

Estimação da dose de radiação por incorporação de Pb-210 nos ossos de habitantes de Recife/Pernambuco, Brasil

C. E. O. Costa Júnior¹; E. B. Silva^{1,2}; C. M. SILVA³; J. A. Santos Júnior⁴

¹Departamento de Energia Nuclear/Grupo de Radioproteção e Radioecologia, UFPE, 50.740-540, Recife-PE, Brasil

² Centro Acadêmico de Vitória, UFPE, 50.010-921, Vitória de Santo Antão-PE, Brasil

³ Departamento de Matemática/UPE, 50.720-001, Recife-PE, Brasil

⁴Departamento de Energia Nuclear/Grupo de Radioecologia, UFPE, 50.740-540, Recife-PE, Brasil

oliveiracosta@msn.com;

(Recebido em 29 de março de 2013; aceito em 15 de julho de 2013)

O ^{210}Pb é um elemento distribuído naturalmente no ambiente e quando inalado e/ou ingerido pode ser depositado nos ossos, causando várias doenças, inclusive o câncer. O estudo deste elemento é importante do ponto de vista de proteção radiológica por sua contribuição para o aumento da dose interna recebida pelo homem. Contudo, são escassos os trabalhos que utilizam a concentração de ^{210}Pb em urina humana, para estimativa de dose. Assim, o objetivo dessa pesquisa foi estimar a dose de radiação por incorporação de ^{210}Pb nos ossos de habitantes de Recife (PE-Brasil). Para isso, a urina de 11 voluntários saudáveis e não fumantes foi coletada por 24 horas, para determinação da concentração de ^{210}Pb . As amostras foram coletadas seguindo os procedimentos adotados pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria. O ^{210}Pb foi separado através da técnica da resina trocadora de íons. Nesse processo, o ^{210}Pb foi precipitado sob a forma de PbCrO_4 , cuja mensuração foi obtidas por meio de um detector proporcional de fluxo contínuo, Tennelec S5E da Canberra®. Para estimar a dose de radiação nos ossos foram adotados os valores de atividade de retenção e excreção sugeridos pela IAEA-37. Com base na variação da concentração de ^{210}Pb obtida nas amostras de urina (82 a 712 mBq.L^{-1}) foi estimada uma dose anual máxima de 2,15 nSv.a^{-1} nos ossos da população de Recife foi. Este valor está muito abaixo do limite médio anual de dose recomendado para indivíduos do público, que corresponde a 1 mSv.a^{-1} , não representando risco radiológico para a população estudada.

Palavras-chave: Urina, radionuclídeos naturais, ossos.

Radiation dose estimation due Pb-210 incorporation in inhabitants from Recife/PE, Brazil

^{210}Pb is an element widely distributed in the environment and when it is ingested by humans through air, water and food can cause various diseases including cancer because it is deposited in bones. Studies about assessment of the dose due to incorporation of ^{210}Pb using the urine samples of volunteers from Recife are scarce. Thus, the purpose of this research was to estimate the radiation dose in bones of inhabitants from Recife (PE-Brazil) by incorporation of this radionuclide. For this, the concentration of ^{210}Pb present in urine samples was determined from 11 healthy and nonsmoker subjects. The urine samples were collected for a period of 24 hours following the procedures adopted by Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Pb-210 was separated by ion exchange resin technique. In this method, the ^{210}Pb was precipitated in form of PbCrO_4 followed by beta counting, which were conducted in a Canberra Tennelec S5E detector. To estimate radiation dose in bones it was adopted values of retention and excretion of activity from IAEA-37. Concentrations of ^{210}Pb in the urine samples of inhabitants from Recife varied from 82 to 712 mBq.l^{-1} . The maximum annual dose estimated in bones for individuals from Recife was about 2.15 nSv.y^{-1} . This value is below from the recommended dose limit for member of the general public, which corresponding to 1 mSv.a^{-1} , representing a negligible risk for the population studied.

Keywords: Urine, natural radionuclides, bones.

1. INTRODUÇÃO

O ^{210}Pb é um emissor beta, com meia-vida de aproximadamente 22 anos, sendo produto da série radioativa do ^{238}U . Na natureza, sua ocorrência deve-se à deposição atmosférica em consequência do decaimento do ^{222}Rn , bem como devido à lixiviação das rochas e sedimentos que contêm urânio^{1,2}. As atividades antropogênicas que envolvem eliminação de resíduos ricos

em ^{210}Pb no ambiente constituem uma fonte artificial deste radioisótopo ¹. Em virtude desses fatores pode-se encontrar o ^{210}Pb em praticamente todos os compartimentos do ecossistema. Este radionuclídeo entra na cadeia alimentar do homem através da ingestão de alimentos e do consumo de água ^{2,3}.

Estudos em água potável têm demonstrado uma grande variedade na concentração de ^{210}Pb . Por exemplo, nas águas minerais da região de Poços de Caldas (Minas Gerais, Brasil) foram encontrados teores que variaram de 3,5 a 780 mBq.L^{-1} ⁴. Estudos realizados em águas de abastecimento da região metropolitana do Recife encontraram valores de ^{210}Pb de 26 a 691 mBq.L^{-1} , em recursos hídricos subterrâneos, e de 137 a 1066 mBq.L^{-1} em recursos hídricos superficiais ⁵.

Quando ingerido, o ^{210}Pb tem afinidade por órgãos densos como fígado e ossos ^{2,6}. Pesquisas indicam que aproximadamente 22% do ^{210}Pb presente na corrente sanguínea depositam-se preferencialmente nos ossos trabeculares e corticais ⁶. No esqueleto, a cadeia de decaimento ^{210}Pb - ^{210}Bi - ^{210}Po , contribui significativamente para o aumento da dose interna em seres humanos ⁷.

A acumulação do ^{210}Pb nos ossos ocorre através de troca iônica entre o Pb^{+2} e o Ca^{+2} , devido a similaridade bioquímica do chumbo com o cálcio no corpo ⁸. Estimativas apontam que 50% do ^{210}Po resultante do decaimento do ^{210}Pb é transferido para os ossos ⁹, e uma das principais consequências desse processo é o dano na estrutura óssea por emissão de partículas alfa. Estudos realizados nos ossos de pessoas ocupacionalmente não expostas evidenciaram que a presença de injúrias malignas (p.ex. o sarcoma ósseo e o carcinoma renal) nessa região pode ser resultado das emissões liberadas no decaimento do ^{210}Pb para o ^{210}Po ¹⁰.

Estimar a dose de radiação absorvida é um importante passo para avaliar os riscos associados à incorporação do ^{210}Pb no esqueleto humano. As seguintes considerações devem ser observadas na dosimetria deste elemento: i) O ^{210}Pb decai para o ^{210}Bi pela emissão de uma partícula beta com energia média de 4 keV; ii) O ^{210}Bi produz ^{210}Po , quando outras partículas beta são emitidas com energia média de 0,4 MeV; iii) Por sua vez o ^{210}Po , último radionuclídeo gerado pela cadeia de decaimento radioativo do ^{238}U , emite uma partícula alfa de aproximadamente 5,3 MeV de energia.

A energia máxima emitida pela partícula beta liberada no decaimento é de 17 keV, porém apenas 1% da energia emitida é depositada na medula óssea vermelha. Já a energia máxima da radiação beta emitida pelo ^{210}Bi , é de 1,2 MeV, onde somente 17% dessa energia é absorvida pela medula óssea vermelha. Por outro lado, 90 a 95% da energia de 5,3 MeV resultante o decaimento alfa do ^{210}Po é depositada na medula óssea vermelha o que contribui consequentemente com maior dose recebida pela medula óssea vermelha ⁸. Assim, para os padrões dosimétricos, a energia de 4 keV pode ser desconsiderada ¹¹ e por isso, para os radionuclídeos presentes nos ossos, a dosimetria da partícula alfa é a mais importante do ponto de vista de proteção radiológica ¹².

A ICRP-60 ¹³ enfatiza a necessidade de haver controle sobre as fontes de radiação natural, apoiada no fato de que essas exposições são responsáveis por aproximadamente 70% da dose total recebida pelo homem. Em Pernambuco, o Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, realiza trabalhos referentes à monitoração ambiental e monitoração individual de habitantes de regiões de elevada radioatividade natural do Estado. Em Recife apesar de existirem trabalhos que reportam a concentração de ^{210}Pb em águas de abastecimento e sedimentos de reservatórios que atendem a população, existem poucos dados quanto a dosimetria interna deste radionuclídeo nos habitantes desta cidade.

Godoy et al. ¹⁴ apresentaram o método da troca iônica para a determinação do ^{210}Pb em amostras ambientais. Segundo Jia e Torri ¹⁵, na técnica de separação radioquímica, ou técnica de troca iônica, a pureza das fontes de ^{210}Pb apresenta grande influência sobre a exatidão do resultado final. Segundo esses autores, os radionuclídeos emissores beta das séries radioativas naturais do urânio e do tório interferem na quantificação do ^{210}Pb em análise de amostras ambientais, porém, eles demonstraram que a separação radioquímica do ^{210}Pb de outros emissores beta em amostras ambientais, utilizando resina trocadora de íons, é um procedimento eficiente para a quantificação da concentração deste radionuclídeo.

Na literatura não há nenhuma informação sobre a adaptação e aplicação desta técnica para a determinação das concentrações de ^{210}Pb em amostras biológicas, tal como a urina. Dos métodos indiretos para determinação de radionuclídeos, a análise de urina é o mais simples constituindo-se a amostra ideal, pois é de fácil obtenção além de conter somente os radionuclídeos metabolizados ¹⁶.

Dentro do contexto, o objetivo deste trabalho foi estimar a contribuição da dose de radiação de ^{210}Pb nos ossos de habitantes de Recife (Pernambuco, Brasil), a partir dos valores de concentração deste radionuclídeo em amostras de urina.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Critérios de seleção de voluntários e coleta de amostras

Este trabalho foi submetido ao comitê de ética da Universidade Federal de Pernambuco e aprovado sob nº 324/2009. Para este estudo foram selecionados 11 voluntários masculinos e femininos considerados saudáveis, não fumantes e com idade entre 20 e 45 anos. Os participantes são habitantes de Recife há no mínimo 20 anos e consomem em sua dieta alimentos comercializados na própria cidade.

As amostras de urina foram obtidas seguindo os critérios estabelecidos pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria ¹⁷. Cada voluntário recebeu um recipiente de polietileno com capacidade para 2 litros, previamente descontaminado, para a coleta de urina excretada no período de 24 horas. Após a entrega das amostras pelos voluntários, foram adicionados 25 mL de formaldeído a 37% em cada recipiente.

2.2 Determinação do ^{210}Pb

Para a determinação do ^{210}Pb o volume de urina foi medido, transferido para cápsulas de porcelana, com capacidade para 750 ml, para secar a 70°C. A matéria seca obtida foi levada ao forno, cuja temperatura foi aumentada gradativamente até atingir 450°C, deixando-se, então, a esta temperatura por 48 horas, até a obtenção das cinzas ¹⁷.

As cinzas foram utilizadas para determinar as concentrações do ^{210}Pb a partir do método da troca iônica estabelecido por Godoy et al., ¹⁴. O procedimento foi iniciado pela lixiviação de 2 g de cinzas na presença de 100 mL de HBr 0,5 M; 1,0 g de cloridrato de hidroxilamina e 1 mL de carreador de Pb^{++} [20 mg/L de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$], por um período de 12 horas. Em seguida a solução foi filtrada e posta para percolar numa coluna contendo resina trocadora de íons do tipo BIO-RAD DOWEX 1-X8 50-100, a qual retém o ^{210}Pb e pela eluição da solução inicial.

Após a eluição da solução o ^{210}Pb foi retirado da resina, utilizando 50 mL de HNO_3 1M e a solução obtida foi aquecida até a secagem total. Em seguida, foram adicionados 50 mL de água deionizada e o pH corrigido entre 4,5 a 5,0 com acetato de amônio a 40%. A solução foi aquecida até uma temperatura de 100°C, onde 2 mL de Na_2CrO_4 a 25% foram adicionados.

O ^{210}Pb foi precipitado na forma de cromato de chumbo (PbCrO_4). A solução foi filtrada em papel quantitativo, cobrindo-se o precipitado com papel contato, que em seguida foi levado ao detector para determinação da contagem beta total. A concentração específica do ^{210}Pb ($C_{\text{Pb-210}}$) foi determinada utilizando a Equação 1 ¹⁵:

$$C_{\text{Pb-210}} = \frac{A_L}{(1 - e^{-\lambda_{\text{Bi}} t}) \eta y m} \quad (1)$$

Onde:

AL = contagem líquida obtida no detector (cpm);

t = tempo do crescimento do Bi (bismuto);

λ_{Bi} = constante de decaimento do Bi (dias⁻¹);

η = eficiência de detecção do Bi (cpm/Bq);

y = rendimento químico (%);

w = quantidade de cinza de urina utilizada na análise (kg).

2.3 Sistema de medidas

O sistema de medida utilizado neste trabalho foi o detector proporcional alfa beta de fluxo contínuo Canberra Tennelec S5E. Conforme o procedimento do item 2.2, foram utilizadas amostras padrões com concentrações variando de 0,153 a 6,124 Bq em análise em quadruplicatas para a calibração do equipamento.

2.3.1 Calibração do sistema de medidas

Para realização desta pesquisa e garantia da confiabilidade dos resultados obtidos alguns parâmetros foram observados e considerados na metodologia proposta, como a curva de eficiência do detector e a determinação do limite de detecção para as amostras utilizadas. A curva de calibração média obtida de cinco análises de concentrações das amostras padrões é mostrada na Figura 1.

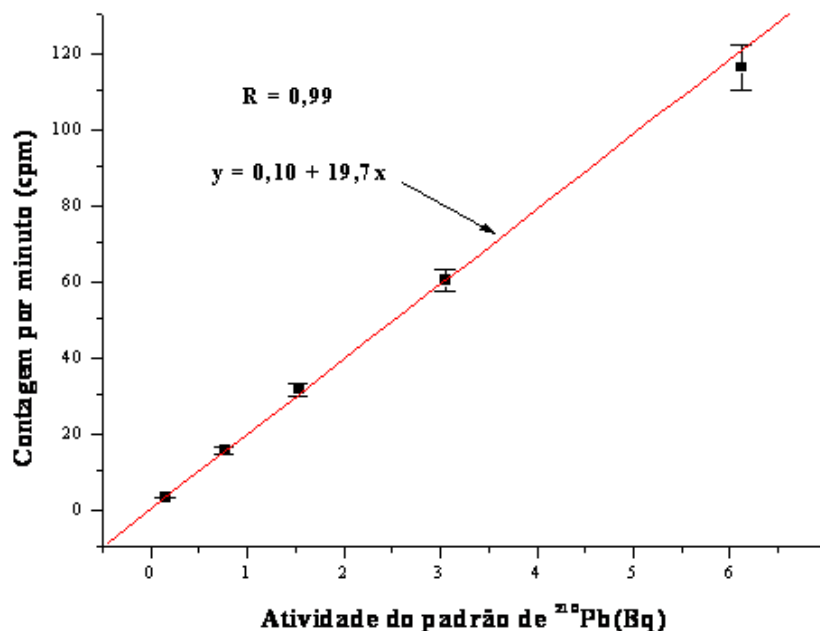


Figura 1: Curva de calibração média do sistema de medidas utilizando o padrão de ^{210}Pb .

Os limites de detecção e quantificação encontrados para determinação do ^{210}Pb foram respectivamente 0,05 e 0,166 Bq. Já a eficiência de contagem do platô beta (η), foi determinada da Figura 1, a partir do valor numérico do coeficiente angular da reta. Para este trabalho o valor encontrado para η foi $19,7 \text{ cpm}\cdot\text{Bq}^{-1}$. Com base nisto a eficiência de contagem beta foi de aproximadamente, 33%.

2.4 Padrões líquidos

Devido à ausência de padrões certificados de ^{210}Pb em urina, foram preparados padrões que permitissem o procedimento de avaliação do método radioanalítico utilizado no presente estudo, descrito por Godoy et al. ¹⁴. Para tanto, foram utilizados padrões líquidos de ^{210}Pb fornecidos pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD). Os padrões líquidos foram diluídos em ácido nítrico a 1 M, conforme recomendações do IRD. Inicialmente, prepararam-se amostras de

urina em duplicatas. Nessas amostras foram adicionados 7,4 Bq de padrão de ^{210}Pb , sendo então, submetidas aos procedimentos apresentados no item 2.2.

2.5 Avaliação do método para determinação do ^{210}Pb

Considerando-se o elevado grau de exigência radioanalítica, foram seguidos procedimentos de avaliação de métodos analíticos e bioanalíticos, conforme estabelecido pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e pelo Ministério da Saúde do Brasil¹⁸. Conforme as especificações estabelecidas pela norma da ANVISA, foram utilizados os parâmetros de Linearidade, Limite de detecção, Limite de quantificação, Precisão e Exatidão para avaliação do método utilizado nesta pesquisa.

Os valores médios obtidos para a precisão e a exatidão foram 3,5% e 96%, respectivamente. O rendimento químico médio da técnica utilizada foi de 97%. Esses resultados demonstram a adaptabilidade e a aplicabilidade do método da troca iônica na quantificação do ^{210}Pb em amostras de urina humana.

No presente estudo, foi analisado o grau de separação do ^{210}Pb dos demais emissores beta nos padrões líquidos preparadas conforme item 2.2. Para tanto, observou-se o crescimento radioativo do ^{210}Bi nas amostras padrões. As Figuras 2 e 3 mostram o crescimento do ^{210}Bi , nas amostras de urina humana, nas quais foram adicionados padrões de ^{210}Pb com concentrações iguais a 7,4 Bq. Estas medidas foram obtidas durante 35 dias. Estas figuras demonstram que o valor dos dados experimentais se aproxima do modelo matemático teórico e com isso o equilíbrio secular entre o ^{210}Pb e o ^{210}Bi sendo alcançado em cerca de 35 dias (50.000 minutos após a eluição das amostras).

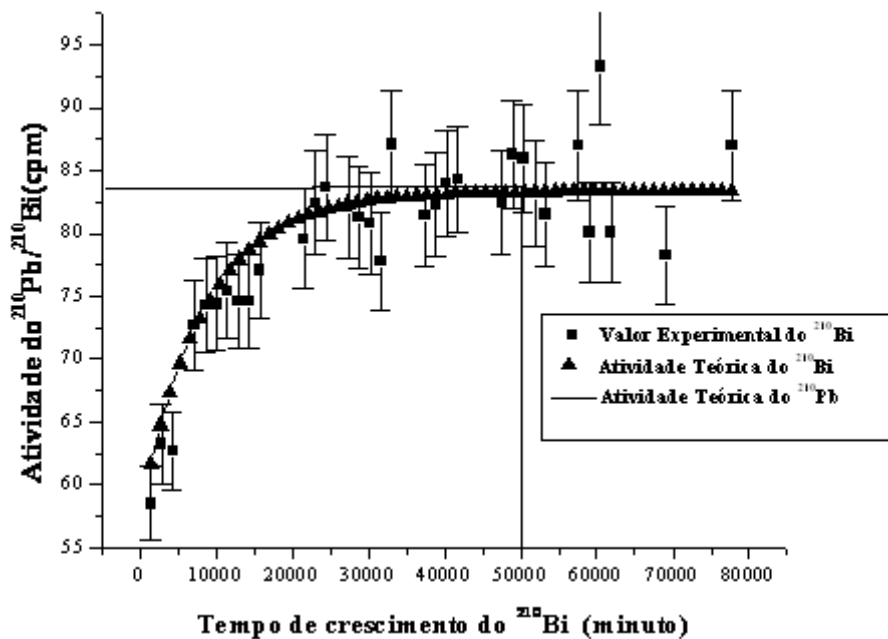


Figura 2: Tempo de crescimento do ^{210}Bi na amostra padrão 1 após a eluição.

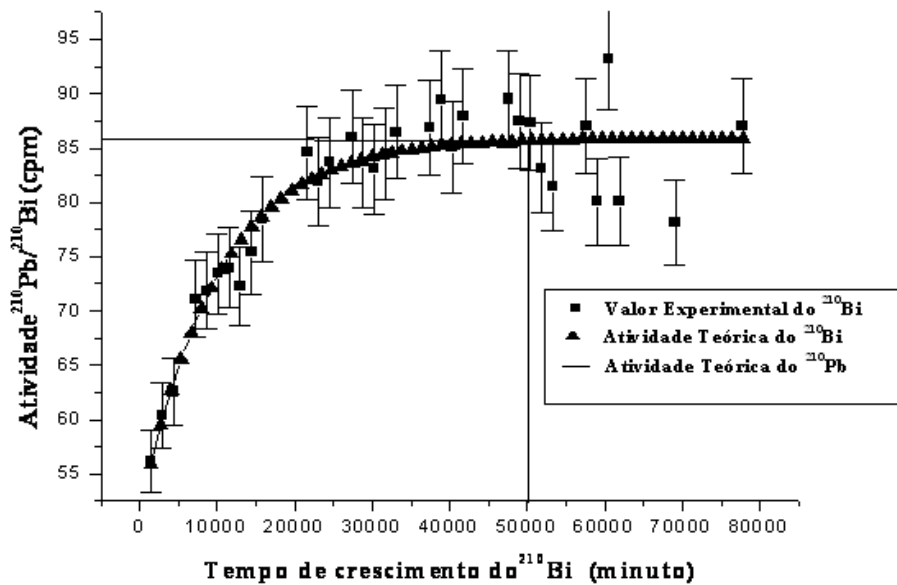


Figura 3: Tempo de crescimento do ^{210}Bi na amostra padrão 2 após a eluição.

2.6 Estimação da dose

Para este trabalho considerou-se que a ingestão de água e alimentos pelos habitantes de Recife contribui para distribuição uniforme deste radionuclídeo através da estrutura óssea, em conformidade com a ICRP-67¹⁹.

Em relação à partícula alfa $D_{a,T}$ (em Gy), o cálculo da dose absorvida por tecidos moles (T) devido ao ^{210}Pb incorporado é obtido através da Equação 6¹¹.

$$D_{a,T} = \frac{(A_T)(5,297,000)(t)(1,6 \times 10^{-19})}{m_T} \quad (6)$$

Onde:

A_T = atividade do radionuclídeo no tecido T (Bq);

5,297,000 eV = energia da partícula alfa

t = tempo de incorporação;

$1,6 \times 10^{-19}$ = fator de conversão (J/ eV)

m_T = massa do tecido

O resultado da dose de radiação absorvida ($D_{a,T}$) é multiplicado por 20, pois este valor corresponde ao fator de ponderação da partícula alfa e a unidade da dose recebida no osso é o Sievert (Sv).

Para o cálculo da atividade do radionuclídeo no tecido ósseo foram adotados valores de retenção e excreção da atividade de acordo com a IAEA-37²⁰, os quais foram derivados dos modelos mais recentes da ICRP-67¹⁹, em que após a ingestão do ^{210}Pb a taxa de transferência em 24 horas é de 0,2000 no sangue, $8,8 \times 10^{-3}$, na urina e de $3,0 \times 10^{-2}$ nos ossos.

2.7 Análise estatística

Como cada amostra foi analisada em triplicata, os resultados foram determinados pelas médias aritméticas, tendo como parâmetro a concentração em atividade calculada para as diferentes concentrações e seus respectivos desvios-padrões. No cálculo do desvio padrão das concentrações considerou-se um erro de 5% adotado na análise radioquímica das amostras, de acordo com o Programa Nacional de Intercomparação do Instituto de Radioproteção e

Dosimetria¹⁷. Para análise estatística dos resultados o programa utilizado foi o Microcal™ Origin® 6.0.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Concentração do ²¹⁰Pb nas amostras de urina

Na Tabela 1 é possível notar que foram obtidas diferentes concentrações de ²¹⁰Pb nas amostras de urina dos voluntários estudados. Tal variabilidade pode ser explicada principalmente pelos hábitos alimentares, pois a ingestão total de radionuclídeos depende da concentração dos radionuclídeos nos alimentos e das quantidades destes que são consumidas.

Tabela 1: Concentração média em atividade do ²¹⁰Pb em amostras de urina.

Amostra	Concentração ²¹⁰ Pb
	mBq.L ⁻¹
01	651 ± 17*
02	278 ± 11
03	<L.D.
04	82 ± 09
05	101 ± 24
06	167 ± 17
07	712 ± 63
08	108 ± 26
09	245 ± 32
10	417 ± 50
11	294 ± 33

*Desvio padrão (95% de confiança)

Bueno²¹ justifica tal situação da seguinte forma: a concentração de ²¹⁰Pb em frutos do mar é alta, mas o consumo deste alimento é baixo e, portanto, a ingestão do radionuclídeo é baixa. Entretanto, a cidade do Recife localiza-se em região litorânea e o consumo de frutos do mar é elevado. No trabalho de Bueno²¹, conduzido no Brasil, os maiores teores de ²¹⁰Pb foram encontrados em alimentos como peixes e frutos do mar (1,3±0,2 a 1,8±0,3 Bq.kg⁻¹).

No Japão o valor médio de ²¹⁰Pb encontrado neste tipo de alimento é de 0,28 Bq.kg⁻¹[22]. Estudos conduzidos nessa região reportaram que o alto consumo de frutos do mar pelos japoneses é responsável pelos diferentes níveis de excreção de ²¹⁰Pb e ²¹⁰Po²³ em urina. Nesta pesquisa a técnica utilizada foi a cintilometria alfa e as contagens foram feitas em um sistema do tipo ZnS(Ag).

Em Poços de Caldas, no Brasil, também foi verificada grande variabilidade na excreção do ²¹⁰Pb e ²¹⁰Po em urina através da cintilometria alfa. Os autores associaram os resultados encontrados com os hábitos alimentares do grupo controle²⁴. Bueno²¹ destaca ainda que em outras situações é possível encontrar baixas concentrações do radionuclídeo no leite, porém o consumo é alto e, portanto a ingestão do ²¹⁰Pb é alta. O leite produzido na região considerada como “Bacia Leiteira” do Estado de Pernambuco, apresenta concentrações de ²¹⁰Pb variando de 62 a 650 mBq.L⁻¹²⁵. Em outros alimentos como batata e produtos de padaria, tem-se um alto teor de ²¹⁰Pb associado a um alto consumo dos produtos alimentícios. Em trabalho realizado na Austrália, os valores encontrados para o chumbo-210 em amostras de batata variaram de 0,5 a 1 Bq.kg⁻¹²⁶. Na pesquisa realizada por Bueno²¹, o teor desse isótopo do chumbo em batatas foi abaixo de 0,08 Bq.kg⁻¹. Neste mesmo trabalho são citados os níveis de ingestão de chumbo-210 associados ao consumo de produtos de padaria que está por volta de 2,9 Bq.a⁻¹, enquanto que o consumo de batata contribui com 2,11 Bq.a⁻¹ e o consumo de leite e seus derivados contribuem com um valor médio de 2,15 Bq.a⁻¹.

Consequentemente, em decorrência da variação do número de radionuclídeos naturais presente nos distintos ambientes e diferentes hábitos alimentares, os teores de radionuclídeos naturais introduzidos no corpo humano podem variar em diferentes locais e condições climáticas. No Rio de Janeiro, por exemplo, o consumo de vegetais contribui com 62% da dose recebida pelo ^{210}Pb nos habitantes desta cidade ²⁷.

Trabalhos relacionados com os teores de ^{210}Pb em urina humana da população não ocupacionalmente exposta são escassos na literatura especializada, contudo, as concentrações encontradas nesta pesquisa são de uma a três ordens de grandezas maiores do que aquelas apresentadas por Santos et al. ²⁸. Nesse trabalho os níveis de ^{210}Pb determinados por espectrometria alfa variaram de 3,6 a 6,3 mBq.L^{-1} , na urina de fazendeiros que trabalhavam com fertilizante fosfatados em Joinville no Estado de Santa Catarina. Pesquisas realizadas em rochas fosfáticas, utilizadas na produção de fertilizantes químicos, apresentaram concentrações elevadas de chumbo-210 (^{210}Pb) que variaram de 329 a 1414 Bq.kg^{-1} ²⁹.

Naumann et al. ³⁰, usando a técnica de espectrometria alfa, determinaram que a concentração de ^{210}Pb varia de 6 a 12 mBq.L^{-1} nas amostras de urina dos habitantes da cidade de Berlim, Alemanha. O valor máximo encontrado por esses autores foi quatro vezes menor do que os valores mostrados na Tabela 1. A mesma técnica foi empregada para determinação das concentrações de ^{210}Pb na urina de pessoas que trabalhavam na reciclagem de baterias de automóveis, em Belgrado (antiga Iugoslávia), que variou de 34,1 a 183 mBq.L^{-1} ³¹. O valor máximo encontrado pelos autores está na mesma ordem de grandeza das amostras 5, 6 e 8 do presente trabalho.

3.2 Estimação da dose absorvida nos ossos devido à incorporação de ^{210}Pb

Levando-se em consideração a amostra com a maior concentração de ^{210}Pb (712 mBq.L^{-1}) e aplicando-se os valores de retenção e excreção da atividade conforme o modelo da IAEA-37 ²⁰, a atividade acumulada no esqueleto (A_T) em 24 horas é de aproximadamente 2,42 Bq por dia. Adotando-se que a expectativa de vida da população do Recife é de 68,6 anos ³² e que a transferência de ^{210}Pb para os ossos ocorre desde o nascimento, o tempo de incorporação T (68 anos) é de 24.820 dias.

Considerando-se que a massa do esqueleto (m_T) é de 7kg ³³, a dose absorvida acumulada foi de aproximadamente 7,2 nGy enquanto que a dose equivalente acumulada foi de $1,44 \times 10^{-7}$ Sv. Se a dose equivalente acumulada for dividida por 68 anos o resultado corresponde a uma dose anual de aproximadamente 2,15 nSv como é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Dose de radiação nos ossos

Amostra	Dose interna
	nSv.a^{-1}
01	1,960
02	0,838
03	-
04	0,270
05	0,304
06	0,503
07	2,150
08	0,325
09	0,738
10	1,260
11	0,886

A utilização da estimativa de dose representa um importante parâmetro para avaliar os riscos inerentes ao ^{210}Pb e a outros radionuclídeos naturais, principalmente porque a concentração deste radionuclídeo nos ossos aumenta com idade, principalmente entre a faixa etária de 10 a 20

anos concomitante com a puberdade ¹¹. Nesta pesquisa, as estimativas de dose efetivas anuais apresentaram-se muito abaixo dos valores recomendados pela ICRP-67 ¹⁹.

Segundo a ICRP-67, para indivíduos do público, a dose efetiva deve ser inferior a 1 mSv.a⁻¹. Doses mais elevadas podem ser aceitas desde que a média durante 5 anos não exceda 1 mSv. Se for comparada com a dose média mundial de 2,4 mSv oriunda com radioatividade natural, este limite ainda é muito baixo.

4. CONCLUSÃO

Os valores de concentração de ²¹⁰Pb nas amostras de urina dos habitantes de Recife, Pernambuco, Brasil, foram altos quando comparados com os dados encontrados na literatura. Contudo o estudo da avaliação da atividade incorporada nos ossos indicou uma baixa estimativa de dose, o que representa um risco desprezível para a população.

5. AGRADECIMENTOS

Aos voluntários pela participação nesta pesquisa, ao CNPq pelo financiamento e ao Departamento de Energia Nuclear da UFPE por oferecer a infraestrutura necessária à realização dos experimentos.

-
1. Souza, V.L.B.; Rodrigues, K.R.G.; Pedroza, E.H.; Melo, R T.; Lima, V.L.; Hazin, C. A.; Almeida, M.G.O.; Nascimento, R. K. Sedimentation Rate and ²¹⁰Pb Sediment Dating at Apipucos Reservoir, Recife Brasil. *Sustainability*.4:2419-2429 (2012).
 2. Silva, C.M.; Amaral, R.S.; Santos Júnior, J.A.; Menezes, R.S.C. ²¹⁰Pb em sal mineral consumido por bovinos leiteiros da região do agreste semi-árido de Pernambuco. *Scientia Plena*. 7(1):1-11 (2011).
 3. Jaworowski, Z. Radioactive lead in the environment and in the human body. *Atomic Energy Review*. 7:3-45 (1969).
 4. Nieri Neto, A.; Mazzilli, B. Evaluation of ²¹⁰Po and ²¹⁰Pb in some mineral spring waters in Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity*. 41(1):11-18 (1998).
 5. Melo, N.M.P. Avaliação da dose interna devida ao ²²⁶Ra, ²²⁸Ra e ²¹⁰Pb nos suprimentos de água para abastecimento público da região metropolitana do Recife. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Energia Nuclear. Recife, Brasil (2008).
 6. Holtzman, R. B. Measurement of natural contents of RaD (Pb-210) and RaF (Po-210) in human bone – estimates of whole – body burdens. *Health Physics*. 9:385-400 (1963).
 7. Spencer, H.; Holtzman, R.B.; Kramer. L.; Iicewicz, F.H. Metabolic balances of ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po at natural levels. *Journal of Radiation Research*. 69:166-184 (1977).
 8. Pounds, J.G.; Mittelstaedt, R.A. Mobilization of cellular calcium-45 and lead-210: effect of physiological stimuli. *Science*. 220:308-310 (1983).
 9. Osborne, R.V. Lead-210 and Polonium-210 in human tissues. *Nature*, 199:295 (1963).
 10. Hill, C. R.; Jaworowski, Z. S. Lead-210 in some human and animal tissues. *Nature*.190:353-354 (1961).
 11. Salmon, P.L.; Bondarenko, O.A.; Henshaw, D.L. Dose 210, a semiempirical model for prediction of organ distribution and radiation doses from long term exposure to ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po. *Radiation Protection Dosimetry*.82:175–192 (1999).
 12. Rowland, R.E.; Stehney, A.F.; Lucas, H.F. Dose-response relationships for female radium dial workes. *Journal of Radiation Research*.76:368–383 (1978).
 13. ICRP. International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection 1990. ICRP Publication 60. ICRP 21. (1/3) (1991).
 14. Godoy, J.M.; Moreira I.; Wanderley, C.; Simões Filho, F.F.; Mozeto, A.A. An alternative method for the determination of excess ²¹⁰Pb in sediments'. *Radiation Protection Dosimetry*, 75:111–115 (1998).
 15. Jia, G.; Torri, G. Determination of ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po in soil or rock samples containing refractory matrices. *Application Radiation Isotopes*. 65:1–8 (2007).

16. Passarelli, M.M. Determinação de Urânio e Trítio em urina de trabalhadores. Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo. Departamento de Análises Clínicas e Toxicológicas. São Paulo, Brasil (1977).
17. IRD. Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Manual de procedimentos técnicos do Departamento de Proteção Radiológica Ambiental. CNEN-Rio de Janeiro, Brasil (1983).
18. ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Guia para validação de métodos analíticos e bioanalíticos. Resolução - RE nº 899, de 29 de maio de 2003.
19. ICRP. International Commission on Radiological Protection. Age-Dependent Doses to Members of Public from Intake of Radionuclides: Part 2 Ingestion Dose Coefficients. International commission on radiological protection ICRP-67 Ann. ICRP 23. (3/4). Oxford: Pergamon Press (1993).
20. IAEA. International Atomic Energy Agency. Methods for assessing occupational radiation doses due to intakes of radionuclides. Safety Report series n.37 (2004).
21. Bueno, L. Análise de radionuclídeos naturais e chumbo em produtos alimentícios e dietas. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de São Paulo. IPEN (1999).
22. Yamamoto, M.; Abe, T.; Kuwabara, J.; Komura, K.; Ueno, K.; Takizawa, Y. Polonium-210 and lead-210 in marine organisms: intake level for Japanese. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 178:81-90 (1994).
23. Okabayashi, H. A study on the excretion of Pb-210 and P-210. *Journal of Radiation Research*. 23:242-252 (1982).
24. Santos, P.L.; Govea, R.C.; Dutra, I.R. Concentrations of ^{210}Pb and ^{210}Po in hair and urine of workers, of the uranium mine at Poços de Caldas (Brazil). *The Science of Total Environment*. 148:61-65 (1994).
25. Silva C. M.; Amaral R. S.; Tabosa, J. N.; Santos Júnior, J. A.; Menezes, R. S. C.; Ribeiro, F. C. A. Estimation of dose due to ingestion of ^{210}Pb in Milk from Dairy Cattle in the Semi-Arid region of Pernambuco, Brazil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 85:103-108 (2010).
26. Cooper, M.B.; Clarke, P.C.; Robertson, W.; Mcpharlin, I.R.; Jeffrey, R.C. An investigation of radionuclide uptake into food crops grown in soils treated with bauxite mining residues. *Journal of Radioanalytical Chemistry*. 194:379-387(1995).
27. Santos, E.E.; Lauria, D.C.; Amaral, E.C.S.; Rochedo, E.R. Daily ingestion of ^{232}Th ^{238}U ^{226}Ra ^{228}Ra and ^{210}Pb in vegetables by inhabitants of Rio de Janeiro City. *Journal of Environment Radiation*. 62:75-86 (2002).
28. Santos, P.L.; Gouvea, R.C.; Dutra, I.R. Human occupational radioactive contamination from the use of phosphated fertilizers. *The Science of the Total Environment*. 162:19-22 (1995).
29. Santos, A.J.G.; Mazzilli, B.P.; Fávoro, D.I.T.; Silva, P.S.C. Partitioning of radionuclides and trace elements in phosphogypsum and its source materials based on sequential extraction methods. *Journal of Environmental Radioactivity*. 87:52-61 (2006).
30. Naumann, M.; Hänisch, K.; Hartmann, M. Levels of natural radionuclides in human excreta in the Berlin Area. *Radiation Protection Dosimetry*. 79:197-200 (1998).
31. Knezevic, I.; Milacic, S.; Novak, L.J.; Uzelac, V.; Nesić, V. The Effect of CaNa_2EDTA on Excretion of ^{210}Pb , ^{210}Po and Stable Lead in Cases of Chronic Lead Intoxication. *Radiation Protection Dosimetry*. 79:471-472 (1998).
32. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estatísticas do Século XX. Comunicação Social. 29 de setembro de 2003.
33. ICRP. International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the international commission on radiological protection'. International commission on radiological protection ICRP-20. Pergamon Press, Oxford (1977).