



Universidade Estadual de Santa Cruz

Programa Regional de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente
Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente

**Estudo de contaminação ambiental por urânio
no município de Caetité-Ba, utilizando dentes
humanos como bioindicadores.**

PRODEMA

Geórgia Reis Prado

Ilhéus-Ba
Setembro de 2007

GEÓRGIA REIS PRADO

**Estudo de contaminação ambiental por urânio no município de
Caetité-Ba, utilizando dentes humanos como bioindicadores.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente – UESC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. João Dias de Toledo Arruda Neto.

Co-orientador: Prof. Dr. Fermin de La Caridad Garcia Velasco.

Ilhéus
2007

P896 Prado, Geórgia Reis.
Estudo de contaminação ambiental por urânio no município de Caetité-Ba, utilizando dentes humanos como bioindicadores / Geórgia Reis Prado. – Ilhéus : UESC/PRODEMA, 2007.

182fl. : il.

Orientador : João Dias de Toledo Arruda Neto.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Santa Cruz. Programa Regional de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

1. Meio ambiente – Contaminação – Caetité (BA).
2. Urânio – Radiação – Caetité (BA). I. Arruda Neto, João Dias de. II. Título.

CDD – 363.739

FOLHA DE APROVAÇÃO

GEÓRGIA REIS PRADO

Estudo de contaminação ambiental por urânio no município de Caetité-Ba, utilizando dentes de humanos como bioindicadores.

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, junto à Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC.

Orientador: Prof^o.Dr^o. João Dias de Toledo Arruda Neto.

Co-orientador: Prof^o.Dr^o. Fermin de La Caridad Garcia Velasco.

Ilhéus (BA), 28/ 09/ 2007

Prof^o. Dr^o. João Dias de Toledo Arruda Neto – USP
(Orientador)

Felix Mas Milian - UESC

Neylor Calasans - UESC

**Aos meus pais Amines e Valmi,
porque acima de qualquer outro motivo,
são os mais importantes.**

Mensagem

Existe somente uma idade para a gente ser feliz,
somente uma época na vida de cada pessoa
em que é possível sonhar e fazer planos
e ter energia bastante para realizá-los
a despeito de todas as dificuldades e obstáculos.
Uma só idade para a gente se encantar com a vida
e viver apaixonadamente
e desfrutar tudo com toda intensidade
sem medo nem culpa de sentir prazer.

Fase dourada
em que a gente pode criar e recriar a vida
à nossa própria imagem e semelhança
e vestir-se com todas as cores
e experimentar todos os sabores
e entregar-se a todos os amores
sem preconceito, nem pudor.

Tempo de entusiasmo e coragem
em que todo desafio é mais um convite à luta
que a gente enfrenta
com toda disposição de tentar algo novo,
de novo e de novo,
e quantas vezes for preciso.

Essa idade tão fugaz na vida da gente
chama-se **PRESENTE**
e tem a duração do instante que passa...

(Mário Quintana)

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Ciência e Tecnologia (CNPq) pelo financiamento deste trabalho.

A todas as crianças e adultos de Caetité, Igaporã, Lagoa Real e São Paulo, que doaram os dentes, bem como aos seus responsáveis, que foram muito solícitos em participarem do estudo.

Ao Coordenador do Prodema Prof. Dr^o Neylor Calasans, pela assistência e viabilidade durante toda minha pesquisa.

Ao meu co-orientador Prof. Dr^o Fermin de La Caridad, por todos os ensinamentos e acompanhamentos desde a graduação, sendo o principal incentivador desta pesquisa de mestrado.

Ao Núcleo de Física Médica da UESC, que fiz parte, em especial a Prof^a. Msc. Agnes e o Prof. Dr^o. Anderson pelos ensinamentos e encorajamento desde a graduação.

Ao Prof. Herlon Brandão que me acompanha desde o 1^o semestre de Física da UESC, pelas conversas amigas e por todos os conselhos. Você foi um professor ímpar em minha vida.

À todos funcionários da secretaria do PRODEMA, pelo suporte importante e necessário à vida acadêmica.

Aos meus queridos amigos de mestrado Luana, Kaline, Cristiana, Susele, Iderval e Marcos Luedy.

Aos meus amigos Joane, Billy, Adriana, Pillar, Luana e Celiene pelos momentos de descontração que me proporcionaram.

Ao meu querido orientador Prof. Dr^o. João Dias de Toledo Arruda Neto por toda ajuda, confiança, esforço, dedicação, cumplicidade, gentileza, paciência e pelas conversas que sempre me incentivaram a ir além. Pelo exemplo de professor, amigo e acima de tudo ser humano. Você é uma verdadeira lição de amor à vida e as pessoas.

Ao Prof. Dr^o. Jorge Eduardo Sarkis do IPEN, pela visão crítica que me fez enxergar a pesquisa de ângulo muito mais amplo.

Ao Prof. Dr^o. Luís Paulo Geraldo da Unisantos, por toda disponibilidade e dedicação, compartilhando comigo valiosos ensinamentos.

À Técnica do Laboratório de Química Analítica da USP Eliana Theodoro, pelo auxílio nas análises das minhas amostras e por ter sido uma verdadeira mãe na minha estada em São Paulo.

À Renata do IPEN; Fabiana, Bianca e Guilherme da UNISANTOS; pela incondicional ajuda, viabilizando assim o processamento de minhas amostras.

À Prof. Dr^a. Maria Victoria pelo companheirismo e disposição dignos de uma cubana baianizada.

Aos funcionários do LAL (Laboratório do Acelerador Linear-USP), Juliana, Marcelo, Cacá, Antônio, Roberto e Evandro pelo carinho, cuidado e disposição.

Às grandes amigas que fiz em São Paulo Érika, Vanicléia e Sara, por todos os conselhos, as conversas às altas horas da madrugada, pelo carinho, preocupação, companheirismo, amizade e fraternidade que me fizeram acreditar que não poderia desistir.

À Jéssica e Juan por toda amizade e carinho que me foram dados nos primeiros momentos em São Paulo.

À Ivan por toda paciência e auxílio com o Origin.

Aos meus pais pelos ensinamentos, esforços, renúncias e dedicação. Por toda confiança que me foi creditada me dando a certeza que seria capaz de conseguir, mesmo nos momentos de maiores dúvidas e angústias.

Aos meus irmãos Mariana e Leonardo, por todo carinho e amor, que nem mesmo a distância e o tempo foram capazes de apagar.

Às minhas avós Amélia e Valdenir, por toda bondade e sabedoria transmitida.

Aos meus queridos avôs Júlio e João (*in memoriam*) que hoje aplaudem meu sucesso de um lugar privilegiado. Tenho a plena certeza que estão felizes com mais esta conquista.

“O valor das coisas não está no tempo em que elas duram, mas na intensidade com que acontecem. Por isso existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e **pessoas incomparáveis**”.

(Fernando Pessoa).

RESUMO

Prado, G. R. **Estudo de contaminação ambiental por urânio no município de Caetité-Ba, utilizando dentes de humanos como bioindicadores.** 2007. 182f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus-Ba.

Este trabalho tem como objetivo principal um estudo da contaminação ambiental à qual estão expostos os moradores do município de Caetité-Ba (sudoeste da Bahia, 757 km de Salvador) e regiões vizinhas (Lagoa Real e Igaporã), onde se localiza a maior jazida de urânio do país. Caetité, em particular, enfrenta problemas ambientais decorrentes de atividades antrópicas de mineradoras de urânio, bem como os conseqüentes efeitos à saúde da população. Neste estudo, o grau de contaminação ambiental por urânio foi inferido a partir dos níveis de incorporação desse radionuclídeo pelos habitantes da região, utilizando-se dentes como bioindicadores. Para tanto, foram coletados dentes extraídos por motivos ortodônticos em indivíduos pertencentes a uma ampla faixa etária, de 5 a 87 anos. Dentes de habitantes da região da Represa de Guarapiranga, região sul de São Paulo (onde não se tem registro de presença de urânio) foram utilizados como controle. Para a quantificação do urânio foi utilizada a técnica de Espectrometria de Massa Acoplada ao Plasma de Argônio (ICP-MS). Uma vez que a concentração de urânio em dentes é muito similar àquela verificada no esqueleto (dentro de uma incerteza inferior a 10%), nossos resultados para dentes também expressam o conteúdo de urânio (por unidade de massa) no esqueleto como um todo. No caso de Caetité medimos uma incorporação média de urânio igual 52,3 ppb ($\mu\text{g/L}$), cerca de 2 vezes maior do que em Lagoa Real, quase uma ordem de grandeza maior do que foi medido em Igaporã, 25 vezes maior do que na região controle, a Represa de

Guarapiranga, e ainda cerca de 100 vezes maior do que a média mundial. Portanto, as populações dessas localidades, e de Caetité em particular, estão sujeitas a riscos radiobiológicos muito superiores aos de populações de outras regiões, tanto no país como no restante do mundo. Essa circunstância pode levar a sérios problemas de saúde como a ocorrência de neoplasias. Paralelamente, este trabalho oferece subsídios para estudos voltados à identificação de fatores causadores de poluição ambiental associados aos possíveis riscos à saúde pública.

Palavras-chave: exposição ambiental, risco à saúde, urânio, mineração, Caetité-Ba.

ABSTRACT

Prado, G. R. **Study of environmental contamination by uranium in the Caetité-Ba village, using human teeth as bioindicators.** 2007. 182pp Master degree Dissertation – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus-Ba.

The main goal of this work is the study of environmental contamination by which the inhabitants of the Caetité-Ba village (southwest of the state, 757 km from Salvador), and neighbouring region (Lagoa Real and Igaporã), are exposed to. The region hosts the largest uranium deposit of the country. Caetité, particularly, has been facing environmental problems arising from anthropic activities in uranium mining, as well as their derived effects to public health. The degree of environmental contamination was inferred, in this study, from the uranium incorporation levels in the local population, by using teeth as bioindicators. To this end, it were obtained teeth extracted by orthodontic reasons in individuals belonging to an ample age interval from 5 to 87 years old. Teeth from inhabitants of the Guarapiranga dam surroundings, São Paulo city south region (an uranium poor locality), were used as control samples. The uranium content in the samples was quantified by the ICP-MS technique (Inductive Coupled Plasma – Mass Spectrometry, using argon plasma). Since uranium concentrations in teeth are quite similar to those verified in the skeleton (with an uncertainty around 10%), our results with teeth also express the uranium content of the whole skeleton. Regarding e Caetité, we measured an average uranium incorporation in teeth equal to 52,3 ppb ($\mu\text{g/L}$), about two times higher than in Lagoa Real, one order of magnitude higher than in Igaporã, about 25 times higher than in the control region (the Guarapiranga dam), and 100 times higher than the world-wide average. Therefore, the inhabitants of the locaties we investigated, and Caetité in particular, are exposed to radiobiological risks much higher than in populations from other regions, here or abroad. Such a circumstance could lead to serious health problems as neoplasias. As a by product, this work could subside further studies toward the identification of the driving factors in environmental polution, associated with possible risks to the public health.

Word-key: environmental exposition, health risk, uranium, mining, Caetité-Ba.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1

Reservas de urânio do Brasil em toneladas de U_3O_8 -----44

Quadro 2

Comparação de concentrações de urânio em fertilizantes fosfatados produzidos em diferentes países-----46

Quadro 3

Distribuição populacional do município de Caetité, Bahia em 2000-----54

Quadro 4

Percentual de pessoas ocupadas por setor de atividade em empresas com CGC-----
-----55

Quadro 5

Legenda da fotografia aérea da área de beneficiamento da mina de urânio-----57

Quadro 6

Distribuição geral dos chefes de família por faixa de rendimentos-----61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1

Valores percentuais das amostras pertencentes às crianças de sexos diferentes.-----
-----73

Tabela 2

Valores percentuais dos dentes coletados.-----74

Tabela 3

Valores percentuais dos tipos de dentes coletados nas duas regiões-----75

Tabela 4

Parâmetros de medidas e condições de operação do ICP-MS-----81

Tabela 5

Concentração elementar (em ppb) adicionada em cada padrão artificial-----85

Tabela 6

Valores utilizados na curva de calibração construída para análise do ICP-MS-----
-----86

Tabela 7

Isótopo medido neste trabalho-----87

Tabela 8

Valores percentuais de dentes de crianças e adultos.-----100

Tabela 9

Valores experimentais de urânio referente ao total acumulado em alguns tecidos humanos, e coeficientes de transferência f_i em diferentes países, comparativamente às predições assintóticas do modelo desenvolvido pela ICRP para concentrações de urânio-----103

Tabela 10

Comparação entre as várias taxas estimadas para ingestão diária de urânio ($\mu\text{g U/day}$) em diferentes países-----104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1

Minério de urânio-----39

Figura 2

Séries radioativas naturais-----41

Figura 3

Localização das reservas de urânio no Brasil-----43

Figura 4

Algoritmo da saúde ambiental: marco conceitual individual-----51

Figura 5

Localização do município de Caetité em relação a capital, Salvador-----53

Figura 6

Localização do município de Caetité e demais municípios da micro-região da Serra Geral-----53

Figura 7

Fotografia aérea da área de beneficiamento da mina de urânio-----57

Figura 8

Localização da área do levantamento aerogeofísico: Projeto São Timóteo-----58

Figura 9

Represa de Guarapiranga e a abrangência de seu abastecimento-----60

Figura 10

As diferentes partes do dente-----66

Figura 11

Percentual das amostras pertencentes às crianças de sexos diferentes-----73

Figura 12

Percentual de dentes coletados-----74

Figura 13

Tipos de dentes coletados nas duas regiões-----75

Figura 14

Fotografia do ICP-MS-----82

Figura 15

Esquema de funcionamento do ICP-MS-----83

Figura 16

Curva de calibração construída para análise com ICP-MS-----86

Figura 17

Concentração de urânio em dentes da Região Controle (Represa de Guarapiranga)-----97

Figura 18

Média dos resultados obtidos das amostras coletadas nas 3 regiões estudadas-----98

Figura 19

Média e desvio dos resultados obtidos das amostras com expurgo (7, 15, 31 e 57 anos), coletadas nas 3 regiões do estudo-----99

Figura 20

Porcentagem de dentes de crianças e adultos-----100

Figura 21

Média das idades das amostras coletadas nas 3 regiões estudadas-----101

Figura 22

Microdistribuição do urânio na secção transversal do fêmur de Beagles-----106

Figura 23

Resultados obtidos a partir do MMC para a acumulação de U em esqueleto, segundo dois regimes extremos de ingestão: 300 e 24.000 µg-U/dia. Os pontos experimentais referem-se à concentração de U em dentes de habitantes do município de Caetité-Ba-----108

Figura 24

Resultados obtidos a partir do MMC para a acumulação de U em esqueleto, segundo dois regimes extremos de ingestão: 1.000 e 11.000 µg-U/dia. Os pontos experimentais referem-se à concentração de U em dentes de habitantes do município de Lagoa Real-Ba-----109

Figura 25

Resultados obtidos a partir do MMC para a acumulação de U em esqueleto, segundo dois regimes extremos de ingesta: 600 e 7.500 $\mu\text{g-U/dia}$. Os pontos experimentais referem-se à concentração de U em dentes de habitantes do município de Igarorã-Ba-----109

Figura 26

Resultados obtidos a partir do MMC para a acumulação de U em RINS, segundo os dois regimes extremos de ingesta deduzidos, a partir de dentes, para os habitantes do município de Caetité (300 e 24.000 $\mu\text{g-U/dia}$)-----111

Figura 27

Resultados obtidos a partir do MMC para a acumulação de U em SANGUE, segundo os dois regimes extremos de ingesta deduzidos, a partir de dentes, para os habitantes do município de Caetité (300 e 24.000 $\mu\text{g-U/dia}$)-----112

Figura 28

Resultados obtidos a partir do MMC para a acumulação de U em TECIDOS, segundo os dois regimes extremos de ingesta deduzidos, a partir de dentes, para os habitantes do município de Caetité (300 e 24.000 $\mu\text{g-U/dia}$)-----113

Figura 29

Resultados obtidos a partir do MMC para a acumulação de U em FÍGADO, segundo os dois regimes extremos de ingesta deduzidos, a partir de dentes, para os habitantes do município de Caetité (300 e 24.000 $\mu\text{g-U/dia}$)-----114

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1

Processo de desfluorinação-----46

Equação 2

Equação da reta-----86

Equação 3

Cálculo de k -----87

Equação 4

Cálculo de ζ_{cinza} -----87

Equação 5

Cálculo de C'_u -----88

Equação 6

Cálculo de m'_{cinza} -----88

Equação 7

Cálculo de C''_u -----88

Equação 8

Calculo de C'''_u -----89

Equação 9

Cálculo de C_u -----89

Equação 10

Cálculo de σ_{cu} -----90

Equação 11

Cálculo de C''_u -----91

Equação 12

Cálculo de $\sigma_{c''_u}$ -----91

Equação 13

Cálculo de σ_{cu} -----91

Equação 14

Equação da reta-----92

Equação 15

Cálculo de t-----92

Equação 16

Limite de detecção-----94

Equação 17

Ddesvio padrão-----96

Equação 18

Equação geral do MMC-----174

Equação 19

Variação da concentração no tempo para todos os compartimentos-----174

Equação 20

Variação da concentração no tempo para os pulmões-----174

Equação 21

Variação da concentração no tempo para os músculos-----174

Equação 22

Variação da concentração no tempo para gordura-----175

Equação 23

Variação da concentração no tempo para outros órgãos -----176

Equação 24

Forma matricial de expressão das equações -----176

Equação 25

Forma matricial de expressão das equações, considerando os compartimentos como volumes-----176

Equação 26

Equação de matriz não-homogênea -----177

Equação 27

Coefficiente de transferência-----177

Equação 28

Coefficiente de transferência em forma de matriz-----177

Equação 29

Solução geral para formal-----177

Equação 30

Expressão geral para a entrada total do sistema biológico-----178

Equação 31

Expressão geral para o nosso modelo-----178

LISTA DE ABREVIATURAS

U – urânio

Th – tório

Pb – chumbo

Sr – estrôncio

Ra – rádio

Ba – bário

Ce – cério

Pr – praseodímio

Pu - plutônio

ppm – partes por milhão ($\mu\text{g/ml}$ ou mg/L)

ppb – partes por bilhão ($\mu\text{g/L}$)

t – toneladas

intake – absorção

uptake – incorporação/retenção

LISTA DE SIGLAS

LET – Linear Energy Transfer

ICP-MS – Espectrometria de Massas de Alta Resolução com Fonte de Plasma Indutivamente Ativado

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

INB – Indústria Nuclear Brasileira

DCP – Fosfato Bicálcico

PMC – Prefeitura Municipal de Caetité

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

EMBASA – Empresa Baiana de Saneamento Básico

SABESP – Companhia de Saneamento Básico de São Paulo

UNISA – Universidade de Santo Amaro

IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

ICRP - International Commission on Radiation Protection

MMC – Modelo de Múltiplos Compartimentos

AAS - Espectrofotometria de absorção atômica

SUMÁRIO

Resumo

Abstract

Lista de quadros

Lista de tabelas

Lista de figuras

Lista de equações

Lista de abreviaturas

Lista de siglas

INTRODUÇÃO	37
1. Urânio	38
1.1 Urânio e sua radioatividade	39
1.1.2 O urânio no Brasil	41
1.1.3 O urânio - meio ambiente e saúde humana	44
1.1.4 Toxicologia e carcinogênese do urânio	48
1.2 Caracterização da área de estudo	52
1.2.1 Município de Caetité: Localização Geográfica e Aspectos Geofísicos	52
1.2.2 Dados Demográficos, Econômicos e Saneamento Básico	54
1.2.3 Caetité - Lagoa Real e a Mina de urânio	56

1.3 Região Controle-----	59
1.4 Exposição Ambiental-----	62
1.4.1 Biomarcadores de Exposição-----	62
1.4.2 Estrutura óssea: um reservatório que contém importantes informações-----	63
1.4.3 Dentes: uma solução para estudo em humanos e grandes populações-----	65
2. O problema e as hipóteses-----	68
3. Objetivos-----	71
3.1 Objetivo Geral-----	71
3.2 Objetivos Específicos-----	71
4. Procedimento Experimental-----	72
4.1 População estudada-----	72
4.1.1 Coleta dos dentes-----	72
4.2 Materiais e Métodos-----	75
4.2.1 Amostras analisadas-----	75
4.2.2 Balança-----	76
4.2.3 Micropipetas-----	76
4.2.4 Instrumentação: Reagentes e Soluções-----	76
4.2.5 Limpeza das Amostras-----	77

4.2.6 Calcinação	77
4.2.7 Digestão da Amostras	78
4.2.8 Mensuração do urânio das Amostras	80
4.2.9 Adição do Analito – Padrões	83
4.2.10 Brancos	84
4.3 O método ICP-MS	84
4.3.1 Validação do Método	84
4.3.2 Curva analítica	85
4.3.3 Cálculo de conversão de medidas	87
4.3.4 Propagação de erro	90
4.3.5 Quantificação de urânio	91
4.3.6 Especificidade	91
4.3.7 Linearidade	92
4.3.8 Sensibilidade	93
4.3.9 Limite de detecção	94
4.3.10 Exatidão	95
4.3.11 Precisão	95
5. Resultados	97
5.1 Região Controle	97
5.2 Resultado Global: Caetité, Lagoa Real e Igaporã	98

5.3 Análise por Idade-----	99
----------------------------	----

6. Discussão-----101

6.1 Valores médios comparados com outras regiões-----	101
---	-----

6.2 Influência da idade na incorporação de urânio-----	101
--	-----

6.3 Extrapolação dos resultados em dentes para outros órgãos-----	107
---	-----

7. Conclusões-----115

8. Referências Bibliográficas-----116

Apêndice 1: Questionários aplicados aos responsáveis pelas crianças participantes do estudo e termo de consentimento de doação do dente

Coleta de Dados-----	122
----------------------	-----

Termo de consentimento de doação-----	123
---------------------------------------	-----

Apêndice 2: Perfil da população estudada

Lista de abreviaturas-----	125
----------------------------	-----

Tabelas de identificação dos dentes com o perfil da população estudada-----	126
---	-----

Apêndice 3: Quantificação e erro de U e Th da amostra 1 a partir da leitura do ICP-MS

Quantificação e erro de U e Th da amostra 1 a partir da leitura do ICP-MS-----	133
--	-----

Apêndice 4: Conversão de medidas

Cálculo de conversão de medidas para o MMC-----137

Apêndice 5: Tabela de medidas

Tabela com resultados da quantificação de U e Th, média, variância e desvio, obtidos pela técnica de ICP-MS por região de todas as amostras e com expurgo-----141

Apêndice 6: MMC

A.6 O Modelo de Múltiplos Compartimentos-----148

A.6.1 Delineação do Modelo-----150

A.6.2 Descrição Físico-Matemática-Biológica do Modelo-----150

Apêndice 7: Tabelas

Tabela 12: Valores média e desvio dos resultados obtidos de todas as amostras coletadas nas 3 regiões do estudado.-----157

Tabela 13: Valores média e desvio dos resultados obtidos das amostras com expurgo, coletadas nas 3 regiões do estudo.-----158

Tabela 14: Valores da média das amostras coletadas nas 3 regiões estudadas e discriminadas por idade-----159

Introdução

Os metais são provavelmente os elementos tóxicos mais antigos conhecidos pelo homem. A influência antrópica altera a potencialidade de seus efeitos sobre a saúde em pelo menos duas grandes formas: transporte de metais entre diferentes regiões do planeta, através do ar, água, solo e alimentação, e a forma química ou bioquímica dos elementos (BEIJER e JERNELOV, 1986, *apud*: GOYER, 2001). Nem todos os metais são tóxicos: existem os essenciais, que possuem funções biológicas importantes no corpo humano. São exemplos de metais essenciais: o ferro, zinco, manganês, cromo, cobalto e o cobre (CORDEIRO, LIMA FILHO e SALGADO, 1996). Sabe-se, por exemplo, que mesmo os elementos químicos e não essenciais, quando em excesso, podem ser tóxicos, constituindo área de grande interesse para a toxicologia . O monitoramento contínuo desses minerais tem grande interesse comercial, pois permite identificar e corrigir deficiências dietéticas, revelar a incidência de doses excessivas, verificar as condições gerais de pacientes, e quem sabe, futuramente fazer diagnóstico precoce de doenças associando desordens no metabolismo humano com composição e/ou contaminação nutricional.

Metais são redistribuídos naturalmente no meio ambiente através dos ciclos geológicos e biológicos. As águas da chuva dissolvem as rochas e minérios transportando os elementos para rios e cursos d'água, depositando-os no solo e, eventualmente, transportando essas substâncias para o oceano de onde posteriormente serão precipitadas em outras localidades. Os ciclos biológicos dos metais incluem bioconcentração por plantas e animais e incorporação na cadeia alimentar. A atividade industrial pode **encurtar** enormemente o tempo de residência

dos metais nos minérios, pode formar novos compostos e aumentar em muito o transporte e distribuição desses elementos no mundo, não apenas através da transferência desses para o solo e para a água, mas também através da sua descarga na atmosfera. Quando descarregados na forma gasosa ou em finíssimas partículas, os metais podem ser transportados a longas distâncias, em escala global (GOYER, 2001), o que leva à união de diversos países em torno de políticas públicas que visem à diminuição da emissão de poluentes, enquanto seus pesquisadores buscam um melhor entendimento das interações destes com a natureza e a saúde humana.

1. Urânio

O minério de urânio consiste de toda concentração natural de mineral ou minerais na qual o Urânio ocorre em proporções e condições tais que permitam sua exploração econômica. O elemento químico urânio é um metal branco-níquel, pouco menos duro que o aço e encontra-se em estado natural nas rochas da crosta terrestre. Sua principal aplicação comercial é na geração de energia elétrica, sendo empregado como combustível para reatores nucleares de potência (OLIVEIRA, 2005). É também utilizado na produção de material radioativo para uso na medicina e na agricultura (INB, 2002-2003).

O urânio é um metal 80% mais denso que o chumbo, e sua importância principal está no fato de ser material radioativo, possuindo três isótopos: ^{235}U , ^{237}U e ^{238}U . Dentre estes, o ^{235}U é o mais importante por ser o mais físsil dos três (GUERRA, 1990).

O Urânio é extraído da uraninita e de outros minérios contendo fosfatos e arseniatos uraníferos, purificado e concentrado sob a forma de um sal de cor

amarela conhecido por *yellowcake* (ou concentrado de U_3O_8), cuja composição química é o diuranato de amônia (INB, 2002-2003). Esses minérios aparecem geralmente nas rochas eruptivas e nos pegmatitos associados ao tungstênio. Suas maiores concentrações estão, porém, nas rochas sedimentares (GUERRA, 1990).



Figura 1: Minério de Urânio.
Fonte: INB, 2002-2003.

1.1 Urânio e sua radioatividade

Devido à presença de radionuclídeos naturais ou artificiais no sistema geosfera-hidrosfera-atmosfera, o ser humano está constantemente exposto às radiações ionizantes (Barbosa & Neto, 2005). A radioatividade natural é a principal fonte de radiação que afeta o ser humano, uma vez que é responsável por 70% da dose total recebida pelo mesmo (Pascholati *et al.*, 1997; IRD-CNEN, 2000).

Elementos radioativos naturais são encontrados em rochas, e a determinação destes elementos e de seus teores pode fornecer dados adicionais sobre as características destas rochas. A ocorrência dos elementos radioativos está intimamente correlacionada à composição mineralógica das rochas (FERREIRA *et al.*, 1992).

Dos radionuclídeos mais importantes para estimativas de doses devidas à contaminação interna, podemos ressaltar o urânio.

O urânio é um elemento radioativo que se encontra na natureza em forma de mineral. Rochas, solos, água superficial e subterrânea, o ar, as plantas e os animais, contêm quantidades variáveis de urânio, em concentrações típicas da ordem de algumas partes por milhão (ppm). Constitui um dos elementos tóxicos mais pesados encontrados na natureza, além de ser um dos principais precursores de radionuclídeos naturais, emissor de partículas alfa, caracterizadas por ter alto LET¹ (GUEVARA, 2002).

Pesquisas recentes têm chamado a atenção para possíveis riscos à saúde humana provocados pela exposição à radiação natural (PASCHOLATI *et al.*, 1997; IRD-CNEN, 2000) e aos produtos de decaimento radioativo de elementos como U e Th.

De maneira geral, os radionuclídeos gerados pelo decaimento radioativo dos elementos U e Th, conforme mostra o esquema abaixo, podem ser encontrados em rochas, solos e sedimentos em concentrações variadas (PEREIRA & NEVES, 2003). Em geral, minerais acessórios de algumas rochas podem conter mais de 85% de todo o teor de U dessa mesma rocha (REBELO *et al.*, 2003).

Em particular, Th e U desempenham um papel predominante no estudo da radioatividade das rochas da crosta terrestre, devido à abundância inicial destes elementos e à ordem de grandeza de suas respectivas meias-vida (FERREIRA *et al.*, 1992), conforme mostra a figura 2.

¹Linear Energy Transfer

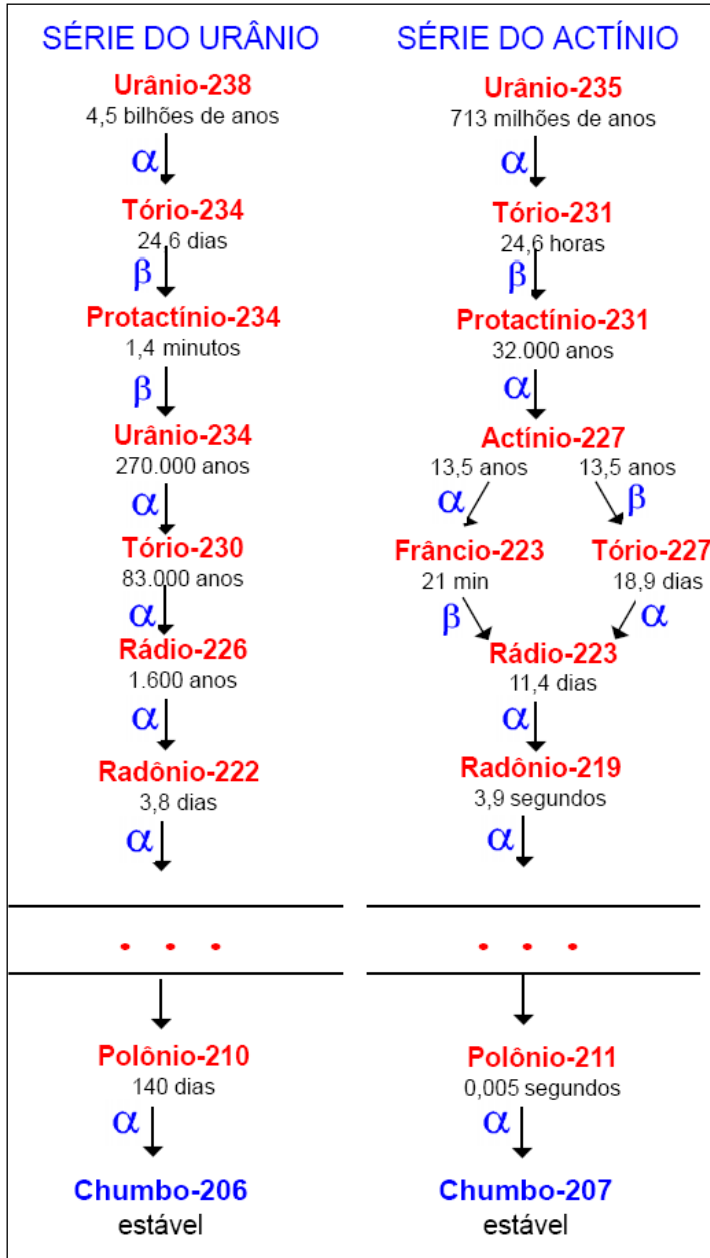


Figura 2: Séries radioativas naturais
Fonte: CNEN.

1.1.2 O urânio no Brasil

A concentração média de urânio na crosta terrestre é cerca de 2ppm. Para ser considerada jazida, a concentração de urânio deve ser de 400 a 2500 vezes que a concentração média (TEIXEIRA, TOLEDO, FAIRCHILD e TALIOI, 2000).

A prospecção e pesquisa de minerais de urânio tem por finalidade básica localizar, avaliar e medir reservas de urânio. Tais trabalhos começam pela seleção de áreas promissoras, indicadas por exame de fotografias aéreas, imagens de radar e de satélites (INB, 2002-2003).

No Brasil foram estudadas e catalogadas dezenas de milhares de ocorrências de urânio. No entanto, uma ocorrência não leva necessariamente à descoberta de um depósito economicamente explorável (TEIXEIRA, TOLEDO, FAIRCHILD e TALIOLI, 2000).

O Brasil possui uma das maiores reservas mundiais de urânio, possibilitando o suprimento das necessidades domésticas ao longo prazo e a disponibilização do excedente para o mercado externo (AMBIENTE BRASIL).

A primeira unidade mineira e de beneficiamento do Brasil foi ao município de Poços de Caldas (sul de Minas). Com a exaustão e desativação do urânio economicamente explorável dessa mina em 1996, o urânio passou a ser produzido na região sudoeste da Bahia, nos municípios de Lagoa Real e Caetité, que apresentaram reservas estimadas em 100.000t (cem mil toneladas) de urânio, sem outros minerais associados (TEIXEIRA, TOLEDO, FAIRCHILD e TALIOLI, 2000).

Em junho/2001 o País já possuía a sexta maior reserva geológica de urânio do mundo, com cerca de 309.000t de U_3O_8 , nos Estados da Bahia, Ceará, Paraná e Minas Gerais, entre outras ocorrências (AMBIENTE BRASIL).

Na figura 3, está disposto à localização das reservas de urânio no Brasil.



Figura 3: Localização das reservas de Urânio no Brasil.
Fonte: INB, 2002-2003.

Amazonas e área de Carajás, no Estado do Pará, apresentam um potencial adicional estimado de 150.000t (INB, 2002-2003).

Código Brasileiro de Mineração dá as seguintes classificações para as reservas minerais: reserva inferida, reserva indicada e reserva medida.

Quadro 1: Reservas de Urânio do Brasil em toneladas de U_3O_8
 Fonte: INB, 2002-2003.

Ocorrência	Medidas e Indicadas			Inferidas	TOTAL
Depósito-Jazida	< 40US\$/kg U	< 80US\$/kg U	Sub-Total	< 80US\$/kg U	
Caldas (MG)	-	500t	500t	4.000t	4.500t
Lagoa Real/Caetité (BA)	24.200t	69.800t	94.000t	6.770t	100.770t
Santa Quitéria (CE)	42.000t	41.000t	83.000t	59.500t	142.500t
Outras	-	-	-	61.600t	61.600t
TOTAL	66.200t	111.300t	177.500t	131.870t	309.370t

1.1.3 O urânio – meio ambiente e saúde humana

Algumas rochas e solos podem conter quantidades maiores de urânio que outros (LEDVINA, 1996). Se a quantidade for suficientemente grande, o urânio pode ser aproveitado comercialmente, ser extraído, e convertido em dióxido ou outras formas do produto. O resíduo desta série de processos mineralógicos também contém uma pequena quantidade de urânio, assim como outros de rejeitos naturalmente radioativos tais como o tório (GUEVARA, 2002).

No meio ambiente, as substâncias químicas podem ser degradadas por processos químicos, como hidrólise, fotoxidação, e bioquímicos. A estabilidade da substância está relacionada à sua própria estrutura e a fatores ambientais, como temperatura, nível de radiação solar, pH e concentração de matéria orgânica. Esses fatores determinam a velocidade de propagação da substância no ambiente. Algumas moléculas recalcitrantes, ou seja, particularmente resistentes à degradação química e bioquímica, apresentam meia-vida longa na biota, no solo, nos sedimentos e na água, causando maior impacto ao ecossistema. Este seria o caso dos

compostos de urânio, presentes naturalmente no meio ambiente principalmente na forma de óxidos. Outras, por sua vez, ao sofrer degradação, resultam em produtos com toxicidade maior que a do precursor (AZEVEDO & CHASIN, 2004).

A degradação é uma das propriedades intrínsecas da substância mais importante na determinação do dano potencial ao meio ambiente. Substâncias não degradáveis, como os compostos de urânio, persistirão no meio podendo, conseqüentemente, causar efeitos crônicos à biota e aos seres humanos. (AZEVEDO & CHASIN, 2004).

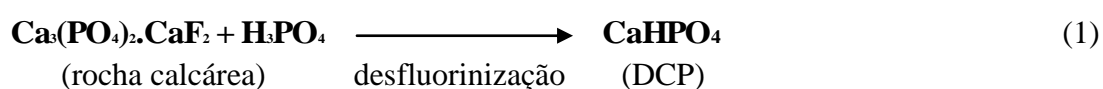
Os radionuclídeos, como o urânio, chegam ao interior do corpo humano quando ingeridos, inalados, absorvidos pela pele ou por uma mucosa, ou então quando são administrados durante os exames realizados com radionuclídeos. O dano produzido pela radiação que essas fontes emitem depende da energia das partículas, tipo de radiação emitida, distribuição do radionuclídeo no corpo e da taxa de eliminação do radionuclídeo (GARCIA, 2002).

O urânio entra na cadeia alimentar principalmente como conseqüência da sua presença em rochas fosfáticas que são utilizadas como matéria prima na fabricação de fertilizantes e ração animal. O fosfato é utilizado como nutriente para reposição em solos empobrecidos por atividades agrícolas intensas e problemas de erosão. A contínua utilização destes fertilizantes resulta na adsorção de certas quantidades de minerais por plantas e, portanto, torna-se uma fonte de urânio na dieta alimentar humana (YAMAZAKI e GERALDO, 2003).

A utilização do fosfato na composição de suplementos de ração animal propicia a acumulação do urânio à massa corpórea dos animais que serão consumidos pelos humanos, tornando-se, portanto uma outra rota de entrada na

cadeia alimentar e sujeitando os consumidores à ingestão crônica do metal (ARRUDA NETO *et al.*, 1997).

Vale mencionar, por exemplo, o fosfato bicálcico (DCP). O DCP é obtido através de um processo de desfluorinação, como é mostrado na equação 1. Após este processo, o DCP pode conter concentrações tão altas quanto 200 ppm (ARRUDA NETO *et al.*, 1997).



Quadro 2: Comparação de concentrações de urânio em fertilizantes fosfatados produzidos em diferentes países.

Fonte: Oliveira, 2005 (adaptado de Yamazaki e Geraldo, 2003).

País	Concentração de Urânio ($\mu\text{g.g}^{-1}$)	Método de determinação	Referência
EUA	8,9 – 221,0	Espectrometria γ	Hamamo et al. (1995)
Alemanha	3,2 – 185,5	Espectrometria γ	Pfister et al. (1976)
Uzbequistão	11 – 70	Traços de fissão	Al-Shawi and Dahl (1995)
Índia	15,9 – 35,8	Traços de fissão	Lal et al. (1985)
Croácia	66 – 127	Espectrometria γ	Barisic et al. (1992)
Yugoslávia	58,9 – 162,0	Espectrofotometria	Vucic e Ilic (1989)
Brasil	5,17 – 54,3	Traços de fissão	Yamazaki e Geraldo (2003)

No Brasil, o suplemento de cálcio na dieta de ovelhas e frangos, por exemplo, inclui um consumo de 72g de DCP. Se considerarmos então que a fração de DCP consumida é da ordem de 3%, a quantidade de urânio ingerida estará aproximadamente entre 5 e 6 ppm. Os humanos são consumidores do leite e da carne desses animais (GUEVARA, 2002).

Outros estudos envolvendo análises de 15 tipos de solos brasileiros, (PEREZ, 1998) acharam concentrações totais de urânio na faixa de 2 e 3 ppm, assim como (DECARMO, 1996) reportaram-se as mesmas quantidades em água mineral proveniente de regiões de alto background no Brasil.

Em outros lugares do planeta podem ser achadas concentrações na água potável tão altas quanto 200 $\mu\text{g-U/l}$ (WHO, 2001), como no caso da antiga URSS, e de 3000 $\mu\text{g-U/l}$ como na Finlândia (REIMANN, 1996).

Alguns radionuclídeos se depositam em tecidos e órgãos importantes e, dessa forma constituem-se num componente importante do “background” radioativo que irradia permanentemente o indivíduo. A maioria dos radionuclídeos incorporados, como o urânio, são oriundos dos alimentos e da água. Outros, contudo, são inalados ou atravessam a barreira da pele, sobretudo através de ferimentos (GARCIA, 2002).

Conforme será discutido neste trabalho, a afinidade iônica faz do esqueleto um órgão retentor de metais, de forma que depois de cessada ou diminuída a fonte exógena, o indivíduo continuará exposto ao elemento que foi retido na estrutura óssea, que agora funcionará como fonte endógena. Assim sendo, quanto maior a retenção, maior e mais longa será essa exposição. Além disso, estudos demonstraram que baixas concentrações de urânio ingeridas de forma crônica, ou seja, no transcurso de longos períodos de tempo, levam ao acúmulo do elemento não somente nos ossos como também em todo o volume da medula óssea, colocando as células estaminais hematopoiéticas, produtoras de sangue, dentro do alcance da radiação alfa (ARRUDA NETO *et al.*, 2004).

Neste sentido, a mensuração das quantidades do elemento na estrutura óssea é uma informação relevante, relacionando as fontes dos alimentos consumidos pela população local aos riscos à saúde humana. No entanto, não se

encontram na literatura estudos envolvendo medidas de Urânio em dentes humanos e em regiões contaminadas no Brasil, como a região objeto deste estudo.

Muitos fatores são considerados capazes de aumentar o risco de câncer. Os agentes ambientais também estão implicados e são, em algumas vezes, relevantes em áreas e grupos populacionais especiais. Circunstâncias especiais como as encontradas em exposições ocupacionais, práticas locais ou outras condições podem aumentar o risco de aparecimento de certos tipos de câncer (BRILHANTE, 1999).

Assim, das vias de entrada de radionuclídeos no corpo humano, a ingestão pode considera-se uma das mais efetivas, por estar diretamente relacionada a hábitos alimentares.

1.1.4 Toxicologia e Carcinogênese do urânio

O organismo humano contém em média 90 µg de urânio, incorporados através do consumo normal de água e alimento, e também por ar inalado. Aproximadamente 66% se encontram no esqueleto, 16% no fígado, 8% em rins e 10% em outros tecidos. Na excreção urinária ou nas fezes elimina-se mais de 95% do urânio que entra no corpo (WHO, 2001).

Tipicamente, entre 0,2 e 2% do urânio contido nos alimentos e na água é absorvido pelo trato gastrointestinal. Do urânio que é absorvido no sangue, aproximadamente 67% é filtrado pelos rins e excretado pela urina, nas primeiras 24 horas. Compostos solúveis do urânio são melhor absorvidos do que compostos insolúveis, porque a mobilidade do íon uranila (UO_2^{2+}) é similar à mobilidade do cátion Ca^{2+} (WHO, 2001).

Como o U transita majoritariamente pelos rins, seu efeito toxicológico mais importante é a nefrotoxicidade. No rim, a toxicidade do urânio retido depende de sua concentração: em altas concentrações pode causar necrose no túbulo proximal enquanto que, em quantidades não letais, o dano ao túbulo é regenerado, com subsequente tolerância a doses maiores de urânio (DURANOVIC, 1999). Ainda que os rins sejam o órgão onde o urânio exerça sua toxicidade química mais importante, os ossos são considerados críticos para os estudos dos efeitos a longo prazo da exposição ao urânio, já que apresentam afinidade pelo urânio, retendo-o por grandes períodos e prolongando a exposição, pois o elemento é liberado da estrutura óssea durante o remodelamento desta (SAR, 1989).

O urânio, assim como outros metais pesados, tem grande afinidade pelo osso. Desta forma, este órgão é um dos mais importantes acumuladores biológicos de radionuclídeos de vida longa. Por outro lado, é preocupante que nele se concentrem as células hematopoiéticas da medula óssea e células progenitoras do osso.

Por estas razões, o estudo do metabolismo de urânio em tecidos ósseos, em quantidades que sejam suficientemente baixas para não induzir um efeito severo imediato pró-toxicidade química ou radiológica em outros órgãos, é fundamental para avaliar riscos à saúde ao longo prazo principalmente em etapas de crescimento do indivíduo.

Acumulam-se as evidências de que os fatores ambientais que determinam a higidez dos ecossistemas vêm gradativamente sendo modificados. As condições de desequilíbrio do meio ambiente dependem basicamente da quantidade, da duração e da intensidade da exposição às substâncias químicas. Assim, pode-se inferir que essas alterações são de origem essencialmente antropogênica e intimamente

relacionadas às emissões de grandes quantidades de contaminantes no ar, mananciais, aquíferos, além de aditivos tóxicos nos alimentos e em solos cultiváveis. São igualmente relevantes, a disposição de dejetos urbanos perigosos não-degradáveis, a excessiva combustão da biomassa (carvão, madeira e petróleo) e o desenvolvimento industrial desenfreado (BRILHANTE, 1999).

Segundo AZEVEDO & CHANSIN, (2004) o processo carcinogênico envolve interações complexas entre vários fatores, tanto exógenos (ambientais) quanto endógenos (genéticos, hormonais, etc.). Vários fatores podem estar relacionados ao aparecimento de câncer, como agentes físicos (radiações ionizantes e raios ultravioleta), biológicos (vírus) e, principalmente, químicos (MÍDIO & MARTINS, 2000). Muitos compostos químicos podem agir especificamente nas fases de iniciação e promoção do tumor (AZEVEDO & CHANSIN, 2004).

Muitos fatores são considerados capazes de aumentar o risco de câncer, como estilo de vida (fumo, álcool, dieta, comportamento reprodutivo) e fatores genéticos e hormonais. Os agentes ambientais também estão e são, algumas vezes, relevantes em áreas e grupos populacionais especiais. Circunstâncias especiais como as encontradas em exposições ocupacionais, práticas locais ou outras condições podem aumentar o risco do aparecimento de certos tipos de câncer, como os de pele e os do trato respiratório e urinário.

O risco potencial de alimentos, água, ar e solo contaminados por xenotóxicos são as causas mais comuns de doenças de etiologia ambiental (CRAIGHEAD, 1995). O caminho que conduz ao aparecimento de modificações subclínicas nas populações expostas, doença (morbidade) e casos fatais (mortalidade) são apresentados na figura 4, (BRILHANTE, 1999).

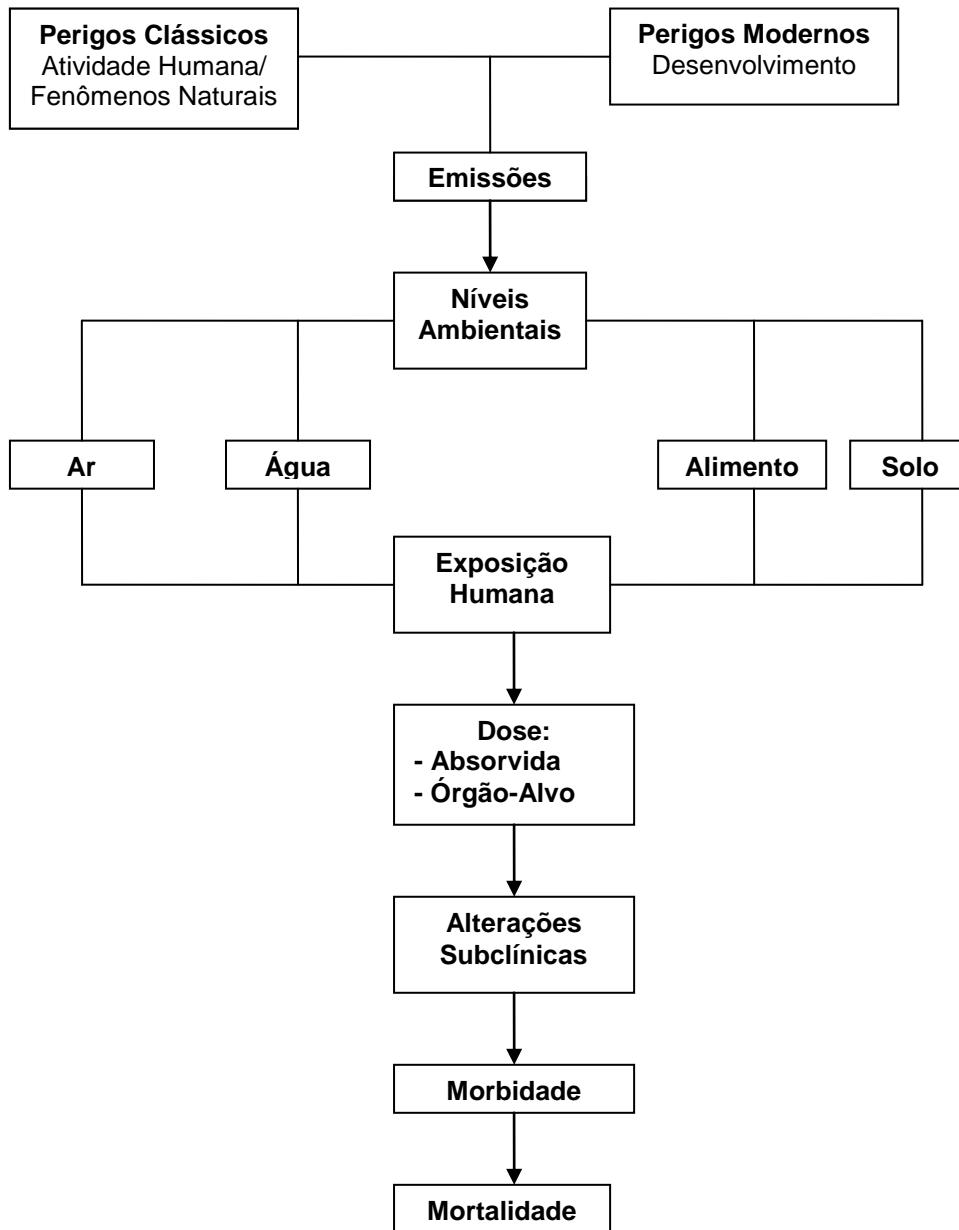


Figura 4: Algoritmo da saúde ambiental: marco conceitual individual.
Fonte: BRILHANTE, 1999.

Os tóxicos são concentrados em órgão ou tecidos afins. Alguns atingem sua mais elevada deposição no próprio sítio de ação, como o monóxido de carbono por conta de sua grande afinidade com a hemoglobina, e o paraquat, que se acumula nos pulmões. Outros agentes armazenam-se em locais distintos do sítio de ação,

como acontece com o chumbo e o urânio que se depositam nos ossos (AZEVEDO & CHASIN, 2003, *apud*: KLAASEN, 1975).

1.2 Caracterização da área de estudo

1.2.1 Município de Caetité: Localização Geográfica e Aspectos Geofísicos

O município de Caetité localiza-se no sudoeste da Bahia, a cerca 757 km de Salvador, capital do estado (ver figura 5).

Fundado em 1867, o município possui uma área geográfica de 1 902 km², altitude de 824 m acima do nível do mar, sua latitude é de -14°04'10" e longitude de 42°28'30" (BAHIA, 2006).

A vegetação típica da região é a caatinga, entremeada de matas, formando os chamados "capões" junto as nascentes. A maior parte do território é composta dos "gerais", denominação comum da caatinga arbustiva. Em consequência de sua localização geográfica a cidade faz parte do perímetro afetado pela estiagem. A temperatura média é de 21,1°C, sendo a máxima de 26,8° e a mínima de 16,4° C, tendo clima semi-árido e de subúmido a seco (PMC, 2002).



Figura 5: Localização do município de Caetité em relação a capital, Salvador.
 Fonte: Prefeitura Municipal de Caetité.

Com tais características, possui um relevo de Patamares Orientais e Ocidentais do Espinhaço e uma geologia composta de Anfibólitos, Arenitos Feldspáticos, Depósitos Eluvionares e Coluvionares, Gnaisses, Migmatitos, Quartzitos, Rochas Básicas-Ultrabásicas, justificando assim a riqueza de seu solo e a exploração de minérios no município (BAHIA, 2006).

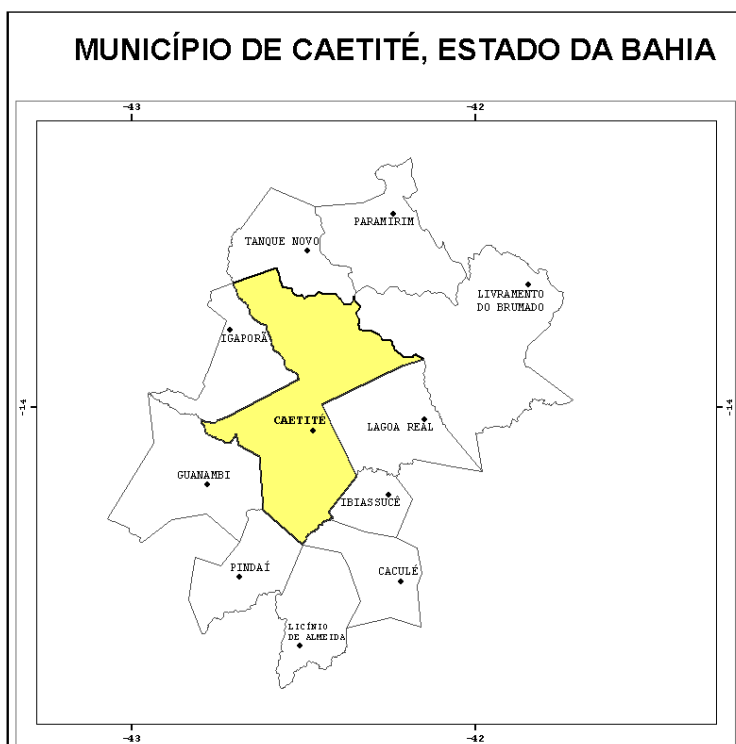


Figura 6: Localização do município de Caetité e demais municípios da micro-região da Serra Geral.
 Fonte: Prefeitura Municipal de Caetité.

1.2.2 Dados Demográficos, Econômicos e Saneamento Básico

De acordo com o censo realizado em 2000, a população total da região da Serra Geral é de 564.990 habitantes, 8% desse total residindo em Caetité, terceira cidade mais populosa da Serra Geral, com aproximadamente 45.090 habitantes. A densidade demográfica é de 23,78 hab/km², sendo que para 2005 sua população foi estimada em 48.041 habitantes (IBGE, 2000).

Quadro 3: Distribuição populacional do município de Caetité, Bahia em 2000.

Fonte: Censo Demográfico 2000.

Município	População residente, sexo e situação do domicílio.					População residente com 10 anos ou mais de idade		
	Total	Homem	Mulher	Urbana	Rural	Total	Alfabetizada	Taxa de alfabetização (%)
Bahia	13.070.250	6.462.033	6.608.217	8.772.348	4.297.902	10.385.720	8.138.193	78.4
Caetité	45.090	22.269	22.821	23.459	21.631	35.853	25.956	72.4

A pecuária, agricultura, mineração, indústria, comércio e o turismo são alguns dos setores da economia do município de Caetité. O município possui uma pecuária de corte, enquanto que na agricultura a produção de mandioca, cana-de-açúcar, feijão, milho e café se destacam. Além de possuir indústrias de cerâmica, alimentícia e manufaturas têxteis, há ainda mineração e a exploração de ricas jazidas de urânio, ametista e manganês.

Na tabela 4 estão apresentados detalhadamente os setores da economia do município, com seus respectivos percentuais de unidades locais e de ocupação da população.

Quadro 4: Percentual de pessoas ocupadas por setor de atividade em empresas com CGC.
 Fonte: IBGE – Cadastro Central de Empresas, 2003.

Setor	Unidades Locais	Pessoal ocupado
Agricultura, pecuária, silvicultura e exploração florestal	12 (1,1%)	32 (0,9%)
Indústrias Extrativistas	13 (1,2%)	178 (4,9%)
Indústrias de Transformação	80 (7,1%)	731(20,1%)
Construção	21 (1,9%)	39 (1,1%)
Comércio; reparação de veículos automotores, objetos pessoais e domésticos	579 (51,3%)	992 (27,3%)
Alojamento e alimentação	52 (4,6%)	120 (3,3%)
Transporte, armazenagem e comunicações	31 (2,7%)	185 (5,1%)
Intermediação Financeira	7 (0,6%)	44 (1,2%)
Atividades imobiliárias, aluguéis e serviços prestados às empresas	46 (4,1%)	97 (2,6%)
Administração pública, defesa e seguridade social	3 (0,3%)	865 (23,8%)
Educação	41 (3,7%)	101 (0,02%)
Saúde e serviços	25 (2,2%)	162 (4,5%)
Outros serviços coletivos, sociais e pessoais	139 (12,3%)	93 (2,5%)
Total	1 129 (100%)	3 639 (100%)

Verifica-se, de acordo com os dados da tabela 4, que os setores de comércio, reparação de veículos automotores, objetos pessoais e domésticos é responsável pelo maior número de pessoas ocupadas no município, com 27,3% dos empregos. Em segundo lugar, com 23,8% das ocupações tem-se os setores de administração pública, defesa e seguridade social, seguidos pelo setor indústria de transformação com 20,1%. A educação aparece com apenas 0,02% dos empregos, caracterizando-se como o setor que oferece o menor número de empregos.

O abastecimento de água é fornecido pela Empresa Baiana de Saneamento Básico – EMBASA. A água é captada no rio do Antônio de uma represa pertencente à Embasa, que é submetida a tratamento para posterior uso da população. Já na zona rural é inexistente o tratamento de água para uso da população. As comunidades rurais utilizam água sem tratamento de rios ou poços, quando estes não estão secos, como ocorre em alguns lugarejos.

1.2.3 Caetité – Lagoa Real e a Mina de urânio

Instalada no sudoeste da Bahia, entre os municípios de Caetité e Lagoa Real, situa-se uma das mais importantes províncias uraníferas brasileira. A mina tem 1.800 hectares de extensão e tem uma reserva estimada de 100 mil toneladas exclusivamente de urânio, sem outros minerais de interesse associados e é explorada pela INB – Indústria Nuclear Brasileira. Esta quantidade é suficiente para o suprimento da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (usinas Angra I, II e III) por 100 anos, e a continuidade das atividades de pesquisa e prospecção pode aumentá-la substancialmente (INB, 2002-2003).

Com capacidade de produção de 400 toneladas/ano de concentrado de urânio, a meta da INB para os próximos anos é a sua duplicação para 800 toneladas/ano. Esta unidade de beneficiamento de minério de urânio é um empreendimento minero-industrial modular, concebido com a finalidade de promover o aproveitamento do urânio em cerca de 33 ocorrências conhecidas que atualmente compõem a reserva.



Figura 7: Fotografia aérea da área de beneficiamento da mina de urânio.
Fonte: INB.

Quadro 5: Legenda da fotografia aérea da área de beneficiamento da mina de urânio.

1	Piscina Armazenamento de Efluentes
2	Área de Britagem
3	Área de Lixiviação
4	Piscina de Armazenamento de Licor
5	Área Industrial
6	Área Administrativa

O Distrito Uranífero de Lagoa Real está localizado numa região montanhosa do centro-sul do Estado da Bahia, cerca de 20 Km a nordeste da cidade de Caetité, (figura 8). Foi descoberto durante a execução de uma série de levantamentos aerogeofísicos, entre 1976 e 1977, que levou à identificação de 19 áreas mineralizadas. Um trabalho mais detalhado de aerogamaespectrometria levou à descoberta de 33 ocorrências uraníferas adicionais, também avaliadas (INB, 2002-2003).

O projeto básico de mina foi concluído em 1996, indicando uma lavra de céu aberto na jazida da Cachoeira (anomalia 13). Esta anomalia com teor médio de 3.000 ppm prevê a produção aproximada de 400 toneladas/ano de urânio. Gradualmente serão explorados outros depósitos dentre os 33 existentes. Essas reservas são

suficientes para a operação de dez reatores do tipo Angra 2 por toda a vida útil do empreendimento. Embora seja a maior reserva de urânio que o país possui, sua viabilidade econômica é dependente da exploração do fosfato associado. Isso significa que a extração de urânio está condicionada à produção de ácido fosfórico - insumo utilizado na produção de fertilizantes. (INB, 2002-2003).

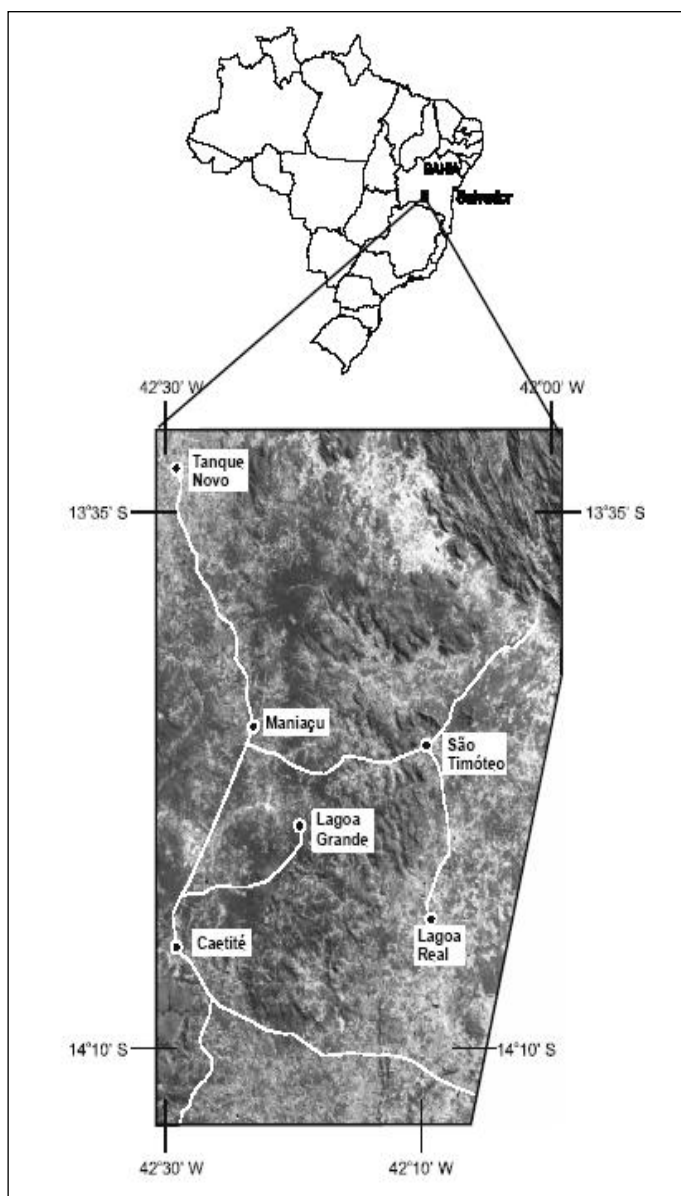


Figura 8: Localização da área do levantamento aerogeofísico Projeto São Timóteo, Bahia (gamaespectrometria e magnetometria), na imagem Landsat – 5TM.
Fonte: Pascholati, 1995.

O Complexo Granítico-Gnáissico Lagoa Real, do Paleoproterozóico, estende-se na direção norte-sul e abrange uma área superior a 2 000km² (PASCHOLATI, 1995).

1.3 Região Controle

Desde a década de 80, a região sul da cidade de São Paulo vem sofrendo uma ocupação desordenada, caracterizada por irregularidades, altas densidades demográficas e inexistência de infra-estrutura básica (FRANÇA, 2000). Nesta região encontra-se a represa de Guarapiranga (Figura 9), que é responsável pelo abastecimento de 25% da região metropolitana de São Paulo, aproximadamente 3,7 milhões de pessoas (SABESP, 2005). A represa faz parte da bacia hidrográfica do Guarapiranga, que se estende por 643 km² na região, abrangendo áreas dos municípios de São Paulo, Embu, Itapeverica da Serra, Embu-Guaçu, Cotia, São Lourenço da Serra e Juquitiba. No caso do município de São Paulo, trata-se de uma área de 229 km², 36% da área total da bacia. Em função da importância da represa para o abastecimento da região metropolitana, a área é protegida pela legislação de Proteção aos Mananciais, que regula o uso e a ocupação do solo (ISA, 1996), o que não tem impedido a formação de um imenso e incontrolável bolsão de pobreza em seu entorno, onde atualmente vivem cerca de 600 mil pessoas (ISA, 1996; FRANÇA, 2000), 450 mil localizados na porção do território do município de São Paulo. O quadro 5 mostra a distribuição dos moradores da Represa de Guarapiranga por faixa de renda.

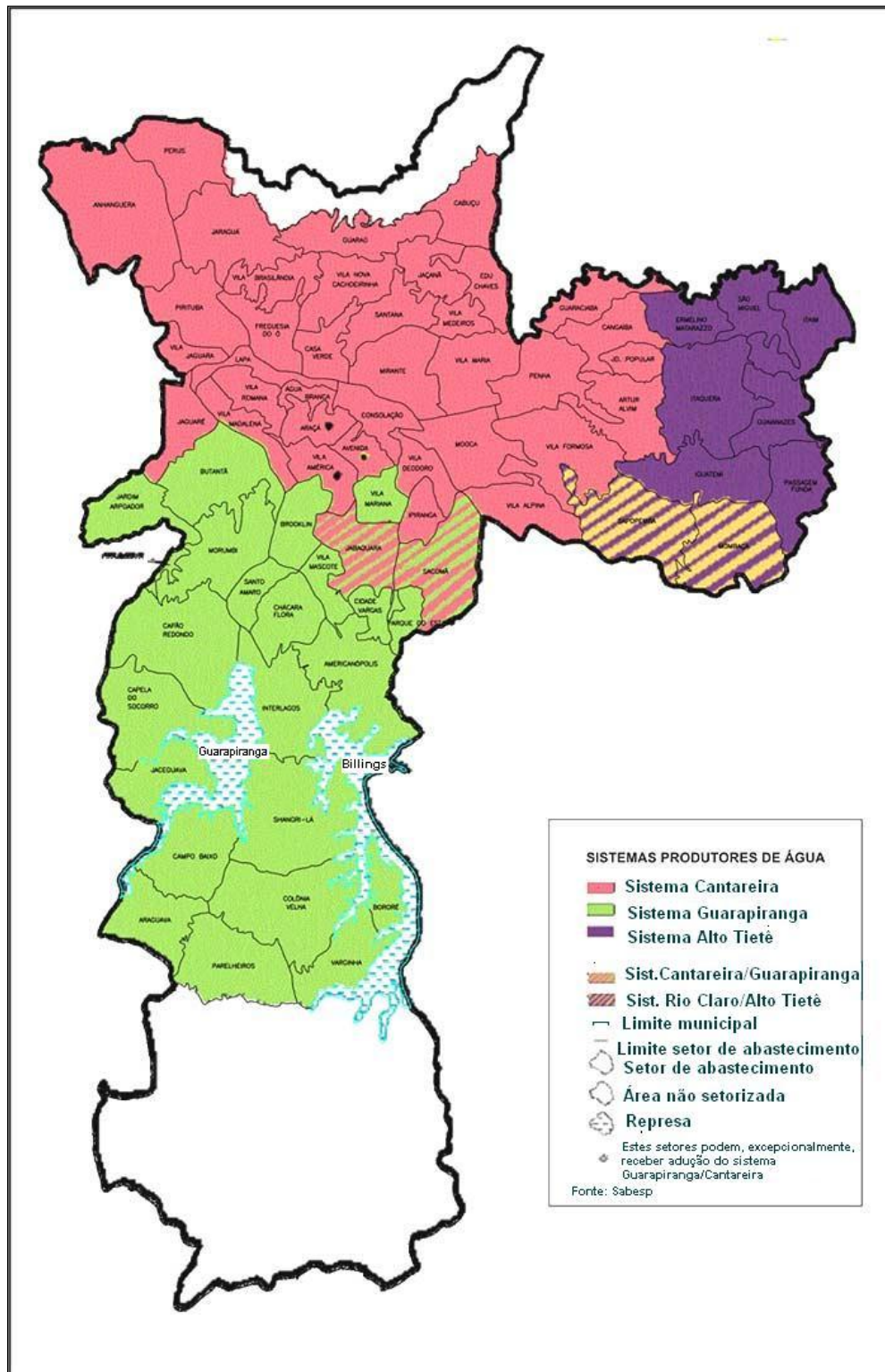


Figura 9: A represa Guarapiranga e a abrangência de seu abastecimento.
Fonte: SABESP.

Quadro 6: Distribuição geral dos chefes de família por faixa de rendimentos.Fonte: IBGE, Censo demográfico 1991 *apud*: FRANÇA, 2000.

<i>Distritos da Bacia do Guarapiranga</i>	<i>Faixa de renda em salários mínimos</i>					
	Até 2	2 a 5	5 a 10	10 a 20	Mais de 20	Sem declaração
Cidade Dutra	23,13%	38,82%	21,04%	9,47%	3,52%	0,54%
Jardim Ângela	27,32%	45,35%	15,32%	2,70%	0,57%	0,75%
Socorro	16,75%	16,20%	24,31%	18,29%	9,99%	0,93%
Jardim São Luís	23,14%	40,72%	2,01%	6,83%	1,83%	0,62%
Parelheiros	33,78%	42,76%	13,39%	3,27%	0,79%	0,99%
Marsilac	41,71%	34,91%	11,52%	3,40%	1,18%	0,97%
População total da Bacia do Guarapiranga	137.318	175.459	80.979	29.026	11.185	3.114
População total do município de São Paulo	2.543.823	3.220.270	1.924.540	1.038.489	676.447	123.857

É importante destacar que o perfil econômico da região caracteriza-a como uma das mais pobres de São Paulo, conforme se pode inferir a partir da renda familiar, em que aproximadamente 70% das famílias da região recebem até cinco salários mínimos.

1.4 Exposição Ambiental

1.4.1 Biomarcadores de Exposição

Biomarcadores de exposição têm sido usados com sucesso na identificação de indivíduos expostos, bem como no acompanhamento da exposição. Chumbo em sangue, ácido mandélico em urina, e benzeno em ar expirado são exemplos de biomarcadores de exposição utilizados para o acompanhamento de trabalhadores ocupacionalmente expostos.

O pré-requisito para o uso de biomarcadores de exposição como indicadores de risco à saúde é o conhecimento da relação entre o biomarcador, o(s) efeito(s) à saúde e sua representação no tempo, isto é, o período de tempo ao qual a exposição se refere (AITIO e KALIO, 1999).

A exposição aos metais é mais comumente monitorada em humanos através de análises de urina, sangue e cabelo, sendo realizadas também medidas em saliva. As vantagens do uso desses biomarcadores é a facilidade de coleta e a existência de técnicas e métodos bem estabelecidos para a mensuração. O problema é o período de tempo ao qual a exposição se refere: as observações feitas em sangue e urina representam exposições muito recentes e não possibilitam conclusões quanto ao que foi efetivamente incorporado. Um acompanhamento periódico pode ser feito, mas os dados relativos a períodos críticos de exposição (por exemplo, durante o desenvolvimento do sistema neurológico) não estariam disponíveis, a menos que se começasse o acompanhamento desde o período gestacional. Além disso, quantidades significativas podem ser incorporadas gradualmente de uma fonte constante, sem que

os níveis do elemento no sangue sejam elevados de maneira alarmante (FREMLIN e EDMONDS, 1980). Cabelo e unhas são considerados indicadores de médio alcance, refletindo um tempo de exposição que vai de poucos meses até alguns anos, para o caso do cabelo, e apresentando maior precisão para as exposições agudas (AITIO e KALIO, 1999).

Para exposições crônicas como as ambientais, no entanto, é necessário buscar marcadores que funcionem como depositores desses elementos com o tempo, pois é a mensuração de sua incorporação efetiva durante os períodos de alta vulnerabilidade que indicará possíveis implicações à saúde. São necessários, portanto, marcadores de exposição de longo alcance.

1.4.2 Estrutura Óssea: um reservatório que contém importantes informações

Radionuclídeos como o Sr se distribuem por todo o corpo, enquanto outros se concentram em determinadas regiões ou órgãos. A estrutura biológica que é capaz de concentrar uma determinada espécie de radionuclídeo é chamada de **órgão crítico**. Nesse órgão, como a concentração de átomos radioativos está aumentada, cresce as chances para que apareçam radiolesões. Alguns radionuclídeos podem depositar-se nos ossos substituindo o cálcio. Entre eles estão o Sr, Ra, Ba, Ce, Pr, Pu e U. Eles são conhecidos como “bone seekers”, pois se ligam à estrutura mineral dos ossos e passam dali, a irradiar a medula óssea, podendo produzir a sua destruição ou então leucemias (GARCIA, 2002).

A estrutura óssea é o grande reservatório de íons do corpo humano. Por sua afinidade iônica e capacidade de mimetizar o cálcio, tanto o chumbo quanto o urânio são acumulados no esqueleto em grandes proporções, quando comparados aos outros tecidos (POUNDS, LONG e ROSEN, 1991).

Os átomos radioativos que se acumulam nos ossos têm, via de regra, meia-vida biológica muito longa. Quanto maior for sua meia-vida biológica e mais lento for seu decaimento, mais lenta também será a sua eliminação do corpo (GARCIA, 2002).

Após a acumulação, que começa durante o desenvolvimento fetal e continua até os 60 anos, estas quantidades representam uma importante reserva para o corpo humano que pode ser mobilizada por estados fisiológicos e patológicos, incluindo gravidez, amamentação, envelhecimento, doenças e osteoporose (POUNDS, LONG e ROSEN, 1991). Nestas condições, a demanda por cálcio no organismo aumenta, e como o mesmo mecanismo responsável pela liberação de cálcio para a corrente sanguínea mobiliza também os metais não essenciais (SANÍN *et al.*, 1998), o esqueleto torna-se uma fonte endógena de chumbo e urânio mesmo depois de cessada a exposição ambiental, causando efeitos adversos em outros tecidos, incluindo o feto em formação. Portanto, medir a quantidade de metais não essenciais em osso é acessar uma informação que está relacionada ao risco que este metal pode causar à saúde desses indivíduos a médio e longo prazo, possibilitando o controle da depuração do elemento no organismo através de intervenções durante os períodos de alteração nas condições fisiológicas.

Quanto maior for o tempo de permanência do radionuclídeo no interior do corpo, maior será a chance para que ocorram radiolesões (GARCIA, 2002).

Apesar da importância da mensuração do metal em osso, dificuldades para a mensuração “in vivo” impossibilitam estudos em grandes populações. Técnicas como a fluorescência de raios-X, que possibilitam testes não invasivos e indolores, e cuja exposição à radiação é equivalente a 10 minutos de exposição ao sol (SANÍN *et al.*, 1998), já estão sendo utilizados na Europa e Estados Unidos. Em 1998 havia cerca de 12 grupos de trabalho utilizando esta técnica, a maioria deles nos EUA. Como esta tecnologia envolve altos custos, ela vem sendo utilizada para estudos em animais e casos de envenenamento em humanos (TODD *et al.*, 2002), não estando disponível para estudos em grandes populações.

1.4.3 Dentes: uma solução para estudo em humanos e grandes populações

Dentes têm sido muito utilizados como bioindicadores de exposição crônica a metais pesados por apresentarem várias vantagens: são de fácil obtenção, principalmente na infância, possuem a mesma estrutura do osso e, portanto, apresentam a mesma afinidade por metais. Além disso, os dentes sofrem menor remodelamento e, conseqüentemente, menor depuração (RABINOWITZ *et al.*, 1993), fornecendo um registro permanente da exposição ao elemento (BERCOVITZ *et al.*, 1993 *apud*: TSUJI *et al.*, 1997). Sua estrutura não homogênea, formada principalmente por esmalte, dentina e polpa, permite uma análise temporal da exposição: quantidades depositadas no esmalte são referentes à época de sua formação, o que, para dentes decíduos, se inicia entre o terceiro e o quinto mês gestacional, dependendo do tipo do

dente (RABINOWITZ, M. *et al.*, 1989 e PINKHAM, J.R.,1991 *apud*: HERNANDEZ-GUERRERO *et al.*, 2004); quantidades encontradas na dentina refletem a exposição gradativa até o período atual, e exposições recentes podem ser avaliadas através de medidas realizadas na polpa.

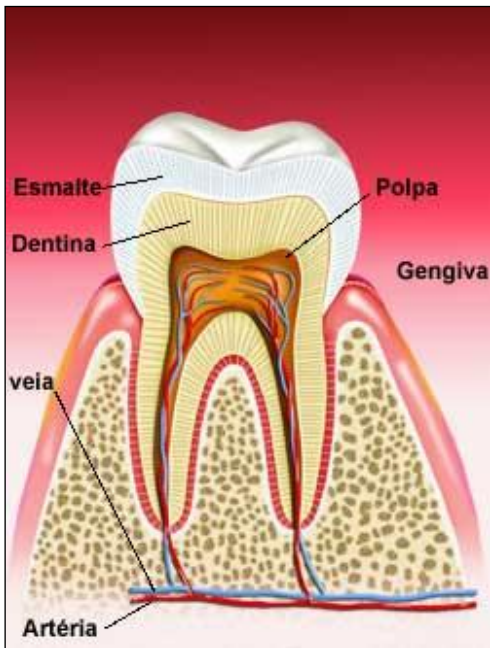


Figura 10: As diferentes partes do dente
Fonte: OLIVEIRA, 2005.

Em estudo comparativo entre os indicadores sangue, cabelo e dente, este último foi considerado o mais preditivo para implicações neuropsicológicas, enquanto que o sangue e o cabelo foram considerados de pouco ou nenhum valor preditivo (BERGOMI *et al.*, 1989).

Para a avaliação dos períodos críticos de vulnerabilidade, ou seja, da época de formação do sistema neurológico, que é de interesse para o nosso estudo, dentes decíduos são, portanto, os melhores indicadores, possibilitando inclusive a quantificação da exposição “herdada” da mãe, com a mensuração do elemento presente no esmalte.

Além disso, podem-se utilizar as semelhanças entre as estruturas do dente e do esqueleto para inferir, através de medidas realizadas no primeiro, quantidades acumuladas no segundo, o que apontará para os riscos efetivos à saúde.

2. O problema e os pressupostos

Em 04 de outubro de 2004, os técnicos que operam a instalação da INB (Indústria Nuclear Brasileira) elaboraram um detalhado relatório técnico onde, ao final, solicitam o fechamento da mina devido às seguintes razões:

1. A escavação é feita num ângulo impróprio e pode levar à desabamentos, oferecendo risco aos trabalhadores.

2. Não há estudo hidrogeológico provando que a água contaminada acumulada nos vãos de escavação não está chegando ao lençol freático, e.

3. A bacia que abriga a água contaminada tem sofrido constantes transbordamentos. Em dez meses houve seis vazamentos. Num deles, a água chegou ao meio ambiente, mas não há estudo sobre o dano que causou, conforme divulgado pela mídia (NASCIMENTO, 2004).

Caetité tem 46.000 habitantes, metade vivendo na zona rural, onde criam gado e plantam mandioca, cana-de-açúcar, feijão e milho. A situação é semelhante em Lagoa Real, onde 80% dos 13.000 habitantes vivem na área rural. Na região há consumo por pessoas e animais de água não tratada de poços e de um riacho que atravessa a área da mina. Caso ocorra liberação de urânio ao meio ambiente em quantidades apreciáveis, esse elemento seria ingerido diretamente através da água contaminada, bem como via toda a cadeia alimentar, inclusive pelo consumo do leite de vacas.

❖ Trabalhos realizados na região indicaram o seguinte:

1. Os níveis de urânio medido nas águas da bacia hidrográfica do Rio do Antônio (município de Brumado, distando 100 Km de Caetité) estavam acima dos níveis estabelecidos pelo CONAMA, (MOREIRA, 2004).

2. O município de Brumado apresentou ocorrência de neoplasias em sua população proporcionalmente maior do que todo o Estado da Bahia (CRUZ, 2004).

❖ As principais e mais relevantes perguntas a serem respondidas por este estudo são:

1. De quanto é a concentração de urânio bioacumulada em residentes do município de Caetité, decorrente de uma provável ingestão crônica desse contaminante presente no meio ambiente e na cadeia alimentar?

2. Por que essa bioacumulação de urânio pela população residente em Caetité e seu entorno pode representar riscos radiobiológicos? e

3. Quais e quão relevantes são os esses riscos?

❖ Os pressupostos de partida deste trabalho são:

1. A ingestão crônica de urânio, dependendo das concentrações ingeridas, pode aumentar consideravelmente a ocorrência de neoplasias.

2. Existe contaminação ambiental (solos, água, vegetais, animais etc) por radionuclídeos;

3. Os humanos via cadeia alimentar, absorvem (intake) e incorporam (uptake) esse contaminante por não dependerem de maior ou menor proximidade em relação à fonte contaminante, uma vez que estão presentes nos alimentos e na água;

4. A estrutura óssea é o órgão alvo mais importante, mas sua monitoração direta em humanos é inviável;

5. Estudos recentes mostraram, pela primeira vez, que a ingestão crônica de urânio, mesmo em pequenas quantidades, acumula-se na medula óssea em níveis

iguais ou maiores àqueles observados na matriz óssea mineralizada (ARRUDA NETO *et al.*, 2004);

6. Uma vez na medula óssea, no raio de alcance das partículas alfa (aproximadamente 200 μ m), encontram-se as importantíssimas células estaminais hematopoiéticas. Torna-se evidente o elevado risco radiológico ao qual ficam expostas estas células, aumentando em muito a possibilidade de ocorrência de neoplasias (HALL, 1994);

7. Através de modelos biocinéticos pode-se estimar a concentração desses contaminantes em ossos e outros órgãos, a partir de sua quantificação em dentes.

3. Objetivos

3.1 Objetivo Geral

Avaliar a contaminação por urânio à qual estão expostas as populações residentes em áreas contaminadas, ou próximas a agentes contaminadores, através da quantificação dos níveis desse elemento em dentes.

3.2 Objetivos Específicos

1. Desenvolver, pela primeira vez no país, metodologia para quantificação de radionuclídeos em dentes humanos como um meio de monitoramento de contaminação ambiental.

2. Quantificar níveis de urânio em amostras de dentes de residentes nos municípios de Caetité, Lagoa Real e Igaporã, no sudoeste da Bahia, utilizando-se a técnica de Espectrometria de Massas de Alta Resolução com Fonte de Plasma Indutivamente Ativado, ICP-MS² (HIRATA, S.; *et al.*,2000).

3. Quantificar níveis de urânio em amostras de dentes de crianças de uma região da periferia de São Paulo, para fins de controle em relação aos resultados a serem obtidos a partir das amostras de Caetité, Lagoa Real e Igaporã.

4. Avaliar a influência da idade dos indivíduos na absorção de urânio.

² Do inglês Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry

4. Procedimento Experimental

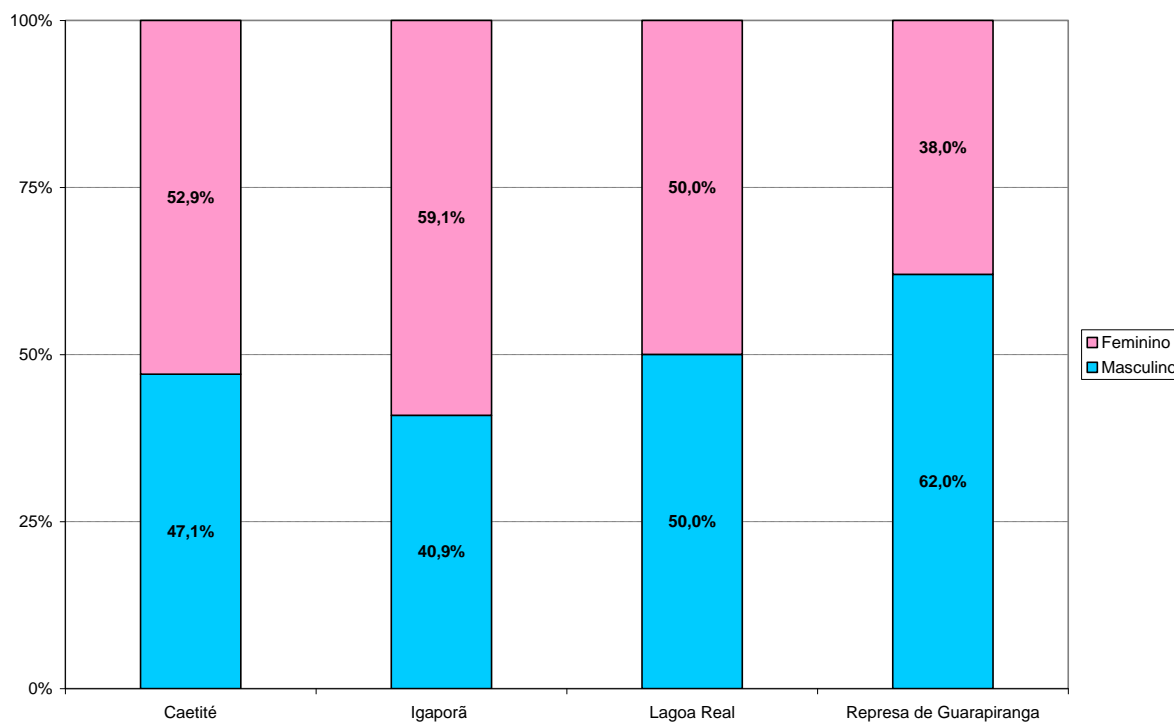
4.1 População estudada

Foram analisados 50 dentes da região controle, Represa de Guarapiranga e 41 dentes das Regiões de Caetité, Lagoa Real e Igaporã.

4.1.1 Coleta dos dentes

Na região controle, Represa de Guarapiranga, a coleta foi realizada na Faculdade de Odontopediatria da Universidade de Santo Amaro (UNISA), que desenvolve um programa de atendimento gratuito à população carente da região de Santo Amaro.

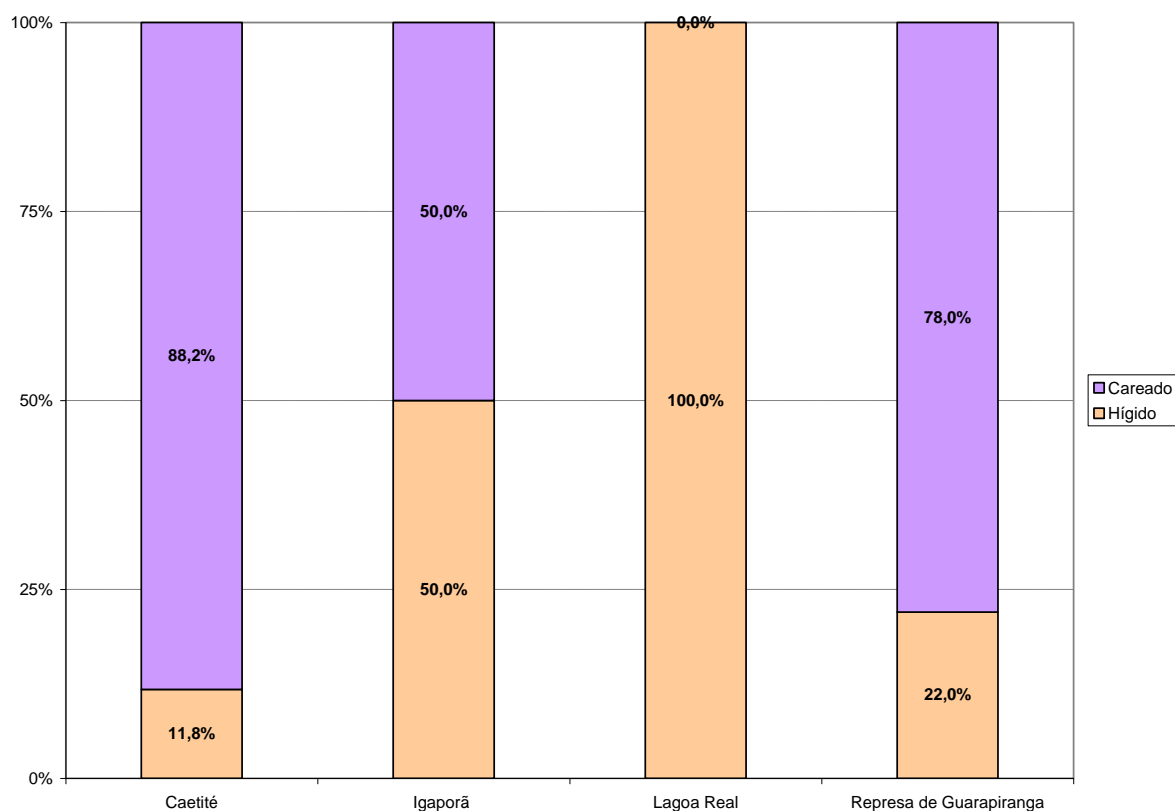
Nas regiões de Caetité, Lagoa Real e Igaporã, a coleta foi realizada por clínicas odontológicas destes municípios que realizam atendimento à população dessas regiões. A partir da exodontia, o responsável era contatado e convidado a participar do estudo através da doação do dente da criança. Adultos também contribuíram com a pesquisa doando dentes. A figura 11 mostra a distribuição das amostras, divididas por sexo e por região.

Figura 11: Percentual das amostras pertencentes às crianças de sexos diferentes.**Tabela 1:** Valores percentuais das amostras pertencentes às crianças de sexos diferentes.

Região	Masculino		Feminino	
	Porcentagem	Quantidade	Porcentagem	Quantidade
Caetité	47,1%	8	52,9%	9
Igaporã	40,9%	9	59,1%	13
Lagoa Real	50,0%	1	50,0%	1
Represa de Guarapiranga	62,0%	31	38,0%	19

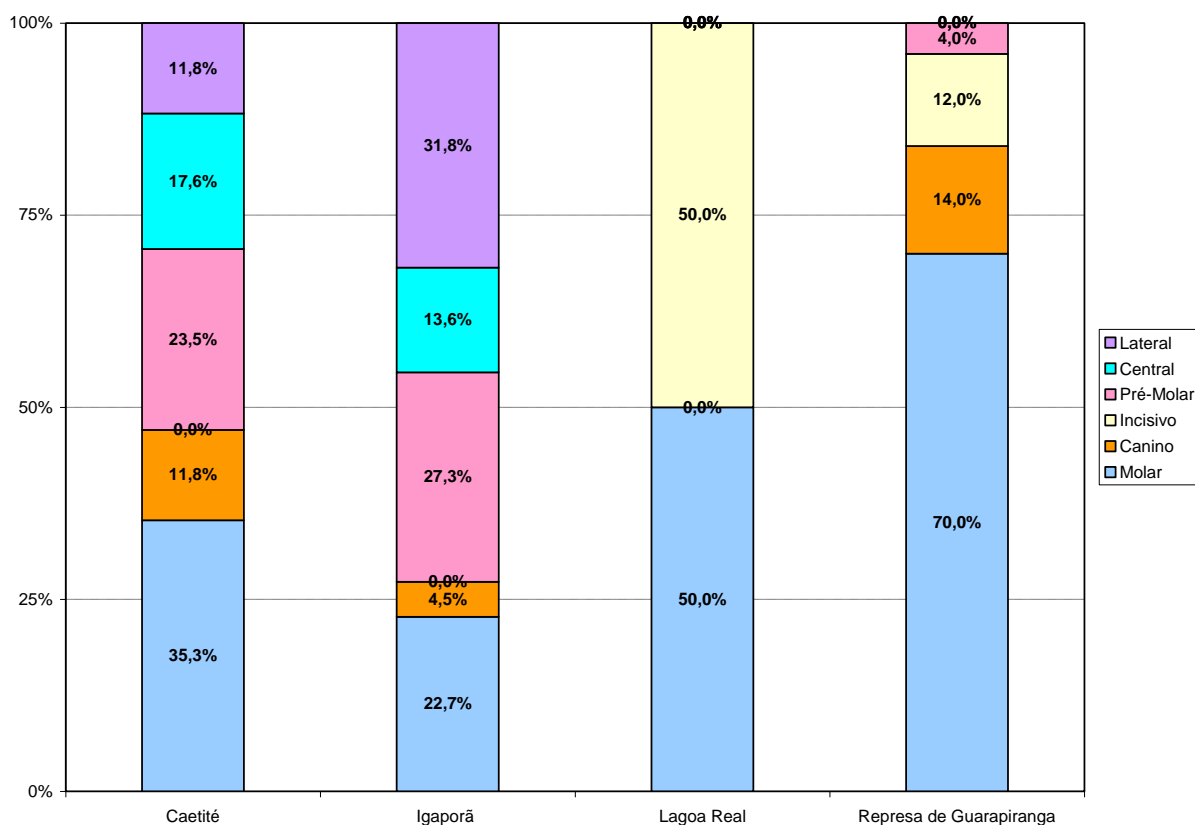
Foi realizada uma entrevista contendo informações que nos ajudasse a traçar um perfil socioeconômico e nutricional, juntamente com a doação formal do referido dente (formulários no apêndice 1).

Informações sobre os motivos da extração e estado dos dentes fornecidos pelo dentista responsável pela extração também foram acrescentadas. Dentes careados e restaurados também foram acrescentados ao estudo, conforme figura 12.

Figura 12: Percentual de dentes coletados.**Tabela 2:** Valores percentuais dos dentes coletados.

Região	Hígido		Careado	
	%	N	%	N
Caetité	11,8%	2	88,2%	15
Igarorã	50,0%	11	50,0%	11
Lagoa Real	100,0%	2	0,0%	0
Represa de Guarapiranga	22,0%	11	78,0%	39

Os dados dos pacientes e dos dentes coletados foram informados pelos dentistas, conforme tabela mostrada no apêndice 2. Diferentes tipos de dentes foram coletados, e suas distribuições são mostradas no figura 13. Alguns estudos relatam diferenças significativas entre concentrações de metais quando medidas em diferentes tipos de dentes (TVINNEREIM, EIDE e RIISE, 2000 e HERNÁNDEZ-GUERRERO, 2004), onde os incisivos apresentaram as maiores concentrações, seguidos dos caninos e dos molares.

Figura 13: Tipos de dentes coletados nas duas regiões**Tabela 3:** Valores percentuais dos tipos de dentes coletados nas duas regiões.

	Caetité		Igaporã		Lagoa Real		Represa de Guarapiranga	
Molar	35,3%	6	22,7%	5	50,0%	1	70,0%	35
Canino	11,8%	2	4,5%	1	0,0%	0	14,0%	7
Incisivo	0,0%	0	0,0%	0	50,0%	1	12,0%	6
Pré-Molar	23,5%	4	27,3%	6	0,0%	0	4,0%	2
Central	17,6%	3	13,6%	3	0,0%	0	0,0%	0
Lateral	11,8%	2	31,8%	7	0,0%	0	0,0%	0

4.2 Materiais e Métodos

4.2.1 Amostras analisadas

As amostras analisadas neste trabalho foram dentes humanos dos municípios de Caetité, Igaporã e Lagoa Real no sudoeste da Bahia e da Represa de Guarapiranga no município de São Paulo.

4.2.2 Balança

Para todas as pesagens realizadas na preparação de amostras e padrões, foi utilizada uma balança analítica modelo BK 600 da Gehaka (Ind. E Com. Gehaka Ltda. SP, Brasil).

4.2.3 Micropipetas

Para a manipulação quantitativa de pequenas quantidades de soluções de amostras e padrões, foram utilizadas micropipetas calibradas, modelo Finnpipette (Labsystems, Helsinki, Finlândia) e LABMATE.

4.2.4 Instrumentação: Reagentes e Soluções

A água utilizada para limpeza, e para a diluição das amostras e reagentes foi destilada e Bi-deionizada em colunas de troca aniônica e catiônica D.P.L.5000FB (DEION, Brasil), em seguida purificada em um sistema de ultrapurificação Milli Q[®] (Millipore, EUA), permitindo a obtenção de água com elevado grau de pureza (18,2 M Ω .cm⁻¹).

O ácido nítrico (Merck, Alemanha) utilizado na preparação das soluções analíticas e na diluição das amostras foi purificado em subdestiladores de quartzo.

4.2.5 Limpeza das Amostras

No laboratório de Química Analítica CNENA-USP, as amostras foram retiradas de seus frascos originais e acondicionadas em tubos de ensaio previamente identificados. A cada tubo de ensaio foi adicionada uma quantidade de peróxido de hidrogênio ultrapuro a 30% v/v suficiente para cobrir a amostra, e colocados em ultra-som por 2 horas, para a remoção dos tecidos moles e resíduos orgânicos. Neste processo foi utilizado o banho ultrassônico (Thornton, USA) de 30 cm de largura, 30 cm de comprimento e 20 cm de profundidade, 250W de potência de ultra-som e frequência de 25 kHz.

Depois disso, cada amostra foi lavada abundantemente com água do tipo Milli-Q[®], para garantir a remoção total do peróxido. As amostras foram então colocadas em capela de fluxo laminar classe 100 para secar por 3 h.

4.2.6 Calcinação

No CNENA-USP, cada dente foi pesado, colocado em um cadinho e levado a mufla modelo 6800 Freezer/Mill (SPEX, USA) que foi utilizada no processo de calcinação. Dez cadinhos foram postos por vez na mufla, cada um com seu respectivo dente identificado. A calcinação foi realizada em aproximadamente uma hora e meia, alcançando uma temperatura máxima de 800°C. Depois de desligada a mufla, foi necessário esperar cerca de 1 hora para que a mufla pudesse ser aberta para a retirada dos cadinhos.

Após a calcinação os dentes foram pesados novamente, separando-se a coroa e pesando-se somente a raiz. As coroas não foram utilizadas pelo fato de em sua

maioria estarem cariadas; desta forma foram excluídas, pois suas fissuras são potencializadores de acumulação de minerais, metais e outros elementos, podendo interferir no resultado do trabalho.

Em seguida, cada raiz do dente foi macerada com a ajuda de um grau com pistilo e sob uma lâmpada de 110 V, cuja finalidade era minimizar a absorção de água do meio, e novamente pesado.

As amostras foram armazenadas em ependorfes e acomodadas em local apropriado para que as etapas seguintes do processo pudessem ser realizadas.

4.2.7 Digestão das Amostras

No Laboratório de Química do Centro de Laseres e Aplicações do IPEN, foi realizada a digestão das amostras para a determinação do conteúdo total de urânio dos dentes. Procedeu-se em primeiro lugar à digestão das amostras em aparelho ultra-sônico (Spex Industries Inc., Edson. New Jersey, USA), que permite a solubilização total das espécies de interesse. Esta etapa é de fundamental importância no procedimento analítico, já que uma digestão incompleta pode resultar em interferências na quantificação dos elementos por falta de homogeneidade e solubilização da amostra, entre outros.

A digestão foi realizada em tubos de polipropileno de 30 mL no aparelho de ultra-som. O procedimento utilizado para a digestão é descrito a seguir:

- foram pesados aproximadamente 200 mg (0,2 g) de cada amostra em tubos de polipropileno descartáveis e esterilizados com volume de 30 mL;
- foram adicionados 2,5 mL de ácido nítrico concentrado Suprapuro (HNO_3), sub-boiling à 2%.

O tubo foi fechado e levado ao banho ultra-sônico à temperatura de 70°C por 1 hora.

- foi adicionado 0,5 mL de Índio na concentração de 10 ppb ($10 \mu\text{g.L}^{-1}$).

O Índio adicionado serviu como padrão interno durante a medida, ou seja, foi um elemento de referência, que não fazia parte da amostra e que foi adicionado em quantidade conhecida, cujo sinal servirá para a correção da influência de possíveis flutuações do equipamento na quantificação dos elementos.

- foi adicionada água deionizada até o volume de 25 mL (resistividade 18.2 mWcm) do tipo Milli-Q[®].

A utilização de ácidos para a decomposição de compostos orgânicos é uma opção descrita na literatura. Soluções diluídas de HNO_3 têm sido empregadas com sucesso em digestões (ZHOU *et al.*, 1996; CHOW *et al.*, 1995; DUGENEST *et al.*, 1998; ARAÚJO *et al.*, 2002).

Após o término do programa, deixou-se esfriar por 15 min. até que a pressão interna dos frascos se aproximasse da pressão atmosférica e os frascos pudessem ser abertos sem nenhum risco de acidentes.

Uma vez concluída a digestão, as amostras foram transferidas para tubos de poliestireno de 30 mL, procedendo-se de tal forma que não restasse nenhum resíduo sólido no tubo original. As amostras foram diluídas com ácido nítrico sub-boiling a 2% v/v até o volume de 25 mL. A amostra foi pesada, e os valores registrados.

A possibilidade de diminuir o volume é um atrativo do ponto de vista de minimizar resíduos e gerar digeridos com concentração ácida final menor, adequados a determinação de elementos no ICP-MS.

Toda a vidraria utilizada neste trabalho foi lavada e em seguida recebeu tratamento para desmineralização, que consiste em imersão por um período de 12h em banho de ácido nítrico 10%. Após esse período, foi feita lavagem abundantemente com água ultrapura.

4.2.8 Mensuração do Urânio das Amostras

A determinação quantitativa de urânio nas amostras foi realizada com a utilização de um espectrômetro de massa com fonte de plasma induzido (ICP-MS), modelo Element 1 Finnigan MAT (Bremen, Germany), instalado no Laboratório do Centro de Laser e Aplicações do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN-CNEN/SP), sob a coordenação do Prof. Dr^o. Jorge Eduardo Sarkis.

O espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado, ICP-MS é uma evolução da espectrometria de absorção atômica, (AAS). Em ambas as técnicas a amostra é nebulizada, ionizada e seus componentes analisados.

No ICP-MS as amostras são introduzidas ao equipamento na forma líquida, e são nebulizadas, porém num forno indutivamente acoplado e com temperatura muito mais alta que na AAS, cerca de 10^4 °C. Nestas condições, os componentes atômicos da amostra são totalmente ionizados. Um quadrupolo eletrostático analisa os íons e classifica-os conforme sua massa atômica. O sinal resultante no ICP-MS são melhores que 1 ppm (ou mg/L para líquidos) para que todos elementos da tabela periódica, chegando a valores menores que 1 ppb (ou µg/L para líquidos) para elementos mais pesados com $Z > 37$ (Montaser, 1998).

No espectrômetro de massa com fonte de plasma induzido, que foi utilizado na determinação de urânio e tório, o sistema é purgado com argônio. O equipamento possui como fonte de íons uma tocha do tipo Fassel, com bobina de indução, sistema de refrigeração e gerador de radiofrequência. O sistema de focalização de íons consiste de dois quadrupolos e lentes de focalização e extração. O analisador de massa tem geometria NIER-JOHNSON reversa, com voltagem de aceleração de 8kV. O sistema de detecção é formado por um diodo conversor de sinal e uma multiplicadora de elétrons secundários (SEM), que opera em dois modos: o analógico, onde os elétrons atravessam 7 diodos, e o modo de contagem, onde os elétrons secundários passam por 19 diodos. Os modos são selecionados de acordo com a intensidade do sinal. Todo sistema é automático e informatizado.

As condições de operação utilizadas são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros de medidas e condições de operação do ICP-MS.

Potência da radio frequência	2200 W
Fluxo da amostra (L.min ⁻¹)	1,0
Vazão de gás de resfriamento (L.min ⁻¹)	15,53
Vazão do gás auxiliar (L.min ⁻¹)	0,8
Vazão do gás nebulizador (L.min ⁻¹)	1,00 - 1,2
Sinal de otimização	Solução de índio 10 ng/g
Modo de detecção	Íon Count
Tempo de medida (ms)	10
Isótopos medidos	²³⁸ U e ²³² Th
Câmara de nebulização	Cinnabar ciclonic 20
Nebulizador	Conical AR40-FC1

Como houve uma boa digestão das amostras, não encontramos a presença de elementos da matriz óssea, que provocasse entupimentos no nebulizador e nos orifícios dos cones. Assim, não houve redução do sinal de contagem durante todo o processo, bem como não ocorrendo paradas para limpeza do aparelho, pois durante toda a contagem o sinal foi suficiente para a mensuração.



Figura 14: Fotografia do ICP-MS
Fonte: PRADO, G.

Na figura 15 apresentamos esquematicamente um ICP-MS e seus principais componentes. No apêndice 3 está detalhes do funcionamento e aspectos técnicos do ICP-MS e no apêndice 4 consta uma tabela como amostra de leitura do ICP-MS para quantificação de urânio e tório para a amostra 1.

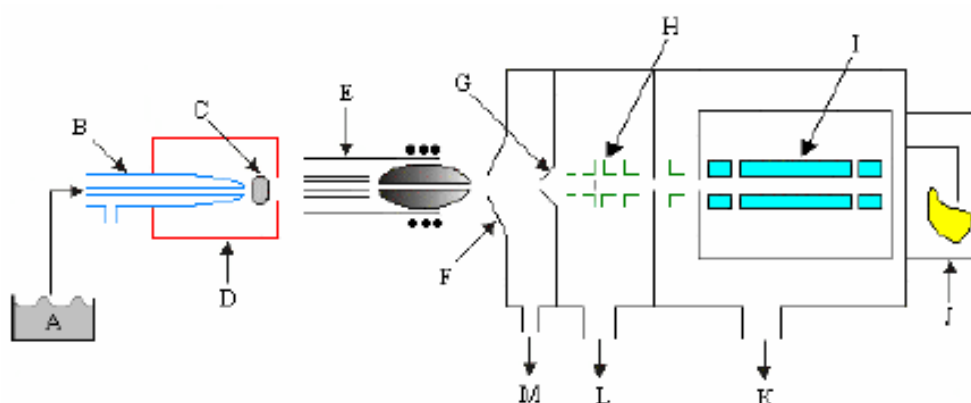


Figura 15: Esquema de um sistema ICP-MS convencional. Onde: A é a amostra líquida; B, o nebulizador; C, o aerossol; D, a câmara de nebulização; E, a tocha de ICP; F, o cone amostrador; G, o cone skimmer; H são as lentes iônicas; I é o analisador de massa; J, o sistema de detecção; K e L são bombas de vácuo turbo-molecular (alcançam vácuo de 5×10^{-9} barr e $< 1 \times 10^{-7}$ barr, respectivamente) e M é a bomba de vácuo mecânica (2×10^{-3} barr).

A rapidez, sensibilidade e capacidade analítica multi-elementar do método ICP-MS faz dessa linha de pesquisa, um poderoso instrumento para compressão da influência do meio ambiente nos sistemas biológicos.

4.2.9 Adição do Analito – Padrões

O método da adição de analito consiste na adição de quantidades conhecidas da substância de interesse que está sendo analisada a quantidades conhecidas da amostra, antes do seu preparo. Estas amostras, como padrão incorporado, são utilizadas na construção da curva analítica, relacionando-se as quantidades da substância adicionada à amostra com as respectivas contagens obtidas. Este método é trabalhoso, mas é especialmente importante quando a amostra é muito complexa, que é o caso de dentes, e quando as interações com a matriz são significativas.

Soluções com concentrações finais de 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,8 e 1,6 $\mu\text{g/g}$ de Urânio foram preparadas a partir de uma mistura feita com aproximadamente 1mL de cada amostra. As amostras digeridas foram analisadas por ICP-MS mediante nebulização direta, utilizando-se as condições experimentais mencionadas na tabela 4.

4.2.10 Brancos

Junto às amostras foram preparados 3 brancos, ou seja, amostras controle específicas para o método de medida utilizado, com a finalidade de monitorar as eventuais contaminações das amostras ocorridas durante a manipulação.

4.3 O Método ICP-MS

4.3.11 Validação do Método

Validar um método é o processo de demonstrar que a seqüência analítica adotada é capaz de produzir resultados confiáveis e reprodutíveis. Dessa forma, um método analítico deve ser submetido a estudos laboratoriais que demonstrem que o mesmo atenda às exigências requeridas pelo tipo de determinação a que se destina.

Para garantir a qualidade dos resultados, todos os fatores que de alguma forma influenciem nas etapas intermediárias do processo devem ser controlados, tais como: verificação da calibração de balanças, micropipetas; o equipamento a ser utilizado nas análises; as condições ambientais para as análises.

4.3.12 Curva analítica

Uma vez que o ICP-MS não dispõe de um modelo físico que descreve quantitativamente a resposta do equipamento com suficiente precisão, a determinação quantitativa por esta técnica requer a construção de curvas de calibração diárias, que serão referência para converter as intensidades registradas nas análises das soluções-problema em concentrações dos respectivos elementos.

Uma curva é gerada com no mínimo 3 pontos, que idealmente devem cobrir o intervalo de concentração esperado nas amostras (portanto, com dois pontos extremos, um menor que a mínima e outro maior que a máxima concentração esperada). Neste trabalho, foram utilizados 6 padrões artificiais, confeccionado no laboratório de Laseres do IPEN. Estes padrões foram obtidos adicionando concentrações elementares diferentes, mostrados na tabela 5.

Tabela 5: Concentração elementar (em ppb) adicionada em cada padrão artificial.

Concentração	Padrão 0,05	Padrão 0,10	Padrão 0,20	Padrão 0,40	Padrão 0,80	Padrão 1,6
Intensidade de sinal	0,10	0,27	0,54	0,86	1,89	3,55

A curva de calibração foi construída no dia das medidas usando a intensidade das curva analítica para o urânio.leituras e a concentração final dos padrões. Na figura 31 está representada a

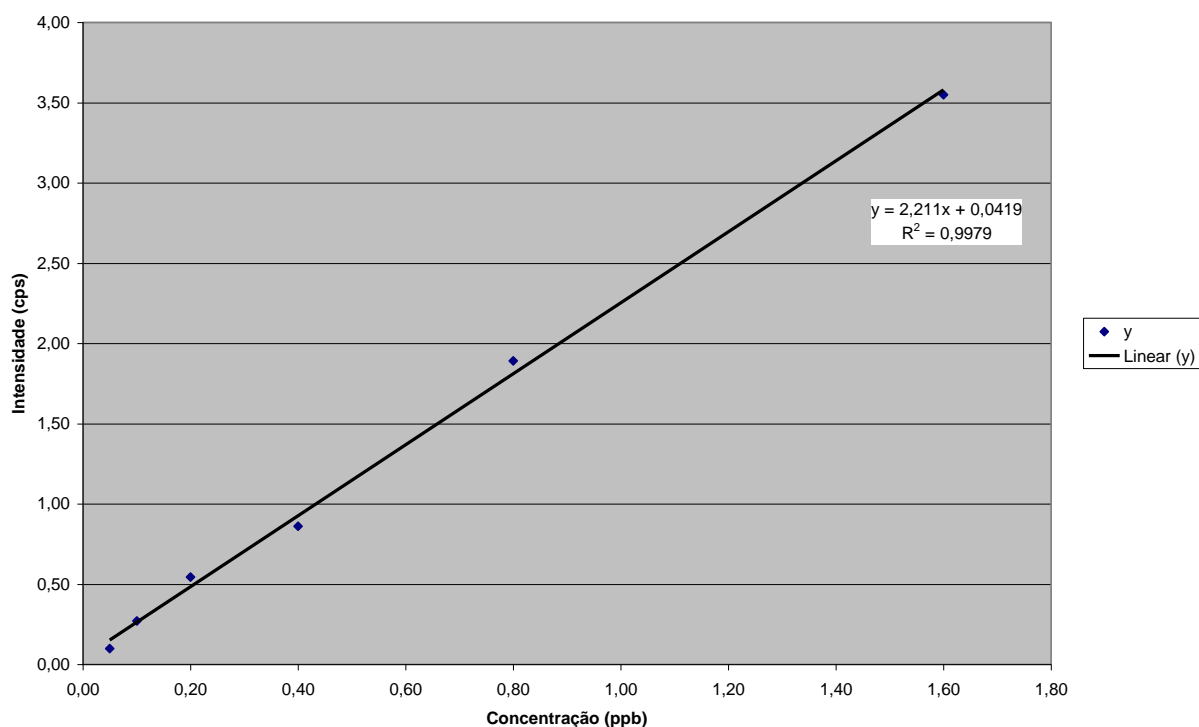


Figura 16: Curva de calibração construída para análise com ICP-MS.

Na tabela 6, consta os valores utilizados na construção da curva analítica de calibração.

Tabela 6: Valores utilizados na curva de calibração construída para análise com ICP-MS.

x	Y
0,05	0,10
0,10	0,27
0,20	0,54
0,40	0,86
0,80	1,89
1,60	3,55

A resposta do ICP-MS deve ser linear com a concentração elementar. Assim, ajustando retas à curva de sensibilidade versus concentração descrita na equação 2, o ajuste se mostra estatisticamente satisfatório como pode ser verificado na figura 16.

$$C = a + bI \quad (2)$$

onde: C é a concentração em ppb, a e b são, respectivamente, os coeficientes linear e angular da reta e I é a taxa de contagens (em cps).

Tabela 7: Isótopo medido nesse trabalho

Isótopo	Padrão	Resolução
Determinado	interno	
U	In	Média

4.3.13 Cálculo de conversão de medidas

Cada dente, com massa M_{dente} , foi incinerado obtendo-se cinzas (M_{cinza}).

As massas M_{dente} e M_{cinza} foram mensuradas em balança analítica com precisão de 0,1 μ g a 0,1 mg. Para cada dente calculamos a razão:

$$k = \frac{M_{cinza}}{M_{dente}}, \quad (3)$$

em que $k < 1$, e $(1 - k)$ representa a fração de água presente no dente original.

Para preparar a solução de entrada no ICP-MS, colhemos uma massa m_{cinza} do total M_{cinza} ($m_{cinza} < M_{cinza}$), em geral igual a 0,2g, e a diluímos em água deionizada até se obter um volume de 25mL. A densidade dessa solução será:

$$\zeta_{cinza} = \frac{m_{cinza}}{25} (g / mL) \equiv \frac{m_{cinza}}{25} (Kg / L) \quad (4)$$

A solução é previamente digerida para degradar a matéria orgânica em frasco fechado. Assim, a massa m_{cinza} altera suas características, mas sem perda de material.

A saída do ICP-MS fornece resultados de concentração C'_u expressos em μg de U por litro de solução de entrada. Então,

$$C'_u (\mu g - U / L) = \frac{m'_u (\mu g)}{V'_{cinza} (L)} \quad (5)$$

em que m'_u é a massa de U (μg) mensurada em V'_{cinza} (L) de solução de entrada aliquotada. A massa m'_{cinza} contida em V'_{cinza} é dada por

$$m'_{cinza} (Kg) = \zeta_{cinza} \cdot V'_{cinza} \Rightarrow V'_{cinza} = \frac{m'_{cinza}}{m_{cinza}} \times 25(L) \quad (6)$$

Substituindo (6) em (5):

$$C'_u (\mu g - U / L) = \frac{m'_u (\mu g)}{m'_{cinza} (Kg)} \times \frac{m_{cinza}}{25} \equiv C''_u \times \frac{m_{cinza}}{25} \quad (7)$$

em que:

$$C''_u = \frac{m'_u (\mu g)}{m'_{cinza} (Kg)}$$

é a concentração de U por unidade de peso de dente seco (cinzas). Mas da equação (3) temos que:

$$C''_u = \frac{m'_u}{k.m'_{dente}} = \frac{C_u}{k}, \text{ em que} \quad (8)$$

$C_u = \frac{m'_u (\mu g)}{m_{dente} (Kg)}$ é a concentração de U por unidade de matéria úmida (dente

antes da incineração). Portanto,

$$C_u (\mu g - U / Kg - dente) = k.C''_u (\mu g - U / Kg - cinza) \quad (9)$$

Exemplo numérico conforme tipicamente executado em nossas medições (indivíduo 1 - amostra 3):

$$M_{dente} = 0,8g$$

$$M_{cinza} = 0,6g$$

$$k = \frac{0,6}{0,8} \cong 0,7.$$

Retirando-se $m_{cinza} = 0,2$ g de M_{cinza} , e avolumando a 25mL com água deionizada, obtemos:

$$\zeta_{cinza} = \frac{0,2}{25} (g / mL) \equiv \frac{0,2}{25} (Kg / L)$$

A saída do ICP-MS para o indivíduo 1 da amostra 3 é $C'_u = 4,0(\mu g-U/L)$, da equação 7, temos que $C''_u = C'_u \times \frac{25}{m_{cinza}} = \frac{4,0 \times 25}{0,2} = 500(\mu g - U/Kg - cinza)$

e da equação 9:

$$Cu(\mu g-U/Kg - dente) = k.500 = 0,7.500 = 350(\mu g-U/Kg - dente).$$

4.3.14 Propagação de erro

Da equação 9:

$$\sigma_{cu} = k\sigma_{c''_u} \tag{10}$$

admitindo-se que o erro em k é desprezível.

Da equação 8:

$$C''_u = C'_u \times \frac{25}{m_{cinza}} \quad (11)$$

mas, $\sigma_{m_{cinza}}$ também é muito pequeno (0,0001). Portanto,

$$\sigma_{c''_u} = \left(\frac{25}{m_{cinza}} \right) \times \sigma_{c'_u} = \frac{25}{0,2} \times \sigma_{c'_u} \quad (12)$$

Finalmente, substituindo (12) em (10):

$$\sigma_{cu} = \frac{k \times 25}{0,2} \times \sigma_{c'} \quad (13)$$

em que $\sigma_{c'}$ é o erro fornecido na saída do ICP-MS.

Os resultados de conversão de medidas e erros estão no apêndice 5.

4.3.15 Quantificação de Urânio

4.3.16 Especificidade

É a habilidade de o método medir apenas o analito de interesse. Em um método quantitativo, este será considerado específico se a resposta obtida para a substância de interesse em presença de todos os demais componentes da amostra, for idêntica aquela obtida para uma solução contendo unicamente a substância de interesse. É essencial, portanto, que a avaliação de “brancos” tanto do padrão como

das amostras seja feita, não só para validação do método, mas também nas análises de rotina. O valor do branco deve ser descontado das medidas, quer seja na zeragem automática do instrumento, quer seja nos cálculos manuais.

4.3.17 Linearidade

Linearidade é a maneira de um método analítico produzir resultados em proporção direta à concentração do analito nas substâncias em estudo em uma dada faixa de concentração. Para isso, é necessário a preparação de uma curva analítica, sendo o eixo “x” a concentração e o eixo “y” da resposta, como por exemplo; intensidade de sinal medido.

A equação da reta que relaciona as duas variáveis é:

$$y = ax + b \quad (14)$$

onde: y = resposta medida (absorbância, altura ou área do pico, etc.);

x = concentração;

a = inclinação da curva de calibração = sensibilidade;

b = interseção com o eixo y, quando x = 0.

A linearidade de um método pode ser observada pelo gráfico dos resultados dos ensaios em função da concentração do analito ou então calculados a partir da equação da regressão linear, determinada pelo método dos mínimos quadrados.

A linearidade de uma função calibração é importante. O cálculo do coeficiente de correlação (r) que expressa a relação de “x” e “y” na curva torna a equação da reta mais consistente e significativa. O coeficiente de correlação linear é

frequentemente usado para indicar o quanto pode ser considerada adequada a reta como modelo matemático. Um valor maior que 0,90 é usualmente, requerido. O método pode ser considerado como livre de tendências (*unbiased*) se o corredor de confiança da reta de regressão linear contiver a origem.

Como os desvios da linearidade são muitas vezes difíceis de serem detectados visualmente, pode-se verificar a sua adequação por meio do cálculo dos resíduos entre os valores medidos e os valores calculados a partir da equação de regressão. Calcula-se o valor de t por:

$$t_{\text{calculado}} = \frac{\text{resíduo}}{Sr/\sqrt{n}} \quad (15)$$

onde : resíduo = $|x_{\text{medido}} - x_{\text{calculado}}|$

Sr = desvio padrão dos resíduos

n = número de pontos

Se o valor de t calculado para um ponto duvidoso de uma curva de calibração for menor ou igual ao valor de t unilateral, para a confiança desejada e $(n - 1)$ graus de liberdade, considera-se que o ponto pertence à curva e a faixa até ele é linear.

4.3.18 Sensibilidade

Esta grandeza depende de quanto o método é capaz de discriminar entre amostras de teores de analito semelhantes. Pode ser expressa pela inclinação da curva analítica ou curva de calibração. A sensibilidade depende da natureza do analito e da técnica de detecção utilizada.

4.3.19 Limite de detecção

O limite de detecção é importante para saber qual o menor valor de concentração do analito detectado em confiabilidade de precisão aceitável, em função do limite do sistema (eletrônica, instrumental, etc), ou seja, do ruído.

O limite de detecção do equipamento (LDE) é definido como a concentração ou quantidade de uma dada substância que produz um sinal ou resposta maior do que $3s$ (onde s representa o desvio padrão de uma série de medidas de branco). Em geral, o LDE é utilizado como guia para o estabelecimento do limite de detecção do método.

O limite de detecção do método (LDM) é definido como a menor concentração do analito na amostra que, quando submetida a todo processo analítico, produz um sinal definido como o limite de detecção do método. É fundamental assegurar-se de que todas as etapas de processamento do método analítico sejam incluídas na determinação desse limite de detecção.

O limite de quantificação (LQ) é a menor concentração do analito em uma amostra, que pode ser determinada com nível aceitável de precisão e exatidão, sob determinadas condições experimentais. Este limite, após ter sido determinado, deve ser testado para averiguar se a exatidão e precisão conseguidas são satisfatórias.

$$LQ = \bar{X} + 10s \quad (16)$$

onde:

\bar{X} = média dos valores dos brancos.

s = desvio padrão dos brancos

4.3.20 Exatidão

A exatidão de um método é definida como sendo a concordância entre o valor médio da concentração da substância no ensaio e o valor de referência da mesma, presente na amostra analisada.

A exatidão sempre que possível, deve ser avaliada através da análise de materiais de referência ou padrões certificados em que o nível da concentração do analito seja o mesmo esperado nas amostras.

Os processos normalmente utilizados para avaliar a exatidão de um método são, entre outros: uso de materiais de referência, participação em comparações interlaboratoriais e realização de ensaios de recuperação.

4.3.21 Precisão

Precisão é um termo geral pra expressar o grau de concordância entre os resultados quando uma mesma amostra homogênea é analisada diversas vezes pelo método em estudo, sob idênticas condições de teste, ou seja, maior será a precisão quanto menor for a amplitude das medidas. É normalmente determinada para as circunstâncias específicas de medição e as duas formas mais comuns de expressá-la são por meio da repetitividade e a reprodutibilidade, sendo usualmente expressa pelo desvio padrão. A intenção em se medir o desvio é buscar uma quantidade que meça a amplitude de variação em torno da média de um conjunto de medidas. O desvio padrão experimental, ou precisão é calculado através da expressão:

$$\frac{1}{n} \sum |x - \bar{x}| \quad (17)$$

onde:

s = desvio padrão experimental

x = resultado individual de cada medida

\bar{x} = média aritmética de todos os resultados

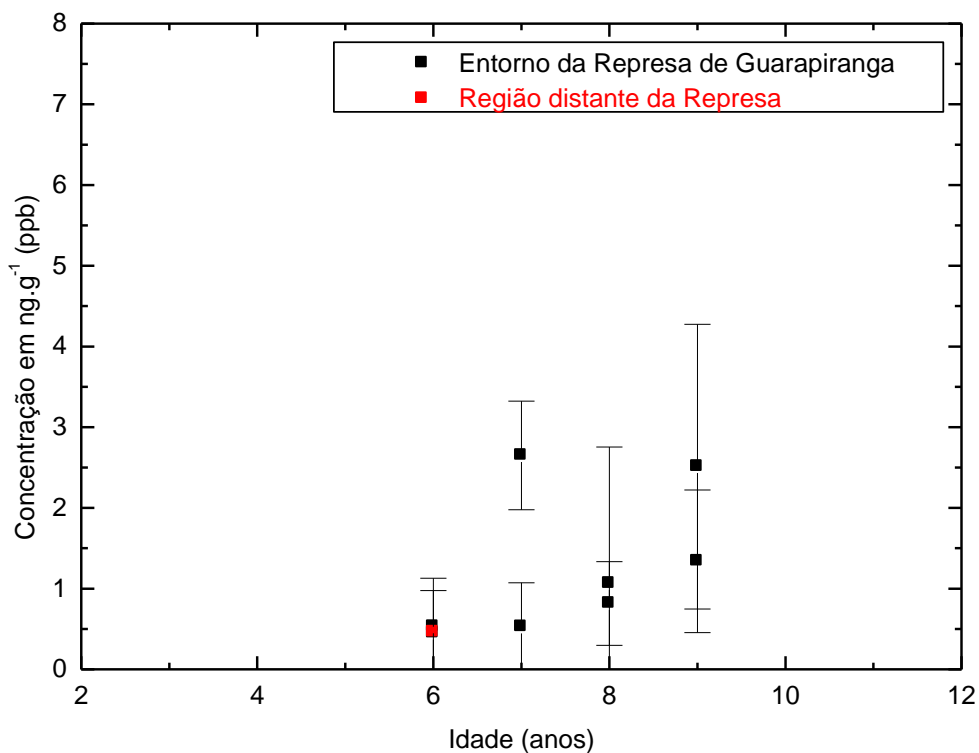
n = número de resultados.

5. Resultados

5.1 Região Controle

Na região controle encontra-se a Represa de Guarapiranga, onde foram coletados um total de 50 dentes de indivíduos de várias idades. As amostras foram processadas da forma usual (Moagem Criogênica e Digestão Ácida), e o urânio foi quantificado com o ICP-MS. Este trabalho faz parte de uma dissertação de Mestrado de uma estudante do grupo e já defendida no PROCAM-USP (OLIVEIRA, M. C. C.).

Figura 17: Concentração de urânio em dentes da Região Controle (Represa Guarapiranga).



5.2 Resultado Global: Caetité, Lagoa Real e Igaporã

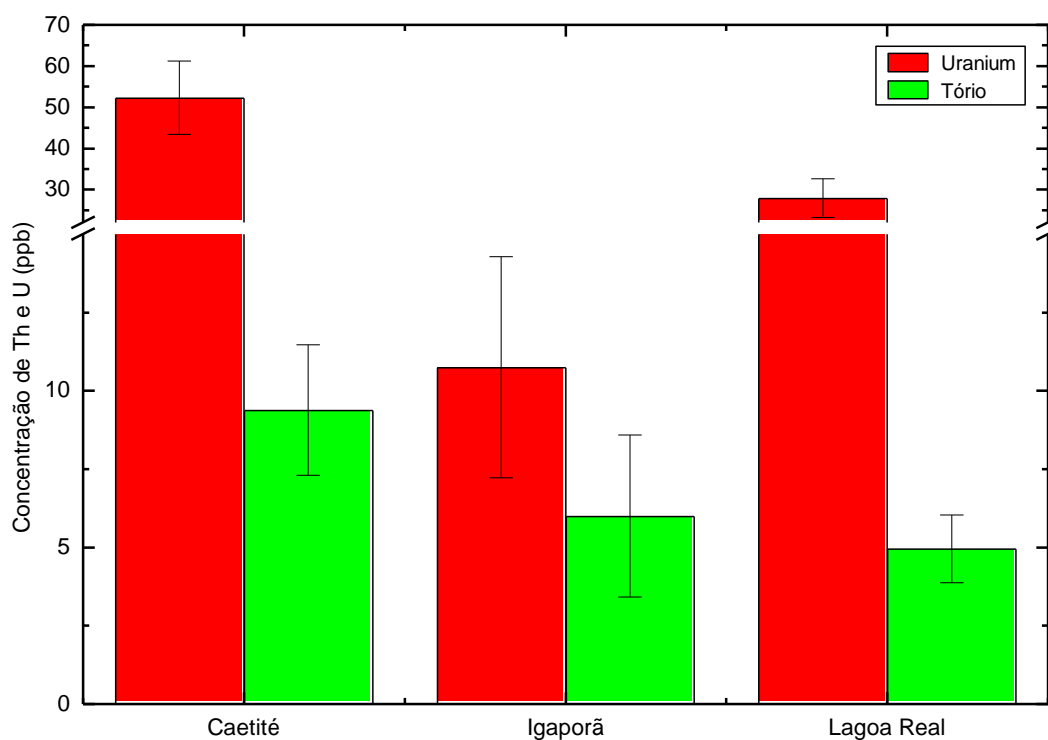
Foram coletados 41 dentes. Destes, 17 de residentes do município de Caetité, 2 de residentes do município de Lagoa Real e 22 de residentes do município de Igaporã, em indivíduos com idades variando entre 5 e 87 anos.

As amostras foram processadas da forma usual, por moagem criogênica e digestão ácida.

Os níveis de urânio foram quantificados utilizando-se a técnica de ICP-MS.

Na figura 33 são apresentadas as médias dos resultados obtidos de amostras coletadas nas 3 regiões estudadas. As médias foram obtidas considerando-se todas as idades.

Figura 18: Média e desvio dos resultados obtidos de todas as amostras coletadas nas 3 regiões do estudo, dados no apêndice 8, tabela 12.



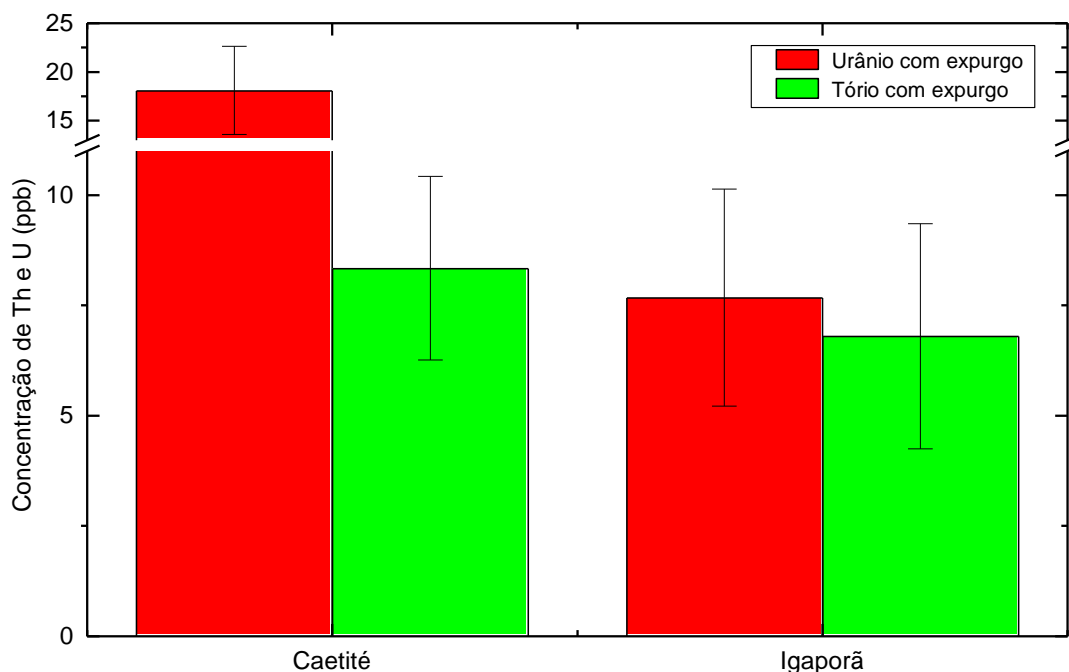


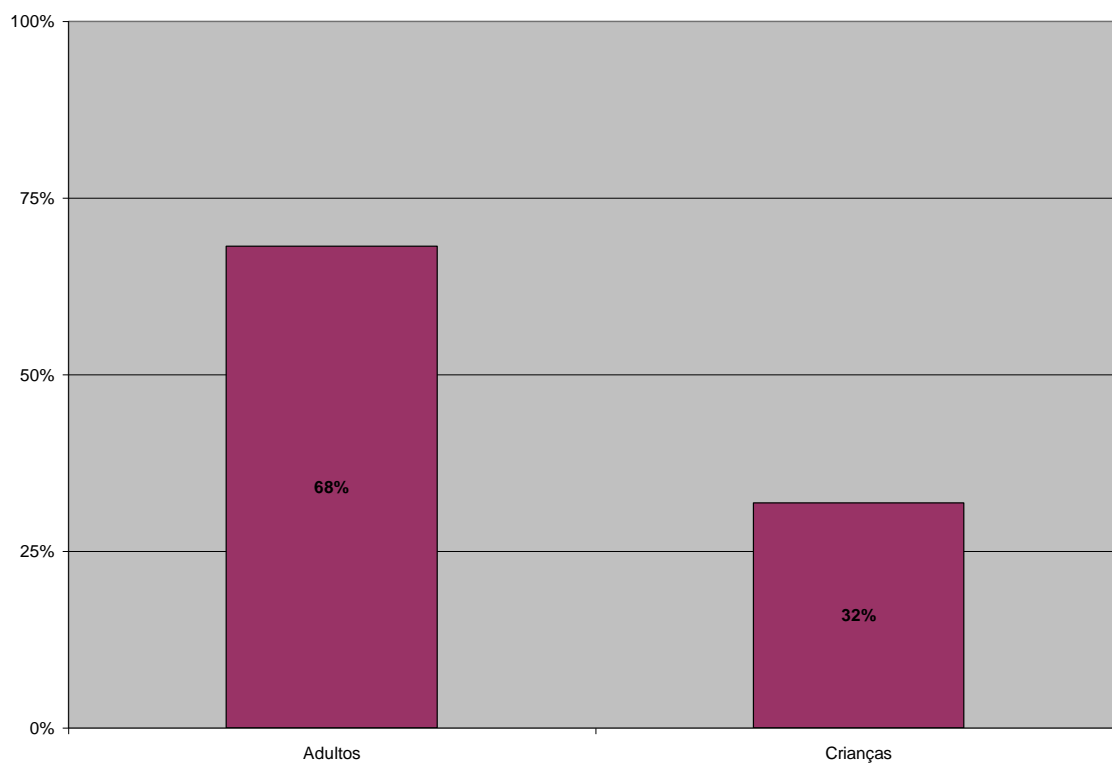
Figura 19: Média e desvio padrão médio dos resultados obtidos das amostras com expurgo, coletadas nas 3 regiões do estudo, dados no apêndice 8, tabela 13.

A figura 16 mostra as médias e desvios dos resultados obtidos expurgando as idades de 7, 15, 31 e 57 anos. Idades que apresentaram muitas flutuações ao longo dos intervalos de todas as idades.

A saída do ICP-MS também forneceu resultados para o tório, porém com concentrações muito inferiores às do urânio. As tabelas correspondentes aos dados mostrados nas figuras 18 e 20 estão no Apêndice 6.

5.3 Análise por idade

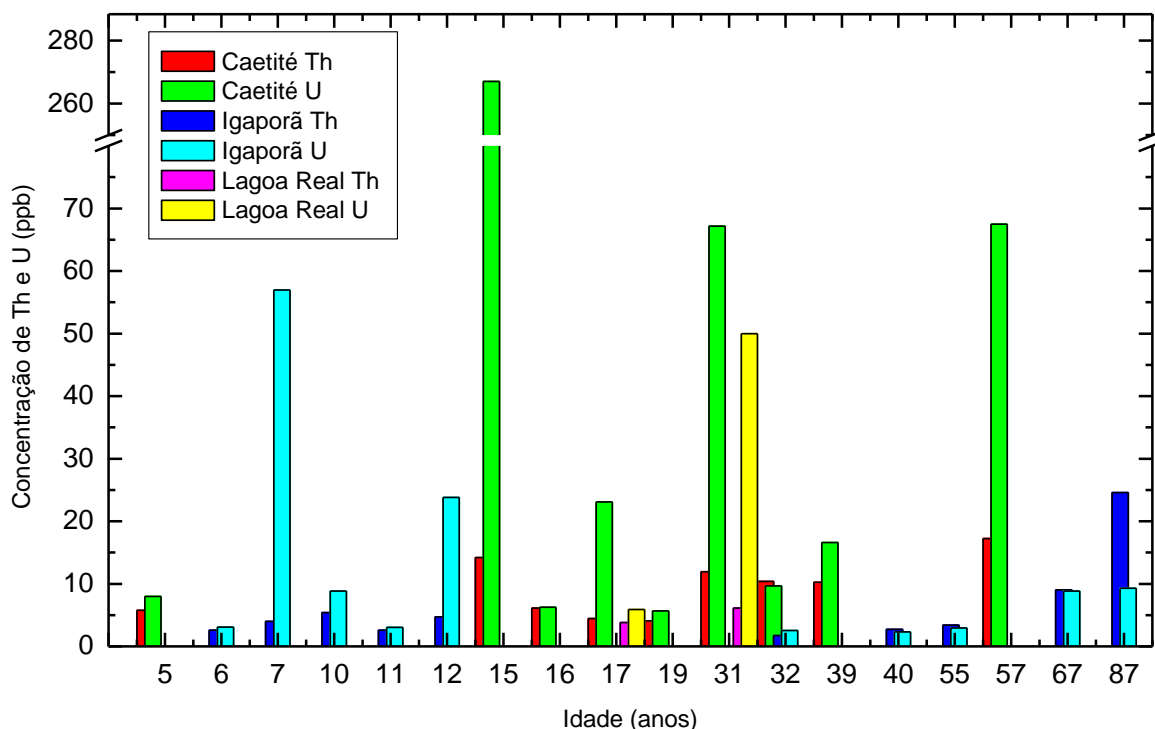
Na figura 20 abaixo está representado o percentual de dentes coletados de crianças e adultos das três regiões em estudo.

Figura 20: Percentagem de dentes de crianças e adultos.**Tabela 8:** Valores percentuais de dentes de crianças e adultos.

Adultos	68%
Crianças	32%

Na figura 36 são apresentados os resultados em função das idades dos indivíduos residentes nas 3 regiões estudadas.

Figura 21: Média das amostras coletadas nas 3 regiões estudadas e discriminadas por idade, dados no apêndice 8, tabela 14.



6. Discussão

6.1 Valores médios comparados com outras regiões

A figura 18 mostra claramente que os residentes de Caetité apresentam, em média, incorporação de urânio bem superior àquelas verificadas para os residentes de Igaporã e Lagoa Real. De fato, a concentração média de urânio medida em Caetité é cerca de **2** vezes maior do que em Lagoa Real, **5** vezes maior ao que foi medido em Igaporã.

A concentração média de urânio medida em amostras da região de controle é igual a **2** ppb. Portanto, constatamos as seguintes relações em comparação com a região de controle:

- a – A concentração de U em Caetité é cerca de **25** vezes maior;

b – Em Lagoa Real a concentração de U é **15** vezes maior e;

c – Em Igaporã a concentração é aproximadamente **5** vezes maior.

A literatura científica relata dados referentes à acumulação de urânio no esqueleto de indivíduos de várias regiões do planeta. Esses dados são fortemente correlacionados com a ingestão diária de urânio via cadeia alimentar, conforme mostrado nas tabelas 9 e 10. Normalizando-se esses dados por unidade de massa de esqueleto, ou seja, convertendo-os em concentração de urânio, obtém-se valores entre **0,2** e **0,6** ppb, para localidades tão diferentes quanto Tóquio e Nova Iorque. Através de um modelo biocinético desenvolvido pelo grupo (discutido no apêndice 7) poderemos estimar as concentrações em esqueleto e outros órgãos de interesse, a partir das medidas em dentes.

Tabela 9: Valores experimentais de urânio referente ao total acumulado em alguns tecidos humanos, e coeficientes de transferência f_i em diferentes países, comparativamente às predições assintóticas do modelo desenvolvido pela ICRP para concentrações de Urânio (transcrito de - GARCIA *et al.*, 2006).

Fonte	Fígado		Rins		Esqueleto	
	U-acumulado, f_i μg [dias] ⁻¹		U-acumulado, f_k μg [dias] ⁻¹		U-acumulado, f_x μg [dias] ⁻¹	
New York ^a ($D_{\text{entrada}}=1,3 \mu\text{g U/day}$)	0.36	0.27	0.13	0.10	6.84	5.26
Pennsylvania ^b ($D_{\text{entrada}}=1,4 \mu\text{g U/day}$)	0.22	0.15	0.12	0.09	7.48	5.34
Utah ^b ($D_{\text{entrada}}= 4 \mu\text{g U/day}$)	0.59	0.14	0.27	0.19	14.75	3.69
Colorado ^b ($D_{\text{entrada}}=4 \mu\text{g U/day}$)	0.54	0.13	0.30	0.08	19.44	4.86
Tokyo ^c ($D_{\text{entrada}}=1,5 \mu\text{g U/day}$)	0.43	0.28	0.10	0.07	6.88	4.58
Valores médios Experimentais	0.19	-	0.10	-	4.74	-
São Paulo ^d ($D_{\text{entrada}}=0,97 \mu\text{g U/day}$)	0.14	0.15	0.064	0.07	4.46	4.59

Os cálculos foram executados de até 60 anos de exposição crônica, com entrada de $0,97 \mu\text{g U/day}$ na cidade de São Paulo.

^a Fisenne and Welford (1986).

^b Singh et al. (1986).

^c Igarashi et al. (1985).

^d Present work.

Tabela 10: Comparação entre as várias taxas estimadas para ingestão diária de Urânio ($\mu\text{g U/day}$) em diferentes países (GARCIA *et al.*, 2006 - transcrito de Uranium levels in the diet of São Paulo City residents)

Country	Total intake ($\mu\text{g U/day}$)	Source of U-Intake
Brazil (São Paulo) ^a	0.97	Valores médios de concentração de U em vários tipos de comida
USA (New York) ^b	1.30	
USA (Chicago) ^c	1.40	
USA (San Francisco) ^c	1.30	
United Kingdom ^d	1.00	
Japan (Yokohama) ^e	0.10	
Vietnam ^f	0.70	
Italy ^g	3.90	Valores médios de comida e água
Poland ^h	1.80	
Ukraine ⁱ	0.60	
Japan ^j	0.70	
Índia ^k	2.20	
Hong Kong ^l	15.30	
France ^m	1.00	
Russian Federation ^m	3.50	
Russian Federation ^m	3.50	
Worldwide ^m	1.30	
Worldwide ^m	1.30	

^aPresent Work.

^bFisenne *et al.* (1987).

^cWelford and Baird (1967).

^dHamilton (1972).

^eKuwahara *et al.* (2001).

^fGiang *et al.* (2001).

^gGalletti *et al.* (2003).

^hPietrzak-Flis *et al.* (2001).

ⁱShiraishi *et al.* (1997).

^jShiraishi *et al.* (1992).

^kDang *et al.* (1992).

^lYu and Mão (1999).

^mUNSCEAR (2000).

Com base nessas verificações, chegamos a algumas constatações:

1 – A região de controle que utilizamos (o entorno da Represa de Guarapiranga) apresentou concentração média cerca de **4** vezes maior do que a média mundial. Isto já era esperado, pois as águas dessa represa são bastante

poluídas, não somente com metais pesados, mas também com detritos de origem industrial clandestina.

2 – Com relação a Caetité verificamos então que a concentração média de urânio medida em dentes de seus residentes (**52,3** ppb) é **100** vezes maior do que a média mundial (**0,5** ppb).

3 – Admitindo-se que a correlação entre urânio incorporado e urânio ingerido seja aproximadamente linear, concluiríamos que em Caetité a sua população ingere **100** vezes mais urânio do que a média mundial. Pela tabela 10 verificamos que a ingesta média mundial de urânio é igual a **1** e **2** μg U/dia, para alimentos e água, respectivamente. Então, em Caetité esses valores seriam superiores a **100** e **200** μg U/dia.

Esta última constatação sobre Caetité enseja a elaboração de um estudo mais aprofundado, e com ênfase em riscos radiobiológicos. Este tema não é contemplado nos objetivos do presente estudo. Contudo, podemos ressaltar um aspecto já explorado na literatura científica: o urânio acumulado nos ossos (cujas concentrações são próximas àquelas medidas em dentes) distribui-se igualmente no osso cortical (matriz mineralizada) e na medula (figura 22). Nesta última encontram-se as extremamente radiosensíveis células hematopoiéticas que ficariam, então, sujeitas à radiação alfa emitida pelo urânio. Lembrando tratar-se de radiação com um dos mais altos LET (*linear energy transfer*), é plausível cogitar-se que os residentes de Caetité estariam sujeitos a apreciáveis riscos radiobiológicos. Nesse sentido, ressaltamos que um estudo epidemiológico realizado em localidade próxima a Caetité constatou a ocorrência de neoplasias em número muito superior ao verificado em todo o estado da Bahia (CRUZ, Z. V.).

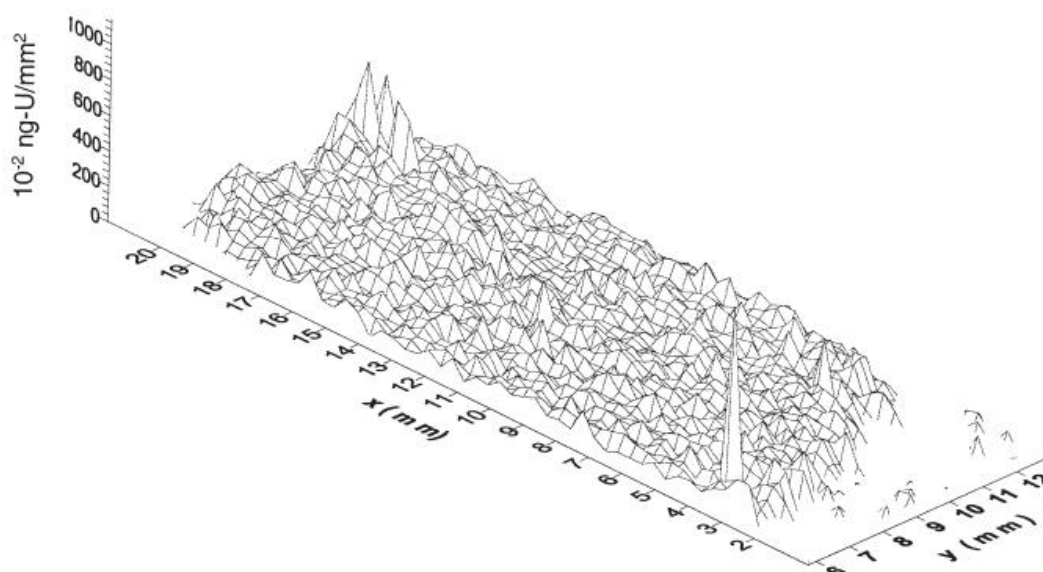


Figura 22: Microdistribuição do urânio na seção transversal do fêmur de Beagles (transcrito de Arruda-Neto *et al.*, 2004). Observa-se que o urânio em toda a extensão da medula com picos próximos ao endóstio.

6.2 Influência da idade na incorporação de Urânio

As concentrações de urânio em função da idade dos indivíduos (figura 21) exibe muitas flutuações ao longo de todo o intervalo de idades. As flutuações mais agudas foram observadas para as idades de **7, 15, 31 e 57** anos, sugerindo portanto que não se trata de um efeito correlacionado com a idade.

Mais interessante, contudo, é o fato de que apenas o indivíduo de **7** anos não reside em Caetité. Ainda, a flutuação mais alarmante refere-se ao indivíduo de **15** anos – os dois dentes doados por essa pessoa apresentam concentrações de urânio semelhantes e com um valor médio de **270** ppb, ou seja, cerca de **500** vezes maior do que a média mundial devendo tratar-se, portanto, de um acidente de superexposição.

Com o intuito de analisar os resultados sem os “acidentes de exposição radiológica”, recalculamos o valor médio de todas as medidas realizadas **expurgando-se** os valores referentes às idades de **7, 15, 31 e 57** anos obtendo-se:

$$\text{VALOR MÉDIO COM EXPURGO} = \mathbf{18,1} \text{ ppb.}$$

Lembrando que

$$\text{VALOR MÉDIO GLOBAL} = \mathbf{0,5} \text{ ppb,}$$

teríamos que em Caetité a média é cerca de **40** vezes maior do que a média mundial. **Sem dúvida, ainda um valor muito elevado.**

6.3 Extrapolação dos resultados em dentes para outros órgãos

No Apêndice 7 apresentamos de forma sucinta o Modelo de Múltiplos Compartimentos (MMC) recentemente desenvolvido por nosso grupo de pesquisa, e que está sendo preparado para publicação.

Os modelos biocinéticos como o MMC possibilitam, de uma maneira geral, obter a distribuição de um determinado contaminante nos órgãos biologicamente mais relevantes, a partir de dados referentes ao regime de ingestão e retenção (*intake* e *uptake*) do material contaminante. No presente estudo, referente à contaminação por urânio, não dispusemos de dados quanto à ingestão e retenção. Mas, por outro lado, o fato de dispormos de informação da acumulação de urânio em um órgão biocineticamente similar ao esqueleto (os dentes), possibilita estimar os limites superiores e inferiores de ingestão diária de urânio pela população estudada. A partir desses limites, e através do mesmo modelo biocinético, calculamos as

concentrações de urânio em outros órgãos, partindo da constatação de que não há diferença biocinética entre dentes e ossos. Os resultados referentes à acumulação de urânio no esqueleto são mostrados nas figuras 23 a 25. Os cálculos foram realizados variando-se o parâmetro de entrada referente à ingestão diária de urânio, sendo que para cada região selecionamos dois valores limite que englobassem os resultados obtidos.

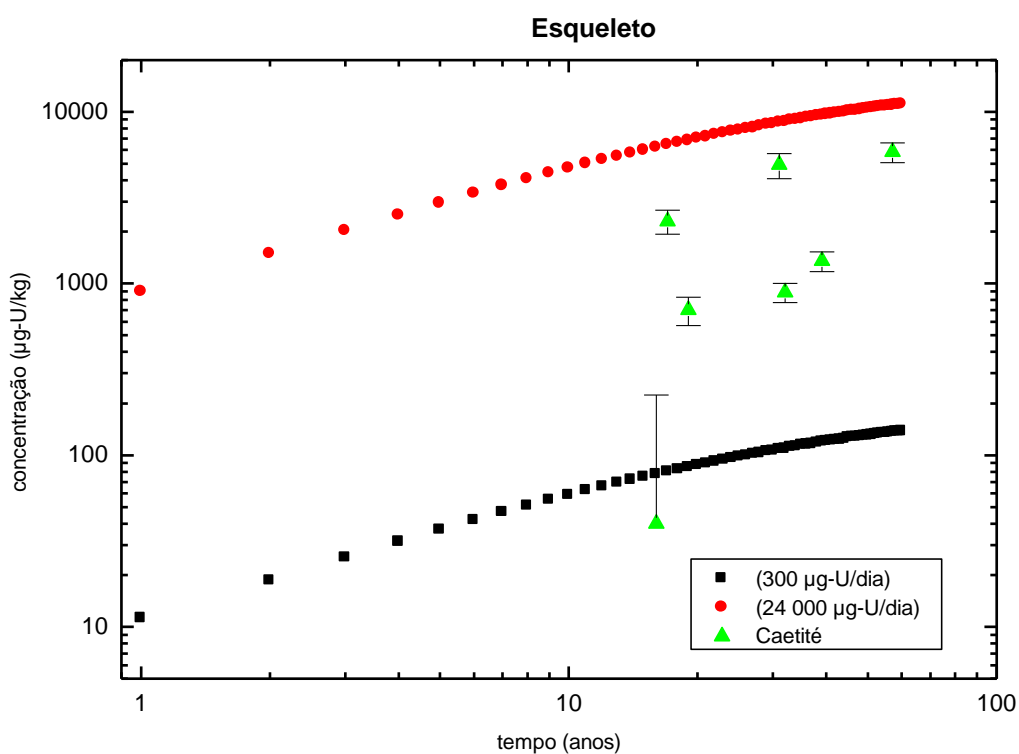


Figura 23: Resultados obtidos a partir do MMC para a acumulação de U em esqueleto, segundo dois regimes extremos de ingestão: 300 e 24.000 ($\mu\text{g-U/kg}$) dia^{-1} . Os pontos experimentais referem-se à concentração de U em dentes de habitantes do município de Caetité-Ba.

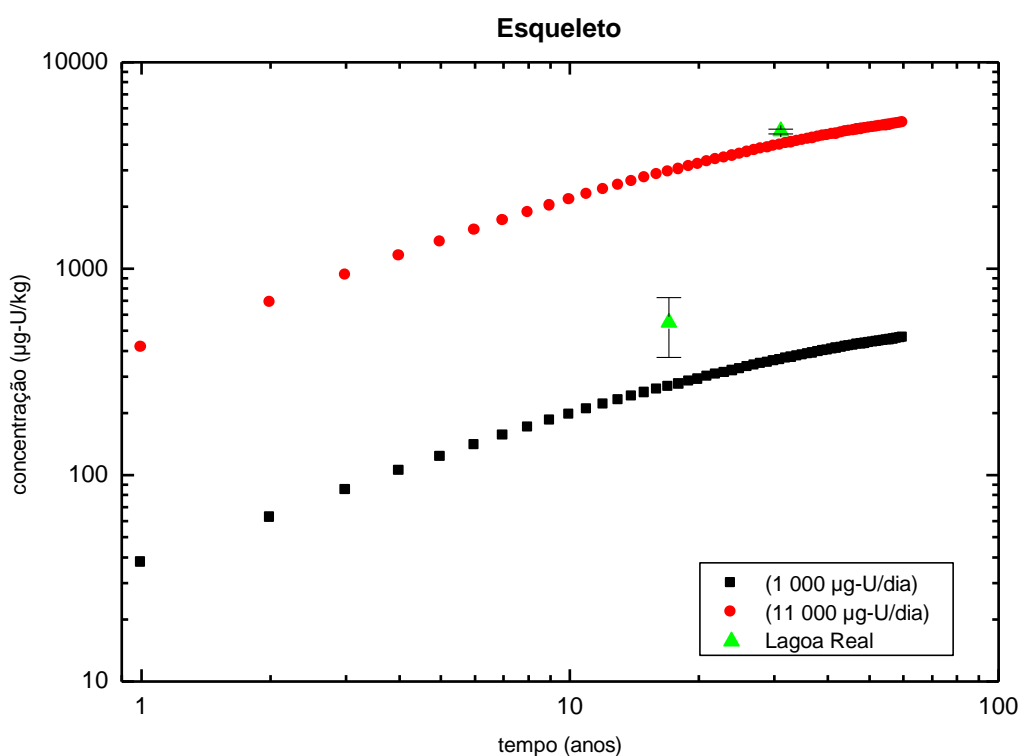


Figura 24: Resultados obtidos a partir do MMC para a acumulação de U em esqueleto, segundo dois regimes extremos de ingestã: 1.000 e 11.000 ($\mu\text{g-U/kg}$) dia^{-1} . Os pontos experimentais referem-se à concentração de U em dentes de habitantes do município de Lagoa Real-Ba.

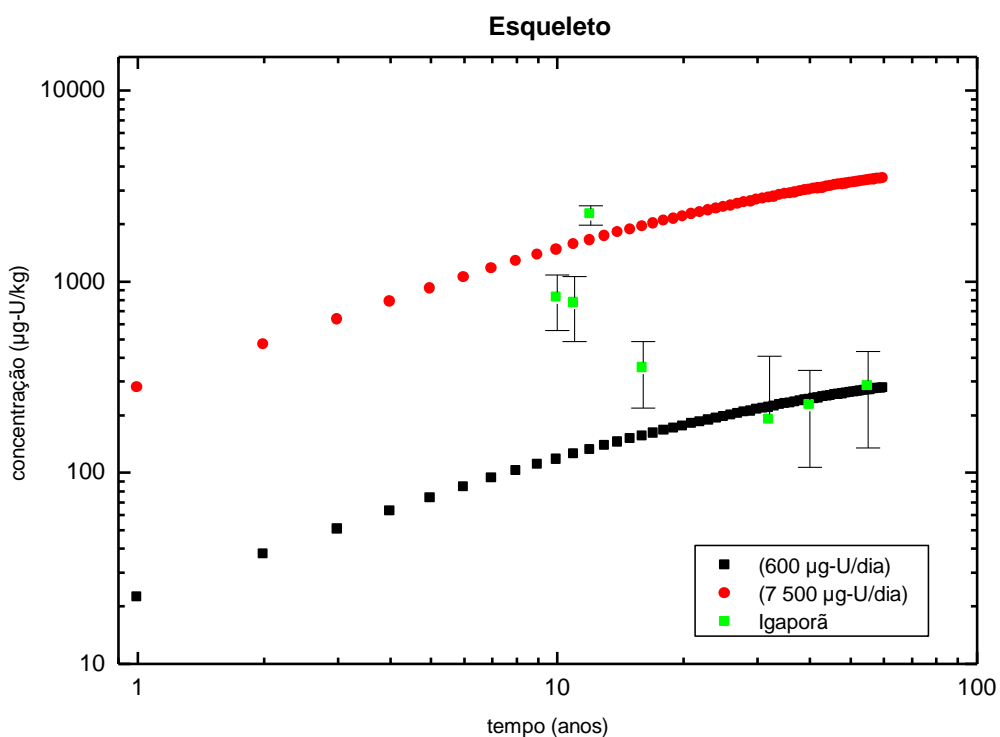


Figura 25: Resultados obtidos a partir do MMC para a acumulação de U em esqueleto, segundo dois regimes extremos de ingestã: 600 e 7.500 ($\mu\text{g-U/kg}$) dia^{-1} . Os pontos experimentais referem-se à concentração de U em dentes de habitantes do município de Igaporã-Ba.

Esses resultados permitem inferir, inicialmente, que:

(1) as 3 regiões estudadas apresentam níveis de contaminação ambiental por urânio bem diferentes;

(2) a grande amplitude entre os limites inferiores e superior para a ingestão diária de urânio indica que, nas 3 regiões estudadas, esse contaminante deve estar heterogeneamente disperso no meio ambiente.

Quanto à ingestão diária de urânio, inferida dos resultados para cada região, obtivemos o seguinte quadro:

a - 0,3 a 24 $\mu\text{g(U)}/\text{dia}$ em Caetité. Ponto médio $\approx 12,2 \text{ mg(U)}/\text{dia}$ – fig. 23;

b - 1,0 a 11 $\mu\text{g(U)}/\text{dia}$ em Lagoa Real. Ponto médio $\approx 6 \text{ mg(U)}/\text{dia}$ – fig 24;

c - 0,6 a 7,5 $\mu\text{g(U)}/\text{dia}$ em Igaporã. Ponto médio $\approx 4 \text{ mg(U)}/\text{dia}$ – fig 25.

Esses resultados são bastante consistentes com o fato de que a maior proximidade com a planta de extração e processamento de urânio (operada pela INB) resulta em maior contaminação ambiental, levando assim os habitantes de seu entorno a ingerirem relativamente mais urânio. Esta foi a situação verificada em Caetité, onde a ingestão de urânio é mais do que o dobro dos valores encontrados nas duas outras regiões mais distantes da planta de processamento da INB, Lagoa Real e Igaporã.

A partir desses limites para a ingestão de urânio, inferidos com o programa biocinético baseado no MMC e utilizando os resultados que obtivemos para dentes (igualando-os ao esqueleto), calculamos via o mesmo MMC as concentrações de urânio em outros órgãos de interesse radiobiológico (ver figuras 26 a 29, para o caso mais relevante que é o de Caetité).

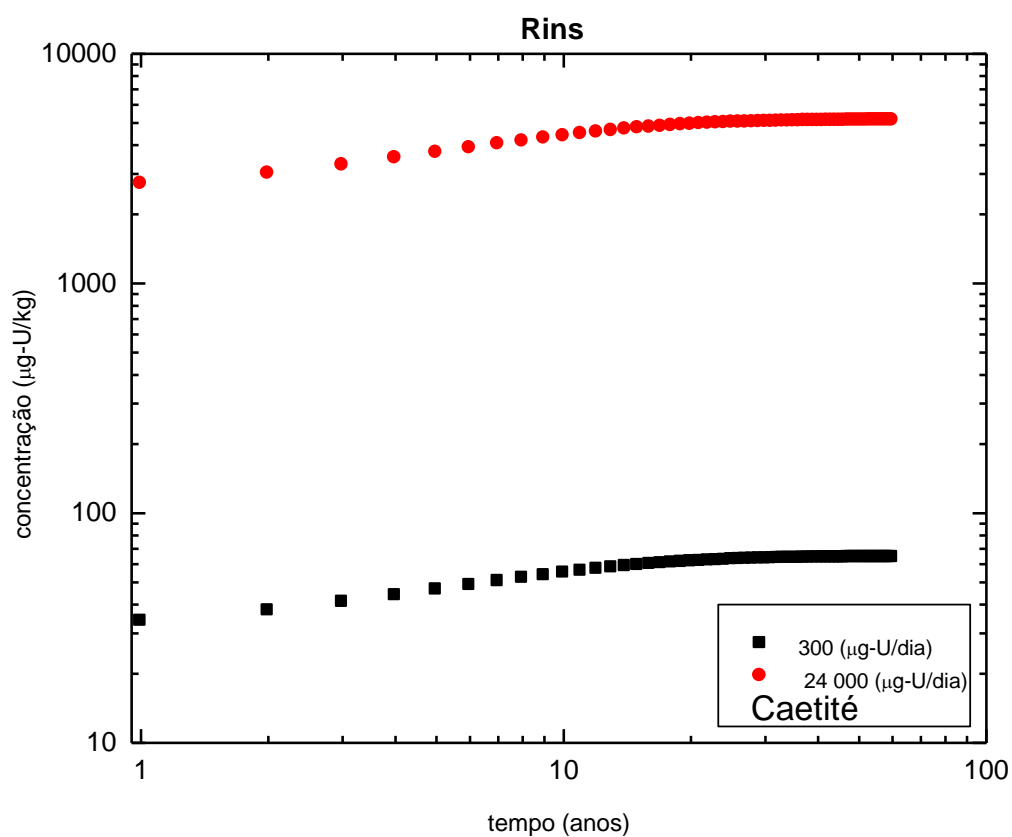


Figura 26: Resultados obtidos a partir do MMC para a acumulação de U em RINS, segundo os dois regimes extremos de ingestão deduzidos, a partir de dentes, para os habitantes do município de Caetité (300 e 24.000 $\mu\text{g-U/kg.dia}$).

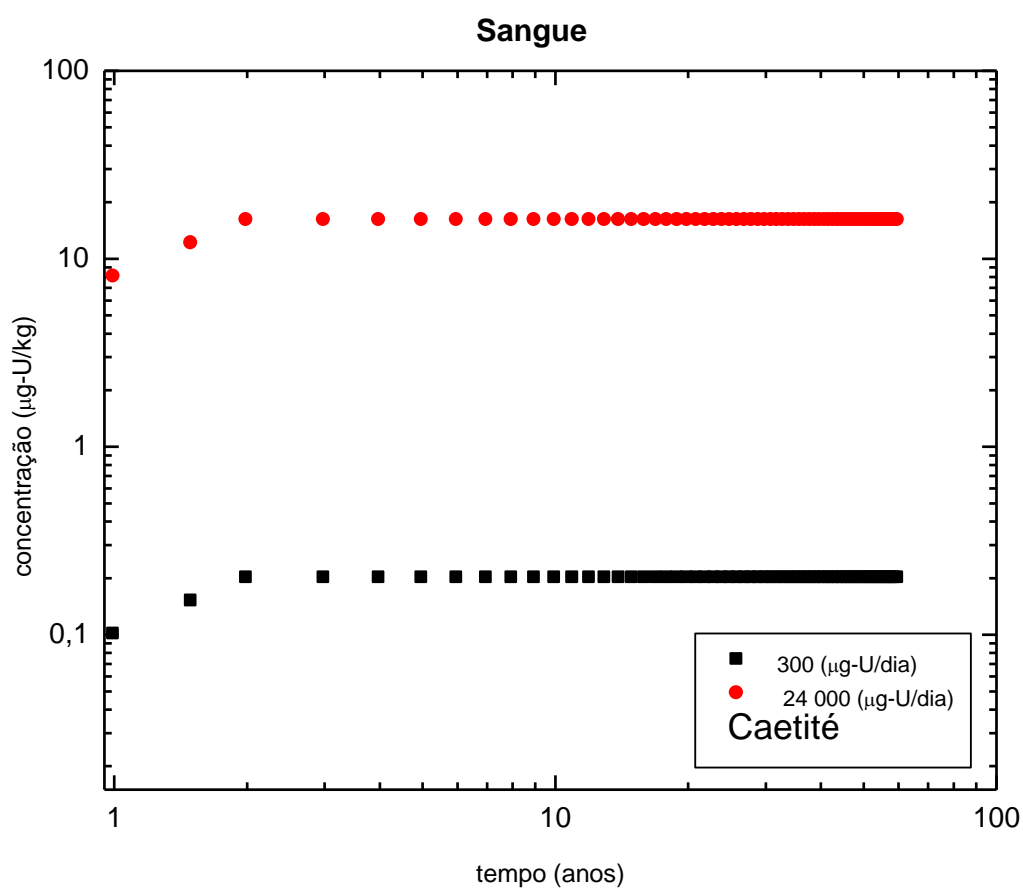


Figura 27: Resultados obtidos a partir do MMC para a acumulação de U em SANGUE, segundo os dois regimes extremos de ingestão deduzidos, a partir de dentes, para os habitantes do município de Caetité (300 e 24.000 $\mu\text{g-U/kg.dia}$).

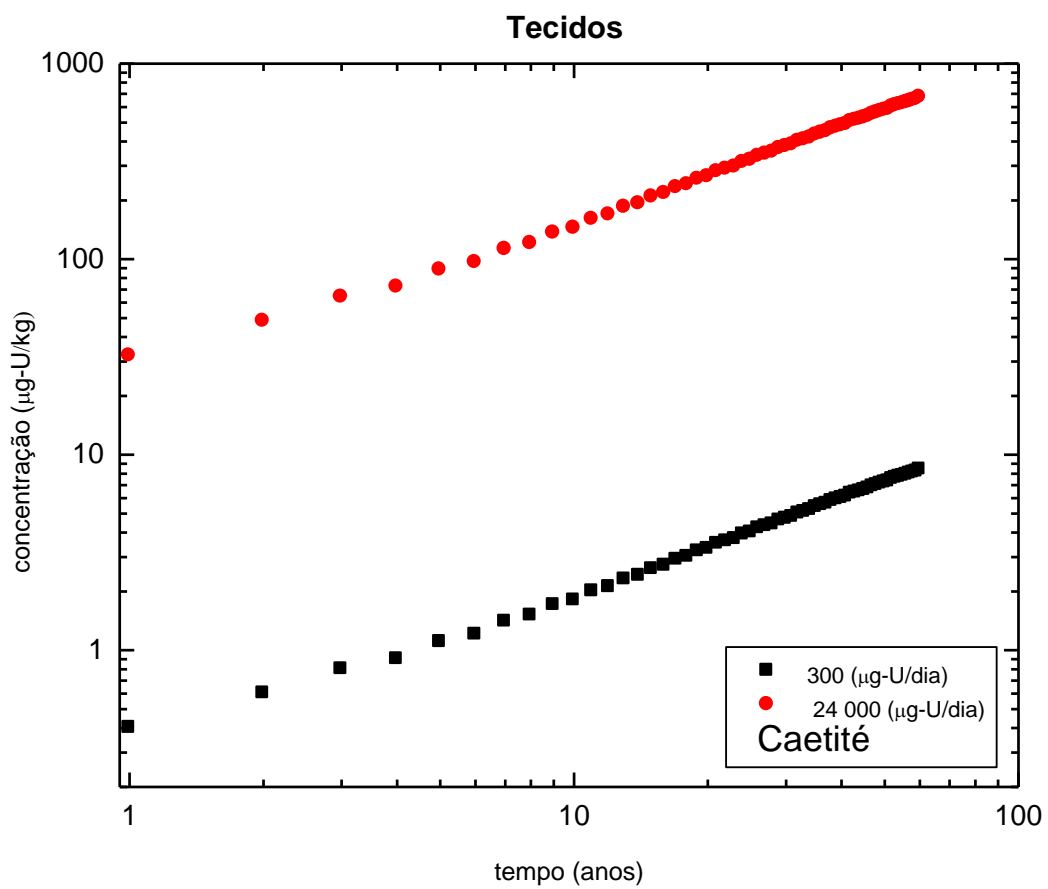


Figura 28: Resultados obtidos a partir do MMC para a acumulação de U em TECIDOS, segundo os dois regimes extremos de ingestão deduzidos, a partir de dentes, para os habitantes do município de Caetité (300 e 24.000 $\mu\text{g-U/kg.dia}$).

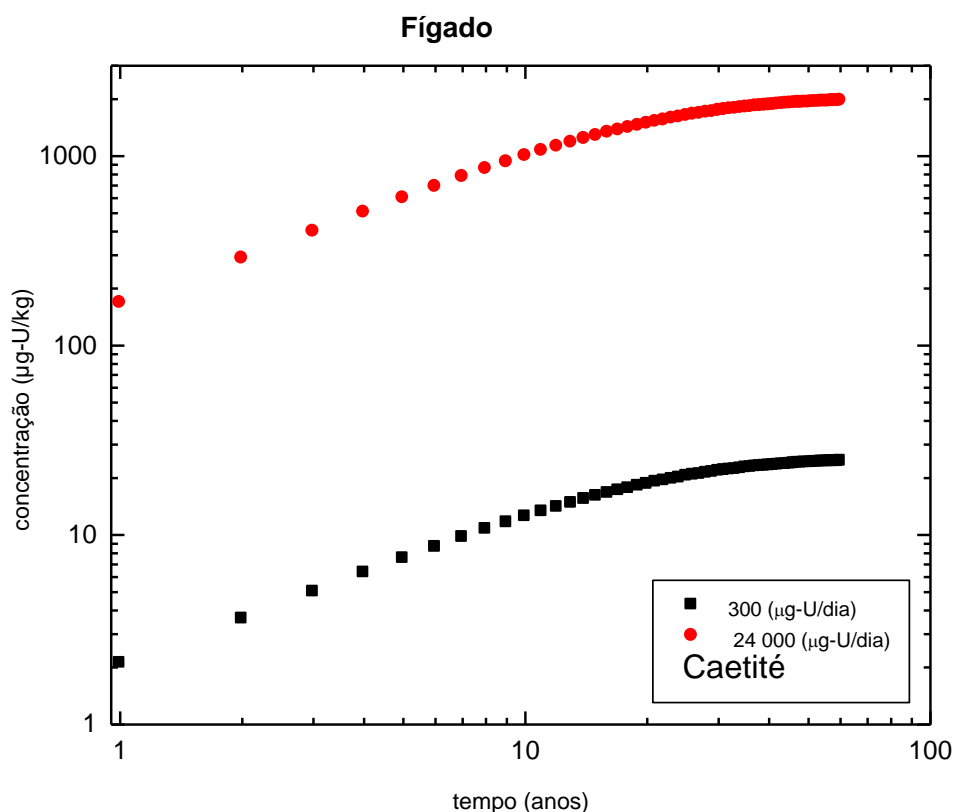


Figura 29: Resultados obtidos a partir do MMC para a acumulação de U em FÍGADO, segundo os dois regimes extremos de ingestão deduzidos, a partir de dentes, para os habitantes do município de Caetité (300 e 24.000 µg-U/kg.dia).

Observamos que depois do esqueleto a maior acumulação de urânio se dá nos rins, saturando a partir de idades iguais e superiores a 10 anos. Essa constatação é grave em decorrência da alta nefrotoxicidade de alguns compostos de urânio, notadamente os sais de uranila. Portanto, além dos riscos radiobiológicos, os habitantes de Caetité também estariam sujeitos aos efeitos toxicológicos em rins.

Por outro lado, a menor concentração de urânio ocorre no sangue e saturando rapidamente a partir dos primeiros anos de vida do indivíduo.

7. Conclusões

1 – Os residentes nos municípios de Caetité, Igaporã e Lagoa Real, devem apresentar índices corpóreos de urânio bastante elevados.

2 – No caso de Caetité a situação é a mais grave, pois a média de urânio incorporado é ordens de grandeza superior à média mundial.

3 – Tendo-se em conta a correlação entre incorporação e ingestão, concluímos que a concentração urânio na dieta de alimentos e água dos residentes de Caetité é igualmente muito elevada.

4 – Neste caso, as populações dessas localidades, e de Caetité em particular, estão sujeitas a riscos radiobiológicos muito superiores aos de populações de outras regiões, tanto no país como no restante do mundo.

5 – A análise via o modelo MMC indica que além dos efeitos radiológicos, os residentes em Caetité estão sujeitos a problemas nefrotóxicos e hepatotóxicos agudos.

6 - Não foi possível estabelecer uma correlação clara entre idade e incorporação de urânio nas regiões estudadas. Recomendamos que esse aspecto seja retomado em um outro estudo, especificamente visando à coleta de dentes decíduos e dentes de adultos, em faixas etárias bem determinadas, e em quantidades que propiciem uma melhor estatística.

7 - O trabalho não indica necessariamente que a contaminação venha da atividade mineradora da usina, uma vez que o solo de toda região é rico em urânio.

8 - Este trabalho constitui a primeira tentativa, em nível nacional, de monitoramento radiológico ambiental a partir de bioindicadores humanos (dentes).

8. Referências Bibliográficas

AGUDO, E. D. **Materiais Radioativos e Radiações Ionizantes**. In: OGA, S. Fundamentos de Toxicologia. 2ed. São Paulo: Atheneu Editora, 2003. p. 474.

AITIO, A e KALLIO, A. **Exposure and effect monitoring: a critical appraisal of their practical application**. Toxicology Letters, v. 108, n. 2-3, p. 137-147, 1999.

AMBIENTE BRASIL – **Ambiente e Energia**. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br>>. Acesso em 24/07/06.

ARGENTIÈRE, R. **Urânio e Tório no Brasil**. Notas sobre a história do Urânio. p. 188, 1990.

ARRUDA NETO, J. D. T. et al. **Concentrations of uranium in animal feed supplements: measurements and dose estimates**. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, v. 221, p. 97-104, 1997.

_____ et al.. **Long-term accumulation and microdistribution in the bone and marrow of beagle dog**. International Journal of Radiation Biology, v. 80, n. 8, p. 567-575, 2004.

ASSIMAKOPOULOS, P. A., IOANNIDES. K. G. and PAKOU. A. A. **A General multiple - compartment model for the transport of trace elements through animals**. Health Physics, v. 61, n. 2, p. 241, 1991.

AZEVEDO, F. ANTÔNIO; CHANSIN, A. A. DA MATTA. **As Bases Toxicológicas da Ecotoxicologia**. Editora RIMA, 2004.

BAHIA – **BAHIAINVEST**. Disponível em: <<http://www.ba.gov.br/>>. Acesso em 17/05/06.

BARBOSA, Christianne. T P; NETO, João A. S. **Distribuição Geoquímica de K-U-Th, Geofísica e Mapeamento Geológico Aplicados ao Zoneamento de Áreas com Radiação Natural, Anômala: Exemplo do Depósito de U-ETR de São José de Espinharas (PB)**. X Congresso Brasileiro de Geoquímica e II Simpósio de Geoquímica dos Países do Mercosul, 2005.

BERGOMI, M. et al. **Relationship between lead exposure indicators and neuropsychological performance in children**. Developmental Medicine and Child Neurology, v. 31, p. 181-190, 1989.

BRILHANTE, Ogenis M. **Gestão e Avaliação da Poluição, Impacto e Risco na Saúde Ambiental**. Editora FIOCRUZ, 1999.

BOLEA, M. & ESTAVAN, T. **Evaluación Del Impacto Ambiental**. Madri: Fundación Mafre, 1984.

CHASIN, A. A. M. ; NASCIMENTO, E. S. ; AZEVEDO, F.A. . Mercúrio. In: Azevedo, F.A e Chasin, AA M,. (Org.). **Metais: Gerenciamento da Toxicidade**. São Paulo: Editora Atheneu, 2003, v. 1, p. 299-352.

CNEN – **Comissão Nacional de Energia Nuclear**. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>. Acesso em 29/05/07.

CNPE – **Conselho Nacional de Política Energética**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/10-Outras_fontes\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/10-Outras_fontes(2).pdf)>. Acesso em 24/05/06.

CORDEIRO, R.; LIMA FILHO, E. C.; SALGADO, P. E. T. **Distúrbios neurológicos em trabalhadores com baixo níveis de chumbo no sangue I: neuropatia periférica**. Revista de Saúde Pública, v. 30, n. 3, p. 248-55, 1996.

CRAIGHEAD, C. **Cancer Incidence Rates in Eddy and Lea Counties**. New Mexico, 1970-1994. Issued: April 6, 1998.

CRUZ, Z. V. **Fatores Ambientais de Risco associados à neoplasias no município de Brumado-Ba**. Ilhéus: Universidade/UESC, 2004.

DECARMO I. M. C. et. al. (1996). **Determination of U and Th isotopes in mineral spring water**. J. Radioanal. Nuclear Chem. Letters. 212 (4), 251-258.

DURAKOVIC, A. **Medical effects of internal contamination with uranium**. Croatian Medical Journal, 40(1):49-66, 1999.

FERREIRA, C., NORDEMANN-MOREIRA, I. M., NORDEMANN, D. J. R. **A radioatividade natural da região de Irecê, Ba**. Revista Brasileira de Geociências, 22 (2): 167-174, 1992.

FRANÇA, E. **O programa de saneamento ambiental e recuperação urbana da bacia do Guarapiranga e a prefeitura de São Paulo**. In: FRANÇA, E. (Coord.). **Guarapiranga: recuperação urbana e ambiental no município de São Paulo**. São Paulo: M. Carrilhos Arquitetos, 2000. p. 19-37.

FREMLIN, J. H. e EDMONDS, M. I. **The determination of lead in human teeth**. Nuclear Instruments and Methods, v. 173, p. 211-215, 1980.

FURUSAWA, H. A., **Razão Isotópica de Enxofre em Material Atmosférico por ICP-MS de Alta Resolução**, Tese de doutorado, Instituto de Química, USP, São Paulo, 1999.

GARCIA, E. A. C. **Biofísica**. 2^o reimpr. da 1^o edição, 2002. Sarvier Editora.

GARCIA, F., BARIONI, A., ARRUDA-NETO, J. D. T., DEPPMAN, A., MILIAN, F., MESA, J., RODRIGUEZ, O. **Uranium levels in the diet of São Paulo City residents**. Environment International v. 32, p. 697-703. 2006.

GOYER, R. A.; CLARKSON, T. W. **Toxic effects of Metals**. In: Klaassen, C. D. (Ed.). Casarett and Doull's Toxicology: the basic science of poisons. New York: McGraw-Hill, 2001. p. 811-837.

GUERRA, A.T. **Dicionário Geológico – Geomorfológico**. 3^o edição, 1990. Fundação IBGE.

GUEVARA, M. V. M., **Estudo da incorporação de urânio em osso de ratos Wistar e cães Beagle, utilizando técnicas nucleares**. São Paulo: Universidade/USP, 2002.

HALL, E. J., 1994, **Radiobiology for Radiologist**, 4th edn. (Philadelphia, Lippincott).

HERNANDEZ-GUERRERO, J. C. et al. **Lead levels in primary teeth of children living in Mexico City**. International Journal of Paediatric Dentistry, n. 14, p. 175-181, 2004.

HIRATA, S.; *et al.* **Hematopoietic stem cells differentiate into vascular cells that participate in the pathogenesis of atherosclerosis**. Nature Medicine v. 8, p. 403-409, 2002.

IBGE - **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Sistema de Recuperação automática – SIDRA, Censo 2000. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/default.php>>. Acesso em 15/05/06.

ICRP (1969). **Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 3 Ingestion Dose Coefficient**. ICRP Publication 69. Elsevier Science Ltd, Oxford. July 1994.

INB – **Indústria Nuclear Brasileira**. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/caetite.asp>>. Acesso em: 17/05/06.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL (ISA). **Guarapiranga: diagnóstico socioambiental participativo preliminar da bacia hidrográfica do Guarapiranga**. São Paulo, 1996, p.37.

IRD (Instituto de Radioproteção e Dosimetria) – CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), 2000. **Radioatividade natural: tecnologia humana aumenta risco de exposição**. Ciência Hoje, p. 36-41.

LEDVINA R. et. al. (1996). **Uranium, thorium and some other elements in topsoils of the Trebon region from the aspect of production contamination**. Rostlina Vyroba 42(2), 73-78.

MARQUES, A. L., GERALDO, L. P., SANTOS, dos W. **Níveis de Radioatividade natural decorrente do radônio no complexo rochoso da serra de São Vicente, SP**. Radiologia Brasileira. 2006; 39 (3): 215-218.

MC LEON, J. A., Minnich, M. G., Iacom, L. A., Luil, H. e Montaser, A., **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 13, 829-842, 1998.

MONTASER, A., **Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry**, USA, (1998).

MOREIRA, A. S. **Estudo da poluição inorgânica no rio do Antônio e avaliação do risco à saúde pública na população do município de Brumado-Ba.** Ilhéus: Universidade/UESC, 2004.

MULLER, R. M. L. **Esquema de Funcionamento do ICP-MS.** IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2007.

NASCIMENTO, S., Revista **VEJA**, 20 de outubro, 2004, p.130.

NONLUX, W.S. **Primary pulmonary neoplasms in domestic animals.** Southwestern Veterinary Journal, 6:131-134, 1952.

OLIVEIRA, M. C. C. **Estudo da exposição ambiental a metais e radionuclídeos em crianças do entorno da Represa de Guarapiranga.** São Paulo: Universidade/USP, 2005.

PASCHOLATI, E. M. Silva, C. L. Costa, S. S. Osako, L. S. Amaral, G. Rodriguez, I. P. **Novas ocorrências de urânio na região de Lagoa Real, a partir da superposição de dados geofísicos, geológicos e de sensoriamento remoto.** Revista Brasileira de Geociências. Vol. 33 (2-Suplemento), p. 91-98, 2003.

PASCHOLATI, E. M., AMARAL, G., OSAKO, L. S. 1997. **Environmental radiation patterns of the Lagoa Real Uranium District, Bahia, Brasil.** In: V Cong. Intern. Coimbra: Associação Portuguesa de Geólogos, 6p.

PEREIRA, A., NEVES, L. 2003. **Geologia e radioatividade natural na região de Beiras.** In: XXII Curso de actualização de professores de Geociências. Coimbra: Associação de Geólogos, 6p.

PEREZ D. V. et al. (1998). **Total concentration of uranium and thorium in some Brazilian soils.** Pesquisa Agropecuária Brasileira 33 (88), 1417-1423.

PMC – **Prefeitura Municipal de Caetité, Bahia.** Portal de Caetité. Disponível em: <<http://www.caetite.ba.gov.br/dadosgeograficos.htm>>. Acesso em: 11/05/06.

PAVAN, C., et al. **A Energia Atômica e o Futuro do Homem.** 3ed. Local: Companhia Editora Nacional. 1968, v. 17.

POTTS, P. J., A Handbook of silicate Rock Analysis, **Blackie Academic & Professional**, 1987.

POUNDS, J. G.; LEGGETT, R. W. **The ICRP age-specific biokinetic model for lead: validations, empirical comparisons and explorations.** Environmental Health Perspectives, v. 106, suppl. 6, p. 1505:1508, 1998.

PRADO, G. R. Fotografia do ICP-MS. UESC – Universidade Estadual de Santa Cruz, 2007.

RABINOWITZ, M. B. et al. **Lead metabolism in the normal human: stable isotope studies.** Science, v. 182, p. 725-727, 1993.

REBELO, A.M.A, BITTENCOURT, A.V.L., Mantovani, L.E., Rossi, T.B. 2003. **Pedogeochemical models on prognosis and control of radon fluxes from humid tropical landscapes over granite.** Environmental Geology, 44:158-168.

REIMANN C. et. al. (1996). **Radon, fluoride and 62 elements as determined by ICP-MS in 145 Norwegian hard rock groundwater samples.** The Science of the Total Environment. 192, 1-19.

SABESP. **Sistema de Captação e Tratamento da região metropolitana – São Paulo.** São Paulo, s/d. Disponível em : www.sabesp.com.br Acesso em jan. 2005.

SANÍN, L. H. et al. **Acumulación de plomo en hueso y sus efectos en la salud.** Salud Pública de México, v. 40, n. 4, p. 359-368, 1998.

SAR - **Sociedad Argentina de Radioproteccion.** Boletin. Buenos Aires, 1989.

TEREPKA, A. R., Toribara, T. Y. and Neuman, W. F. (1964). **Skeletal Retention of Uranium in Man.** Abstract 22, 46th meeting of the endocrine society, San Francisco, C. A, (ver pp. 206-207 de Hursh e Spoor, 1973).

SANTOS, S. B. **Elementos traço em soro sanguíneo medidos pelos métodos PIXE e ICP-MS.** Dissertação de Mestrado, São Paulo/USP, 2007.

SKOOG, D. A., HOLLER, F. J. e NIEMAN, T. A., **Princípios de Análise Instrumental,** Bookman, 2002.

TEIXEIRA, W., TOLEDO, M. C. M., FAIRCHILD, T. R. e TAIOLI, F. **Decifrando a Terra.** USP, 2000.

TODD, A. C. et al. **Measurements of lead in human tibiae: a comparison between K-shell x-ray fluorescence and electrothermal atomic absorption spectrometry.** Physics in Medicine and Biology, v. 47, n. 4, p. 673-687, 2002.

TSUJI, L. J. S. et al. **Elevated dentine lead levels in adult teeth of first nation people from an isolated region of northern Ontario, Canada.** Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, v. 59, p. 854-860, 1997.

TVINNEREIM, H. M.; EIDE, R.; RIISE, T. **Heavy metals in human primary teeth: some factors influencing the metal concentrations.** The Science of the Total Environment, v. 255, p. 21-27, 2000.

ULRICH, J. C., **Determinação de Impurezas em Compostos de Urânio por meio da Técnica de Espectrometria de Massas de Alta Resolução com Fonte de Plasma Indutivo (HR-ICPMS),** Dissertação de Mestrado, IPEN, São Paulo, 2001.

WIKIPÉDIA – **Enciclopédia Viva.** Caetité. Disponível em : <http://pt.wikipedia.org/wiki/Caetit%C3%A9#Imagens>>. Acesso em 15/05/2006.

WHO/SDE/PHE/01.1. 9 (2001). **Depleted Uranium, sources, exposure and health effects.** WHO, Geneva.

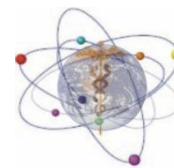
YAMAZAKI, I. M.; GERALDO, L. P. **Uranium content in phosphate fertilizers commercially produced in Brazil.** Applied Radiation and Isotopes, v. 59, p. 133-136, 2003.

Apêndice 1: Questionários aplicados aos responsáveis pelas crianças participantes do estudo e termo de consentimento de doação do dente.



Universidade Estadual de Santa Cruz

Núcleo de Física Médica e Ambiental



Coleta de Dados

Para o colaborador:

Nome: _____

Endereço: _____

Telefone para contato: _____

Mora em Caetité desde: _____

Onde morou anteriormente: _____

Bairro onde mora: _____ Mora desde: _____

Data de Nascimento: _____ Profissão: _____

Grau de Escolaridade: _____

Em casa, bebe água: Mineral Filtrada Encanada

Para o dentista:

Dente extraído: _____

Motivo da extração: _____

Estado do dente: _____

Observação: _____

* No caso de crianças ou adolescentes, preencher termo de consentimento, profissão do responsável.

Universidade Estadual de Santa Cruz

Núcleo de Física Médica e Ambiental. Torre Central 3º Andar

Campus Prof. Soane Nazaré de Andrade, Km 16 – Rodovia Ilhéus/Itabuna

Cep: 45662-000 – Ilhéus-Bahia-Brasil

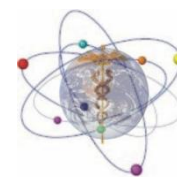
Fone: (73) 680-5044 - Fax: (73) 680-5230

E-Mail: fimed@uesc.br homepage: www.uesc.br/fimed/index.htm



Universidade Estadual de Santa Cruz

Núcleo de Física Médica e Ambiental



TERMO DE CONSENTIMENTO INFORMADO

Ilhéus, _____ de _____ de 20____

Eu, _____ autorizo a utilização do dente extraído por motivos ortodônticos do meu filho menor _____, matrícula nº _____ para fins de pesquisa acadêmica, que avaliará a presença de metais pesados e radionuclídeos em dentes humanos, e será realizada em colaboração com Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP) e a Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC).

O objetivo deste estudo é medir a quantidade de metais pesados e radionuclídeos em dentes humanos, avaliando os riscos que estes podem acarretar à saúde.

A participação na pesquisa se dará através da doação do dente, e de uma entrevista, a ser realizada posteriormente. Esta participação não oferece risco à criança, e a recusa na participação não acarreta em qualquer tipo de penalização ou perda de benefícios que esta esteja recebendo no ambulatório médico.

Assinatura do responsável pelo paciente

RG nº _____ CPF: _____

Apêndice 2: Perfil da população estudada.

Lista de Abreviaturas utilizadas:

dir.	direito
esq.	esquerdo
F	feminino
M	masculino
inc.	incisivo
lat.	lateral
sup.	superior
inf.	inferior
incomp.	incompleto

Tabelas de identificação dos dentes com o perfil da população estudada.

Região de Igaporã: Crianças								
Indivíduo (nº)	Amostra (nº)	Idade	Sexo	Tipo do dente	Estado do dente	Região	Responsável	
							Profissão	Escolaridade
3	9	7	M	canino	careado	Igaporã	estudante	Alfabetização
	10			central	hígido			
4	11	6	M	molar	careado	Igaporã	estudante	Alfabetização
	12			molar	careado			
5	13	12	F	molar	careado	Igaporã	estudante	6º série
6	14	7	F	pré-molar	careado	Igaporã	estudante	Alfabetização
7	15	11	M	central	hígido	Igaporã	estudante	-
	16			central	hígido			
8	17	10	F	pré-molar	careado	Igaporã	estudante	4º série
	18			pré-molar	careado			
	19			Molar	hígido			

Região de Igaporã: Adultos								
Indivíduo (nº)	Amostra (nº)	Idade	Sexo	Tipo do dente	Estado do dente	Região	Responsável	
							Profissão	Escolaridade
1	1	67	M	lateral inferior	hígido	zona rural de Igaporã	lavrador	1º série do fundamental
	2			2º molar superior	hígido			
2	3	40	F	1º pré-molar	careado	Igaporã	doméstica	4º série do fundamental
	4			2º pré-molar	careado			
	5			Lateral	hígido			
	6			lateral inferior	hígido			
	7			lateral inferior	hígido			
	8			lateral superior	hígido			
9	20	87	F	Lateral	careado	Igaporã	dona de casa	analfabeta
10	21	55	M	Lateral	hígido	Igaporã	professor	2º grau completo
11	22	32	F	2º pré-molar	careado	zona rural de Igaporã	doméstica	4º série

Região de Caetité: Crianças								
Indivíduo (nº)	Amostra (nº)	Idade	Sexo	Tipo do dente	Estado do dente	Região	Responsável	
							Profissão	Escolaridade
16	32	5	M	central inferior	hígido	Caetité	Estudante	Primário

Região de Caetité: Adultos								
Indivíduo (nº)	Amostra (nº)	Idade	Sexo	Tipo do dente	Estado do dente	Região	Responsável	
							Profissão	Escolaridade
12	23	32	F	3º molar inferior esquerdo	careado	zona rural de Caetité	lavradora	4º série
13	24	57	F	canino superior direito	careado	zona rural de Caetité	lavradora	analfabeta
	25			lateral superior direito	careado			
	26			central superior direito	careado			
	27			canino superior esquerdo	careado			
14	28	15	F	pré-molar superior	careado	Caetité	estudante	1º grau completo
	29			lateral superior	careado			
	30			central superior	careado			

15	31	39	M	2º molar superior esquerdo	careado	Caetité	vendedor	2º grau completo
19	35	31	F	2º pré-molar superior direito	careado	Caetité	doméstica	6º série
20	36	17	M	3º molar inferior direito	careado	zona rural de Caetité	estudante	8º série
	37			2º molar inferior esquerdo	careado			
	38			2º molar inferior direito	careado			
	39			3º molar inferior esquerdo	careado			
21	40	19	M	2º pré-molar superior esquerdo	careado	Caetité	vigilante	fundamental completo

22	41	16	M	1º pré-molar inferior esquerdo	hígido	Caetité	estudante	1º grau incompleto
----	----	----	---	--------------------------------	--------	---------	-----------	--------------------

Região de Lagoa Real: Adultos								
Indivíduo (nº)	Amostra (nº)	Idade	Sexo	Tipo do dente	Estado do dente	Região	Responsável	
							Profissão	Escolaridade
17	33	17	F	incisivo central inferior esquerdo	hígido	zona rural de Lagoa Real	estudante	2º grau incompleto
18	34	31	M	3º molar superior esquerdo	hígido	Lagoa Real	motorista	1º grau incompleto

Apêndice 3: Quantificação e erro de U e Th da amostra 1 a partir da leitura do ICP-MS.

Acquisition Parameters

Data File : C:\Element\user\SERVIÇOS\data\Georgia_dente_171106\1.dat
 Error :
 Analysis Date : Fri, 17-Nov-2006 17:22:07
 Sample Name :
 Tune Parameters : C:\Element\user\SERVIÇOS\idsc\TUNE2006.tpf
 Method File : C:\Element\user\SERVIÇOS\desc\Uth_INB05.met
 15 * 1 + 0 * 0 + 0 *
 Runs/Passes (Meãs.) : 0
 Res. Switch Delay [s] : 2
 Washtime [min] : 0
 Take-up Time [s] : 25
 Deadtime [ns] : 20

Evaluation Parameters

Analysis Type : SMP
 Standard File :
 Int. Standard File : C:\Element\user\SERVIÇOS\desc\In0_2ppb.std
 Blank File : C:\Element\user\SERVIÇOS\data\Georgia_dente_171106\branco1.dat
 15 * 1 + 0 * 0 + 0 *
 Runs/Passes (Eval.) : 0
 Quant. (EXT
 CALIB)
 Quantification Type :
 Calibration File : C:\Element\user\SERVIÇOS\data\Georgia_dente_171106\calib_dente161106.cal
 Response File :
 Dilution Factor : 125
 Sample Amount :
 Spike Amount :
 Final Volume :
 Int. Std. active : Yes
 IS before BS : Yes

Analysis Details

Sample Name :

Matrix :

Lot Number :

Order Number :

Laboratory :

Operator :

Comment 1 :

Comment 2 :

Instrument Vendor Name : Thermo Electron

Instrument Model : Finnigan Element 2

Software Version : 2.42

File Version : 9

Tune Parameters	LR	MR	HR
Plasma power [Watt] :	1255	1255	1255
Peri. Pump Speed [rpm] :	5	5	5
Cool gas [L/min] :	16.22	16.22	16.22
Aux gas [L/min] :	0.41	0.41	0.41
Sample gas [L/min] :	0.86	0.86	0.86
Additional 1 [L/min] :	0	0	0
Add. 2 / GD Gas Flow [L/min] :	0	0	0
Guard Electrode :	No	No	No
Extraction [V] :	-1910	-1910	-1910
Focus [V] :	-731.4	-731.4	-731.4
X-Deflection [V] :	1.6	1.6	1.6
Y-Deflection [V] :	-0.8	-0.8	-0.8
Shape [V] :	130.39	130.39	130.39
Rotation quadrupol 1 [V] :	-13.44	9.4	11.05
Rotation quadrupol 2 [V] :	-3.85	12.05	1.35
Focus quadrupol 1 [V] :	-7.3	-4.15	-0.7

Focus quadrupol 2 [V] :	0.08	0.08	0.08
UaUb [%] :	0.78	0.78	0.78
Focus offset [%] :	50	50	50
MATSUDA-Plate [V] :	60	60	60
SEM-Deflection [V] :	-75	-75	-75
SEM [V] :	2250	2250	2250

Isotope	Intensity RSD [%]	Intensity AVG [cps]	Intensity B cor AVG	Intensity B cor STD	Concentration AVG (concentração)	Concentration STD (erro)	Concentration RSD [%]
In115(LR)	10.39	2265.7					
Th232(LR)	15.58	1736	1.32E-01 µg/L	2.91E-02 µg/L	8.876 µg/L	1.684 µg/L	18.98
U238(LR)	14.73	1956.4	1.52E-01 µg/L	3.15E-02 µg/L	6.057 µg/L	1.782 µg/L	29.42

Errorcodes : S=Amplifier Skipped D=Intensity Defocussed O=Overflow

Apêndice 4: Cálculo de conversão de medidas para o MMC, expurgando as idades de 67 e 87 anos (indivíduo 1 e 9).

Indivíduo	Amostra	P1	P2	K	Média de K	Mcinza(g)	Cicp	C _{μg(U)/Kg(cinza)} =C _{cp} *25/Mcinza(0,2)	C _{μg(U)/Kg(úmida)} =C _{cp} *25*K/Mcinza(0,2)	σ(25*K/Mc)*σ _{cp}
2	3	0.8	0.6	0.7	0.6	0.2	4.0	500.0	353.0	326.3
	4	0.9	0.6	0.7		0.2	3.0	375.0	266.6	244.7
	5	1.1	0.4	0.4		0.2	1.1	137.5	50.9	96.3
	6	0.6	0.4	0.7		0.1	2.2	374.1	267.3	261.9
	8	1.0	0.6	0.6		0.2	2.4	300.0	187.5	210.0
3	9	0.2	0.1	0.6	0.6	0.1	5.0	1168.2	749.8	817.8
	10	0.2	0.1	0.7		0.1	165.0	44837.0	29404.2	31385.9
4	11	1.0	0.7	0.7	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	12	0.5	0.3	0.7		0.1	6.0	1034.5	702.9	724.1
5	13	1.4	1.0	0.7	0.7	0.2	24.0	3000.0	2236.6	2100.0
6	14	0.7	0.5	0.7	0.7	0.2	2.0	250.0	175.5	175.0
7	15	0.3	0.2	0.7	0.7	0.1	2.4	845.1	602.4	591.5
	16	0.3	0.2	0.7		0.1	4.0	1333.3	943.1	933.3
	17	0.5	0.4	0.7		0.2	5.0	625.0	447.3	437.5
8	18	0.5	0.4	0.7	0.7	0.2	8.0	1000.0	714.7	700.0
	19	1.0	0.8	0.7		0.2	14.0	1750.0	1302.8	1225.0
	21	0.7	0.5	0.8		0.2	3.0	375.0	283.3	262.5
11	22	3.2	1.9	0.6	0.6	0.2	2.5	312.5	188.1	218.8
12	23	1.4	1.0	0.7	0.7	0.2	10.0	1250.0	886.6	875.0
13	24	1.0	0.6	0.6	0.7	0.2	74.0	9250.0	5741.4	6475.0
	25	0.5	0.3	0.7		0.2	14.0	1785.7	1275.9	1250.0
	26	0.8	0.5	0.7		0.2	172.2	21525.0	15323.8	15067.5
	27	1.0	0.7	0.7		0.2	10.3	1287.5	922.9	901.3
	28	0.6	0.5	0.7		0.2	638.1	79762.5	56687.8	55833.8
14	29	0.5	0.4	0.7	0.7	0.2	16.0	2162.2	1531.3	1513.5
	30	0.8	0.6	0.7		0.2	147.5	18437.5	13288.2	12906.3
	31	1.0	0.6	0.6		0.2	17.0	2125.0	1350.8	1487.5
17	33	0.6	0.5	0.7	0.7	0.2	6.0	750.0	547.5	525.0
18	34	1.9	1.4	0.7	0.6	0.2	50.0	6250.0	4621.5	4375.0
19	35	1.0	0.6	0.6	0.6	0.2	67.2	8400.0	4903.9	5880.0
20	36	1.3	0.8	0.6	0.6	0.2	48.5	6062.5	3885.2	4243.8
	37	2.3	1.6	0.7		0.2	49.2	6150.0	4303.4	4305.0
	38	2.2	1.5	0.7		0.2	11.3	1412.5	972.1	988.8

	39	2.2	1.5	0.7		0.2	0.5	62.5	42.4	43.8
21	40	0.9	0.9	0.9	0.9	0.2	6.0	750.0	699.2	525.0
22	41	1.2	0.1	0.1	0.1	0.2	6.3	787.5	39.9	551.3
				Média de K	0.7					

Dados de Igaporã:

Indivíduo	Amostra	Idade(tempo)	Concentração	Média da Conc	Erro	Média do Erro
	2	3	40	353.0	225.1	326.3
		4		266.6		244.7
		5		50.9		96.3
		6		267.3		261.9
		8		187.5		210.0
	3	9	7	749.8	10109.8	817.8
		10		29404.2		31385.9
	6	14	7	175.5		175.0
	4	11	16	0	351.5	0.0
		12		702.9		724.1
	5	13	12	2236.6	2236.6	2100
	7	15	11	602.4	772.8	591.5
		16		943.1		933.3
	8	17	10	447.3	821.6	437.5
		18		714.7		700
		19		1302.8		1225
	10	21	55	283.3	283.3	262.5
	11	22	32	188.1	188.1	218.8

Dados de Caetité:

Indivíduo	Amostra	Idade(tempo)	Concentração	Média da Conc	Erro	Média Erro
12	23	32	886.6	886.6	875.0	875.0
13	24	57	5741.4	5816.0	6475.0	5923.5
	25		1275.9		1250.0	
	26		15323.8		15067.5	
	27		922.9		901.3	
14	28	15	56687.8	23835.8	55833.8	23417.9
	29		1531.3		1513.5	
	30		13288.2		12906.3	
15	31	39	1350.8	1350.8	1487.5	1487.5
19	35	31	4903.9	4903.9	5880.0	5880.0
20	36	17	3885.2	2300.8	4243.8	2395.4
	37		4303.4		4305	
	38		972.1		988.8	
	39		42.4		43.8	
21	40	19	699.2	699.2	525	525.0
22	41	16	39.9	39.9	551.3	551.3

Dados de Lagoa Real:

Indivíduo	Amostra	Idade(tempo)	Concentração	Média Concentração	Erro	Média Err
17	33	17	547.5	547.5	525.0	525.0
18	34	31	4621.5	4621.5	4375.0	4375.0

Apêndice 5: Tabela com resultados da quantificação de U e Th, média, variância e desvio, obtidos pela técnica de ICP-MS por região de todas as amostras e com expurgo.

Resultados das Análises no ICP-MS

Média e desvio dos resultados obtidos de todas as amostras coletadas nas 3 regiões do estudado.

Indivíduo	Amostra	Idade	Sexo	Local Zona	Concentração de U (238)				Concentração de Th (232)																					
					µg/L	Média (U)	Média U(idade)	(xi-x) ² (U)	Var	Desvio	µg/L	Média (Th)	Média Th(idade)	(xi-x) ² (Th)	Var	Desvio														
1	1	67	M	Rural de Igaporã	6,06	8,86	8,86	3,62			8,88	9,0	9,0	8,82																
	11,66				9,14																									
9	20	87	F	Igaporã	9,28	9,28	9,28	2,19			24,56	24,56	24,56	343,07																
2	3	40	F	Igaporã	3,83	2,30	2,30	71,54			2,82	2,7	2,7	11,02																
	4				2,65						2,44																			
	5				1,11						3,04																			
	6				2,19						2,63																			
	7				1,63						2,96																			
	8				2,40						2,43																			
	3				9						7						M	Igaporã	4,88	84,72	43,11	1046,77			5,22	4,7	3,7	5,66		
					10														164,56					4,17						
6	14	7	F	Igaporã	1,51	1,51				2,63	2,63																			
4	11	6	M	Igaporã	0,00	2,90	2,90	61,70			2,24	2,6	2,6	12,01																
	12				5,81						2,91																			
5	13	12	F	Igaporã	23,79	23,79	23,79	169,79			4,72	4,72	4,72	1,74																
7	15	11	M	Igaporã	2,36	3,05	3,05	59,44			2,83	2,6	2,6	11,66																
	16				3,73						2,42																			
	8				17						10						F	Igaporã	4,98	8,83	8,83	3,73			3,94	5,4	5,4	28,97		
	18				7,63					7,08																				
	19				13,88					5,13																				
10	21	55	M	Igaporã	2,93	2,93	2,93	61,32			3,42	3,42	3,42	6,86																
11	22	32	F	Zona	2,54	2,54	2,54	67,54			1,72	1,72	1,72	18,66																

				Rural de Igaporã				10,76	1547,64	12,44	3,53		6,0	448,46	6,70	2,59
12	23	32	F	Zona Rural de Caetité	9,68	9,68	9,68	1813,50		10,39	10,39	10,39	0,99			
13	24	57	F	Zona Rural de Caetité	73,91	67,50	67,50	232,25		17,38	17,2	17,2	61,61			
	25				13,60					17,35						
	26				172,20					19,95						
	27				10,30					14,29						
14	28	15	F	Caetité	638,10	267,02	267,02	46120,90		6,65	14,2	14,2	23,15			
	29				15,50					18,75						
	30				147,46					17,22						
15	31	39	M	Caetité	16,59	16,59	16,59	1272,72		10,23	10,23	10,23	0,69			
16	32	5	M	Caetité	7,98	7,98	7,98	1960,74		5,75	5,75	5,75	13,30			
				Zona Rural de												
20	36	17	M	Caetité	48,47	27,37	22,48	887,27		4,76	4,6	4,6	22,93			
	37				49,22					5,37						
	38				11,30					6,55						
	39				0,48					1,75						
21	40	19	M	Caetité	5,67	5,67	5,67	2170,65		4,08	4,08	4,08	28,25			
22	41	16	M	Caetité	6,27	6,27	6,27	2115,29		6,12	6,12	6,12	10,73			
19	35	31	F	Caetité	67,18	67,18	67,18	222,39		11,94	11,94	11,94	6,46			
								52,26	56795,71	79,44	8,91		9,39	168,11	4,32	2,08
				Zona Rural de												
17	33	17	F	Lagoa	5,89	5,89	5,89	486,00		3,79	3,79	3,79	1,36			

18	34	31	M	Real Lagoa Real	49,98	49,98	49,98	486,00			6,12	6,12	6,12	1,36		
							27,94	972,01	22,05	4,70			4,96	2,73	1,17	1,08

Média e desvio dos resultados obtidos das amostras com expurgo, coletadas nas 3 regiões do estudo.

Indivíduo	Amostra	Idade	Sexo	Local Zona	Concentração de U (238) µg/L				Var	Desvio	Concentração Th (232) µg/L				Var	Desvio														
					Média (U)	Média U(idade)	(xi-x) ² (U)	Média (Th)			Média Th(idade)	(xi-x) ² (Th)																		
1	1	67	M	Rural de Igaporã	6,06	8,86	8,86	1,39			8,88	9,0	9,0	5,05																
	2				11,66						9,14																			
9	20	87	F	Igaporã	9,28	9,28	9,28	2,56			24,56	24,56	24,56	316,77																
2	3	40	F	Igaporã	3,83	2,30	2,30	28,92			2,82	2,7	2,7	16,35																
	4				2,65						2,44																			
	5				1,11						3,04																			
	6				2,19						2,63																			
	7				1,63						2,96																			
	8				2,40						2,43																			
	4				11						6						M	Igaporã	0,00	2,90	2,90	22,80			2,24	2,6	2,6	17,55		
	12				5,81														2,91											
5	13	12	F	Igaporã	23,79	23,79	23,79	259,56			4,72	4,72	4,72	4,17																
8	17	10	F	Igaporã	4,98	8,83	8,83	1,32			3,94	5,4	5,4	28,97																
	18				7,63						7,08																			
	19				13,88						5,13																			
10	21	55	M	Igaporã Zona	2,93	2,93	2,93	22,56			3,42	3,42	3,42	11,18																
11	22	32	F	Rural de Igaporã	2,54	2,54	2,54	26,40			1,72	1,72	1,72	25,44																
																	7,68	365,51	6,05	2,46	6,8	425,48	6,52	2,55						
12	23	32	F	Zona Rural de Caetité	9,68	9,68	9,68	71,17			10,39	10,39	10,39	4,17																
13	24	57	F	Rural de Caetité	73,91	67,50	67,50	2439,24			17,38	17,2	17,2	79,20																
	25				13,60						17,35																			
	26				172,20						19,95																			

	27				10,30					14,29						
15	31	39	M	Caetité	16,59	16,59	16,59	2,33		10,23	10,23	10,23	3,55			
16	32	5	M	Caetité	7,98	7,98	7,98	102,64		5,75	5,75	5,75	6,74			
				Zona												
				Rural de												
20	36	17	M	Caetité	48,47	27,37	13,10	25,10		4,76	4,6	4,6	13,98			
	37				49,22					5,37						
	38				11,30					6,55						
	39				0,48					1,75						
21	40	19	M	Caetité	5,67	5,67	5,67	154,79		4,08	4,08	4,08	18,19			
22	41	16	M	Caetité	6,27	6,27	6,27	140,26		6,12	6,12	6,12	4,95			
							18,11	2935,54	20,48	4,53						
												8,34	130,78	4,32	2,08	

Apêndice 6: Modelo de Múltiplos Compartimentos.

A.6 O Modelo de Múltiplos Compartimentos

O Modelo de Múltiplos Compartimentos (MMC) desenvolvido por nosso grupo (submetido à revista *Environmental Research*) foi baseado, mas particularizado, na estrutura geral do modelo para elementos alcalinos divulgado pela *International Commission on Radiation Protection* (ICRP-69), esquematicamente apresentado na figura 45. Essa escolha deveu-se ao fato de que o urânio tende a seguir o comportamento do cálcio, em grande medida similar à cinética do esqueleto. Por outro lado, como o metabolismo do cálcio em dentes é muito similar ao esqueleto, nossa hipótese de partida foi a de que o mesmo deveria ocorrer para o urânio. Nesse sentido, utilizamos parâmetros obtidos para o esqueleto a partir de experimentos em animais (detalhes em ICRP-69). Observamos que a acumulação de urânio é bem mais alta em esqueletos metabolicamente ativos, como no caso de crianças e jovens. Contudo, esses experimentos foram realizados com ratos (Terepka *et al.*, 1964).

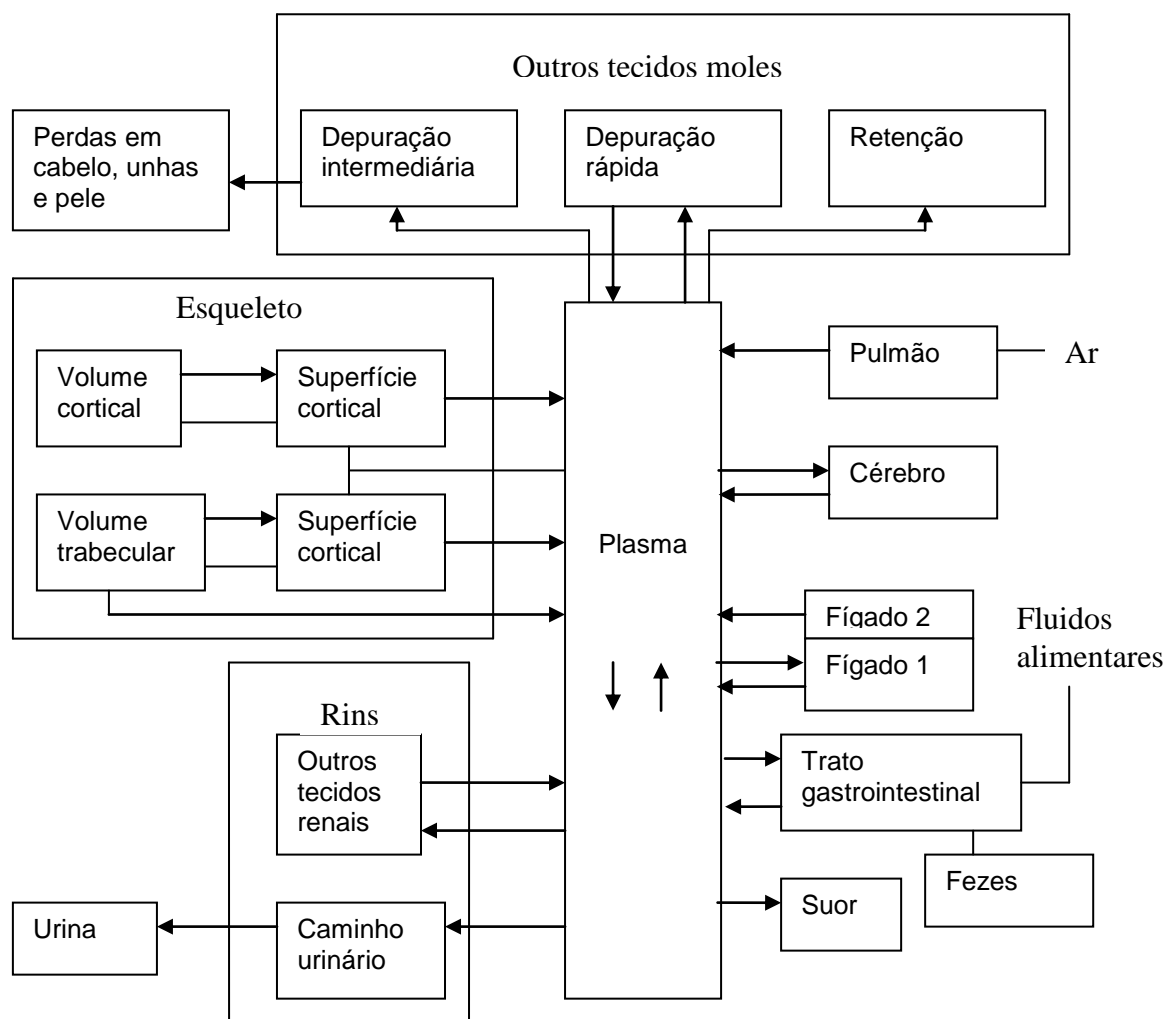


Figura 45: Modelo atualmente adotado pela ICRP – adaptado de Leggett, 1993.

A tabela 11 abaixo especifica a concentração de urânio pelo MMC, em órgãos por idade desde 3 meses à fase adulta.

Tabela 11: Taxas de transferência para órgãos por idade-específica para o modelo do urânio.
 Fonte: *International Commission on Radiation Protection (ICRP-69)*.

Uranium (ICRP Publication 69)

Transfer	Age-specific transfer rate (/d)					
	3 month	1 year	5 year	10 year	15 year	Adult
Plasma to ST0	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50
Plasma to RBC	1.59E-01	2.10E-01	2.19E-01	1.91E-01	1.60E-01	2.45E-01
Plasma to urinary bladder	9.99	13.26	13.80	12.06	10.10	15.43
Plasma to urinary path	1.90	2.52	2.63	2.30	1.92	2.94
Plasma to other kidney tissue	7.90E-03	1.05E-02	1.10E-02	9.60E-03	8.00E-03	1.22E-02
Plasma to ULI contents	7.90E-02	1.05E-01	1.10E-01	9.60E-02	8.00E-02	1.22E-01
Plasma to liver 1	2.38E-01	3.16E-01	3.29E-01	2.87E-01	2.40E-01	3.67E-01
Plasma to ST1	1.05	1.40	1.46	1.27	1.07	1.63
Plasma to ST2	4.76E-02	6.31E-02	6.57E-02	5.74E-02	4.81E-02	7.35E-02
Plasma to trabecular surfaces	2.20	1.32	1.31	2.07	3.03	2.04
Plasma to cortical surfaces	8.82	5.29	4.57	6.16	7.84	1.63
ST0 to plasma	8.32	8.32	8.32	8.32	8.32	8.32
RBC to Plasma	3.47E-01	3.47E-01	3.47E-01	3.47E-01	3.47E-01	3.47E-01
Urinary path to urinary bladder	9.90E-02	9.90E-02	9.90E-02	9.90E-02	9.90E-02	9.90E-02
Other kidney tissue to plasma	3.80E-04	3.80E-04	3.80E-04	3.80E-04	3.80E-04	3.80E-04
Liver 1 to plasma	9.20E-02	9.20E-02	9.20E-02	9.20E-02	9.20E-02	9.20E-02
Liver 1 to liver2	6.93E-03	6.93E-03	6.93E-03	6.93E-03	6.93E-03	6.93E-03
ST1 to plasma	3.47E-02	3.47E-02	3.47E-02	3.47E-02	3.47E-02	3.47E-02
ST2 to plasma	1.90E-05	1.90E-05	1.90E-05	1.90E-05	1.90E-05	1.90E-05
Bone surfaces to plasma	6.93E-02	6.93E-02	6.93E-02	6.93E-02	6.93E-02	6.93E-02
Bone surfaces to <i>exch</i> volume	6.93E-02	6.93E-02	6.93E-02	6.93E-02	6.93E-02	6.93E-02
Liver 2 to plasma	1.90E-04	1.90E-04	1.90E-04	1.90E-04	1.90E-04	1.90E-04
<i>Nonexch trab. vol</i> to plasma	8.22E-03	2.88E-03	1.81E-03	1.32E-03	9.59E-04	4.93E-04
<i>Nonexch cort. vol</i> to plasma	8.22E-03	2.88E-03	1.53E-03	9.04E-04	5.21E-04	8.21E-05
<i>Exch</i> bone vol to bone surfaces	1.73E-02	1.73E-02	1.73E-02	1.73E-02	1.73E-02	1.73E-02
<i>Exch</i> bone vol to <i>nonexch</i> vol	5.78E-03	5.78E-03	5.78E-03	5.78E-03	5.78E-03	5.78E-03

A.6.1 Delineação do modelo

A.6.2 Descrição Físico-Matemática-Biológica do modelo

O estudo da biocinética de isótopos radioativos vêm crescendo atualmente, pois a investigação de mecanismos de transporte de substâncias radioativas através da cadeia alimentar é de fundamental importância para proteção radiológica da população. No estudo da cadeia vegetal-animal-homem, um dos aspectos decisivos é a quantificação da concentração de contaminante por órgão do animal.

Em virtude da relevância desses fatos foi desenvolvido um modelo físico-matemático visando o estudo da biocinética do urânio e metais pesados no organismo humano, após sua absorção pelo sangue.

Foi utilizado o Modelo de Multicompartimentos (fig. 46) que consiste em descrever o organismo animal como um sistema de múltiplos compartimentos, onde o contaminante é absorvido por um compartimento central (sangue) que o distribui para os outros compartimentos (órgãos). A taxa de variação da concentração do contaminante em cada órgão é dada pela diferença do fluxo de contaminante que chega em cada compartimento com o fluxo que sai deste. Portanto, o objetivo principal do estudo da biocinética de radionuclídeos é a determinação dos parâmetros de fluxo e dos coeficientes de transferência do contaminante em cada órgão do organismo.

Para a determinação dos parâmetros de fluxo usamos o método dos mínimos quadrados, em que foram implementados os mesmos princípios do **GMCM** (General Multiple Compartment Model), em uma aproximação simplificada de um sistema de n -compartimentos intercomunicados com um compartimento central (sangue). Aqui, V_i representa o volume do órgão, e este compartimento central é alimentado por uma fonte exterior a uma taxa constante γF , onde γ representa o coeficiente de absorção fracionário para a entrada total (F). Logo, com base na equação geral, podemos montar equações que descreverão a variação da concentração de contaminante em função do tempo para cada um dos compartimentos.

Equação geral:

$$\frac{d(V_i X_i)}{dt} = \delta_{i1} \gamma F_1 + \sum_{j=1, j \neq i}^n r_{ji} X_j - X_i \left(\sum_{j=1, j \neq i}^n r_{ij} \right) - \xi_i X_i \quad (18)$$

onde, $V_i X_i$ é a concentração do compartimento i e r_{ij} , r_{ji} e ξ_i são os parâmetros de fluxo

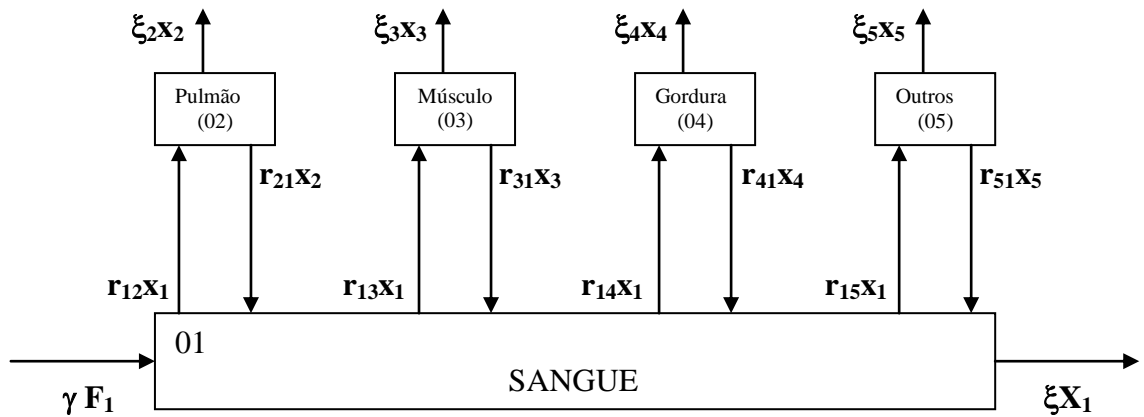


Figura 46: o modelo utilizado para os cinco compartimentos.

Assim, temos as equações que descrevem a variação da concentração no tempo para cada um dos cinco compartimentos (Fig. 46)

$$\frac{d(X_1)}{dt} = \delta_{il} y F_1 + \sum_{j=1, j \neq 1}^n r_{ji} X_j - X_1 \left(\sum_{j=1, j \neq 1}^n r_{ij} \right) - \xi_i X_1 \quad (19)$$

$$\frac{d(X_2)}{dt} = r_{12} x_1 - r_{21} x_2 - \xi_i X_2 \quad (20)$$

$$\frac{d(X_3)}{dt} = r_{13} x_1 - r_{31} x_3 - \xi_i X_3 \quad (21)$$

$$\frac{d(X_4)}{dt} = r_{14} x_1 - r_{41} x_4 - \xi_i X_4 \quad (22)$$

$$\frac{d(X_5)}{dt} = r_{15}x_1 - r_{51}x_5 - \xi_i X_5 \quad (23)$$

O método utilizado para resolver essas equações diferenciais lineares é análogo ao utilizado em sistemas de equações acopladas, já que as diferentes equações dos diferentes compartimentos possuem incógnitas em comum. Essas equações podem ser expressas na forma matricial como:

$$\frac{d}{dt}(VX) = F + RX \quad (24)$$

\mathbf{X} e \mathbf{F} são "vetores colunas" com elementos X_i e F_i , respectivamente, \mathbf{V} é a "matriz diagonal" com elementos V_i (volume do i -ésimo compartimento), sempre quando os elementos diagonais como $r_{ij} = -\sum r_{ij} - \xi_i$ são definidos. \mathbf{R} é a transposição da matriz com elementos de parâmetros de fluxo r_{ij} .

Já que consideramos compartimentos com volumes constantes, equação (24) poderia ser expressa como:

$$V \frac{d}{dt}(X) = F + RX \quad (25)$$

Esta é uma equação de matriz não-homogênea. Conforme proposto por Assimakopoulos e colaboradores, a solução da equação (25) é dada por:

$$X(t) = [\exp(V^{-1}Rt) - 1]R^{-1}F + \exp(V^{-1}Rt)X(0) \quad (26)$$

onde as concentrações de contaminantes no compartimento em $t = 0$ são dadas pelo vetor $X(0)$.

É esperado que o comportamento de um sistema de múltiplos compartimentos realístico (prático, baseado em dados) atinja assintoticamente um estado de equilíbrio estável. Neste caso, o mais importante a considerar é o coeficiente de transferência (q). Esta quantidade para o i -ésimo compartimento é definida como uma fração do "input" total do sistema, p , ou seja:

$$q_i = \frac{X_i(t \rightarrow \infty)}{p} \quad (27)$$

que pode ser escrito em forma de matriz como:

$$q = \frac{1}{p} X(t \rightarrow \infty) \quad (28)$$

a solução geral formal (equação(26)), para o modelo descrito acima, o vetor coeficiente de transferência toma a forma (Assimakopoulos et al 1991):

$$q = -\frac{1}{p} R^{-1}F \quad (29)$$

onde a entrada total do sistema biológico, o escalar p , é dado pela expressão geral:

$$p = \sum_{i=1}^n F_i , \quad (30)$$

que em nosso modelo aplicado tem o valor:

$$p = F_1 \quad (31)$$

Para a solução da equação (25) precisa-se dos valores de todos os parâmetros de fluxo. Em uma situação real, entretanto, o que conhecemos são dados medidos (calculados) para as concentrações (em alguns compartimentos) como uma função do tempo, enquanto os parâmetros de fluxo são desconhecidos.

Apêndice 7: Tabelas 12, 13 e 14.

Tabela 12: Valores de média e desvio padrão médio dos resultados obtidos de todas as amostras coletadas nas 3 regiões do estudo.

Idade	Caetité		Igaporã		Lagoa Real	
	Concentração (ppb)		Concentração (ppb)		Concentração (ppb)	
	Th	U	Th	U	Th	U
5	5,8	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	2,6	2,9	0,0	0,0
7	0,0	0,0	3,7	43,1	0,0	0,0
10	0,0	0,0	5,4	8,8	0,0	0,0
11	0,0	0,0	2,6	3,1	0,0	0,0
12	0,0	0,0	4,7	23,8	0,0	0,0
15	14,2	267,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	6,1	6,27	0,0	0,0	0,0	0,0
17	4,6	22,5	0,0	0,0	3,8	5,9
19	4,1	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0
31	12,0	67,2	0,0	0,0	6,1	50,0
32	10,4	9,7	1,7	2,5	0,0	0,0
39	10,2	16,6	0,0	0,0	0,0	0,0
40	0,0	0,0	2,7	2,3	0,0	0,0
55	0,0	0,0	3,4	2,9	0,0	0,0
57	17,2	67,5	0,0	0,0	0,0	0,0
67	0,0	0,0	9,0	8,9	0,0	0,0
87	0,0	0,0	24,6	9,3	0,0	0,0
Média	9,4	52,3	6,0	10,8	4,9	27,9
Var(%)	4,3	79,4	6,7	12,4	1,2	22,1
Desvio	2,1	8,9	2,6	3,5	1,1	4,7

Tabela 13: Valores de média e desvio dos resultados obtidos das amostras com expurgo, coletadas nas 3 regiões do estudo.

	Caetité		Igaporã		Lagoa Real	
	Concentração (ppb)		Concentração (ppb)		Concentração (ppb)	
Idade	Th	U	Th	U	Th	U
5	5,8	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	2,6	2,9	0,0	0,0
10	0,0	0,0	5,4	8,8	0,0	0,0
11	0,0	0,0	2,6	3,1	0,0	0,0
12	0,0	0,0	4,7	23,8	0,0	0,0
16	6,1	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0
17	4,6	22,5	0,0	0,0	0,0	0,0
19	4,1	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0
32	10,4	9,7	1,7	2,5	0,0	0,0
39	10,2	16,6	0,0	0,0	0,0	0,0
40	0,0	0,0	2,7	2,3	0,0	0,0
55	0,0	0,0	3,4	2,9	0,0	0,0
67	17,2	67,5	0,0	0,0	0,0	0,0
87	0,0	0,0	9,0	8,9	0,0	0,0
Média	8,3	18,1	6,8	7,7	-	-
Var	4,3	20,5	6,5	6,1	-	-
Desvio	2,1	4,5	2,5	2,5	-	-

Tabela 14: Valores da média das amostras coletadas nas 3 regiões estudadas e discriminadas por idade.

Idade	Caetité		Igaporã		Lagoa Real	
	Concentração (ppb)		Concentração (ppb)		Concentração (ppb)	
	Th	U	Th	U	Th	U
5	5,8	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	2,6	2,9	0,0	0,0
7	0,0	0,0	3,7	43,1	0,0	0,0
10	0,0	0,0	5,4	8,8	0,0	0,0
11	0,0	0,0	2,6	3,1	0,0	0,0
12	0,0	0,0	4,7	23,8	0,0	0,0
15	14,2	267,1	0,0	0,0	0,0	0,0
16	6,1	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0
17	4,6	22,5	0,0	0,0	3,8	5,9
19	4,1	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0
31	11,9	67,2	0,0	0,0	6,12	50,0
32	10,4	9,7	1,7	2,5	0,0	0,0
39	10,2	16,6	0,0	0,0	0,0	0,0
40	0,0	0,0	2,7	2,3	0,0	0,0
55	0,0	0,0	3,4	2,9	0,0	0,0
57	17,2	67,5	0,0	0,0	0,0	0,0
67	0,0	0,0	9,0	8,9	0,0	0,0
87	0,0	0,0	24,6	9,3	0,0	0,0