

## ATIVIDADES DE RADÔNIO-222 E RÁDIO-226 EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE TRÊS REGIÕES DA BAHIA: CAMAÇARI, IPIRÁ E CAETITÉ/LAGOA REAL (ANTES DO PROCESSAMENTO DE URÂNIO)

Alexandre Barreto COSTA<sup>1</sup>  
Antonio Expedito Gomes de AZEVEDO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Físico, Doutor em Geofísica e Professor Adjunto do Depto. de Física da Terra e do Meio Ambiente, Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia - DFTMA/IF/UFBA. abc@ufba.br

<sup>2</sup> Físico, Doutorado em Ciências da Terra, Professor Adjunto aposentado, DFTMA/IF/UFBA. expedito@ufba.br

**RESUMO.** As atividades de Radônio-222 (<sup>222</sup>Rn) e Rádio-226 (<sup>226</sup>Ra) foram medidas em águas subterrâneas de três regiões do estado Bahia com características geológicas diferentes. Foram coletadas amostras de poços na região de Camaçari, Ipirá e Lagoa Real. As atividades médias de <sup>222</sup>Rn foram de 7,20 Bq L<sup>-1</sup> (variando de 3,50 a 13,40 Bq L<sup>-1</sup>) em Camaçari, 74,10 Bq L<sup>-1</sup> em Ipirá e 580,30 Bq L<sup>-1</sup> em Lagoa Real. Para o <sup>226</sup>Ra somente duas amostras de Camaçari apresentaram uma atividade de 0,06 e 0,10 Bq L<sup>-1</sup>. Em Ipirá, doze amostras com atividades variando de 0,08 a 0,69 Bq L<sup>-1</sup>, e em Lagoa Real quatro amostras com atividades variando de 0,26 até 1,00 Bq L<sup>-1</sup>. Em Ipirá e Lagoa Real foram medidas atividades acima dos limites de potabilidade estabelecidos pela agência de proteção ambiental Americana de 11,11 Bq L<sup>-1</sup> para o <sup>222</sup>Rn e de 0,11 Bq L<sup>-1</sup> para o <sup>226</sup>Ra.

**Palavras-Chave:** <sup>222</sup>Rn; <sup>226</sup>Ra; água subterrânea; limites de potabilidade.

**ABSTRACT.** *222-Radon and 226-Radium activities in groundwater of three regions of Bahia State, Brazil: Camaçari, Ipirá and Caetité/Lagoa Real (before the processing of uranium). The 222-Radon (<sup>222</sup>Rn) and 226-Radium (<sup>226</sup>Ra) activities in groundwater from three regions in the State of Bahia with different geological characteristics was measured. Were collected from wells in the region of Camaçari, Ipirá and Lagoa Real. The activity measured for <sup>222</sup>Rn averaged 7.20 Bq L<sup>-1</sup> in Camaçari, 74.10 Bq L<sup>-1</sup> in Ipirá and 580.3 Bq L<sup>-1</sup> in Lagoa Real. For <sup>226</sup>Ra only two samples from Camaçari presented detectable activity concentration of 0.06 and 0.10 Bq L<sup>-1</sup>, in Ipirá twelve samples had activities above the limiar of detection varying from 0.08 to 0.69 Bq L<sup>-1</sup>, and in Lagoa Real four samples had detectable activities varying from 0.26 to 1.00 Bq L<sup>-1</sup>. In Ipirá and Lagoa Real were measured activity concentrations well above the limits for drinking established by the American environmental protection agency of 11.11 Bq L<sup>-1</sup> for <sup>222</sup>Rn and 0.11 Bq L<sup>-1</sup> for <sup>226</sup>Ra.*

**Keywords:** <sup>222</sup>Rn; <sup>226</sup>Ra; groundwater; drinking limits.

### INTRODUÇÃO

Radionucleotídeos oriundos das séries radioativas naturais do urânio e do tório que se solubilizam em água como resultado de sua interação com os solos e rochas, podem servir para indicar características geológicas dos aquíferos. Em particular, as concentrações do Urânio-238 (<sup>238</sup>U) e de seus descendentes radioativos Rádio-226 (<sup>226</sup>Ra) e Radônio-222 (<sup>222</sup>Rn) estão relacionadas com a natureza física do aquífero e com o conteúdo de urânio das formações envolvidas (ASIKAINEN, 1981).

O radônio está sempre presente em toda água subterrânea oriunda de fontes naturais, como consequência do decaimento de rádio que pode estar contido na água, na rocha e/ou solo (JACOMINO et al., 1996). O radônio é um gás que possui boa solubilidade em água. Ele possui dois isótopos de maior importância, <sup>222</sup>Rn (T<sub>1/2</sub> = 3,825 dias) que é resultante do decaimento alfa do <sup>226</sup>Ra da família do <sup>238</sup>U e o Radônio-220 (<sup>220</sup>Rn, T<sub>1/2</sub> = 54,5 segundos) resultante do

decaimento alfa do <sup>224</sup>Ra da família do Tório-232 (<sup>232</sup>Th).

O radônio, inicialmente, foi utilizado como uma ferramenta auxiliar na prospecção de minérios de urânio (BARRETTO et al., 1976). A partir daí começou a ser empregado em diversos tipos de estudos, sendo utilizado como traçador, indicando recentes contatos de massas de ar com os continentes (HEIMANN, 1990) e na água subterrânea e oceanos (BURNETT et al., 1997) para detectar falhas e fraturas, sendo que a emissão de radônio em falhas também tem sido estudada como um possível indicativo de terremotos através do monitoramento da variação da sua concentração. As variações na concentração de <sup>222</sup>Rn nos aquíferos cristalinos têm sido usadas para identificar características do fraturamento e da sua abertura hidráulica (FOLGER et al., 1996). O radônio também vem sendo utilizado como traçador natural de fluxos com o objetivo de medir a descarga de água subterrânea que penetra nas águas superficiais.

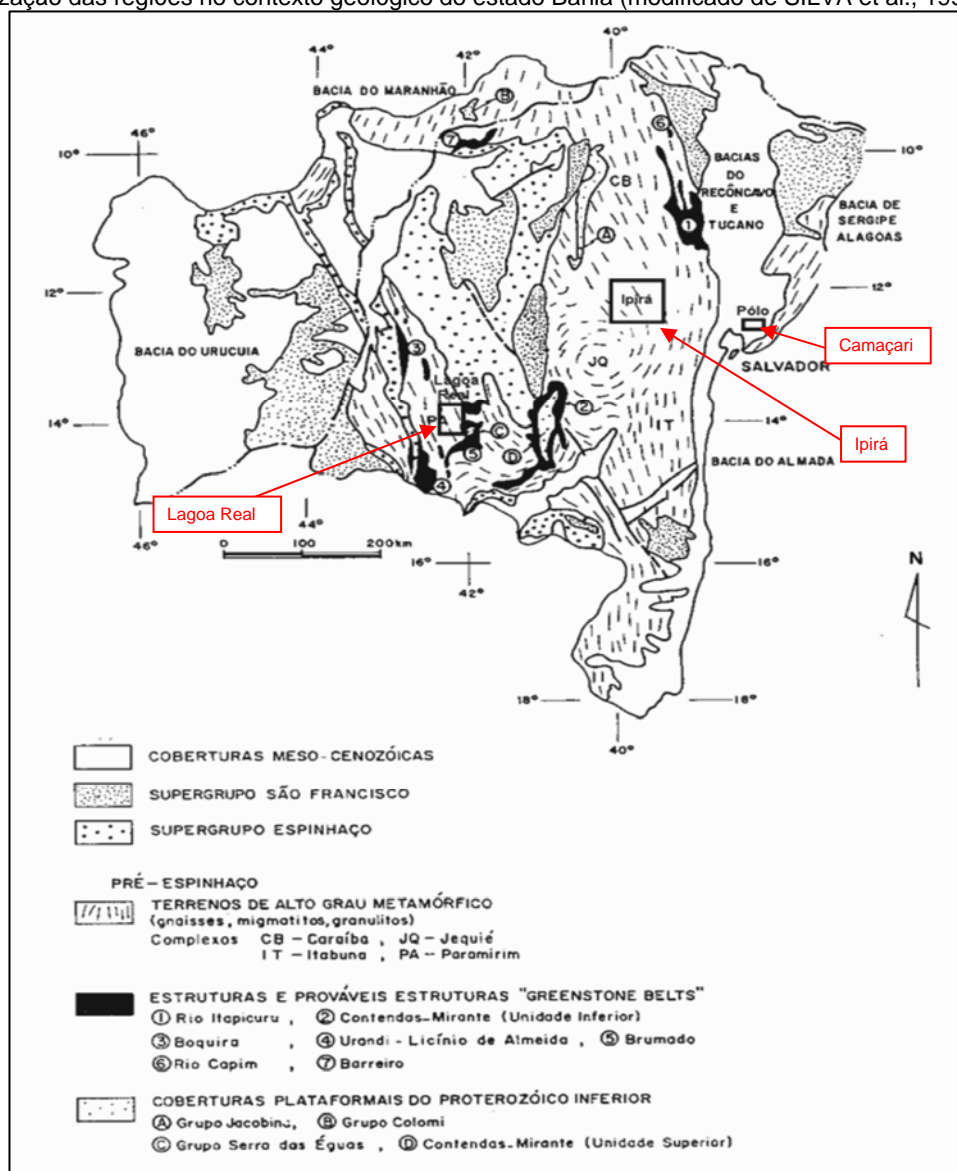
Estudos também vêm sendo desenvolvidos usando o rádio, sendo que num estágio menos avançado do que o radônio (KRAEMER et al., 1998). Atualmente, estudos na área ambiental e de saúde constataram que a inalação de radônio no ar é o segundo maior causador de câncer no pulmão nos E.U.A, perdendo apenas para a fumaça inalada do cigarro segundo os dados da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S.E.P.A). Além disso, a ingestão de águas subterrâneas com altos teores de rádio e/ou radônio é prejudicial à saúde. Estudos sugerem que esta ingestão pode resultar num acréscimo do número de cânceres de ossos, cabeça e estômago, respectivamente (JACOMINO et al., 1996). A agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (U.S.E.P.A.) estabeleceu como limite de potabilidade as concentrações de  $0,11 \text{ Bq L}^{-1}$  ( $3 \text{ pCi L}^{-1}$ ) para o  $^{226}\text{Ra}$  e  $11,11 \text{ Bq L}^{-1}$  ( $300 \text{ pCi L}^{-1}$ ) para o  $^{222}\text{Rn}$ .

Neste trabalho são reportadas as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{226}\text{Ra}$  em amostras de águas subterrâneas das Regiões de Lagoa Real, Ipirá e Camaçari, localizadas no estado da Bahia, analisadas no ano de 1999, enquanto a fábrica de processamento de urânio das Indústrias Nucleares do Brasil do Estado da Bahia ainda estava em fase de implantação. Foram analisados alguns aspectos da correlação destas concentrações com as características litológicas e físicas dos aquíferos e são discutidos como estes teores se distribuem com respeito aos índices de potabilidade.

## ÁREAS DE ESTUDO

As amostras foram coletadas em três regiões indicadas na Figura 1. A região do Pólo Petroquímico de Camaçari está situada na Bacia sedimentar do Recôncavo no estado da Bahia.

Figura 1. Localização das regiões no contexto geológico do estado Bahia (modificado de SILVA et al., 1997).



Esta região caracteriza-se pela presença de aquíferos sedimentares do tipo semi-confinado, com espessas camadas de arenito intercaladas com folhelhos, constituído pelas formações Marizal e São Sebastião, sendo que a parte explorada são os pacotes de arenito da formação São Sebastião.

Quanto à ocorrência de água subterrânea nesta região, ela apresenta um grande potencial hidrogeológico que é intensamente explorado, tanto para o consumo humano, como para fins industriais. As amostras desta região foram coletadas de poços de grande produção (cerca de  $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ), com profundidades de cerca de 300 m, drenando níveis na Formação São Sebastião.

Nas regiões de Ipirá e de Lagoa Real, os aquíferos amostrados foram do tipo fraturado em rocha cristalina. São caracterizados por poços de profundidade de até 60 m, e geralmente com pequena produção. Nestas regiões são encontradas rochas metamórficas, geralmente descritas como constituintes do complexo metamórfico migmatítico. Os sistemas de fraturas que constituem este tipo de aquífero têm maior potencial de criar acumulações de radônio em água, principalmente, se as rochas têm grande concentração de urânio. Na região de Ipirá, não há registro de concentrações anômalas de urânio, a não ser em pequenas ocorrências de apatita onde a concentração desse elemento pode ultrapassar 20 ppm. As águas subterrâneas de Ipirá possuem alto teor salino, sendo necessária a utilização de dessalinizadores para que a água fique potável.

Na região de Lagoa Real, o sistema de aquíferos é similar ao de Ipirá, mas com gnaisses ricos em albita-oligoclásio que são rochas hospedeiras de mineralização de urânio. Nessa região foram amostrados poços próximos às zonas de anomalia de urânio, com rochas apresentando concentrações desse elemento até superiores a 5000 ppm.

## MATERIAIS E MÉTODOS

As medidas de radônio foram realizadas utilizando-se um sistema portátil para a detecção de radônio *RD-200*, em conjunto com um sistema de retirada de gás radônio dissolvido em água, o *RDU-200* da *EDA Instruments*, que usa células de cintilação de  $\text{ZnS}(\text{Ag})$ . Em todas as amostras, a determinação de  $^{222}\text{Rn}$  foi realizada junto ao poço, imediatamente após a coleta da amostra. A concentração de  $^{226}\text{Ra}$  foi feita através da medida do  $^{222}\text{Rn}$ , em amostras que foram mantidas em frascos fechados por pelo menos 30 dias, de forma a se estabelecer o equilíbrio radioativo entre a  $^{226}\text{Ra}$  e o  $^{222}\text{Rn}$  dissolvidos na água. A maioria das amostras foi coletada com os poços em operação ou sendo colocados em operação

por algum tempo para que depois fosse feita a coleta. Em Ipirá alguns deles não continham sistema de bombeamento. A coleta de água superficial foi feita em Lagoa Real no Rio São João.

A verificação da calibração do sistema de contagem de  $^{222}\text{Rn}$  foi feita utilizando-se padrões de água com concentração conhecida, a partir de soluções do padrão de Urânio (RGU-1) da Agência Internacional de Energia Atômica, onde toda a família de decaimento do  $^{238}\text{U}$  está em equilíbrio radioativo. Foram preparadas duas soluções com concentrações calculadas de  $4,89 \pm 0,01 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $24,4 \pm 0,2 \text{ Bq L}^{-1}$ . Após um período superior a 30 dias necessário para garantir o equilíbrio de atividade do  $^{222}\text{Rn}$ , esses padrões foram medidos como amostras, tendo sido obtidos os valores de  $4,56 \pm 0,37 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $25,4 \pm 1,6 \text{ Bq L}^{-1}$ , indicando uma boa calibração.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Observa-se que as amostras da região do Pólo Petroquímico de Camaçari, indicados na Tabela 1, possuem concentrações baixas, com o teor de  $^{222}\text{Rn}$  variando de 3,48 a  $13,4 \text{ Bq L}^{-1}$  e com teores detectáveis de  $^{226}\text{Ra}$  obtidos apenas em 2 poços, com concentrações de 0,06 e  $0,10 \text{ Bq L}^{-1}$ . A menor concentração de  $^{222}\text{Rn}$  nesta região foi a de um poço de monitoramento e a maior em um poço de captação profunda, indicando um possível aumento da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  com a profundidade da zona de captação de água.

**Tabela 1.** Concentração de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{226}\text{Ra}$  em Camaçari.

Amostra	$^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq L}^{-1}$ )	$^{226}\text{Ra}$ ( $\text{Bq L}^{-1}$ )
COP-05	6,5	<LD
COP-09	9,3	0,06
COP-10	4,8	<LD
COP-13	13,4	0,10
COP-14	11,9	<LD
COP-22	9,0	<LD
JOR-01	11,1	<LD
CME-02	4,7	<LD
CME-03	6,4	<LD
CME-04	5,0	<LD
CME-05	5,7	<LD
PMCME-01	5,1	<LD
PMCME-03	6,0	<LD
PMCME-06	3,5	<LD
PMCME-11	5,8	<LD

<LD = Inferior ao limite de detecção

Na região de Ipirá, cujos resultados estão apresentados na Tabela 2, foram observadas concentrações bem maiores do que as do complexo petroquímico de Camaçari, sendo que os teores de  $^{222}\text{Rn}$  variaram entre 16,1 e  $200,9 \text{ Bq L}^{-1}$  e os teores de  $^{226}\text{Ra}$ , detectados em 12 dos 25 poços analisados, variaram de 0,08 a  $0,69 \text{ Bq L}^{-1}$ .

**Tabela 2.** Concentração de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{226}\text{Ra}$  em Ipirá.

Amostra	$^{222}\text{Rn}$ (Bq L <sup>-1</sup> )	$^{226}\text{Ra}$ (Bq L <sup>-1</sup> )
IP-01	39,6	0,41
IP-02	41,0	0,34
IP-03	108,0	<LD
IP-04	34,0	0,18
IP-05	62,8	0,34
IP-06	117,6	<LD
IP-07	115,8	<LD
IP-08	32,6	0,69
IP-09	188,7	0,51
IP-10	200,9	0,29
IP-11	40,9	<LD
IP-12	50,4	<LD
IP-13	49,8	<LD
IP-14	22,8	<LD
IP-15	58,0	0,27
IP-16	110,2	<LD
IP-17	47,9	0,08
IP-18	16,1	<LD
IP-19	117,5	0,37
IP-20	148,5	0,13
IP-21	59,0	0,11
IP-22	53,5	<LD
IP-23	46,0	<LD
IP-24	34,3	<LD
IP-25	62,5	<LD

Os resultados para a região de Lagoa Real estão apresentados na Tabela 3, onde foram observados teores muito altos. As concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  nas amostras de água subterrânea variaram entre 83,90 e 3330,5 Bq L<sup>-1</sup>. Na amostra de água superficial coletada no Rio São João, foi determinada uma concentração de  $^{222}\text{Rn}$  de 41,3 Bq L<sup>-1</sup>, o que representa um teor anômalo para águas superficiais, mostrando a influência da mineralização de urânio nessas águas. O  $^{226}\text{Ra}$  foi detectado em 4 das 9 amostras coletadas com teores que variaram entre 0,26 e 1,0 Bq L<sup>-1</sup>. Em dois poços dessa região foram encontradas concentrações extremamente anômalas de  $^{222}\text{Rn}$  com teores de 3330,5 Bq L<sup>-1</sup> e 978,8 Bq L<sup>-1</sup>, sugerindo que estas águas estão em contato com rochas desta zona.

**Tabela 3.** Concentração de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{226}\text{Ra}$  em Lagoa Real.

Amostra	$^{222}\text{Rn}$ (Bq L <sup>-1</sup> )	$^{226}\text{Ra}$ (Bq L <sup>-1</sup> )
PC-01	3330,5	1,00
PC-05	111,9	0,96
PC-16	118,0	<LD
PC-33	83,9	<LD
PC-34	91,6	<LD
PC-74	197,1	<LD
Maniaçu	978,8	1,00
São Timóteo	135,0	0,26
Rio São João	41,3	<LD

O  $^{222}\text{Rn}$  transportado pela água, é o principal agente de contaminação humana, nas águas subterrâneas imediatamente consumidas. Através das concentrações obtidas tanto para o  $^{222}\text{Rn}$  quanto para o  $^{226}\text{Ra}$  nos aquíferos da região do

Pólo não foram encontrados teores elevados de radioatividade, e apenas duas amostras de águas subterrâneas apresentaram concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  marginalmente acima dos limites estabelecidos pela U.S.E.P.A. Nas regiões de Ipirá e Lagoa Real todas as amostras de água subterrânea apresentaram concentração de radônio acima dos limites permitidos para consumo humano. Em termos de  $^{226}\text{Ra}$ , nas 12 amostras em que foram detectadas a presença de Rádio em Ipirá, apenas 2 tiveram o teor de  $^{226}\text{Ra}$  abaixo do limite máximo permitido. As 10 amostras restantes, apresentaram teores de  $^{226}\text{Ra}$  maiores do que o permitido pela U.S.E.P.A. Em Lagoa Real, das 9 amostras coletadas, 4 apresentaram teores de  $^{226}\text{Ra}$  acima do limite máximo permitido.

O problema da diminuição dos níveis de  $^{222}\text{Rn}$  nas águas subterrâneas foi discutido em Alabudula'Aly (1999) onde técnicas como aeração, filtração e retirada de sais por osmose reversa podem eliminar até 96,5% do radônio dissolvido na água. Nos poços de Ipirá onde é usada a retirada de sais por esse tratamento minimiza o problema dos altos teores de radônio da água, já nos poços de Lagoa Real devido à água não ser salina e não possuir dessalinizadores deveria se deixar a água em repouso certo período para que a atividade do radônio caísse para os limites de potabilidade.

## CONCLUSÕES

Na região do Pólo, foram obtidos os menores teores de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{226}\text{Ra}$ . As águas subterrâneas de Ipirá, onde os aquíferos são situados em zonas fraturadas em rochas metamórficas, obteve-se uma média de concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{226}\text{Ra}$  intermediária.

Na área de mineralização de urânio em Lagoa Real, onde os poços são situados em zonas de fraturadas, foram obtidas maiores concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{226}\text{Ra}$ . Assim, a composição mineral das rochas que constituem os aquíferos dominam, em caráter regional, as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{226}\text{Ra}$  de suas águas.

Com relação aos limites de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{226}\text{Ra}$  dissolvidos na água, foi observado que as águas dos 15 poços analisados em Camaçari são próprias, com relação a estes radioelementos, para consumo humano. Em Ipirá as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  foram superiores aos limites estabelecidos pela agência americana de proteção ambiental em todos os 25 poços amostrados e as de  $^{226}\text{Ra}$  foram superiores em 11 poços. Na região de Lagoa Real, as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  foram superiores aos limites estabelecidos pela agência americana de proteção ambiental em todos os 09 poços e as de  $^{226}\text{Ra}$  foram superiores em 04 poços.

A importância dos valores obtidos no ano de 1999 em Lagoa Real e nas outras duas regiões de controle, enquanto a fábrica de processamento de urânio das Indústrias Nucleares do Brasil do Estado da Bahia ainda estava em fase de implantação, mostrou que já existiam poços com valores de atividades altos de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{226}\text{Ra}$ . Foi observado também que regiões com aquíferos no embasamento cristalino e que não têm mineralização de urânio, como no caso de Ipirá, podem ter atividades de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{226}\text{Ra}$  altas. Estes resultados mostram uma necessidade de controle dos teores destes elementos, principalmente, em aquíferos no embasamento cristalino.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pela bolsa fornecida durante a pesquisa.

### REFERÊNCIAS

- ALABDULA'ALY, A. I. Occurrence of radon in the central region groundwater of Saudi Arabian. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 44, p. 85-95, 1999.
- ASIKAINEN, M. State of disequilibrium between  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{222}\text{Rn}$  in groundwater from bedrock. **Geochim. Cosmochim. Acta**, v. 45, p. 201-206, 1981.
- BARRETTO, P. M.; SMITH, A. Y.; POURNS, S. Radon methods in uranium exploration. **Exploration for uranium ore deposits**. Vienna : IAEA , 1976. p. 185-211.
- BURNETT, WILLIAN C., COBERTT, D. REIDE, CABLE, PETER H., CLARK, SUE B. Radon tracing of groundwater input into Par Pond Savannah River Site . **Journal of Hydrology**, v. 203, p. 209-227, 1997.
- CBPM - Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. **Projeto estudo do domínio granulítico na região de Itaberaba - Cruz das Almas**. Salvador, 1997.
- FOLGER, P.F., POETER, E., WANTY, R.B., FRISHMAN, D. AND DAY, W. Controls on  $^{222}\text{Rn}$  variations in a fractured crystalline rock aquifer evaluated using aquifer tests and geophysical logging. **Groundwater**, v. 34, p. 250-261, 1996.
- HEIMAN, M., MONFRAY, P., POLLIAN, G. Modelling of the long-range transport of  $^{222}\text{Rn}$  to Subantarctic and Antarctic areas. **Tellus** , v. 42B , p. 83-99, 1990.
- HORVÁT, A.; BOHUS, L.O.; URBANI, F.; MARX, G.; PIRÓTH, A.; GREAVES, E.D.. Radon concentrations In hot spring waters in northern Venezuela. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 47, p. 127-133, 2000.
- JACOMINO, V. F. ; BELLITANI, S.A.; OLIVEIRA, J. ; MAZZILLI, B. P. ; FIELDS, D. E. ; SAMPA, M. H. AND SILVA, B. Estimates of cancer mortality due to the ingestion of mineral spring waters from a highly natural radioactive region of Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 33, n. 3, p. 319 – 329, 1996.
- KRAEMER, T. F. and GENEREUX, D. P. Applications of Uranium- and Thorium- series radionuclides in Catchment Hydrology Studies. In: C. Kendall and J.J. McDonnell. **Isotope Tracers in Catchment Hydrology**. Amsterdam: Elsevier Science, 1998. Chapter 20.
- MORSE, R.H. Radon counters in uranium exploration. **Exploration for uranium ore deposits**. Vienna: IAEA, 1976. p. 229-239.
- U.S.E.P.A - United States Environmental Protection Agency. **Nation primary drinking water regulations , radionuclides**: notice of proposed rule making. Federal register 56: 33050-33127, 1991.