

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E  
NUCLEARES (PROTEN)

**$^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  E  $^{40}\text{K}$  EM INCRUSTAÇÕES FORMADAS EM CALDEIRAS DE  
INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS DO ESTADO DE PERNAMBUCO**

**Claudia Miriam Braga Poggi**

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

ABRIL– 2011

CLAUDIA MIRIAM BRAGA POGGI

**$^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  E  $^{40}\text{K}$  EM INCRUSTAÇÕES FORMADAS EM CALDEIRAS DE  
INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS DO ESTADO DE PENAMBUCO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares do DEN/UFPE e CRCN-NE/CNEN, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Dosimetria e Instrumentação.

**Orientador: Dr. Clovis A. Hazin**

**Co-orientador: Dra. Maria Helena Paranhos Gazineu**

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

ABRIL – 2011

Catálogo na fonte  
Bibliotecário: Carlos Moura, CRB4-1502 (BDEN/UFPE)

**P746d Poggi, Claudia Miriam Braga.**

$^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$  em incrustações formadas em caldeiras de instalações industriais do estado de Pernambuco. / Claudia Miriam Braga Poggi. - Recife: O Autor, 2011.

77 f. : il., tab.

Orientador: Prof. Dr. Clovis A. Hazin.

Co-orientador: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria Helena Paranhos Gazineu.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2011.

Inclui Referências Bibliográficas.

**1. Incrustação. 2. Radionuclídeos naturais.  
3. Espectrometria gama. I. Hazin, Clovis A. (orientador).  
II. Título.**

612.01448 CDD (21. ed.)

UFPE/BDEN/2011-005

**$^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$  EM INCRUSTAÇÕES FORMADAS EM CALDEIRAS  
DE INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS DO ESTADO DE PERNAMBUCO**

**Claudia Miriam Braga Poggi**

**APROVADA EM: 07.04.2011**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Clovis Abrahão Hazin**

**CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. Maria Helena Paranhos Gazineu**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior – PNP/CAPE/FACEPE/DEN/UFPE**

---

**Profa. Dra. Vivianne Lúcia Bormann de Souza – CRCN-NE/CNEN**

---

**Profa. Dra. Alexandra Amorim Salgueiro – DQ/UNICAP**

**Visto e permitida a impressão**

---

**Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE**

*Aos meus amados pais, Vinício Barroso Braga e Miriam Marroquim Braga*

*Dedico*

*E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria.*

1 CORÍNTIOS 13.2

## AGRADECIMENTOS

Ao meu amado Deus pelas coisas especiais que tem feito em minha vida e por colocar em meu caminho anjos maravilhosos.

Ao meu verdadeiro porto seguro, meu pai Vinício que tanto me inspirou com seu exemplo de honra, dignidade, cultura e busca pelo saber. E a minha mãe Miriam, exemplo de coragem, determinação e luta que com seu amor e carinho me deu forças para que eu seguisse sem desanimar. Meu muito obrigada, aos meus pais que durante toda a minha vida me incentivaram.

Aos meus irmãos Flávia, Daniel e Daniele e a todos os meus familiares pelo amor e apoio incondicional. E de modo especial, ao meu generoso irmão Vinício Júnior que me fez enxergar o verdadeiro valor dos laços familiares.

A meu esposo Eurico pelo amor, cuidado, torcida, incentivo e pela sua dedicação a esse trabalho.

Ao meu querido filho Victor Henrique, principal motivação para conclusão deste trabalho.

Ao Dr. Clovis Abrahão Hazin pela orientação, paciência, compreensão, generosidade e pela imensa oportunidade de me fazer conhecer um pouco do universo fascinante da energia nuclear. E a Dra. Maria Helena Gazineu pela co – orientação, dedicação apoio e força nas horas mais difíceis. Sem dúvida, essa pesquisa não teria êxito, sem a boa vontade e ajuda de vocês. Muito obrigada.

À Dra. Eliane Valentim pelo apoio, amizade, colaboração e por todo seu dinamismo que também motivou a minha trajetória acadêmica.

Ao Dr. Elvis França pela valiosa contribuição científica no desenvolvimento desse trabalho e por toda a sua ajuda e dedicação na realização das análises.

Aos professores Dra. Vivianne Bormann de Souza, Dra. Alexandra Salgueiro, Dr. José Araújo Júnior pelas contribuições durante a avaliação desse trabalho.

Aos meus queridos amigos Ana Claudia, Fernando, Michele, Maurício, Tida, Geliane, Hélia, Lai e Maria José pela torcida, incentivo e amizade na realização dessa pesquisa.

A minha eterna amiga telepática Flavia Renata, por toda a sua fiel amizade, dedicação e apoio nas horas difíceis. Em especial aos amigos, Israel, Josicleide, Bartolomeu, Ivanilda, Luiz Mário e Cida que tanto contribuíram para o meu crescimento espiritual, tão necessário para manter o equilíbrio emocional nessa etapa. Obrigada pela passagem de vocês em minha vida.

Aos meus amigos do CRCN-NE/DEN Adriana Muniz, Márcia Paes, Jairo Dias Carlos Neto, Daniela Oliveira, Fernanda Claudia, Thiago Oliveira pela amizade e incentivo. Em especial a Patrícia Brandão, Emerson Emiliano e Fernanda Pessoa que tanto ajudaram com suas importantes sugestões, na construção desse trabalho.

Aos caros amigos Adriano Silva e Ivan Carneiro que tanto contribuíram na viabilização da parte técnica dessa pesquisa.

As minhas queridas amigas Ester, Zélia, Adelaide e Simone pelo apoio, torcida e amizade. E em particular, a minha amiga Elaine que tanto colaborou na realização das correções das referências bibliográficas.

Aos funcionários do CRCN e do DEN, em especial a Crescêncio Andrade Silva Filho pelo auxílio nas análises, amizade, paciência e valorosas sugestões.

À Universidade Federal de Pernambuco, especialmente ao DEN e aos professores pelos conhecimentos adquiridos. Em particular, a querida amiga e colaboradora do DEN Magali que tanto me auxiliou nessa jornada.

Ao ITEP- OS que tanto me apoiou no início desse trabalho.

A CAPES pela bolsa concedida.

Ao CRCN/CNEN por todo apoio empregado no desenvolvimento dessa pesquisa.

# $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ E $^{40}\text{K}$ EM INCRUSTAÇÕES FORMADAS EM CALDEIRAS DE INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS DO ESTADO DE PENAMBUCO

Orientador: Dr. Clovis A. Hazin

Co-orientador: Dra. Maria Helena Paranhos Gazineu

## RESUMO

A geração de vapor é um procedimento comum em muitas indústrias, independente de seu produto final ou atividade. O vapor é produzido em caldeiras, sendo enviado através de tubulações para máquinas e equipamentos utilizados nos diferentes setores das instalações industriais. A água utilizada nesses processos é de origem subterrânea, possuindo altas concentrações de sais, que podem co-precipitar junto com elementos radioativos naturais, gerando incrustações radioativas e que se depositam nas tubulações, levando à perda da eficiência de produção de vapor e aumento do consumo de combustível. Além do mais, radionuclídeos de ocorrência natural (NORM) podem ser tecnologicamente aumentados, gerando as incrustações radioativas. Neste contexto, este trabalho objetivou determinar as concentrações de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$ , radionuclídeos naturais comumente encontrados em incrustações geradas em indústrias, em amostras de incrustação retiradas de caldeiras nas cidades de Caruaru, Paulista e Goiana, no estado de Pernambuco. Foram realizadas também análises complementares das concentrações de cálcio, magnésio e bário presentes nas amostras de incrustação, a fim de verificar a existência de possível correlação entre esses elementos e os radionuclídeos estudados. Os resultados obtidos para concentrações em atividade nas amostras de incrustações variaram entre  $< 1,36$  (LD) e  $1328,00 \pm 23,00 \text{ Bq.kg}^{-1}$  para o  $^{226}\text{Ra}$  e entre  $< 1,78$  (LD) e  $265,00 \pm 8,00 \text{ Bq.kg}^{-1}$  para o  $^{228}\text{Ra}$ . As concentrações para o  $^{40}\text{K}$  variaram entre  $< 14,60$  (LD) até  $288,00 \pm 11,00 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Esses valores de concentrações em atividade foram inferiores ao valor estabelecido pelas Normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear.

**Palavras-chave:** Incrustações, radionuclídeos naturais, espectrometria gama.

# $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ E $^{40}\text{K}$ IN SCALE FORMED IN BOILERS OF INDUSTRIAL INSTALLATIONS OF THE ESTADO OF PENAMBUCO

Adviser: Dr. Clovis A. Hazin

Co- Adviser: Dra. Maria Helena Paranhos Gazineu

## ABSTRACT

Steam generation is a common procedure in many industries, regardless of their end product or activity. Steam production takes place in boilers, being distributed through pipes to machines and equipment in the different sectors of the installations. Underground water used in these facilities contains high concentrations of salt, which can coprecipitate with natural radioactive elements, creating radioactive scale, which is deposited in pipes, decreasing the efficiency of steam production, with the consequent increase in fuel consumption. Furthermore, naturally occurring radionuclides (NORM) can be technologically enhanced, appearing as radioactive scale in the inner structure of boilers. In this context, the objective of this work was to determine concentrations of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{40}\text{K}$ , natural radionuclides commonly found in scale generated in industries and in samples taken from scale of boilers in the cities of Caruaru, Paulista and Goiana, Pernambuco. Complementary analyses of calcium, magnesium and barium in the samples of scale were also carried out in order to verify the correlation between these elements and the radionuclides studied. Activity concentrations of  $^{226}\text{Ra}$  were in the range of  $< 1.36$  (DL) to  $1,328.00 \pm 23.00 \text{ Bq.kg}^{-1}$  and  $^{228}\text{Ra}$  activity concentrations varied from  $< 1.78$  (DL) to  $265.00 \pm 8.00 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Activity concentrations of  $^{40}\text{K}$  were in the range of  $< 14.60$  (DL) to  $288.00 \pm 11.00 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . All these activity concentrations were lower than the limits established by the Brazilian Commission of Nuclear Energy for this type of matrix.

**Keywords:** Scale, natural radionuclides, gamma spectrometry.

## LISTA DE FIGURAS

Páginas

<b>Figura 1.</b>	Relação entre espessura da incrustação e o aumento do consumo de combustível	29
<b>Figura 2.</b>	Exposição à radiação natural	33
<b>Figura 3.</b>	Série de decaimento do $^{235}\text{U}$	34
<b>Figura 4.</b>	Série de decaimento do $^{238}\text{U}$	35
<b>Figura 5.</b>	Série de decaimento do $^{232}\text{Th}$ .	36
<b>Figura 6.</b>	Espectrometria de absorção atômica	46
<b>Figura 7.</b>	Incrustação produzida numa tubulação de água, seccionada de uma caldeira	49
<b>Figura 8</b>	Medida da condutividade térmica para verificar a espessura da incrustação	49
<b>Figura 9.</b>	Sistema de medidas	51
<b>Figura 10.</b>	Eficiência de contagem	57
<b>Figura 11</b>	Matriz de correlação entre bário e rádio	64

## LISTA DE TABELAS

	Página
<b>Tabela 1.</b> Condutividade térmica dos diversos tipos de incrustações e dos metais que compõem a caldeira	28
<b>Tabela 2.</b> Perdas na eficiência da caldeira devido à presença de incrustação	29
<b>Tabela 3.</b> Isótopos naturais do rádio	37
<b>Tabela 4.</b> Principais energias gama para determinação de radionuclídeos naturais através de núcleos emissores de raios $\gamma$ .	45
<b>Tabela 5.</b> Limites de detecção para as amostras analisadas.	58
<b>Tabela 6.</b> Resultados obtidos por espectrometria gama para material de referência	58
<b>Tabela 7.</b> Concentração em atividade de $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ e $^{40}\text{K}$ determinados por espectrometria gama	59
<b>Tabela 8.</b> Determinação dos teores médios de $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ e $\text{Ba}^{2+}$ e seus respectivos desvios padrão expressos em $\text{mg.kg}^{-1}$	63

## SUMÁRIO

Página

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Indústria Têxtil e de Confecção	14
2.2 O Pólo de Confecções em Pernambuco	15
2.3 A Cidade de Caruaru	16
2.4 A Cidade de Paulista	17
2.5 A Cidade de Goiana	17
2.6 Processos Produtivos das Indústrias Têxteis do Agreste Pernambucano	19
2.7 Resíduos Sólidos Gerados nas Indústrias Têxteis	20
2.8 Formação de Incrustações em Caldeiras	24
2.9 Águas subterrâneas	31
2.10 Radioatividade Natural	32
2.11 Radionuclídeos: $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ e $^{40}\text{K}$	37
2.12 Radioatividade e Formação de Incrustações	40
2.13 Espectrometria Gama	43
2.14 Espectrometria de Absorção atômica	45
3. MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1 Local de Estudo	47
3.2 Coleta e preparação das amostras	48
3.3 Determinação dos Radionuclídeos em Estudo	50
3.4 Determinação do Teor de Radionuclídeos por Espectrometria Gama	50

3.4.1 Sistema de contagem no HPGe	51
3.4.2 Eficiência de contagem	52
3.4.3 Determinação da concentração de atividade	52
3.5 Determinação dos teores de Ca <sup>++</sup> , Mg <sup>++</sup> e Ba <sup>++</sup>	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5. CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

## 1 INTRODUÇÃO

Existe atualmente no Brasil cerca de trinta mil indústrias têxteis e de confecção, sendo este setor da economia um dos mais importantes ramos de atividade para o país (ABIT, 2011). No Nordeste, Pernambuco evidencia-se por possuir o segundo maior pólo de confecções do Brasil, que está localizado na mesorregião do Agreste (MACHADO, 2008). Os municípios de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe, Toritama e Riacho das Almas fazem parte desse pólo e se destacam por seu desenvolvimento na produção industrial têxtil.

Caruaru tem cerca de 110 lavanderias de têxteis (CHAGAS, 2009), e a maioria delas não trata os resíduos oriundos dos processos empregados na lavagem desses produtos. O beneficiamento têxtil envolve grande quantidade de água e uma enorme diversidade de matérias-primas, levando conseqüentemente à produção de rejeitos líquidos e sólidos que, em geral, contêm substâncias tóxicas ou difíceis de serem degradadas. Em várias etapas do processo da lavagem, é necessária a presença de vapor, que é fornecido pela caldeira. O vapor produzido por esse equipamento produz uma pressão que é fornecida às secadoras, lavadoras, e para o setor de acabamento onde abastecem os ferros de passar roupas (GALIZA NETO, 2006).

Devido à elevada temperatura na água na caldeira, certos compostos que são solúveis na água de alimentação/reposição tendem a uma condição de supersaturação, instalando-se sobre a superfície de troca térmica da caldeira. As incrustações formadas consistem na deposição e agregação de sólidos junto à superfície da caldeira e tubulações, no lado da água, em razão da presença de impurezas tais como, sulfatos, carbonatos (de cálcio e/ou magnésio), silicatos e complexos contendo ferro, alumínio, cálcio e sódio. A presença de precipitados resultantes de tratamentos inadequados da água da caldeira, originam incrustações bastante rígidas e de difícil remoção (SANTOS FILHO, 1985).

As incrustações trazem problemas no desempenho da caldeira com relação à formação de vapores, pois a quantidade de incrustações acumuladas nas paredes dos dutos que transportam a água causam a redução na eficácia do processo, uma

vez que o diâmetro dos dutos diminui consideravelmente ao longo do tempo e com isso o fluxo de água é menor.

Nas lavanderias de Caruaru, como de outros locais do pólo de confecções de Pernambuco, os resíduos sólidos gerados são recolhidos para o aterro sanitário da cidade, onde são segregados para evitar possível contaminação dos lençóis aquíferos da região. Entretanto, as incrustações removidas dos dutos e caldeiras podem conter elementos radioativos de ocorrência natural que, ao longo do tempo, podem vir a contaminar o ambiente.

Os radionuclídeos de ocorrência natural são definidos na literatura pela sigla NORM (*Naturally Occurring Radioactive Material*). Quando matérias-primas contendo NORM passam por processos industriais que concentram os radionuclídeos oriundos naturalmente do solo, da água e das rochas, estas são então denominadas TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*) ou seja, radionuclídeos naturais aumentados tecnologicamente (GODOY; CRUZ, 2003).

A formação de TENORM pode ocorrer em diversos tipos de processos, tendo sido observada na indústria de mineração, na produção de energia (em incrustações e borras formadas na produção de petróleo) e em resíduos de tratamento de águas e efluentes (GAZINEU, 2005, KLEINSCHMIDT; AKBER, 2007).

Não foram encontrados dados na literatura sobre a radioatividade em incrustações provenientes das indústrias têxtil ou em caldeiras de maneira geral. Sabe-se, entretanto, que a formação de incrustações em locais onde se utiliza águas subterrâneas vem a propiciar o acúmulo de radioatividade nesses materiais. Verificou-se então a necessidade de se investigar e avaliar os resíduos e/ou rejeitos formados em indústrias têxteis com relação aos riscos radioativos.

Dessa maneira, os objetivos deste trabalho foram determinar os teores de  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$ , radionuclídeos de importância radiológica, além do  $^{40}\text{K}$ , presentes nos resíduos sólidos gerados pela indústria têxtil da cidade de Caruaru, Goiana e Paulista, no estado de Pernambuco, com a finalidade de avaliar possíveis impactos causados ao ambiente.

Com o intuito de confrontar os resultados encontrados, com a região fosfática de Pernambuco, foram coletadas amostras de indústrias localizadas nas cidades de Paulista e Goiana, ambas em Pernambuco e situadas em região reportada como Região Fosfática de Pernambuco (SAAD, 1974).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Indústria Têxtil e de Confeção

Na década de 1960, Pernambuco ocupava o segundo lugar na produção nacional com relação à indústria têxtil. Com a recessão econômica e a abertura comercial, geradas no final da década de 80, afetando toda a cadeia têxtil, houve um decréscimo na produção, fazendo com que as pequenas e médias empresas, maiores empreendedoras do setor, não resistissem à concorrência dos produtos importados e muitas indústrias fecharam (APOLINÁRIO, 2000).

Ainda no mesmo período em Pernambuco, as indústrias tentaram se adequar à nova realidade sob a orientação da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), mas esse esforço de modernização foi prejudicado pelo surgimento das fibras sintéticas (LIMA, 1996).

A indústria de confecção de Pernambuco surgiu paralelamente na mesma época, com produtos populares de baixo custo. Em meados da década de 1980 a indústria de confecção em Caruaru, Toritama e Santa Cruz do Capibaribe, evidenciou um aumento significativo e o surgimento de novas empresas com produtos diversificados, tais como: artigos de cama, mesa e banho, e os mais diversos tipos de roupa e acessórios. Esse fato ocorreu devido à criação do Estatuto da Microempresa (Lei Complementar nº 48, de 10 de dezembro de 1984), à situação econômica nos anos 80 e 90 e as facilidades para instalações dessas indústrias. Um dos detalhes nas indústrias de confecção na região nordeste é a sua variedade de escala, onde participam grandes, médias, pequenas e micro-empresas; porém, na estrutura industrial da região, as micros e pequenas empresas predominam. (BANCO DO NORDESTE, 1999).

Na década de 1990, o setor possuía cerca de 14.400 empresas de confecções bem diferentes, pouco modernas, desatualizadas e que sobreviviam por atuarem na economia informal e em nichos regionais de mercado.

O setor têxtil e de confecção brasileiro tem se destacado mundialmente não apenas na área profissional, de criatividade e na tecnologia, assim como também, pelas dimensões do seu parque têxtil. Na economia brasileira, a indústria têxtil e de confecção contempla atualmente trinta mil empresas instaladas em todo território

nacional, ocupando hoje a sexta posição no ranking mundial de produtores desse segmento, o segundo maior produtor de denim e o terceiro na produção de malhas. Conta atualmente com trinta mil empresas no setor. A indústria têxtil e de confecção emprega cerca de 1,65 milhão de trabalhadores, dos quais 75% são de mão-de-obra feminina, segundo maior empregador da indústria de transformação, sexto maior produtor têxtil do mundo, segundo maior produtor de denim do mundo, representa 17,5% do PIB da indústria de transformação e cerca de 3,5% do PIB total brasileiro (ABIT, 2011).

## **2.2 O Pólo de Confeções em Pernambuco**

O Pólo de Confeção de Pernambuco está localizado na mesorregião do Agreste pernambucano, na microrregião do Alto Capibaribe.

Atualmente, as cidades com maior destaque que constituem o pólo de confecção do Agreste são: Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe, Toritama e Cruz das Almas. Todas as peças produzidas por esses municípios são comercializadas no Brasil e em países da América do Sul (SEBRAE, 2003).

A produção de “jeans” é a principal atividade do setor na região e conta com cerca de 220 lavanderias, sendo 110 em Caruaru, 80 em Toritama e 30 em Riacho das Almas. A principal função da maioria da população em Santa Cruz do Capibaribe é a confecção de peças de “jeans” ou malha, ainda com poucas lavanderias, duas ou três industriais (SEBRAE, 2003).

Uma pesquisa realizada pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) indica a existência de 12 mil unidades produtivas na região do Pólo de Confeção do Agreste. Essas empresas (das quais somente oito por cento são formais) empregam aproximadamente 76 mil pessoas, produzindo 57 milhões de peças por mês, correspondendo a 15% da produção nacional e realizam um faturamento mensal superior a R\$ 144 milhões (POLO, 2004).

### 2.3 A Cidade de Caruaru

Caruaru é uma cidade do estado de Pernambuco, a mais populosa do interior do estado, com uma população estimada em 289.086 habitantes e área da unidade territorial de 921 km<sup>2</sup>. A cidade é constituída por quatro distritos: Caruaru, Carapatós, Gonçalves Ferreira e Lajedo do Cedro (IBGE, 2009).

A cidade localiza-se num planalto elevado possui um relevo suave ondulado, de solo pedregoso e argiloso com altitude média de 545 m acima do nível do mar. Seu clima é semi-árido quente, com temperaturas entre 22°C e 30°C, podendo-se considerar em média, 24 °C como a temperatura anual. A precipitação pluviométrica anual está em torno de 622 mm, sendo o período mais chuvoso, entre junho e julho. Há grandes períodos de escassez de chuvas, onde uma das explicações é a Serra das Russas, localizada no município de Gravatá; devido à altitude, provoca chuvas orográficas, fazendo assim com que o ar chegue ao interior da região mais seco (MASCARENHAS et al, 2005).

Com relação aos recursos geológicos, destacam-se a argila, feldspato, quartzo, caulim, lentes de calcário e rochas cristalinas (ornamentais e britais) que podem ser encontradas na bacia, o granito e o granodiorito, entre outros. A área cobre uma superfície de 3.433,58 km<sup>2</sup>, correspondendo a 3,49% do total do Estado, e seu perímetro é de 749,6 km<sup>2</sup> (CONDEPE, 2005).

Apesar de o rio Capibaribe abranger maior área, o eixo físico-econômico é representado pelo rio Ipojuca (principal rio), que nasce em Arcoverde e corta a micro região em toda a sua extensão no sentido longitudinal.

Em relação aos recursos hídricos, Caruaru está situada nas bacias hidrográficas do rio Capibaribe e do rio Ipojuca. Esse rio corresponde à Unidade de Planejamento Hídrico, entre as latitudes 08°09'50" e 08°40'20" de latitude Sul, e 34°57'52" e 37°02'48" de longitude a Oeste de Greenwich (MASCARENHAS et al, 2005; CONDEPE, 2005).

## 2.4 A Cidade de Paulista

O município de Paulista faz parte da Região Metropolitana do Recife e está a 15 km da capital pernambucana. Sua população está estimada em 262.237 habitantes (IBGE, 2010). O clima é tropical, quente e úmido e a temperatura média é de 24,52°C. Dois rios fazem parte da área estuária, Timbó e Paratibe. Em Paulista está localizado o parque industrial de Paratibe, que abriga empresas de diversos setores, dinamizando a economia da região e gerando emprego para a população.

A cidade possui três reservas ecológicas: mata de Caetés, mata do Janga e mata de Jaguarana. Estas matas são reservas ecológicas criadas pela Lei n° 9.989, de 13 de janeiro de 1987. Dessas três reservas, apenas a de Caetés foi implantada. Em 1991 sofreu mudança de categoria, transformando-se em Estação Ecológica pela Lei n° 11.622/98, buscando, principalmente, contribuir para a proteção dos recursos hídricos, realizar atividades de Educação Ambiental e investigação científica, além de proporcionar lazer à população local.

Na faixa litorânea de Paulista, nos terrenos submetidos à influência constante das marés, desenvolve-se a vegetação de mangue. Esse ecossistema desempenha importante função como filtro biológico e químico das águas contaminadas por resíduos industriais e domésticos, além de servir como viveiro natural. Ainda na Planície Costeira, a ocupação urbana tomou o lugar da vegetação de praia, ali representada por espécies herbáceas. O Relevo é constituído por tabuleiros, cuja altitude varia de 40 a 50 metros, próximo à planície costeira e até mais de 160 metros, na porção oeste, estendendo-se para o leste (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - PNUD, 2000).

## 2.5 A Cidade de Goiana

Goiana é um município do litoral do estado de Pernambuco, situado na região Nordeste. Sua população estimada em 2009 era de 74.424 habitantes (IBGE, 2009), possuindo assim a segunda maior população da Zona da Mata, a maior de sua microrregião (Zona da Mata Norte) e a 19ª do seu estado. Goiana localiza-se no nordeste do estado, com sua sede a treze metros de altitude, fazendo divisa com o

estado da Paraíba, estando a 62 km de Recife (capital do estado), a 51 km de João Pessoa (capital do estado vizinho) e a 2.187 km de Brasília (capital federal). O município é dividido em três distritos, Sede, Pontas de Pedras e Tejucoapapo. Representa o quinto maior PIB do interior do estado, estimado em 446 milhões de reais (IBGE, 2009), destacando-se pela cultura da cana-de-açúcar, da produção de papelão e da produção de cimento.

O município está inserido no Domínio Hidrogeológico Intersticial e no Domínio Hidrogeológico Fissural. O Domínio Hidrogeológico Intersticial é composto de rochas sedimentares da Formação Beberibe, Grupo Barreiras, Depósitos Aluvionares, Depósitos Flúvio-lagunares, e dos Depósitos Flúvio-marinos. O Domínio Hidrogeológico Fissural é formado por rochas do embasamento cristalino que engloba o subdomínio de rochas metamórficas, constituído do Complexo Vertentes e do Complexo Belém do São Francisco.

O município de Goiana encontra-se inserido nos domínios da Bacia Hidrográfica do Rio Goiana. Todos os cursos d'água no município têm regime de escoamento perene e o padrão de drenagem é o dendrítico. O abastecimento de água é feito por trinta poços que retiram águas dos recursos superficiais e subterrâneos do município, sendo dezenove públicos e onze particulares (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - PNUD, 2000).

Ressalta-se, que as cidades estudadas, Paulista e Goiana estão inseridas na Região Fosfática de Pernambuco. Essa área foi denominada de região fosfática por possuir depósitos de fosfato de origem marinha que contém pequenas quantidades de urânio associada diretamente a concentração de fosfato no minério (LIMA, 1996; SAAD, 1974).

Geograficamente, localiza-se na faixa litorânea leste dos estados de Pernambuco e Paraíba, sendo limitada a oeste pelo meridiano de 35°00'00", a leste pelo oceano atlântico e ao norte e ao sul pelo paralelo de 7°00'00" e 8°00'00" respectivamente (DANTAS, 2000).

Nessa região foram realizados estudos para monitoração de possíveis alterações no ambiente decorrente de atividades agrícolas e industriais significativas, considerando ainda levantamentos radiométricos (LIMA, 1996).

Sendo assim, é provável que a água extraída de poços para uso industrial contenha radionuclídeos naturais das séries do urânio e do tório, além do <sup>40</sup>K,

resultando possivelmente em maiores concentrações de atividade nas incrustações formadas em caldeiras a vapor, das indústrias nesta região. Como exemplos, podemos citar as pesquisas desenvolvidas por Santos (2010) e Amaral (1992) que corroboram com essas afirmações.

## **2.6 Processos Produtivos das Indústrias Têxteis do Agreste Pernambucano**

De acordo com a Agência Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (CPRH), o processo produtivo executado nas indústrias têxteis (lavanderias) do Agreste pernambucano é constituído basicamente por cinco etapas: desengomagem, tingimento, alvejamento, lavagem, centrifugação e secagem.

A desengomagem é utilizada para retirar a goma aplicada anteriormente pela tecelagem. As gomas, por serem solúveis em água, são facilmente removidas por lavagem com água quente, ou no processo de cozimento. A retirada das gomas, antes do tingimento, é necessária porque elas podem reagir e causar a mudança de cor na peça. A carga poluidora do efluente da desengomagem resulta de aditivos usados na composição da goma, surfactantes, enzimas, ácidos, álcalis e o amido.

O tingimento é um processo de coloração dos substratos têxteis, de forma homogênea, com a aplicação de corantes. Após o tempo de fixação do corante na peça, o tecido é lavado com água fria, água quente e depois é ensaboado, sendo enxugado totalmente, logo em seguida. A função do enxágue bem efetuado no tecido é retirar o corante hidrolisado sobre a fibra, evitando problemas de desbotamento. Para cores fortes, se necessário, usam-se fixadores.

As peças alvejadas ou tingidas passam por etapas de lavagem que precisam do uso de vários produtos químicos auxiliares, como detergentes sabões, sequestrantes, neutralizantes, dentre outros. Os procedimentos de lavagem são realizados, normalmente, nos mesmos equipamentos onde são feitos o alvejamento ou tingimento, ou, ainda, em equipamentos especialmente designados para essas etapas.

Os efluentes provenientes dos processos de lavagem, principalmente os primeiros banhos, apresenta elevada concentração de poluentes, corantes e

produtos auxiliares, os quais devem, obrigatoriamente, serem enviados ao sistema de tratamento para depuração.

Os artigos têxteis, após serem devidamente tingidos ou alvejados, geralmente apresentam-se com excesso de água, devendo ser secados. Contudo, devido à grande quantidade de água é necessária a sua extração por processo mecânico, o que é realizado em centrífugas.

Os efluentes gerados nesse processo de centrifugação, geralmente são conduzidos aos sistemas de tratamento. Entretanto, em função da pouca quantidade de contaminantes, essas águas podem ser reutilizadas em outras etapas. Para isso, após serem segregadas das demais águas, elas devem ser reconduzidas aos pontos de consumo.

A secagem de artigos têxteis tem por finalidade a remoção da umidade restante dos processos úmidos anteriores. A secagem é feita em secadores, onde a fonte de calor é gerada a partir de vapor ou queima direta de gás (PERNAMBUCO, 2001). Os resíduos dessa operação são as emissões gasosas, principalmente originados da queima de gás e, eventualmente, os amaciantes que volatilizam durante o processo térmico de secagem.

## **2.7 Resíduos Sólidos Gerados nas Indústrias Têxteis**

Toda a evolução econômica e social estabelecida após o surgimento das lavanderias em Caruaru, gerou empregos, mas também causou forte destruição ambiental, principalmente no rio Ipojuca, que recebe os efluentes têxteis produzidos nas lavanderias que movimentam a economia local (SANTOS, 2006).

Os impactos ambientais provocados pelas lavanderias industriais de “jeans”, não se limitam apenas aos recursos hídricos, mas ao ecossistema como um todo, em consequência do uso de lenha como fonte de energia de biomassa, emissões gasosas oriundas dos geradores de vapor e resíduos sólidos (PERNAMBUCO, 2003).

De acordo com a NBR 10004:2004 da ABNT (ABNT, 2004), resíduos sólidos são aqueles que resultam das atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de variação, que podem se apresentar nos estados sólido e semi – sólido, incluindo os lodos da Estação de Tratamento de

Águas – ETA, produtos de equipamento anti-poluição e líquidos de características específicas. Esses resíduos devem ser devidamente tratados e dispostos sem que provoquem danos ao meio ambiente.

Ao longo de 20 anos, discutiu-se no Congresso Nacional uma proposta direcionada para distinguir por exemplo, o que é resíduo (lixo aproveitável, reciclável) do que é rejeito (que não pode ser aproveitado). Após todo esse tempo, os parlamentares chegaram a um consenso, resultando na Lei nº 12.305/10 de 02 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). O principal avanço dessa Lei, foi a atribuição de responsabilidades específicas que, antes eram de todos. As empresas produtoras, distribuidoras de material descartável como eletrônicos, baterias, lâmpadas fluorescentes e pneus – terão que recolher seus produtos. As embalagens devem permitir o uso ou reciclagem. Os municípios irão promover a gestão integrada do lixo e além deles o Estado e também a União terão que estipular metas de reciclagem e estratégias para tratamento e destinação e destinação dos resíduos.

Ainda de acordo com a Lei supracitada, sugere-se a extinção de lixões a céu aberto e a construção de aterros sanitários, reduzindo assim os problemas ambientais e promovendo o reaproveitamento dos resíduos sólidos. Dessa maneira, os catadores de resíduos terão mais oportunidade de trabalho, gerando desenvolvimento sócio-econômico.

Em Pernambuco, foi publicado no diário oficial do Estado em 14/12/2010, a Lei Ordinária nº 14.236 que criou a Nova Política Estadual de Resíduos Sólidos que irá nortear as ações do Estado sobre o planejamento e a gestão de resíduos sólidos (PERNAMBUCO, 2010).

De acordo com o Brasil (2010), no país são coletadas 161.084 mil toneladas de lixo por dia, sendo que destas, 59,5% têm destinação irregular. Em Pernambuco, apenas 38% das 6.281 mil toneladas de lixo/dia têm destinação adequada. BATISTA (2004) afirmou que a situação nacional torna-se pior quando a questão dos resíduos industriais é mencionada, pois 88,4% dos municípios brasileiros não controlam seus resíduos e o descarte é feito junto com os resíduos domésticos, sendo dispostos no mesmo local.

Na Agenda 21, documento celebrado durante a Conferência Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento – CMMAD, em 1992, foram firmadas propostas que, no seu cumprimento, poderão promover a saúde do homem, a proteção da

natureza, o manejo dos recursos naturais e o desenvolvimento sustentável. Os capítulos 19 a 22 tratam especificamente e, respectivamente, do manejo saudável de substâncias químicas tóxicas, dos resíduos perigosos, dos resíduos sólidos e manejo seguro e saudável dos resíduos radioativos.

As normas brasileiras relacionadas à radioatividade são emitidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que é o órgão federal responsável pelo licenciamento e fiscalização das instalações nucleares e radiativas brasileiras. Com relação aos resíduos radioativos, dentre as normas da CNEN, não existe citação com relação a incrustações provenientes de dutos, equipamentos ou instalações ligados a qualquer tipo ou forma de caldeiras. Entretanto, podem-se mencionar algumas normas e regulamentação que se aplicam à Proteção Radiológica e a Resíduos sólidos.

A Norma CNEN - NN-3.01 (CNEN, 2005) estabelece as Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica, abrangendo os princípios, limites, obrigações e controles básicos para a proteção do homem e do seu meio ambiente contra possíveis efeitos causados pela radiação ionizante.

A Norma CNEN- NE- 6.02 (CNEN, 1998) estabelece o processo relativo ao licenciamento de instalações radiativas no tocante às atividades relacionadas com a localização, construção, operação e modificações de instalações radiativas. Enquanto isso, a Norma CNEN-NN-6.05 (CNEN, 1985) estabelece critérios gerais e requisitos básicos relativos à gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas.

Até janeiro de 2005, a CNEN não possuía legislação específica para a indústria de petróleo no que se refere à TENORM. No decorrer desse mesmo ano, foi publicada uma regulamentação, a POSIÇÃO REGULATÓRIA – 6.02/002 (CNEN, 2005) para as “Instalações de Produção de Petróleo e Gás dos Materiais, Peças ou Componentes Contaminados com Ra-226 e Ra-228 e seus Descendentes Radioativos”. Esse documento reporta-se ao capítulo 4 da Norma CNEN- NE-6.02 (CNEN, 1998) e a sua aplicação na classificação de instalações de produto e exploração de petróleo e gás, contendo materiais, peças ou componentes contaminados com Ra-226 e Ra-228 e seus descendentes radioativos. De acordo com a Posição Regulatória – 6.02/002, caso a instalação venha a ser enquadrada como Instalação Radioativa, serão aplicadas todas as prerrogativas de controle regulatório, no tocante a:

- a) proteção radiológica;
- b) transporte de material radioativo;
- c) gerência de rejeitos radioativos;
- d) liberação de materiais;
- e) deposição de rejeitos radioativos;
- f) controle de efluentes.

Além do mais, neste caso, a instalação também estará sujeita às demais normas aplicáveis da CNEN (CNEN, 2005). Com relação ainda à Posição Regulatória, é importante destacar a interpretação do requisito que diz: “Uma vez identificada que qualquer instalação de produção de petróleo e gás, em decorrência de sua operação, possa vir acumular quantidades de materiais contendo Ra-226 e/ou Ra-228 e seus descendentes radioativos em quantidades superiores a 100 Bq.g<sup>-1</sup>”, o que equivale a 100 kBq.kg<sup>-1</sup>. Nessa condição a instalação deve ser classificada de acordo com os critérios estabelecidos na Seção 4 da Norma CNEN-6.02 e um cronograma para o atendimento aos requisitos de radioproteção aplicáveis à situação deve ser estabelecido e submetido à aprovação da CNEN.

As Normas CNEN-NN-3.01, “Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica”, CNEN-NE-6.05 “Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radiativas” e CNEN-NE-5.01 “Transporte de Material Radioativo” devem ser aplicadas quando do manuseio, transporte, armazenamento ou deposição desses materiais.

É importante ainda citar a Norma CNEN-NN-4.01, de janeiro de 2005, da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Esse regulamento é aplicado a instalações minero-industriais que manipulam, processam, bem como armazenam minérios, matéria-prima, estéreis, resíduos, escórias e rejeitos contendo radionuclídeos das séries naturais do urânio e do tório. Com base nessa Norma estão isentas de controle as instalações que manuseiem ou gerem materiais com atividade específicas das substâncias radioativas sólidas naturais ou concentradas inferior a 10 Bq .g<sup>-1</sup> (10 kBq kg<sup>-1</sup>).

## 2.8 Formação de Incrustações em Caldeiras

As incrustações, de acordo com a ABNT NBR 10004:2004 são classificadas como resíduos sólidos. Nas lavanderias de beneficiamento de “jeans” as incrustações são geradas principalmente na caldeira. Nesse equipamento o vapor produzido gera uma pressão que é fornecida igualmente às secadoras, lavadoras e para o setor de acabamento (ferros de passar roupas), sendo por conseguinte responsável de forma indireta, pelo funcionamento da maioria dos equipamentos utilizados nas lavanderia têxteis (GALIZA NETO, 2006).

Caldeiras, segundo a classificação disposta na NR-13 (BRASIL, 2006) são todos os equipamentos que simultaneamente geram e acumulam vapor de água ou outro fluido. Esses equipamentos efetuam processos que são definidos como a operação de adição de energia calorífica ao fluido a ser aquecido. A função principal do sistema de controle de uma caldeira é manipular a relação de entrada e saída de energia, de maneira que as variáveis do processo sejam mantidas dentro do nível. O operador da caldeira controla a temperatura do fluido aquecido (variável controlada) e compara com a temperatura desejada, corrigindo vazão de vapor (variável manipulada) de modo a manter a variável controlada (temperatura no ponto de ajuste) (BEGA, 2003).

De acordo com Bega (2003), uma caldeira é composta por dois sistemas básicos separados. Um é o sistema vapor-água, também chamado de lado de água de caldeira, e o outro é o sistema combustível-ar-gás da combustão ou lado de fogo da caldeira. O início do sistema vapor-água é onde a água recebe calor através de uma barreira de metal sólido, sendo aquecida e transformada em vapor, deixando o sistema na forma de vapor.

O lado de fogo da caldeira inclui o combustível e o ar de combustão, necessários à queima desse combustível. Nesse sistema, o combustível e o ar de combustão são completa e cuidadosamente misturados, havendo na câmara de combustão, logo em seguida, a queima dos mesmos. A combustão converte a energia química do combustível em energia térmica, ou seja, calor. Esse calor é fornecido para o sistema vapor-água, para geração de vapor.

As incrustações são causadas por impurezas originadas de precipitações que ocorrem diretamente na superfície de troca de calor ou por material em suspensão na água. O processo de evaporação nas caldeiras leva à concentração dessas impurezas, que depositadas no metal, tornam-se duras e aderentes. Como os minerais são precipitados da água, eles formam diversos tipos de estruturas cristalinas (SANTOS FILHO, 1985).

As incrustações de carbonatos mais comuns, são geralmente granulares e algumas vezes muito porosas. A sua identificação pode ser facilmente realizada através do gotejamento direto de ácido clorídrico, com formação de bolhas de dióxido de carbono que emergem da incrustação.

Diante desses fatores relevantes, é importante destacar, as relações envolvidas entre alguns elementos disponíveis na natureza, assim como também, os seus comportamentos e suas interações com o ambiente.

### **Bário**

O Bário é um elemento raro nas águas naturais, encontra-se em teores de 0,0007 a 0,9 mg/L. As principais fontes naturais são: intemperismo e erosão de depósitos naturais, normalmente veios, onde ocorre na forma de barita ( $\text{BaSO}_4$ ), ou feldspatos ricos em bário.

Entre as atividades humanas que introduzem bário no meio ambiente, pode-se citar: perfuração de poços, onde é empregado em lamas de perfuração; produção de pigmentos, fogos de artifício, vidros e defensivos agrícolas.

Pela resolução CONAMA 396/08, o limite permitido de bário em águas subterrâneas, é de 0,7 mg/L. É um elemento muito tóxico acima desse teor, sua ingestão provoca elevação da pressão sanguínea, por vaso constrição e bloqueio do sistema nervoso.

### **Cálcio**

A concentração de cálcio nas águas subterrâneas varia de uma forma geral de 10 a 100  $\text{mg.L}^{-1}$ . As fontes primordiais de cálcio são os plagioclásios cálcicos,

calcita, dolomita, apatita, entre outros. O carbonato de cálcio é pouco solúvel em água pura.

O cálcio é produzido nas águas em forma de bicarbonato e sua solubilidade é função da quantidade de gás carbônico dissolvido. Esse valor de CO<sub>2</sub> dissolvido é bastante relativo e depende diretamente de fatores tais como pressão e temperatura para a determinação da solubilidade do carbonato de cálcio. A reação resultante é:



Toda oscilação de temperatura e de pressão que leva à alteração do CO<sub>2</sub> dissolvido refletirá sobre o conteúdo do cálcio. No caso das águas subterrâneas podem ocorrer dois casos, sendo um deles a solubilidade do carbonato de cálcio e o outro, a sua precipitação. A incrustação de um filtro de poço por carbonato de cálcio é uma das consequências desse processo.

## **Magnésio**

O magnésio é um elemento cujo comportamento geoquímico é semelhante ao do cálcio, esse fato é justificado por fazerem parte da mesma família na tabela periódica, ou seja, possuem características físicas e químicas semelhantes. Os minerais mais corriqueiros fornecedores de magnésio para as águas subterrâneas são: biotita, antibólitos e piroxênios. Esses minerais são mais estáveis diante do intemperismo químico do que os minerais fornecedores de cálcio. Diante disso, o teor de cálcio nas águas subterrâneas é significativamente menor do que o de magnésio.

Em regiões de rochas carbonáticas, o mineral dolomita é um importante fornecedor de magnésio. Nas águas subterrâneas, é encontrado em concentrações que variam entre 1 e 40 mg/L. O magnésio, depois do cálcio é o principal elemento responsável pela dureza das águas. Na água do mar, o magnésio ocorre em teores de próximos de 1.400 mg/L, bem superior ao teor do cálcio (cerca de 480 mg/L). Em águas subterrâneas nas regiões litorâneas, a relação Mg/Ca é um elemento caracterizador de água marinha (MASTERTON et al,1994).

A dureza da água se caracteriza pela presença de cátions divalentes, os quais são capazes de reagir formando precipitados com certos ânions presentes na água, produzindo crostas. Essa dureza provoca a redução da formação de espuma,

aumentando o consumo de sabão e detergentes. Além de causar gosto desagradável à água, a dureza é responsável por incrustação em caldeiras, aquecedores e canalizações. A dureza da água está especialmente ligada às concentrações de cálcio e magnésio, sendo o cálcio o principal elemento responsável por esse fator (VIANA et al., 2009; SILVA ; OLIVEIRA, 2001).

Além das incrustações a base de carbonatos, pode-se mencionar também as incrustações de sulfatos, que são quebradiças e não formam bolhas na presença de ácido, sendo bastante duras e densas. Enquanto isso, as incrustações de sílica têm aparência de porcelana, muito quebradiças e dissolvem-se lentamente em meio alcalino. Podem existir também incrustações formadas por depósitos de ferro, que têm coloração escura, sendo sua ocorrência devido à corrosão ou por contaminação de ferro na água. Elas são solúveis em ácido à quente, formando uma solução bem característica.

O controle de produtos químicos usados nos processos e a qualidade físico-química da água quando não são adequados podem ocasionar sérios problemas nas caldeiras. As incrustações formadas podem gerar como consequência, a ruptura de tubos, devido ao superaquecimento ou restrições em seus diâmetros. Elas também reduzem a geração de vapor e podem, muitas vezes, provocar sua contaminação (SANTOS FILHO, 1985).

As incrustações atuam como uma camada isolante e impedem uma eficiente transferência de calor através dos tubos de circulação de água. A redução na condutividade térmica diminui o rendimento da caldeira, levando ao superaquecimento, podendo resultar na fratura dos tubos.

A condutividade térmica dos principais compostos incrustantes é significativamente inferior a dos metais que normalmente compõem as caldeiras e seus equipamentos periféricos, notadamente de aço carbono e cobre. A Tabela 1 confirma a afirmação anterior.

Tabela 1 Condutividade térmica dos diversos tipos de incrustações e dos metais que compõem a caldeira (PASTOR et al., 2009).

<b>Composto Químico</b>	<b>Condutividade Térmica (kcal. m<sup>-2</sup>. h<sup>-1</sup>. c<sup>-1</sup>)</b>
Incrustação a Base de Sílica	0,2 ~ 0,4
Incrustação a Base de Carbonato	0,4 ~ 0,6
Incrustação a Base de Sulfato	0,6 ~ 2,0
Liga de Aço Carbono	40 ~ 60
Liga de Cobre	320 ~ 360

Os valores apresentados (Tabela 1) mostram que, quando da ocorrência de incrustações, existe uma resistência muito grande à transferência do calor gerado na câmara de combustão da caldeira para água, o que torna a eficiência do equipamento minimizada pela presença de depósitos (incrustações) sobre sua superfície de troca térmica.

Outro fator relevante com relação à presença de incrustação é o aumento de consumo do combustível devido à diminuição da eficiência de operação.

Paralelamente aos riscos inerentes à própria seguridade operacional do equipamento, a presença de incrustações também acarreta prejuízos quanto ao custo de operação da caldeira.

A presença de incrustação de carbonato de cálcio de 1,0 mm de espessura aderida à superfície de troca térmica da caldeira, causa um incremento no consumo de combustível em torno de 4%. De forma similar, a presença de incrustações silicosas promove um aumento no consumo de combustível na ordem de 8% (PASTOR et al., 2009). A Figura 1 ratifica o anteriormente exposto, relacionando o incremento no consumo de combustível com a espessura da incrustação.

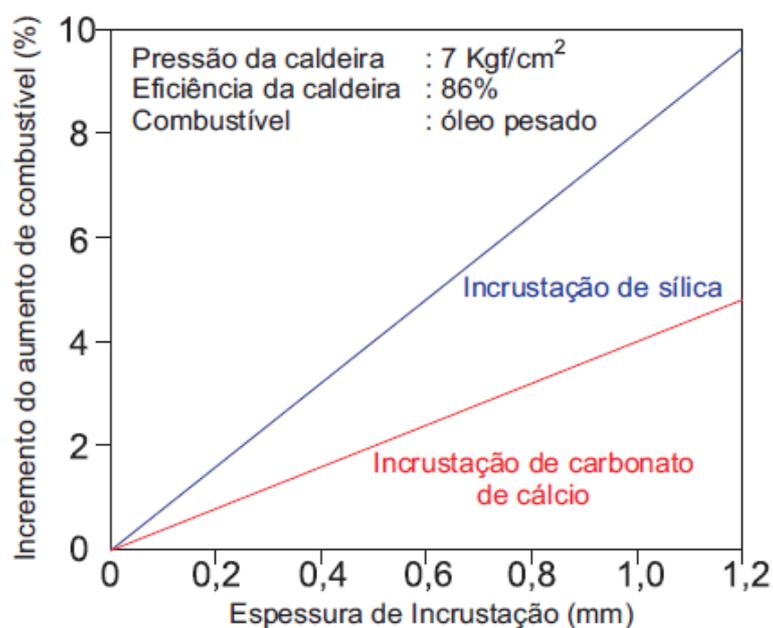


Figura 1 Relação entre espessura da incrustação e aumento do consumo de combustível (PASTOR et al., 2009)

De acordo com a THERMIDAIRE (2009), a espessura da incrustação de 3,7 mm pode aumentar o consumo de combustível da caldeira em 18%. O tratamento de água correto poderá reduzir os custos em no mínimo 20%. A Tabela 2 mostra as perdas na eficiência da caldeira devido à incrustação.

Tabela 2 Perdas na eficiência da caldeira devido à presença de incrustação

Espessura da incrustação (mm)	Percentual de perda da eficiência (%)	Carvão consumido por tonelada (lb)	Aumento do consumo de combustível (%)
0,05	4,0	80	4,0
1,0	7,0	140	7,0
2,0	11	220	11
3,65	18	360	18
6,25	38	760	38
12,7	60	1200	60
19,5	80	1800	80

Fonte: Tabela adaptada de Thermidaire (2009)

A importância do tratamento correto de águas de caldeiras pode ser observada também nas usinas de cana-de-açúcar, onde se tornam evidentes as perdas da eficiência da caldeira e maior quantidade de combustível com o aumento de espessura da incrustação. Como exemplo, tem-se que, para a moagem de 10.000 toneladas de cana-de-açúcar por dia, consome-se como combustível 429 toneladas de bagaço de cana-de-açúcar para uma espessura de incrustação de 1/16". Enquanto isso, para uma espessura de incrustação de 1/32", a quantidade de combustível consumido é 231 toneladas, sendo observado um aumento de praticamente 50% no aumento combustível utilizado no processo da moagem. (CUDDIHY et al., 2005).

De acordo com SUASSUNA (2000), cerca de 70% da superfície do Nordeste semi-árido se localiza sobre um escudo cristalino. Nessas áreas, não existem depósitos naturais de água generalizados e de grandes extensões. As águas subterrâneas apresentam-se armazenadas de duas formas: i) de modo restrito, em fendas ou fraturas do solo rochoso (escudo cristalino), e ii) em depósitos bem maiores, identificados em aluviões do sistema hidrográfico (SUASSUNA, 1994).

MOLINIER e colaboradores (1989) observaram que a água de chuva na região de Sumé, nos Cariris Velhos da Paraíba, após o escoamento superficial, tem sua concentração salina aumentada em até quatro vezes.

Enquanto isso, LEPRUN (1983), nas suas pesquisas desenvolvidas com águas superficiais e subterrâneas da região semi-árida cristalina, afirmam que a qualidade dessas águas (composição química e nível de concentração dos sais) tem influência direta do tipo de rocha e de solo com os quais elas têm contato. Desse modo, as águas subterrâneas utilizadas na produção de vapor também podem sofrer essa influência.

Tendo em vista que Caruaru está localizada na região do semi-árido pernambucano, onde a concentração de sais na água é muito elevada (SUASSUNA, 2000), espera-se encontrar formação de incrustações em caldeiras e tubulação nas indústrias de jeans que utilizam as águas subterrâneas da região.

Não só o Agreste pernambucano sofre a influência geológica da região, mas também a faixa litorânea do Estado de Pernambuco onde estão situadas as cidades

de Paulista e Goiana. Elas fazem parte do distrito minero que está compreendido entre Olinda e João Pessoa, onde se encontra instalada a Província Fosfática-Carbonática, onde são conhecidos inúmeros depósitos de fosfato e calcário de origem sedimentar (DANTAS, 2000).

## **2.9 Águas subterrâneas**

Toda água que se localiza abaixo da superfície terrestre, completando poros vazios intergranulares das rochas sedimentares, ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas cristalinas ou compactadas, correspondem a uma etapa ciclo da água, uma vez que é decorrente de uma porção da água que se precipita (SANTOS, 2010 Apud BOSCARDIN; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2004).

É importante ressaltar que as fontes de água subterrânea encontram-se armazenadas em aquíferos que são constituídos de unidades rochosas e de sedimentos com características porosas e permeáveis com excelentes condições de armazenar e transferir elevados volumes de água (SUGUIO, 2006).

As fontes de águas subterrâneas são classificadas em dois tipos, rasas ou profundas. As rasas são aquelas obtidas de fontes como, por exemplo, as minas; os poços rasos, comumente chamados de cisternas. Já as fontes subterrâneas profundas podem ser derivadas de poços artesianos e semi-artesianos.

A água subterrânea escoar lentamente até ser descarregada em corpos d'águas superficiais através das nascentes, sendo interceptadas pelas raízes de plantas extraídas por poços. Essa água possui algumas propriedades que tornam o seu uso mais vantajoso em relação às águas superficiais, ou seja: são "filtradas e purificadas", naturalmente através da percolação, determinando excelente qualidade e dispensando tratamentos prévios, para algumas utilizações; não ocupam espaço na superfície; e sofrem menor influência das variações climáticas (VIANA, 2009).

Essas modificações produzidas na água no decorrer do seu percurso ao subsolo, são também influenciadas pela ação do Intemperismo, que trata-se de processos naturais que causam alterações nas rochas.

Sendo assim, uma rocha afetada por esse processo libera seus produtos, que podem ser removidos fisicamente e em solução. O processo de retirada desses

produtos é chamado de erosão e a movimentação desses materiais é chamada de transporte (SUGUIO, 2006).

No trajeto até o subsolo, as águas podem receber componentes químicos. Essas substâncias contidas nas águas subterrâneas são provenientes de dissoluções ocorridas nas rochas e solos, além das relacionadas às atividades antrópicas. Esses constituintes químicos, ao serem adicionados às águas subterrâneas, através de corpos de organismos ou que sofreram reações químicas inorgânicas, precipitam-se como carbonatos, sílica e outras substâncias (SUGUIO, 2006).

É importante salientar também, que a reserva brasileira de água subterrânea é estimada em 12.000 km<sup>3</sup> de água doce (REBOUÇAS, 1999). Portanto, os lençóis de águas subterrâneas podem resultar em grandes possibilidades de captação de água, uma vez que, em alguns casos, podem-se obter razoáveis volumes de água com qualidade apropriada para o consumo humano (VIANA, 2009).

## **2.10 Radioatividade Natural**

A humanidade e o ambiente sofrem a influência direta e ou indireta da exposição inevitável às radiações ionizantes. Essas radiações podem ocorrer de diversas formas, sendo emitidas com diferentes energias e poder de penetração e, portanto, produzindo efeitos diferentes nos seres vivos e no meio ambiente. Dessa forma, uma grande proporção da dose de radiação recebida pela população mundial é oriunda de fontes naturais que vem atingindo a Terra ao longo da sua existência (BONOTTO, 2004).

Existem diferentes formas de exposição às radiações relacionadas aos vários compartimentos da Terra: atmosfera (<sup>222</sup>Rn), alimentos (<sup>40</sup>K), água (<sup>3</sup>H) e solo (<sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K). A presença de alguns radionuclídeos também pode ser detectada no corpo humano. No sangue e nos ossos, por exemplo, encontram-se <sup>40</sup>K, <sup>14</sup>C e <sup>226</sup>Ra. Além disso, os raios cósmicos, ao interagir com os elementos que compõem a atmosfera, produzem continuamente vários elementos radioativos, tais como <sup>7</sup>Be, <sup>10</sup>Be, <sup>14</sup>C, <sup>39</sup>Cl, <sup>3</sup>H, <sup>22</sup>Na, <sup>22</sup>P e <sup>33</sup>P (MANAHAM, 1994).

A exposição externa às radiações ocorre pela absorção de raios gama emitidos por radionuclídeos presentes em solos e rochas, enquanto a exposição interna é devido à ingestão ou inalação de radionuclídeos que se incorporam aos órgãos ou tecidos (BONOTTO, 2004).

A irradiação de órgãos e tecidos depende da distribuição interna dos radionuclídeos, do tempo de instalação em dado compartimento e de propriedades específicas da radiação emitida (LINSALATA, 1994). A cadeia alimentar, incluindo a água, é o mais importante meio de transporte dos radionuclídeos para os seres humanos e para os animais. A concentração presentes na água oscila bastante, sendo mais significativa para águas subterrâneas (HESS et al., 1985).

Existem locais onde a água potável é captada de poços subterrâneos próximos a depósitos minerais contendo urânio e seus descendentes, a exemplo da região fosfática de PE. Nesse caso, é importante quantificar os diferentes radionuclídeos presentes, para se ter noção da dose recebida pelos usuários dessa água (SILVA, 1995; LIMA, 1996; VALENTIM et al., 1997).

Segundo a UNSCEAR (2000), a radioatividade natural é responsável por cerca de 70% da exposição do homem à radiação ionizante. Para a maioria da população, a exposição à radiação natural excede aquela vinda das fontes artificiais, enquanto que, a dose efetiva média individual em termos mundiais é de 2,4 mSv devido à radiação natural, 0,4 mSv provêm de exposições médicas e apenas 0,2  $\mu$ Sv são derivadas da produção de energia em centrais nucleares. Dentre os radionuclídeos naturais, o radônio é o responsável por mais da metade da exposição humana (Figura 2).

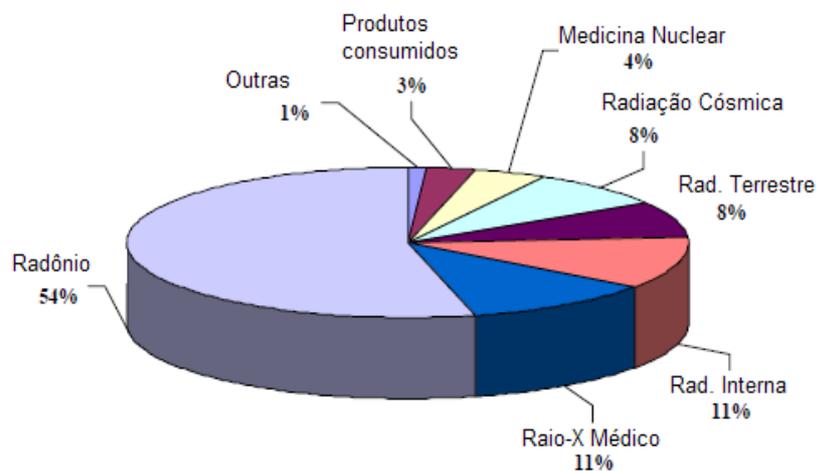


Figura 2

Exposição à radiação natural (UNSCEAR, 2000)

A maior parte dos elementos radioativos naturais pertence a três famílias ou séries radioativas: as séries do  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$  e do. Os radionuclídeos da série do  $^{235}\text{U}$  ou série do actínio ( $4n + 3$ ) possuem pequena importância radioativa, tendo em vista a pouca relevância em relação à dose de radiação natural, devido às baixas concentrações presentes na natureza (COWART; BURNETT, 1994).

A série do  $^{235}\text{U}$  está representada na Figura 3, onde se pode observar que a grande maioria dos seus descendentes possui tempo de meia-vida bastante reduzido.

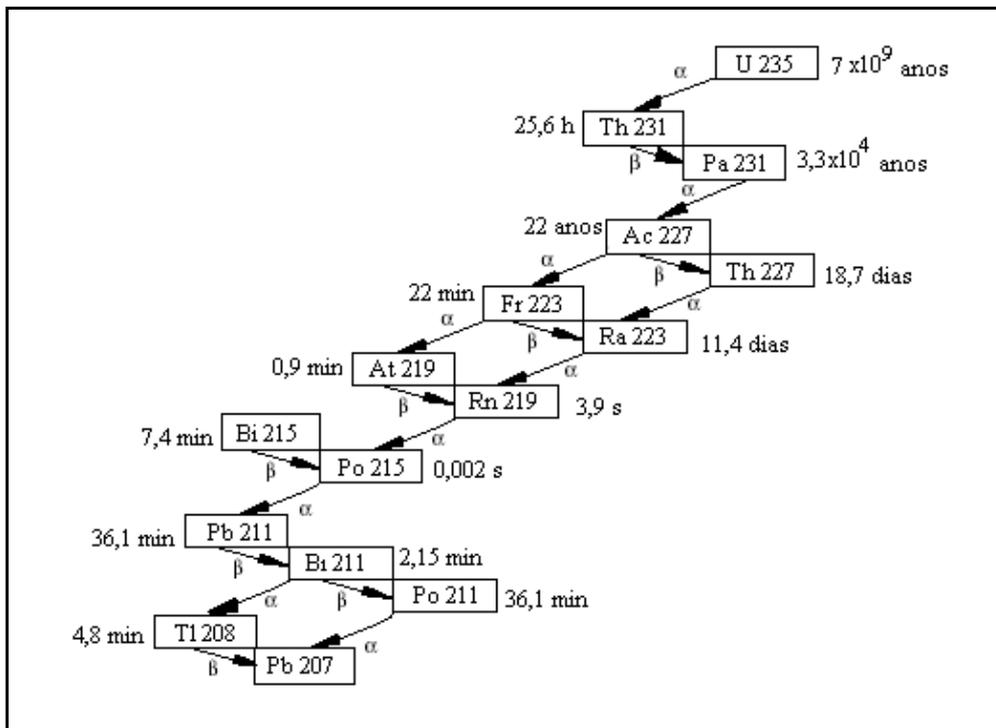


Figura 3. Série de decaimento do  $^{235}\text{U}$ .

A série do  $^{238}\text{U}$  (Figura 4), identificada como a série ( $4n + 2$ ), é a mais longa e importante do ponto de vista da proteção radiológica. Ela possui elementos emissores alfa e beta, desde o  $^{238}\text{U}$ , até o isótopo estável que é o  $^{206}\text{Pb}$ . Além do  $^{238}\text{U}$  ( $t_{1/2} = 4,5 \times 10^9$  anos) outros dois elementos da série têm meia-vida longa, o  $^{234}\text{U}$  com  $t_{1/2}$  de  $2,5 \times 10^5$  anos e o  $^{230}\text{Th}$  com tempo de meia-vida de  $7,7 \times 10^4$  anos (BONOTTO, 2004).

O  $^{226}\text{Ra}$ , sexto elemento da série, é um elemento de grande relevância radiológica. Ele apresenta meia-vida de 1600 anos e, após a emissão de uma partícula alfa, cuja energia é de 4,78 MeV, decai para o gás nobre  $^{222}\text{Rn}$  ( $t_{1/2}=3,82$  dias), único elemento gasoso da série, precursor dos elementos de meias vidas curtas ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ). O  $^{222}\text{Rn}$ , sétimo elemento da série, emite uma partícula alfa de 5,49 MeV.

O  $^{210}\text{Pb}$  emite uma partícula beta, transformando-se no  $^{210}\text{Bi}$ , o qual, após o decaimento radioativo, dá origem ao  $^{210}\text{Po}$ , último emissor alfa da série. O  $^{210}\text{Po}$  apresenta  $t_{1/2}$  de 138,4 dias e tem uma grande afinidade por tecidos macios. Alguns isótopos nessa série radioativa, como o  $^{210}\text{Pb}$  e o  $^{210}\text{Po}$ , são introduzidos no organismo humano pelos alimentos, especialmente peixes e crustáceos. Finalmente, para concluir a série do  $^{238}\text{U}$ , o elemento  $^{210}\text{Po}$ , através de uma emissão alfa, dá origem ao elemento estável, o  $^{206}\text{Pb}$ .

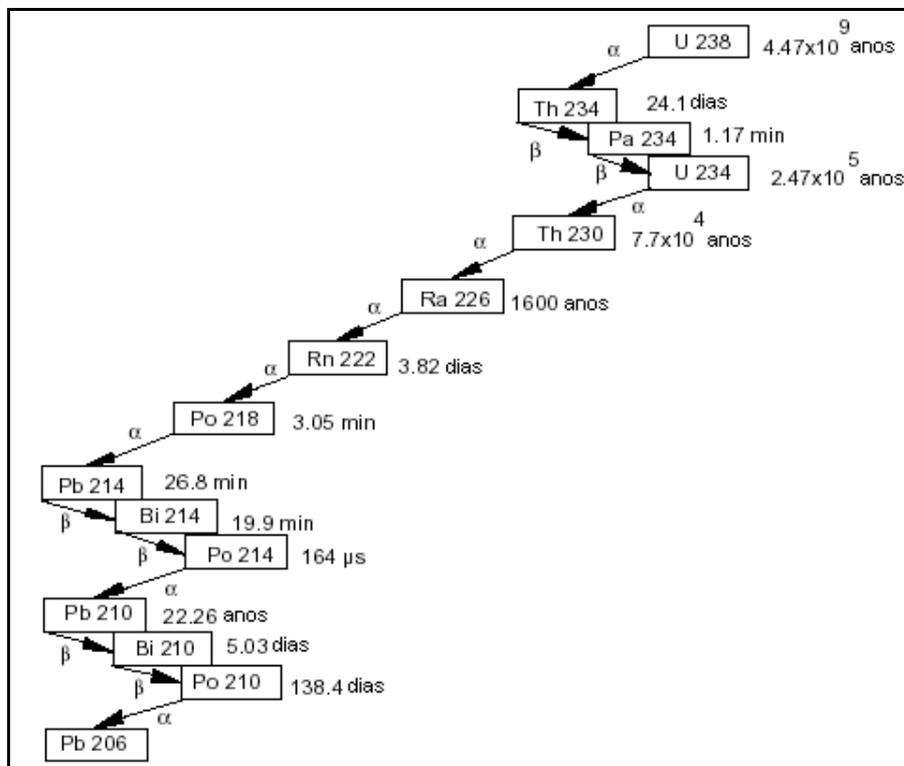


Figura . Série de decaimento do  $^{238}\text{U}$ .

O urânio é um elemento amplamente distribuído na crosta terrestre, com concentração média de  $2,0 \text{ mg.kg}^{-1}$  em solo (AIETA et al., 1987). Em alguns lugares do planeta, a erupção vulcânica é a principal responsável pelo o aumento do percentual de urânio natural na superfície da Terra (EISENBUD; GESSEL, 1997).

Nas rochas graníticas, rochas metamórficas, areias monazíticas, nos depósitos de fosfatos e em minerais com uranila e carnotita, são encontradas as mais elevadas concentrações de urânio. O urânio natural consiste quase que inteiramente do  $^{238}\text{U}$  (99,28%), contendo também  $^{235}\text{U}$  (0,71%) e  $^{234}\text{U}$  (0,0054%) (WISSER, 2003).

Outra família ou série radioativa de extrema relevância do ponto de vista radiológico é a série do  $^{232}\text{Th}$  (Figura 5), identificada como série 4n, que possui meia-vida longa, estimada em  $1,4 \times 10^{10}$  anos. Essa série é composta de 12 elementos dentre os quais estão o  $^{228}\text{Ac}$  ( $t_{1/2} = 6,13 \text{ h}$ ) e o  $^{228}\text{Th}$  ( $t_{1/2} = 1,9$  anos) representando o terceiro e quarto elementos da série, respectivamente. O segundo elemento da série é o  $^{228}\text{Ra}$  ( $t_{1/2} = 5,75$  anos) que possui importância significativa do ponto de vista radioproteção. O  $^{220}\text{Rn}$ , sexto elemento da série, apresenta meia-vida de apenas alguns segundos e, portanto, não tem uma maior relevância no contexto radiológico. A série é finalizada com o elemento estável  $^{208}\text{Pb}$ .

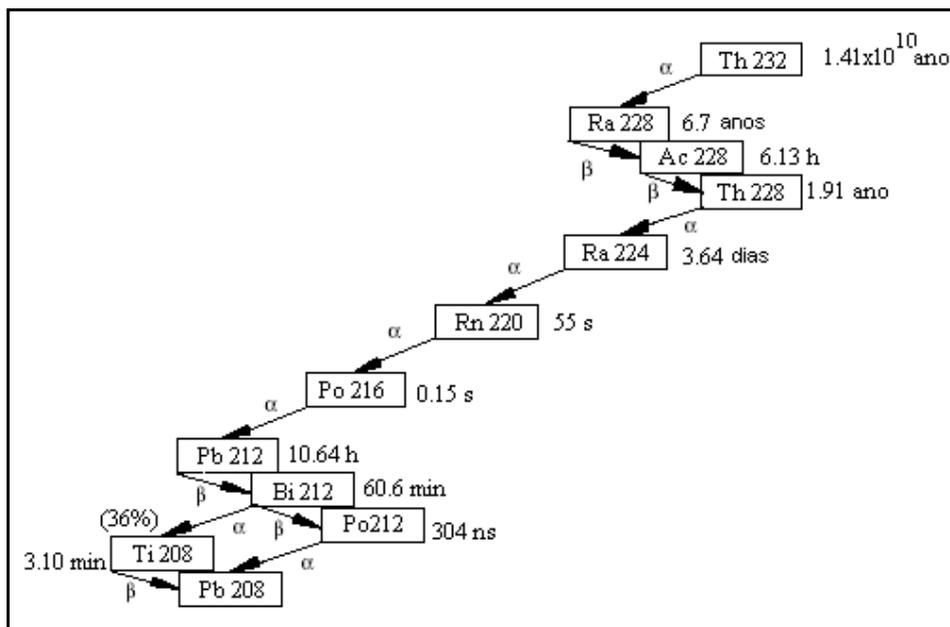


Figura 5. Série de decaimento do  $^{232}\text{Th}$ .

## 2.11 Radionuclídeos: $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ e $^{40}\text{K}$

O rádio é um elemento encontrado amplamente no meio ambiente, em vários níveis de concentração no solo, na água e nas rochas. Esse elemento faz parte do grupo dos metais alcalinos terrosos (Ca, Sr, Ba, Ra), que são extremamente reativos. Raramente encontram-se no estado livre e apresentam propriedades químicas semelhantes aos outros elementos pertencentes ao seu grupo, principalmente, o bário e cálcio (WILLIAMS; KIRCHMAN, 1990). Na natureza, o rádio é encontrado em quatro formas isotópicas, originadas do urânio e do tório que estão identificadas na Tabela 3.

Tabela 3 Isótopos naturais do rádio (UNSCEAR, 2000)

Isótopos	Série de decaimento	$T_{1/2}$	Radiação: energia (MeV); (probabilidade)	Isótopo filho
$^{228}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	5,8 a	$\beta$ : 0,039 (40%) $\beta$ : 0,013 (30%)	$^{228}\text{Ac}$
$^{226}\text{Ra}$	$^{238}\text{U}$	1.602 a	$\alpha$ : 4,784 (94,5%) $\alpha$ : 4,601 (5,55%)	$^{222}\text{Rn}$
$^{224}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	3,7 d	$\alpha$ : 5,6854 (94,9%) $\alpha$ : 5,4486 (5,06%)	$^{220}\text{Rn}$
$^{223}\text{Ra}$	$^{235}\text{U}$	11,4 d	$\alpha$ : 5,7162 (52,6%) $\alpha$ : 5,6067 (25,7%)	$^{219}\text{Rn}$
$^{40}\text{K}$	-	$1,3 \times 10^9$ a	*CE: 0,483 (10,7%) $\beta$ : 1,311 (89,3 %)	$^{40}\text{Ar}$ $^{40}\text{Ca}$

\*CE- Captura eletrônica

Alguns grupos de radionuclídeos podem apresentar comportamento ecológico semelhante, devido às suas propriedades químicas. Os elementos do grupo dos metais alcalino terrosos apresentam estado de oxidação  $+2$ . O  $^{226}\text{Ra}$  é parcialmente solúvel em água e a presença de altos teores de sulfato favorece sua remoção a partir da formação de cristais mistos de sulfato de bário e rádio ( $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$ ) (WILLIAMS; KIRCHMAN, 1990).

Por apresentar moderada solubilidade em água, a remoção do rádio a partir de cristais mistos é favorecida, podendo precipitar com os seguintes compostos: calcita:  $\text{CaCO}_3$ ; barita:  $\text{BaSO}_4$ ; carbonato de estrôncio:  $\text{SrCO}_3$ ; sulfato de estrôncio:  $\text{SrSO}_4$ . Os cloretos, brometos e iodetos são solúveis, mas sua solubilidade diminui com o aumento da concentração do respectivo sal, podendo contaminar com isso os aquíferos subterrâneos.

O rádio geralmente apresenta mobilidade em águas pobres em oxigênio e ricas em sais; já em águas oxigenadas e pouco mineralizadas, o rádio é insolúvel. Se as condições da água passarem de anaeróbias para aeróbias, o rádio conseqüentemente formará precipitado com hidróxido de ferro e manganês (WISSER, 2003).

O  $^{226}\text{Ra}$  é um dos radionuclídeos mais importantes da série do  $^{238}\text{U}$ , seus descendentes,  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{210}\text{Po}$  são elementos importantes da série. No entorno de locais próximos a minas de urânio o rádio, pode ser encontrado nos resíduos de mineração, como pode também ser transportado por ação dos ventos ou da água (CLULOW; PYLE, 1997).

O rádio entra no corpo humano, quimicamente e fisiologicamente como o cálcio, através dos alimentos e da água, incorporando-se nos esqueletos e dentes. Com isso, causa um aumento da dose de radiação interna (EISENBUD; GESSEL, 1997). Estima-se que a quantidade de  $^{226}\text{Ra}$  em equilíbrio no esqueleto corresponde a 25 vezes a sua ingestão diária. Portanto, a ingestão diária de 0,185 Bq produzirá uma carga no esqueleto de 4,625 Bq (CAMARGO, 1998).

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency – USEPA, 2000) considera o rádio um agente carcinogênico devido à sua radiotoxicidade. Pesquisas sobre a radiotoxicidade do  $^{226}\text{Ra}$  são de grande interesse, não só pela importância radioepidemiológica, mas também por sua larga biodisponibilidade no meio ambiente (MILLS, 1994).

A radiotoxicidade do  $^{226}\text{Ra}$  resulta: (a) na fixação desse radionuclídeo nos ossos; (b) na meia vida física e biológica longas e (c) na emissão de partícula alfa devido ao seu decaimento (IYENGAR, 1990). Ressalta-se que essas emissões alfa

são sempre acompanhadas por radiação gama, tanto para o radioisótopo  $^{226}\text{Ra}$ , como para o do  $^{228}\text{Ra}$  (CEPA, 2006).

O  $^{228}\text{Ra}$ , produto de decaimento do  $^{232}\text{Th}$ , com tempo de meia-vida longo de 5,7 anos, decai para o  $^{228}\text{Ac}$ . A energia média de 400 keV das partículas beta emitidas por esse radionuclídeo é suficiente para produzir ionização e excitação nas moléculas durante seu percurso pelo meio material. Sendo assim, o  $^{228}\text{Ra}$  é um elemento perigoso para a saúde do ser humano e animais, quando incorporado ao organismo (SILVA, 2006).

O nível máximo de contaminação por rádio em água de abastecimento nos Estados Unidos foi definido pela USEPA (2000) como  $185 \text{ mBq L}^{-1}$ . Para o  $^{226}\text{Ra}$ , este valor corresponde a  $110 \text{ mBq L}^{-1}$ . A longa meia-vida do  $^{226}\text{Ra}$  garante sua presença no aquífero. Já o  $^{228}\text{Ra}$ , descendente do  $^{232}\text{Th}$ , é controlado pela baixa solubilidade do tório. A curta meia-vida do  $^{228}\text{Ra}$  impede o seu transporte até longas distâncias (SIDLE et al., 2001).

Frissel e Koster (1990) estudaram o comportamento do rádio no solo e observaram que, na maioria das vezes, o  $^{226}\text{Ra}$  não migra diretamente do solo para a água. Porém, um aumento na acidez, resultante de ácidos orgânicos elementares, pode facilitar esse transporte. Em águas com elevada quantidade de sulfato, o  $^{226}\text{Ra}$  e o  $^{228}\text{Ra}$  são co-precipitados como sulfatos insolúveis, o que dificulta a migração do radionuclídeo (IAEA, 1990). Entretanto, o baixo pH, a elevada salinização e a baixa quantidade de oxigênio dissolvido aumentam a migração desses radionuclídeos em águas (EISENBUD ; GESSEL, 1997).

Um dos elementos primordiais mais importantes, relacionados à fonte natural de radioatividade, é o  $^{40}\text{K}$ . Esse elemento é considerado um litófilo e se concentra preferencialmente nas rochas ígneas ácidas (BONOTTO, 2004). Há pouca concentração em basaltos e areias, levando em consideração que as rochas graníticas, contêm em geral, altas concentrações desse elemento. Para o feldspato potássico o teor máximo de  $^{40}\text{K}$  é de 0,14% (EISENBUD; GESELL, 1997).

O nível médio de potássio nas rochas crustais corresponde a cerca de 2,5%, porém, dos três isótopos de ocorrência natural:  $^{39}\text{K}$ ,  $^{40}\text{K}$  e  $^{41}\text{K}$ , apenas o  $^{40}\text{K}$  é radioativo e ocorre numa proporção de apenas 0,0118% em relação à massa total

do potássio (PEIXOTO et al., 1995). O  $^{40}\text{K}$  decai por emissão de partícula  $\beta^-$  para o  $^{40}\text{Ca}$ . Alternativamente, pode ocorrer captura eletrônica, emitindo um raio gama com energia de 1,461 MeV (10,7%), formando o  $^{40}\text{Ar}$  (BONOTTO, 2004).

Na crosta terrestre, a presença de  $^{40}\text{K}$  é de larga relevância, tendo em vista que ele é responsável por 98% da emissão de radiação gama dos radionuclídeos. O potássio apresenta tempo de meia-vida física por volta de  $1,28 \times 10^9$  anos, biológica de 30 dias e atividade específica  $31 \text{ kBq.kg}^{-1}$  ( $836 \text{ pCi.g}^{-1}$ ) (PEIXOTO et al., 1995; EISENBUD; GESELL, 1997; SANTOS JÚNIOR et al, 2005). A média mundial da concentração específica do  $^{40}\text{K}$  é de  $370 \text{ Bq.kg}^{-1}$ , variando de 100 a  $700 \text{ Bq.kg}^{-1}$  (MCAULAY; MORAN, 1998).

É importante destacar que o potássio é um elemento essencial, que apresenta uma grande contribuição no desempenho das funções vitais do corpo humano. Ele se difunde igualmente no organismo, contribuindo com todas as células vivas, principalmente no tecido muscular (EISENBUD; GESELL, 1997).

De acordo com o United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR, 2000), devido ao fato do potássio ser um elemento essencial ao ser humano,  $^{40}\text{K}$  é incorporado juntamente com os isótopos não radioativos, sendo responsável por uma dose no indivíduo de  $180 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ .

## **2.12 Radioatividade e Formação de Incrustações**

A prioridade da concentração de certos radionuclídeos em uma matriz ocorre devido à especificidade de suas propriedades químicas, pois alguns radionuclídeos são mais solúveis ou têm maior mobilidade que outros. Deve-se observar, entretanto, que o comportamento químico é alterado à medida que os átomos radioativos se transmutam em outros átomos (HALON, 1993).

Quando matérias primas contendo NORM passam por processos industriais que concentram os radionuclídeos oriundos naturalmente do solo, da água e das rochas, pode ocorrer a formação de TENORM. Na indústria, os TENORM podem ocorrer em incrustações facilmente removíveis ou em incrustações muito duras e insolúveis em ácido e de difícil remoção (USEPA, 2000; GODOY; CRUZ, 2003).

Os radionuclídeos naturais, inclusive  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e seus descendentes, localizados em depósitos geológicos, podem ser trazidos para a superfície através da captação de água. Sendo assim, a formação de TENORM pode ocorrer em diversos tipos de indústrias que utilizam água em seus processos, tendo sido observada na indústria de mineração, na produção de energia (em incrustações e borras formadas na produção de petróleo), e em resíduos de tratamento de águas e efluentes (GAZINEU, 2005;KLEINSCHMIDT; AKBER, 2007).

Keinschmidt; Akber (2007) observaram em suas pesquisas que elevadas concentrações de rádio em água subterrânea ocorrem devido à interação entre a geologia do aquífero e suas propriedades químicas. Nas estações de tratamento de água, o rádio presente pode precipitar, ocorrendo então na forma de borras e incrustações. De acordo com esses autores, os resíduos gerados durante o tratamento de água, contêm elevadas concentrações de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{210}\text{Pb}$  quando comparados com os valores de referência adotados pela UNSCEAR (2000). Esses fatos podem ser comparados com a formação de incrustações produzidas pela água de formação de vapor utilizada na caldeira, tendo em vista a semelhança da origem da água que também é extraída do subsolo.

As concentrações de rádio encontradas em borras e incrustações da indústria de petróleo podem oscilar. Geralmente, pode-se encontrar concentrações de  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  em incrustações, variando entre 10 a 1.000 kBq. kg<sup>-1</sup> (GODOY, 1996).

Nos Estados Unidos, as concentrações de rádio total em borras e incrustações da indústria de petróleo podem chegar a alguns milhares de Bq, no entanto, apenas um percentual pequeno (menos que 1% do total) das borras e incrustações apresenta valores de rádio superior a 15.000 kBq.kg<sup>-1</sup> ou cerca de 400.000 pCi g<sup>-1</sup> (USEPA, 1993). Por comparação, observa-se que esses valores são bastante elevados: a maioria dos solos e rochas apresentam entre 18,5 e 185 kBq.kg<sup>-1</sup> (0,5 - 5 pCi.g<sup>-1</sup>) de rádio total. Enquanto isso, o minério de urânio que contém 1% em peso de urânio tem aproximadamente 122 kBq.kg<sup>-1</sup> (3.300 pCi.g<sup>-1</sup>) de  $^{226}\text{Ra}$  (ZIELINSKY; OTTON,1999).

Parâmetros físico-químicos relacionados à água, tais como pressão, temperatura, pH, e salinidade possuem significativa influência na formação de

incrustações. Na indústria do petróleo, em termos comparativos, pode-se dizer que a produção de óleo em suas diversas etapas modifica as condições do processo, pela alteração do pH, redução de pressão e pelo borbulhamento dos gases. Mudanças realizadas nesses parâmetros favorecem a deposição de radionuclídeos em borras, material arenoso e incrustações. Os radionuclídeos encontrados normalmente nessas amostras são  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{210}\text{Pb}$  (MATTA et al.,2001; GODOY,1996; VEGUEIRA et al.,2002). Pode-se dizer que o aparecimento das incrustações depende da salinidade da água de formação. Quando apresentam elevados níveis de sais de cloro ou de sulfato, gás carbônico e elementos alcalinos terrosos como cálcio, bário e rádio (HAMLAT et al.,2001).

De acordo com Testa et al (1994), a deposição de incrustação está relacionada com o tipo de tubos, à rugosidade da superfície dos dutos e é controlada por fenômenos de dinâmica dos fluídos e pela cinética de cristalização. Apesar das normas e regras específicas para TENORM serem muito restritas, no Brasil não existem normas direcionadas a esse problema. Enquanto isso, nos Estados Unidos, alguns Estados têm suas leis específicas (SMITH; BLUNT, 1995). Na Europa, a Comissão Européia (EC – European Commission) adotou o limite de  $1 \text{ mSv ano}^{-1}$  como referência para as atividades com TENORM. Estabeleceu que a concentração em atividade com NORM em resíduos da indústria não nuclear, não poderia ultrapassar  $500 \text{ kBq.kg}^{-1}$  (IAEA, 1996; PASCHOA, 2003).

Segundo SMITH et al (1996), cuidados devem ser tomados para reduzir a dose recebida por trabalhadores e pela população que residem em área cujo solo foi contaminado por TENORM e que consomem água e alimentos produzidos no local. Os Estados Unidos realizou uma simulação para estimar a dose recebida por indivíduos que vivem nesses lugares. Para se obter uma base de cálculos, foi suposto que o solo teria sido contaminado por concentrações de até  $1.110 \text{ Bq.Kg}^{-1}$  ( $30 \text{ pCi g}^{-1}$ ) de rádio, que é o limite máximo estabelecido por alguns estados americanos. De modo geral, a dose adicional por radiação, admitindo-se as vias de irradiação ou incorporação (exposição externa, ingestão e inalação) foi equivalente à dose média anual devido à radiação de fundo para a população americana (ZIELINSKI ; OTTON,1999).

Com relação especificamente a incrustações retiradas de caldeiras, não foram encontrados na literatura parâmetros relacionados à matriz de incrustação em caldeiras. Portanto, houve necessidade de se referenciar matrizes de incrustações produzidas em extração e produção de petróleo, onde foram estudados alguns radionuclídeos presentes nessas amostras. Nesses casos observou-se que a água reinjetada nos reservatórios para manter a produção de petróleo durante a exploração, parece ser a causa principal para a formação de incrustação (TESTA et al., 1994).

### **2.13 Espectrometria Gama**

A espectrometria de raios gama é uma técnica bastante eficaz para a determinação qualitativa e quantitativa da radiação de baixo nível em amostras ambientais, geológicas e alimentares, através da emissão de raios gama. A atividade dos elementos presentes na amostra é proporcional à taxa de contagem dos raios gama emitidos pelos radionuclídeos presentes na amostra. Além do mais, efeitos como auto-absorção e interferência da radiação de fundo podem influenciar nos resultados (LAURIA et al, 2007).

A espectrometria gama permite a identificação simultânea de diversos radionuclídeos e atualmente utiliza-se com grande frequência detectores de germânio hiperpuros (HPGe – High purity Germanium), sendo necessário serem resfriados com nitrogênio líquido (- 196 °C) quando em funcionamento. Esses detectores apresentam boa resolução em energia e linearidade de resposta numa ampla faixa de energia (KNOLL, 1989).

Em geral, os detectores HPGe são construídos na geometria cilíndrica ou coaxial, o que possibilita que se trabalhe com maiores volumes de material, necessário para espectrometria gama. Além disso, é um método rápido, multielementar e não destrutivo; e o tempo de análise está intimamente ligado às concentrações dos radionuclídeos de interesse (PAPACHRISTODOULOU et al., 2003).

As limitações desse método são o elevado custo do equipamento, a baixa sensibilidade quando comparado com os métodos radioquímicos tradicionais, o resfriamento com nitrogênio líquido e sua baixa eficiência em relação aos detectores que utilizam cristais de NaI(Tl) de mesmas dimensões (SILVEIRA, 2007).

Para baixas energias, em geral inferiores a 100 keV, ocorrem interferências da radiação de fundo, auto absorção gama e efeitos secundários (AMARAL, 1987). Para diminuir essas interferências, deve-se priorizar, as análises dos fotopicos produzidas por fótons de energia menores. A faixa de medida mais adequada para análise com espectrometria gama, está entre 120 e 1.500 keV para medidas com detectores convencionais (SANTOS JÚNIOR, 2009 apud BOLIVAR et al., 2003).

Em alguns casos, há a necessidade de se aguardar um tempo para que seja estabelecido o equilíbrio secular entre alguns dos radionuclídeos a serem medidos e os seus descendentes. Após atingir o equilíbrio secular, as taxas de desintegração do radionuclídeo pai e de seus descendentes são idênticas. Assim, os descendentes que tiverem energias gama mais apropriadas podem ser usados para a determinação da atividade do nuclídeo pai (ZIELINSKY; BUDAHN, 1998).

A medida da atividade gama do  $^{226}\text{Ra}$  também apresenta certa dificuldade: a linha de 186,2 keV (probabilidade de emissão de 3,2%), correspondente à radiação gama emitida por este radionuclídeo podem formar dubletos com a radiação gama do  $^{235}\text{U}$  (185,7 keV e probabilidade de emissão de 54%). A incerteza na medida pode ser de 10%, se a linha de 186,2 keV for usada para medida do  $^{226}\text{Ra}$ . No entanto, se o equilíbrio secular for estabelecido, pode-se medir o  $^{226}\text{Ra}$  através de seus descendentes, bastando para isso conhecer as constantes de decaimento e a probabilidade de emissão gama do radionuclídeo filho (HEATON, 1998; AZOUAZI et al., 2001).

Na prática, tanto o  $^{226}\text{Ra}$  como o  $^{228}\text{Ra}$  são medidos em espectrometria gama pelos seus descendentes. Tanto as linhas dos fotopicos 295 keV (18,7%) e 352 keV (37,1%) do  $^{214}\text{Pb}$ , como a linha de 609 keV (46,1%) do  $^{214}\text{Bi}$  (MALANCA et al., 1993; MALCZEWSKI et al., 2004; SILVEIRA, 2007), assim como do fotopico de 1120 keV (14,4%) do  $^{214}\text{Bi}$  podem ser usadas para medida do  $^{226}\text{Ra}$ . Enquanto isso, as linhas de 911 keV (27,7%) e 968 keV (16,6%) do  $^{228}\text{Ac}$  podem ser usadas para medida do  $^{228}\text{Ra}$  (SILVEIRA, 2007), embora também se use a linha de 583 keV

(86%) do  $^{208}\text{Tl}$ , pertencente à série do  $^{232}\text{Th}$  (AKSOY et al., 2002). O  $^{40}\text{K}$  é determinado pela transição gama de 1.460 keV.

A Tabela 4 apresenta com melhor clareza algumas importantes energias com as quais se pode trabalhar na interpretação dos resultados.

Tabela 4. Principais energias gama para determinação de radionuclídeos naturais através de núcleos emissores de raios  $\gamma$ .

Nuclídeo a ser determinado	Nuclídeo emissor	Energia dos fótons(keV)	Probabilidade de emissão (%)
$^{226}\text{Ra}$	$^{214}\text{Pb}$	242	7,5
	$^{214}\text{Pb}$	295	19,2
	$^{214}\text{Pb}$	352	37,1
	$^{214}\text{Bi}$	609	46,1
	$^{214}\text{Bi}$	1.120	15,0
$^{228}\text{Ra}$	$^{228}\text{Ac}$	911	26,6
	$^{228}\text{Ac}$	968	16,2
$^{40}\text{K}$	$^{40}\text{K}$	1.460	10,7

Modificado de PAPP et al.,1997.

## 2.14 Espectrometria de Absorção atômica

Na técnica de absorção atômica, a solução a ser analisada é aspirada e convertida em aerossol, onde ocorre uma mistura com o gás combustível (acetileno) e um gás oxidante (ar ou óxido nítrico) que fluem para o atomizador (chama ou forno grafite), onde à elevada temperatura, o solvente é evaporado e as pequenas partículas que se formam são fundidas e vaporizadas.

O vapor, que é constituído por uma fonte característica do elemento a ser determinado, atravessa o sistema de atomização, onde parte dessa luz é absorvida pelos átomos do analito. O grau de absorção é proporcional à quantidade de átomos livres presente na chama, obedecendo a Lei de Lambert-Beer (Vogel, 1986). O cálculo para absorbância é realizado pela Equação 1.

$$\text{Absorbância} = \frac{\log I_0}{I} = K.C.L. \quad (1)$$

Onde:

$I_0$  = intensidade da radiação incidente emitida pela fonte de luz;

$I$  = intensidade da radiação transmitida (quantidade não absorvida);

$C$  = concentração da amostra (átomos livres);

$K$  = constante de proporcionalidade;

$L$  = caminho óptico (comprimento que a luz percorre através da amostra).

A região do espectro a ser lida é isolada por um monocromador, cujo sistema contém uma célula fotomultiplicadora que registra um sinal que será processado digitalmente para expressar os resultados.

A Figura 6 ilustra o equipamento de espectrometria de absorção atômica, utilizado em diversas análises, de diferentes matrizes.



Figura 6. Espectrometria de absorção atômica

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

O trabalho de pesquisa foi realizado em instalações industriais do estado de Pernambuco. Foram coletadas oito amostras de incrustações formadas em tubulações de caldeiras de oito lavanderias têxteis, e duas amostras de uma usina de cana-de-açúcar. A seguir foram identificados os radionuclídeos naturais concentrados nesses materiais.

Inicialmente, foi feito um levantamento na região do Agreste pernambucano, envolvendo as cidades de Caruaru, Toritama e Cruz das Almas, para identificar possíveis pontos de coleta. Dentre essas três cidades foi escolhida a cidade de Caruaru por possuir uma maior quantidade de caldeiras em fase de manutenção.

Após essa etapa do trabalho, foram feitas visitas técnicas às lavanderias têxteis para conhecer a estrutura e as etapas envolvidas no processo de lavagem dos tecidos e quais as operações responsáveis pelo processo de beneficiamento têxtil.

Em cada lavanderia avaliou-se a presença de incrustações nas caldeiras e tubulações, para possível análise. Foi feito também um trabalho de levantamento para determinar a origem da água que alimenta a caldeira. Além do mais, foram avaliadas as condições de estocagem dos rejeitos, na forma de incrustações em tubulações, que ficam acumulados nas lavanderias.

Além das amostras de Caruaru coletaram-se também amostras de incrustações de indústrias situadas em duas cidades que fazem parte da Região Fosfática de Pernambuco, Paulista e Goiana. Essas amostras foram oriundas também da indústria de confecção, salvo duas amostras que foram coletadas de uma usina de cana-de-açúcar.

#### **3.1 Locais de Estudo**

As amostras foram retiradas diretamente de tubulações das caldeiras das diferentes indústrias. Foram medidas as concentrações em atividade de dez amostras, das quais cinco foram coletadas na cidade de Caruaru, sendo elas

identificadas pelos números um até cinco. Enquanto isso, a amostra seis foi coletada na cidade de Paulista. Na cidade de Goiana foram coletadas quatro amostras, onde duas delas (sete e oito) foram coletadas em lavanderias têxteis, e as outras duas (nove e dez) de uma usina de cana-de-açúcar localizada na mesma região.

Como exemplo dessas indústrias têxteis, cita-se uma lavanderia de médio porte, que lava em média 150.000 peças por mês, com aumento nos períodos sazonais. Essa indústria possui 13 máquinas de lavar (de 4, 15, 40, 60, 150 e 200 kg de capacidade), sendo que duas dessas máquinas são usadas para testes de novos tipos de lavagens e novos tingimentos.

A lavanderia possui também quatro centrífugas (de 10 e 50 kg) e sete secadores (de 50, 100 e 120 kg de capacidade). Todas essas máquinas, responsáveis pelo beneficiamento da peça, são alimentadas pelo vapor produzido na caldeira.

A água utilizada para produção de vapor na caldeira é de origem mineral, vinda de uma serra próxima e de poços artesianos com aproximadamente 100 metros de profundidade e o combustível utilizado é a lenha. Com relação à manutenção da caldeira, ela é realizada anualmente, dependendo do resultado das análises das incrustações, que são realizadas mensalmente por equipe especializada. As operações úmidas, quer sejam lavagens ou tingimentos, têm procedimentos pré-estabelecidos que variam de acordo com o pedido do cliente.

### **3.2 Coleta e preparação de amostra**

As amostras de incrustação foram coletadas diretamente da superfície dos tubos no interior das caldeiras. (Figura 7). Para cada amostra, coletou-se cerca de 400g de incrustação. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e enviadas para os laboratórios do Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN/NE) onde foram realizadas as determinações dos teores de radionuclídeos.



Figura 7. Incrustação produzida numa tubulação de água, seccionada de uma caldeira.

Na Figura 8, observa-se o momento da abertura da caldeira onde foi realizada a medida da condutividade térmica para se verificar a espessura da incrustação. Essa etapa é crucial para a manutenção da caldeira, pois a partir daí define-se se a mesma será ou não aberta. Caso seja, coleta-se amostra para análise.



Figura 8. Medida da condutividade térmica para verificar a espessura da incrustação.

Após a coleta as amostras passaram por um tratamento prévio, quando foram secas em estufa, por 2 horas a 105°C e depois resfriadas no dessecador por 40 minutos.

Após secagem, as amostras foram maceradas em almofariz para haver uma melhor uniformidade na granulometria do material, aumentando com isso, a eficiência da etapa seguinte que consistiu em triturar as amostras no moinho de jarro, marca LICIT, a 250 rpm, para garantir a homogeneidade das amostras.

Cerca de 100 g de cada amostra de incrustação foram então cuidadosamente pesados e colocados em recipientes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 60 mm de altura. Cada recipiente foi vedado com adesivo selante de silicone e com fita isolante para evitar a fuga do gás radônio e assegurar o equilíbrio entre os radionuclídeos presentes na amostra. Com esta finalidade, antes do procedimento de análise espectrométrica gama, as amostras foram armazenadas por 30 dias, para o equilíbrio entre o  $^{226}\text{Ra}$  e os seus descendentes de curta meia-vida da série do  $^{238}\text{U}$ .

Para a determinação dos teores de cálcio, magnésio e de bário reservou-se uma porção analítica das mesmas amostras preparadas para as análises de radionuclídeos.

### **3.3 Determinação dos Radionuclídeos em Estudo**

As concentrações de atividade dos radionuclídeos foram determinadas nas incrustações geradas nas superfícies das tubulações.

Foram estudados os radioisótopos naturais da série do urânio e do tório, destacando-se os isótopos do rádio com meia-vida mais elevada, pois são esses os que apresentam maior risco do ponto de vista da proteção radiológica. Dentre esses elementos, foram selecionados o  $^{226}\text{Ra}$  (meia-vida de  $1,6 \times 10^3$  anos) e o  $^{228}\text{Ra}$  (meia-vida de 5,8 anos), radionuclídeos que surgem com maior frequência em incrustações. Determinou-se também para as mesmas amostras, a concentração de  $^{40}\text{K}$  (meia-vida de  $1,3 \times 10^9$  anos), elemento radioativo presente na natureza com elevada abundância.

### **3.4 Determinação do Teor de Radionuclídeos por Espectrometria Gama**

Para a determinação de radionuclídeos faz-se necessário o uso de uma série de recursos como: equipamentos calibrados, padronização das amostras e análise

de espectros a fim de garantir o bom funcionamento do sistema e uma melhor precisão dos resultados. De acordo com LAURIA et al. (2007), espectrometria gama é um dos métodos mais utilizados nos dias atuais para medir a atividade de radionuclídeos em resíduos, pois dispensa métodos químicos complexos. Esses equipamentos têm ainda a capacidade de medir simultaneamente diversos radionuclídeos.

### 3.4.1 Sistema de contagem no HPGe

Os teores de radionuclídeos foram analisados por um sistema de espectrometria gama medidas (Figura 9) baseado em um detector de germânio hiper puro, HPGe da Canberra®. O detector utilizado apresenta uma resolução de 2,6 keV (largura do pico a meia altura) para a energia de 1.332 keV para o  $^{60}\text{Co}$ , eficiência relativa de 27,7% e está acoplado a um MCA (“multichannel analyzer”) Canberra® com 8.192 canais, onde as aquisições foram gerenciadas pelo “software” Genie-2000 da Canberra®. O analisador multicanal permite a transformação dos pulsos lineares em sinais digitais, realizando o processamento de separação por intervalos de energia.

A resposta do sistema é observada pelo monitor na forma de um histograma que correlaciona o número de contagens e a amplitude do pulso (energia).



Figura 9 .Sistema de medidas (Lab. de Instrumentação– DIAMB/CRCN).

Com o sistema de detecção utilizado, a concentração em atividade de vários elementos radioativos pode ser determinada simultaneamente. Para cada elemento, a concentração específica foi determinada pela integração de todas as contagens sob o pico correspondente à radiação gama emitida pelo radionuclídeo de interesse. A radiação de fundo foi diminuída de cada contagem.

Para a determinação dos teores de radionuclídeos, as amostras foram posicionadas diretamente sobre o detector, em função de sua baixa atividade. O tempo de contagem foi de 80.000 segundos, com a finalidade de diminuir o erro estatístico de contagem.

### 3.4.2 Eficiência de contagem

A eficiência de contagem do detector para raios gama, como função de energia foi determinada usando uma fonte padrão líquida de  $^{152}\text{Eu}$ , certificada pelo IRD/CNEN (Instituto de Radioproteção e Dosimetria, da Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro).

O padrão de  $^{152}\text{Eu}$  é considerado um “multi-emissor” gama, emitindo na faixa entre 120 keV e 1.408 keV. Esse padrão foi utilizado por atender às transições gamas de interesse.

A partir da Equação 2 foram calculadas as eficiências de contagem, baseadas na área de cada fotopico. Nesta equação o número de contagens líquidas, diminuído da radiação de fundo é representado pela letra  $C$ , o tempo de contagem por  $t$ , a concentração da atividade gama do radionuclídeo padrão por  $A$ , as abundâncias gamas percentuais por  $I_Y$  e  $M$ , a massa da amostra (kg).

$$\mathcal{E} = \frac{C}{A \times t \times I_Y \times M} \quad (2)$$

### 3.4.3 Determinação da concentração de atividade

A concentração de atividade de cada radionuclídeo nas amostras analisadas foi calculada pela Equação (3):

$$A = \frac{C}{\varepsilon \times t \times I_Y \times M} \quad (3)$$

onde **A** representa a concentração de atividade para o radionuclídeo considerado  $\text{Bq.kg}^{-1}$ , **C** é a área líquida total do pico correspondente a uma determinada energia (contagem), obtida experimentalmente;  $\varepsilon$  é a eficiência de contagem para a energia específica considerada; **t** é o tempo de contagem (s);  $I_Y$  é a abundância gama percentual do radionuclídeo em consideração e **M** a massa da amostra (kg).

Para a contagem de radiação de fundo foi utilizado um recipiente vazio, idêntico ao usado nas contagens das amostras, com o mesmo tempo de contagem. O resultado dessa contagem foi subtraído da contagem de cada amostra analisada.

### 3.5 Determinação dos teores de $\text{Ca}^{++}$ , $\text{Mg}^{++}$ e $\text{Ba}^{++}$

A caracterização química das amostras de metais em incrustação foi realizada no laboratório SM Controle de Qualidade Limitada. Para o cálcio e o magnésio utilizou-se o método titulométrico do EDTA. Esse é o método mais comumente empregado na determinação de dureza, sendo baseado na reação de ácido etilenodiaminatetracético (EDTA) ou seus sais de sódio, que formam complexos solúveis quelados com certos cátions metálicos, conforme a Equação 4.



Esse método consiste em tomar uma alíquota de 0,5 g de amostra e submeter à digestão com ácido clorídrico a quente, ferver em chapa aquecedora até próximo a *secura*. Dissolver o resíduo com 20 mL de solução de HCl (1+5) e avolumou-se para um balão de 100 mL. Conforme metodologia recomendada pela Instrução Normativa

nº 28 do Ministério da Agricultura Pecuária e Desenvolvimento. A partir dessa etapa obteve-se o extrato que foi utilizado nas análises de cálcio, magnésio e bário.

Para a determinação do cálcio, tomou-se uma alíquota de 5 mL do extrato em frasco de erlenmeyer de 125 mL e adicionou-se 50 mL de água destilada, 5 mL da solução Hidróxido de Potássio e Cianeto de Potássio (veneno) e  $15 \pm 1$  mg do indicador calceína sob agitação, após colocar cada reativo. Titulou-se com EDTA 0,02 M, até a mudança de vermelho para violeta intenso e anotou-se os volumes gastos (V1). Desenvolveu-se uma prova em branco e anotou-se o volume consumido (V2). A partir da Equação 5, foi calculada a percentagem para o cálcio.

$$\% \text{ Ca} = \frac{112,16M(V1-V2)}{G}, \text{ onde:} \quad (5)$$

V1= Volume (mL) da solução de EDTA padronizado gasto na titulação.

V2 =Volume (mL) da solução de EDTA padronizado gasto na titulação do branco.

G = Massa inicial da amostra, em gramas.

M = Concentração molar da solução de EDTA.

Em seguida, para a determinação do magnésio, tomou-se uma alíquota do extrato de 5mL para erlenmeyer de 125 mL e adicionou-se 50 mL de água destilada, 5 mL de solução tampão de pH = 10 e 10 gotas de negro de eriocromo T, agitou-se após a adição de cada reagente. Titulou-se imediatamente o cálcio mais o magnésio (dureza total) com EDTA 0,02 M até a viragem do indicador de vermelho vinho para azul puro e estável. Anotou-se o volume gasto (V3) da solução de EDTA consumido. Desenvolveu-se uma prova em branco e anotou-se o volume consumido (V4). A partir da Equação 6 foi calculada a percentagem para o magnésio.

$$\% \text{ Mg} = \frac{80,62M [(V3-V4) - (V1-V2)]}{G}, \text{ onde:} \quad (6)$$

V1= Volume (mL) da solução de EDTA padronizada gasto na titulação.

V2 =Volume (mL) da solução de EDTA padronizada gasto na titulação do branco.

V3= Volume (mL) da solução de EDTA padronizada gasto na titulação do cálcio mais o magnésio.

V4 =Volume (mL) da solução de EDTA padronizada gasto na titulação do branco do cálcio mais o magnésio.

G = Massa inicial da amostra, em gramas.

A opção por este método foi feita devido aos altos teores característicos de cálcio e magnésio encontrados de um modo geral em amostras de incrustação.

A técnica utilizada para determinação do bário foi a de espectrometria de absorção atômica por chama (AAS), no módulo de absorbância. Utilizou-se equipamento da marca Varian modelo GTA 110, com lâmpada de cátodo oco operando em 10mA e comprimento de onda de 283,3 nm de absorbância.

O controle de qualidade das medidas por espectrometria de absorção atômica foi realizado utilizando-se ácidos com alto grau de pureza nos processos de tratamento das amostras, além de água tri-destilada. As soluções foram preparadas com micropipetas automáticas com ponteiros descartáveis. As pesagens foram feitas em balanças analíticas com quatro casas decimais.

Todos os materiais utilizados nas etapas dos procedimentos analíticos foram descontaminados, sendo imersos em solução detergente Extran neutro a 5% por oito horas, enxaguando-se com bastante água, em seguida imersos em solução de ácido nítrico a 10% por doze horas, enxaguando-se novamente, secando-se em capela de fluxo laminar. Para a precisão dos resultados, todas as amostras foram analisadas em triplicata e a concentração calculada como a média aritmética desses resultados, com desvio padrão menor que 10% (INMETRO, 2003).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente são apresentados os cálculos da eficiência de contagem para as medidas de espectrometria gama e o cálculo do limite de detecção para os radionuclídeo em estudo.

Nesse capítulo são apresentados ainda os resultados obtidos para a concentração em atividade das amostras de incrustação coletadas em caldeiras nas diferentes instalações industriais.

A seguir são apresentados também os resultados das análises para as concentrações de cálcio, magnésio e bário e suas correlações com o rádio.

### 4.1 Cálculo da eficiência de contagem

A eficiência de contagem foi calculada utilizando-se uma amostra com baixa radiação natural e com a mesma geometria e granulometria das amostras analisadas, à qual foram adicionados 5mL do padrão líquido de  $^{152}\text{Eu}$ . Na Figura 10, apresenta-se a curva de eficiência produzida experimentalmente. A equação dessa curva ajustada (Equação 7) serviu para calcular as eficiências de contagem para as energias de 241, 295, 352, 609, 911, 968, 1.120 e 1.460 keV empregadas na determinação das atividades.

A partir do gráfico (Figura 10), encontrou-se a Equação 7:

$$\ln(Ef) = -38,86 + 20,84 \times \ln(E) - 4,223 \times \ln(E)^2 + 0,3477 \times \ln(E)^3 - 0,00979 \times \ln(E)^4 \quad (7)$$

Onde,  $Ef$  é a eficiência calculada e  $E$  é a energia de interesse.

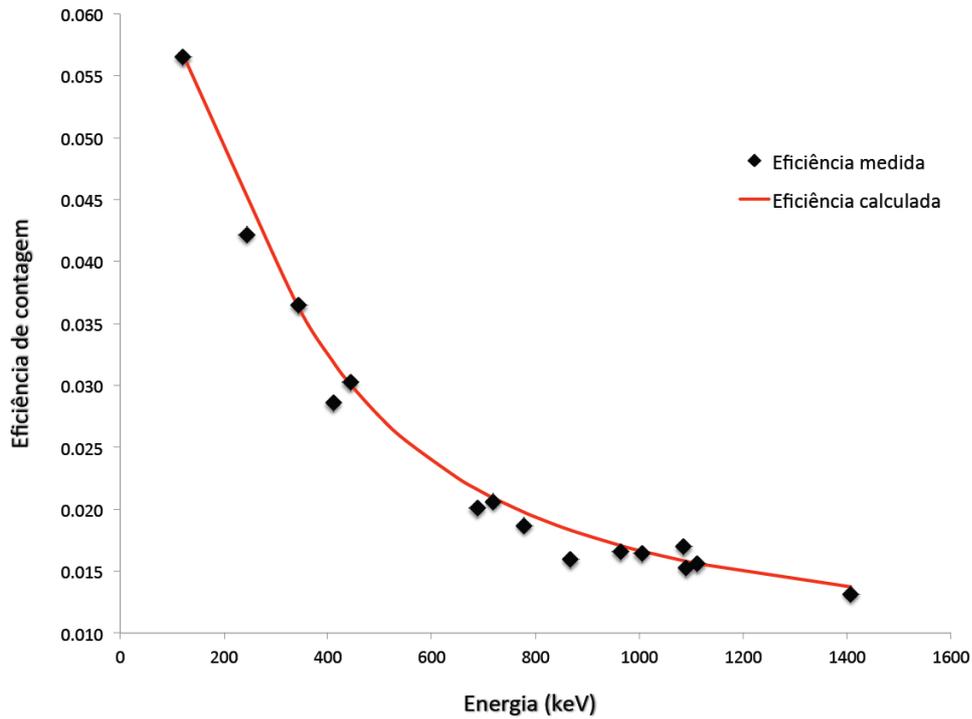


Figura 10. Eficiência de contagem.

#### 4.2 Cálculo do limite de detecção

Na espectrometria de raios gama os limites de detecção para as energias gama em estudo foram calculados pela Equação 8 (CURRIE, 1968), sendo as medidas realizadas com os recipientes vazios, e para o mesmo tempo de contagem das amostras:

$$LD = \frac{4,66\sqrt{C}}{\varepsilon \times t \times I_{\gamma} \times M} \quad (8)$$

Na Equação 9 o número 4,66 é uma constante calculada para o limite de confiança de 95%,  $C$  é a área líquida total do pico para a energia do radionuclídeo (contagens);  $\varepsilon$  é a eficiência de contagem para cada energia específica de interesse;  $t$  é o tempo de contagem em segundos (s);  $I_{\gamma}$  é a abundância gama percentual do radionuclídeo em consideração, e  $M$  a massa da amostra (kg).

Na Tabela 5 estão apresentados os limites de detecção para os radionuclídeos analisados, calculados a partir da Equação 9.

Tabela 5 Limite de detecção para as amostras analisadas.

Radionuclídeo	Limite de detecção
$^{226}\text{Ra}$	1,36
$^{228}\text{Ra}$	1,78
$^{40}\text{K}$	14,63

### 4.3 Resultados do padrão de referência

Para maior segurança dos resultados obtidos foi realizada uma análise gama em um material de referência (IAEA – 375 Radionuclides and trace elements in soil), compatível com as amostras analisadas. O material de referência foi fabricado pela IAEA (International Atomic Energy Agency) e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 Resultados obtidos por espectrometria gama para material de referência

Radionuclídeo	Concentração referenciada (Bq.kg <sup>-1</sup> )	Concentração encontrada (Bq.kg <sup>-1</sup> )	Erro (%) relativo
$^{40}\text{K}$	424 (417 - 432)	419	- 1
$^{226}\text{Ra}$	20 (18 - 22)	18	-10
$^{232}\text{Th}$ ( $^{228}\text{Ra}$ )	20,5 (19,2 – 21,9)	20,9	2

Os valores encontrados a partir da espectrometria gama foram próximos aos referenciados (valor verdadeiro). Os erros relativos variaram dentre -10 e 2 %.

Sendo assim, o método analítico empregado foi considerado adequado para a determinação gama de radionuclídeos.

Os valores obtidos de concentração, quando comparados à concentração recomendada estão bem próximos da faixa de confiança.

Com relação ao  $^{232}\text{Th}$ , deve-se observar que o material de referência utilizado nesse trabalho usa a concentração em atividade para o tório e não para o  $^{228}\text{Ra}$ . Entretanto, esse fato não apresenta problemas, pois é possível estimar o comportamento do filho pelo pai, assumindo o equilíbrio secular entre esses radionuclídeos.

#### 4.4 Cálculo da concentração em atividade

Foram medidas por espectrometria gama as concentrações em atividade de dez amostras de incrustação. Na Tabela 7, estão apresentadas as concentrações em atividade e as incertezas das medidas para os isótopos de rádio e potássio presentes nas amostras.

Tabela 7 Concentração em atividade de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$  determinados por espectrometria gama

Amostra	Local	$^{226}\text{Ra}$ (Bq.kg <sup>-1</sup> )	$^{228}\text{Ra}$ (Bq.kg <sup>-1</sup> )	$^{40}\text{K}$ (Bq.kg <sup>-1</sup> )
1	Caruaru	4,04 ± 0,04	8,04 ± 0,70	288,12 ± 11,51
2	Caruaru	3,06 ± 0,02	< 1,78 (LD)	< 14,63 (LD)
3	Caruaru	14,53 ± 0,22	3,13 ± 0,20	46,80 ± 3,10
4	Caruaru	52,50 ± 0,70	82,40 ± 0,70	< 14,63 (LD)
5	Caruaru	5,90 ± 0,01	39,70 ± 0,50	< 14,63 (LD)
6	Paulista	421,00 ± 3,00	84,40 ± 3,40	64,90 ± 4,80
7	Goiana	1.328,00 ± 23,00	265,49 ± 8,00	< 14,63 (LD)
8	Goiana	451,00 ± 4,00	84,70 ± 3,70	38,90 ± 3,30
9	Goiana	412,00 ± 5,00	113,83 ± 3,70	71,00 ± 4,90
10	Goiana	< 1,36 (LD)	< 1,78 (LD)	196,00 ± 9,00

LD = Limite de Detecção

As concentrações em atividade variaram desde  $< 1,36$  (LD) até  $1.328,00 \pm 23,00$  Bq.kg<sup>-1</sup> para o <sup>226</sup>Ra, entre  $< 1,78$  (LD) até  $265,49 \pm 8,00$  Bq.kg<sup>-1</sup> para <sup>228</sup>Ra e  $< 14,63$  (LD) até  $288,12 \pm 11,51$  para o <sup>40</sup>K. Nessa tabela as incertezas foram calculadas com 95% de confiabilidade para <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra e <sup>40</sup>K nas amostras de incrustação.

Os valores encontrados para as concentrações de atividade de <sup>226</sup>Ra e <sup>228</sup>Ra nas amostras de incrustações das localidades de Caruaru, Paulista e Goiana foram inferiores aos valores limites estabelecidos na Posição Regulatória 6.02/002 para borras e incrustações em Instalações de Produção e Exploração de Petróleo e Gás (100 kBq.kg<sup>-1</sup> para <sup>226</sup>Ra e <sup>228</sup>Ra)(CNEN-NE-6.02, julho de 1998). Deve-se salientar que nesse trabalho os valores foram comparados com a posição regulatória 6.02/002 devido à ausência de norma específica para incrustações em caldeiras.

Ao mesmo tempo, a Norma da CNEN para instalações minero-industriais (CNEN-NN-4.01, janeiro de 2005), indica um limite estabelecido de 10 kBq.kg<sup>-1</sup> para os radionuclídeos das séries naturais do urânio e tório. Desse modo, os valores encontrados para as amostras de incrustação apresentaram-se também inferiores aos limites estabelecidos nessa Norma.

Os valores de concentração de atividade de <sup>226</sup>Ra e <sup>228</sup>Ra encontrados para as amostras de Caruaru foram inferiores àqueles das cidades de Paulista e Goiana. De acordo com SAAD (1974), a região fosfática (onde se encontram Paulista e Goiana), está situada em áreas cortadas por aquíferos. Sendo assim, as jazidas de fosfato constituem-se em fontes de radionuclídeos para as águas subterrâneas.

Observa-se que, para as amostras de Paulista e Goiana, o <sup>226</sup>Ra apresenta valores maiores de concentração de atividade que o <sup>228</sup>Ra, o que pode ser justificado também pelo fato de que a área em estudo está contida na região fosfática de Pernambuco, que se situa desde o sul da cidade de Olinda (Estado de Pernambuco) até o extremo Norte do Estado da Paraíba. Essa região apresenta altas concentrações de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (30 a 500 ppm) (VALENTIM et al.,1997), tendo portanto maior concentração de <sup>226</sup>Ra, que é descendente do <sup>238</sup>U.

Verifica-se ainda na Tabela 7 que existe, na maioria das amostras, significativa diferença entre as concentrações de atividade do  $^{226}\text{Ra}$  e do  $^{228}\text{Ra}$ , sendo as concentrações em atividade do  $^{228}\text{Ra}$ , menores que as do  $^{226}\text{Ra}$ .

A diferença entre as concentrações de atividade desses isótopos pode estar relacionada às concentrações de  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  presentes nas rochas do aquífero. Deve-se considerar também que o  $^{238}\text{U}$  na fase água/rocha possui maior mobilidade e solubilidade do que o  $^{232}\text{Th}$  (BONOTTO, 2004). O fato de o tempo de meia-vida do  $^{226}\text{Ra}$  (1.600 anos) ser muito maior quando comparado ao  $^{228}\text{Ra}$  (5,7 anos), também pode explicar as concentrações mais elevadas para o  $^{226}\text{Ra}$ .

O estudo realizado por Santos (2010) relata também que as concentrações de  $^{226}\text{Ra}$  são maiores do que as concentrações de  $^{228}\text{Ra}$  em pelo menos 50% das amostras de água subterrânea analisadas.

Ressalta-se que, pela dificuldade de se encontrar pesquisas relacionadas com incrustações geradas por água de caldeiras industriais, nesse trabalho foram referenciados trabalhos sobre borras e incrustação da indústria de petróleo.

A pesquisa desenvolvida por Matta (2001) determinou concentrações máximas para  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  de 48 e 42  $\text{kBq.kg}^{-1}$  para incrustações e borras retiradas de unidades de petróleo na Bacia de Campos. Enquanto isso, Testa e colaboradores (1994) acharam valores de até 2,89  $\text{kBq.kg}^{-1}$  para o  $^{226}\text{Ra}$ , em incrustações/borras retiradas de tubulações da indústria de petróleo da Tunísia.

Nas pesquisas realizadas por Gazineu (2005) para borras e incrustações coletadas em indústria de produção de petróleo, foi evidenciado que, para as amostras com altas concentrações de atividade, os valores de  $^{226}\text{Ra}$  foram sempre maiores que o  $^{228}\text{Ra}$ . Na indústria de petróleo, as águas extraídas junto com óleo e gás, podem estar também contaminadas com rádio oriundo do urânio e tório presentes numa grande variedade de rochas, em diversas concentrações na crosta terrestre (TESTA et al., 1993).

As amostras analisadas por Gazineu (2005), apresentaram valores bem acima dos citados, variando entre 1,2 e 567,8  $\text{kBq.kg}^{-1}$  para o  $^{226}\text{Ra}$  e entre 2,2 e 166,7  $\text{kBq.kg}^{-1}$  para o  $^{228}\text{Ra}$ . Valores tão variáveis para isótopos de rádio nos rejeitos de diferentes origens da indústria de petróleo podem ser explicados com base em considerações geológicas (El AFIFI ; AWWAD, 2005).

Ainda com relação à Tabela 7, verifica-se que os valores das concentrações em atividade para o  $^{40}\text{K}$  variaram entre  $<14,63$  (LD) e  $288,12 \pm 11,51 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Para amostras ambientais tais como, a crosta terrestre, o valor da concentração em atividade para o  $^{40}\text{K}$  é de  $13 \text{ pCi.g}^{-1}$  ou aproximadamente  $480 \text{ Bq.kg}^{-1}$  e para plantas podem variar entre  $12,00$  e  $797,30 \text{ Bq.kg}^{-1}$  (ANL, 2005; KARUNAKARA et al., 2003).

A amostra 7, coletada em Goiana, apresentou o maior valor para concentração em atividade para o  $^{226}\text{Ra}$ , enquanto isso o valor para o  $^{40}\text{K}$  para a mesma amostra ficou abaixo do limite de detecção ( $<14,63 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). Os resultados observados para o  $^{40}\text{K}$  e o  $^{226}\text{Ra}$  sugerem uma relação inversa para as concentrações em atividade; quando o  $^{226}\text{Ra}$  aumenta o  $^{40}\text{K}$  diminui e vice versa.

Ainda com relação ao  $^{40}\text{K}$ , verificou-se que as pesquisas sobre a concentração em atividade desse radionuclídeo em incrustações em geral são escassas. Enquanto isso, para a indústria de petróleo, existem poucos dados sobre a concentração  $^{40}\text{K}$ , que pode variar entre  $16,00$  e  $144,60 \text{ kBq.kg}^{-1}$  para incrustações acumuladas em indústria de produção do petróleo (GAZINEU; HAZIN, 2008).

#### **4.5 Determinação de $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ e $\text{Ba}^{2+}$ em amostras de incrustações**

A Tabela 8 apresenta os valores dos metais encontrados nas amostras de incrustação, determinados por absorção atômica.

Tabela 8 Determinação dos teores médios de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Ba}^{2+}$  e seus respectivos desvios padrão expressos em ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )

<b>Amostra</b>	<b>Local</b>	<b>Cálcio</b>	<b>Magnésio</b>	<b>Bário</b>
1	Caruaru	81.200 ± 7.600	8.700 ± 790	142,2 ± 0,7
2	Caruaru	133.000 ± 12.000	97.900 ± 8.100	15,7 ± 0,1
3	Caruaru	147.400 ± 13.200	106.600 ± 10.150	42,3 ± 0,7
4	Caruaru	155.800 ± 14.100	128.700 ± 11.600	403 ± 12
5	Caruaru	194.800 ± 18.700	85.600 ± 7.700	68,0 ± 0,9
6	Paulista	77.200 ± 6.000	45.100 ± 3.800	266 ± 3
7	Goiana	177.400 ± 16.500	52.800 ± 4.600	677 ± 22
8	Goiana	78.200 ± 7.000	39.800 ± 3.800	240 ± 4
9	Goiana	74.700 ± 6.800	37.600 ± 3.500	264 ± 6
10	Goiana	< 2,00 LD	1.200 ± 99	< 1,00 LD

LD = Limite de Detecção (0,01  $\text{mg.k}^{-1}$  para o bário)

LD = Limite de Detecção (2  $\text{mg.k}^{-1}$  para o cálcio)

LD = Limite de Detecção (1  $\text{mg.k}^{-1}$  para o magnésio)

Observa-se que, para as amostras analisadas, os valores de cálcio e magnésio foram bastantes elevados, evidenciando com isso a dureza existente na água que se deposita nas tubulações, sujeitas ao efeito de altas temperaturas. É importante ressaltar que este fato se deve à presença de cátions metálicos divalentes, os quais são capazes de reagir com ânions presentes na água para formar incrustações (SILVA; OLIVEIRA, 2001). Sendo assim, através das análises de caracterização do material coletado nas paredes de tubulações ou caldeiras pode-se verificar se o precipitado formado por esses elementos gerou incrustações e associar esses resultados à concentração de íons na água.

O rádio precipita juntamente com o bário, geralmente na forma de sulfatos, quando da formação de incrustações, pois ambos pertencem ao mesmo Grupo 2A da tabela periódica, apresentando características semelhantes (LAURIA et al, 2007).

#### 4.6 Correlação entre rádio e demais cátions

A fim de verificar a existência de possível correlação entre as concentrações em atividade nas amostras de incrustação e as concentrações dos cátions analisados, foram realizadas análises de correlação com os dados obtidos neste experimento. Esses dados produziram uma matriz de gráficos de dispersão (Figura 11). Os dados foram padronizados (média = 0; desvio padrão = 1) para redução de problemas de escala, em que, por exemplo, as concentrações de cálcio variaram desde < 2,00 (LD) até 194.800 mg/kg, enquanto para bário as concentrações variaram entre < 0,01 mg/kg (LD) e 677 mg/kg. A Figura 11 ilustra uma matriz de correlação obtida para as amostras analisadas.

Ressalta-se que não foi feita a correlação para o  $^{40}\text{K}$ , pois o número de dados encontrados para este radionuclídeo foi insuficiente, devido a 40% das amostras apresentarem valores abaixo do limite de detecção.

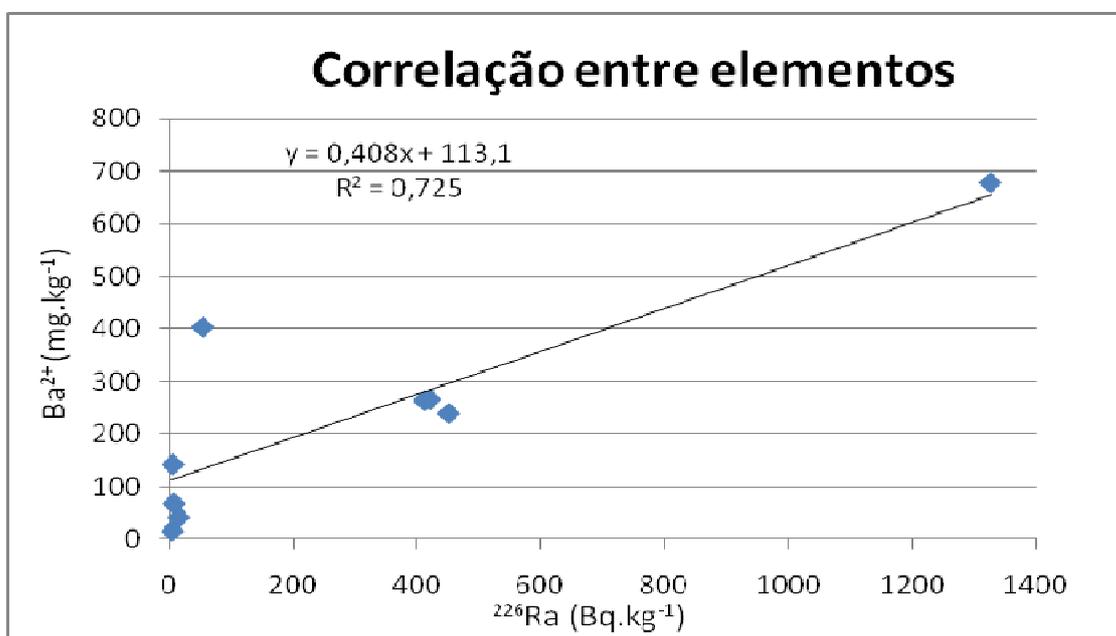


Figura 11. Matriz de correlação entre bário e rádio.

De acordo com a Figura 11, não houve correlação significativa entre rádio e cálcio, e entre rádio e magnésio. Algumas amostras apresentarem comportamento diferenciado para as variáveis analisadas.

Verificou-se (Figura 11) que houve correlação positiva em nível de confiança de 95% ( $p < 0.05$ ) entre o rádio e o bário, com índice  $r$  igual a 0,85. O valor obtido foi próximo àquele de 0,78 encontrado por Vegueira et al. (2002) em amostras de incrustação de indústria de petróleo.

A correlação foi também utilizada na análise dos dados empregados em outros trabalhos, como no caso Morgan e Beatham (1990) e Silveira (2007), que evidenciaram que a absorção de rádio é inibida em solos com elevada quantidade de sais dissolvidos, especialmente  $Mg^{+2}$  e  $Ca^{+2}$ , devido à competição com esses cátions, nesse caso para a matriz de solo.

De acordo com Lauria et al. (2007), os níveis de concentração de rádio são extremamente baixos em águas naturais e dependem da fase sólida por onde a água circula. Sendo assim, o rádio se comporta como traço, cuja química é controlada por processo de co-precipitação e adsorção superficial. Nesses ambientes a co-precipitação de bário também é comum. Ainda de acordo com os autores, existe competição entre o rádio e os cátions maiores de cálcio e magnésio pelos sítios da fase sólida.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados das análises para a concentração de atividade de  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  nas amostras de incrustações retiradas de caldeiras em indústrias localizadas nos municípios de Caruaru, Paulista e Goiana, no estado de Pernambuco, indicam que não há concentração significativa desses radionuclídeos. Os valores encontrados são inferiores àqueles estabelecidos pela Norma CNEN-NN-4.01 e pela Posição Regulatória – 6.02/002 ambas da CNEN, para o tipo de material analisado, não requerendo tratamento especial.

Observa-se, entretanto, que as concentrações de atividade para o  $^{226}\text{Ra}$  nas amostras colhidas nos municípios de Paulista e Goiana são de duas a três ordens de grandeza mais elevadas do que as observadas nas incrustações colhidas em Caruaru (com exceção de uma amostra). Essa mesma tendência pode ser observada, embora em menor grau, para as concentrações de  $^{228}\text{Ra}$ .

O aumento nas concentrações de atividade dos dois isótopos do rádio decorre, provavelmente, do fato de a área onde se localizam os municípios de Paulista e Goiana estar contida na região fosfática de Pernambuco, onde existe maior possibilidade de se encontrar níveis elevados de radioatividade natural.

Com relação ao  $^{40}\text{K}$ , os valores para a concentração de atividade desse radionuclídeo estão todos na faixa de concentrações de atividade esperadas para este radionuclídeo em amostras ambientais.

A análise química das incrustações demonstra que existe correlação significativa entre os teores de bário e as concentrações de atividade dos isótopos de rádio (Ra-226) analisados, sugerindo que aqueles radionuclídeos são carregados pela água juntamente com a barita, formando as incrustações no interior das caldeiras.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos para avaliação mais detalhada das fontes de água que abastecem as caldeiras, principalmente as de origem subterrânea. Sugere-se também que sejam avaliadas outras indústrias situadas na região fosfática de Pernambuco.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIT – **Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de confecções**. Em: [http://www.abit.org.br/site/navegacao.asp?id\\_menu=1&id\\_sub=3&idioma=PT](http://www.abit.org.br/site/navegacao.asp?id_menu=1&id_sub=3&idioma=PT). Acesso: 07 jun.2011.

AIETA, E.; SINGLEY, F. E.; TRUSSELL, K. W.; MCGUIRE, M. Radionuclides in drinking water; an overview. **Research technology**, v. 189, p.144-152, 1987.

AMARAL, R. S. **Determinação de urânio na fosforita por meio de medidas radiométricas e análise por ativação**. 1987. 109p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) - Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1987.

AMARAL, R. S. **Modificação da exploração à radiação natural devido a atividades agrícolas e industriais numa área de atividade natural elevada no Brasil**. 1992. 132 p. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992.

ANL - **Argonne National Laboratory, EVS. Potassium-40. Human Health Fact Sheet, (2005)** In: <<http://www.ead.anl.gov/pub/doc/potassium.pdf>>. Access: 01 jun. 2011.

APOLINÁRIO, V. **Emprego da indústria têxtil de transformação nordestina nos anos 90: foco sobre a indústria têxtil**. Rio Grande do Norte – Natal: [s.n.], 2000. 12p.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

AKSOY, A.; AL-JARALLAH, M.; AL-HADDAD, M. N. Natural radioactivity in the scale of water well pipes. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 61, p. 33 – 40, 2002.

AZOUAZI, M.; OUAHIDI, Y.; FAKHI, S.; ANDRES, Y.; ABBE, J. C.; BENMANSOUR, M. Natural radioactivity in phosphates, phosphogypsum and natural waters in Morocco. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 54, p. 231 – 242, 2001.

BANCO DO NORDESTE DO BRASIL. **Aprendizado e inovação local: obstáculos e oportunidades da indústria nordestina de confecções**. Fortaleza – Ceará: BNB, 1999. 43p. (Estudos Setoriais , 2).

BATISTA, T. R. O. **Metodologia para estimativa da energia associada ao resíduo sólido industrial: proposta e aplicação para a região metropolitana de campinas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 2004.

BEGA, E. A. **Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 179p

BONOTTO, D. M. **Radioatividade nas águas, da Inglaterra ao Guarani**. São Paulo: Editora UNESP, 2004.

BRASIL. Ministério da Educação. Educação ambiental: leis e decretos. Disponível em: <[www.mec.gov.br](http://www.mec.gov.br)>. Acesso em: 22 dezembro. 2010.

BRASIL. Lei nº 12.305/10 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 03 Ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n. 396, 03 de Abril de 2008. **Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências**. Disponível em: <<http://mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 05 mar. 2011.

BRASIL. Ministério do Trabalho. Norma Regulamentadora n.13. **Dispõe sobre Caldeiras e Vapor**. Disponível em: <[www.mt.gov.br](http://www.mt.gov.br)>. Acesso em: 10 jun. 2009.

CAMARGO, I. M. C.; MAZZILLI, B. Estimativa de risco devido à ingestão de isótopos de urânio em fontes de águas minerais. **Rev. Saúde Pública**, v. 32, p. 317-320, 1998.

CAMPOS, L. H. R.; VASCONCELOS, V.; MOURA, K. A. R. Trabalho, sindicato condições de trabalho na indústria do vestuário: uma estudo sobre Toritama. In: ENCONTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS DO NORTE E NORDESTE, 14, 2009, Recife. **Anais...**Recife: UFRPE, 2009.

CEPA (2006).Public health goals for chemicals in drinking water: radium - 226 and – 228 California Environmental Protection Agency. **Office of Environmental Health Hazard Assessment**.

CHAGAS, M. A. **Tratamento de efluente têxtil por processos físico-químico e biológico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

CLULOW, F. V.; PYLE, G. G. Radium-226 equilibrium between water and lake herring *Coregonus artedii*, tissues attained fish lifetime: confirmation in this species of one assumption in the simple linear concentration factor model. **Environmental Pollution**, v. 96, n.1, p.75-78, 1997.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE O MEIO AMBIENTE E O DESENVOLVIMENTO. **Agenda 21**. Rio de Janeiro: 1992. Disponível em: <[www.mma.gov.br](http://www.mma.gov.br)>. Acesso em: 03 jul. 2009.

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-NN-3.01. Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Publicação: D.O.U. 06/01/2005. Brasil, 2005.

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-NE-6.02. Licenciamento de Instalações Radioativas. Publicação: D.O.U. de 08/06/1998. Brasil, 1998.

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN- POSIÇÃO REGULATÓRIA – 6.02/002, 2005 – Instalações de Produção de Petróleo e Gás com Materiais, Peças ou Componentes Contaminados com Ra-226 e Ra-228 e seus Descendentes Radioativos. Publicação: D.O.U. de 10/01/2005. Brasil, 2005.

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-NE- 6.5. Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radioativas. Publicação: D.O.U. 17/012/1985. Brasil, 1985.

CONDEPE. Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco. **Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca**. Recife: CONDEPE, 2005. (Bacias Hidrográficas de Pernambuco,1).

COWART, J. B.; BURNETT, W. C. The distribution of uranium and thorium decay-series radionuclides in the environment – a review. **Journal of Environmental Quality**, v. 23, p .651-662, 1994.

CUDDIHY, J. A.; SIMONEAUX JR.; WALTER J.; ROBERT N. FALGOUT; JAMES S. RAUH. Boiler Water Treatment and Related Costs of Boiler Operation: An Evaluation of Boilers in the Louisiana Sugar Industry. **Journal American Society Sugar Cane Technologists**, v.25, 2005.

DANTAS, José Robinson Alcoforado. **Distritos Mineiros do Nordeste Oriental**. Recife: DNPM 4º Distrito, 2000. 90p.

DEMÉTRIO, J. G. A; DOHERTY, F. R; ARAÚJO FILHO, P. F.; SCHEFFER, S. Qualidade da Água Subterrânea no Nordeste Brasileiro. In: Reunião anual da SBPC, 45, 1993, Recife. **Anais...** Recife: UFPE/IPA/LAMEPE, 11-16 jun. 1993, p..79. Comunicação Oral.

EL AFIFI, E. M.; AWWAD, N. S. Characterization of the TE-NORM waste associated with oil and natural gas production in Abu Rudeis, Egypt. **Journal of Environmental Radioactivity**, v.82, p. 7–19, 2005.

EISENBUD, M; GESSEL. T. **Environmental Radioactivity**: from natural, industrial and military sources. New York: Academia Press, 4.ed., 1997. 656p.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE PERNAMBUCO. Sindicato da indústria de fiação e tecelagem em geral e da malharia no estado de Pernambuco – sinditêxtil/PE. **Perfil da indústria têxtil em Pernambuco**. Recife: FIEPE, 2000.

FERREIRA, J. A.; Anjos, L. A. Aspectos de Saúde Coletiva e Ocupacional Associados à Gestão dos Resíduos Sólidos Municipais. **Caderno Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v.17, p. 689-696, 2001.

FREY, M.G. **Uso racional del agua em tintorerias industriales**. Buenos Aires, 2000. Disponível em: <<http://www.aidisar.org/pro.2.html>>. Acesso em : 10 jun. 2009.

FRISSEL, M. J; KOSTER, H. W. Radium in soil. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1990, Viena. **Anais...**Vienna: IAEA, 1990. v.1.

GALIZA NETO, L. S. **Intervenção tecnológica para minimização das externalidades ambientais negativas em lavanderias industriais na cidade de toritama – PE**. Dissertação (Mestrado) - Associação Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP/OS, Recife, 2006.

GARCIA, R.; MOTTA, F.; SCUR, G.; LUPATINI, M.; MOREIRA, J. R. C. Esforços Inovativos no Brasil. Uma análise das Indústrias têxtil- vestuário, calçados e cerâmica. **São Paulo em Perspectiva**, v. 19, n.2, p.60-70, abr./jun., 2005.

GAZINEU, M. H; HAZIN, C. A. **Radium and potassium-40 in solid wastes from the oil industry**. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 66, p. 90–94 (2008).

GAZINEU. M. H. P. **Teores de radionuclídeos em processos de extração e produção de petróleo no nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

GODOY, J. M. Radioatividade natural em atividades petrolíferas: ocorrências e aplicações. In: SEMINÁRIO DE QUÍMICA ANALÍTICA NA PETROBRAS, 4., 1996, Rio de Janeiro. **Anais ...**Rio de Janeiro, 1996. p. 253 - 258.

GODOY, J. M.; CRUZ, R. P. 226Ra and 228Ra in scale and sludge sample and their correlation with the chemical composition. **Journal of Environmental Radioactivity**, v.70, p. 199-206, 2003.

GONÇALVES, F. M.. **Caracterização e estudo da tratabilidade pelas vias físico-química e biológica anaeróbia dos efluentes líquidos das lavanderias industriais de Colatina(ES)**. 1996. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1996.

HALON, E. R. Norm contamination in the petroleum industry. **Journal of Petroleum Technology**, v.45, n.1, p.12-16, 1993.

HAMLAT, M. S.; DJEFFAL, S.; KADI, H. Assessment of radiation exposures from naturally occurring radioactive materials in the oil and gas industry. **Applied Radiation and Isotopes**, v.55, p.141-146, 2001.

HASSEMER, M. E. N.; DALSAÑO, R. L. ; SENS, M. L. Processo físico-químico para industria têxtil. **Revista Saneamento ambiental** , n.81, p. 28-34, out. 2001.

HEATON, B. Field survey instrumentation and radioanalytical procedures for NORM. **Applied Radiation Isotopes**, v. 49, n. 3, p. 197-204, 1998.

HESS, C. T.; MICHEL, J.; HORTON, T. R.; PRICHARD, H. M.; CONIGLIO, W. A. The occurrence of radioactivity in public water supplies in the United States. **Health Physics**, v. 48, p. 553-586, 1985.

IAEA-INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **The environmental behavior of radium**. 1990. (Technical Report Serie, 310).

IAEA-INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources**. Vienna: 1996. (Safety Series, 115).

IAEA-INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Reference material IAEA-375 Radionuclides and trace elements in soil**. Reference date for decay correction: 31<sup>st</sup> December 1991.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades@: informações sobre municípios brasileiros**. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/estatística/população/contagem2007/default.shtm>> . Acesso em: 10 mai. 2009.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) *Censo Populacional 2010*. *Censo Populacional 2010*. Página visitada em 11 de dezembro de 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Orientação sobre a validação de métodos de ensaios químicos doq-cgcre-008**. Revisão: 01 mar. 2003.

INSTITUTO DE ESTUDOS E MARKETING INDUSTRIAL. **Perfil e dimensão do setor têxtil no Brasil**. São Paulo: IEMI, 2002. 6 p.

IYENGAR, M. A. R. The natural distribution of radium. In: THE ENVIRONMENTAL BEHAVIOR OF RADIUM, TECHNICAL REPORTS SERIES, 310, 1990, Viena. **Anais...** Viena: IAEA, 1990. p. 59-128.

KARUNAKARA, N.; Somashekarappa, M.; Narayana, H. M.; AVADHANI, Y. D. N.; MAHESH, H. M.; SIDDAPPA, K. “<sup>226</sup>Ra, <sup>40</sup>K and <sup>7</sup>Be activity concentrations in plants in the environment of Kaiga, India”, *Journal of Environmental Radioactivity*, **65(3)**, pp. 255-266 (2003).

KLEINSCHMIDT, R.; AKBER, R. Naturally occurring radionuclides in materials derived from Urban water treatment plants in southeast Queensland, Australia. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 99, p. 1-14, 2007.

KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement**. 2.ed. New York ; Chichester: J. Wiley, c1989, 754p.

LAURIA, D. C.; MARTINS, N. S. F.; ZENARO, R. **Monitoração radiológica ambiental**. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2007.

LEPRUN, J. C. **Primeira avaliação das águas superficiais do nordeste: relatório de fim de convênio de manejo e conservação de solo**. Recife: SUDENE-DRN, 1983, p.91-141. Convênio SUDENE/ORSTOM.

LIMA, J. C. **Trabalho, mercado e formação de classe: estudos sobre operários fabris em Pernambuco**. João Pessoa-PB: Editora Universitária/UFPB, 1996. 215p.

LIMA, R. A. **Avaliação da dose na população da região urano-fosfática do nordeste que utiliza os recursos hídricos da região**. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1996.

LINSALATA, P. Uranium and Thorium decay séries radionuclides in humans and animal food chains. **Journal of Environmental Quality**, v.23, p. 633-642, 1994.

MACHADO, L. E.; KIST, L. T.; LOPEZ, D. A. N.; HOELTZ, J. M.; JACHETTI, D. M. Eletroflotação em fluxo contínuo no tratamento de efluentes do tingimento têxtil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24, 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2008.

MAFRA, O. **Técnicas e medidas nucleares**. São Paulo: Edgard Blusher, 1973. 110 p.

MALANCA, A.; PESSINA, V.; DALLARA, G. Assesment of the natural radioactivity in the Brazilian State of Rio Grande do Norte. **Health Physics**. v.65, n. 3, p. 298-302, 1993.

MALCZEWSKI, D.; TEPER, L.; DORDA, J. Assesment of natural end anthropogenic radioactivity levels in rocks and soil in the environs of Swieradow zdroj in Sudetes, Poland, by in situ gamma-ray spectrometry. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 73, p. 233-245, 2004.

MANAHAM, S. E. **Environmental chemistry**. 6.ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 1994. 881 p.

MASCARENHAS, J.C.; BELTÃO, B.A.; SOUZAJÚNIOR, L.C.; GALVÃO, M.J.T.G.; PEREIRA, S.N. **Projeto de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea, estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 11 p. + anexo.

MASTERTON, W. L.; SLOWINSKI, E. J.; STANITSKI, C. L. **Princípios de Química**. 6.ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1994. p 681.

MATTA, L. E. S. C.; GODOY, J. M. O.; REIS, M. C. D.; PINTO, R. S. M. Avaliação dos problemas radiológicos devido aos radionuclídeos naturais, em unidades de exploração e produção de petróleo. In: REGIONAL CONGRESS ON RADIATION PROTECTION AND SAFETY, 5, 2001, Recife. **Anais...** Recife; IRPA/SBPR, 2008. 1CD.

MCAULAY, I. R.; MORAN, D. Natural radioactivity in soil in the republic of Ireland. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 24, n.1-4, p. 47-49, 1998.

MILLS, W. A. Estimates of human câncer risks associated with internally deposited radionuclides. In: RAABE, O. G. **Internal Radiation Dosimetry**. Madison, Wisconsin: Medical Physics Publishing, 1994. p.609-631.

MINISTÉRIO PÚBLICO DE PERNAMBUCO. **Ministério público monitora poluição provocada por lavanderias: 2003**. Disponível em: [http://www.mp.pe.gov.br/imprensa/noticias/main\\_agosto\\_2003.htm](http://www.mp.pe.gov.br/imprensa/noticias/main_agosto_2003.htm). Acesso em: 15 mai. 2009.

MOLINIER, A.; DESCONNETS, P.; LEPRUN, J. C. **Dinâmica da água e das matérias em ecossistema representativo no nordeste brasileiro: condições de extrapolação espacial à escala regional**. Recife: ORSTOM, 1989.

PAPACHRISTODOULOU, C. A.; ASSIMAKOPOULOS, P. A.; PATRONIS, N.E.; IOANNIDES, K. G. Use of HPGe  $\gamma$ -ray spectrometry to assess the isotopic composition of uranium in soil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 64, p. 195-203, 2003.

PAPP, Z.; DEZSO, Z.; DARÓCZY, S. Measurement of the radioactive  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{40}\text{K}$  in soil using direct Ge(Li)  $\gamma$ -ray spectrometry. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 222, n. 1-2, p. 171-176, 1997.

PASCHOA, A. S. Radiological impact due to oil and gas extraction. Business briefing: exploration and production 2003. Disponível em: [http://www.wmrc.com/businessbriefing/odf/expl\\_prod03/Refref11.pdf](http://www.wmrc.com/businessbriefing/odf/expl_prod03/Refref11.pdf). Acesso em: 04 set. 2009.

PASTOR, J. R.; CARVALHO, A. R. P.; ZIBORDI, G. **Incrustações em caldeiras**. KURITA: soluções em engenharia de tratamento de água. Disponível em: <http://www.kurita.com.br/adm/download/caldeira.pdf>. Acesso em: 15 jun 2009.

PEDROSA, I. V. **Avaliação do processo de lavagem de jeans na cidade de Toritama – PE**. Dissertação (Mestrado) - Associação Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP/OS, Recife, 2006.

PEIXOTO, C. M.; AULER, L. M. L. A.; FONCECA, R. C. M. Interferência do K-40 na atividade beta total nas atividades ambientais. In: ENCONTRO DE FÍSICA DE REATORES E TERMO-HIDRÁLICA, 10, 1995, Belo Horizonte. ENCONTRO DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 3, 1995, Águas de Lindóia, SPI. **Anais...** Belo Horizonte: CNEN, 1995. p. 280-285.

PERNAMBUCO. Companhia Pernambucana de Recursos Hídricos. **Roteiro complementar de licenciamento e fiscalização para a tipologia têxtil**. Recife: CPRH, 2001.

PERNAMBUCO. Companhia Pernambucana de Recursos Hídricos. **Norma Técnica: Controle de Carga Orgânica em Efluentes Líquidos Industriais n. 2.001 de 03 de Novembro de 2003**. Recife: CPRH, 2003.

PERNAMBUCO. Decreto Lei nº 23.941, de 11 de janeiro de 2002. **Dispõe Sobre e Regulamentação da Política Estadual de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <<http://www.sectma.pe.gov.br>>. Acesso em : 29 fev. 2009.

PERNAMBUCO. Decreto Lei nº 12.008, de 02 junho de 2001. **Dispõe Sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <<http://www.sectma.pe.gov.br>>. Acesso em: 29 fev 2009.

PERNAMBUCO. Lei Ordinária nº 14.236 de 13 de dezembro de 2010. **Dispõe sobre a política estadual de resíduos sólidos**. Disponível em: <http://www.arpe.pe.gov.br/legislacao.php?op=1&codGrupo=2>. Acesso em: 28 fev 2011.

PÓLO. Calçadista se Vestiu de Jeans. **Diário de Pernambuco**, Recife, 22 jan.2004.

PUBLIC HEALTH GOALS OF CHEMICALS IN DRINKING WATER. **Radium – 226 and – 228**. California: Secretary for Environmental Protection Agency, mar. 2006. Disponível em: < <http://oehha.ca.gov/water/phg/pdf/PHGradium030306.pdf>>. Acesso em: 02 mai. 2010.

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (2000). *Ranking decrescente do IDH-M dos municípios do Brasil*. *Atlas do Desenvolvimento Humano*. < <http://www.pnud.org.br/atlas/ranking/idm-m%2091>>. Acesso em: 21 jan. 2011.

REBOLÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas Doces no Brasil – capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Escrituras editora, 1999.

SAAD, S. Aspectos econômicos do aproveitamento do urânio associado aos fosfatos do Nordeste. **Boletim da Comissão de Energia Nuclear**, Brasília, n.7, 1974.

SANTOS FILHO, D. F. **Tecnologia de Tratamento de Água**. São Paulo: Nobel.1985.

SANTOS, E. O. **Caracterização, biodegradabilidade e tratabilidade do efluente de uma lavanderia industrial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco), Recife, 2006.

SANTOS JÚNIOR, J. A. **Avaliação radiométrica do U-238, Ra-226, Th-232 e K-40 em uma área anômala do agreste de Pernambuco**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

SANTOS, F. P. C. **Radionuclídeos naturais em água minerais comercializadas na cidade de Recife – PE**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

SEBRAE- SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Estudo de caracterização econômica do pólo de confecções do agreste pernambucano**. Recife: SEBRAE, 2003.

SIDLE, W. C. ; SHANKLIN, D. ; LEE, P. Y. ; ROOSE, D. L.  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Ra}$  activities associated with agricultural drainage ponds in the Kankakee Watershed, Illinois – Indiana, USA. **Journal of Environmental Radioactivity**, v.55, p.29-46, 2001.

SILVA, C. M. **Ra – 226 e Ra – 228 na Dieta de Bovinos Leiteiros do Agreste Semi-Árido de Pernambuco e a Avaliação de Riscos Decorrente do Consumo de Leite por uma População Potencialmente Exposta**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

SILVA, E. V. **Chumbo-210 e Polônio-210 em Águas Subterrâneas da Região Fosfática de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1995.

SILVA, S. A; OLIVEIRA. R. **Manual de análises físico químicas de águas de abastecimento e residuária**. Campina Grande, PB: o autor, 2001.

SILVEIRA, P. B. **Determinação de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$  em Uvas e Vinhos da Região do Vale do São Francisco**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE FIAÇÃO E TECELAGEM EM GERAL E DE MALHARIA NO ESTADO DE PERNAMBUCO. **A Indústria Têxtil de Pernambuco**. Recife, 1973. 83p.

SMITH, K. P.; BLUNT, D. L. Scrap metal management issues associated with naturally occurring radioactive material. In: ANNUAL CONFERENCE ON THE RECYCLE AND REUSE OF RADIOACTIVE SCRAP METAL , 3, 1995, Knoxville, (TN) Unites States. **Anais...B Knoxville, (TN) Unites States** , 1995. p.1-8.

SMITH, K. P.; BLUNT, D. L.; WILLIAMS, G. P.; TEBES, C. L. **Radiological dose assessment related to management of naturally occurring radioactive materials generated by the petroleum industry**. Illinois: Argonne National Laboratory, 1996. Disponível em: < <http://www.evs.anl.gov/pub/doc/anlead2.pdf>>. Acesso em : 11 mai. 2009.

SOUZA, V. L. B. **Biodisponibilidade de metais-traço em sedimento das lagoa olho d'água: uma ferrameta para avaliação da contaminação ambiental**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

SUASSUNA, J. A. Pequena irrigação no nordeste: algumas preocupações. **Revista Ciência Hoje**, SBPC, v.8, n.104, p.38-43, out.1994.

SUASSUNA, J. **Contribuição do estudo hidrológico do semi-árido nordestino**. Rio de Janeiro: Massangana, 2000.

SUGUIO. K. **Água**. Ribeirão Preto: Holos editora, 2006.

TESTA, C.; DESIDERI, D.; MELI, M.A.; ROSELLI, C.; BASSIGNANI, A.; COLOMBO, G.; FANTONI, R. F. Radiation protection and radioactive scale in oil and gas production. **Health Physics**, v.67, n.1, p.34-38, 1994.

THERMIDAIRE CORPORATION CANADÁ LTDA. Disponível em: < <http://www.thermidaire.on.ca/bls.html>>. Acesso em: 02 set. 2009.

UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation . **Sources and effects of ionizing radiation**. New York: United Nations Publication, 2000.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Draft diffuse NORM-waste characterization and preliminary risk assessment Office of Radiation and Indoor Air**. Washington, D.C., 1993.

\_\_\_\_\_. United States Environmental Protection Agency. **National Primary Drinking Water Standards**. Washington, D. C., 2000.

VALENTIM, E.; HAZIN, C. A.; KHOURY, H. J.; LIMA, R. A.; GODOY, J. M. Dose decorrente da ingestão e água contendo  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{210}\text{Po}$  na região fosfática de Pernambuco. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 4., 1997, Poços de Caldas, Brasil. **Anais...** Poços de Caldas: 1997. p. 278-282. v.I.1.

VEGUEIRIA, S. F. J.; GODOY, J. M.; MIEKELEY, N. Environmental impact studies of barium and radium discharges by produced Waters from the “Bacia de Campos” oil-field offshore platforms, Brasil. **Journal of Environmental Radioactive**, v. 62, p. 29-38, 2002a.

VIANA, F. C. **Tratamento de água no meio rural**. Viçosa: CPT, 2006.

WILLIAMS, A. R.; KIRCHMAN, R. J. Radium, a historical introduction. **Technical Report Series** (IAEA), Viena, v.1, n. 310, p.110-120, 1990.

WILSON, A. J.; SCOTT, L. M. Characterization of radioactive petroleum piping scale with an evaluation of subsequent land contamination. **Health Physics**, v. 63, n.6, p. 682-685, 1992.

WISSER, S.; WILKEN, R. D. Determination of uranium-isotopes in ground- and drinking waters from ontario, Canada. **Publications du Centre Universitaire Luxembourg**, 2003.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking water quality: recommendations**. Geneva: WHO, 2004. v.1

ZIELINSKI, R. A.; BUDAHN, J. R. Radionuclides in fly ash and bottom ash: improved characterization based on radiography and low energy gamma-ray spectrometry. **Fuel**, v. 77, n. 4, p. 259 – 267, 1998.

ZIELINSKI, R. A.; OTTON, J. K. **Naturally occurring radioactive materials (NORM) in produced water and oil-field equipment – an issue for the energy industry, 1999.** U.S. Department of Interior. U.S. Geological Survey. Fact Sheet FS-142-99, set. 1999. Disponível em: < <http://www.pubs.usgs.gov/fs/fs-0142-99/fs-0142-99.odf>>. Acesso em: 21 set. 2009.