclusão	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

SUMÁRIO DE TABELAS

Tabela 3.1: Radionuclídeos iniciais e nuclídeos finais das séries radioativas	13
Tabela 3.2: Série de decaimento radioativo do ^{238}U	17
Tabela 3.3: Série de decaimento radioativo do ^{235}U	18
Tabela 3.4: Série de decaimento radioativo do ^{232}Th	20
Tabela 4.1: Energias utilizadas para identificação dos radionuclídeos de interesse.....	43
Tabela 4.2: Valores de eficiência do sistema de contagem para ^{137}Cs e ^{40}K obtida a partir dos materiais de referência	50
Tabela 4.3: Valores de eficiência do sistema de contagem para ^{232}Th e ^{238}U obtida a partir dos materiais de referência	50
Tabela 5.1: Concentração de ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U em Bq kg^{-1} , nos materiais de referência	55
Tabela 5.2: Concentração mínima detectável (CMD) para os radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U	56
Tabela 5.3: Atividade específica de ^{40}K e ^{137}Cs em cogumelos comestíveis em peso seco	57
Tabela 5.4: Atividade específica de ^{232}Th e ^{238}U em cogumelos comestíveis em peso seco	58
Tabela 5.5: Casos pertencentes ao G1	61
Tabela 5.6: Casos pertencentes ao G2	61
Tabela 5.7: Casos pertencentes ao G3	62
Tabela 5.8: Atividades de ^{137}Cs em amostras de cogumelos de provenientes de outros países	68
Tabela 5.9: Atividades de ^{40}K em amostras de cogumelos provenientes de outros países	69

SUMÁRIO DE FIGURAS

Figura 1.1: Desenvolvimento dos cogumelos.....	6
Figura 1.2: Principais espécies de cogumelos consumidas no Brasil.....	7
Figura 1.3: Cultivo de Shitake em tora de Carvalho.....	9
Figura 3.1: Esquema de decaimento do ^{40}K	15
Figura 3.2: Radionuclídeos artificiais e naturais conhecidos.....	22
Figura 3.3: Nuvem formada a partir de uma explosão nuclear.....	23
Figura 3.4: Deposição global de ^{137}Cs devido ao “ <i>fallout</i> ” radioativo.....	25
Figura 3.5: Produção do ^{137}Cs a partir da fissão do ^{235}U	26
Figura 3.6: Esquema de decaimento do ^{137}Cs	27
Figura 3.7: Linhas de espectro de emissão de raio gama para: a) Potássio; b) Urânio; c) Tório.....	30
Figura 3.8: Definição da resolução em energia de um detector em função da largura a meia altura.....	33
Figura 3.9: Comparação do espectro- γ de ^{166}Ho obtido com um detector semicondutor e com um detector de cintilação de NaI(Tl).....	34
Figura 3.10: Esquema do detector e eletrônica associada – (1)Detector e pré-amplificador, (2) Fonte de alta tensão, (3) Amplificador, (4) Sistema de aquisição de dados de medida	35
Figura 4.1: Amostras adquiridas diretamente de centros comerciais da região metropolitana do estado de São Paulo.....	37
Figura 4.2: Amostra de cogumelo adquirida diretamente do produtor, no município de Suzano- SP.....	38
Figura 4.3: Cidades de onde foram adquiridas amostras diretamente dos produtores.....	38
Figura 4.4: Espécies de cogumelos analisadas.....	39
Figura 4.5: Amostra de cogumelo comestível submersa em água.....	40
Figura 4.6: Equipamento utilizado para liofilizar as amostras.....	40

Figura 4.7: Recipientes de polietileno contendo as amostras preparadas e identificadas, prontas para as medidas.....	41
Figura 4.8: Equipamento utilizado para determinação do teor de umidade residual das amostras.....	42
Figura 4.9: Contagem de ^{40}K referente à radiação de fundo (BG) e materiais de referência em função do tempo.....	46
Figura 4.10: Contagem do ^{137}Cs referente à radiação de fundo (BG) e materiais de referência em função do tempo.....	47
Figura 4.11: Contagem do ^{228}Ac referente à radiação de fundo (BG) e materiais de referência em função do tempo.....	48
Figura 4.12: Contagem do ^{214}Bi referente à radiação de fundo (BG) e materiais de referência em função do tempo.....	49
Figura 4.13: Contagem de ^{40}K referente à radiação de fundo (BG) e uma determinada amostra função do tempo.....	51
Figura 4.14: Contagem do ^{137}Cs referente à radiação de fundo (BG) e uma determinada amostra em função do tempo.....	52
Figura 4.15: Contagem do ^{228}Ac referente à radiação de fundo (BG) e uma determinada amostra em função do tempo.....	52
Figura 4.16: Contagem do ^{214}Bi referente à radiação de fundo (BG) e uma determinada amostra função do tempo.....	53
Figura 5.1: Atividades específicas calculadas para os radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U nas amostras de cogumelos comestíveis.....	59
Figura 5.2: Dendograma para agrupamento das amostras de cogumelos comestíveis.....	60
Figura 5.3: Distribuição das atividades específicas para ^{40}K nas amostras de cogumelos comestíveis.....	64
Figura 5.4: Distribuição das atividades específicas para ^{137}Cs nas amostras de cogumelos comestíveis.....	64
Figura 5.5: Distribuição das atividades específicas para ^{232}Th nas amostras de cogumelos comestíveis.....	65
Figura 5.6: Distribuição das atividades específicas para ^{238}U nas amostras de cogumelos comestíveis.....	65
Figura 5.7: Funções discriminantes para as amostras de cogumelos comestíveis.....	66

CAPÍTULO 1

1.1 Introdução

Desde o início da formação da Terra, a radioatividade está presente em todos os compartimentos do ecossistema. Essa radiação é proveniente de radionuclídeos, os quais ocorrem naturalmente na crosta terrestre, como aqueles presentes na série do ^{232}Th , ^{235}U e ^{238}U . Existem, ainda, alguns elementos radioativos naturais, que não estão inclusos nessas séries radioativas, tais como: ^{40}K , ^{50}V , ^{87}Rb , ^{115}In , ^{138}La , ^{144}Nd , ^{147}Sm , ^{176}Lu , ^{187}Re , dentre esses elementos, o que é mais encontrado é o potássio natural (MELQUIADES e APPOLONI, 2004). Além da existência dos radionuclídeos naturais, há também os artificiais como, por exemplo, o ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{127}I , entre outros, que foram introduzidos no planeta por meio do “*fallout*” radioativo, formado a partir de ações antrópicas, dentre as quais estão vários testes atmosféricos de bombas nucleares realizados entre as décadas de 40 a 70, acidentes com reatores nucleares e outros fatores (MALINOWSKA e col., 2006).

Os radionuclídeos artificiais e naturais são comumente encontrados nos gases atmosféricos, nas águas de rios e oceanos, nos solos, em rochas, nos seres humanos, nos animais e nos vegetais (MOSQUERA e col., 2004). Sendo assim, os seres humanos e seu ambiente estão continuamente expostos a essas radiações, das quais em relação à dose recebida pela população, pode-se afirmar que aproximadamente 81% corresponda à radiação natural e cerca de 19% seja proveniente de fontes artificiais (MAZZILLI e col., 2002). A dieta alimentar é considerada uma das principais vias para ingestão de todos os elementos, inclusive os radionuclídeos (BUENO, 1999). A medida da radioatividade no

ambiente e nos alimentos é extremamente importante para monitorar os níveis de radiação aos quais o homem possa estar exposto de forma direta ou indireta. A monitoração biológica ambiental tem demonstrado que diversos organismos, dentre eles: crustáceos, peixes e cogumelos, são úteis para avaliar os índices de poluição e qualidade do ecossistema (MARZANO e col., 2001; SPODATTO, 2007).

Dos organismos citados acima, destaque-se o cogumelo, nome comum dado às frutificações de alguns fungos das divisões Basidiomycota e Ascomycota. Muitos cogumelos são comestíveis, outros, no entanto, são tóxicos, podendo, em alguns casos, levar à morte (KEIZER, 2001).

Segundo Giovani e col. (1990), Ingaro e col. (1992) e Ruhm e col. (1997), diferentes espécies de cogumelos têm a capacidade de reter altas concentrações de radionuclídeos e metais provenientes do solo. Esses autores afirmam que a “vida longa” e a ampla extensão do micélio fazem desses organismos excelentes bioindicadores.

Dentre os diversos radionuclídeos que podem ser acumulados pelos cogumelos pode-se citar ^{137}Cs , ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K , entre outros.

O ^{137}Cs é de interesse específico no meio ambiente devido ao seu tempo de meia vida (30,17 anos), a sua fácil migração nas correntes tróficas e também a sua biodisponibilidade (MALINOWSKA e col., 2006).

Os elementos das séries do urânio e tório apresentam alta radiotoxicidade e encontram-se disseminados no ambiente em quantidades traço. Alguns elementos dessas séries contribuem com uma das maiores doses de radiação natural no corpo humano (UNSCEAR, 1993).

Já o potássio estável está amplamente distribuído na natureza, pois encontra-se no solo e em todo tecido vegetal e animal, apresentando-se como um elemento de extrema

importância para o cérebro e para os músculos. Aproximadamente a metade da radioatividade encontrada em humanos é proveniente do ^{40}K (SANCHEZ e col., 2006).

Portanto, as propriedades de bioacumulação demonstradas pelos cogumelos podem ser usadas para detectar até mesmo baixos níveis de contaminação. Muitas pesquisas, principalmente após o acidente com o reator nuclear em Chernobyl, vêm indicando os cogumelos como importantes biomonitores, podendo apresentar níveis elevados de r

adionuclídeos artificiais acumulados (SUGIYMA e col., 2000). Devido à contaminação da maior parte da Europa por meio do “*fallout*” radioativo, iniciou-se um intenso estudo, em diversos países, para verificar a contaminação decorrente desse fato (KALAC e SBOVODA, 1999).

Kammerer e col. (1994), na Alemanha, analisaram 83 espécies de cogumelos selvagens de três regiões distintas e constataram que a atividade de ^{137}Cs variou entre 2 a 15000 Bq kg⁻¹ e, que a espécie *Xerocomus badius*, destacou-se como a que apresentou a maior frequência desse radionuclídeo.

Battiston e col. (1989) determinaram os níveis de ^{137}Cs nas espécies de cogumelos comestíveis, *Clitocybe infundibuliformi*, *Cantharellus lutescen* e *Boletus cavipes*, coletadas no nordeste da Itália, após o acidente de Chernobyl, cujas amostras apresentaram elevados níveis desse radionuclídeo, variando de 95 a 27626 Bq kg⁻¹. Com esses dados, os pesquisadores concluíram que a radioatividade encontrada nos cogumelos não está relacionada somente ao nível de contaminação do solo, mas também ao fato de que algumas espécies apresentam maior afinidade em concentrar certos radionuclídeos.

Gasó e col. (2000) determinaram as atividades de ^{137}Cs e ^{40}K com valores médios de 5,5 Bq kg⁻¹ e 101,6 Bq kg⁻¹ respectivamente em 30 espécies de cogumelos comestíveis

coletadas em mercados de 4 cidades mexicanas; os valores encontrados para ^{40}K variaram de 18 Bq kg⁻¹ para a espécie *Clitocybe gibba* a 257 Bq kg⁻¹ para *Lyoperdon pyriforme*. Os valores máximos encontrados, para os radionuclídeos estudados são bem inferiores em relação aos valores reportados em estudos realizados em alguns países da Europa.

Atualmente, os cogumelos são amplamente utilizados e há inúmeras investigações relacionadas à sua radioecologia, além disso, trata-se também de um alimento muito apreciado em diversas culturas devido ao seu elevado poder medicinal e significativo valor nutricional (JANSON e KUTTI, 2004).

O contraponto do cogumelo seria sua alta capacidade em acumular radionuclídeos e outros elementos, favorecendo a contaminação desse tipo de alimento, podendo trazer efeitos altamente prejudiciais à saúde humana. Tal fato cria a necessidade de se estabelecer controles relativos à avaliação das concentrações de elementos radiativos nesse gênero alimentício em relação às quantidades máximas permitidas para o consumo humano. No entanto, pouca atenção tem sido dada ao conteúdo radioativo em cogumelos e a dose para a população devido à sua ingestão (BAEZA e col., 2004).

Em países do hemisfério Sul, especificamente, nos países da América Latina, há poucos estudos sobre a radioatividade natural e artificial em cogumelos (MELQUIADES e APPOLONI, 2004). Pouco se sabe a respeito da qualidade dos cogumelos comestíveis cultivados pelos produtores brasileiros, sendo que a maioria dos trabalhos realizados são de alimentos provenientes de países do hemisfério Norte, talvez por ser a região mais afetada pelo “*fallout*” radioativo.

A ingestão de cogumelos no Brasil é muito baixa, se comparada a de países europeus e asiáticos, cuja população freqüentemente os consome, tornando-os parte de seu hábito alimentar.

Entre 1995 e 2005 a produção mundial de cogumelos aumentou mais de 60% e, embora o Brasil não se encontre nessa estimativa, a efetiva produção e comercialização estão aumentando consideravelmente. Sabe-se que a maior região produtora está localizada no Alto Tietê, em São Paulo (VILELA, 2007).

O crescimento do consumo mundial de cogumelos pode ser atribuído à intensa divulgação de seus benefícios, mudanças de hábitos nutricionais e redução de custos (FURLANI e GODOY, 2007). Estudos têm demonstrado que esses organismos podem atuar como redutores de colesterol, antitumorais, antivirais e reduzem os efeitos relacionados à trombose (JANSON e KUTTI, 2004).

O levantamento bibliográfico mostra o grande interesse em investigar sobre os contaminantes radioativos que possam estar presentes nesses organismos e avaliar os possíveis riscos oferecidos aos seus consumidores. Entretanto, até o presente momento, não há publicações que registrem a ocorrência de radionuclídeos naturais e artificiais em cogumelos comestíveis comercializados no Brasil.

1.2 Cogumelos

1.2.1 Características gerais

O que normalmente se conhece como cogumelo, na verdade, é a estrutura reprodutiva externa dos fungos superiores ou macroscópicos, ou seja, é o corpo de frutificação responsável pela produção de esporos. Dá-se o nome de fungos superiores ou macroscópicos, àqueles que podem ser facilmente distinguidos sem o auxílio de microscopia. Uma porção da estrutura desses seres vivos encontra-se inserida no substrato em que se desenvolvem, tais como: madeira em decomposição, tronco de árvores vivas, solo, entre outros; formando uma

rede densa de filamentos denominada hifas, estas estruturas em conjunto formam o micélio. O desenvolvimento dos cogumelos pode ser observado na Figura 1.1 (BIELLI, 1998).

Figura 1.1: Desenvolvimento dos cogumelos (Extraída de Bielli, 1998)

Esses organismos são capazes de se reproduzir sexuadamente e, para que se forme um corpo de frutificação, é necessário que dois micélios primários da mesma espécie entrem em contato, sendo que um se comporta como micélio feminino e outro, como micélio masculino, fundindo-se e formando o micélio secundário que, em condições adequadas de temperatura, umidade e disponibilidade de nutrientes, produz o corpo de frutificação destinado à perpetuação da espécie, mediante a produção abundante de esporos, que se dispersam na maioria dos casos sob ação do vento.

Os fungos formam um amplo grupo de organismos (mais de 100.000 espécies distribuídas em diversos ecossistemas), incluindo os fungos superiores e esses, por sua vez, subdividem-se em dois grandes grupos: Ascomicetos e Basidiomicetos. Essa divisão deve-se

às diferenças anatômicas das estruturas destinada à formação de esporos. Esses organismos apresentam-se sob diferentes formas e cores, sendo que muitas espécies podem ser consideradas como comestíveis, tóxicas e até mortais (KEIZER, 2001).

Quanto à nutrição dos fungos, pode-se dizer que alguns organismos são saprófitos, desenvolvendo-se sobre matéria orgânica em decomposição; outros são parasitas, fixando-se em grandes árvores, das quais absorvem nutrientes necessários a sua sobrevivência; e muitos podem ser classificados como simbioses, que para sobreviverem, suas hifas se unem a raízes de determinadas plantas.

1.2.2 Cogumelos comestíveis

Os cogumelos comestíveis são apreciados desde a idade antiga devido à crença em seu elevado valor nutritivo e em seu poder medicinal, além de serem classificados como uma especiaria nobre em pratos culinários.

Atualmente, no mundo, são conhecidas 2000 espécies de cogumelos comestíveis e cerca de 25 espécies são cultivadas comercialmente (COUTINHO, 2007). No Brasil, as espécies mais cultivadas e consumidas são: *Agaricus bisporus*, conhecido como Champignon de Paris; *Lentinula edodes*, popularmente chamada de Shitake; e *Pleurotus sp*, nomeado Shimeji ou Hiratake, apresentados na Figura 1.2 (URBEN e col., 2001).

Agaricus bisporus

Lentinula edodes

Pleurotus ostreatus

Figura 1.2: Principais espécies de cogumelos consumidas no Brasil (Extraída de Keizer, 2001)

Os cogumelos comestíveis são cultivados em grande variedade de resíduos agrícolas e são considerados grandes transformadores desses resíduos, representando a biotransformação mais eficiente de reciclagem no meio ambiente (STURION e OETTERER, 1995).

O cultivo de *Agaricus bisporus*, conhecido popularmente como Champignon de Paris ou, simplesmente, Champignon, teve origem na França, casualmente, em 1650. Agricultores observaram que esses organismos se desenvolviam sobre compostos (palha e esterco) utilizados para o cultivo de melão, notaram também que, se regassem o esterco com água, esses cogumelos se multiplicavam. Porém, somente em 1865, o cultivo desses cogumelos foi introduzido na América (BONONI e col., 1999).

Agaricus bisporus, foi a primeira espécie de cogumelo a ser cultivada comercialmente no Brasil, sua cultura foi iniciada em 1956 no estado de São Paulo por imigrantes chineses que se fixaram na região de Mogi das Cruzes, local que detém, até hoje, a maior produção nacional dessa espécie. Basicamente, existem dois tipos de Champignon: o tradicional Champignon de Paris, *Agaricus bisporus* (de cor branca) e o Champignon Portobello, *Agaricus sp* (de cor parda) (RAIGAU, 1980).

Já o cultivo de *Lentinula edodes*, comumente nomeado de Shitake, é o mais antigo dentre todas as espécies comestíveis. Seu cultivo primitivo teve início há cerca de 800 anos, na China, passando por vários aperfeiçoamentos desenvolvidos, principalmente, por japoneses, que são considerados, atualmente, os maiores produtores mundiais desse gênero alimentício.

O Shitake trata-se de um fungo degradador de madeira. Normalmente, utilizam-se árvores para o cultivo desse cogumelo, como é mostrado na Figura 1.3, sendo a Castanheira, o Carvalho e o Olmo as mais comuns para esse fim.

Figura 1.3: Cultivo de Shitake em tora de Carvalho

Na China e no Japão, este cogumelo faz parte dos hábitos alimentares da população. No Brasil, devido à presença de uma vasta colônia de imigrantes e descendentes de origem asiática, há um mercado consumidor em potencial, havendo, porém, somente alguns pequenos produtores.

Quanto às suas propriedades medicinais, pode-se dizer que estas são conhecidas há muito tempo; na medicina oriental, o Shitake é conhecido como “elixir da vida”, por ser usado no combate de várias doenças. Muitas dessas propriedades terapêuticas foram comprovadas após inúmeros estudos de cientistas de todo o mundo, mas, principalmente, do Japão e dos Estados Unidos, o que contribuiu com a divulgação desse alimento e aumento do consumo mundial (BONONI e col., 1999).

Um outro gênero comercializado no Brasil é o *Pleurotus* que pode ser encontrado em diversas regiões do mundo, inclusive em florestas brasileiras, devido ao fato de ter-se adaptado satisfatoriamente ao clima tropical (BREENE, 1990). É conhecido, em diferentes partes do mundo, como uma classe de cogumelos de alta habilidade saprofítica e, por degradar resíduos lignocelulósicos como substrato (MANZI e col., 1999). Atualmente, é conhecido pelos orientais como Hiratake e, no caso de cogumelos colhidos menores e crescidos sob condições de menor iluminação e ventilação, tem sido denominado Shimeji.

No Brasil, a produção do cogumelo gigante ou caetetuba, como é conhecido popularmente, teve início na década de 70, porém o aumento de sua produção e consumo só ocorreu a partir de 1985, devido ao intenso trabalho de divulgação desse cogumelo (BONONI e col., 1999), que passou a ser apreciado por causa de seu delicioso paladar e por apresentar quantidade relativamente alta de proteínas, carboidratos, minerais e vitaminas, bem como baixo teor de lipídeos.

Além de suas importantes propriedades, os cogumelos do gênero *Pleurotus* necessitam pouco tempo para o crescimento. Comparado a outros cogumelos, seu corpo de frutificação não é muito atacado por doenças e pragas, podendo ser cultivado de um modo simples e barato (BANIK e NANDI, 2004).

1.2.3 Consumo de cogumelos no Brasil

O aumento do consumo de cogumelos, no Brasil, deve-se, sobretudo, à mudança de hábitos alimentares, buscando uma alimentação saudável e equilibrada. Esse gênero alimentício é um importante componente para a dieta alimentar de pessoas portadoras de hipertensão, diabetes ou obesidade, uma vez que esse tipo de produto apresenta um baixo teor de gordura, carboidratos e sais, sendo muito rico em proteínas, vitamina B12 e ácido fólico.

Por esses motivos, houve uma diversificação do cultivo e comercialização de novas espécies, além do tradicional Champignon.

A produção mundial de cogumelos foi estimada, no ano de 2005, em cerca de 3,36 milhões de toneladas, destacando-se, como maiores produtores a China (1,4 milhões toneladas) e os Estados Unidos da América (391 mil toneladas) (FAO, 2006). O Brasil não possui dados oficiais sobre a produção de cogumelos, mas a maior área produtora localiza-se no Alto Tietê, em São Paulo, na região de Mogi das Cruzes. Anualmente, a região comercializa nos mercados interno e externo mais de 4 mil toneladas, representando cerca de 80% da produção nacional (COUTINHO, 2007). A produção brasileira, portanto, deve girar em torno de 5 mil toneladas anuais ou 0,15% da produção mundial, estimando-se que o consumo anual de cogumelos no Brasil seja algo em torno de 30 g por habitante. Na França, onde o cogumelo é altamente difundido, a estimativa de consumo anual é de 2 kg por habitante (EMBRAPA, 2005).

CAPÍTULO 2

2.1 Objetivos

Face ao exposto, o presente estudo tem como objetivos:

- desenvolver a metodologia para determinar a atividade de ^{40}K e ^{137}Cs e estimar a atividade de ^{232}Th e ^{238}U em cogumelos comestíveis comercializados no estado de São Paulo;
- aplicar a metodologia estabelecida às amostras de referência, de modo a verificar a precisão e a exatidão do método analítico;
- estabelecer valores de atividade específica para os radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U mencionados em cogumelos comestíveis comercializados em São Paulo-Brasil, os quais poderão ser comparados a cogumelos provenientes de outras regiões do mundo;
- comparar os resultados obtidos à literatura.

CAPÍTULO 3

3.1 Revisão bibliográfica

Neste capítulo, serão apresentadas as considerações gerais sobre os radioisótopos naturais e artificiais analisados no presente trabalho, assim como os princípios da espectrometria gama.

3.1.1 Radioatividade natural

Como já foi dito na introdução deste trabalho, a radioatividade natural está presente em todos os compartimentos do planeta desde a formação deste, sendo que os níveis específicos da radiação natural estão relacionados principalmente à composição geológica do planeta, variando de região para região. Essa radioatividade deve-se, principalmente, à existência de radionuclídeos presentes nas três séries radioativas conhecidas, conforme apresentadas na Tabela 3.1, que indica os nuclídeos iniciais, com seus respectivos tempos de meia-vida; além dos nuclídeos finais de cada série.

Tabela 3.1: Radionuclídeos iniciais e nuclídeos finais das séries radioativas (Extraída de Burcham, 1974)

Nome da série	Radionuclídeo inicial	½ vida (anos)	Nuclídeo final
Tório	^{232}Th	$1,4 \times 10^{10}$	^{208}Pb
Urânio	^{238}U	$4,5 \times 10^9$	^{206}Pb
Actínio	^{235}U	$7,2 \times 10^8$	^{207}Pb

Existem, ainda, alguns elementos radioativos naturais que não estão incluídos nas séries radioativas; dentre eles, o mais encontrado é o potássio natural. Os radionuclídeos naturais terrestres, em geral, possuem meias-vidas longas, da ordem de centenas de milhões de anos.

Dessa forma, a irradiação externa do corpo humano, devido a esses elementos, dá-se principalmente por meio de radiação gama dos radionuclídeos das séries naturais do ^{232}Th e do ^{238}U e do decaimento do ^{40}K . Portanto a principal via de incorporação desses radionuclídeos pelo homem é pela ingestão de alimentos e de água, logo, a contaminação radioativa dependerá dos hábitos alimentares da população, do tipo de solo onde são cultivados os produtos e se estabelecem os pastos e também das práticas agrícolas.

Os radioisótopos, em regras gerais, comportam-se do mesmo modo que seus isótopos não radioativos em relação à absorção e, mesmo não tendo função, podem ser incorporados aos tecidos dos seres vivos (UMISED, 2007).

3.1.2 Potássio-40

Potássio natural é encontrado em níveis altos na maioria dos solos, tornando-se acessível quando está ligado às partículas de argila, podendo trocar de lugar com outros íons positivos em processos nos quais ocorra a dissolução do solo, permitindo com que plantas e cogumelos absorvam esse elemento facilmente (BRADY, 1989).

O potássio natural contém 0,0118% do isótopo radioativo ^{40}K (meia-vida $1,3 \times 10^9$ anos), sendo responsável por uma das mais importantes fontes de radiação natural do planeta (KELLER, 1981).

Na Figura 3.1 é mostrado o esquema de decaimento do ^{40}K e permite que se observe o seguinte, quando um núcleo desse radionuclídeo decai, este pode emitir uma partícula β^- com energia máxima de 1,314 MeV, transformando-se no elemento estável

^{40}Ca . Essa forma de decaimento ocorre com 89,3% de probabilidade, porém nota-se que há outra forma de decaimento desse núcleo, com probabilidade de 10,7%, por meio da captura eletrônica (CE). Nessa forma de decaimento, o núcleo de ^{40}K captura um elétron orbital, transformando, assim, um próton do núcleo em um nêutron, seguido de emissão de um fóton da radiação gama com energia de 1,46 MeV, que resultará no elemento ^{40}Ar estável.

Figura 3.1: Esquema de decaimento do ^{40}K

O comportamento desse radionuclídeo, no corpo humano, é muito parecido ao de um nutriente essencial, assemelhando-se ao K estável encontrado nos tecidos musculares, onde sua concentração apresenta-se constante devido ao equilíbrio homeostático. De acordo com Bailey e col. (1978), em um corpo humano padrão de aproximadamente 70Kg, há 140g de potássio, conseqüentemente, a atividade de ^{40}K correspondente é de 3,7 Bq. Esse radionuclídeo é responsável pelo equivalente à dose anual de 0,17mSv para adultos e de 0,19mSv para crianças (UNSCEAR, 2000).

3.1.3 Urânio-238

Urânio natural possui três isótopos, ^{238}U , ^{235}U , e ^{234}U , com abundâncias isotópicas de 99,274%, 0,7205% e 0,0056% respectivamente. Os isótopos ^{238}U e ^{235}U são radioativos, por esta razão, constituem duas séries de decaimento radioativos que podem ser vistos nas Tabelas 3.2 e 3.3, que terminam com os elementos estáveis ^{206}Pb e ^{207}Pb respectivamente.

No presente trabalho, será enfatizada a série do ^{238}U , devido à sua grande abundância em relação aos outros isótopos de urânio.

Acredita-se que na série de decaimento radioativo do ^{238}U , todos os radionuclídeos filhos estejam em equilíbrio radioativo com o radionuclídeo pai (^{238}U), porém, nessa série, é muito comum ocorrer um desequilíbrio devido à remoção completa ou parcial de um ou mais produtos da cadeia radioativa, como é o caso do ^{222}Rn (gás radônio) que apresenta característica móvel e pode escapar de solos e rochas para a atmosfera. Tal fato cria a possibilidade de erros nos cálculos das concentrações da atividade de ^{238}U por espectrometria gama. Dessa forma, normalmente os valores são reportados como “equivalentes de U” (eU), e não como atividades absolutas (IAEA, 2003).

O urânio apresenta-se na maioria das rochas e solos e, nos últimos 50 anos, a quantidade desse elemento, no meio ambiente, aumentou devido à algumas atividades humanas, tais como extração de urânio de minas, indústria nuclear e uso de fertilizantes na agricultura (RIVAS, 2005).

Uma pessoa pode ser exposta ao urânio por meio da ingestão de alimentos e água ou pela inalação. Cerca de 98% desse elemento, que passa pelo organismo, não é absorvido e o restante, aproximadamente 2%, pode ser encontrado nos rins, ossos e pulmões; sendo que nos órgãos respiratórios, sua presença está relacionada ao gás radônio, que é liberado da série radioativa (USEPA, 2006).

Estima-se que, no esqueleto humano, há um conteúdo de 25 µg de Urânio equivalente à 0,296 Bq de atividade e responsável por uma dose de 0,003 mSV ano⁻¹ (EISENBUD, 1987).

Tabela 3.2: Série de decaimento radioativo do ²³⁸U (Adaptado de IAEA, 2003)

Nuclídeo	Meia-vida	Maior energia radioativa (MeV) e intensidade*		
		α	β	γ
²³⁸ U	4.468x10 ⁹ a	4.15 (23%) 4.19 (77%)	–	–
↓				
²³⁴ Th	24.1d	–	~0.103 (19%) 0.191 (81%)	0.063 (3.5%) 0.093 (4%)
↓				
²³⁴ Pa	1.18m	–	2.29 (98%)	0.765 (0.30%) 1.001 (0.60%)
99.89% ↓ 0.14% ↓				
²³⁴ Pa	6.7h	–	0.53 (66%) 1.13 (13%)	0.10 (50%) 0.70 (24%) 0.90 (70%)
↓				
²³⁴ U	2.48x10 ⁵ a	4.72 (28%) 4.77 (72%)	–	0.053 (0.2%)
↓				
²³⁰ Th	7.52x10 ⁴ a	4.62 (24%) 4.68 (76%)	–	0.068 (0.6%) 0.142 (0.07%)
↓				
²²⁶ Ra	1602 a	4.60 (5.5%) 4.78 (94.5%)	–	0.186 (4%)
↓				
²²² Rn	3.825d	5.49 (~100%)		0.510 (0.07%)
↓				
²¹⁸ Po	3.05m	6.11 (100%)	0.33 (100%)	–
99.98% ↓ 0.02% ↓				
²¹⁴ Pb	26.8m	–	1.03 (6%) 0.352 (36%)	0.295 (19%) 0.352 (36%)
↓				
²¹⁸ At	2s	6.65 (6%) 6.70 (94%)	0.67 (94%)	–
↓				
²¹⁴ Bi	19.7m	5.61 (100%)	3.26 (100%)	0.609 (47%) 1.120 (17%) 1.764 (17%)
99.98% ↓ 0.04% ↓				
²¹⁴ Po	164µs	7.83 (100%)	–	0.799 (0.014%)
↓				
²¹⁰ Pb	1.32m	–	2.3 (100%)	0.296 (80%) 0.795 (100%) 1.31 (21%)
↓				
²¹⁰ Pb	~22 a	3.7 (1.8 x10 ⁻² %)	0.017 (85%) 0.064 (15%)	0.047 (4%)
↓				
²¹⁰ Bi	5.02d	4.93 (60%) 4.89 (34%) 4.59 (5%)	1.155 (100%)	–
~100% ↓ ~0.0001% ↓				
²¹⁰ Po	138.3d	5.30 (100%)	–	0.803 (0.0011%)
↓				
²⁰⁶ Pb	4.19m	–	1.520 (100%)	–
↓				
²⁰⁶ Pb	Estável	–	–	–

*Intensidade referente à porcentagem de desintegração para o nuclídeo, não está relacionada ao nuclídeo pai original da série

Tabela 3.3: Série de decaimento radiativo do ^{235}U (Adaptado de IAEA, 2003)

Nuclídeo	Meia-vida	Maior energia radioativa (MeV) e intensidade*		
		α	β	γ
^{235}U	$7.13 \times 10^8 \text{ a}$	4.36 (18%) 4.39 (57%) 4.1-4.6 (8%)	–	0.143 (11%) 0.185 (54%) 0.204 (5%)
^{231}Th	25.64h	–	0.300 (~100%)	0.026 (2%) 0.084 (10%)
^{231}Pa	$3.43 \times 10^4 \text{ a}$	5.01 (<20%) 4.99 (25.4%) 4.94 (22.8%)	–	0.027 (6%) 0.29 (6%)
^{227}Ac	22 a	4.95 (48.7%) 4.94 (36.1%) 4.87 (6.9%)	0.046 (100%)	0.070 (0.08%)
^{227}Th	18.17d	5.76 (21%) 5.98 (24%) 6.04 (23%)	–	0.050 (8%) 0.237 (15%) 0.31 (8%)
^{223}Fr	21m	5.34 (.005%)	1.15 (100%)	0.050 (40%) 0.080 (13%) 0.234 (4%)
^{223}Ra	11.68d	5.61 (26%) 5.71 (53.7%) 5.75 (9.1%)	–	0.149 (10%) 0.270 (10%) 0.33 (6%)
^{219}Rn	3.92s	6.42 (8%) 6.55 (11%) 6.82 (81%)	–	0.272 (9%) 0.401 (5%)
^{215}Po	1.83ms	7.38 (100%)	–	–
^{211}Pb	36.1m	–	0.95 (1.4%) 0.53 (5.5%) 1.36 (92.4%)	0.405 (3.4%) 0.427 (1.8%) 0.832 (3.4%)
^{211}Bi	2.16m	6.28 (17%) 6.62 (83%)	0.60 (0.28%)	0.351 (14%)
^{211}Po	0.52s	7.43 (99%)	–	0.570 (0.5%) 0.90 (0.5%)
^{207}Tl	4.79m	–	1.44 (100%)	0.897 (0.16%)
^{207}Pb	Estável	–	–	–

*Intensidade referente à porcentagem de desintegração para o nuclídeo, não está relacionada ao nuclídeo pai original da série

Quando o ^{219}Rn , radionuclídeo presente na série do ^{235}U , se desintegra, são gerados três descendentes chamados filhos, o ^{215}Po , ^{211}Pb e o ^{211}Bi , que em quantidades

microscópicas são sólidos e, se formados a partir do radônio presente no ar, eles aderem rapidamente às partículas de poeira que, ao serem inaladas, aderem-se aos pulmões aumentando os riscos de câncer nesses órgãos. Sendo assim, pode-se afirmar que, nessas condições, esses elementos apresentam riscos à saúde (BAIRD, 2002).

3.1.4 Tório-232

Tório é um elemento radioativo natural e pode ser encontrado em concentrações que variam de 8,1 a 33 ppm em rochas ígneas, porém esse elemento geralmente está associado a diversos tipos de rochas e solos.

Por se tratar de um elemento radioativo com meia-vida de aproximadamente 14 bilhões de anos, o tório passa por um processo de decomposição radioativa até atingir a estabilidade, ou seja, juntamente com seus produtos de decaimento, constitui uma série radioativa.

De acordo com a Tabela 3.4, o pai da série do tório é o ^{232}Th e, durante o processo de decaimento radioativo desse elemento, há emissão de uma partícula alfa formando o ^{228}Ra . Esse processo de decaimento, a liberação de radiação e a consequente presença de um novo elemento continuam até a formação do ^{208}Pb , elemento estável.

A exemplo da série de decaimento radioativo do ^{238}U , na série do ^{232}Th também pode haver um desequilíbrio devido à perda de um ou mais elementos da cadeia radioativa, porém tal advento raramente ocorre na natureza. No entanto, as atividades calculadas para esse elemento são usualmente reportadas como “equivalente de Tório” (eTh) (IAEA, 2003).

Tabela 3.4: Série de decaimento radioativo do ^{232}Th (Adaptado de IAEA, 2003)

Nuclídeo	Meia-vida	Maior energia radioativa (MeV) e intensidade*		
		α	β	γ
^{232}Th	$1.39 \times 10^{10} \text{ a}$	3.95 (24%) 4.01 (76%)	—	—
↓				
^{228}Ra	5.75 a	—	0.055 (100%)	—
↓				
^{228}Ac	6.13h	—	2.11 (100%)	0.34 (15%) 0.908 (25%) 0.96 (20%)
↓				
^{228}Th	1.913 a	5.34 (28%) 5.42 (71%)	—	0.084 (1.6%) 0.214 (0.3%)
↓				
^{224}Ra	3.64d	5.45 (5.5%) 5.68 (94.5%)	—	0.241 (3.7%)
↓				
^{220}Rn	55.6s	6.30 (~100%)	—	0.55 (0.07%)
↓				
^{216}Po	0.145s	6.78 (100%)	—	—
↓				
^{212}Pb	10.64h	—	0.580	0.239 (47%) 0.300 (3.2%)
↓				
^{212}Bi	60.5m	6.05 (70%) 6.09 (30%)	2.25 (100%)	0.040 (2%) 0.727 (7%) 1.620 (1.8%)
↓				
^{212}Po	304ns	8.78 (100%)	—	—
↓				
^{208}Tl	3.1m	—	1.80 (100%)	0.511 (23%) 0.583 (86%) 0.860 (12%) 2.614 (100%)
↓				
^{208}Pb	Estável	—	—	—

*Intensidade referente à porcentagem de desintegração para o nuclídeo, não está relacionada ao nuclídeo pai original da série

A absorção do ^{232}Th pelas plantas é muito pequena devido ao fato desse radionuclídeo apresentar pouca solubilidade e à sua concentração em materiais biológicos ser insignificante (EISENBUD, 1987). No corpo humano, esse elemento é freqüentemente encontrado nos ossos. Uma vez que o tório tem o mesmo comportamento do urânio e, isso se deve à semelhança química demonstrada entre o ^{226}Ra e ^{228}Ra (filhos radioativos da série do ^{238}U e ^{232}Th , respectivamente) em relação ao Ca, há uma competição entre eles, criando a possibilidade de serem absorvidos pelas estruturas ósseas (UMISEDO, 2007).

Juntamente com seus filhos radioativos, o ^{232}Th contribui com 0,09 mSv na dose efetiva anual devido à exposição interna de radionuclídeos naturais (UNSCEAR, 2000).

3.2 Radioatividade artificial

Uma nova fase, em relação aos estudos nucleares, teve início a partir das descobertas de Curie e Joliot, ao constatarem que certos produtos de algumas reações nucleares induzidas são radioativos como, por exemplo, a formação de elementos radioativos devido ao bombardeio de partículas α sobre núcleos de elementos leves. Tal fato foi denominado radioatividade artificial. Descobriu-se, também, que reações nucleares induzidas por prótons, dêuterons, nêutrons e fótons têm, geralmente, como produtos resultantes, elementos radioativos (MELQUIADES, 2000).

Os radionuclídeos chamados artificiais são caracterizados pelo respectivo tempo de meia-vida e pelo tipo de emissão radioativa, sendo análoga aos radionuclídeos naturais. Na Figura 3.2, pode-se observar um gráfico dos radionuclídeos naturais e artificiais conhecidos.

Figura 3.2: Radionuclídeos artificiais e naturais conhecidos (Extraída de Kaplan, 1963)

A produção dos radioisótopos artificiais iniciou-se, a partir da década de 40, com o advento da energia nuclear e sua utilização. Atualmente, cerca de 30 países dependem dessa fonte de energia para gerar eletricidade (ISHIGURO, 2002).

Em relação ao impacto ambiental, dentre os inúmeros radionuclídeos produzidos artificialmente e liberados no meio ambiente, destaca-se o produto de fissão

^{137}Cs devido às suas características nucleares, tais como: alto rendimento de fissão, meia-vida longa e semelhanças químicas com o potássio, sendo que esse isótopo radioativo tende a participar de processos metabólicos, podendo depositar-se parcialmente nos músculos (FIGUEIRA, 2000).

A seguir, serão apresentadas as principais formas de contaminações radioativas, enfatizando o radionuclídeo artificial ^{137}Cs , de interesse no presente estudo: a fim elucidar o processo de contaminação radioativa em cogumelos.

3.2.1 “Fallout” radioativo

Uma enorme nuvem de gás e vapor é produzida em decorrência de uma explosão nuclear, como ilustrado na Figura 3.3. A altura e o diâmetro dessa nuvem conhecida popularmente como “cogumelo”, dependerá especificamente da potência da bomba nuclear.

Figura 3.3: Nuvem formada a partir de uma explosão nuclear

Os testes atmosféricos das bombas nucleares e os acidentes ocorridos em reatores nucleares ocasionaram o surgimento de vários elementos radioativos artificiais que se espalham por todo o globo terrestre devido ao “fallout”.

O “*fallout*” é citado por Figueira e col. (1998), como sendo um fenômeno subsequente a uma explosão nuclear. Após uma explosão, grande parte do material presente é vaporizado em decorrência do intenso calor produzido, seguido de um processo de resfriamento, formando, assim, inúmeros fragmentos. Os fragmentos maiores caem diretamente a terra por efeito gravitacional, provocando o “*fallout*” local, poucas horas depois da explosão, numa extensão de alguns quilômetros ao redor do ponto da explosão; já os fragmentos menores, que alcançam a troposfera, são disseminados, para diversas partes do planeta, por meio de correntes eólicas. Portanto, a partir do advento de uma explosão nuclear, são lançados inúmeros radionuclídeos artificiais na atmosfera, que podem atingir todos os compartimentos do planeta.

Entre a década de 40 e primórdios da de 70, testes e usos de armas nucleares foram os principais responsáveis pela contaminação radioativa da atmosfera, sendo que o “*fallout*” dos respectivos resíduos radioativos e produtos de fissão destacam-se como significativas fontes de liberação de elementos artificiais no meio ambiente, sobressaindo-se o ^{137}Cs , um dos mais importantes produtos de meia-vida longa (UNSCEAR, 2000).

A partir da década de 80, as principais fontes de liberação de radionuclídeos artificiais foram os acidentes radiológicos e nucleares (ANJOS e col., 2000). Em algumas regiões do mundo como Belarus, Ucrânia, Rússia e locais adjacentes, ainda se observa altas concentrações de radionuclídeos, dentre eles o ^{137}Cs , entre outros, oriundos de ações antrópicas. Tal fato deve-se ao acidente ocorrido com o reator nuclear em Chernobyl, em abril de 1986, fato também observado nas cidades Hiroshima e Nagasaki devido à explosão de bombas atômicas em 1945. De acordo com Melquiades (2000), o “*fallout*” total de ^{137}Cs no hemisfério Norte é superior em relação ao hemisfério Sul, isto pode ser atribuído a uma maior atividade envolvendo testes nucleares no hemisfério Norte, como pode ser observado na Figura 3.4.

Desta forma, fica claro que além da presença dos radionuclídeos naturais, a radioatividade do planeta deve-se também à incorporação dos elementos radioativos artificiais provenientes da respectiva deposição da atmosfera para a superfície da Terra, ou seja, por meio do “*fallout*”, como foi visto anteriormente. Sendo assim, o transporte dos elementos radioativos na natureza envolve a transferência entre os três componentes primários do ambiente: vegetação, solo e água. Por esse motivo, é de extrema importância conhecer os efeitos ambientais da radioatividade, assim como os possíveis riscos aos quais a humanidade possa estar exposta devido à ingestão de alimentos contaminados.

Figura 3.4. Deposição global de ^{137}Cs devido ao jato radioativo (Extraída de Melquiades, 2000)

3.2.2 Césio-137

^{137}Cs é um radionuclídeo artificial introduzido no meio ambiente por meio do “*fallout*” radioativo, proveniente dos testes de armas termonucleares atmosféricas e de acidentes nucleares, como já foi dito no item 2.2.1. A deposição do ^{137}Cs ocorreu até meados de 1980, sendo que devido ao acidente de Chernobyl, grande parte da Europa teve um “*fallout*” adicional desse elemento. No entanto, não existe relato na literatura que a contaminação proveniente desse acidente tenha alcançado o hemisfério Sul (JAWROWSKI e KOWNACKA, 1988).

Apesar de não haver constatação de contaminação do hemisfério Sul por meio do “*fallout*”, verifica-se a presença desse radioisótopo em países dessa região, como por exemplo, o Brasil que, dentre outros fatores, devido a acidentes, como o ocorrido em 1987, na cidade de Goiânia, com a abertura de uma cápsula de Césio radioativo (^{137}Cs) de uso medicinal, apresentou contaminação desse local.

O radioisótopo artificial ^{137}Cs é formado a partir da fissão do ^{235}U , como é mostrado na Figura 3.5, tendo como produto final o ^{137}Ba , elemento estável.

Figura 3.5: Produção do ^{137}Cs a partir da fissão do ^{235}U

O processo de decaimento do ^{137}Cs para a formação do ^{137}Ba ocorre pela emissão de uma partícula beta (0,500 MeV) seguida da emissão de raios gama (0,661 MeV), como demonstrado na Figura 3.6.

^{137}Cs é encontrado na família dos metais alcalinos e trata-se de um elemento com meia-vida física de 30,14 anos e meia-vida biológica que varia de 70 dias,

considerando todo o organismo, a 140 dias, considerando-se os músculos (BAILEY e col., 1978).

Figura 3.6: Esquema de decaimento do ^{137}Cs (Extraída de Figueira, 2000)

Do ponto de vista ambiental, ^{137}Cs destaca-se devido às suas características nucleares (alto rendimento de fissão e meia-vida longa), sendo que nos processos metabólicos, o elemento cézio comporta-se de forma semelhante ao potássio, tendendo a acompanhá-lo depositando-se parcialmente nos músculos (FIGUEIRA e col., 1998). No entanto, o potássio trata-se de um elemento essencial para o homem, enquanto não há evidências de que o Cs também seja um elemento traço essencial, ao contrário disso, esse elemento, quando presente no corpo humano, pode participar de processos que desencadeiam doenças como, o câncer (UMISED, 2007).

De acordo com PIETRAZAK-FLIS e col. (1996), o ^{137}Cs é facilmente absorvido por cogumelos e plantas vasculares, podendo, desta forma, fazer parte da cadeia alimentar e assim ser incorporado pelo homem e pelos animais.

A presença de ^{137}Cs , pode estar relacionada à deposição desse radionuclídeo, proveniente do “*fallout*” radioativo, diretamente na superfície de alguns seres vivos como

plantas e cogumelos ou pela transferência direta desse elemento presente no solo para esses organismos, que dependerá da concentração encontrada, assim como da profundidade das raízes da vegetação e micélios dos fungos inseridos no substrato.

3.3 Espectrometria gama

A espectrometria gama é utilizada efetivamente para a determinação de radiação em amostras ambientais, geológicas e biológicas, possibilitando determinar os radionuclídeos que são emissores de raios gama diretamente do material que se deseja estudar, sem que haja a necessidade, por exemplo, de agregar ao processo de análise, outras metodologias como, a separação radioquímica. Tal facilidade permitiu que a espectrometria gama se tornasse um método experimental padrão na espectrometria nuclear muito utilizado atualmente.

O princípio básico da espectrometria gama consiste em medir a energia correspondente a cada fóton de raio gama emitido a partir do decaimento radioativo de possíveis radionuclídeos presentes na amostra analisada; cada fóton de raio gama tem uma discreta energia, esta, por sua vez, é característica para cada isótopo, possibilitando assim, a sua identificação (IAEA, 2003).

Os raios gama emitidos a partir de uma amostra são normalmente identificados por meio da associação entre um detector de radiação específico e uma eletrônica nuclear, que serão discutidos mais adiante. Com esse método, é possível realizar identificação qualitativa e quantitativa dos radionuclídeos emissores gama presentes.

Basicamente, a espectrometria gama foi a técnica utilizada para determinar a concentração dos radionuclídeos nas amostras que serão apresentadas neste trabalho.

3.3.1 Propriedades dos espectros de raios gama

Átomos com núcleos em estado excitado podem se tornar estáveis por processos que envolvam decaimento alfa, beta e gama. Nos processos de decaimento, alfa e beta, o núcleo do isótopo descendente permanece, em geral, em um estado de excitação, decaindo rapidamente para o estado fundamental por emissão de um ou mais raios gama, correspondente a fótons de elevada energia, que variam de 0,1 a 10 MeV (FIGUEIRA, 2000).

Durante a emissão γ , ocorre o processo de Conversão Interna, em que o núcleo excitado transfere sua energia diretamente a um elétron atômico, o qual é liberado do átomo. Nesse processo, não há formação de um elétron e^- , apesar do átomo tornar-se ionizado, não há alteração em relação ao número atômico ou de nêutrons do radionuclídeo (PIERO, 2003).

Os fótons de radiação eletromagnética, que são emitidos pelos radionuclídeos, são, geralmente, estudados pela espectrometria gama, uma vez que o decaimentos de alguns elementos como ^{40}K , ^{232}Th ^{238}U , entre outros, são observadas as linhas de espectro características. Ou seja, esses radionuclídeos naturais produzem raios gama de alta energia, durante o processo de decaimento radioativo, com intensidade suficiente para que seja possível fazer um mapeamento utilizando a espectrometria gama, como apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.7: Linhas de espectro de emissão de raio gama para: a) Potássio; b) Urânio; c) Tório (Adaptado de IAEA, 2003)

Essas linhas, observadas na Figura 3.7, representam a distribuição de energia emitida pelos fótons, referentes aos radionuclídeos ^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U a partir de uma determinada fonte, sendo que cada espectro formado é detectado por espectrometria gama. Cada linha do espectro (ou emissão do espectro) mostra a energia e a intensidade relativa à emissão de raio gama proveniente do processo de decaimento.

Radioisótopos artificiais também são mapeados por meio dessa metodologia, como é o caso do ^{137}Cs , que é considerado um dos principais emissor gama proveniente do “*fallout*” radioativo. Esse radionuclídeo apresenta um único fotopico característico de 0,661 MeV.

3.3.2 Detectores de radiação gama

A radiação nuclear, tanto a corpuscular como a eletromagnética, é detectada por meio de sua interação com a matéria, em que a forma de interagir da radiação- $\bullet$ é diferente da interação das partículas $\bullet$ e $\bullet$. Na interação de partículas $\bullet$ e $\bullet$ carregadas, elas transferem sua energia para os elétrons das camadas eletrônicas sob muitos processos.

Já na interação do quantum- $\bullet$, em um único processo, toda energia é transferida, ou pelo menos uma grande fração da energia, por meio de processos fundamentais como: efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares (KNOLL, 1999).

No efeito fotoelétrico, o quantum- $\bullet$, ao interagir com a matéria, transfere toda a sua energia para um elétron da camada eletrônica, em uma única interação; enquanto que no efeito Compton, o quantum- $\bullet$ transfere somente parte de sua energia para o elétron, isto significa que o quantum- $\bullet$ sofrerá um desvio. Finalmente, o efeito de produção de pares é o resultado da interação do quantum- $\bullet$ com o campo elétrico de um núcleo, produzindo assim, um par pósitron-néutron; esse processo só pode ocorrer quando a energia do quantum- $\bullet$ for maior que 1,022 MeV (KELLER, 1981).

Dessa forma, a detecção da radiação- γ é possível quando um fóton de radiação atinge um detector específico, transferindo toda ou parte de sua energia, por meio de um dos processos citados acima.

Os raios gama frequentemente são estudados em dois tipos de detectores: os cintiladores e os semicondutores. Os detectores de cintilação são divididos em orgânicos e inorgânicos. Os de cintilação orgânicos funcionam basicamente por fluorescência, enquanto os inorgânicos são feitos em sua maioria de haletos metálicos, sendo que um dos mais populares é o de iodeto de sódio dopado com tálio [NaI(Tl)] (KNOLL, 1999).

A principal vantagem de um detector cintilador é a sua eficiência, ou seja, a razão entre o número de contagens registradas correspondente ao número de fótons absorvidos e número de fótons incidentes no detector. Porém, a baixa resolução oferecida por esse tipo de detector, que não realiza de forma satisfatória a discriminação entre picos de energias muito próximas em um espectro, torna sua utilização questionável, dependendo da finalidade.

A resolução em energia de um detector é definida como a largura da meia altura de um pico formado presente em um espectro, FWHM (“Full Width at Half Maximum”) e está relacionada a uma determinada linha de energia, conforme é mostrada na Figura 3.8. Quanto menor for a largura da meia altura do pico, melhor é a habilidade do detector em discriminar a energia da radiação incidente (KNOLL, 1999).

Figura 3.8: Definição da resolução em energia de um detector em função da largura a meia altura (Extraída de Mosquera, 2004)

Os detectores semicondutores possuem maior habilidade em distinguir entre dois raios gama de energias ligeiramente diferentes, ou seja, apresentam melhor resolução em relação aos detectores inorgânicos, exemplo disso é o NaI(Tl), como observado na Figura 3.9.

Figura 3.9: Comparação do espectro- γ de ^{166}Ho obtido com um detector semicondutor e com um detector de cintilação de NaI(Tl) (Extraída de Keller,1981)

Sendo assim, em estudos que se requer boa resolução, são utilizados detectores semicondutores, como o de Germânio.

No detector de Germânio, a detecção dos raios γ se inicia quando a radiação ionizante atinge a matriz do cristal, formando pares elétron-buraco, gerando um pulso ou sinal elétrico, cuja amplitude é proporcional à energia da radiação incidente (KRANE, 1988).

Com a formação de uma “lacuna” no cristal, um elétron vizinho preenche esse vazio, formando então uma nova lacuna, que propicia a migração dessa “lacuna” por todo o cristal. Normalmente, esses detectores são associados a uma eletrônica, como mostra a Figura 3.10, em que o pulso elétrico formado é analisado, convertido em um pulso de voltagem e adquire a forma gaussiana no amplificador.

Os pulsos de saída desse amplificador vão para o analisador de altura de pulso onde são classificados e armazenados por um número de canais de acordo com suas alturas de pulso. Assim, um espectro adquirido pelo analisador de altura de pulso (analisador

multicanal) representa o número de contagens por canal como uma função da altura do pulso ou da energia (MELQUIADES, 2000).

Figura 3.10: Esquema do detector e eletrônica associada – (1) detector e pré-amplificador, (2) fonte de alta tensão, (3) amplificador, (4) sistema de aquisição dos dados de medida

CAPÍTULO 4

4.1 Parte experimental

Neste capítulo serão expostas informações sobre os equipamentos utilizados, locais de aquisição e preparo das amostras e metodologia aplicada para a determinação dos radionuclídeos de interesse presentes em cogumelos comestíveis.

4.1.1 Materiais e métodos

4.1.2 Equipamentos

Para o tratamento das amostras de cogumelos comestíveis, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Purificador de água, marca Millipore e modelo Academic Gradient A10;
- Freezer, marca Brastemp e modelo Quality-280;
- Liofilizador, marca Thermo Electron Corporat e modelo Modulyo D-115;
- Balança analítica, marca Shimadzu Libror e modelo AEL-40SM;
- Liquidificador doméstico, marca Arno e modelo Magiclean;
- Balança determinadora de umidade, marca OHAUS e modelo MB45.

Para as determinações dos radionuclídeos, ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U , nas amostras de cogumelos comestíveis, por espectrometria gama, os seguintes equipamentos foram necessários:

- Espectrômetro de raios gama, constituído de um detector de Germânio Hiperpuro (HPGe) coaxial, modelo GEM 60190, tipo POP TOP, marca EG&ORTEC, com resolução de 1,9 keV para o fotopico de 1332,2 keV do ^{60}Co ,

Figura 4.2: Amostra de cogumelo adquirida diretamente do produtor, no município de Suzano- SP

Os cogumelos, adquiridos diretamente dos produtores, são provenientes de cultivos desenvolvidos em municípios como Mogi das Cruzes, Mirandópolis, Suzano e Juititaba, como mostra a Figura 4.3.

Figura 4.3: Municípios de onde foram adquiridas amostras diretamente dos produtores

No período de novembro/2006 a março/2007, foram adquiridas aproximadamente 400g das seguintes espécies de cogumelos comestíveis: *Agaricus bisporus*, *Agaricus blazei*, *Agaricus sp*, *Lentinula edodes*, *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus eryngii* e *Pleurotus ostreatoroseus*, como mostra a Figura 4.4.

Agaricus bisporus

Agaricus sp

Agaricus blazei

Lentinula edodes

Pleurotus ostreatus

Pleurotus eryngii

Pleurotus ostreatoroseus

Figura 4.4: Espécies de cogumelos analisadas

4.1.4 Preparação das amostras

Primeiramente, todas as amostras foram limpas e para isso ficaram submersas por 10 minutos em água purificada, com resistividade de 18 Ohms, de acordo com a Figura 4.5.

Figura 4.5: Amostra de cogumelo comestível submersa em água

Após a lavagem, as amostras foram retiradas da água e cortadas em fatias finas, utilizando faca plástica e distribuídas em placas de Petri. Após esta etapa, as amostras foram então congeladas em freezer, no mínimo por 12 horas. Após o congelamento, as amostras foram liofilizadas, entre 10 e 15h a pressão de até 45 μ bar em um liofilizador, que pode ser observado na Figura 4.6.

Figura 4.6: Equipamento utilizado para liofilizar as amostras

Depois do processo de liofilização, as amostras foram trituradas e homogeneizadas em um liquidificador doméstico adaptado com lâminas de Ti. Finalmente, aproximadamente 22g de cada amostra, na forma de pó, foram acondicionadas em

recipientes de polietileno, apropriados para contagem gama, com dimensões de 65 mm de diâmetro e 19 mm de altura. Foram, então, devidamente seladas com as respectivas tampas dos recipientes e fita adesiva e identificadas, como pode ser visto na Figura 4.7. Todas as amostras foram armazenadas por aproximadamente 35 dias e após este período iniciaram-se as medidas das atividades por espectrometria gama.

Figura 4.7: Recipientes de polietileno contendo as amostras preparadas e identificadas, prontas para as medidas

Foi necessário esperar este período de 35 dias, para iniciar as contagens, pois as atividades dos radionucléios ^{232}Th e ^{238}U são calculadas pelas taxas de contagens obtidas pelos seus descendentes, onde as medições são feitas após as amostras atingirem o equilíbrio da formação dos radionuclídeos filhos. Neste caso, o equilíbrio radioativo secular é atingido, ou seja, condição em que todos os elementos de cada uma das respectivas séries de decaimento do ^{232}Th e ^{238}U estejam com igual atividade.

4.1.5 Determinação do teor de umidade das amostras

Após a liofilização das amostras, verificou-se que a perda de água das mesmas variou de 86,2% a 94,7%. Já a determinação do teor de água residual das amostras foi feita por meio da utilização da balança determinadora de umidade MB45 da OHAUS e para isso cerca de 1g de cada amostra de cogumelo, sob a forma de pó, foi aquecida até atingir a temperatura de 85°C e alcançar peso constante. As percentagens de umidades obtidas variaram de 4,28% a 11,94%. O equipamento utilizado para esta finalidade está apresentado na Figura 4.8.

Figura 4.8: Equipamento utilizado para determinação do teor de umidade residual das amostras

4.1.6 Determinação dos radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U

Para a determinação dos radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U , foi aplicada a metodologia de análise desenvolvida por Figueira (2000).

Esta metodologia consiste basicamente em:

- calibração do detector;
- contagem cumulativa da radiação de fundo (*background*) do equipamento de detecção em intervalos regulares de tempo;
- contagem cumulativa de materiais de referência em intervalos regulares de tempo;
- determinação da eficiência de contagem do detector;
- contagem cumulativa das amostras em intervalos regulares de tempo;
- suavização dos picos de energia obtidos por meio de um polinômio integrado ao software;
- regressão linear.

^{40}K e ^{137}Cs foram determinados por espectrometria gama pelos picos 1460,8 keV e 661,6 keV, respectivamente. No entanto, ^{232}Th e ^{238}U foram determinados por meio

dos radionuclídeos filhos, presentes em suas séries de decaimento radioativo, que apresentam atividades iguais às de seus pais, em estado de equilíbrio secular, em condições de análise favoráveis (IAEA, 2003).

Porém, como fora abordado nos itens 3.1.2 e 3.1.3 do capítulo 3, pode ocorrer um desequilíbrio nas séries de decaimento do ^{232}Th e ^{238}U , respectivamente, sendo as estimativas de concentração de ^{238}U normalmente reportadas como “equivalente de urânio” (eU), onde essas estimativas são baseadas no pressuposto de condições de equilíbrio. A concentração de tório também é geralmente reportada como “equivalente de tório” (eTh), embora a sua série de decaimento esteja freqüentemente em equilíbrio (IAEA, 2003).

Sendo assim, no presente trabalho, as estimativas de ^{232}Th e ^{238}U foram feitas por meio dos fotopicos 911,2 keV do ^{228}Ac e 609,3 keV do ^{214}Bi , respectivamente. Na tabela 4.1 estão descritas todas as energias utilizadas para a identificação dos radionuclídeos de interesse no presente trabalho.

Tabela 4.1: Energias utilizadas para identificação dos radionuclídeos de interesse

Radionuclídeo	Energia (keV)
^{40}K	1460,8
^{137}Cs	661,6
^{214}Bi (^{232}Th)	609,3
^{228}Ac (^{238}U)	911,2

Para a determinação das atividades específicas dos radionuclídeos, inicialmente, foi feita a calibração do detector, realizando a contagem de uma fonte calibrada de ^{60}Co e ^{152}Eu . Posteriormente, foram feitas contagens acumulativas da radiação de fundo, *background* (BG), do equipamento. Para isso, um recipiente de polietileno vazio,

igual ao utilizado para acondicionar as amostras de cogumelos, foi colocado no detector e contado durante 200000 s, sendo que as sucessivas contagens foram gravadas em intervalos de 25000 s, entre 100000 s a 200000 s, totalizando assim 5 espectros de contagens para a radiação de fundo do equipamento, obtendo-se, assim, registros dos fotopicos de interesse.

Após ter sido feita a contagem da radiação de fundo, iniciou-se o estudo da eficiência de contagem do detector gama. Para isto, foram colocados os materiais de referência da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA): IAEA-300 (sedimento marinho), IAEA-327 (solo) e IAEA-375 (solo), em potes de polietileno, com a mesma geometria dos recipientes utilizados para as amostras (IAEA, 2000; IAEA, 2000; IAEA, 2001).

Os materiais de referência foram mantidos sob o mesmo tempo de armazenamento decorrido para as amostras, ou seja, 35 dias, até que se iniciassem as contagens. Cada contagem durou aproximadamente 120000 s, sendo que as respectivas contagens foram sendo gravadas nos tempos de 90000 s, 100000 s, 110000 s, 115000s e 120000 s, totalizando 5 espectros de contagem para os materiais de referência, obtendo-se, assim, os registros dos fotopicos de interesse.

Todos os espectros obtidos sofreram um processo de suavização, utilizando-se o Software MAESTROII (EG & ORTEC, 1992), antes de serem analisados, de acordo com a Equação [1]:

$$S_i = \sum_{j=1}^5 C_j \cdot O_{i-3+j} \quad [1] \text{ (EG\&ORTEC, 1992)}$$

Em que,

S_i : dados suavizados (smothed) no canal i;

C_j : coeficiente de suavização (smoothing);

O_i : dados originais no canal i.

Este é um algoritmo de suavização binominal de 5 pontos, onde a área não é alterada. Para a análise do ^{40}K foram utilizados 21 canais, enquanto para os demais radionuclídeos, ^{137}Cs , ^{232}Th (^{228}Ac) e ^{238}U (^{214}Bi), foram utilizados 11 canais, sendo observado que esta quantidade de canais estabelecida foi satisfatória para análise destes radionuclídeos em baixas concentrações (FIGUEIRA, 2000).

Foram feitas, então, linhas de regressão linear das contagens obtidas em função do tempo, tanto para a radiação de fundo (BG) como para os materiais de referência. As Figuras 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, apresentam os gráficos de contagem para a radiação de fundo (BG) e materiais de referência, a reta ajustada, assim como, os valores dos coeficientes angulares obtidos, tanto para a radiação de fundo (a_{BG}) como para os materiais de referência (a_{MR}), referente às energias de interesse dos radionuclídeos, ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U , respectivamente.

A partir dos valores de coeficiente angular, pode-se determinar as eficiências do detector para ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U , segundo a Equação 2:

$$\varepsilon = \frac{a_{MR} - a_{BG}}{m_{MR} \cdot A_{MR}} \quad [2] \text{ (FIGUEIRA, 2000)}$$

Em que,

ε : eficiência do detector para o fotopico 661,6 keV do ^{137}Cs , 911,2 keV do ^{228}Ac , 609,3 keV do ^{214}Bi e 1460,8 keV do ^{40}K ;

a_{MR} e a_{BG} : coeficiente angular da curva de regressão para o material de referência e radiação de fundo, respectivamente;

m_{MR} : massa do material de referência em kg;

A_{MR} : atividade do radioisótopo de interesse no material de referência (Bq kg^{-1}), ajustado para a data de análise.

Figura 4.9: Contagens de ^{40}K referentes à radiação de fundo (BG) e materiais de referência em função do tempo

Figura 4.10: Contagens do ^{137}Cs referentes à radiação de fundo (BG) e materiais de referência em função do tempo

Figura 4.11: Contagens do ^{228}Ac referentes à radiação de fundo (BG) e materiais de referência em função do tempo

Figura 4.12: Contagens do ^{214}Bi referentes à radiação de fundo (BG) e materiais de referência em função do tempo

Os valores de eficiências do detector para os fotopicos 661,6 keV do ^{137}Cs e 1460,8 keV do ^{40}K , obtidos através das medidas dos materiais de referência IAEA-300 e IAEA-375, foram calculados a partir da Equação 2 e estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores de eficiência do sistema de contagem para ^{137}Cs e ^{40}K obtidos a partir dos materiais de referência

Material de Referência	Data de referência	Material	Valor certificado (Bq kg^{-1})		^{137}Cs	^{40}K
			^{137}Cs	^{40}K	Eficiência (%)	Eficiência (%)
IAEA -300	01/01/1993	Sedimento marinho	1066,6 (1046 – 1080) ¹	1059 (1046 – 1226) ¹	1,90	0,19171
IAEA -375	31/12/1991	Solo	5280 (5200-5360) ¹	424 (417-432) ¹	1,98	0,19055
Média ± desvio-padrão					1,94 ± 0,05	0,19113 ± 0,00082

¹intervalo de confiança

Já os valores das eficiências do detector para o fotopico 911,2 keV do ^{228}Ac (^{232}Th) e 609,3 keV do ^{214}Bi (^{238}U), a partir dos materiais de referência IAEA-300 e IAEA-327 estão descritos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores de eficiência do sistema de contagem para ^{232}Th e ^{238}U obtidos a partir dos materiais de referência

Material de Referência	Data de referência	Material	Valor certificado (Bq kg^{-1})		^{232}Th	^{238}U
			^{232}Th	^{238}U	Eficiência (%)	Eficiência (%)
IAEA -300	01/01/1993	Sedimento marinho	72,4 (68,5 - 77,6) ¹	64,7 (61 - 68,7) ¹	0,73	1,19
IAEA -327	31/12/1994	Solo	38,7 (37,2 - 40,2) ¹	32,8 (31,4 - 34,2) ¹	0,76	1,56
Média ± desvio-padrão					0,75 ± 0,02	1,38 ± 0,25

¹intervalo de confiança

As amostras de cogumelo foram submetidas ao mesmo método de contagem acumulativo utilizado para os materiais de referência e a partir das taxas de contagem obtidas para os radionuclídeos de interesse presentes na amostra (C_A) e para a radiação de fundo (C_{BG}), podendo-se obter as equações das duas retas (C_A versus tempo) e (C_{BG} versus tempo), sendo possível obter os valores dos coeficientes angulares para a amostra (a_A) e para a radiação de fundo (a_{BG}).

As Figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, exemplificam os gráficos de contagem obtidos para radiação de fundo e para uma determinada amostra em função do tempo, assim como a reta ajustada e o valor do coeficiente angular (a_A) e (a_{BG}) para os radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{228}Ac e ^{214}Bi , respectivamente.

Figura 4.13: Contagens de ^{40}K referentes à radiação de fundo (BG) e uma determinada amostra em função do tempo

Figura 4.14: Contagens do ^{137}Cs referentes à radiação de fundo (BG) e uma determinada amostra em função do tempo

Figura 4.15: Contagens do ^{228}Ac referentes à radiação de fundo (BG) e uma determinada amostra em função do tempo

Figura 4.16: Contagens do ^{214}Bi referentes à radiação de fundo (BG) e uma determinada amostra em função do tempo

Partindo-se do pressuposto de que o coeficiente angular da reta para a amostra (C_A versus tempo) deve ser maior do que o apresentado pela radiação de fundo (C_{BG} versus tempo), é possível fazer a determinação dos radionuclídeos.

Então, a partir dos valores de coeficientes angulares, (a_A) e (a_{BG}), obtidos por meio da curva de regressão, para as amostras e para a radiação de fundo, e conhecendo a eficiência de contagem do detector, foi possível determinar as atividades específicas dos

radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th (^{228}Ac) e ^{238}U (^{214}Bi), presentes em cada amostra de cogumelo comestível analisada, a partir da Equação 3:

$$a = \frac{a_A - a_{BG}}{m_A \cdot \varepsilon} \quad [3] \text{ (VENDRAME, 2007)}$$

Em que,

a : atividade específica de interesse na amostra em Bq kg^{-1} ;

a_A , a_{BG} : coeficiente angular da curva de regressão para a amostra e para a radiação de fundo, respectivamente;

m_A : massa da amostra em kg;

ε : eficiência para os fotopicos 661,6 keV do ^{137}Cs , 609,3 keV do ^{214}Bi , 911,2 keV do ^{208}Ac e 1460,8 keV do ^{40}K .

CAPÍTULO 5

5.1 Resultados e discussão

5.1.1 Validação da Metodologia

Para a validação da metodologia, foram analisados os materiais de referência, IAEA-307 (solo), IAEA-414 (peixe), IAEA-375 (solo) e IAEA-Mushroom (IAEA, 1989; IAEA, 2000; IAEA, 2004; e IAEA, 2006). O IAEA Mushroom foi certificado em um projeto inter-regional, INT/1/ 054 “*Preparation of reference materials and organization of proficiency test rounds*” (RAHMAN e col., 2006).

A Tabela 5.1 mostra os resultados das atividades específicas calculadas a partir da Equação 3, apresentada no capítulo 3, para os radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th (^{228}Ac) e ^{238}U (^{214}Bi), nos materiais de referência citados. Observa-se que os resultados obtidos estão de acordo com os valores certificados, sendo que os erros relativos obtidos foram inferiores a 20%.

Tabela 5.1: Concentração de ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U em Bq kg^{-1} , nos materiais de referência

Material de Referência	^{40}K			Material de Referência	^{137}Cs		
	Este trabalho	Valor certificado	E.R %		Este trabalho	Valor certificado	E.R. ⁽²⁾ %
IAEA Mushroom	962 ± 4 (0,4%) ³	1136 (1046-1226) ⁽¹⁾	15,3	IAEA Mushroom	3184 ± 94 (3,02%) ³	2899 (2740-3058) ⁽¹⁾	9,8
IAEA-414	484 ± 2 (0,4%) ³	480 (461-498) ⁽¹⁾	0,7	IAEA-307	$5,5 \pm 0,2$ (3,62%) ³	4,9 (4,5-5,2) ⁽¹⁾	12,5
^{232}Th				^{238}U			
IAEA-375	$16,52 \pm 0,01$ (0,062%) ³	20,5 (19,2-21,9) ⁽¹⁾	19,4	IAEA-307	$12,4 \pm 2,3$ (18%) ³	14 (2,5-21) ⁽¹⁾	13
				IAEA-375	$23,7 \pm 4,4$ (18,5%) ³	24,4 (19-29,8) ⁽¹⁾	13

⁽¹⁾ Intervalo de confiança

⁽²⁾ E.R= Erro Relativo

⁽³⁾ Desvio padrão relativo

5.1.2 Concentração Mínima Detectável

A Concentração Mínima Detectável (CMD) corresponde à menor atividade que pode ser detectada em um determinado nível de confiança. O CMD foi calculado pela Equação 4 (IAEA, 1989):

$$\text{CMD} = \frac{4,66 \cdot S_B}{t \cdot \varepsilon \cdot m} \quad [4] \text{ (IAEA, 1989)}$$

em que,

S_B : desvio padrão da taxa de contagem para o branco;

t : tempo de contagem;

ε : eficiência da contagem do detector;

m : massa da amostra em kg.

Os valores de CMD obtidos para os radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U a partir das condições experimentais do presente trabalho, são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Concentração Mínima Detectável (CMD) para os radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U

Radionuclídeo	CMD (Bq kg ⁻¹)
^{40}K	25,6
^{137}Cs	1,1
^{232}Th	3,1
^{238}U	7,3

5.1.3 Atividades específicas dos radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U presentes nas amostras de cogumelos.

Foram analisadas 17 amostras de cogumelos comestíveis, incluindo as amostras adquiridas em centros comerciais e aquelas coletadas diretamente de alguns produtores.

A Tabela 5.3 mostra as atividades específicas obtidas para ^{40}K e ^{137}Cs nas amostras analisadas, expressas em Bq kg^{-1} em peso seco.

Tabela 5.3: Atividade específica de ^{40}K e ^{137}Cs em cogumelos comestíveis em peso seco

Amostra	Nome comercial	Origem	Nome científico	^{40}K (Bq kg^{-1})	^{137}Cs (Bq kg^{-1})
CCG	Champignon	São Paulo-SP	<i>Agaricus bisporus</i>	764 ± 3	$1,8 \pm 0,1$
CML	Champignon	Mogi das Cruzes-SP	<i>Agaricus bisporus</i>	743 ± 3	< CMD
CCM	Champignon	Mogi das Cruzes-SP	<i>Agaricus bisporus</i>	752 ± 3	< CMD
CAD	Blazei	São Paulo-SP	<i>Agaricus blazei</i>	860 ± 4	$1,45 \pm 0,04$
PBL	Portobello	São Paulo-SP	<i>Agaricus sp</i>	1215 ± 5	$8,6 \pm 0,3$
SPL	Shitake	São Paulo-SP	<i>Lentinula edodes</i>	813 ± 3	$1,7 \pm 0,1$
SJL	Shitake	Juquitiba – SP	<i>Lentinula edodes</i>	806 ± 3	$6,0 \pm 0,2$
SMM	Shitake	Mirandópolis-SP	<i>Lentinula edodes</i>	461 ± 2	$3,5 \pm 0,1$
SML	Shitake	Mogi das Cruzes-SP	<i>Lentinula edodes</i>	887 ± 4	$2,6 \pm 0,1$
CSD	Shitake	São Paulo-SP	<i>Lentinula edodes</i>	713 ± 3	$4,9 \pm 0,1$
CJD	Shitake	São Paulo-SP	<i>Lentinula edodes</i>	841 ± 4	$3,3 \pm 0,1$
CSE	Shimeji escuro	São Paulo-SP	<i>Pleurotus ostreatus</i>	849 ± 4	$6,7 \pm 0,2$
CHH	Hiratake	São Paulo-SP	<i>Pleurotus ostreatus</i>	703 ± 3	$3,6 \pm 0,1$
CES	Eryngui	São Paulo-SP	<i>Pleurotus eryngui</i>	797 ± 3	< CMD
CEU	Eryngui	Suzano-SP	<i>Pleurotus eryngui</i>	785 ± 3	$3,8 \pm 0,1$
CSI	Salmão	São Paulo-SP	<i>Pleurotus ostreatoroseus</i>	1535 ± 1	$10,6 \pm 0,3$
SFZ	Salmão	São Paulo-SP	<i>Pleurotus ostreatoroseus</i>	566 ± 2	$3,5 \pm 0,1$

CMD para ^{40}K : $25,6 \text{ Bq kg}^{-1}$; CMD para ^{137}Cs : $1,1 \text{ Bq kg}^{-1}$

As atividades específicas calculadas para ^{232}Th e ^{238}U a partir das amostras analisadas, expressas em Bq kg^{-1} em peso seco, podem ser observadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Atividade específica de ^{232}Th e ^{238}U em cogumelos comestíveis em peso seco

Amostra	Nome comercial	Origem	Nome científico	^{232}Th (Bq kg^{-1})	^{238}U (Bq kg^{-1})
CCG	Champignon	São Paulo-SP	<i>Agaricus bisporus</i>	$27,0 \pm 0,9$	< CMD
CML	Champignon	Mogi das Cruzes-SP	<i>Agaricus bisporus</i>	$6,2 \pm 0,2$	< CMD
CCM	Champignon	Mogi das Cruzes-SP	<i>Agaricus bisporus</i>	< CMD	< CMD
CAD	Blazei	São Paulo-SP	<i>Agaricus blazei</i>	< CMD	< CMD
PBL	Portobello	São Paulo-SP	<i>Agaricus sp</i>	$38,1 \pm 1,2$	18 ± 3
SPL	Shitake	São Paulo-SP	<i>Lentinula edodes</i>	$14,1 \pm 0,5$	14 ± 3
SJL	Shitake	Juquitiba – SP	<i>Lentinula edodes</i>	$11,3 \pm 0,4$	< CMD
SMM	Shitake	Mirandópolis-SP	<i>Lentinula edodes</i>	< CMD	< CMD
SML	Shitake	Mogi das Cruzes-SP	<i>Lentinula edodes</i>	$35,6 \pm 1,1$	23 ± 4
CSD	Shitake	São Paulo-SP	<i>Lentinula edodes</i>	$16,4 \pm 0,5$	< CMD
CJD	Shitake	São Paulo-SP	<i>Lentinula edodes</i>	< CMD	< CMD
CSE	Shimeji escuro	São Paulo-SP	<i>Pleurotus ostreatus</i>	$26,9 \pm 0,9$	24 ± 4
CHH	Hiratake	São Paulo-SP	<i>Pleurotus ostreatus</i>	$29,0 \pm 0,9$	15 ± 3
CES	Eryngui	São Paulo-SP	<i>Pleurotus eryngui</i>	$12,6 \pm 0,4$	17 ± 3
CEU	Eryngui	Suzano-SP	<i>Pleurotus eryngui</i>	$14,9 \pm 0,5$	23 ± 4
CSI	Salmão	São Paulo-SP	<i>Pleurotus ostreatoroseus</i>	$54,2 \pm 1,7$	66 ± 12
SFZ	Salmão	São Paulo-SP	<i>Pleurotus ostreatoroseus</i>	$9,7 \pm 0,3$	18 ± 3

CMD para ^{232}Th : $3,1 \text{ Bq kg}^{-1}$; CMD para ^{238}U : $7,3 \text{ Bq kg}^{-1}$

Todos os resultados obtidos para os cálculos referentes à determinação da atividade específica para os radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U nas amostras de cogumelos comestíveis, podem ser visualizadas na Figura 5.1.

Figura 5.1: Atividades específicas calculadas para os radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U nas amostras de cogumelos comestíveis

De acordo com a Figura 5.1, é possível visualizar que as atividades específicas variaram para os radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U , respectivamente: de 461 a 1535 Bq kg⁻¹ em peso seco, 1,4 a 10,6 Bq kg⁻¹ em peso seco, 6,2 a 54,2 Bq kg⁻¹ em peso seco e 14 a 66 Bq kg⁻¹ em peso seco.

5.1.4 Análise dos resultados

Segundo Santos (2007), a classificação das amostras analisadas é facilitada quando suas composições químicas são estatisticamente distinguíveis de acordo com seus perfis químicos.

Alguns estudos sugerem que a presença de radionuclídeos naturais e artificiais em amostras de cogumelos comestíveis esteja relacionada ao tipo de espécie desses organismos, assim como, formas de cultivo e influências ambientais.

Partindo desse pressuposto, os resultados obtidos foram avaliados por meio de análise de agrupamento (“*Cluster analysis*”), construção de *Box Plot* e análise discriminante.

De acordo com a análise de agrupamento (“*Cluster analysis*”), as amostras foram organizadas com base em seu grau de semelhança, com o objetivo de classificá-las em grupos, como observado na Figura 5.2.

Para que essa técnica estatística multivariada fosse aplicada, primeiramente foi estabelecida a normalização dos dados obtidos em relação às atividades específicas calculadas para os radionuclídeos de interesse. Após esse processo, para realizar o agrupamento, adotou-se a distância Euclidiana como medida de similaridade e os casos foram ligados entre si pelo método de Ward.

Figura 5.2: Dendrograma para agrupamento das amostras de cogumelos comestíveis

A partir da Figura 5.2 é possível identificar a formação de 3 grupos distintos, relacionando os casos mais semelhantes entre si; tais grupos foram identificados como G1, G2 e G3. Nas Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7, constam-se descritos os casos que compõem cada grupo e suas respectivas características.

Tabela 5.5: Casos pertencentes ao G1

AMOSTRA	ORIGEM	NOME CIENTÍFICO	^{40}K (Bq kg ⁻¹)	^{137}Cs (Bq kg ⁻¹)	^{232}Th (Bq kg ⁻¹)	^{238}U (Bq kg ⁻¹)
CCG	São Paulo-SP	<i>Agaricus bisporus</i>	764 ± 3	1,8 ± 0,1	27,0 ± 0,9	< CMD
SML	Mogi das Cruzes-SP	<i>Lentinula edodes</i>	887 ± 4	2,6 ± 0,1	35,6 ± 1,1	23 ± 4
SPL	São Paulo-SP	<i>Lentinula edodes</i>	813 ± 3	1,7 ± 0,1	14,1 ± 0,5	14 ± 3
CHH	São Paulo-SP	<i>Pleurotus ostreatus</i>	703 ± 3	3,6 ± 0,1	29,0 ± 0,9	15 ± 3
CES	São Paulo-SP	<i>Pleurotus eryngii</i>	797 ± 3	< CMD	12,6 ± 0,4	17 ± 3
CEU	Suzano-SP	<i>Pleurotus eryngii</i>	785 ± 3	3,8 ± 0,1	14,9 ± 0,5	23 ± 4

Tabela 5.6: Casos pertencentes ao G2.

AMOSTRA	ORIGEM	NOME CIENTÍFICO	^{40}K (Bq kg ⁻¹)	^{137}Cs (Bq kg ⁻¹)	^{232}Th (Bq kg ⁻¹)	^{238}U (Bq kg ⁻¹)
CML	Mogi das Cruzes-SP	<i>Agaricus bisporus</i>	743 ± 3	< CMD	6,2 ± 0,2	< CMD
CCM	Mogi das Cruzes-SP	<i>Agaricus bisporus</i>	752 ± 3	< CMD	< CMD	< CMD
CAD	São Paulo-SP	<i>Agaricus blazei</i>	860 ± 4	1,45 ± 0,04	< CMD	< CMD
CJD	São Paulo-SP	<i>Lentinula edodes</i>	841 ± 4	3,3 ± 0,1	< CMD	< CMD
SJL	São Paulo-SP	<i>Lentinula edodes</i>	806 ± 3	6,0 ± 0,2	11,3 ± 0,4	< CMD
CSD	São Paulo-SP	<i>Lentinula edodes</i>	713 ± 3	4,9 ± 0,1	< CMD	< CMD
SMM	Mirandópolis-SP	<i>Lentinula edodes</i>	461 ± 2	3,5 ± 0,1	< CMD	< CMD
SFZ	São Paulo-SP	<i>Pleurotus ostreatoroseus</i>	566 ± 2	3,5 ± 0,1	9,7 ± 0,3	18 ± 3

Tabela 5.7: Casos pertencentes ao G3.

AMOSTRA	ORIGEM	NOME CIENTÍFICO	^{40}K (Bq kg ⁻¹)	^{137}Cs (Bq kg ⁻¹)	^{232}Th (Bq kg ⁻¹)	^{238}U (Bq kg ⁻¹)
PBL	São Paulo	<i>Agaricus sp</i>	1215 ± 5	8,6 ± 0,3	38,1 ± 1,2	18 ± 3
CSE	São Paulo-SP	<i>Pleurotus ostreatus</i>	849 ± 4	6,7 ± 0,2	26,9 ± 0,9	24 ± 4
CSI	São Paulo-SP	<i>Pleurotus ostreatoroseus</i>	1535 ± 7	10,6 ± 0,3	54,2 ± 1,2	66 ± 12

Os casos incluídos no G1, demonstraram atividades específicas constantes em relação aos radionuclídeos estudados, sendo que somente uma amostra apresentou-se abaixo da concentração mínima detectável para ^{137}Cs , assim como para ^{238}U , tratando-se de amostras distintas.

Já no G2, encontram-se descritos o maior número de casos, destacando-se dos demais grupos por apresentar uma grande quantidade de amostras em que não foi possível determinar a atividade específica para os radionuclídeos pesquisados. Os radionuclídeos ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U demonstraram-se abaixo da concentração mínima detectável em 25%, 62,5% e 87,5% dos casos estudados, respectivamente. Estas proporções são superiores aos demais grupos. Em relação ao ^{40}K pode-se notar que as atividades específicas demonstraram-se constantes.

No G3, há o menor número de casos, porém esse grupo difere dos demais por apresentar amostras em que foram determinadas as mais elevadas atividades específicas para ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U .

De um modo geral, analisando a composição dos grupos, constatou-se que em todos eles pode-se encontrar mais de uma espécie de cogumelo comestível, tratando-se de

grupos heterogêneos quanto à taxonomia. Essa mesma heterogeneidade é mantida quando se observa os locais de origem das amostras. Nesse caso, a variação obtida em relação ao acúmulo dos radionuclídeos determinados pode ser atribuída diretamente à forma de cultivo, relacionada ao uso de determinados fertilizantes que influenciam significativamente no conteúdo radioativo desses organismos.

Para identificar as amostras discrepantes em cada grupo formado, G1, G2 e G3, foram feitos *Box-Plot*, observados nas Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6.

As amostras discrepantes, também chamadas de amostras atípicas ou “*outliers*”, tratam-se de dados que parecem ser divergentes em relação ao conjunto de dados remanescentes (BARNETT e LEWIS, 1995).

O *Box-Plot* é um tipo de gráfico que tem como característica principal a visualização de várias informações simultaneamente, sendo especialmente útil para mostrar a dispersão de um grupo de dados e as diferenças que existem entre esses grupos. Nesse caso, observa-se a média, o desvio padrão, os pontos discrepantes (*outliers*) e os resultados que estão dentro de um determinado intervalo.

Figura 5.3: Distribuição das atividades específicas para ^{40}K nas amostras de cogumelos comestíveis

Figura 5.4: Distribuição das atividades específicas para ^{137}Cs nas amostras de cogumelos comestíveis

Figura 5.5: Distribuição das atividades específicas para ^{232}Th nas amostras de cogumelos comestíveis

Figura 5.6: Distribuição das atividades específicas para ^{238}U nas amostras de cogumelos comestíveis

Os “outliers” apresentados nas Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 correspondem às amostras identificadas como SMM, SJL, CSD e CES respectivamente. Esses pontos

discrepantes não devem ser rejeitados, pois podem trazer informações passíveis de investigação, sugerindo possíveis erros de medição, assim como, variabilidade populacional do atributo medido, entre outros fatores.

De acordo com Santos (2007), a identificação de valores discrepantes em amostras multivariadas é de extrema dificuldade, visto que a inspeção de cada variável isolada não é suficiente para identificar uma amostra discrepante. Dessa forma, para que tais hipóteses sejam confirmadas, novas análises desses casos deveriam ser realizadas ou talvez uma maior amostragem, considerando principalmente a região de coleta, pode ser significativa para este tipo de estudo.

A fim de corroborar os resultados apresentados a partir da análise de agrupamento, também se empregou a análise discriminante dos resultados, baseando-se no método canônico. Na Figura 5.7, mostram-se os escores das funções discriminantes para as amostras de cogumelos comestíveis.

Figura 5.7: Funções discriminantes para as amostras de cogumelos comestíveis

A partir da análise discriminante, verificou-se que as amostras foram classificadas corretamente em seus respectivos grupos, indicando ainda que os grupos G1 e G2 apresentam características mais próximas do que em comparação ao G3.

5.1.5 Discussão e comparação dos resultados obtidos com dados da literatura.

As atividades específicas para ^{137}Cs variaram de 1,4 a 10,6 Bq kg⁻¹ em peso seco, estando presente em 82,3%, ou seja, 14 amostras, dentre as 17 que foram analisadas, demonstraram valores acima da concentração mínima detectável para esse radionuclídeo.

Segundo Gillet e Crout (2000), diferentes fatores controlam os níveis de ^{137}Cs em cogumelos, como por exemplo, a afinidade que algumas espécies demonstram em reter esse radionuclídeo e certas características, como a profundidade do micélio desses organismos e o substrato de cultivo, aumentando a biodisponibilidade de ^{137}Cs .

Todos os valores apresentados para ^{137}Cs mostraram-se bem inferiores aos dados reportados por Teherani (1998) na Áustria, que analisou várias espécies de cogumelos um ano após o acidente de Chernobyl, obtendo como resposta à análise, uma concentração de atividade que variou de 18 a 3852 Bq kg⁻¹.

Resultados, em relação às atividades obtidas para ^{137}Cs , em amostras de cogumelos selvagens e comestíveis provenientes de outros países, são observados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Atividades de ^{137}Cs em amostras de cogumelos provenientes de outros países

Referência	Tipo de amostra	Atividade (Bq kg^{-1}) em peso seco	Origem
Este trabalho	comestível	1,4 a 10,6	São Paulo – Brasil
Vaszari, e col., 1992	selvagem	3 a 714	Hungria
Yoshida e col., 1994	selvagem	2 a 16000	Japão
Kirchner, e col., 1998	selvagem	2,5 a 2763	França
Gasó, e col., 2000	selvagem	0,2 a 91	México
Marzano, e col., 2001	comestível	2 a 732	Itália
Kuwahara, e col., 2004	selvagem	291 a 7950	Monte Fuji – Japão
Baeza, e col., 2004	comestível	0,61 a 121,7	Espanha
Malinowska, e col, 2006	comestível	330 a 6670	Polônia

A partir da Tabela 5.8, nota-se que os valores de atividades específicas máximas obtidas, em amostras oriundas de outros países, são muito superiores às encontradas neste trabalho.

Essa variação está relacionada diretamente ao fato do “*fallout*” total de ^{137}Cs no hemisfério Norte ser maior que no hemisfério Sul, devido às quantidades de testes nucleares e eventos locais, como o acidente de Chernobyl (MELQUIADES, 2000).

No entanto, de acordo com a revisão da literatura realizada por Martine e Mary (2008), em relação ao acúmulo de ^{137}Cs por cogumelos, não devem ser desconsideradas as espécies desses organismos, pois embora muitas delas tenham capacidade de reter esse radionuclídeo, vários tipos de cogumelos apresentam pouca afinidade em concentrar ^{137}Cs . Destacando que essas informações são independentes do fato dos cogumelos terem sido amostrados antes ou depois de acidentes nucleares, como o de Chernobyl.

Alguns cogumelos, que não apresentam grande propensão em reter esse radionuclídeo, pertencem ao gênero: *Agaricus sp*, *Corioulos sp*, *Asterophora sp* e

Pycnoporus sp. Dentre os gêneros citados, somente o *Agaricus* é comercializado no Brasil e, de acordo com os resultados apresentados, esse gênero está incluso entre as amostras que apresentaram as menores atividades específicas para ^{137}Cs .

Em relação à ocorrência de ^{40}K nas amostras analisadas, os resultados demonstraram que esse radionuclídeo natural esteve presente em todas as espécies de cogumelos comestíveis analisados, sendo que os valores variaram de 461 a 1535 Bq kg⁻¹ peso seco.

Em contraste à baixa concentração radioativa de ^{137}Cs , comparada às amostras de cogumelos de outros países, os valores para ^{40}K estão de acordo com os obtidos por Wang e col. (1998), em Taiwan, em que as atividades encontradas variaram entre <50 a 1230 Bq kg⁻¹ em peso seco. Outras referências das atividades de ^{40}K , em cogumelos, são apresentadas na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Atividades de ^{40}K em amostras de cogumelos provenientes de outros países

Referência	Tipo de amostra	Atividade (Bq kg ⁻¹) em peso seco	Origem
Este trabalho	comestível	461 a 1535	São Paulo – Brasil
Muramatsu, e col., 1991	comestível	109 a 1460	Japão
Vaszari, e col., 1992	selvagem	704 a 2234	Hungria
Gaso, e col., 2000	selvagem	18 a 257	México
Kuwahara, e col., 2004	selvagem	999 a 2670	Monte Fuji – Japão
Baeza e col., 2005	selvagem	468 a 2670	Espanha
Malinowska, e col., 2006	comestível	180 a 1520	Polônia

Esse e outros estudos parecem indicar que a incorporação do potássio estável e, por conseguinte, do ^{40}K , é auto-regulado pelo fungo como requisito fisiológico, enquanto que,

em oposição ao ^{40}K , o conteúdo de ^{137}Cs não é auto-regulado pelo fungo (MALINOWSKA e col., 2005). Kuwahara e col. (2004), propuseram que as variações encontradas em relação às atividades de ^{40}K em cogumelos estão relacionadas à geologia local, formas de cultivo, uso de fertilizantes, idades da cultura, entre outros fatores.

Comparando o maior valor encontrado, neste estudo, para a atividade do ^{137}Cs , que é de $10,6 \pm 0,3 \text{ Bq kg}^{-1}$ em peso seco com o nível máximo permitido pela portaria regulatória 3.01/006 estabelecida pela CNEN (2005), de 1 KBq kg^{-1} para alimentos em geral, assim como os níveis de ^{40}K encontrados estão de acordo com valores apresentados em estudos realizados em outros países, pode-se afirmar que os cogumelos analisados não apresentam riscos para seus consumidores, além do fato de que o consumo desse tipo de alimento é pequeno em termos de percentagem da dieta da população local. Porém, é necessário sempre estabelecer controles da concentração de ^{137}Cs não somente em cogumelos, mas também em outros alimentos, como: carne, leite, frutos, etc. Em se tratando do ^{40}K , que é uniformemente distribuído no organismo e está sob controle homeostático, é menos perigoso para a saúde humana do que o ^{137}Cs .

Quanto à estimativa da atividade específica para ^{238}U , foi possível determiná-la em aproximadamente 53% das amostras. As atividades específicas calculadas, para esse radionuclídeo, nos cogumelos variaram entre 14 e 66 Bq kg^{-1} em peso seco. Os valores encontrados são superiores aos reportados por Baeza e col. (2005), na Espanha, em amostras de cogumelos selvagens, sendo que a atividade encontrada variou entre 0,81 e 7 Bq kg^{-1} em peso seco. Porém, quando comparado a valores relacionados a outros gêneros alimentícios como, por exemplo, em ervas, analisadas por Harb (2006) no Egito, a atividade de ^{238}U calculada variou de 4,6 a $25,1 \text{ Bq kg}^{-1}$ em peso seco, demonstrando-se

próxima aos níveis apresentados no presente trabalho. Os valores deste trabalho também se apresentam constantes em relação aos reportados por Jibiri e col. (2007), na Nigéria, que pesquisaram a presença desse radionuclídeo natural em diversos gêneros alimentícios, tais como: mandioca, batata doce, batata irlandesa, tomate, soja e amendoim, e as atividades específicas variaram de 4,5 a 32,1 Bq kg⁻¹ em peso seco.

Já as atividades específicas estimadas para ²³²Th, neste trabalho, variaram de 6,2 a 54,2 Bq kg⁻¹ em peso seco, sendo que os valores acima da concentração mínima detectável foram descritos em aproximadamente 76,4% das amostras analisadas.

Baeza e col. (2005), analisaram cogumelos em duas regiões da Espanha, Muñoveros e Bazagona. Na primeira região, estudaram 5 espécies distintas e os valores das atividades específicas para ²³²Th variaram de 1,44 a 11,1 Bq kg⁻¹ em peso seco, enquanto que dentre as 3 espécies analisadas, na segunda região de estudo, os resultados variaram de 1,07 e 6,7 Bq kg⁻¹. Os valores máximos encontrados por esses autores são bem inferiores, quando comparados aos valores máximos estimados no presente trabalho. Assim como, quando se faz a comparação entre as atividades específicas estimadas para ²³²Th em ervas, por Harb (2006), que variaram de 1 a 4,8 Bq kg⁻¹ peso seco. Porém, os valores estimados em cogumelos para esse radionuclídeo, apresentam-se constantes quando comparados aos estimados por Jibiri e col. (2007) em determinadas espécies vegetais, sendo que variaram de 9,8 a 35,6 Bq kg⁻¹.

Como não existem muitos trabalhos, na literatura, atualmente, relacionados ao conteúdo de ²³²Th e ²³⁸U em cogumelos, não foi possível fazer uma comparação mais abrangente das atividades específicas estimadas no presente trabalho, com valores reportados em outros estudos.

Conforme Baeza e col. (2005), as análises relacionadas ao conteúdo radioativo em cogumelos estão centradas principalmente na contaminação por ^{137}Cs e, por essa razão, outros radionuclídeos como Urânio e Tório, em particular, têm sido menos estudados.

De um modo geral, para entender a relação entre as radioatividades observadas em cogumelos, é muito importante enfatizar a relação do solo com esse organismo, uma vez que a precipitação, altitude e condições meteorológicas exercem uma importante influência na deposição dos radionuclídeos no solo; normalmente, todo o “*fallout*” é depositado nesse compartimento terrestre. Assim, parte do material radioativo transportado pela água da chuva é absorvido pela terra e utilizado pelo micélio durante a absorção de sais minerais, esses componentes radioativos não são completamente eliminados por qualquer lavagem ou fervura dos cogumelos. Dessa forma, as propriedades físico-químicas dos solos (pH, minerais argilosos, turfa, etc) assumem um grande significado no modo em que o radionuclídeo é absorvido (BATTISTON, 1989).

No Brasil, especificamente, Malanca e col. (1993) estudaram a radiação natural em solos provenientes do estado do Rio Grande do Norte, onde a atividade específica média para ^{40}K e ^{232}Th foi de 677 e 46,6 Bq kg⁻¹, respectivamente. Ainda no Brasil, em uma região do estado de Pernambuco, Silveira e col. (2007) estimaram a variação da atividade específica para ^{232}Th entre 93 e 97 Bq kg⁻¹.

De acordo com a UNSCEAR (1988), a média global para as atividades específicas dos radionuclídeos no solo para ^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U é de 370 Bq kg⁻¹, 25 Bq kg⁻¹ e 25 Bq kg⁻¹, respectivamente.

Dessa forma, cria-se a possibilidade de se realizar pesquisas futuras, que envolvam não somente o conteúdo radioativo nos cogumelos, mas também no solo ou em qualquer outro substrato de desenvolvimento desses organismos; de modo a determinar o fator de

transferência de radionuclídeos do meio de cultivo para o cogumelo, relacionando a sua forma de nutrição, uma vez que o sistema nutricional também pode ser um fator determinante para a absorção de contaminantes pelos cogumelos. Porém, trata-se de um sistema altamente complexo.

Em síntese, as espécies são subdivididas em saprófitas ou parasitas, absorvendo nutrientes via superfície do micélio. Portanto, ao comportamento metabólico dos cogumelos associado às características geológicas, pode ser atribuída a responsabilidade pelas atividades dos radionuclídeos observadas nesses organismos.

CAPÍTULO 6

6.1 Conclusão

O método de análise por espectrometria gama empregado, neste estudo, demonstrou-se adequado para determinar as atividades específicas de ^{40}K e ^{137}Cs e estimá-las para ^{232}Th e ^{238}U , sendo corroborado pela precisão e exatidão da técnica demonstrada por meio dos resultados obtidos nos materiais de referência certificados, uma vez que os valores de desvio padrão relativo variaram de 0,062% a 18,5% enquanto os valores de erro relativo variaram de 0,7 a 19,4%

Esse fato consolida o uso da espectrometria gama para medir a concentração de radionuclídeos em cogumelos como uma técnica bastante adequada. A utilização do detector de germânio hiperpuro foi ideal para a identificação das linhas de emissão da radiação gama, tanto para radionuclídeos naturais como para o radionuclídeo de origem antropogênica.

As atividades encontradas para os radionuclídeos ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U , nos cogumelos comestíveis, variaram, respectivamente, entre 461 a 1535 Bq kg⁻¹ em peso seco, 1,4 a 10,6 Bq kg⁻¹ em peso seco, 6,2 a 54,2 Bq kg⁻¹ em peso seco e 14 a 66 Bq kg⁻¹ em peso seco.

Os valores referentes ao ^{40}K demonstraram-se dentro da mesma ordem de grandeza dos dados publicados na literatura, enquanto que as atividades específicas para ^{137}Cs apresentaram-se inferiores em relação às amostras de cogumelos de outras regiões do mundo, como de países do hemisfério Norte, comprovando a influência do “*fallout*” radioativo. Já quanto aos dados quantitativos relacionados ao ^{232}Th e ^{238}U , poucas são as referências sobre

cogumelos comestíveis citadas na literatura impossibilitando, assim, comparações. Porém, quando comparados a outros gêneros alimentícios, os valores apresentaram-se aproximadamente constantes.

Todos os valores apresentados para as atividades específicas em relação a ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th e ^{238}U são inéditos em cogumelos comestíveis cultivados no Brasil.

Desse modo, cria-se a perspectiva de novos estudos que obtenham dados em relação ao substrato de cultivo, a fim de estabelecer fatores de transferência para que se compreenda mais amplamente o comportamento desses radionuclídeos.

As atividades específicas obtidas para o radionuclídeo ^{137}Cs , presentes nos cogumelos comestíveis pesquisados, estão abaixo dos limites máximos estabelecidos pela portaria regulatória 3.01/006 estabelecida pela CNEN, para alimentos em geral. Já para os radionuclídeos naturais, não existem valores estabelecidos nessa portaria, porém, em comparação aos valores reportados na literatura, pode-se concluir que os cogumelos não oferecem riscos à saúde humana em relação à presença desses radionuclídeos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJOS, R. M.; FACURE, A. ; DAMASIO, K. C.; MACARIO, E. M.;YOSHIMURA, J. A.;BRAGE,P.; TERRA, E. M.; TOMPAKOW, H.; GOMES, P. R. S.;ALHANATI, C. E.; CARDOSO, S. N. M.;SANTORO, M. D. N. The Study of Goiânia Radiological Accident in the Modern Physics Teaching”, **Rev. Bras. de Ensino de Física**, v22, p. 60-68, 2000.

BAEZA, A.; HERNÁNDEZ, S.; GUILLÉN, J. F.; MORENO, G.; MANJÓN, L. J.; PASCUAL, R. Radiocesium and natural gamma emitters in mushrooms collected in Spain. **Sci.Total Environ.**, v.318, p. 59-71, 2004.

BAEZA, A.; GUILLÉN, J.; BERNEDO, J.M. Soil-fungi transfer coefficients: Importance of the location of mycelium in soil and of the differential availability of radionuclides in soil fractions. **J.Environ.Radioact.** v.81, n.1, p. 89-106, 2005.

BAILEY, R. A.; CLARK, H. M.; FERRIS, J. P.; KRAUSE, S.; STRONG, R. L. **Chemistry of the environment**. Academic Press, London, 1978.

BAIRD, C. **Química ambiental**. 2ªed. Bookman, Porto Alegre-RS, 2002.

BANIK, S.; NANDI, R. Effect of supplementation of rice straw with biogas residual slurry manure on the yield, protein and mineral contents of oyster mushrooms. **Industrial crops and products**, v.20, n.3, p. 311-319, 2004.

BARNETT, V.; LEWIS T. **Outliers in statistical data**. Chichester: Joh Wiley, p. 584, 1995.

BATTISTON, G. A.; DEGETTO, S.; GERBASI, R.; SBRIGNADELLO, G. Radioactivity in mushrooms in northeast Italy following the chernobyl accident. **J.Environ.Radioact.**, v.9, n.1, p.53-60, 1989.

BIELLI, E. **El gran libro de las setas**. 1ªed. Editorial Planeta, Barcelona, Espanha,1998.

BONONI, V. L.; CAPELARI, M.; MAZIERO, R.; TRUFEN, S.F.B. **Cultivo de cogumelos comestíveis**. 2ªed. Editora Ícone, São Paulo, Brasil, 1999.

BRADY, C. N. **Natureza e propriedade dos solos**. 7ªed. Freitas Bastos, Rio de Janeiro, 1989.

BREENE, W.M. Nutritional and medicinal value of specialty mushrooms. **J. Food Protec.**, v.53, n.10, p. 883-894, 1990.

BUENO, L. **Análise de radionuclídeos naturais e chumbo em produtos alimentícios e dietas**. 1999. Tese (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

BURCHAM, E. M. *Física nuclear*. 1ª ed. Editorial Reverti S.A, 1974.

CNEN-PR-3.01/006. Medidas de proteção e critérios de intervenção em situações de emergência. Nov. 2005.

COUTINHO, L.N. Cultivo de espécies de cogumelo comestíveis.

Disponível em: <http://www.geocities.com/esabio.geo/cogumelo/agaricus.htm> Acesso em: 04 out. 2007.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Cogumelos Comestíveis e medicinais serão tema de exposição da Embrapa em feira de botânica. Brasília, 2005. Disponível em:

<http://www.portaldoagronegocio.com.br/index.php?p=noticia&&edN=4895> .Acesso em: 05 abr. 2006.

EG&ORTEC. Maestro II software model A64-BI operator's manual. USA, 1992.

EISENBUD, M. *Environmental radioactivity: from natural, industrial and military sources*. 3ª ed. New York: Academic Press, INC.; 1987.

FAO- Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Disponível em:

<http://faostat.fao.org/faostat/gorm?collection=Production.crops.primary&Domain=production&servlet=1&hasbulk=&version=ext&language=EN>. Acesso em: 05 abr. 2006.

FIGUEIRA, R. C.; SILVA, L. R. N.; FIGUEIREDO, A. M. G.; CUNHA, I. I. L. "Instrumental analysis by gamma spectrometry of low level Cs-137 in marine sample. In: Goiânia, Ten Years later." *IAEA*, p.239 –327,1998.

FIGUEIRA, R. C. L. *Inventário de radionuclídeos artificiais em água do mar e sedimentos da costa sul do Brasil*. 2000. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

FURLANI, R. P. Z.; GODOY, H. T. Valor nutricional de cogumelos comestíveis. **Cienc. Tecnol. Aliment.**, v.27, n.1, p. 154-157, 2007.

GASO, M. I.; SEGOVIA, N.; MORTON, O.; CERVANTES, M. L.; GODINEZ, L.; PEÑA, P.; ACOSTA, E. ¹³⁷Cs and relationships with major and trace elements in edible mushrooms from México. *Sci. Total. Environ.*, v.262 (1-2), p.73-89, 2000.

GILLET, A.G.; CROUT, N.M.J. A review of ¹³⁷Cs transfer to fungi and consequences for modelling environmental transfer. *J.Environ.Radioact.*, v.48, n.1, p. 95-121, 2000.

GIOVANI, C.; NIMIS, P. L.; PADOVANI, R. Investigation of the performance of macromycetes as bioindicators of radioactive contamination. In “ *Transfer of Radionuclides in Natural and Semi – natural Environments*,” Desmet, Nassimbei and Belli, Eds, p. 485-491, Elsevier, London, 1990.

HARB, S. Measurement of the radioactivity of ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{228}Th , ^{232}Th , ^{228}Ra , ^{137}Cs and ^{40}K in tea using gamma-spectrometry. *J.Radional. Nucl.Chem.*, v.274, n.1, p. 63-66, 2006.

IAEA- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Measurement of radionuclides in food and in the environment*. Technical Reports Series n° 295, IAEA, Vienna, 1989

IAEA- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Report on the intercomparasion of IAEA-307. Radionuclides in a sea plant*. 1989.

IAEA- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Reference sheet, reference material, IAEA-300. Radionuclides in baltic sea sediment, 2000*.

IAEA- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Reference sheet, reference material, IAEA-375. Radionuclides and trace elements in soil, 2000*.

IAEA- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Reference sheet, reference material, IAEA-327. Radionuclides in soil, 2001*.

IAEA- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Guideline for radioelement mapping using gamma ray spectrometry*. TEC. DOC. 1363, 2003.

IAEA- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Report on the worldwide intercomparison, IAEA- 414. Radionuclides in mixed fish from Irish Sea and the North Sea*, 2004.

IAEA- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Report proficiency test exercise on determintation of natural levels of radionuclides mushroom reference material*, 2006.

INGARO, G.; BWLLONI, P.; SANTARONI, G. P. Mushrooms as biological monitors of trace elements in the environment. *J.Radional. Nucl.Chem.*, v.161, n.1, p.113-120, 1992.

ISHIGURO, Y. *A energia nuclear para o Brasil*. São Paulo, Makron Books; 2002.

JANSON, L. M.; KUTTI, L. Micronutrients in edible mushrooms. *Human Nut.* v.5, p.1-8. 2004.

JAWROWSKI, Z.; KOWNACKA, L. Tropospheric and stratospheric distribution of radioactive iodine and cesium after Chernobyl accident. *J.Environ.Radioact.*, v.6, n.2, p. 145-150, 1988.

JIBIRI, N. N.; FARAI, I. P.; ALAUSA, S. K. Estimation of annual effective dose due to natural radioactive elements in ingestion of foodstuffs in tin mining area of Jos-Plateau, Nigeria. *J.Environ.Radioact.*, v. 94, n.1, p. 31-40, 2007.

KALAC, P.; SVOBODA, L.; A review of trace element concentrations in edible mushrooms. *Food Chem.* v.69, p.273-281, 1999.

KAMMERER, L.; HIERSCHE, L.; WIRTH, E. Uptake of radiocesium by different species of mushrooms. *J.Environ.Radioact.*, v.23, n.2, p. 135-140, 1994.

KAPLAN, I. **Nuclear Physics**, Addison – Wesley Publishing Comp., Inc., 1963.

KEIZER, G. J., *La enciclopedia de las setas*. 1.ed. Madrid: LIBSA, 2001.

KELLER, C. *Radioquímica*. Recife: Universitária, 1981. Tradução de: Radiochemie.

KNOLL, G.F. *Radiation detection and measurement*. New York: Editora John Wiley & Sons; 1999

KIRCHNER, G.; DAILLANT, O. Accumulation of ^{210}Pb , ^{226}Ra and radioactive cesium by fungi. *Sci.Total Environ.*, v. 222, p.63-70, 1998.

KRANE, K.S. *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley & Sons, Inc., 845p., USA, 1988.

KUWAHARA, C.; FUKUMOTO, A.; OHSONE, A., N.. FURUYA, H.; SHIBTA, H. SUGIYAMA, KATO, F. Accumulation of radiocesium in wild mushrooms collected from a Japanese Forest and cesium uptake by microorganisms isolated from the mushroom-growing soils. *Sci.Total Environ.*, v.345, n.1-3, p.165-173, 2004.

MALANCA, A.; GIDOLFI, L.; PESSINA, V.; DALLARA, G. Distribution of ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K in soils of Rio Grande do Norte (Brazil). *J.Environ.Radioact.* v.30, n.1, p. 55-67, 1996

MALINOWSKA, E.; SZEFER, P.; BOJANOWSKI, R. Radionuclides content in *Xerocomus badius* and other commercial mushrooms from several regions of Poland. *Food Chem.*, v. 97, p. 19-24, 2006.

MANZI, P.; GAMBELLI, L.; MARCONI, S.; VIVANTI, V.; PIZZOFERRATO, L. Nutrients in edible mushrooms an interspecies comparative study. *Food chemistry*, v. 65, n.4, p. 477-482, 1999.

MARTINE, C. D.; MARY, L. R. Accumulation of radiocesium by mushrooms in the environment: a literature review. *J.Environ.Radioact.* V.xx, p. 1- 21, 2008.

MARZANO, F. N.; BRACCHI, P. G.; PIZZETTI, P. Radioactive and conventional Pollutants accumulated by edible mushrooms (*Boletus sp*) are useful indicators of species origin. *Environ. Res.*, v. 85, n.3, p. 260-264, 2001.

MAZZILLI, B. P.; SILVA, P. S. C. ; NISTI, M. B. . Enhancement of natural radioactivity in the surrounding of a phosphate fertilizer complex in Santos basin, Brazil. IN: Radioprotection Colloques, França, v. 37, n. C1, p. 795-799, 2002.

MELQUIADES, F. L. **Medida de traços radioativos em amostras de leite em pó da região de Londrina-PR**, 2000. Tese (mestrado) – Universidade Estadual de Londrina.

MELQUIADES, F. L.; APPOLONI, C. R. Natural radiation levels in powdered milk samples. *Ciênc.Tecnol.Aliment.*, v. 24 , n° 4, p.501-504 , 2004.

MOSQUERA, B.; CARVALHO, C. ; VEIGA, R. ; MANGIA, L. ; ANJOS, R.M. ^{137}Cs and ^{40}K distribution in tropical fruit trees. In: XXVII Reunião de Trabalho Sobre Física Nuclear no Brasil, 2004, Santos. Proceedings da XXVII Reunião de Trabalho Sobre Física Nuclear no Brasil., v. 1. p. 30, 2004.

MURAMATSU, Y.; YOSHIDA, S.; SUMIYA, M. Concentration of radiocesium and potassium in basidiomycetes collected in Japan. . *Sci.Total Environ.* v.105, p. 29-39, 1991.

PIERO, R. M. D. **Potencial dos cogumelos *Lentinula edodes* (Shiitake) e *Agaricus blazei* (cogumelo-do-sol) no controle de doenças em plantas de pepino, maracujá e tomate, e a purificação parcial de compostos biologicamente ativos**, 2003. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ).

PIETRZAK-FLIS, Z.; RADWAN, I.; ROSEAK, L.; WIRTH, E. Migration of ^{137}Cs in soils and its transfer to mushrooms and vascular plants in mixed forest. *Sci.Total Environ.* v.186, p. 243-259, 1996.

RAHMAN, A.; SIDDIQUE, N., AHMAD, S.;ROSSWBACH, M. Report on the proficiency tests exercise for radionuclides in mushroom reference material” – *Prepared for IAEA under IAEA Interregional Project INT/1/054*, 2006.

RAIGAU, A. **Cultivo de cogumelos e trufas**. 1ª ed. Porto Alegre. Editorial Presença, 1980. p.139.

RIVAS, M. D. C. Interactions between soil uranium contamination and fertilization with N, P and S on the uranium content and uptake of corn, sunflower and beans, and soil microbiological parameters. FAL Agricultural Research enter of Germany Journal. 2005; Special Issue. Disponível em:

www.fal.de/.../ibf_sh_287_en.templateID=raw,property=publicationFile.pdf/Ibf_sh_287_en.pdf. Acesso em: 14 dez. 2007.

RUHM, W.; KAMMERE, L.; HIERSCHE, L.; WIRTH, E. The $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$ ratio in fungi as indicator of the major mycelium location in forest soil. *J. Environ. Radioact.*, v. 35, n.2, p.129-148, 1997.

SANCHEZ, M.; LANDSBERGER, S.; BRAISTED, J.; Evaluation of ^{40}K en food by determining total potassium using neutron activation analysis. *J. Radional. Nucl. Chem.*, v.269, n°2, p. 487-490, 2006.

SANTOS, J. O. **Estudos arqueométricos de sítios arqueológicos do baixo São Francisco**, 2007. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

SILVEIRA, P. B.; GENEZINI, F. A.; HONORATO, E.V.; HAZIN, C. A.; FARIAS, E.E.; BELO, M.T.; LIRA, M. Natural radionuclides in grapes and wine of the Valley of São Francisco-PE. In: International Nuclear Conference . ISBN: 978-85-99141-02-1, 2007.

SPODATTO, C. A. Indicador de impacto ambiental. *Committee of Environment. Brazilian Society of the Science of the Harmful Plants*.

Disponível em: <http://www.cnpma.embrapa.br/herbicidas/> Acesso em: 15 set. 2007.

STURION, G. L.; OETTERER, M. Composição química de cogumelos comestíveis (*Pleurotus* spp) originados de cultivos em diferentes substratos. *Ciênci. Tecnol aliment.*, v.15, n.2, p. 189-193, 1995.

SUGIYAMA, H.; TERADA, H.; SHIBATA, Y. M.; KATO, F. Radiocesio concentration in wild mushrooms and characteristics of cesium accumulation by the edible mushrooms (*Pleurotus ostreatus*). *J. Health Sc.*, v. 46 n.5, p. 370-375, 2000.

TEHERANI, D. K. Determination of ^{137}Cs and ^{134}Cs radioisotopes in various mushrooms from Austria one year after the Chernobyl incident. *J. Radional. Nucl. Chem.*, v.126, n.6, p. 401-406, 1988.

UMISEDIO, N. K. **Dose de radiação ionizante decorrente do uso de fertilizantes agrícolas**, 2007. Tese (doutorado) – Universidade de São Paulo- Faculdade de Saúde Pública.

UNSCEAR – United Nations Scientific Comitee on the Effects of atomic Radiation. *Sources, effects and risks of ionizing radiation*. New York, 1988.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of atomic Radiation. *Effects of atomic radiation to the general assembly*, 1993.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of atomic Radiation. *Sources and effects of ionizing radiation*. Vienna; v.1, 2000.

USEPA – [homepage na internet]. United States Environmental Protection Agency Radiation Information; 2006. acesso em 14 set 2007

Disponível em: <http://www.epa.gov/radiation/radionuclides> Acesso em: 14 set. 2007.

URBEN, A. F.; OLIVEIRA, H. C. B.; VIEIRA, W.; CORREIA, M. J.; URIARTT, A. H. **Produção de cogumelos por meio da tecnologia chinesa modificada**. Brasília: Embrapa, p.151, 2001.

VASZARI, E. E.; TÓTH, V.; TARJÁN, S. Determination of radioactivities of some species of higher fungi. *J. Radioanal. Nucl. Chem*, v.65, n. 6, p. 345-350, 1992.

VENDRAME, A. C. **Níveis de ^{137}Cs em colunas sedimentares da Baía do Almirantado, Península Antártica**, 2007. Tese (mestrado) – Universidade Cruzeiro do Sul.

VILELA, P. S. Cogumelos - mercado e comercialização.

Disponível em: <www.faeng.org.br/content.aspx?code=353&parentpath=none;13>.

Acesso em: 24 jan. 2007.

YOSHIDA S, MURAMATSU Y, OGAWA M. Radiocesium concentrations in mushrooms collected in Japan. *J. Environ. Radioact.*, v.22, p. 141-154, 1994.

WANG, J. J.; WANG, C. J.; LAIAND, S. Y., LIN, Y. M. Radioactivity Concentrations of ^{137}Cs and ^{40}K in Basidiomycetes Collected in Taiwan. *Appl. Radiat. Isot.* v.49 p. 29-34, 1998.