

# Dosimetria de pacientes submetidos a exames de PET/CT cerebral para diagnóstico de comprometimento cognitivo leve\*

*Dosimetry of patients submitted to cerebral PET/CT for the diagnosis of mild cognitive impairment*

Priscila do Carmo Santana<sup>1</sup>, Arnaldo Prata Mourão<sup>2</sup>, Paulo Márcio Campos de Oliveira<sup>1</sup>, Felipe Dias Bernardes<sup>3</sup>, Marcelo Mamede<sup>4</sup>, Teógenes Augusto da Silva<sup>5</sup>

Santana PC, Mourão AP, Oliveira PMC, Bernardes FD, Mamede M, Silva TA. Dosimetria de pacientes submetidos a exames de PET/CT cerebral para diagnóstico de comprometimento cognitivo leve. Radiol Bras. 2014 Nov/Dez;47(6):350–354.

**Resumo** **Objetivo:** O objetivo deste trabalho é avaliar a dose em pacientes submetidos a PET/CT para diagnóstico de comprometimento cognitivo leve.

**Materiais e Métodos:** Para as medidas da dose absorvida proveniente da modalidade CT utilizaram-se detectores TLD-100 inseridos em um simulador Alderson Rando<sup>®</sup>. Os simuladores antropomórficos (versões masculina e feminina) foram submetidos aos mesmos protocolos técnicos para aquisição das imagens dos pacientes. A dose absorvida resultante da injeção do radiofármaco foi estimada por meio do modelo proposto pela ICRP 106.

**Resultados:** A dose efetiva a que foram submetidos os pacientes com esta técnica diagnóstica foi, aproximadamente,  $(5,34 \pm 1,99)$  mSv.

**Conclusão:** Protocolos otimizados para cálculo de atividade radioativa que será injetada em cada paciente podem contribuir para a redução da dose efetiva nos pacientes durante a realização do diagnóstico de comprometimento cognitivo leve com PET/CT.

**Unitermos:** Dosimetria; PET/CT; Comprometimento cognitivo leve.

**Abstract** **Objective:** The present study was aimed at evaluating the effective radiation dose in patients submitted to PET/CT for the diagnosis of mild cognitive impairment.

**Materials and Methods:** TLD-100 detectors inserted into an Alderson Rando<sup>®</sup> anthropomorphic phantom were utilized to measure the absorbed dose coming from the CT imaging modality. The anthropomorphic phantoms (male and female adult versions) were submitted to the same technical protocols for patients' images acquisition. The absorbed dose resulting from the radiopharmaceutical injection was estimated by means of the model proposed by the ICRP publication 106.

**Results:** The effective dose in patients submitted to this diagnostic technique was approximately  $(5.34 \pm 1.99)$  mSv.

**Conclusion:** Optimized protocols for calculation of radioactive activity injected into patients submitted to this diagnostic technique might contribute to reduce the effective radiation dose resulting from PET/CT in the diagnosis of mild cognitive impairment.

**Keywords:** Dosimetry; PET/CT; Mild cognitive impairment.

## INTRODUÇÃO

Pacientes portadores de comprometimento cognitivo leve (CCL) podem ter seu quadro clínico evoluído para doença de Alzheimer. Os pacientes com CCL apresentam déficit de memória similar à doença de Alzheimer, mas não apresentam outros critérios desta; entretanto, têm uma taxa de con-

versão para doença de Alzheimer de aproximadamente 10% a 15% ao ano.

A doença de Alzheimer é uma doença neurodegenerativa mais frequentemente associada à idade, cujas manifestações cognitivas e neuropsiquiátricas resultam em uma deficiência progressiva e eventual incapacitação<sup>(1,2)</sup>. Entre 60% e 70% dos pacientes com quadro de déficit cognitivo leve apresentam hipometabolismo moderado a grave no córtex associativo. Os pacientes com doença de Alzheimer tendem a ter hipometabolismo nos lobos parietal, temporal e cíngulo posterior. Por esse motivo, além dos exames clínicos, uma das técnicas para diagnóstico precoce do CCL e da doença de Alzheimer é a PET/CT (*positron emission tomography/computed tomography*) com o radiofármaco <sup>18</sup>F-fluorodesoxiglicose (<sup>18</sup>F-FDG).

\* Trabalho realizado na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil. Suporte financeiro: Pró-reitoria de Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) e INCT de Metrologia das Radiações.

1. Doutores, Professores Adjuntos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

2. Doutor, Professor Associado do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (Cefet-MG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

3. Graduando em Tecnologia em Radiologia na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

4. Pós-doutor, Professor Titular da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

5. Pós-doutor, Pesquisador Titular do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – Comissão Nacional de Energia Nuclear (CDTN-CNEN), Belo Horizonte, MG, Brasil.

Endereço para correspondência: Dra. Priscila do Carmo Santana. Avenida Professor Alfredo Balena, 190, Departamento de Anatomia e Imagem. Belo Horizonte, MG, Brasil, 30130-100. E-mail: pridill@gmail.com.

Recebido para publicação em 16/5/2013. Aceito, após revisão, em 17/4/2014.

A PET é a modalidade de imagem mais sensível e específica na detecção de alterações metabólicas, entretanto, apresenta limitada resolução espacial. A tomografia computadorizada (CT) auxilia, portanto, a identificação anatômica das possíveis alterações que poderão ser encontradas na imagem da PET/CT.

Para a realização do exame de PET/CT, o paciente é submetido aos níveis de radiação proveniente da injeção do radiofármaco e à dose de raios X provenientes da utilização do tomógrafo. Por isso, quando comparado a outros exames de diagnóstico, esta técnica submete os pacientes a doses efetivas mais elevadas que em outras técnicas de imagem<sup>(3-5)</sup>.

A dosimetria é o estudo quantitativo dos efeitos provocados pelas radiações ionizantes em um meio. O modo como as radiações ionizantes interagem em um meio absorvente depende da sua composição e da energia da radiação, portanto, é muito importante o conhecimento das características do feixe de radiação incidente, como a quantificação da energia depositada por este em um determinado material<sup>(6)</sup>.

A dosimetria de pacientes pode ser realizada de forma direta ou indireta. Quando realizada de forma direta, geralmente são utilizados dosímetros termoluminescentes, que são cristais de pequenas dimensões que possuem a capacidade de armazenar a energia da radiação e liberá-la na forma de luz, quando aquecidos a determinadas temperaturas. O número atômico efetivo dos dosímetros termoluminescentes à base de fluoreto de lítio está muito próximo ao dos tecidos humanos, sendo assim, o seu posicionamento no paciente ou em simuladores, dentro do feixe direto de radiação, não atrapalha a aquisição da imagem para a faixa de energia utilizada em radiodiagnóstico convencional<sup>(6)</sup>. Por meio de modelos biocinéticos de incorporação de radionuclídeos e do conhecimento da interação da radiação com a matéria, podem ser realizados estudos dosimétricos de modo indireto.

O estudo das doses absorvida e efetiva nos pacientes submetidos a PET/CT para diagnóstico e estadiamento oncológico é importante para permitir a otimização dos procedimentos de radiodiagnóstico e demonstrar a aplicação dos princípios de proteção radiológica. Dessa maneira, é possível obter imagens de qualidade diagnóstica com o mínimo de exposição do paciente à radiação.

Com o intuito de conhecer a dose efetiva à qual esses pacientes são submetidos, este estudo tem como objetivo determinar o nível de radiação em cada uma das modalidades nos órgãos mais radiosensíveis, como o cristalino e a tireoide, que podem sofrer diretamente a exposição da radiação emitida pelo exame de CT e pela incorporação do radiofármaco.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para determinar as doses efetivas e absorvidas resultantes da CT, utilizou-se equipamento PET/CT Discovery 690 da General Electric, que possui 64 canais. Os parâmetros técnicos utilizados para aquisição de imagens cerebrais foram: tensão = 120 kV; corrente = 150 mA (sem modulação);

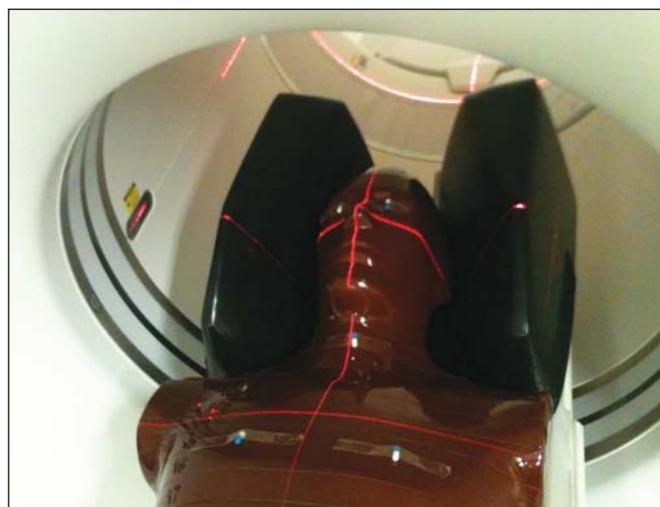
espessura do corte = 3,75 mm; espessura do feixe = 20 mm; *pitch* = 0,531; velocidade da mesa = 10,62 mm/rotação; tempo de exposição por rotação = 0,5 s.

Para a realização das medidas de dose absorvida e efetiva na PET/CT, foi necessário garantir as condições adequadas de funcionamento do equipamento, mediante aplicação dos testes de controle de qualidade recomendados pelo fabricante, tais como o aquecimento e calibração do tubo de raios X e controle da homogeneidade e reprodutibilidade de resposta dos detectores.

Para determinar a dose efetiva proveniente do exame de PET/CT, foram necessárias duas etapas: uma para determinar a contribuição da dose efetiva causada pela CT e outra para avaliar a contribuição proveniente da atividade do radiofármaco.

As doses absorvidas e efetivas recebidas pelos pacientes durante a realização do exame de CT foram mensuradas utilizando-se detectores termoluminescentes (TLDs) inseridos em simuladores antropomórficos Alderson Randon<sup>®</sup> (versões masculina e feminina). Os dosímetros, previamente selecionados e calibrados, utilizados neste experimento foram de fluoreto de lítio ativados com magnésio e titânio (LiF: Mg,Ti – TLD-100) no formato Rod (cilíndrico), fabricados pela Harshaw Chemical Company. A calibração dos detectores foi realizada na faixa de energia de interesse, dada pela radiação de referência para CT no Laboratório de Calibração do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), identificada por RQT9, produzida com tensão de 120 kV e camada semirredutora de 8,4 mm de alumínio. A Figura 1 mostra o simulador antropomórfico posicionado no interior do *gantry* para a realização do procedimento tomográfico, em que é possível observar cinco cápsulas posicionadas nas regiões das mamas, tireoide e cristalino.

Os detectores TLD-100 foram inseridos nos simuladores antropomórficos Alderson Randon<sup>®</sup> em cada ponto correspondente a órgãos mais radiosensíveis e com maior probabilidade de exposição devido à sua inserção no campo de



**Figura 1.** Posicionamento do simulador antropomórfico masculino para a realização do procedimento tomográfico.

radiação ou proximidade a ele (cérebro, mama, tireoide, cristalino). Foram selecionados vários pontos por órgão baseado em seu volume, e para cada ponto selecionado foram inseridos três detectores encapsulados, de modo a aumentar a confiabilidade metrológica das medições.

Após o preparo dos simuladores antropomórficos, estes foram submetidos ao mesmo protocolo de aquisição de imagens dos pacientes e foi realizada uma irradiação. Para avaliar alterações metabólicas cerebrais, o exame de CT se restringe ao protocolo de aquisição de imagens de cérebro, portanto, somente esta região recebe diretamente o feixe primário de radiação X.

De posse dos resultados de dose absorvida em cada órgão, a dose efetiva nos exames de CT foi calculada por meio da equação 1:

$$E = \sum (W_T \times \sum (D_T \times W_R)) \quad (1)$$

onde:  $D_T$  representa a média dos resultados da leitura da dose absorvida pelos dosímetros posicionados no tecido ou órgão "T";  $W_R$  representa o fator de ponderação para o tipo de radiação "R", dado pela publicação ICRP 103, que para radiação X é a unidade<sup>(7)</sup>;  $W_T$  representa o fator de ponderação para o tecido ou órgão "T", dado pela publicação ICRP 103<sup>(7)</sup>.

Já na modalidade PET, o radiofármaco injetado ( $^{18}\text{F}$ -FDG) é distribuído no corpo todo, porém tem maior afinidade por órgãos com alta captação de glicose, como o cérebro e o coração, além dos órgãos de excreção, como a bexiga. Portanto, o radiofármaco contribuirá com níveis mais elevados de radiação em vários órgãos fora da região de avaliação. Para determinar essa contribuição, utilizou-se o modelo proposto pela ICRP 106<sup>(8-10)</sup>.

O modelo proposto pela ICRP 106 para o radiofármaco  $^{18}\text{F}$ -FDG é baseado em trabalhos científicos que apresentam modelos biocinéticos após sua administração intravenosa<sup>(11)</sup>. De acordo com a mesma publicação, existe uma absorção inicial de  $^{18}\text{F}$ -FDG no coração (4%), cérebro (8%), fígado (5%), pulmões (3%) e todos os outros tecidos (80%). A retenção nos órgãos de origem especificados é considerada como sendo infinita (sem levar em conta a absorção retardada). Uma fração de 30% da atividade em outros órgãos e tecidos é considerada como excretada na urina, com tempo de meia vida biológica de 12 minutos (eliminação de 25%) e 1,5 hora (eliminação de 75%), de acordo com o modelo biocinético do rim-bexiga. Ainda de acordo com o modelo proposto pela ICRP 106, órgãos como cristalino e tireoide apresentam incorporação insignificante em comparação a outros, já que apresentam baixo metabolismo de glicose.

Nos exames de PET para identificação das CCLs, a atividade radioativa a ser incorporada pelo paciente é calculada com base em sua massa corpórea. Utilizou-se um fator de 3,7 MBq/kg para cada paciente. Foram utilizados os dados de 59 pacientes do sexo feminino e 38 pacientes do sexo masculino submetidos a esse protocolo. De acordo com o modelo proposto pela ICRP 106, são utilizados coeficientes ( $\Gamma$ ) que permitem calcular o valor da dose absorvida (D) nos

órgãos e a dose efetiva (E) em função da atividade radioativa (A) injetada nos pacientes, radionuclídeo injetado (nesse caso o flúor-18), idade do paciente e órgão, conforme as equações 2 e 3:

$$D = {}^{18}\text{F}\Gamma \times A \quad (2)$$

$$E = {}^{18}\text{F}\Gamma \times A \quad (3)$$

## RESULTADOS

O coeficiente de calibração para a radiação de referência utilizada (RQT9) foi  $(82,9 \pm 8,3)$  mGy/nC. A dose efetiva média proveniente do exame de PET/CT para o protocolo de estudos de doenças de CCL foi  $(5,34 \pm 1,99)$  mSv. O valor da média de idade dos pacientes que realizaram este exame foi 76 anos, com altura média de 1,57 m, massa de 62,86 kg, atividade injetada de  $(295,99 \pm 106,21)$  MBq e dose efetiva devida somente à incorporação do radiofármaco  $(5,22 \pm 1,84)$  mSv, como mostra a Tabela 1. Todas as incertezas foram calculadas para o intervalo de confiança de 95,45% dos dados, com fator de abrangência de  $k = 2$ .

Os valores da média da dose absorvida pelos pacientes submetidos à PET/CT resultantes somente da irradiação pelos raios X são apresentados na Tabela 2.

A região que recebeu maior nível de radiação procedente da CT foi o cristalino, que recebeu  $(25,53 \pm 5,12)$  mGy e  $(24,91 \pm 4,98)$  mGy para os lados direito e esquerdo, respectivamente, sendo, portanto, o tecido ou órgão mais irradiado nesse tipo de protocolo de aquisição de imagens.

Os valores da média da dose absorvida pelos pacientes submetidos à PET/CT resultantes da incorporação da  $^{18}\text{F}$ -FDG estão apresentados na Tabela 3. Para órgão como o cérebro, a dose absorvida foi  $(11,25 \pm 4,04)$  mGy e para a tireoide foi  $(2,96 \pm 1,06)$  mGy.

**Tabela 1**—Dados do grupo de pacientes submetidos a PET/CT para diagnóstico do CCL.

| Dados                    | Média           | Mínimo | Máximo | 3° Quartil |
|--------------------------|-----------------|--------|--------|------------|
| Idade (anos)             | 76 ± 17         | 39     | 91     | 83         |
| Altura (m)               | 1,57 ± 0,20     | 1,34   | 1,84   | 1,63       |
| Massa (kg)               | 62,86 ± 22,43   | 37,3   | 92     | 70,8       |
| Atividade injetada (MBq) | 295,99 ± 106,21 | 154,66 | 459,36 | 332,22     |
| Dose efetiva média (mSv) | 5,22 ± 1,84     | 2,75   | 7,99   | 5,87       |

**Tabela 2**—Dose absorvida proveniente dos exames de tomografia computadorizada para diagnóstico do CCL.

| Órgão                   | Dose absorvida média (mGy) |
|-------------------------|----------------------------|
| Cristalino direito      | 25,53 ± 5,12               |
| Cristalino esquerdo     | 24,91 ± 4,98               |
| Tireoide                | 1,01 ± 0,20                |
| Cérebro – lobo direito  | 0,28 ± 0,06                |
| Cérebro – lobo esquerdo | 0,31 ± 0,06                |
| Forame magno            | 17,64 ± 3,52               |
| Glândula pituitária     | 15,92 ± 3,19               |
| Mama direita            | Background                 |
| Mama esquerda           | Background                 |

**Tabela 3**—Valores de dose absorvida nos diversos órgãos decorrente da incorporação do  $^{18}\text{F}$ -FDG.

| Órgão                       | Média da dose absorvida (mGy) | Máximo (mGy) | Mínimo (mGy) | 3º Quartil |
|-----------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|------------|
| Suprarenais                 | 3,55 ± 1,27                   | 5,51         | 1,86         | 3,99       |
| Bexiga                      | 38,47 ± 13,82                 | 59,72        | 20,11        | 43,19      |
| Superfícies ósseas          | 3,26 ± 1,17                   | 5,05         | 1,70         | 3,65       |
| Cérebro                     | 11,25 ± 4,04                  | 17,46        | 5,88         | 12,62      |
| Mamas                       | 2,60 ± 0,93                   | 4,04         | 1,36         | 2,92       |
| Vesícula biliar             | 3,84 ± 1,39                   | 5,97         | 2,01         | 4,32       |
| Trato gastrointestinal      |                               |              |              |            |
| Estômago                    | 3,26 ± 1,17                   | 5,05         | 1,70         | 3,65       |
| Intestino delgado           | 3,55 ± 1,27                   | 5,51         | 1,86         | 3,99       |
| Cólon                       | 3,85 ± 1,38                   | 5,97         | 2,01         | 4,32       |
| – Intestino grosso superior | 3,55 ± 1,27                   | 5,51         | 1,86         | 3,99       |
| – Intestino grosso inferior | 4,14 ± 1,49                   | 6,43         | 2,17         | 4,65       |
| Coração                     | 19,83 ± 7,12                  | 30,78        | 10,36        | 22,26      |
| Rins                        | 5,03 ± 1,81                   | 7,81         | 2,63         | 5,65       |
| Fígado                      | 6,22 ± 2,23                   | 9,65         | 3,25         | 6,98       |
| Pulmões                     | 5,92 ± 2,13                   | 9,19         | 3,09         | 6,64       |
| Músculos                    | 2,96 ± 1,06                   | 4,59         | 1,55         | 3,32       |
| Ovários                     | 3,96 ± 1,44                   | 5,98         | 2,17         | 4,41       |
| Pâncreas                    | 3,85 ± 1,38                   | 5,97         | 2,01         | 4,32       |
| Medula vermelha             | 3,26 ± 1,17                   | 5,05         | 1,70         | 3,65       |
| Pele                        | 2,31 ± 0,83                   | 3,58         | 1,21         | 2,59       |
| Baço                        | 3,26 ± 1,17                   | 5,05         | 1,70         | 3,65       |
| Testículos                  | 3,47 ± 1,11                   | 5,05         | 2,52         | 3,83       |
| Timo                        | 3,55 ± 1,27                   | 5,51         | 1,86         | 3,99       |
| Tireoide                    | 2,96 ± 1,06                   | 4,59         | 1,55         | 3,32       |
| Útero                       | 5,10 ± 1,84                   | 7,69         | 2,78         | 5,67       |
| Demais órgãos               | 3,55 ± 1,27                   | 5,51         | 1,86         | 3,99       |

## DISCUSSÃO

Foi possível observar o baixo nível de radiação na tireoide, já que a dose neste órgão é proveniente em sua maioria pela incorporação da  $^{18}\text{F}$ -FDG e este órgão se encontra fora do campo de radiação durante a obtenção da imagem de CT. O cristalino, que é um órgão radiosensível, recebe irradiação somente da CT, já que este órgão não capta de modo significativo a  $^{18}\text{F}$ -FDG. Já o cérebro e o coração são órgãos que apresentam alta irrigação sanguínea, levando ao aumento significativo na captação de  $^{18}\text{F}$ -FDG, o que eleva a dose absorvida nesses órgãos.

A dose absorvida nas mamas, proveniente do exame de CT de crânio, não foi estatisticamente possível de distinção, pois está no nível da radiação de fundo (*background*), mostrando que o posicionamento de detectores em órgãos ainda mais distantes do feixe primário de radiação é desnecessário para o protocolo de aquisição de imagens utilizado.

A bexiga é o órgão que sofre maior deposição de energia das radiações para os exames em estudo, uma vez que a via de excreção é pelo trato urinário, e a  $^{18}\text{F}$ -FDG fica armazenada nesse órgão durante grande período de tempo. Este fato explica o alto nível de radiação recebido, representando, aproximadamente, em termos relativos, 25% do total de dose absorvida de corpo inteiro, em média. Já os demais órgãos

receberam níveis de radiação muito parecidos, representando, em média, 3% do total de dose absorvida de corpo inteiro por órgão avaliado.

A falta de estudos dosimétricos referentes a exames cerebrais utilizando-se a PET/CT não permite boas comparações de resultados, porém, para alguns exames específicos é possível obter uma relação entre os resultados<sup>(12–18)</sup>.

Khamwan et al. mostraram que, para 35 pacientes tailandeses submetidos a exames de PET/CT oncológicos de corpo inteiro, a média encontrada de dose efetiva foi 18,85 mSv, calculada por métodos computacionais<sup>(17)</sup>.

Huang et al. estimaram a dose de radiação de corpo inteiro decorrente da utilização da  $^{18}\text{F}$ -FDG e decorrente da CT para avaliar o risco de indução de câncer na população dos Estados Unidos e Hong Kong. Determinou-se que as doses, ao utilizar três protocolos diferentes (A, B e C) foram, respectivamente, 13,45, 24,79 e 31,91 mSv para pacientes do sexo feminino e 13,65, 24,80 e 32,18 mSv para pacientes do sexo masculino<sup>(12)</sup>.

Esses resultados demonstram que os níveis de radiação para estudos exclusivamente cerebrais submetem os pacientes a níveis de radiação muito inferiores às doses efetivas provenientes de estudos de corpo inteiro, conforme esperado.

Pina et al. avaliaram a distribuição de doses absorvidas em órgãos, em três equipamentos de CT em protocolos de

crânio, utilizando dosímetros TLD-100 inseridos em um simulador antropomórfico Alderson Rando®. Foram obtidos valor médio de 16 mGy de dose absorvida no cristalino e valor médio de 0,5 mGy na tireoide, que representam diferenças de 52% e 50%, respectivamente, quando comparados aos dados obtidos no presente estudo<sup>(19)</sup>.

O nível de radiação a que são submetidos os pacientes no diagnóstico das CCLs, utilizando-se da tecnologia PET/CT, é de aproximadamente 98% proveniente da incorporação do radiofármaco, o que demonstra a importância da injeção do elemento radioativo na quantidade que permita o diagnóstico preciso. Portanto, um estudo de modo a otimizar a atividade injetada nos pacientes poderá ser extremamente eficiente na redução de doses a que são submetidos.

## CONCLUSÃO

Protocolos otimizados para cálculo de atividade radioativa que será injetada em cada paciente podem contribuir para a redução da dose efetiva nos pacientes durante a realização do diagnóstico pela PET/CT. A utilização do cálculo individualizado da atividade de radiofármaco também é um fator primordial para a redução da dose efetiva.

O conhecimento dos recursos dos equipamentos de PET/CT, a conscientização e o treinamento dos profissionais em relação à proteção radiológica dos pacientes podem interferir diretamente na escolha do protocolo e, assim, na dose a que esses pacientes serão submetidos.

## REFERÊNCIAS

1. Zhao Q, Tang XC. Effects of huperzine A on acetylcholinesterase isoforms in vitro: comparison with tacrine, donepezil, rivastigmine and physostigmine. *Eur J Pharmacol.* 2002;455:101–7.
2. Janus C, Westaway D. Transgenic mouse models of Alzheimer's disease. *Physiol Behav.* 2001;73:873–86.
3. Deloar HM, Fujiwara T, Shidahara M, et al. Estimation of absorbed dose for 2-[F-18]fluoro-2-deoxy-D-glucose using whole-body positron emission tomography and magnetic resonance imaging. *Eur J Nucl Med.* 1998;25:565–74.
4. Hays MT, Segall GM. A mathematical model for the distribution of fluorodeoxyglucose in humans. *J Nucl Med.* 1999;40:1358–66.
5. Hays MT, Watson EE, Thomas SR, et al. MIRD dose estimate report no. 19: radiation absorbed dose estimates from (18)F-FDG. *J Nucl Med.* 2002;43:210–4.
6. Oliveira PMC. Avaliação de parâmetros da qualidade de imagem e dosimetria de pacientes submetidos a exames radiológicos de tórax. [Tese de doutorado]. Belo Horizonte, MG: Universidade Federal de Minas Gerais; 2012.
7. [No authors listed]. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals ICRP.* 2007;37(2–4):1–332.
8. [No authors listed]. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. A report of a Task Group of Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection. *Ann ICRP.* 1987;18(1–4):1–377.
9. [No authors listed]. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals (addendum 2 to ICRP Publication 53). *Ann ICRP.* 1998;28(3):1–126.
10. ICRP. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals – Addendum 3 to ICRP Publication 53. ICRP Publication 106. *Ann ICRP.* 2008;38(1–2):1–197.
11. Mejia AA, Nakamura T, Masatoshi I, et al. Estimation of absorbed doses in humans due to intravenous administration of fluorine-18-fluorodeoxyglucose in PET studies. *J Nucl Med.* 1991;32:699–706.
12. Huang B, Law MW, Khong PL. Whole-body PET/CT scanning: estimation of radiation dose and cancer risk. *Radiology.* 2009;251:166–74.
13. Al-Haj AN, Lobrighito AM, Arafah A, et al. Deriving staff and public doses in a PET/CT facility from measured radiation levels using thermoluminescent dosimetry. *Radiat Prot Dosimetry.* 2011;144:487–91.
14. Zenóbio MAF, da Silva TA. Absorbed doses on patients undergoing tomographic exams for pre-surgery planning of dental implants. *Appl Radiat Isot.* 2007;65:708–11.
15. Bedetti G, Pizzi C, Gavaruzzi G, et al. Suboptimal awareness of radiologic dose among patients undergoing cardiac stress scintigraphy. *J Am Coll Radiol.* 2008;5:126–31.
16. Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, National Research Council. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2 (2006). Washington, DC: National Academy Press; 2006.
17. Khamwan K, Krisanachinda A, Pasawang P. The determination of patient dose from (18)F-FDG PET/CT examination. *Radiat Prot Dosimetry.* 2010;141:50–5.
18. Hillner BE, Siegel BA, Liu D, et al. Impact of positron emission tomography/computed tomography and positron emission tomography (PET) alone on expected management of patients with cancer: initial results from the National Oncologic PET Registry. *J Clin Oncol.* 2008;26:2155–61.
19. Pina DR, Duarte SB, Ghilardi Netto T, et al. Controle de qualidade e dosimetria em equipamentos de tomografia computadorizada. *Radiol Bras.* 2009;42:171–7.