

# Dose absorvida pela tireóide em casos de acidentes nucleares

Laélia Campos<sup>1</sup>, Márcia Regina Pereira Attie<sup>1</sup>, Fernando Roberto de Andrade Lima<sup>2</sup>,  
Ademir Amaral<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Física  
Rod. Marechal Rondon, s/n, Rosa Elze, São Cristóvão - SE  
CEP: 49100-000, Brasil  
[lpbcampos@gmail.com](mailto:lpbcampos@gmail.com), [marcia.attie@gmail.com](mailto:marcia.attie@gmail.com)

<sup>2</sup>Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE)  
Av. Prof. Luiz Freire 200, Cidade Universitária, Recife - PE  
CEP 50740-540, Brasil  
[falima@cnen.gov.br](mailto:falima@cnen.gov.br)

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear  
Av. Prof. Luiz Freire, 1000, Cidade Universitária, Recife - PE  
CEP: 50740-540, Brasil  
[ajamail@ibest.com.br](mailto:ajamail@ibest.com.br)

**Abstract.** Radioisotopes of iodine are produced in abundance in nuclear fission reactions, and great amounts of radioiodine may be released into the environment in case of a nuclear reactor accident. Thyroid gland is among the most radiosensitive organs due to its capacity to concentrate iodine. The aim of this work was to evaluate the importance of contributions of internally deposited iodines ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{134}\text{I}$  and  $^{135}\text{I}$ ) to the dose absorbed to thyroid's follicle and to the whole organ, after internal contamination by those isotopes. For internal dose calculation, the code of particles' transport MCNP4C was employed. The results showed that, in case of nuclear accidents, the contribution of short-lived iodines for total dose is about 45% for thyroid of newborn and about 40% for thyroid of adult. Thus, these contributions should not be neglected in a prospective evaluation of risks associated to internal contamination by radioactive iodine.

## 1 Introdução

Em acidentes envolvendo centrais nucleares, devido à liberação de iodo radioativo na atmosfera, devem-se observar os riscos relacionados ao câncer de tireóide da população exposta, resultado de uma contaminação do indivíduo com os radioisótopos de iodo. A avaliação da dose absorvida pela tireóide é de fundamental importância na estimativa do risco de câncer tireoideano. As grandezas dosimétricas usadas na radioproteção estão definidas na ICRP (*International Commission on Radiological Protection*) Publicação 60 [1], e mais recentemente pela ICRP 103 [2].

No acidente nuclear de Chernobyl a maioria das medidas diretas de dose só ocorreu cerca de um mês após o acidente [3,4]. Esse atraso na realização de medidas diretas da dose absorvida contribuiu para aumentar as incertezas associadas às estimativas dos riscos, sendo observado um aumento cerca de dez vezes mais no número de casos de câncer de tireóide em crianças, em relação às previsões baseadas nas doses estimadas recebidas pela tireóide [5,6]. Além disso, as medidas foram realizadas apenas para o  $^{131}\text{I}$ , sem levar em consideração a contribuição dos radioisótopos do iodo de meia-vida curta na dose absorvida [5-8].

Para cálculos dosimétricos foi usado o fator de ponderação da tireóide para a dose efetiva, definido pela ICRP 60 [1], bem como as características físicas do iodo associadas aos modelos antropomórficos usados pelo comitê MIRL (*Medical Internal Radiation Dose*) ou em outros tipos de fantomas [9-11].

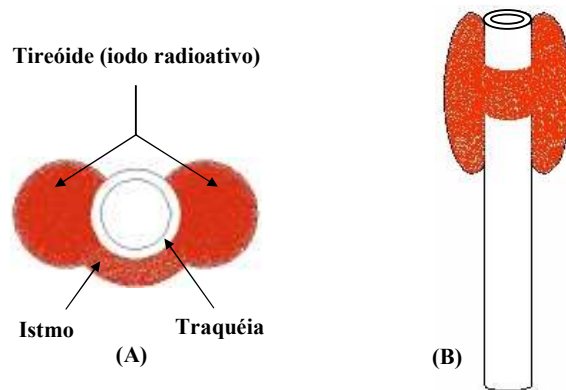
Em estudos recentes, Hindí e colaboradores [12] avaliaram que a distribuição microscópica dos radioisótopos de iodo de meia-vida curta não poderia ser considerada a mesma que para o  $^{131}\text{I}$ . Essa constatação motivou o desenvolvimento de um modelo dosimétrico que levasse em consideração os isótopos de meia-vida curta na avaliação da dose.

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi avaliar a dose absorvida pela tireóide, resultado da incorporação devido ao  $^{131}\text{I}$  e aos isótopos de iodo de meia-vida curta ( $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{134}\text{I}$  e  $^{135}\text{I}$ ), em casos de acidentes nucleares.

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Modelo geométrico da tireóide

O pescoço, a tireóide, o istmo e a traquéia foram modelados para adulto [13] e recém-nascido [14] usando formas geométricas básicas. A densidade usada para a tireóide e para o istmo foi a de tecido mole ( $\rho = 1,04 \text{ g.cm}^{-3}$ ). A massa da tireóide de adulto é igual a 20 g para o homem referência [9] e 1,31 g para recém-nascido [14]. A Figura 1 apresenta a seção transversal (Fig. 1A) e vista frontal (Fig. 1B) da tireóide. Para a traquéia, foi usada a mesma densidade da cartilagem ( $\rho = 1,1 \text{ g.cm}^{-3}$ ) e dentro da traquéia foi preenchida com ar ( $\rho = 0,001124 \text{ g.cm}^{-3}$ ). A densidade e composição elementar dos materiais modelados, bem como as respectivas referências, estão apresentadas na Tabela 1. A fonte de iodo foi simulada uniformemente distribuída em toda a tireóide e istmo.



**Fig. 1.** Modelo da tireóide, traquéia e istmo tireoideano (A) Secção transversal e (B) Vista frontal Imagem obtida através do aplicativo Visual Editor Vised (versão 8E)

**Tabela 1.** Composição elementar e densidade dos materiais modelados

Elemento	Percentual da massa total			
	Ar [15]	Água	Cartilagem [16]	Tecido mole [17,18]
H		11,20	9,6	10,454
C	0,0125		9,9	22,663
N	68,69		2,2	2,490
O	30,1248	88,80	74,4	63,525
Na			0,5	0,112
Mg				0,013
Si				0,030
P			2,2	0,134
S			0,9	0,204
Cl			0,3	0,133
K				0,208
Ca				0,024
Fe				0,005
Zn				0,003
Rb				0,001
Zr				0,001
Ar	1,1717			
Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	0,001124	1,0	1,1	1,04

## 2.2 Simulação Monte Carlo

Nas simulações dos modelos de tireóide foi usado o código para transporte de partículas MCNP versão 4C [15]. Na entrada do código foram informados a geometria de cada modelo estudado, os materiais usados na modelagem, a posição e a distribuição da fonte radioativa, além de todos os parâmetros físicos associados à fonte.

Os radionuclídeos ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{134}\text{I}$  e  $^{135}\text{I}$ ) foram simulados usando as tabelas que contêm os espectros de decaimento de energia para fótons e elétrons, obtidas do Brookhaven National Laboratory's (BNL) National Nuclear Data Center [19].

### 3 Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta a contribuição de elétrons e partículas beta na dose absorvida pela tireóide devido ao  $^{131}\text{I}$  e aos isótopos de iodo de meia-vida curta ( $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{134}\text{I}$  e  $^{135}\text{I}$ ) para adulto e recém-nascido. As incertezas encontradas nas simulações variaram de 0,1 a 0,4%.

**Tabela 2.** Dose absorvida ( $\text{Gy}\cdot\text{des}^{-1}$ ) pela tireóide devido aos elétrons e partículas beta

Tireóide	Dose ( $\text{Gy}\cdot\text{des}^{-1}$ )				
	$^{131}\text{I}$	$^{132}\text{I}$	$^{133}\text{I}$	$^{134}\text{I}$	$^{135}\text{I}$
<b>Adulto</b>	1,50E-12	3,53E-12	3,04E-12	4,35E-12	2,72E-12
<b>Recém-nascido</b>	2,17E-11	4,41E-11	3,98E-11	5,22E-11	3,58E-11

A Tabela 3 apresenta a dose total absorvida pela tireóide devido a todos os fótons contidos nas tabelas de decaimento para cada isótopo de iodo. As incertezas encontradas nas simulações variaram de 1,1 a 2,4%.

**Tabela 3.** Dose total absorvida ( $\text{Gy}\cdot\text{des}^{-1}$ ) pela tireóide devido aos fótons

Tireóide	Dose ( $\text{Gy}\cdot\text{des}^{-1}$ )				
	$^{131}\text{I}$	$^{132}\text{I}$	$^{133}\text{I}$	$^{134}\text{I}$	$^{135}\text{I}$
<b>Adulto</b>	9,93E-14	1,90E-13	1,53E-13	2,03E-13	2,51E-13
<b>Recém-nascido</b>	5,58E-13	9,90E-13	8,27E-13	1,04E-12	1,16E-12

A Tabela 4 apresenta a totalização da dose absorvida pela tireóide proveniente dos elétrons e partículas beta, como também dos fótons, para cada isótopo de iodo simulado.

**Tabela 4.** Dose total absorvida ( $\text{Gy}\cdot\text{des}^{-1}$ ) pela tireóide devido aos elétrons, partículas beta e fótons

Tireóide	Dose ( $\text{Gy}\cdot\text{des}^{-1}$ )				
	$^{131}\text{I}$	$^{132}\text{I}$	$^{133}\text{I}$	$^{134}\text{I}$	$^{135}\text{I}$
<b>Adulto</b>	1,60E-12	3,72E-12	3,19E-12	4,55E-12	2,97E-12
<b>Recém-nascido</b>	2,17E-11	4,41E-11	3,99E-11	5,23E-11	3,59E-11

A Tabela 5 apresenta a energia depositada, a energia efetiva específica (SEE) calculada para a tireóide de adulto (20 g) e a dose absorvida pela tireóide, para a simulação dos fótons de maior frequência. As incertezas encontradas nas simulações variaram de 1,1 a 1,4%.

**Tabela 5.** Energia depositada (MeV.des<sup>-1</sup>), SEE (MeV.des<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>) e dose absorvida (Gy.des<sup>-1</sup>) pela tireóide de adulto devido aos fótons de maior frequência

Iodo	Energia do fóton incidente (MeV) e frequência	Saída MCNP (MeV.des <sup>-1</sup> )	SEE (MeV. des <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )*	Dose (Gy.des <sup>-1</sup> )
<sup>131</sup> I	0,365 (81,7%)	1,21E-02	0,61	7,92E-14
	0,668 (98,7%)	2,15E-02	1,08	1,70E-13
	0,773 (75,6%)	2,81E-02	1,40	1,70E-13
<sup>132</sup> I	0,955 (17,6%)	2,41E-02	1,20	3,39E-14
	0,523 (16%)	1,73E-02	0,87	2,21E-14
	0,630 (13,3%)	3,55E-02	1,78	3,78E-14
	1,399 (7%)	2,05E-02	1,02	1,15E-14
<sup>133</sup> I	0,530 (87%)	1,75E-02	0,88	1,22E-13
	0,847 (95,4%)	2,58E-02	1,29	1,97E-13
	0,884 (64,9%)	2,65E-02	1,33	1,38E-13
	1,073 (14,9%)	3,04E-02	1,52	3,63E-14
<sup>134</sup> I	0,595 (11,1%)	1,95E-02	0,97	1,73E-14
	0,622 (10,6%)	2,03E-02	1,01	1,72E-14
	1,136 (9,10%)	3,17E-02	1,59	2,31E-14
	0,677 (7,90%)	2,17E-02	1,08	1,37E-14
<sup>135</sup> I	1,260 (28,7%)	3,15E-02	1,58	5,70E-14
	1,132 (22,6%)	3,37E-02	1,68	7,73E-14
	1,678 (9,60%)	3,86E-02	1,93	2,97E-14
	1,039 (7,90%)	2,97E-02	1,48	1,88E-14
	1,791 (7,70%)	3,95E-02	1,98	2,44E-14

\* Valores calculados para efeito de validação dos resultados para fótons.

Nos resultados apresentados, os cálculos da dose absorvida foram feitos considerando o mesmo número de desintegrações para os isótopos de iodo simulados. Para cada radionuclídeo, foram usadas todas as energias das partículas emitidas e as respectivas frequências, contidas nas tabelas de decaimento.

Partículas beta e elétrons, bem como fótons com energias abaixo de 10 keV, podem ser considerados não penetrantes para a maioria dos tecidos humanos usados como órgãos fontes, enquanto fótons de alta energia são geralmente considerados penetrantes [10]. Neste trabalho, os fótons dos iodios simulados possuem energia maior que 360 keV, sendo, portanto, considerados penetrantes. Cristy & Eckerman [17] publicaram frações absorvidas específicas ( $\Phi$ ) para fótons de várias energias, sendo a tireóide (adulto) considerada como órgão alvo e órgão fonte (Tabela 6).

**Tabela 6.** Dose total absorvida ( $\text{Gy}\cdot\text{des}^{-1}$ ) pela tireóide devido aos elétrons, partículas beta e fótons

Faixa de energia (MeV)	$\Phi$ (tireóide <sub>adulto</sub> ← tireóide <sub>adulto</sub> ) ( $\text{kg}^{-1}$ )	SEE ( $\text{MeV}\cdot\text{kg}^{-1}$ )*
0,02 – 0,03	18,1 – 7,39	0,36 – 0,22
0,03 – 0,05	7,39 – 2,54	0,22 – 0,13
0,05 – 0,10	2,54 – 1,46	0,13 – 0,15
0,10 – 0,20	1,46 – 1,58	0,15 – 0,32
0,20 – 0,50	1,58 – 1,71	0,32 – 0,86
0,50 – 1,0	1,71 – 1,62	0,86 – 1,62
1,0 – 1,5	1,62 – 1,50	1,62 – 2,25
1,5 – 2,0	1,50 – 1,30	2,25 – 2,60
2,0 – 4,0	1,30 – 1,0	2,60 – 4,00

\* Valores calculados para efeito de validação dos resultados para fótons.

Para validar as simulações dos fótons para os isótopos de iodo, é necessário comparar a energia efetiva específica (SEE) calculada neste trabalho para os fótons de maior frequência, considerando para 1 desintegração (Tabela 5), com os resultados apresentados por Cristy & Eckerman [17] (Tabela 6), para todos isótopos de iodo. A comparação entre as tabelas mostra que os dados obtidos nas simulações estão em boa concordância com os dados publicados para energias menores que 1,0 MeV. Para valores maiores de energia ( $> 1,0$  MeV), o SEE apresenta uma forte dependência do modelo usado.

Para a validação da dose total absorvida proveniente do  $^{131}\text{I}$  **será** foi utilizado o S-value publicado pelo comitê MIRD ( $2,09\text{E}-02 \text{ rad}\cdot\mu\text{Ci}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) calculado para o  $^{131}\text{I}$  e para a tireóide do homem padrão de 20 g [11]. O valor do S-value obtido nesse trabalho foi de  $1,60\text{E}-12 \text{ Gy}\cdot\text{des}^{-1}$  (ver Tabela 4), igual a  $2,13\text{E}-02 \text{ rad}\cdot\mu\text{Ci}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , apresentando uma diferença de apenas 1,9% com relação ao valor publicado pelo comitê MIRD.

No caso particular do acidente de Chernobyl, utilizado como exemplo neste trabalho, a maioria das medidas diretas para a monitoração da população mais exposta ao iodo foi realizada quase 1 mês após o acidente [3,4]. Sabe-se que após o intervalo de tempo de 1 mês, a detecção dos iodios de meia-vida curta não era mais possível, o que leva a subestimação significativa do valor da dose absorvida devido a esses isótopos.

No relatório da UNSCEAR [6] sobre o acidente de Chernobyl, doses à tireóide foram estimadas para 208 trabalhadores que deram entrada no Hospital 6 em Moscou, 3 a 4 dias após o acidente. A maioria dos trabalhadores recebeu uma dose à tireóide menor que 1 Gy, enquanto que para três trabalhadores, a dose individual excedeu 20 Gy. Por outro lado, medidas realizadas em cinco trabalhadores que apresentaram altas doses, mostraram que a contribuição devido ao  $^{133}\text{I}$  foi de aproximadamente 20% [6]. Nos resultados para a tireóide de adulto, a estimativa percentual obtida para o  $^{133}\text{I}$  mostra uma boa concordância com os dados publicados pela UNSCEAR [6].

Para uma melhor estimativa da dose absorvida pela tireóide, as contribuições percentuais de cada isótopo podem ser avaliadas usando o esquema do MIRD [11,20] e a estimativa das atividades liberadas pelo reator de Chernobyl para cada radioisótopo de iodo [6]. Supondo-se, por exemplo, que um indivíduo incorporou uma atividade inicial ( $A_0$ ) de 1 Bq de  $^{131}\text{I}$ , sabe-se pelo inventário do reator que, para cada 1 Bq de  $^{131}\text{I}$  liberado, tem-se então: 0,59 Bq de  $^{132}\text{I}$ ; 0,52 Bq de  $^{133}\text{I}$ ; 0,014 Bq de  $^{134}\text{I}$  e 0,14 Bq de  $^{135}\text{I}$ .

Assim, conhecendo-se a atividade incorporada pelo indivíduo para cada isótopo de iodo, a atividade acumulada pode então ser calculada. Portanto, calculando o valor da atividade cumulada ( $\bar{A}$ ) e conhecendo os S-values obtidos das simulações para cada radionuclídeo, tem-se então a dose absorvida (onde  $D=\bar{A}S$ ).

Sabe-se que a meia-vida biológica do iodo na tireóide do adulto é de aproximadamente 80 dias [21]. Comparando-se esse valor com a meia-vida física dos isótopos de iodo, a meia-vida efetiva será então igual à meia-vida física. Pela ICRP Publicação 78 [21], a meia-vida biológica do iodo é igual a 11,2 dias para recém-nascido. A Tabela 7, a seguir, resume os valores de dose absorvida pela tireóide, calculados pela metodologia MIRD, para adulto e recém-nascido.

**Tabela 7.** Dose absorvida (Gy) pela tireóide usando o sistema MIRD

Tireóide	Dose (Gy.des <sup>-1</sup> )				
	$^{131}\text{I}$	$^{132}\text{I}$	$^{133}\text{I}$	$^{134}\text{I}$	$^{135}\text{I}$
<b>Adulto</b>	1,60E-06	8,92E-07	1,79E-07	2,90E-10	1,45E-08
<b>Recém-nascido</b>	1,27E-05	8,22E-06	2,08E-06	3,32E-09	1,70E-07

De acordo com a Tabela 7, é possível observar que, para todos os isótopos de iodo simulados, a dose absorvida é cerca de dez vezes maior para a tireóide de recém-nascidos, se comparada com a dose absorvida pela tireóide de adultos. Além disso,

calculando o percentual de dose para cada radioisótopo, pode-se concluir que os isótopos de meia-vida curta contribuíram para a dose total na tireóide com cerca de 45% em recém-nascidos e 40% em adultos. O valor complementar da dose é resultado da interação do  $^{131}\text{I}$  com esse órgão.

#### 4 Conclusão

Diante das estimativas de dose absorvida pela tireóide, pode-se concluir que existe uma contribuição significativa de dose proveniente dos radioisótopos de iodo de meia-vida curta. Além disso, as doses mais altas encontradas para a tireóide de recém-nascidos, quando comparadas com as doses para adultos, salientam a importância de se levar em consideração todos os fatores que estão envolvidos para uma avaliação prospectiva dos riscos associados à incorporação devido ao iodo radioativo, resultado de acidentes nucleares.

#### Referências

1. ICRP Publication 60: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford (1990).
2. ICRP Publication 103: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford (2007).
3. LIKHTAREV, I.A., GULKO, G.M., KAIRO, I.A., LOS, I.P., HENRICH, K., PARETZKE, H.G.: Thyroid doses resulting from the Ukraine Chernobyl accident – part I: dose estimates for the population of Kiev. *Health Phys.* (1994), v. 66, pp 137-146.
4. LIKHTAREV, I.A., SHANDALA, N.K., GULKO, G.M., KAIRO, I.A., CHEPURNY, N.I.: Ukrainian thyroid doses after the Chernobyl accident. *Health Phys.* (1993), v. 64, pp 594-599.
5. HINDIÉ, E., LEENHARDT, L., VITAUX, F., COLAS-LINHART, N., GROSCLAUDE, P., GALLE, P., AURENGO, A., BOK, B.: Non-medical exposure to radioiodines and thyroid cancer. *Eur. J. Nucl. Med.* (2002), v. 29, pp S497-S512.
6. UNSCEAR: Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report 2000, New York (2000).
7. GAVRILIN, Y.I., KHROUCH, V.T., SHINKAREV, S.M., KRYSENKO, N.A., SKRYABIN, A.M., BOUVILLE, A., ANSPAUGH, L.R.: Chernobyl accident: reconstruction of thyroid dose for inhabitants of the Republic of Belarus. *Health Phys.* (1999), v. 76, pp 105-119.
8. HEIDENREICH, W.F., KAYRO, I., CHEPURNY, M., JACOB, P., SPAK, V., GOULKO, G.M., PARETZKE, H.G.: Age and sex-specific relative thyroid radiation exposure to  $^{131}\text{I}$  in Ukraine after the Chernobyl accident. *Health Phys.* (2001), v. 80, pp 242-250.
9. CRISTY, M: Reference man anatomical model. In: Raabe, O.G. (ed.): *Internal radiation dosimetry*, Medical Physics publ., Madison (1994), pp. 217-238.
10. LOEVINGER, R., BUDINGER, T.F., WATSON, E.E.: *MIRD Primer for Absorbed Dose Calculations Revised*. Society of Nuclear Medicine (1991).
11. SNYDER, W.S., FORD, M.R., WATSON, S.B.: “S” absorbed dose per unit cumulated activity for selected radionuclides and organs, Society of Nuclear Medicine (1975), 69 p.
12. HINDIE, E., PETIET, A., BOURAHLA, K., COLAS-LINHART, N., SLODZIAN, G., DENNEBOUY, R., GALLE, P.: Microscopic distribution of iodine radioisotopes in the thyroid of the iodine deficient new-born rat: insight concerning the Chernobyl accident. *Cell. Mol. Biol.* (2001), v. 47, pp 403-410.
13. LECLERE, J., ORGIAZZI, J., ROUSSET, B., SCHLIENGER, J.L., WEMEAU, J.L.: *La thyroïde : des concepts à la pratique clinique*. 2nd ed., Elsevier (2001).



14. ULANOVSKY, A.V., ECKERMAN, K.F.: Absorbed fractions for electron and photon emissions in the developing thyroid: fetus to five years old. *Radiat. Prot. Dosim.* (1998), v. 79, pp 419-424.
15. BRIESMEISTER, J.F.: MCNP<sup>TM</sup> – A general Monte Carlo n-particle transport code version 4C. Manual LA-13709-M, Los Alamos (2000).
16. ICRP Publication 89: Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values, Pergamon Press, Oxford (2003).
17. CRISTY, M., ECKERMAN, K.: Specific absorbed fractions of energy at various ages from internal photons sources. ORNL/TM-8381/V1-V7. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge (1987).
18. STABIN, M.G., KONIJNENBERG, M., KNAPP, F.F. JR., SPENCER, R.H: Monte Carlo modeling of radiation dose distributions in intravascular radiation therapy. *Med. Phys.* (2000), v. 27, pp 1086-1092.
19. BNL, Disponível: <http://www.nndc.bnl.gov>. Acesso em: abril de 2011.
20. BOLCH, W.E., ECKERMAN, K.F., SGOUROS, G., THOMAS, S.R.: MIRD Pamphlet 21: A Generalized Scheme for Radiopharmaceutical Dosimetry – Standardization of Nomenclature. *J. Nucl. Med.* (2008), v. 50, pp 477-484.
21. ICRP Publication 78: Individual monitoring for internal exposure of workers, Pergamon Press, Oxford (1998).