UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FACULDADE DE MEDICINA

SAMANTHA CRISTINA PEREIRA FERNANDES

**Dosimetria e cuidados de radioproteção para pacientes
submetidos a procedimentos diagnósticos em Medicina Nuclear**

(Versão Corrigida)

São Paulo

2019

SAMANTHA CRISTINA PEREIRA FERNANDES

**Dosimetria e cuidados de radioproteção para pacientes submetidos
a procedimentos diagnósticos em medicina nuclear**

(Versão Corrigida)

Dissertação apresentada à Faculdade de
Medicina da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em Ciências

Programa de Oncologia

Orientador: Prof. Dr. José Willegaignon de Amorim de
Carvalho

São Paulo

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Preparada pela Biblioteca da
Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo

©reprodução autorizada pelo autor

Fernandes, Samantha Cristina Pereira
Dosimetria e cuidados de radioproteção para
pacientes submetidos a procedimentos diagnósticos em
medicina nuclear / Samantha Cristina Pereira
Fernandes. -- São Paulo, 2019.
Dissertação (mestrado)--Faculdade de Medicina da
Universidade de São Paulo.
Programa de Oncologia.
Orientador: José Willegaignon de Amorim de
Carvalho.

Descritores: 1. Proteção radiológica 2. Medicina
nuclear 3. Dosimetria 4. Radiologia 5. Serviço
hospitalar de oncologia 6. Doses de radiação
7. Radioisótopos

USP/FM/DBD-459/19

Responsável: Erinalva da Conceição Batista, CRB-8 6755

Aos meus pais José Roberto e Edna, pois sempre me incentivaram e acreditaram no meu potencial. E sei que vibram com cada conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado e iluminado todo o meu caminho, fornecendo-me força para não cair em nenhum momento.

Ao Profº Dr. José Willegaignon, meu querido orientador, pela confiança e por me presentear com uma chance de iniciar em um projeto de mestrado; pela paciência e orientação em toda minha jornada até aqui. Agradeço por todos os conhecimentos que pude adquirir com suas aulas, conversas e conselhos, tudo colaborou para meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Ao Rogério Pelissoni, amigo que basicamente vibrou comigo em diversos momentos, alguns felizes e outros nem tanto, mas que me fizeram crescer muito. Obrigada pela amizade, puxões de orelha e confiança.

À Monick e ao Robert da radiofarmácia do ICESP, principalmente pela paciência, todas as explicações, correções e inúmeras dicas valiosas. Fico imensamente grata pela amizade construída nesse período.

Ao meu marido, Diego, que me apoiou desde o início e me ajudou em todos os momentos difíceis nesta jornada. Seu apoio foi crucial em todo esse processo.

Aos meus pais, que sempre estiveram comigo e acreditaram no meu potencial. Sou muito grata por todo amor, apoio e carinho. Vocês foram a base para me manter firme durante todo esse ciclo.

Aos meus irmãos, Fábio, Felipe e Nataly, que nunca deixaram o desânimo me abalar. Sempre acreditaram e sei que se orgulham por minhas conquistas. O amor de vocês foi e sempre será de suma importância.

Ao pessoal da Medicina Nuclear do Instituto do Câncer do Estado de São Paulo (ICESP): médicos, tecnólogos e equipe de enfermagem, sempre atentos e dispostos a auxiliar e tirar minhas dúvidas. Parte deste projeto só foi possível com a colaboração de todos eles; gratidão.

Agradeço também ao pessoal do Instituto do Coração (INCOR) e Serviço de Medicina Nuclear do Instituto de Radiologia do Hospital das Clínicas (InRad-HC) por todo apoio e colaboração principalmente durante a coleta de dados.

**“A ciência nunca resolve um problema
sem criar pelo menos outros dez.”**

(George Bernard Shaw)

RESUMO

Fernandes SCP. *Dosimetria e cuidados de radioproteção para pacientes submetidos a procedimentos diagnósticos em medicina nuclear* [dissertação]. São Paulo: Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo; 2019.

Pacientes que são submetidos a procedimentos de Medicina Nuclear, sejam eles diagnósticos ou terapêuticos, tornam-se fontes radioativas por um determinado período de tempo até que a substância radioativa incorporada por eles seja completamente eliminada de seus organismos. Como consequência, os pacientes radioativos podem expor outros indivíduos e o meio ambiente à radiação ionizante. Visando reduzir estas exposições, cuidados de radioproteção com esses pacientes são geralmente requeridos. Porém, a pequena quantidade de material radioativo administrada em procedimentos diagnósticos leva ao questionamento sobre a real necessidade de se atribuir tais cuidados e, mesmo que comprovada esta necessidade, cabe ainda estabelecer o período de sua vigência. Na literatura não existem estudos científicos que permitam estabelecer tais cuidados e sua adequação de acordo com as necessidades clínicas de cada paciente. Respostas a esses questionamentos estão vinculados ao verdadeiro potencial de exposição que esses pacientes oferecerem a outros indivíduos, como também os riscos radiológicos provenientes dessas exposições e doses de radiação. Desta forma, este estudo visa primordialmente avaliar esses potenciais de exposição baseado no estudo da biocinética de retenção e excreção de radiofármacos recebida pelos pacientes, bem como avaliar os cuidados de radioproteção a serem implantados na Medicina Nuclear diagnóstica seja para reduzir ou controlar as exposições de familiares e demais indivíduos da Sociedade que, por ventura, venham a ser expostos a esses pacientes.

Descritores: Proteção radiológica; Medicina nuclear; Dosimetria; Radiologia; Serviço hospitalar de oncologia; Doses de radiação; Radioisótopos.

ABSTRACT

Fernandes SCP. *Dosimetry and radioprotection care for patients with diagnostic procedures in nuclear medicine* [dissertation]. São Paulo: "Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo"; 2019.

Patients undergoing Nuclear Medicine procedures, whether diagnostic or therapeutic, become radioactive sources for a period of time until the radioactive substance they incorporate is completely eliminated from their organisms. As a consequence, radioactive patients may expose other individuals and the environment to ionizing radiation. In order to reduce these exposures, radioprotective care with these patients is usually required. However, the small amount of radioactive material administered in diagnostic procedures leads to the question of the real need for such care and, even if this need is proven, it is still necessary to establish the period of its validity. There are no scientific studies in the literature to establish such care and its adequacy according to the clinical needs of each patient. Answers to these questions are linked to the true exposure potential these patients offer to other individuals, as well as the radiological risks arising from these exposures and radiation doses. Thus, this study primarily aims to evaluate these exposure potentials based on the study of patient-received radiopharmaceutical retention and excretion kinetics, as well as to evaluate the radioprotective care to be implemented in diagnostic Nuclear Medicine either to reduce or control family exposures. and other individuals of the Society who may be exposed to these patients.

Descriptors: Radiation protection; Nuclear medicine; Dosimetry; Radiology; Oncology service, hospital; Radiation dosage; Radioisotopes.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Representação do campo de radiação existente no entorno do paciente após administração de radiofármacos.....	25
Figura 2. Esquema adotado para o monitoramento de pacientes.....	43
Figura 3. Variação da taxa de dose apresentada por pacientes radioativos. Pontos monitorados e estimativa pós alta do Setor. Onde, a área total representa a dose efetiva acumulada.....	45
Figura 4. Gráfico representativo da estimativa de dose efetiva acumulada oferecida pelos pacientes à terceiros.....	48
Figura 5. Visão do <i>software</i> OLINDA/EXM com dosimetria interna de um paciente submetido à cintilografia óssea – ^{99m}Tc -MDP.....	51
Figura 6. Representação do ajuste de uma função exponencial simples para os valores de taxa de dose medidos no paciente P1, visando calcular a meia-vida efetiva do radiofármaco em seu organismo.....	55
Figura 7: Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco ^{99m}Tc -MDP para o exame de cintilografia óssea. Paciente P1.....	57
Figura 8: Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos à cintilografia óssea com ^{99m}Tc -MDP no momento da liberação da clínica de Medicina Nuclear.....	57
Figura 9. Representação do ajuste de uma função exponencial simples para os valores de taxa de dose medidos no paciente P1, visando calcular a meia-vida efetiva do radiofármaco em seu organismo.....	60
Figura 10: Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco ^{18}F -NaF para avaliação óssea (PET/CT), Paciente P1.....	62

Figura 11: Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos ao PET/CT ósseo com o radiofármaco $^{18}\text{F}\text{-NaF}$	62
Figura 12. Representação do ajuste de uma função exponencial simples para os valores de taxa de dose medidos para o paciente P1, visando calcular a meia-vida efetiva do radiofármaco em seu organismo.....	67
Figura 13: Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco $^{99\text{m}}\text{Tc-DMSA}$ para o exame de cintilografia renal estática, Paciente P1.....	67
Figura 14: Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos ao PET/CT ósseo com o radiofármaco $^{99\text{m}}\text{Tc-DMSA}$	68
Figura 15. Representação do ajuste de uma função exponencial simples para os valores de taxa de dose medidos para o paciente P1, visando calcular a meia-vida efetiva do radiofármaco em seu organismo.....	72
Figura 16: Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco $^{99\text{m}}\text{Tc-DTPA}$ para cintilografia renal estática, Paciente P1.....	72
Figura 17: Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos a cintilografia renal estática com o Radiofármaco $^{99\text{m}}\text{Tc-DTPA}$	73
Figura 18. Representação do ajuste de uma função exponencial simples para os valores de taxa de dose medidos à 2 metros para o paciente P1, visando calcular a meia-vida efetiva do radiofármaco em seu organismo.....	75
Figura 19: Ilustração da variação da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco $^{99\text{m}}\text{Tc-MIBI}$ para o exame de cintilografia do miocárdio. Paciente P1.....	78
Figura 20: Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos a cintilografia do miocárdio com $^{99\text{m}}\text{Tc-MIBI}$ no momento da	

liberação da clínica de Medicina Nuclear, considerando as duas administrações 78

Figura 21. Representação do ajuste de uma função exponencial simples para os valores de taxa de dose medidos para o paciente P1, visando calcular a meia-vida efetiva do radiofármaco em seu organismo..... 82

Figura 22: Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ para cintilografia cerebral, Paciente P1..... 82

Figura 23: Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos a cintilografia cerebral com $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ 83

Figura 24. Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ para cintilografia de corpo total, Paciente P1..... 87

Figura 25. Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos a cintilografia de corpo total com $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ 88

Figura 26. Representação do ajuste de uma função exponencial simples para os valores de taxa de dose medidos para o Paciente P1, visando calcular a meia-vida efetiva do radiofármaco $^{18}\text{F-FDG}$ em seu organismo 92

Figura 27: Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco $^{18}\text{F-FDG}$ para o exame diagnóstico com o PET/CT, Paciente P1..... 93

Figura 28: Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos ao PET/CT oncológico com o radiofármaco $^{18}\text{F-FDG}$ 93

Figura 29. Variação da taxa de dose a 1,0 m de distância considerando a meia-vida efetiva para um paciente submetido ao exame de PET/CT com o radiofármaco $^{18}\text{F-FDG}$. e estimativa de eliminação pós alta do Setor..... 100

Figura 30: Variação da taxa de dose a 1,0 m de distância considerando a meia-vida efetiva para um paciente submetido ao exame de PET/CT com o radiofármaco $^{18}\text{F-FDG}$ 100

FDG. e estimativa de eliminação pós alta do Setor.....	100
---	-----

Figura 31. Comparação da estimativa de dose acumulada a 1,0 e 2,0 metros de distância no período de 24 horas após a liberação da clínica de Medicina Nuclear para todos os procedimentos estudados.....	101
---	-----

Figura 32. Diferença de eliminação entre meia-vida física e meia-vida efetiva, neste caso para procedimentos de envolvendo o radiofármaco ^{18}F -FDG.....	102
--	-----

Figura 33. Estimativa da variação da taxa de dose apresentada pelos pacientes radioativos no período de 24 horas iniciais logo após a liberação da clínica de Medicina Nuclear.....	103
---	-----

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1. Acontecimentos históricos após o descobrimento dos raios X.....	19
Tabela 2. Características físicas de alguns radioisótopos utilizados em Medicina Nuclear.....	21
Tabela 3. Características de alguns exames diagnósticos realizados na Medicina Nuclear.....	29
Tabela 4. Doses de radiação recebida por pacientes submetidos a procedimentos diagnósticos com radiações ionizantes.....	36
Tabela 5. Limites de dose estabelecidos pela CNEN no Brasil.....	37
Tabela 6: Exemplos de cuidados de radioproteção associados às terapias com ^{131}I	38
Tabela 7. Relação de procedimentos diagnósticos, radiofármaco utilizado e quantidade de pacientes estudados em cada grupo.....	52
Tabela 8. Taxa de dose inicial e final monitorada em pacientes submetidos à cintilografia óssea ($^{99\text{m}}\text{Tc-MDP}$).....	54
Tabela 9. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida efetiva e taxa de dose medida à 2 m para pacientes submetidos a exames de cintilografia óssea com $^{99\text{m}}\text{Tc-MDP}$	56
Tabela 10. Estimativa de dose interna – cintilografia com $^{99\text{m}}\text{Tc} - \text{MDP}$	58
Tabela 11. Taxa de dose inicial e final monitorada em pacientes submetidos ao exame de PET/CT ósseo ($^{18}\text{F-NaF}$).....	59
Tabela 12. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida efetiva e taxa de dose medida à 2,0 m para pacientes submetidos a exames de PET/CT ósseo ($^{18}\text{F-NaF}$).....	61

Tabela 13. Estimativa de dose interna – PET/CT ósseo com o ^{18}F -NaF.....	63
Tabela 14 Taxa de dose inicial e final monitorada em pacientes submetidos ao exame de cintilografia renal estática ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ – DMSA).....	65
Tabela 15. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida efetiva e taxa de dose medida à 2,0 m para pacientes submetidos a exames cintilografia renal estática ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DMSA).....	66
Tabela 16. Estimativa de dose interna – Cintilografia renal estática com $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DMSA.....	68
Tabela 17. Taxa de dose inicial e final monitorada em pacientes submetidos ao exame de cintilografia renal dinâmica ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ - DTPA).....	70
Tabela 18. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida efetiva e taxa de dose medida à 2,0 m para pacientes submetidos a exames de cintilografia renal dinâmica ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DTPA).....	71
Tabela 19. Estimativa de dose interna – Cintilografia renal dinâmica com $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DTPA	73
Tabela 20. Taxa de dose inicial e final monitorada em pacientes submetidos à cintilografia do miocárdio ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI).....	76
Tabela 21. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida efetiva e taxa de dose medida à 2 m para pacientes submetidos a exames de cintilografia do miocárdio com $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI	77
Tabela 22. Estimativa de dose interna – Cintilografia do miocárdio com $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI	79
Tabela 23. Taxa de dose inicial e final monitorada em pacientes submetidos ao exame de cintilografia cerebral ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ - MIBI).....	80
Tabela 24. Meia-vida efetiva e taxa de dose oferecido por pacientes à 2 metros durante a estadia no Serviço de Medicina Nuclear quando submetidos a exames de cintilografia cerebral com $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI.....	81

Tabela 25. Estimativa de dose interna – Cintilografia cerebral com o ^{99m}Tc – MIBI	83
Tabela 26. Taxa de dose inicial e final monitorada de pacientes submetidos ao exame de cintilografia de corpo total (^{99m}Tc - MIBI).....	85
Tabela 27. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida e taxa de dose medida à 2,0 m para pacientes submetidos a exames de cintilografia de corpo inteiro com ^{99m}Tc -MIBI	86
Tabela 28. Estimativa de dose interna – cintilografia de corpo total - ^{99m}Tc -MIBI.....	88
Tabela 29. Taxa de dose inicial e final monitorada em pacientes submetidos ao exame diagnóstico com o ^{18}F -FDG - PET/CT.....	90
Tabela 30. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida efetiva e taxa de dose medida à 2,0 m para pacientes submetidos ao exame diagnóstico com o ^{18}F -FDG-PET/CT.....	91
Tabela 31. Estimativa de dose interna PET/CT oncológico com o ^{18}F - FDG.....	94
Tabela 32. Taxa de dose inicial e final (48 horas decorridas da administração do radiofármaco) monitorada em pacientes submetidos ao procedimento de pesquisa de corpo inteiro (^{131}I -Nal).....	95
Tabela 33. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida efetiva e taxa de dose medida à 2,0 m para pacientes submetidos a exames de pesquisa de corpo inteiro (^{131}I -Nal)	96
Tabela 34. Estimativa de dose interna – PCI pré terapia - ^{131}I -Nal.....	98
Tabela 35. Potencial de dose efetiva acumulada oferecida à terceiros durante o período de 24 horas.....	99

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Meia-vida física.....	23
Equação 2. Meia-vida efetiva.....	23
Equação 3. Ajuste da função exponencial para meia-vida efetiva.....	46
Equação 4. Representação para meia-vida efetiva.....	46
Equação 5. Tempo de residência	49
Equação 6. Tempo de residência	49
Equação 7. Correção para massa de medula óssea	50

SUMÁRIO

	Páginas
1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Evolução da Radiologia	18
1.2 Desenvolvimento da Medicina Nuclear.....	20
1.3 Medicina Nuclear e exposição à radiação.....	23
1.4 Procedimentos diagnósticos em Medicina Nuclear.....	28
1.5 Efeitos biológicos das radiações ionizantes	32
1.6 Potencial de exposição fornecido por pacientes radioativos e limites de dose.....	33
1.7 Cuidados de radioproteção com pacientes radioativos.....	37
1.8 Justificativa do estudo.....	39
2. OBJETIVOS.....	40
2.1 Objetivos gerais.....	40
2.2 Objetivos específicos.....	40
3. METODOLOGIA.....	41
3.1 Pacientes e procedimentos diagnósticos.....	41
3.2 Do monitoramento da taxa de dose dos pacientes	42
3.3 Meia-vida efetiva	45
3.4 Cálculos de dose efetiva acumulada e cuidados de radioproteção.....	47
3.5 Dosimetria interna.....	49
4. RESULTADOS.....	52
4.1 Cintilografia óssea - ^{99m}Tc - MDP.....	53
4.1.1 Dosimetria interna – cintilografia óssea (^{99m}Tc -MDP).....	58
4.2 Cintilografia Óssea- PET/CT – ^{18}F -NaF.....	58
4.2.1 Dosimetria Interna - Cintilografia Óssea- PET/CT – ^{18}F -NaF.....	63
4.3 Cintilografia Renal Estática - ^{99m}Tc - DMSA.....	63
4.3.1 Dosimetria Interna - Cintilografia Renal Estática - ^{99m}Tc - DMSA.....	68
4.4 Cintilografia Renal Dinâmica - ^{99m}Tc - DTPA.....	69

4.4.1 Dosimetria interna - Cintilografia Renal Dinâmica - ^{99m}Tc -DTPA.....	73
4.5 Cintilografia do Miocárdio - ^{99m}Tc - MIBI.....	74
4.5.1 Dosimetria interna - Cintilografia do Miocárdio - ^{99m}Tc - MIBI.....	79
4.6 Cintilografia Cerebral – ^{99m}Tc – MIBI.....	79
4.6.1 Dosimetria Interna – Cintilografia Cerebral - ^{99m}Tc – MIBI.....	83
4.7 Cintilografia de Corpo Total – ^{99m}Tc – MIBI.....	84
4.7.1 Dosimetria Interna - Cintilografia de corpo total - ^{99m}Tc – MIBI.....	88
4.8 PET/CT - ^{18}F -FDG.....	89
4.8.1 Dosimetria Interna - PET/CT - ^{18}F -FDG.....	94
4.9 Pesquisa de Corpo Inteiro (Pré Terapia)- ^{131}I	94
4.9.1 Dosimetria Interna - Pesquisa de Corpo Inteiro (Pré Terapia) - ^{131}I	98
4.10 Dose efetiva acumulada	98
5. TRABALHOS FUTUROS	109
6. CONCLUSÕES	110
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
8. ANEXO A	116

1 INTRODUÇÃO

1.1 Evolução da Radiologia

Desde a descoberta dos raios X por Wilhelm K. Röntgen em 1895, a utilização da radiação ionizante para diversas finalidades cresce de acordo com os avanços científicos e tecnológicos. O uso dessas radiações em diversos setores sociais, como médico e científico, também foi implementado com base em descobertas como a radioatividade natural em 1896 por Antoine Henry Becquerel e da separação química do radioisótopo rádio por Marie Curie em 1903. Tais contribuições foram de extrema importância para o desenvolvimento da radiologia como um todo, contemplando aqui áreas como a Radiografia, Tomografia, Radioterapia e Medicina Nuclear, Tabela 1^[1].

A radiação ionizante, utilizada nas áreas acima citadas, pode ser produzida artificialmente por equipamentos médicos, tais como tomógrafos, ou provenientes de radioisótopos empregados nessas práticas. Radioisótopos são átomos instáveis, ou seja, átomos que possuem um desequilíbrio nuclear entre o número de prótons e o número de nêutrons que os compõem, ou átomos que apresentam energia nuclear em estado excitado e que, devido esta natureza, alcançam a estabilidade nuclear pela desintegração radioativa, emitindo neste processo radiação em forma de partículas e, ou, ondas eletromagnéticas^[2].

Tanto as partículas quanto as ondas eletromagnéticas emitidas no processo de desintegração nuclear podem interagir com o tecido biológico do corpo humano, variando sua interação de acordo com a densidade do tecido irradiado e as características das partículas e ondas eletromagnéticas emitidas e suas energias. Em procedimentos diagnósticos em que se emprega raios X, a interação entre este tipo de radiação e o corpo humano resulta em uma interação tecidual diferencial, uma vez que os tecidos biológicos apresentam diferentes densidades, e assim, os raios X ao atravessarem o corpo humano, podem gerar uma imagem em um receptor, chamada de imagem por transmissão^[3]. Já na Medicina Nuclear, o paciente é o próprio emissor da radiação ionizante, uma vez que esta técnica implica na prévia administração de substâncias radioativas a ele, desta forma, a produção

da imagem do paciente para finalidades diagnósticas é chamada de imagem por emissão.

Tabela 1. Acontecimentos históricos após o descobrimento dos raios X.

Ano	Acontecimentos históricos
1895	Descoberta dos raios X
1896	Descoberta da radioatividade natural
1903	Isolamento do elemento rádio e polônio e descoberta da radiação gama
1903	Confirmação da desintegração radioativa
1910	Inclusão e uso de materiais radioativos na Medicina e Indústria
1911	Projetos para a utilização de traçadores radioativos
1926	Uso da radiação ionizante para tratamento de câncer
1934	Divulgação do primeiro radioisótopo artificial e primeira fissão do urânio com nêutrons
1936	Utilização de radioisótopos produzidos em ciclotron para terapias
1939	Einstein divulga carta sobre possibilidade de construção de bomba atômica
1942	Início da construção de um reator nuclear nos EUA
1951	Criação do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) motivada pela era nuclear
1956	Primeiro reator de pesquisa no hemisfério Sul é instalado no Instituto de Energia Atômica (IPEN - SP)
1957	Criação da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA)

O exame diagnóstico com raios X em formato 2D já foi considerado de alta complexidade em décadas passadas. No entanto, com os avanços da Medicina, outras modalidades diagnósticas mais específicas e consideradas também mais complexas surgiram, tais como a tomografia computadorizada (CT, 3D), a ressonância magnética e os exames diagnósticos em Medicina Nuclear, tais como as cintilografias e as tomografias por emissão de pósitrons^[3,4]. A possibilidade do uso de radioisótopos na Medicina trouxe diversos avanços e conquistas no decorrer dos anos; alguns destes avanços podem ser observados na própria Tabela 1.

1.2 Desenvolvimento da Medicina Nuclear

Após as grandes descobertas envolvendo a radiação ionizante, identificou-se que certos isótopos em sua forma instável, radioisótopos, quando marcados com fármacos específicos, poderiam servir para gerar imagens funcionais estáticas ou dinâmicas de órgãos internos de pacientes utilizando equipamentos adequados ou até mesmo servirem como elementos terapêuticos.

Nesse contexto, a Medicina Nuclear geralmente faz uso da marcação química de fármacos com radioisótopos para a produção de imagens diagnósticas ou com função terapêutica. O primeiro uso de radioisótopos em seres humanos ocorreu em 1927, após os pesquisadores Blumgart e Yens administrarem uma solução salina marcada com radônio para medirem a circulação sanguínea em seres humanos^[5]. Em 1938, estudos contribuíram para a inserção do uso do radioisótopo ^{131}I (iodo-131) para avaliar funções da glândula tireoide^[6].

Os procedimentos diagnósticos em Medicina Nuclear tiveram uma maior difusão após a introdução do radioisótopo $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (tecnécio-99 metaestável) por Paul Harper e colaboradores^[7]. Esse radioisótopo é produzido por um gerador de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, cujo $^{99\text{m}}\text{Tc}$ é obtido pela desintegração física do radioisótopo ^{99}Mo . O $^{99\text{m}}\text{Tc}$ possui uma meia-vida física de aproximadamente 6 horas e emite majoritariamente fótons (ondas eletromagnéticas) com energia de 140 keV. Possui grande afinidade química com a maioria dos fármacos utilizados em Serviços de Medicina Nuclear e é compatível com equipamentos convencionais, gama-câmaras, utilizados nesta especialidade médica, bem como com equipamentos da modalidade SPECT (*single photon emission computed tomography*)^[1,2,7].

No Brasil, a Medicina Nuclear teve seu início em meados da década de 50 quando foi criado o Instituto de Energia Atômica (IEA) com parceria do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) e da Universidade de São Paulo (USP). Atualmente, o IEA se chama Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), o qual teve monopólio da produção de radioisótopos e radiofármacos com parceria da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) de 1956 até 2006^[8].

Em 1959, a então IEA, após diversos estudos, iniciou a produção e distribuição do radioisótopo ^{131}I para aplicações clínicas. No entanto, somente a

partir de 1963 a IEA em conjunto com a CNEN passou a produzir e comercializar continuamente produtos e radioisótopos com finalidades diagnósticas e terapêuticas, o que permitiu avançar com a modalidade de Medicina Nuclear no Brasil a partir desse momento^[8].

Passado esses avanços iniciais, diversos estudos foram e continuam sendo realizados visando identificar e produzir novos radioisótopos capazes de serem empregados na área clínica. Entretanto, existe preferência para o uso de radioisótopos que apresentam meia-vida física curta visando reduzir as exposições dos pacientes e de terceiros envolvidos nos procedimentos de Medicina Nuclear, sejam eles diagnósticos ou terapêuticos. Hoje em dia, existem diversos radioisótopos liberados por órgãos governamentais da saúde para uso clínico tanto para diagnósticos quanto terapias, Tabela 2.

Tabela 2. Características físicas de alguns radioisótopos utilizados em Medicina Nuclear.

Radioisótopo	Meia-vida física [h]	Partícula emitida na desintegração radioativa	Energia dos fótons [keV]
^{18}F	1,83	Pósitron/fótons	511
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6	Fótons	140
^{131}I	192	Partículas beta/fótons	364
^{67}Ga	78	Fótons	93,185,300,394
^{111}In	67	Fótons	171,245
^{201}Tl	72	Fótons	135,167
^{11}C	0,4	Pósitron/fótons	511

O radioisótopo mais utilizado em procedimentos diagnósticos é o $^{99\text{m}}\text{Tc}$. No Brasil, o IPEN é o único órgão responsável pela distribuição e comercialização de geradores de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ capazes de disponibilizar o $^{99\text{m}}\text{Tc}$ para ser utilizado pelas clínicas de Medicina Nuclear espalhadas pelo país^[1,8,9].

Após a administração do radiofármaco, a distribuição *in vivo* é caracterizada pela afinidade que cada composto possui por órgãos ou tecidos do corpo humano. Por exemplo, o ^{131}I -NaI (iodeto de sódio marcado com iodo-131), na sua forma de iodeto ($^{131}\text{I}^-$), tende a ser mais captado pela glândula tireoide por possuir maior afinidade por este órgão, diferentemente do $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP (ácido

metilenodifosfônico marcado com tecnécio-99 metaestável) que após ser administrado apresenta maior afinidade por tecido ósseo^[10].

Na Medicina Nuclear, radioisótopos emissores de fótons (ou raios gama) são extremamente importantes para a área de diagnóstico, enquanto os emissores de partículas, geralmente beta, constituem a base das terapias com radiofármacos por possuírem grande poder de ionização e baixo alcance em tecido biológico, qual pode levar a um desarranjo estrutural e morte celular, resultando em um possível controle de doença. Por exemplo, a radioiodoterapia com o radioisótopo ^{131}I -NaI é empregada em tratamentos de hipertireoidismo ou terapia de câncer de tireoide, devido este elemento ser um emissor beta.

Pelo exposto, observa-se que cada radiofármaco utilizado em Medicina Nuclear possui características próprias que direcionam e diferenciam o seu uso. Ainda, antes de avaliar o uso clínico de algum radioisótopo é necessário primeiro avaliar suas características favoráveis, seja como elemento diagnóstico ou terapêutico, como, por exemplo, suas características físicas, tipo de emissão e energia, bem como o potencial de gerar doses de radiação dentro do próprio organismo dos pacientes em que se administrou o radiofármaco e também a capacidade que esse elemento administrado possui para expor outros indivíduos não envolvidos diretamente no procedimento clínico^[11].

Uma característica específica bastante útil apresentada pelos radioisótopos para serem empregados em diagnóstico ou terapia é o seu tempo de meia-vida, que pode ser dividida em três tipos distintos: meia-vida física, meia-vida biológica e meia-vida efetiva.

Meia-vida física

É definido como meia-vida física ($T_{1/2}$ físico) o período de tempo necessário para que a quantidade de átomos radioativos em uma dada amostra se reduza à metade (50%) do valor inicial. Cada radioisótopo apresenta uma meia-vida física específica. A equação matemática que representa esse parâmetro pode ser dada por:

$$T_{1/2 \text{ físico}} = \frac{\ln 2}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2 \text{ físico}}}$$

Equação 1. Meia-vida física

Sendo λ a constante de desintegração radioativa característica de cada elemento radioativo.

Meia-vida biológica

A meia-vida biológica ($T_{1/2}$ biológico) é caracterizada pelo tempo necessário para que a metade dos átomos radioativos existentes dentro de um dado órgão ou tecido biológico seja reduzida à metade do valor inicial ocasionado por processos fisiológicos naturais de eliminação do radioisótopo do órgão. Esse tempo não tem um valor exato, pois ele varia de acordo com a biocinética de cada paciente e grau de funcionalidade do órgão ou tecido em que o radioisótopo se encontra alojado^[12].

Meia-vida efetiva

A meia-vida efetiva ($T_{1/2}$ efetivo) é o tempo necessário para que a quantidade de átomos radioativos existentes em um dado órgão ou tecido biológico seja reduzida à metade (50%) do valor inicial, considerando, neste caso, o processo de desintegração física do radioisótopo e também a eliminação biológica da substância radioativa pelo órgão que o contém; portanto, é uma combinação tanto do $T_{1/2}$ físico quanto do $T_{1/2}$ biológico. A equação matemática que melhor descreve esse parâmetro pode ser dada pela equação abaixo:

$$T_{1/2 \text{ efetivo}} = \frac{T_{1/2 \text{ físico}} \times T_{1/2 \text{ biológico}}}{T_{1/2 \text{ físico}} + T_{1/2 \text{ biológico}}}$$

Equação 2. Meia-vida efetiva

1.3 Medicina Nuclear e exposição à radiação

A Medicina Nuclear se diferencia da Radiologia convencional pelo uso de substâncias radioativas para o diagnóstico e terapia de doenças. Como principais radioisótopos utilizados para a realização de exames diagnósticos temos o ^{99m}Tc , o

^{18}F (flúor-18) e o ^{131}I . Com eles se destacam os exames de cintilografia óssea, exames oncológicos e de tireoide^[1,2].

A tomografia por emissão de pósitrons (*positron emission tomography*, PET) e computadorizada (CT), PET/CT, utilizando o radiofármaco ^{18}F -FDG (fluorodeoxiglicose) é um exame diagnóstico que vem crescendo consideravelmente nas últimas décadas^[4]. Em terapias, o ^{131}I se destaca e acaba sendo o elemento mais utilizado, ocupando aproximadamente 97% de todos os procedimentos terapêuticos^[2,4].

Após a administração dos radiofármacos, seja por via intravenosa, oral ou inalatória, os pacientes permanecem radioativos por um determinado período de tempo até que todo o radiofármaco administrado seja eliminado de seus organismos. A eliminação da substância administrada acontece principalmente por excreção renal (com exceção de alguns radiofármacos), podendo demorar horas ou até dias para a sua completa eliminação.

Quando administrado com radiofármacos, o paciente apresenta um campo de radiação em seu entorno, Figura 1. A intensidade desse campo de radiação no entorno do paciente está diretamente relacionada à quantidade de substância radioativa administrada, chamada de atividade, bem como com as características físicas de cada radioisótopo utilizado, incluindo a meia-vida física, tipo de emissão radioativa e energia da radiação emitida, incluindo também, fators anatômicos específicos de cada paciente. Esse campo de radiação é formado pela pouca interação entre a radiação ionizante eletromagnética (fótons) emitida pelas substâncias radioativas administradas e o corpo humano^[1,2,4].

Figura 1. Representação do campo de radiação existente no entorno do paciente após administração de radiofármacos.

Desde que foram colocados em prática, em 1950, os exames diagnósticos em Medicina Nuclear tiveram significativos avanços tecnológicos, como, por exemplo, a inserção de exames de PET/CT^[4]; modalidade de tecnologia híbrida que permite a fusão entre o exame de tomografia convencional (CT) com a tomografia por emissão de pósitron (PET), permitindo produzir imagens morfológicas e tridimensionais dos pacientes ou órgãos em estudo. Esta modalidade de diagnóstico cresce cerca de 20% ao ano em países mais desenvolvidos economicamente^[13]. Em 2009, estimou-se a existência de 2.000 equipamentos de PET/CTs instalados nos EUA e 350 na Europa^[4]; já em 2011 estes valores ultrapassaram o número de 2.250 nos EUA, 750 na Europa e mais de 5.000 equipamentos instalados em todo o mundo, sendo assim, considerada como a modalidade diagnóstica que mais tem crescido nas últimas décadas^[14].

A América do Sul, incluindo o Brasil, ainda possui uma participação bastante tímida na realização de exames de Medicina Nuclear^[14], embora seja bastante perceptível para os profissionais da área seu gradativo crescimento. No Brasil, estima-se que o aumento no número de exames em Medicina Nuclear foi de 26,5% entre os anos de 2008 e 2012 na rede pública de atendimento de saúde (SUS)^[9]. Em uma busca realizada em outubro de 2018 no banco de dados da Comissão Nacional

de Energia Nuclear (CNEN), existiam 428 clínicas de Medicina Nuclear registradas e operantes no Brasil.

Se por um lado o crescimento da modalidade diagnóstica de Medicina Nuclear permite o atendimento de um número maior de pacientes, esse crescimento também colabora, por motivos já explicados, com um aumento gradativo da exposição à radiação, seja dos próprios pacientes quanto dos demais indivíduos da sociedade. Devido à característica radioativa, pacientes que se submetem a procedimentos de Medicina Nuclear, inevitavelmente, acabam por expor outros indivíduos e o meio ambiente às radiações ionizantes. O aumento no número de exames realizados nesta modalidade de diagnóstico por imagem possui ligação direta com o aumento das exposições de familiares, agentes de saúde e demais indivíduos da sociedade que tenham contato direto com o paciente radioativo, de acordo com registros da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA)^[15] e Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP)^[16].

Ainda, além do aumento dos exames diagnósticos em Medicina Nuclear, observa-se um aumento das exposições médicas como um todo. Os exames de PET/CT tem apresentado um crescimento exponencial, implicando também na exposição de terceiros em igual modelo de crescimento. Exames de PET apresentam potencial de exposição cerca de 10 vezes superior aquele apresentado por exames que utilizam o radioisótopo ^{99m}Tc ^[17]. Assim, torna-se visível o potencial de exposição que pacientes radioativos oferecem a outros indivíduos e para o meio ambiente, seja pela exposição ao campo de radiação emitida pelo paciente radioativo ou pela excreção dos radiofármacos administrados a eles, a qual ocorre principalmente por via renal.

Com o avanço da tecnologia na área médica, com possível redução de custos e conseqüente maior disponibilidade e acessibilidade para a população em geral, exames como cintilografias e PET/CTs tendem a ser mais realizados. Em países mais favorecidos economicamente, esse incremento de exames tem sido acompanhado pelo aumento do nível de exposição à radiação da população em geral. Por exemplo, na década de 80, a dose média de radiação recebida pela população dos EUA era de aproximadamente 3,6 mSv, já em 2006 a dose média foi estimada em 6,2 mSv^[18]. O aumento das exposições não pode ser relacionado

100% com exames praticados pela Medicina Nuclear, visto que existem outros meios de exposição à radiação ionizante, porém, o aumento na demanda de tais exames contribui significativamente para a exposição final da população. Assim, espera-se que o crescimento das exposições observado na população dos EUA também seja apreciado em outros países de acordo com a implantação e disponibilidade dessas novas tecnologias de diagnóstico médico^[19].

Em relatório publicado pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR) em 2008, a contribuição das exposições médicas na soma total de dose de radiação recebida pela população mundial passou de 15% para 48% no período compreendido entre os anos de 1980 e 2006. Houve um crescimento de 55% na dose por pessoa entre os anos de 1991 e 2007^[18].

Como já exposto, o aumento das exposições não recai somente para pacientes submetidos aos procedimentos médicos, mas também para todos os envolvidos no procedimento, como por exemplo, familiares que acompanham o paciente, agentes de saúde (tecnólogos, médicos, físicos, enfermeiros etc) e o meio ambiente em geral. O meio ambiente é afetado devido à maior parte da atividade administrada ao paciente ser excretada diretamente no sistema de coleta pública de esgoto, que então, apesar de todo o tratamento, acabam por desaguar no meio ambiente^[20,21].

Assim, com o aumento das exposições, cresce também a preocupação de entidades governamentais e comissões internacionais sobre o uso pacífico e controlado das radiações ionizantes, tais como a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) e a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP). No Brasil, o órgão que realiza as adequações das recomendações internacionais e também regulamenta o uso destas radiações no cenário brasileiro, é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

A preocupação dessas entidades, bem como as regras no uso das radiações ionizantes, está baseada nos prováveis efeitos nocivos à saúde de indivíduos expostos a doses de radiação, tais como o aparecimento de neoplasias malignas e lesões degenerativas. Assume-se que toda exposição gera um risco à saúde e que este risco torna-se mais elevado de acordo com o aumento das doses de radiação.

A idade do indivíduo no momento da irradiação e os tipos de órgãos criticamente expostos são fatores na análise de risco, embora que para o aparecimento de qualquer efeito nocivo visível uma composição de diferentes fatores físicos e biológicos sejam necessários^[22,23]. Existem lacunas a serem preenchidas quando se trata de taxas de dose emitida por pacientes radioativos, principalmente após esses pacientes serem liberados de uma clínica de Medicina Nuclear. Fatores específicos como peso, altura, dose de radiofármaco administrado, entre outros, precisam ser analisados com maior cautela, tendo em vista que tais variáveis influenciam diretamente no potencial de dose de radiação oferecido por esses pacientes radioativos a outros indivíduos.

1.4 Procedimentos diagnósticos em Medicina Nuclear

Atualmente, existem diferentes tipos de exames diagnósticos oferecidos pela Medicina Nuclear, cada qual seguindo um protocolo específico para a execução do exame. A Tabela 3 traz alguns tipos de exames realizados na Medicina Nuclear, contemplando o radioisótopo, o radiofármaco e a quantidade de atividade (MBq) habitualmente utilizada em cada procedimento. O radiofármaco consiste de uma combinação entre um componente radioativo e um componente químico, por exemplo, ^{99m}Tc – MDP ou ^{99m}Tc – DMSA, em que o ^{99m}Tc é o radioisótopo utilizado, servindo como elemento radiotraçador, e o MDP (ácido metilenodifosfônico) ou DMSA (ácido dimercaptossuccínico) é o fármaco, composto molecular que possui afinidade pelo dado órgão ou tecido que se deseja estudar. Alguns radioisótopos possuem propriedades inerentes de serem captados por órgãos ou tecidos biológicos, independentemente de estarem ligados a moléculas específicas, o que lhes conferem facilidade de uso na rotina clínica. Podemos citar como exemplos desses radioisótopos, o ^{131}I , o ^{67}Ga e o ^{201}Tl [1,12].

Tabela 3. Características de alguns exames diagnósticos realizados na Medicina Nuclear.

Procedimento	Radionuclídeo	Fármaco	Equipamento de imagem utilizado	Principal via de excreção do radiofármaco	Atividade Administrada (MBq)
Cintilografia óssea	^{99m}Tc	MDP	Gama câmara	Renal	555 - 925
Cintilografia renal estática	^{99m}Tc	DMSA	Gama câmara	Renal	74 - 222
Cintilografia renal dinâmica	^{99m}Tc	DTPA	Gama câmara	Renal	185 - 555
Cintilografia cerebral	^{99m}Tc	MIBI	Gama câmara	Hepatobiliar	~ 1110
Cintilografia de corpo total	^{99m}Tc	MIBI	Gama câmara	Hepatobiliar	~ 851
Cintilografia do miocárdio	^{99m}Tc	MIBI	Gama câmara	Hepatobiliar	Prot. dois dias: 350-700 Prot. 1 dia: 250-400 (1ª injeção)/ três vezes maior na 2ª injeção
Cintilografia óssea (PET/CT)	^{18}F	NaF	PET/CT	Renal	300 - 440
(PET/CT) Oncológico	^{18}F	FDG	PET/CT	Renal	Peso do paciente (kg) multiplicado pelo fator 0,10 - 0,15
Pesquisa corpo inteiro (PCI)	^{131}I	NaI	Gama câmara	Renal	~ 185

No procedimento de cintilografia óssea utilizando o radiofármaco ^{99m}Tc – MDP, a finalidade do exame é analisar possíveis alterações de captação do radiofármaco pelo tecido ósseo frente a um padrão normal de captação esperado, como indicativo do surgimento de fraturas, metástases ou mesmo controle ou redução de doença metastática. O paciente é administrado com o radiofármaco e aguarda por aproximadamente de 2 a 6 horas, em média 3 horas, para iniciar a aquisição da imagem. O tempo decorrido entre a administração do radiofármaco e a espera para a aquisição da imagem é necessário para que o radiofármaco

administrado seja disperso por todo o organismo e se concentre no tecido que se deseja estudar. Boa hidratação neste período também é altamente recomendável. Após a aquisição da imagem do paciente, procedimento que requer cerca de 30 minutos, ele é liberado para retornar a sua residência.

A cintilografia renal estática com o ^{99m}Tc – DMSA possui o objetivo de avaliar a função tubular e a anatomia dos rins, identificação de tumores, entre outros. Após a administração do radiofármaco, o paciente aguarda cerca de 2 até 5 horas para a aquisição de imagens, as quais são adquiridas em um período de 30 minutos. Após o período informado, o paciente geralmente é liberado do setor de Medicina Nuclear.

O procedimento de cintilografia renal dinâmica com o ^{99m}Tc – DTPA tem por objetivo avaliar o grau de funcionalidade das vias excretoras e glomerular dos rins. Possui tempo estimado de 1 hora e, neste período, o paciente é encaminhado para a sala de exames com a bexiga vazia, logo em seguida injetado com o radiofármaco e, concomitantemente, adquirindo-se imagens da região anatômica em estudo. Decorridos 30 minutos da administração do radiofármaco, é comum os pacientes serem administrados com medicações que estimulam a excreção renal, que após serem liberados para esvaziarem a bexiga retornam para a sala de exames visando adquirir imagens complementares. Em seguida a este processo, o paciente é liberado do Setor Medicina Nuclear.

A cintilografia cerebral e cintilografia de corpo total com o ^{99m}Tc – MIBI possuem metodologias semelhantes. O paciente é injetado com o radiofármaco cerca de 15 minutos antes da aquisição das imagens, tempo necessário para que haja a distribuição do radiofármaco para as áreas desejadas com um mínimo de captação em miocárdio. Após a realização do procedimento o paciente poderá ser liberado do Setor de Medicina Nuclear.

O procedimento de cintilografia do miocárdio com o ^{99m}Tc – MIBI possui diferentes protocolos de realização do exame. Há de se mencionar que o protocolo indicado no presente trabalho é o de estresse e repouso realizado em um único dia de estudo. Neste tipo de protocolo, Tabela 3, o paciente é administrado com uma dose baixa de radiofármaco e, decorridos 15 minutos da administração, é realizada a primeira aquisição de imagem sem que o paciente faça esforço, ou seja, imagem considerada de repouso. Adquirida esta primeira imagem, o paciente é novamente

injetado com uma dose de radiofármaco de aproximadamente 3 vezes o valor injetado na primeira fase (repouso), agora submetido a um teste de esforço (estresse), podendo ser produzido por corridas em uma esteira ou por aplicação de medicamentos que simule tal fase. Após realizar a fase de estresse, o paciente será encaminhado para a sala de exames e realizará novas aquisições de imagens. Decorrido esses procedimentos, que duram de 3 à 5 horas, o paciente é liberado para retornar a sua residência.

Imagens de tecido ósseo também podem ser adquiridas com equipamentos PET/CTs utilizando o radiofármaco ^{18}F -NaF, emissor de pósitron. O procedimento possui a mesma finalidade que a cintilografia óssea utilizando o $^{99\text{m}}\text{Tc}$ – MDP, podendo, nesse caso, adquirir imagens em formato 3D, o que permite uma melhor localização e visualização de lesões. Para esse procedimento, o radiofármaco é administrado ao paciente tão logo ele chegue ao Setor de Medicina Nuclear. Após a administração, deseja-se que o paciente aguarde por aproximadamente 45 minutos até que as imagens possam ser adquiridas. O tempo total do procedimento ocorre em aproximadamente 2 horas, contemplando neste período 30 minutos para a aquisição de imagens do tecido ósseo do corpo dos pacientes.

Procedimentos diagnósticos de pacientes oncológicos utilizando o ^{18}F -FDG em equipamentos PET/CTs têm a finalidade de fornecer imagens anatômicas e funcionais de pacientes, permitindo identificar melhor a localização e a atividade real do radioisótopo captada por tumores ou tecidos biológicos em estudo. Neste tipo de procedimento, é administrado ao paciente o radiofármaco ^{18}F -FDG tão logo este chegue ao Serviço de Medicina Nuclear, aguardando cerca de 30 a 50 minutos em ambiente isolado de ruído, com controle adequado de temperatura e com boa hidratação, para que, então, as imagens de corpo total possam ser adquiridas com qualidade diagnóstica. O tempo de permanência total do paciente na clínica de Medicina Nuclear é de aproximadamente 4 horas. Transcorrido este período o paciente é liberado para retornar a sua residência.

Para o procedimento de pesquisa de corpo inteiro (PCI - Pré dose ou PCI diagnóstica) com o radiofármaco ^{131}I -NaI, administra-se ao paciente por via oral uma pequena quantidade do radiofármaco e, em seguida, o paciente é liberado para retornar para sua residência, sendo agendada a aquisição das imagens em 24 ou 48

horas após a administração do material radioativo. Geralmente este procedimento é realizado para avaliar a presença de tecidos iodo concentrantes, como, por exemplo, restos de tecidos tireoidianos ou extensão de uma doença metastática originada, principalmente, por câncer diferenciado de tireoide.

1.5 Efeitos biológicos das radiações ionizantes

Após a descoberta dos raios X e também da radioatividade natural, foram observados efeitos nocivos ao tecido humano decorrente da exposição à radiação ionizante. Os primeiros efeitos foram observados e estudados pelos pesquisadores Thomas Edison, Willian J. Morton e Nikola Tesla. Observou-se que, por exemplo, após o contato com raios X ou substâncias radioativas, irritabilidade em pele e em globo ocular poderia ser produzida^[24], isto como consequência de uma série de processos que ocorrem após o organismo ser irradiado.

Os efeitos biológicos originados pela radiação ionizante são divididos em quatro fases distintas, são elas: efeitos físicos, químicos, biológicos e orgânicos. Do efeito físico, após a exposição à radiação ionizante, os locais irradiados acabam concentrando um número maior de elétrons e íons livres (ionizações) produzidos pela quebra de ligações químicas. Para radiações do tipo raios X e gama, as ionizações ocorrem de forma mais distribuída na área irradiada devido a pouca interação que este tipo de radiação possui com o tecido biológico, contribuindo para o seu alto poder de penetração. Já para a radiação do tipo beta, portanto, particulado, existe uma maior interação entre este tipo de radiação e o tecido biológico, o que gera ionizações de forma mais concentrada nos milímetros de tecido que essas partículas conseguem penetrar de acordo com a energia que elas carregam.

No efeito químico, após a irradiação dos átomos e moléculas que compõem o tecido, o microambiente irradiado procura se estabilizar, provocando, para isto, diferentes reações químicas visando a produção de moléculas mais estáveis. Um exemplo bastante explorado desse processo é a radiólise da água, em que a água, após sofrer interação com a radiação ionizante, decompõe-se quimicamente.

Os sintomas físicos produzidos pela irradiação começam a ser visíveis na fase biológica, podendo se apresentar até mesmo anos após a irradiação. No

entanto, se a quantidade de efeitos biológicos no corpo humano for pequena, o organismo pode se recuperar naturalmente^[24]. Os efeitos orgânicos estão diretamente ligados com a quantidade de efeito biológico produzido no tecido irradiado, onde, a depender da dose de radiação recebida pelo tecido, esta exposição pode levar a um desequilíbrio no órgão ou corpo do indivíduo irradiado, fazendo com que eles funcionem de forma inadequada e conduzindo ao aparecimento de doenças ^[1, 24, 25].

Ainda, com relação aos efeitos biológicos e de acordo com as doses de radiação que os indivíduos são expostos, esses efeitos podem ser divididos em duas principais categorias: efeitos estocásticos e determinísticos. O efeito estocástico é diretamente proporcional à dose de radiação recebida e é mensurado em termos de probabilidade, ou seja, são efeitos que podem ou não ocorrer, como, por exemplo, a indução de tumores por doses baixas de radiação (< 200 mSv). Já nos efeitos determinísticos existe uma relação direta e bem conhecida sobre as doses de radiação e o surgimento de algum efeito biológico visível. Podemos citar, como exemplos, o surgimento de eritema e descamação seca em pele com doses de 3 a 5 Gy, com sintomas visíveis após três semanas da irradiação; descamação úmida em pele com surgimento de bolhas para doses absorvidas acima de 20 Gy, decorridas quatro semanas da irradiação, bem como necrose tecidual com doses acima de 50 Gy em igual período de tempo de latência^[24,25].

1.6 Potencial de exposição fornecido por pacientes radioativos e limites de dose

Alguns estudos têm contribuído para avaliar a diferença entre a capacidade de exposição de fontes radioativas pontuais e a de pacientes radioativos. O pesquisador Yi com a ajuda de colaboradores, identificaram que pacientes radioativos podem apresentar taxas de exposição com valores de até 73%, 50% e 60% inferiores às aquelas apresentadas, respectivamente, por fontes pontuais de ¹³¹I, ¹⁸F e ^{99m}Tc^[26]. Willegaignon e colaboradores identificaram semelhante diferença para o radioisótopo ¹³¹I, além de estudar a variação da taxa de exposição proveniente de pacientes ao longo do tempo após a incorporação deste radioisótopo em procedimentos terapêuticos^[27]. Estudos da variação da taxa de exposição apresentada por pacientes em exames diagnósticos também foram realizados por

Kim e colaboradores^[28], os quais verificaram uma redução de aproximadamente 70% na taxa de exposição apresentada por pacientes radioativos decorridos 90 minutos da administração do radioisótopo ^{18}F , 200 minutos da administração do $^{99\text{m}}\text{Tc}$ para cintilografia óssea e 30% decorridos 250 minutos da administração do ^{201}Tl para cintilografia cardíaca, isto quando comparadas com as taxas de exposição apresentadas pelos pacientes radioativos logo após a incorporação dos radioisótopos.

Os dados apresentados acima servem para ilustrar a diferença entre as taxas de exposição apresentadas por pacientes radioativos e aquelas provenientes de fontes teóricas, cuja diferença não deveria ser desconsiderada durante a elaboração de cuidados de radioproteção. Pois, ao se considerar a taxa de exposição real proveniente de pacientes e sua variação ao longo do tempo, cuidados de radioproteção com pacientes radioativos poderiam ser mais flexíveis e menos restritivos. Um exemplo desta flexibilidade de cuidados de radioproteção pode ser observado nos estudos realizados por Willegaignon e colaboradores, onde, ao se considerar a taxa de exposição real apresentada por pacientes tratados com ^{131}I , demonstra-se a possibilidade de realizar este tipo de terapia em regime domiciliar e não de internação hospitalar obrigatória^[31-33]. Isto permitiria conduzir as terapias de forma mais humanizada e, ao mesmo tempo, reduzir custos associados às internações de pacientes.

Diante do exposto, torna-se clara a necessidade de se avaliar o potencial de exposição oferecido por pacientes radioativos a outros indivíduos durante a realização de procedimentos diagnósticos em Medicina Nuclear, bem como avaliar os riscos radiológicos advindos dessas exposições e, caso necessário, estabelecer cuidados de radioproteção adaptados a estes procedimentos como forma de controlar e reduzir as exposições, como bem alertado por alguns pesquisadores^[34,35].

De fato, ao longo dos anos é visível o aumento de exposição de pacientes e terceiros por procedimentos médicos utilizando radiações ionizantes. Na Tabela 4, observa-se um exemplo das doses de radiação recebidas pelos pacientes durante alguns exames radiológicos. Devido à diferença entre as técnicas diagnósticas empregadas na Radiologia e Medicina Nuclear, maiores exposições podem ser

observadas em Medicina Nuclear, sejam aquelas recebidas pelos pacientes, familiares, agentes de saúde e meio ambiente. No entanto, necessita-se compreender que pacientes não possuem limites de dose pré-estabelecidos; porém, o uso de tais fontes para pacientes precisam seguir recomendações como o princípio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), que orienta a utilização de quantidade de exposição tão baixa quanto razoavelmente exequível para aquela determinada técnica que envolve fontes de radiação. Além disso, atribui-se três princípios fundamentais para a redução de dose à terceiros, são eles: tempo, distância e blindagem.

Alguns trabalhos têm contribuído para o conhecimento das doses de radiação recebida por pacientes, agentes de saúde, familiares e indivíduos do público durante os procedimentos que são realizados em Medicina Nuclear. Por exemplo, Barlett estimou uma dose de 80 μSv para agentes de saúde e 100 μSv para indivíduos do público quando pacientes são, respectivamente, atendidos em Unidades de Terapia Intensiva (UTIs) e transportados da unidade de saúde até suas residências^[34]. Barreto e colaboradores estimaram uma dose média de 270 μSv para familiares de pacientes em ambiente hospitalar, 290 μSv para mães de pacientes pediátricos e até 280 μSv para diferentes ambientes dentro de um Serviço de Medicina Nuclear^[36]. Khanal e colaboradores estimaram uma taxa de dose de 234 $\mu\text{Sv/h}$ ao redor de pacientes submetidos a exames de cintilografia renal, cuja taxa de dose poderia ser recebida por qualquer indivíduo que permanecesse nas proximidades desses pacientes^[38]. Gomez-Palacios e colegas procuraram avaliar a dose recebida por agentes de saúde, demais pacientes e acompanhantes baseada na taxa de exposição apresentada por pacientes radioativos submetidos a exames de cintilografia cardíaca, pulmonar e óssea, chegando a valores da ordem de 500 μSv durante a realização desses procedimentos^[37].

Tabela 4. Doses de radiação recebida por pacientes submetidos a procedimentos diagnósticos com radiações ionizantes.

Procedimento Diagnóstico	Dose (mSv)
RX tórax (AP)	0,02
Mamografia	0,02
Panorâmica (dentes)	0,09
PET cerebral	1,0
Cint. óssea ^{99m}Tc -MDP	4,2
Cint. renal ^{99m}Tc -DTPA	3,6
CTtTórax	8,0
CT abdômen	10,0
PET oncológico	14,0
PET/CT oncológico	25,0

De acordo com as recomendações internacionais da ICRP, IAEA e nacionais como CNEN, o limite de dose para indivíduos do público é de 1 mSv/ano e o valor de dose para a otimização da radioproteção é de 300 μSv . Considerando estes dois limites de dose, é possível afirmar que os valores de exposição apresentados pelos pesquisadores citados não são desprezíveis do ponto de vista da radioproteção. Contudo, também não é incomum encontrar agentes de saúde em Serviços de Medicina Nuclear, recebendo doses próximas a 1 mSv/mês quando esses serviços oferecem exames de PET/CT, e que somados ao longo dos 12 meses, pode se aproximar do limite de dose anual estabelecido pelas agências ICRP, IAEA e CNEN, que é de 20 mSv/ano, Tabela 5^[22]. Vale ressaltar que para familiares que acompanham pacientes, as doses precisam ser as menores possíveis e dentro do patamar aceitável de 5,0 mSv/procedimento, bem como o controle das exposições e a manutenção dos limites de dose só são obtidas por intermédio da implementação de ações de radioproteção^[15,28,29].

Tabela 5. Limites de dose estabelecidos pela CNEN no Brasil^[26]

Grandeza	Órgão	Indivíduo ocupacionalmente exposto	Indivíduo do público
Dose efetiva	Corpo inteiro	20 mSv	1 mSv
Dose equivalente	Cristalino	20 mSv	15 mSv
	Pele	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	---

1.7 Cuidados de radioproteção com pacientes radioativos

Em terapias com radiofármacos utilizando atividades superiores a 1850 MBq (50 mCi) de ^{131}I , os pacientes permanecem internados em unidades de saúde durante todo o procedimento que pode durar cerca de dois a três dias; já em procedimentos diagnósticos, os pacientes permanecem dentro do setor de Medicina Nuclear por algumas horas até a completa realização do exame. Com isso, vemos que os agentes de saúde e acompanhantes dos pacientes são os indivíduos mais expostos ao campo de radiação emitida pelo paciente, entretanto, pacientes radioativos ao serem liberados para retornar às suas residências também podem expor outros indivíduos, tais como, familiares, co-habitantes, amigos e também colegas no mesmo ambiente de trabalho^[29]. Visando controlar e reduzir as exposições ao mínimo possível, cuidados de radioproteção são geralmente requeridos com tais pacientes.

Cuidados de radioproteção com pacientes radioativos são estabelecidos tendo por base estudos dosimétricos em que se procura avaliar o potencial de exposição que esses pacientes oferecem a outros indivíduos e ao meio ambiente, algo já bem estudado na área de terapia com radiofármacos^[26,39]. Exemplos desses cuidados podem ser observados na Tabela 6. Embora não seja consensual, existem diferentes cuidados de radioproteção associados a pacientes radioativos em procedimentos terapêuticos; no entanto, em procedimentos diagnósticos, situação em que as atividades administradas aos pacientes chegam a valores da ordem de 100 vezes menor que aquelas aplicadas em terapias, existem poucos estudos dosimétricos que permitam estabelecer cuidados de radioproteção adaptados a

esses procedimentos. A pequena quantidade de atividade administrada aos pacientes, rápida excreção do radiofármaco pelos seus organismos e inexistência de estudos que indiquem o verdadeiro potencial de exposição que esses pacientes oferecem a outros indivíduos conduzem, inevitavelmente, ao questionamento sobre a real necessidade de se atribuir cuidados de radioproteção em exames diagnósticos^[29,40]. Nesse sentido, outro ponto importante é, caso comprovado sua necessidade, por quanto tempo tais cuidados de radioproteção deveriam ser aplicados para prover segurança nesses procedimentos.

Tabela 6: Exemplos de cuidados de radioproteção associados às terapias com ¹³¹I

Cuidados de Radioproteção	Período de manutenção dos cuidados
Dormir em cama separada de familiares adultos	3 a 21 dias
Dormir em cama separada de mulheres grávidas, recém-nascidos e crianças	6 a 21 dias
Manter distância superior a 1 metro de crianças	2 a 24 dias
Manter distância de indivíduos outros que não familiares	3 a 23 dias
Evitar permanecer em locais públicos	1 a 5 dias

A CNEN exige, por meio de sua regulamentação CNEN-NN-3.05 “Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Serviços de Medicina Nuclear” ^[26], que cada Serviço de Medicina Nuclear forneça aos pacientes e a seus familiares instruções de forma escrita e verbal sobre os cuidados de radioproteção com pacientes radioativos após a administração de substâncias radioativas, independentemente se o procedimento a ser realizado seja terapêutico ou diagnóstico. Porém, como já indicado, ainda não existem estudos científicos na literatura que permitam estabelecer tais cuidados em procedimentos diagnósticos, bem como os ajustes desses cuidados de acordo com as condições clínicas, sociais e econômicas de cada paciente, algo recomendável pela ICRP^[15,32,33]. Fatores sociais e econômicos deveriam ser levados em consideração na elaboração de cuidados de radioproteção considerando as diferentes restrições econômicas enfrentadas pelos pacientes. O grau de compreensão, comprometimento, facilidade de adaptação e necessidades clínicas específicas de cada indivíduo também deveriam ser envolvidas no processo de elaboração dos cuidados individuais

considerando a heterogeneidade das condições clínicas e nível de compreensão dos diferentes pacientes atendidos diariamente por um serviço de Medicina Nuclear.

Tendo em vista que cuidados de radioproteção com fontes radioativas, incluindo aqui pacientes, são rotineiramente aplicados na vida diária de uma clínica de Medicina Nuclear, a maior preocupação em exames diagnósticos são as exposições originadas após a liberação dos pacientes pelo Setor de Medicina Nuclear para retornarem às suas residências, considerando que eles ainda possuem a capacidade de expor outros indivíduos à radiação ionizante, seja durante o transporte, dentro de suas residências e até mesmo no ambiente de trabalho.

1.8 Justificativa do estudo

O conhecimento sobre o potencial de exposição oferecido por pacientes radioativos a outros indivíduos durante a realização de exames diagnósticos em Medicina Nuclear é fator primordial para estabelecer cuidados de radioproteção com esses pacientes. Na literatura científica pouca atenção tem sido dada a este ponto, levando ao questionamento sobre a real necessidade de se atribuir tais cuidados e, caso comprovado sua necessidade, por quanto tempo eles deveriam ser aplicados. Assim, o levantamento do potencial de exposição oferecido por pacientes radioativos em procedimentos diagnósticos possibilita estabelecer cuidados de radioproteção menos restritivos, mais humanizados, além de permitir uma segurança radiológica mais efetiva e com contribuição significativa para a área de Medicina Nuclear.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Levantar o potencial de dose de radiação oferecido por pacientes radioativos quando submetidos a procedimentos diagnósticos na Medicina Nuclear por meio do monitoramento da taxa de dose e, assim, orientar cuidados de radioproteção nesses procedimentos.

2.2 Objetivos específicos

Monitorar a taxa de dose de radiação oferecida por pacientes radioativos em função do tempo decorrido após a incorporação de radiofármacos, calculando a meia-vida efetiva ($T_{1/2 \text{ efetiva}}$) de acordo com o radiofármaco administrado e seu decaimento no organismo do paciente após administrado.

Realizar a dosimetria interna para os pacientes submetidos à exames diagnósticos de acordo com a eliminação do radiofármaco administrado e características individuais dos pacientes.

Determinar o potencial de dose oferecido por pacientes radioativos a 1,0 e 2,0 metros de distância de seus organismos como base para o estabelecimento de cuidados de radioproteção em procedimentos diagnósticos.

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada no Instituto do Câncer do Estado de São Paulo (ICESP) no Setor de Medicina Nuclear com apoio do Instituto de Radiologia (INRAD) e Instituto do Coração (INCOR); todos os institutos pertencentes ao complexo do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e obteve aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa institucional (CAPPesq) sob o número 16497/2017.

3.1 Pacientes e procedimentos diagnósticos

A escolha dos procedimentos diagnósticos para compor este estudo foi estabelecida com base na demanda e disponibilidade de exames de medicina nuclear no complexo do Hospital das Clínicas. Ao todo, foram pré-selecionados 9 procedimentos diagnósticos, os quais foram: cintilografia óssea (^{99m}Tc -MDP), cintilografia óssea com PET/CT (^{18}F -NaF), cintilografia de corpo total (^{99m}Tc -MIBI), cintilografia renal estática (^{99m}Tc -DMSA), cintilografia renal dinâmica (^{99m}Tc -DTPA), cintilografia do miocárdio (^{99m}Tc -MIBI), cintilografia cerebral (^{99m}Tc -MIBI), PET/CT oncológico (^{18}F -FDG) e pesquisa de corpo inteiro (^{131}I -PCI) pré-dose. Considerando esses 9 tipos de exames, com estimativa de inclusão de 20 pacientes por exame, cerca de 180 pacientes foram acompanhados durante o procedimento diagnóstico, que se estendeu desde o momento em que o paciente foi administrado com o radiofármaco até sua liberação da clínica de Medicina Nuclear.

A atividade administrada em cada paciente foi proposta de acordo com a bula do *kit* liofilizado utilizado em cada serviço. No caso do presente estudo, todos os *kits* necessários foram produzidos pelo IPEN, seguindo as devidas recomendações para atividade administrada em cada procedimento específico.

O estudo foi composto por pacientes de ambos os sexos, homens e mulheres, com idade superior a 18 anos, sem dificuldades para urinar por vias normais de excreção. Foi considerado como critério de exclusão do estudo: pacientes internados, pacientes que utilizassem sonda vesical, pediátricos ou dialíticos. Entende-se que esses pacientes não incluídos neste trabalho, necessitariam de um

estudo mais específico e com metodologia diferente daquela adotada aqui, isto visando avaliar tanto a excreção do radiofármaco pelos seus organismos, como a redução da taxa de dose emitida por eles em função do tempo. Para fins de comparações com a literatura, quando necessário foi utilizada as medidas da homem referência (1,70 metros e 70 kg).

3.2 Do monitoramento da taxa de dose dos pacientes

Para realizar o monitoramento da taxa de dose dos pacientes, foi utilizado um detector de radiação do tipo Geiger-Müller, modelo MIR-7028, fabricante MRA-Indústria de Equipamentos Eletrônicos Ltda (Ribeirão Preto, São Paulo). O equipamento é utilizado para medidas de taxa de dose fornecida de pacientes, onde, detecta raios X e raios gama em uma faixa de radiação de fundo de até 50 mSv/h. O monitor de radiação foi previamente calibrado por empresa certificada pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) (Metrobras – Centro de Ensaios e Pesquisas em Metrologia), bem como os testes de desempenho do equipamento foram previamente realizados, dando confiabilidade de seu uso nesta pesquisa, como por exemplo o teste de reprodutibilidade realizado mensalmente com o uso de fontes seladas de controle (^{133}Ba , ^{57}Co e ^{137}Cs).

O arranjo esquemático adotado para mensurar a taxa de dose emitida pelos pacientes pode ser observado na Figura 2, onde cada paciente foi monitorado à 1,0 e 2,0 metros de distância de seus organismos, posição em pé de frente para o pesquisador e com o monitor de radiação posicionado a 1,0 metro do solo, altura das gônadas. As distâncias envolvidas foram todas medidas com uma trena com escala de centímetros.

Figura 2. Esquema adotado para o monitoramento de pacientes.

Para acompanhar a redução da taxa de dose emitida pelos pacientes e, conseqüentemente, a atividade de radiofármaco remanescente em seus organismos em função do tempo, foram realizados diversos monitoramentos dessas taxas em momentos distintos, quais foram:

1° Momento: Após a administração do radiofármaco

2° Momento: Pré-micção e pré-exame

3° Momento: Pós-micção e pré-exame

4° Momento: Pós-exame e liberação do paciente

A quantidade de monitorações poderia variar de acordo com o exame realizado e, ou, período permanecido no Setor pelo paciente radioativo.

Todas as monitorações ocorreram em uma mesma sala de administração de radiofármaco, blindada, o que possibilitou um ambiente com baixa radiação de fundo. Antecedendo cada monitoramento, foi adquirida a medida da radiação de fundo, *background radiation* (BG), da sala de monitoramento dos pacientes, isto permitindo subtrair este valor da taxa de dose adquirida dos pacientes radioativos, o que permitiu dar maior veracidade à taxa de dose real emitida por eles. A escolha da sala, em questão, ocorreu após as realizações de diversas monitorações dentro da

área da clínica de Medicina Nuclear e, então, estabelecer um local com menor nível de radiação de fundo, reduzindo, assim, interferências nas medidas radiométricas.

Para encontrar uma medida mais próxima do real, cada ponto de monitoramento, seja para a taxa de dose emitida pelo paciente ou da radiação de fundo, era composto por um conjunto de pelo menos três medidas, para as quais se calculou uma média aritmética simples e o desvio padrão para elas. Assim, as incertezas da taxa de dose foram calculadas com base no conjunto de medidas realizadas em cada momento. Já para as incertezas associadas às atividades administradas, estas foram calculadas de acordo com o resultado do teste de reprodutibilidade do medidor de atividade (curiômetro) utilizado no serviço de Medicina Nuclear.

A unidade de medida para as taxas de dose descritas neste estudo foi o microSievert por hora ($\mu\text{Sv/h}$). Informações específicas como sexo, peso (kg), altura (m), atividade administrada (MBq) de radiofármaco, tempo decorrido entre cada monitoramento (h), taxas de dose e estimativa de líquido ingerido por eles foram registradas em um formulário específico, ANEXO A, permitindo, com isto, estabelecer relações, tais como a taxa de dose por unidade de atividade administrada ($\mu\text{Sv/h.MBq}$).

A quantidade de atividade remanescente no organismo dos pacientes em função do tempo decorrido desde a administração do radiofármaco foi estimada de acordo com a taxa de dose apresentada por eles. Entendendo que esta taxa sofre fortemente a influência da excreção biológica (micção) pelo paciente. O nível de líquido ingerido, de acordo com cada protocolo de exames, possui ligação direta com a filtração glomerular no organismo do paciente, o que auxilia na eliminação da maioria dos radiofármacos do organismo por meio da micção. Com as taxas de dose monitoradas pré e pós-micção, foi possível estimar a diferença entre a atividade administrada total (100%) e aquela eliminada durante as excreções.

Cada procedimento diagnóstico possui uma dinâmica e protocolo diferenciado dos demais, o que impacta diretamente na coleta de dados, resultando em quantidades de monitoramentos diferentes de acordo com cada procedimento executado. Por exemplo, quanto maior o período que o paciente permanece no setor

de Medicina Nuclear, maior será a possibilidade de se realizar mais monitoramentos da taxa de dose apresentada por ele.

Para estimar o potencial de dose oferecido pelos pacientes a outros indivíduos, levou-se em consideração a variação da taxa de dose emitida por eles em função do tempo, exemplificada pela Figura 3. Do tempo zero, logo após a administração do radiofármaco, até o último ponto de medida, o potencial de dose foi calculado pela área sob a linha do gráfico ($\mu\text{Sv} \times \text{h}$) que, para tal, utilizou-se do software ORIGIN 8.1 - *by Originlab Corporation® EUA, 2009* - para se calcular esta área. Com base na taxa de dose fornecida por pacientes radioativos, também foi possível calcular a taxa de dose por atividade administrada ($\mu\text{Sv/h.MBq}$)

Figura 3. Variação da taxa de dose apresentada por pacientes radioativos. Pontos monitorados e estimativa pós alta do Setor

3.3 Meia-vida efetiva

Como já indicado, em cada momento de monitoramento dos pacientes, um conjunto de três medidas da taxa de dose foi adquirida, permitindo calcular uma média e um desvio padrão para elas, o que permite ter um valor mais representativo dos dados coletados. Pelo monitoramento, foi possível acompanhar a variação da

taxa de dose apresentada pelos pacientes durante toda a sua estadia dentro do Serviço de Medicina Nuclear e, com isto, estabelecer a fração de material radioativo que foi eliminada pelos seus organismos nesse período, uma vez que a taxa de dose é diretamente proporcional à quantidade de material radioativo existente dentro do organismo do paciente. Considerando a taxa de dose inicial, aquela adquirida logo após a administração do radiofármaco, como representante de 100% da atividade administrada, as taxas de dose posteriores poderiam ser facilmente relacionadas com as atividades remanescentes nos organismos dos pacientes utilizando a regra de três simples.

A meia-vida efetiva ($T_{1/2}$ efetivo) de cada radiofármaco administrado foi calculada por intermédio do ajuste de uma função exponencial simples para o conjunto de taxas de dose adquiridas de cada paciente, dada pela expressão abaixo:

$$\dot{D} = \dot{D}_o x e^{-\lambda t}$$

Equação 3. Ajuste da função exponencial para meia-vida efetiva

sendo $\dot{D}_o$ a taxa de dose inicial, $\dot{D}$ a taxa de dose final e λ a constante de redução da taxa de dose em função do tempo (t). Para a situação específica em que $\dot{D} = \frac{\dot{D}_o}{2}$, a meia-vida efetiva pode ser dada pela equação:

$$T_{1/2 \text{ efetiva}} = \frac{-0,693}{\lambda}$$

Equação 4. Representação para meia-vida efetiva

O ajuste da função exponencial para representar a variação da taxa de dose em função do tempo decorrido após a administração do radiofármaco foi feita utilizando o sistema computacional *Microsoft Office Excel® 2016 - by Microsoft®, EUA 2016*.

3.4 Cálculos de dose efetiva acumulada e cuidados de radioproteção

Após obter os dados referentes à taxa de dose oferecida por pacientes radioativos, foi possível calcular a dose efetiva acumulada atribuída a indivíduos com contado direto com o paciente radioativo após sua alta.

O cálculo foi realizado com base na taxa de dose final oferecida (média de todos os pacientes para cada tipo de exame diagnóstico), combinada com a meia-vida efetiva ($T_{1/2}$ efetivo) encontrada em cada estudo. Realizou-se uma estimativa de 24 horas de eliminação, considerando como ponto de partida a taxa de dose final do paciente no momento da liberação do Serviço de Medicina Nuclear. O cálculo pode ser representado na fórmula matemática dada em (1), mas sendo neste caso, $\dot{D}_o$ a taxa de dose final (alta do paciente da clínica de Medicina Nuclear), $\dot{D}$ a taxa de dose subsequente e λ é a constante de redução da taxa de dose em função do tempo (t).

Após a conclusão dos cálculos, foi construído um gráfico utilizando o *software* ORIGIN 8.1, onde, calculou-se a área do gráfico desde o momento da alta do Setor de Medicina Nuclear até 24 horas da liberação da clínica. A área total estabelecida pela integral da curva sob o gráfico é equivalente à dose efetiva total acumulada no período e que poderia ser fornecida à terceiros, Figura 4.

Figura 4. Gráfico representativo da estimativa de dose efetiva acumulada oferecida pelos pacientes a terceiros. Onde, a área total representa a dose efetiva acumulada.

De posse de todos os dados referentes à dose efetiva acumulada, realizou-se um estudo comparativo entre as doses levantadas neste estudo com pacientes radioativos reais e os limites de dose estabelecidos para indivíduos do público por meio das normas CNEN NN 3.01 e CNEN NN 3.05. Indicando, a depender da necessidade, cuidados de radioproteção com pacientes submetidos a procedimentos diagnósticos em Medicina Nuclear.

Caso os valores sejam aceitáveis e dentro dos limites estabelecidos em norma, constatará que tais pacientes estarão livres de quaisquer cuidados de radioproteção quando submetidos à procedimentos diagnósticos. No entanto, caso o valor estimado para as doses seja maiores que os recomendados, cuidados de radioproteção serão indicados aos procedimentos diagnósticos, sem deixar de levar em consideração as condições sociais de cada paciente e, com isto, manter as exposições sob controle e abaixo dos níveis preconizados.

3.5 Dosimetria interna

Considerando a relação entre a taxa de dose apresentada pelo paciente e a atividade residente em seu organismo, bem como sua variação ao longo do tempo após a incorporação do radiofármaco foi possível estabelecer a dose de radiação recebida pelo paciente em decorrência da exposição interna. Para estimar a dosimetria interna dos pacientes utilizou-se o programa computacional OLINDA/EXM® (*Version 1.1 Copyright Vanderbilt University, 2007*). Para tal, foi necessário estimar o tempo de residência do radiofármaco dentro do organismo de cada paciente, bem como levar em consideração seus parâmetros físicos, tais como massa corporal e gênero (masculino ou feminino).

O tempo de residência pode ser dado pela equação:

$$\sigma = \frac{\tilde{A}}{Ao},$$

Equação 5. Tempo de residência

sendo $\tilde{A}$ a atividade acumulada e Ao a atividade administrada ao paciente. A atividade acumulada pode ser calculada pela área do gráfico de atividade (MBq) vs tempo decorrido após a incorporação do radiofármaco (h). Como a estimativa da atividade residente no organismo do paciente foi estimada até o último ponto de monitoramento, portanto dificultando estimar a atividade a partir deste ponto, o tempo de residência pode ser calculado, alternativamente, a partir da meia-vida efetiva do radiofármaco no organismo do paciente, cuja fórmula matemática utilizada para tal pode ser dada pela expressão abaixo:

$$\sigma = 1,443 \times T_{1/2efetiva}$$

Equação 6. Tempo de residência

O software OLINDA/EXM® permite ajustar a massa dos órgãos dos pacientes, tendo em vista que fatores geométricos dos pacientes interferem na dosimetria interna. Neste caso, ajustes para a massa corporal total do paciente, bem como massa da medula óssea foram ajustados. Para a estimativa da massa da medula óssea, seguiu-se a fórmula matemática indicada por Willegaignon e

colaboradores, cuja fórmula parte de um valor padrão conhecido para um homem de referência com pequena variação para indivíduos do sexo feminino. Neste estudo, os valores de referência utilizados para homens e mulheres em medula óssea e peso corporal foram, respectivamente, 1,120 kg e 73,700 kg e 1,300 kg e 56,912 kg^[42]. A expressão matemática que indica a correção pode ser observada na expressão abaixo:

$$Massa\ Medula\ Óssea = Massa\ Medula\ Padrão \times \left(\frac{Massa\ Corporal\ Paciente}{Massa\ Corporal\ Padrão} \right)$$

Equação 7. Correção para massa de medula óssea

Assim, com todos os dados adquiridos, utilizou-se o *software* OLINDA/EXM® para estimar a dosimetria interna, Figura 5. Este *software* integra a atividade de determinados órgãos com captação do radiofármaco que multiplicada por fatores de dose, determinam a dose observada em qualquer órgão alvo por desintegrações ocorridas no órgão fonte.

Todos os órgãos analisados e inclusos no estudo estão de acordo com o modelo proposto pela publicação 106 da ICRP 2008^[44].

Quando adequado, todos os dados foram tratados estatisticamente, informando os valores mínimo, máximo, média e o desvio padrão (DP) para as medidas.

Figura 5. Visão do *software* OLINDA/EXM com dosimetria interna de um paciente submetido à cintilografia óssea – ^{99m}Tc -MDP.

4 RESULTADOS

Foram coletados dados de 175 pacientes com idade entre 18 e 87 anos de nove procedimentos diagnósticos diferentes executados em Medicina Nuclear. A escolha dos procedimentos para compor o estudo foi baseada na demanda e disponibilidade para a execução dos respectivos exames pelos Serviços de Medicina Nuclear do Hospital das Clínicas, os quais são: ICESP, INCOR e INRAD. Na Tabela 7 podemos observar os procedimentos diagnósticos estudados, o radiofármaco empregado em cada exame e o número de pacientes inseridos em cada grupo.

Tabela 7. Relação de procedimentos diagnósticos, radiofármaco utilizado e quantidade de pacientes estudados em cada grupo

Procedimento diagnóstico - radiofármaco	Número de pacientes
Cintilografia óssea – ^{99m}Tc – MDP	25
PET/CT ósseo – ^{18}F -NaF	21
Cintilografia de corpo total – ^{99m}Tc - MIBI	21
Cintilografia renal estática – ^{99m}Tc - DMSA	21
Cintilografia renal dinâmica – ^{99m}Tc - DTPA	22
Cintilografia do miocárdio – ^{99m}Tc – MIBI	20
Cintilografia cerebral – ^{99m}Tc – MIBI	5
PET/CT oncológico – ^{18}F – FDG	20
Pesquisa de corpo inteiro (PCI) – ^{131}I -NaI	20
Total de pacientes estudados	175

Devido ao campo de radiação existente no entorno do paciente após a incorporação do radiofármaco, foi possível identificar o potencial de dose apresentado por eles a outros indivíduos tendo por base a taxa de dose emitida pelos seus organismos e sua variação ao longo do tempo. Considerando essas taxas, que foram monitoradas durante a estadia do paciente dentro da clínica de Medicina Nuclear para as realizações dos exames diagnósticos, foi possível acompanhar a biocinética de retenção e eliminação do radiofármaco administrado, bem como estabelecer a velocidade dessa excreção, a qual pode ser representada pela meia-vida efetiva do radiofármaco administrado.

Observou-se que a taxa de dose apresentada no momento da alta do paciente do Serviço de Medicina Nuclear possui relação inversa com o tempo que o paciente permanece no Setor, -quanto maior o tempo de espera dentro da clínica, menor é a taxa de dose apresentada pelo paciente no momento da alta-, bem como com a velocidade de excreção do radiofármaco representada pela meia-vida efetiva deste no organismo de cada paciente. Fatores como a quantidade de atividade administrada e o tipo de radioisótopo presente no procedimento diagnóstico também são fatores importantes e que, certamente, podem influenciar nessas taxas de dose. Assim, fatores internos e externos do paciente estão envolvidos em um maior ou menor potencial de exposição de outros indivíduos, incluindo aqui, membros familiares e demais pessoas que convivam com eles. O levantamento da biocinética do radiofármaco e o potencial de exposição que os pacientes podem oferecer a outros indivíduos são apresentados nos tópicos seguintes para os diferentes procedimentos diagnósticos estudados.

4.1 Cintilografia óssea - ^{99m}Tc - MDP

Esse grupo foi composto por 25 pacientes, os quais foram submetidos ao procedimento de cintilografia óssea com o radiofármaco ^{99m}Tc -MDP. No protocolo para o procedimento em questão, a atividade administrada não foi baseada na massa corporal (kg) do paciente, mas sim na bula oferecida pelo fabricante. A atividade administrada ($\text{MBq} \pm 1\text{DP}$, DP = Desvio Padrão) variou entre $888 \pm 4 \text{ MBq}$ e $966 \pm 5 \text{ MBq}$, resultando em uma média de $917 \pm 5 \text{ MBq}$ de atividade administrada para todos os pacientes, Tabela 8.

A taxa de dose média para todos os pacientes, medida logo após a incorporação do radiofármaco, foi de $18,32 \pm 0,13 \mu\text{Sv/h}$ a 1,0 m e $5,83 \pm 0,49 \mu\text{Sv/h}$ a 2,0 m. No momento da liberação desses pacientes da clínica de Medicina Nuclear a média da taxa de dose apresentada pelos pacientes a 1 e 2 metros foi de $5,52 \pm 0,12 \mu\text{Sv/h}$ e $1,48 \pm 0,10 \mu\text{Sv/h}$, respectivamente, o que corresponde a uma atividade de aproximadamente $232,80 \pm 0,10 \text{ MBq}$.

Uma boa hidratação faz parte do protocolo de exames de Medicina Nuclear e neste caso esses pacientes ingeriram no mínimo 250 mL de água cada um, isto

permitiu que eles permanecessem hidratados antes da realização do exame e favorecesse a excreção renal do radiofármaco.

Por meio do ajuste de uma função exponencial simples para a taxa de dose apresentada pelos pacientes em função do tempo decorrido após a administração do radiofármaco, identificou-se uma meia-vida efetiva média de $2,02 \pm 0,72$ h para todos os pacientes incluídos nesse grupo. O ajuste da função exponencial utilizada para representar os dados pode ser observado na Figura 6. Pelos cálculos, estima-se que em média esses pacientes oferecem uma taxa de dose por atividade administrada de $(6,46 \pm 0,78) \times 10^{-3}$ ($\mu\text{Sv/h}$)/MBq a 2 m durante todo o período em que os mesmos permanecem na clínica de Medicina Nuclear, Tabela 9.

Tabela 8. Taxa de dose inicial e final monitorada em pacientes submetidos à cintilografia óssea ($^{99\text{m}}\text{Tc-MDP}$)

Paciente	Sexo	Atividade administrada ($\pm 1\text{DP}$) [MBq]	Taxa de dose inicial ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]		Taxa de dose final ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]	
			1,0 m	2,0 m	1,0 m	2,0 m
P1	F	914 $\pm$ 5	18,53 $\pm$ 0,10	5,90 $\pm$ 0,01	7,52 $\pm$ 0,01	2,13 $\pm$ 0,04
P2	M	888 $\pm$ 4	22,35 $\pm$ 0,03	6,95 $\pm$ 0,02	6,35 $\pm$ 0,03	1,83 $\pm$ 0,01
P3	F	966 $\pm$ 5	17,14 $\pm$ 0,12	6,08 $\pm$ 0,10	5,87 $\pm$ 0,05	1,62 $\pm$ 0,03
P4	F	914 $\pm$ 5	18,50 $\pm$ 0,05	5,36 $\pm$ 0,15	5,35 $\pm$ 0,10	1,69 $\pm$ 0,05
P5	F	921 $\pm$ 5	16,32 $\pm$ 0,07	5,10 $\pm$ 0,05	6,17 $\pm$ 0,05	1,83 $\pm$ 0,02
P6	M	929 $\pm$ 5	21,96 $\pm$ 0,09	7,41 $\pm$ 0,08	6,25 $\pm$ 0,02	1,82 $\pm$ 0,02
P7	F	892 $\pm$ 5	17,80 $\pm$ 0,06	5,90 $\pm$ 0,04	7,88 $\pm$ 0,01	2,13 $\pm$ 0,01
P8	M	929 $\pm$ 5	18,15 $\pm$ 0,05	6,22 $\pm$ 0,07	6,15 $\pm$ 0,01	1,56 $\pm$ 0,02
P9	F	921 $\pm$ 5	17,48 $\pm$ 0,06	5,54 $\pm$ 0,08	4,65 $\pm$ 0,02	1,05 $\pm$ 0,02
P10	M	907 $\pm$ 5	15,35 $\pm$ 0,05	5,61 $\pm$ 0,07	3,14 $\pm$ 0,03	0,84 $\pm$ 0,01
P11	F	936 $\pm$ 5	17,15 $\pm$ 0,09	5,61 $\pm$ 0,21	4,15 $\pm$ 0,02	0,84 $\pm$ 0,03
P12	M	947 $\pm$ 5	20,12 $\pm$ 0,11	6,56 $\pm$ 0,12	6,12 $\pm$ 0,01	1,58 $\pm$ 0,03
P13	F	944 $\pm$ 5	18,05 $\pm$ 0,08	5,96 $\pm$ 0,04	5,68 $\pm$ 0,05	1,65 $\pm$ 0,01
P14	F	888 $\pm$ 4	19,95 $\pm$ 0,13	6,65 $\pm$ 0,10	5,48 $\pm$ 0,03	1,54 $\pm$ 0,02
P15	F	914 $\pm$ 5	17,13 $\pm$ 0,02	6,02 $\pm$ 0,11	6,25 $\pm$ 0,02	1,82 $\pm$ 0,03
P16	M	921 $\pm$ 5	18,21 $\pm$ 0,08	4,62 $\pm$ 0,10	4,25 $\pm$ 0,01	0,95 $\pm$ 0,06
P17	F	914 $\pm$ 5	17,53 $\pm$ 0,09	4,82 $\pm$ 0,11	4,69 $\pm$ 0,13	1,11 $\pm$ 0,03
P18	F	936 $\pm$ 5	18,15 $\pm$ 0,04	5,61 $\pm$ 0,09	3,95 $\pm$ 0,02	0,84 $\pm$ 0,01
P19	F	918 $\pm$ 5	20,22 $\pm$ 0,13	6,91 $\pm$ 0,07	4,95 $\pm$ 0,05	1,57 $\pm$ 0,02
P20	F	892 $\pm$ 5	18,15 $\pm$ 0,12	5,84 $\pm$ 0,11	4,12 $\pm$ 0,02	1,00 $\pm$ 0,02
P21	F	907 $\pm$ 5	18,00 $\pm$ 0,01	4,75 $\pm$ 0,10	4,59 $\pm$ 0,01	1,02 $\pm$ 0,02
P22	M	914 $\pm$ 5	17,13 $\pm$ 0,02	4,99 $\pm$ 0,08	5,78 $\pm$ 0,01	1,59 $\pm$ 0,03
P23	M	899 $\pm$ 5	19,21 $\pm$ 0,03	5,96 $\pm$ 0,20	6,87 $\pm$ 0,03	1,88 $\pm$ 0,06
P24	M	925 $\pm$ 5	18,23 $\pm$ 0,01	5,97 $\pm$ 0,13	5,52 $\pm$ 0,02	1,48 $\pm$ 0,03
P25	M	899 $\pm$ 5	17,15 $\pm$ 0,04	5,46 $\pm$ 0,07	6,13 $\pm$ 0,03	1,69 $\pm$ 0,02
Média	-	917 $\pm$	18,32 $\pm$	5,83 $\pm$	5,52 $\pm$	1,48 $\pm$

$\pm 1DP$	-	19,34	1,60	0,70	1,14	0,40
-----------	---	-------	------	------	------	------

Figura 6. Representação do ajuste de uma função exponencial simples para os valores de taxa de dose medidos no paciente P1, visando calcular a meia-vida efetiva do radiofármaco em seu organismo.

Cada paciente apresenta uma biocinética particular para o radiofármaco administrado. Notou-se que após a primeira micção, para este procedimento, diminui-se, em média, 32,82% do radiofármaco administrado. A Figura 7 representa a variação da taxa de dose, com conseqüente relação com a eliminação efetiva do radiofármaco administrado, e a Figura 8 apresenta o percentual da taxa de dose com a qual os pacientes são liberados da clínica de Medicina Nuclear em relação ao valor inicialmente medido.

Tabela 9. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida efetiva e taxa de dose medida à 2 m para pacientes submetidos a exames de cintilografia óssea com $^{99m}\text{Tc-MDP}$

Paciente	Atividade residual na liberação do paciente ($\pm 1\text{DP}$) [%]	Meia-vida efetiva ($\pm 1\text{DP}$) [h]	Taxa de dose ($\pm 1\text{DP}$) [($\mu\text{Sv/h}$) /MBq] $\times 10^{-3}$
P1	36,10 $\pm$ 0,01	3,26 $\pm$ 0,13	6,46 $\pm$ 0,15
P2	26,33 $\pm$ 0,02	0,93 $\pm$ 0,21	7,83 $\pm$ 0,24
P3	26,64 $\pm$ 0,10	2,02 $\pm$ 0,18	6,30 $\pm$ 0,23
P4	31,53 $\pm$ 0,15	2,76 $\pm$ 0,19	5,86 $\pm$ 0,31
P5	35,88 $\pm$ 0,05	3,98 $\pm$ 0,18	5,54 $\pm$ 0,21
P6	24,56 $\pm$ 0,08	1,55 $\pm$ 0,18	7,98 $\pm$ 0,18
P7	36,10 $\pm$ 0,04	2,00 $\pm$ 0,21	6,62 $\pm$ 0,15
P8	25,08 $\pm$ 0,07	2,06 $\pm$ 0,13	6,70 $\pm$ 0,28
P9	18,95 $\pm$ 0,08	1,54 $\pm$ 0,15	6,01 $\pm$ 0,23
P10	14,97 $\pm$ 0,07	1,41 $\pm$ 0,13	6,19 $\pm$ 0,29
P11	14,97 $\pm$ 0,21	1,52 $\pm$ 0,15	5,99 $\pm$ 0,31
P12	24,09 $\pm$ 0,12	2,00 $\pm$ 0,15	6,93 $\pm$ 0,32
P13	27,68 $\pm$ 0,04	2,01 $\pm$ 0,18	6,32 $\pm$ 0,18
P14	23,16 $\pm$ 0,10	1,70 $\pm$ 0,18	7,49 $\pm$ 0,21
P15	30,23 $\pm$ 0,11	2,19 $\pm$ 0,18	6,59 $\pm$ 0,26
P16	20,56 $\pm$ 0,10	1,55 $\pm$ 0,17	5,01 $\pm$ 0,21
P17	23,03 $\pm$ 0,11	2,10 $\pm$ 0,16	5,27 $\pm$ 0,15
P18	14,97 $\pm$ 0,09	1,52 $\pm$ 0,13	5,99 $\pm$ 0,15
P19	22,72 $\pm$ 0,07	1,77 $\pm$ 0,15	7,53 $\pm$ 0,20
P20	17,12 $\pm$ 0,11	1,12 $\pm$ 0,15	6,55 $\pm$ 0,21
P21	21,47 $\pm$ 0,10	1,89 $\pm$ 0,18	5,24 $\pm$ 0,15
P22	31,86 $\pm$ 0,08	2,31 $\pm$ 0,21	5,46 $\pm$ 0,18
P23	31,54 $\pm$ 0,20	2,55 $\pm$ 0,20	6,63 $\pm$ 0,23
P24	24,79 $\pm$ 0,13	1,35 $\pm$ 0,25	6,45 $\pm$ 0,21
P25	30,95 $\pm$ 0,07	3,48 $\pm$ 0,12	6,07 $\pm$ 0,18
Média $\pm$ 1DP	25,41 $\pm$ 6,50	2,02 $\pm$ 0,72	6,46 $\pm$ 0,78

Figura 7: Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco ^{99m}Tc -MDP para o exame de cintilografia óssea, Paciente P1.

Figura 8: Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos à cintilografia óssea com ^{99m}Tc -MDP no momento da liberação da clínica de Medicina Nuclear.

4.1.1 Dosimetria interna – cintilografia óssea (^{99m}Tc -MDP)

Para o procedimento em questão, a meia-vida efetiva média para todos os pacientes foi de $2,02 \pm 0,72$ h, com tempo de residência em corpo total estimado em $2,91 \pm 1,04$ h. Com base nesses dados e considerando um paciente padrão (homem padrão – 70 kg, 1,70 m), a tabela abaixo traz a estimativa de dose absorvida calculada para esse tipo de procedimento com base em dados biocinéticos reais apresentados pelos pacientes. Como já indicado, esta estimativa de dose foi realizada com o *software* OLINDA/EXM®.

Tabela 10. Estimativa de dose interna – cintilografia com ^{99m}Tc - MDP.

Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$	Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$
Adrenal	$1,77 \pm 0,63$	Tecido muscular	$1,39 \pm 0,51$
Mama	$1,07 \pm 0,38$	Ovários	$1,91 \pm 0,71$
Cérebro	$1,29 \pm 0,46$	Pâncreas	$1,89 \pm 0,70$
Vesícula biliar	$1,87 \pm 0,67$	Medula óssea	$1,42 \pm 0,53$
Intestino delgado	$1,87 \pm 0,67$	Pele	$0,97 \pm 0,36$
Intestino grosso	$1,83 \pm 0,68$	Baço	$1,63 \pm 0,60$
Coração	$1,70 \pm 0,63$	Testículos	$1,36 \pm 0,50$
Rins	$1,63 \pm 0,60$	Timo	$1,52 \pm 0,56$
Pulmões	$1,49 \pm 0,55$	Tireoide	$1,54 \pm 0,57$
Fígado	$1,65 \pm 0,61$	Bexiga	$1,77 \pm 0,66$
Útero	$1,93 \pm 0,71$	Corpo inteiro	$1,51 \pm 0,56$
Dose efetiva estimada no exame: $(1,59 \pm 0,59) \times 10^{-3}$ mSv/MBq			

4.2 PET/CT ósseo – ^{18}F -NaF

Foram analisados 21 pacientes submetidos ao exame de PET/CT ósseo com o radiofármaco ^{18}F -NaF, Tabela 11. No protocolo para o procedimento em questão, a atividade administrada foi baseada na massa corporal (kg) do paciente. A atividade administrada variou de $185,0 \pm 1,0$ MBq à $221,0 \pm 1,0$ MBq, resultando em uma média de $201,0 \pm 1,0$ MBq de atividade administrada para todos os pacientes.

A taxa de dose média inicial para todos os pacientes incluídos nesse grupo logo após a incorporação do radiofármaco foi de $20,3 \pm 12,0 \mu\text{Sv/h}$ à 1,0 m e $18,05 \pm 3,0 \mu\text{Sv/h}$ à 2 m. Após serem liberados da clínica de Medicina Nuclear, a média de taxa de dose apresentada pelos pacientes a 1,0 e 2,0 m foi de, respectivamente, $7,77 \pm 0,09 \mu\text{Sv/h}$ e $2,59 \pm 0,03 \mu\text{Sv/h}$, o que corresponde a uma atividade média de $86,65 \pm 0,10 \text{ MBq}$.

Por meio do ajuste de uma função exponencial simples para a taxa de dose apresentada pelos pacientes em função do tempo decorrido após a administração do radiofármaco, identificou-se uma meia-vida efetiva média de $1,18 \pm 0,30 \text{ h}$ para todos os pacientes incluídos nesse grupo. O ajuste da função pode ser representado pela Figura 9. Pelos cálculos, estima-se que em média esses pacientes oferecem uma taxa de dose por atividade administrada de $(29,9 \pm 0,5) \times 10^{-3} (\mu\text{Sv/h})/\text{MBq}$ durante todo período em que os mesmos permanecem na Clínica de Medicina Nuclear, Tabela 12.

Cada paciente ingeriu cerca de 1 L de água nos 50 minutos decorridos da administração do radiofármaco, tendo sua primeira eliminação após esse período. Todos os pacientes foram orientados a esvaziar a bexiga antes da realização do exame, sendo padronizada a primeira micção em 50 minutos após administração do material radioativo.

Tabela 11. Taxa de dose inicial e final monitorada em pacientes submetidos ao exame de PET/CT ósseo ($^{18}\text{F-NaF}$)

Paciente	Sexo	Atividade administrada ($\pm 1\text{DP}$) [MBq]	Taxa de dose inicial ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]		Taxa de dose final ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]	
			1,0 m	2,0 m	1,0 m	2,0 m
P1	F	$185,7 \pm 1,0$	$15,00 \pm 0,17$	$5,00 \pm 0,06$	$5,22 \pm 0,06$	$1,74 \pm 0,02$
P2	F	$201,2 \pm 1,0$	$17,41 \pm 0,20$	$5,81 \pm 0,07$	$5,31 \pm 0,06$	$1,77 \pm 0,02$
P3	M	$210,2 \pm 1,0$	$19,98 \pm 0,23$	$6,66 \pm 0,08$	$7,02 \pm 0,08$	$2,34 \pm 0,03$
P4	M	$201,2 \pm 1,0$	$20,31 \pm 0,23$	$6,77 \pm 0,08$	$9,39 \pm 0,11$	$3,13 \pm 0,04$
P5	M	$193,8 \pm 1,0$	$16,35 \pm 0,19$	$5,45 \pm 0,06$	$7,41 \pm 0,09$	$2,47 \pm 0,03$
P6	M	$185,0 \pm 1,0$	$12,03 \pm 0,14$	$4,01 \pm 0,05$	$6,57 \pm 0,08$	$2,19 \pm 0,03$
P7	F	$192,7 \pm 1,0$	$14,28 \pm 0,16$	$4,76 \pm 0,05$	$5,94 \pm 0,07$	$1,98 \pm 0,02$
P8	M	$215,3 \pm 1,0$	$20,01 \pm 0,23$	$6,67 \pm 0,08$	$9,03 \pm 0,10$	$3,01 \pm 0,03$
P9	F	$200,5 \pm 1,0$	$14,94 \pm 0,17$	$4,98 \pm 0,06$	$8,16 \pm 0,09$	$2,72 \pm 0,03$
P10	F	$207,9 \pm 1,0$	$17,64 \pm 0,20$	$5,88 \pm 0,07$	$7,47 \pm 0,09$	$2,49 \pm 0,03$
P11	M	$208,3 \pm 1,0$	$21,42 \pm 0,25$	$7,14 \pm 0,08$	$12,33 \pm 0,14$	$4,11 \pm 0,05$
P12	F	$221,6 \pm 1,0$	$24,87 \pm 0,29$	$8,29 \pm 0,10$	$10,47 \pm 0,12$	$3,49 \pm 0,04$

P13	F	198,3 ± 1,0	19,53 ± 0,23	6,51 ± 0,08	8,07 ± 0,09	2,69 ± 0,03
P14	F	185,0 ± 1,0	23,37 ± 0,27	7,79 ± 0,09	7,81 ± 0,09	2,6 ± 0,03
P15	M	232,3 ± 1,0	16,98 ± 0,20	5,66 ± 0,07	6,45 ± 0,07	2,15 ± 0,02
P16	F	190,1 ± 1,0	18,75 ± 0,22	6,25 ± 0,07	10,53 ± 0,12	3,51 ± 0,04
P17	F	190,9 ± 1,0	14,49 ± 0,17	4,83 ± 0,06	7,14 ± 0,08	2,38 ± 0,03
P18	M	203,5 ± 1,0	14,52 ± 0,17	4,84 ± 0,06	7,74 ± 0,09	2,58 ± 0,03
P19	M	210,1 ± 1,0	19,98 ± 0,17	6,66 ± 0,08	7,02 ± 0,08	2,34 ± 0,03
P20	F	192,4 ± 1,0	17,94 ± 0,23	5,98 ± 0,07	4,74 ± 0,05	1,58 ± 0,02
P21	M	201,6 ± 1,0	19,35 ± 0,22	6,45 ± 0,07	9,45 ± 0,11	3,15 ± 0,04
Média ± 1DP	-	201,0 ± 1,0	20,3 ± 0,25	18,05 ± 3,21	6,02 ± 0,8	2,48 ± 0,3

Figura 9. Representação do ajuste de uma função exponencial simples para os valores de taxa de dose medidos para o paciente P1, visando calcular a meia-vida efetiva do radiofármaco em seu organismo.

Para este procedimento, após a primeira micção, diminui-se, em média, 11,52% do radiofármaco inicialmente administrado. A Figura 10 representa a variação da taxa de dose, com consequente relação com a eliminação efetiva do radiofármaco administrado, e a Figura 11 apresenta o percentual da taxa de dose com a qual os pacientes são liberados da clínica de Medicina Nuclear em relação ao valor inicialmente medido.

Tabela 12. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida efetiva e taxa de dose medida à 2,0 m para pacientes submetidos a exames de PET/CT ósseo (^{18}F -NaF)

Paciente	Atividade residual na liberação do paciente ($\pm 1\text{DP}$) [%]	Meia-vida efetiva ($\pm 1\text{DP}$) [h]	Taxa de dose ($\pm 1\text{DP}$) [($\mu\text{Sv/h}$)/MBq] $\times 10^{-2}$
P1	34,80 $\pm$ 0,01	1,07 $\pm$ 1,0	8,1 $\pm$ 9,0
P2	30,52 $\pm$ 0,02	0,84 $\pm$ 1,3	8,6 $\pm$ 3,0
P3	35,14 $\pm$ 0,10	1,13 $\pm$ 1,4	9,5 $\pm$ 8,0
P4	46,23 $\pm$ 0,15	1,51 $\pm$ 1,0	10,1 $\pm$ 5,0
P5	45,32 $\pm$ 0,05	1,18 $\pm$ 1,0	8,4 $\pm$ 5,0
P6	84,79 $\pm$ 0,08	1,52 $\pm$ 1,4	6,5 $\pm$ 9,0
P7	41,60 $\pm$ 0,04	1,05 $\pm$ 1,2	7,4 $\pm$ 8,0
P8	45,13 $\pm$ 0,07	0,97 $\pm$ 1,0	9,3 $\pm$ 3,0
P9	54,62 $\pm$ 0,08	0,89 $\pm$ 1,0	7,4 $\pm$ 5,0
P10	42,35 $\pm$ 0,07	0,81 $\pm$ 1,2	8,5 $\pm$ 7,0
P11	57,56 $\pm$ 0,21	0,74 $\pm$ 1,5	10,3 $\pm$ 5,0
P12	42,10 $\pm$ 0,12	0,95 $\pm$ 1,3	11,2 $\pm$ 5,0
P13	41,32 $\pm$ 0,04	1,23 $\pm$ 1,0	9,8 $\pm$ 6,0
P14	33,38 $\pm$ 0,10	0,77 $\pm$ 1,3	12,6 $\pm$ 4,0
P15	62,37 $\pm$ 0,11	1,13 $\pm$ 1,0	7,3 $\pm$ 4,0
P16	56,16 $\pm$ 0,10	1,45 $\pm$ 1,4	9,9 $\pm$ 5,0
P17	54,87 $\pm$ 0,11	1,56 $\pm$ 1,3	7,6 $\pm$ 5,0
P18	53,31 $\pm$ 0,09	1,69 $\pm$ 1,2	7,1 $\pm$ 8,0
P19	35,14 $\pm$ 0,07	1,13 $\pm$ 1,4	9,5 $\pm$ 8,0
P20	51,69 $\pm$ 0,11	1,38 $\pm$ 1,5	9,3 $\pm$ 6,0
P21	48,84 $\pm$ 0,10	1,67 $\pm$ 1,0	9,6 $\pm$ 5,0
Média $\pm$ 1 SD	47,49 $\pm$ 12,33	1,18 $\pm$ 0,30	9,5 $\pm$ 10,1

Figura 10: Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco ^{18}F -NaF para avaliação óssea (PET/CT), Paciente P1.

Figura 11: Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos ao PET/CT ósseo com o radiofármaco ^{18}F -NaF.

4.2.1 Dosimetria Interna - PET/CT ósseo – ^{18}F -NaF

Para este grupo de pacientes, a meia-vida efetiva média foi de $1,18 \pm 0,30$ h, com tempo de residência em corpo total estimado em $1,70 \pm 0,43$ h. Os dados da Tabela 13 refletem a estimativa de dose interna para este tipo de radiofármaco.

Tabela 13. Estimativa de dose interna – PET/CT ósseo com o ^{18}F -NaF

Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$	Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$
Adrenal	$9,29 \pm 2,32$	Tecido muscular	$8,03 \pm 2,00$
Mama	$6,87 \pm 1,71$	Ovários	$9,87 \pm 2,47$
Cérebro	$7,35 \pm 1,84$	Pâncreas	$9,77 \pm 2,44$
Vesícula biliar	$9,77 \pm 2,44$	Medula óssea	$7,64 \pm 1,91$
Intestino delgado	$9,77 \pm 2,44$	Pele	$6,48 \pm 1,62$
Intestino grosso	$9,58 \pm 2,40$	Baço	$8,90 \pm 2,23$
Coração	$9,10 \pm 2,28$	Testículos	$8,03 \pm 2,01$
Rins	$8,90 \pm 2,23$	Timo	$8,42 \pm 2,11$
Pulmões	$8,13 \pm 2,03$	Tireoide	$8,42 \pm 2,11$
Fígado	$8,90 \pm 2,23$	Bexiga	$9,48 \pm 2,37$
Útero	$9,97 \pm 2,49$	Corpo inteiro	$8,20 \pm 2,05$
Dose efetiva estimada no exame: $(8,45 \pm 2,11) \times 10^{-3} \text{mSv/MBq}$			

4.3 Cintilografia Renal Estática - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ - DMSA

Foram analisados 20 pacientes submetidos ao exame de cintilografia renal estática com o radiofármaco $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DMSA, Tabela 14. Neste procedimento, em particular, os pacientes radioativos realizaram o procedimento diagnóstico decorrido aproximadamente 5 horas da administração do radiofármaco, assim, as monitorações ocorreram em 3 momentos distintos.

1º Momento: Após a administração do radiofármaco

2º Momento: Antecedendo a aquisição da imagem diagnóstica

3º Momento: Pós-aquisição de imagem e liberação do paciente do Serviço de

Medicina Nuclear

A atividade administrada para este procedimento variou de $159 \pm 0,8$ MBq à $221 \pm 1,1$ MBq, resultando em uma média de $192 \pm 0,8$ MBq de atividade administrada para todos os pacientes, Tabela 14.

A taxa de dose média inicial para todos os pacientes incluídos nesse grupo, logo após a incorporação do radiofármaco, foi de $16,39 \pm 1,92$ $\mu\text{Sv/h}$ a 1,0 m e $4,68 \pm 0,55$ $\mu\text{Sv/h}$ a 2,0 m. Após serem liberados da clínica de Medicina Nuclear, a média de taxa de dose a ser oferecida pelos pacientes a 1,0 e 2,0 metros foi de, respectivamente, $6,26 \pm 0,07$ $\mu\text{Sv/h}$ e $1,79 \pm 0,02$ $\mu\text{Sv/h}$. O que corresponde a uma atividade de $73,33 \pm 0,09$ MBq.

Por meio do ajuste de uma função exponencial simples para a taxa de dose apresentada pelos pacientes em função do tempo decorrido após a administração do radiofármaco, identificou-se uma meia-vida efetiva média de $4,43 \pm 0,55$ h para todos os pacientes incluídos nesse grupo. O ajuste da função pode ser representado pela Figura 12. Pelos cálculos, estima-se que em média esses pacientes oferecem uma taxa de dose por atividade administrada de $(2,45 \pm 0,3) \times 10^{-3}(\mu\text{Sv/h})/\text{MBq}$ durante todo o período em que os mesmos permanecem na clínica de Medicina Nuclear, Tabela 15.

Após as micções, diminui-se, em média, 48% do radiofármaco inicialmente administrado. A Figura 13 representa a variação da taxa de dose, com consequente relação com a eliminação efetiva do radiofármaco administrado, e a Figura 14 apresenta o percentual da taxa de dose com a qual os pacientes são liberados da Medicina Nuclear em relação ao valor inicialmente medido.

Tabela 14. Taxa de dose inicial e final monitorada em pacientes submetidos ao exame de cintilografia renal estática (^{99m}Tc – DMSA)

Paciente	Sexo	Atividade administrada ($\pm 1\text{DP}$) [MBq]	Taxa de dose inicial ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]		Taxa de dose final ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]	
			1,0 m	2,0 m	1,0 m	2,0 m
P1	F	192,4 $\pm$ 1,0	18,03 $\pm$ 0,21	5,15 $\pm$ 0,01	5,88 $\pm$ 0,07	1,68 $\pm$ 0,09
P2	F	185,0 $\pm$ 0,9	23,07 $\pm$ 0,27	6,59 $\pm$ 0,12	6,62 $\pm$ 0,08	1,89 $\pm$ 0,96
P3	F	185,0 $\pm$ 0,9	16,98 $\pm$ 0,20	4,85 $\pm$ 0,06	5,71 $\pm$ 0,07	1,63 $\pm$ 0,47
P4	F	159,1 $\pm$ 0,8	14,88 $\pm$ 0,17	4,25 $\pm$ 0,06	6,55 $\pm$ 0,08	1,87 $\pm$ 0,48
P5	F	221,6 $\pm$ 1,1	15,26 $\pm$ 0,18	4,36 $\pm$ 0,05	6,90 $\pm$ 0,08	1,97 $\pm$ 0,43
P6	F	173,9 $\pm$ 0,7	14,46 $\pm$ 0,17	4,13 $\pm$ 0,08	6,27 $\pm$ 0,07	1,79 $\pm$ 0,59
P7	M	177,6 $\pm$ 0,9	15,47 $\pm$ 0,18	4,42 $\pm$ 0,08	6,97 $\pm$ 0,08	1,99 $\pm$ 0,70
P8	M	213,1 $\pm$ 1,1	17,47 $\pm$ 0,20	4,99 $\pm$ 0,12	6,06 $\pm$ 0,07	1,73 $\pm$ 1,04
P9	M	190,5 $\pm$ 1,0	16,63 $\pm$ 0,19	4,75 $\pm$ 0,11	6,55 $\pm$ 0,08	1,87 $\pm$ 0,98
P10	F	190,5 $\pm$ 1,0	14,70 $\pm$ 0,17	4,20 $\pm$ 0,05	6,02 $\pm$ 0,07	1,72 $\pm$ 0,36
P11	F	214,6 $\pm$ 1,1	18,03 $\pm$ 0,21	5,15 $\pm$ 0,05	5,88 $\pm$ 0,07	1,68 $\pm$ 0,43
P12	F	192,4 $\pm$ 1,0	14,74 $\pm$ 0,19	4,65 $\pm$ 0,03	5,71 $\pm$ 0,07	1,75 $\pm$ 0,24
P13	M	196,1 $\pm$ 1,0	16,28 $\pm$ 0,18	4,35 $\pm$ 0,04	6,13 $\pm$ 0,07	1,65 $\pm$ 0,29
P14	M	207,2 $\pm$ 1,0	15,23 $\pm$ 0,19	4,58 $\pm$ 0,11	5,78 $\pm$ 0,07	1,87 $\pm$ 0,94
P15	M	192,4 $\pm$ 1,0	16,03 $\pm$ 0,19	4,64 $\pm$ 0,05	6,55 $\pm$ 0,08	1,84 $\pm$ 0,43
P16	M	181,3 $\pm$ 1,0	16,24 $\pm$ 0,19	4,48 $\pm$ 0,03	6,44 $\pm$ 0,07	1,87 $\pm$ 0,25
P17	F	196,1 $\pm$ 1,0	15,68 $\pm$ 0,17	4,21 $\pm$ 0,12	6,55 $\pm$ 0,08	1,64 $\pm$ 0,83
P18	F	188,7 $\pm$ 1,0	14,74 $\pm$ 0,18	4,37 $\pm$ 0,08	5,74 $\pm$ 0,07	1,51 $\pm$ 0,53
P19	M	189,4 $\pm$ 1,0	15,30 $\pm$ 0,18	4,52 $\pm$ 0,04	5,29 $\pm$ 0,07	1,82 $\pm$ 0,33
P20	M	192,7 $\pm$ 1,0	15,82 $\pm$ 0,20	5,00 $\pm$ 0,05	6,37 $\pm$ 0,08	1,99 $\pm$ 0,50
Média $\pm$	-	192,0 $\pm$	16,39 $\pm$	4,68 $\pm$	6,26 $\pm$	1,79 $\pm$
1DP	-	14,42	1,92	0,55	0,46	0,13

Tabela 15. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida efetiva e taxa de dose medida à 2,0 m para pacientes submetidos a exames cintilografia renal estática (^{99m}Tc -DMSA)

Paciente	Atividade residual na liberação do paciente ($\pm 1\text{DP}$) [%]	Meia-vida efetiva ($\pm 1\text{DP}$) [h]	Taxa de dose ($\pm 1\text{DP}$) $[(\mu\text{Sv/h})/\text{MBq}] \times 10^{-2}$
P1	32,62 $\pm$ 1,5	3,68 $\pm$ 0,3	2,68 $\pm$ 2,8
P2	46,51 $\pm$ 1,0	2,97 $\pm$ 0,5	3,56 $\pm$ 1,5
P3	33,61 $\pm$ 1,3	4,30 $\pm$ 0,8	2,62 $\pm$ 1,7
P4	44,00 $\pm$ 1,0	5,25 $\pm$ 0,5	2,67 $\pm$ 2,3
P5	45,18 $\pm$ 1,0	3,91 $\pm$ 0,5	1,97 $\pm$ 2,5
P6	43,34 $\pm$ 1,5	5,33 $\pm$ 0,3	2,37 $\pm$ 2,5
P7	45,02 $\pm$ 1,3	4,07 $\pm$ 0,5	2,49 $\pm$ 1,8
P8	34,67 $\pm$ 1,0	3,98 $\pm$ 0,8	2,34 $\pm$ 1,5
P9	39,37 $\pm$ 1,5	4,44 $\pm$ 0,5	2,49 $\pm$ 1,6
P10	40,95 $\pm$ 1,5	5,13 $\pm$ 0,5	2,20 $\pm$ 1,5
P11	32,62 $\pm$ 1,3	4,44 $\pm$ 0,8	2,40 $\pm$ 1,5
P12	37,63 $\pm$ 1,2	4,38 $\pm$ 0,3	2,42 $\pm$ 2,8
P13	37,93 $\pm$ 1,0	4,47 $\pm$ 0,5	2,22 $\pm$ 2,7
P14	40,83 $\pm$ 1,4	4,74 $\pm$ 0,5	2,21 $\pm$ 2,5
P15	39,66 $\pm$ 1,0	4,68 $\pm$ 0,5	2,41 $\pm$ 2,3
P16	41,74 $\pm$ 1,5	4,77 $\pm$ 0,3	2,47 $\pm$ 2,0
P17	38,95 $\pm$ 1,0	4,52 $\pm$ 0,3	2,15 $\pm$ 1,9
P18	34,55 $\pm$ 1,3	4,12 $\pm$ 0,8	2,32 $\pm$ 2,1
P19	40,27 $\pm$ 1,0	4,62 $\pm$ 0,5	2,39 $\pm$ 1,9
P20	39,80 $\pm$ 1,3	4,71 $\pm$ 0,3	1,59 $\pm$ 2,1
Média $\pm$	39,46 $\pm$	4,43 $\pm$	2,45 $\pm$
1DP	4,23	0,55	3,0

Figura 12. Representação do ajuste de uma função exponencial simples para os valores de taxa de dose medidos para o paciente P1, visando calcular a meia-vida efetiva do radiofármaco em seu organismo.

Figura 13: Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco $^{99\text{m}}\text{Tc-DMSA}$ para o exame de cintilografia renal estática, Paciente P1.

Figura 14: Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos ao exame de cintilografia renal estática com o radiofármaco ^{99m}Tc – DMSA.

4.3.1 Dosimetria Interna - Cintilografia Renal Estática - ^{99m}Tc -DMSA

Para este grupo de pacientes, a meia-vida efetiva média foi de $4,43 \pm 0,55$ h, com tempo de residência em corpo total estimado em $6,42 \pm 0,80$ h. Os dados da Tabela 16 refletem a estimativa de dose interna para este tipo de radiofármaco.

Tabela 16. Estimativa de dose interna – Cintilografia renal estática com ^{99m}Tc - DMSA

Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$	Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$
Adrenal	$3,91 \pm 0,47$	Tecido muscular	$3,06 \pm 0,37$
Mama	$2,35 \pm 0,28$	Ovários	$4,22 \pm 0,51$
Cérebro	$2,84 \pm 0,34$	Pâncreas	$4,17 \pm 0,50$
Vesícula biliar	$4,12 \pm 0,49$	Medula óssea	$3,13 \pm 0,38$
Intestino delgado	$4,12 \pm 0,49$	Pele	$2,15 \pm 0,26$
Intestino grosso	$4,03 \pm 0,48$	Baço	$3,60 \pm 0,43$

Coração	$3,75 \pm 0,45$	Testículos	$3,01 \pm 0,36$
Rins	$3,60 \pm 0,42$	Timo	$3,35 \pm 0,40$
Pulmões	$3,29 \pm 0,39$	Tireoide	$3,40 \pm 0,41$
Fígado	$3,63 \pm 0,44$	Bexiga	$3,91 \pm 0,47$
Útero	$4,26 \pm 0,51$	Corpo inteiro	$3,33 \pm 0,40$
Dose efetiva estimada no exame: $(3,50 \pm 0,42) \times 10^{-3}$ mSv/MBq			

4.4 Cintilografia Renal Dinâmica - ^{99m}Tc -DTPA

Foram analisados 22 pacientes submetidos ao exame de cintilografia renal dinâmica com o radiofármaco ^{99m}Tc -DTPA, Tabela 17. No protocolo para o procedimento em questão, a atividade administrada variou de 377 ± 2 MBq à 455 ± 2 MBq, resultando em uma média de 409 ± 26 MBq de atividade administrada para todos os pacientes.

A taxa de dose média inicial para todos os pacientes incluídos nesse grupo, logo após a incorporação do radiofármaco, foi de $14,37 \pm 0,83$ $\mu\text{Sv/h}$ à 1,0 m e $4,91 \pm 0,63$ $\mu\text{Sv/h}$ à 2,0 m. Após serem liberados da clínica de Medicina Nuclear, a média de taxa de dose apresentada pelos pacientes a 1,0 e 2,0 m foi de, respectivamente, $8,25 \pm 1,25$ $\mu\text{Sv/h}$ e $2,75 \pm 0,41$ $\mu\text{Sv/h}$, o que corresponde a uma atividade média de $234,81 \pm 0,09$ MBq.

Por meio do ajuste de uma função exponencial simples para a taxa de dose apresentada pelo paciente em função do tempo decorrido após a administração do radiofármaco, identificou-se uma meia-vida efetiva média de $1,33 \pm 0,19$ h para todos os pacientes incluídos nesse grupo. O ajuste da função pode ser representado pela Figura 15. Pelos cálculos, estima-se que em média esses pacientes oferecem uma taxa de dose por atividade administrada de $(1,18 \pm 0,12) \times 10^{-2}$ ($\mu\text{Sv/h}$)/MBq durante todo o período em que os mesmos permanecem na Clínica de Medicina Nuclear, Tabela 18.

Para este procedimento, após as micções, diminui-se, em média, 40,33% do radiofármaco inicialmente administrado. A Figura 16 representa a variação da taxa de dose, com consequente relação com a eliminação efetiva do radiofármaco

administrado, e a Figura 17 apresenta o percentual da taxa de dose com a qual os pacientes são liberados em relação ao valor inicialmente medido.

Tabela 17. Taxa de dose inicial e final monitorada em pacientes submetidos ao exame de cintilografia renal dinâmica (^{99m}Tc - DTPA)

Paciente	Sexo	Atividade administrada ($\pm 1\text{DP}$) [MBq]	Taxa de dose inicial ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]		Taxa de dose final ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]	
			1,0 m	2,0 m	1,0 m	2,0 m
P1	F	392,2 $\pm$ 2,0	14,61 $\pm$ 0,17	4,87 $\pm$ 0,05	9,51 $\pm$ 0,04	3,17 $\pm$ 0,03
P2	F	384,8 $\pm$ 2,0	13,95 $\pm$ 0,16	4,65 $\pm$ 0,03	9,36 $\pm$ 0,04	3,12 $\pm$ 0,02
P3	F	436,6 $\pm$ 2,2	14,34 $\pm$ 0,17	4,78 $\pm$ 0,04	6,45 $\pm$ 0,02	2,15 $\pm$ 0,02
P4	F	388,5 $\pm$ 2,0	15,45 $\pm$ 0,18	5,15 $\pm$ 0,05	10,23 $\pm$ 0,04	3,41 $\pm$ 0,03
P5	F	388,5 $\pm$ 2,0	14,55 $\pm$ 0,17	4,85 $\pm$ 0,05	7,35 $\pm$ 0,03	2,45 $\pm$ 0,07
P6	F	377,4 $\pm$ 1,9	15,39 $\pm$ 0,18	5,13 $\pm$ 0,11	9,36 $\pm$ 0,04	3,12 $\pm$ 0,04
P7	M	425,5 $\pm$ 2,1	12,30 $\pm$ 0,14	4,10 $\pm$ 0,08	6,39 $\pm$ 0,02	2,13 $\pm$ 0,03
P8	M	414,4 $\pm$ 2,1	15,30 $\pm$ 0,18	5,10 $\pm$ 0,05	9,69 $\pm$ 0,04	3,23 $\pm$ 0,02
P9	M	455,1 $\pm$ 2,3	12,63 $\pm$ 0,15	4,21 $\pm$ 0,04	7,53 $\pm$ 0,03	2,51 $\pm$ 0,01
P10	F	388,5 $\pm$ 2,0	13,95 $\pm$ 0,16	4,65 $\pm$ 0,03	6,39 $\pm$ 0,02	2,13 $\pm$ 0,06
P11	F	447,7 $\pm$ 2,2	13,11 $\pm$ 0,15	4,37 $\pm$ 0,12	6,99 $\pm$ 0,03	2,33 $\pm$ 0,01
P12	F	377,4 $\pm$ 1,9	13,95 $\pm$ 0,16	4,65 $\pm$ 0,01	9,30 $\pm$ 0,04	3,10 $\pm$ 0,01
P13	F	455,1 $\pm$ 2,3	14,19 $\pm$ 0,16	7,43 $\pm$ 0,03	8,85 $\pm$ 0,03	2,95 $\pm$ 0,29
P14	M	418,1 $\pm$ 2,1	14,49 $\pm$ 0,17	4,83 $\pm$ 0,50	8,37 $\pm$ 0,03	2,79 $\pm$ 0,02
P15	M	425,5 $\pm$ 2,1	14,85 $\pm$ 0,17	4,95 $\pm$ 0,04	7,14 $\pm$ 0,03	2,38 $\pm$ 0,02
P16	M	388,5 $\pm$ 2,0	15,30 $\pm$ 0,18	5,10 $\pm$ 0,04	9,36 $\pm$ 0,04	3,12 $\pm$ 0,02
P17	M	418,1 $\pm$ 2,1	14,79 $\pm$ 0,17	4,93 $\pm$ 0,04	8,88 $\pm$ 0,03	2,96 $\pm$ 0,03
P18	F	407,0 $\pm$ 2,0	14,16 $\pm$ 0,16	4,72 $\pm$ 0,05	7,11 $\pm$ 0,03	2,37 $\pm$ 0,03
P19	F	444,0 $\pm$ 2,2	14,67 $\pm$ 0,17	4,89 $\pm$ 0,06	8,43 $\pm$ 0,04	2,81 $\pm$ 0,05
P20	F	392,2 $\pm$ 2,0	14,61 $\pm$ 0,17	4,87 $\pm$ 0,08	9,39 $\pm$ 0,03	3,13 $\pm$ 0,05
P21	M	407,0 $\pm$ 2,0	14,91 $\pm$ 0,17	4,97 $\pm$ 0,11	6,63 $\pm$ 0,03	2,21 $\pm$ 0,05
P22	M	377,4 $\pm$ 2,0	14,64 $\pm$ 0,17	4,88 $\pm$ 0,08	8,79 $\pm$ 0,03	2,93 $\pm$ 0,05
Média $\pm$	-	409 $\pm$	14,37 $\pm$	4,91 $\pm$	8,25 $\pm$	2,75 $\pm$
1DP	-	26,1	0,83	0,63	1,25	0,41

Tabela 18. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida efetiva e taxa de dose medida à 2,0 m para pacientes submetidos a exames de cintilografia renal dinâmica (^{99m}Tc -DTPA)

Paciente	Atividade residual na liberação do paciente ($\pm 1\text{DP}$) [%]	Meia-vida efetiva ($\pm 1\text{DP}$) [h]	Taxa de dose ($\pm 1\text{DP}$) $[(\mu\text{Sv/h})/\text{MBq}] \times 10^{-2}$
P1	65,09 $\pm$ 0,05	1,07 $\pm$ 1,0	12,4 $\pm$ 8,0
P2	67,10 $\pm$ 0,03	1,15 $\pm$ 1,0	12,1 $\pm$ 5,0
P3	44,98 $\pm$ 0,04	0,70 $\pm$ 1,3	10,9 $\pm$ 3,0
P4	66,21 $\pm$ 0,05	0,98 $\pm$ 1,0	13,3 $\pm$ 2,0
P5	50,52 $\pm$ 0,05	0,96 $\pm$ 1,2	12,5 $\pm$ 3,0
P6	60,82 $\pm$ 0,11	1,18 $\pm$ 1,0	13,6 $\pm$ 5,0
P7	51,95 $\pm$ 0,08	0,75 $\pm$ 1,0	9,6 $\pm$ 3,0
P8	63,33 $\pm$ 0,05	1,13 $\pm$ 1,5	12,3 $\pm$ 3,0
P9	59,62 $\pm$ 0,04	1,00 $\pm$ 1,0	9,3 $\pm$ 3,0
P10	45,81 $\pm$ 0,03	0,66 $\pm$ 1,0	12,0 $\pm$ 5,0
P11	53,32 $\pm$ 0,12	0,79 $\pm$ 1,0	9,8 $\pm$ 2,0
P12	66,67 $\pm$ 0,01	1,22 $\pm$ 1,0	12,3 $\pm$ 5,0
P13	62,37 $\pm$ 0,03	1,05 $\pm$ 1,5	10,4 $\pm$ 3,0
P14	57,76 $\pm$ 0,50	0,93 $\pm$ 1,3	11,6 $\pm$ 6,0
P15	48,08 $\pm$ 0,04	0,68 $\pm$ 1,0	11,6 $\pm$ 3,0
P16	61,18 $\pm$ 0,04	0,99 $\pm$ 1,0	13,1 $\pm$ 1,0
P17	60,04 $\pm$ 0,04	0,95 $\pm$ 1,5	11,8 $\pm$ 2,0
P18	50,21 $\pm$ 0,05	0,72 $\pm$ 1,0	11,6 $\pm$ 1,0
P19	57,46 $\pm$ 0,06	0,69 $\pm$ 1,0	11,0 $\pm$ 5,0
P20	64,27 $\pm$ 0,08	1,12 $\pm$ 1,3	12,4 $\pm$ 3,0
P21	44,47 $\pm$ 0,11	0,64 $\pm$ 1,5	12,2 $\pm$ 1,0
P22	60,04 $\pm$ 0,05	0,97 $\pm$ 1,0	12,9 $\pm$ 1,0
Média $\pm$ 1DP	57,33 $\pm$ 7,42	1,33 $\pm$ 0,19	11,8 $\pm$ 1,2

Figura 15. Representação do ajuste de uma função exponencial simples para os valores de taxa de dose medidos para o Paciente P1, visando calcular a meia-vida efetiva do radiofármaco em seu organismo.

Figura 16: Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco $^{99\text{m}}\text{Tc-DTPA}$ para cintilografia renal dinâmica, Paciente P1.

Figura 17: Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos a cintilografia renal dinâmica com o radiofármaco ^{99m}Tc – DTPA

4.4.1 Dosimetria Interna – Cintilografia Renal Dinâmica - ^{99m}Tc -DTPA

Para o procedimento em questão, a meia-vida efetiva média foi de $1,33 \pm 0,19$ h, com tempo de residência em corpo total estimado em $1,92 \pm 0,27$ h. Os dados da Tabela 19 refletem a estimativa de dose interna para este tipo de radiofármaco.

Tabela 19. Estimativa de dose interna – Cintilografia renal dinâmica com ^{99m}Tc - DTPA

Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] x 10^{-3}	Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] x 10^{-3}
Adrenal	$1,17 \pm 0,16$	Tecido muscular	$0,92 \pm 0,13$
Mama	$0,70 \pm 0,10$	Ovários	$1,26 \pm 0,18$
Cérebro	$0,85 \pm 0,12$	Pâncreas	$1,25 \pm 0,18$
Vesícula biliar	$1,23 \pm 0,17$	Medula óssea	$0,94 \pm 0,13$
Intestino delgado	$1,23 \pm 0,17$	Pele	$0,64 \pm 0,10$

Intestino grosso	$1,21 \pm 0,17$	Baço	$1,08 \pm 0,15$
Coração	$1,12 \pm 0,16$	Testículos	$0,90 \pm 0,13$
Rins	$1,08 \pm 0,15$	Timo	$1,00 \pm 0,14$
Pulmões	$0,98 \pm 0,14$	Tireoide	$1,02 \pm 0,14$
Fígado	$1,09 \pm 0,15$	Bexiga	$1,17 \pm 0,16$
Útero	$1,27 \pm 0,18$	Corpo inteiro	$0,99 \pm 0,14$
Dose efetiva estimada no exame: $(1,05 \pm 0,15) \times 10^{-3}$ mSv/MBq			

4.5 Cintilografia do Miocárdio - $^{99m}\text{Tc-MIBI}$

Foram analisados 22 pacientes submetidos ao exame de cintilografia do miocárdio com o radiofármaco $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ com protocolo de 1 dia. No protocolo para o procedimento em questão, a primeira administração do radiofármaco foi feita com 15 minutos de antecedência da realização da imagem em repouso. A atividade administrada variou entre $296 \pm 1,5$ MBq e $444 \pm 2,2$ MBq, resultando em uma média de $348,8 \pm 1,07$ MBq para todos os pacientes, Tabela 20.

A taxa de dose média inicial para todos os pacientes incluídos nesse grupo logo após a incorporação do radiofármaco, foi de $10,06 \pm 2,11$ $\mu\text{Sv/h}$ à 1,0 m e $3,35 \pm 0,7$ $\mu\text{Sv/h}$ à 2,0 m. Após serem liberados da clínica de Medicina Nuclear, a média de taxa de dose apresentada pelos pacientes à 1,0 e 2,0 m foi de, respectivamente, $25,68 \pm 2,37$ $\mu\text{Sv/h}$ e $8,56 \pm 0,79$ $\mu\text{Sv/h}$, o que corresponde a uma atividade média de $470 \pm 0,09$ MBq.

Por meio do ajuste de uma função exponencial simples para a taxa de dose apresentada pelos pacientes em função do tempo decorrido após a administração do radiofármaco, identificou-se uma meia-vida efetiva média de $2,61 \pm 1,31$ h para todos os pacientes incluídos nesse grupo. O ajuste da função pode ser representado pela Figura 18.

Pelos cálculos, estima-se que em média esses pacientes oferecem uma taxa de dose por atividade administrada de $(15 \pm 0,7) \times 10^{-3}$ ($\mu\text{Sv/h}$)/MBq à 2 m durante todo o período em que os mesmos permanecem na clínica de Medicina Nuclear, Tabela 21.

Para este procedimento, após as micções, diminui-se, em média, 24,7 % do radiofármaco inicialmente administrado (primeira fase). A Figura 19 representa a variação da taxa de dose, com consequente relação com a eliminação efetiva do radiofármaco administrado mostrando também o pico de elevação da taxa de dose recorrente da 2ª administração do radiofármaco, sendo ela três vezes maior do que a primeira. A Figura 20 apresenta o percentual da taxa de dose com a qual os pacientes são liberados da Medicina Nuclear em relação ao valor inicialmente medido, considerando o 2ª pico de taxa de dose.

Figura 18. Representação do ajuste de uma função exponencial simples para os valores de taxa de dose medidos no Paciente P1, visando calcular a meia-vida efetiva do radiofármaco em seu organismo.

Tabela 20. Taxa de dose inicial e final monitorada em pacientes submetidos à cintilografia do miocárdio ($^{99m}\text{Tc-MIBI}$).

Paciente	Sexo	Atividade administrada ($\pm 1\text{DP}$) [MBq]	Taxa de dose inicial ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]		Taxa de dose final ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]	
			1,0 m	2,0 m	1,0 m	2,0 m
P1	F	296,0 $\pm$ 1,5	13,41 $\pm$ 0,15	4,47 $\pm$ 0,11	29,61 $\pm$ 0,34	9,87 $\pm$ 0,24
P2	F	444,0 $\pm$ 2,2	9,18 $\pm$ 0,11	3,06 $\pm$ 0,11	28,05 $\pm$ 0,32	9,35 $\pm$ 0,34
P3	M	370,0 $\pm$ 1,9	7,77 $\pm$ 0,09	2,59 $\pm$ 0,03	25,05 $\pm$ 0,29	8,35 $\pm$ 0,10
P4	F	444,0 $\pm$ 2,2	9,45 $\pm$ 0,11	3,15 $\pm$ 0,05	24,45 $\pm$ 0,28	8,15 $\pm$ 0,13
P5	F	333,0 $\pm$ 1,7	7,59 $\pm$ 0,09	2,53 $\pm$ 0,02	28,95 $\pm$ 0,33	9,65 $\pm$ 0,08
P6	F	407,0 $\pm$ 2,0	8,94 $\pm$ 0,10	2,98 $\pm$ 0,11	23,79 $\pm$ 0,27	7,93 $\pm$ 0,29
P7	M	333,0 $\pm$ 1,7	9,45 $\pm$ 0,11	3,15 $\pm$ 0,03	26,16 $\pm$ 0,30	8,72 $\pm$ 0,08
P8	F	333,0 $\pm$ 1,7	12,81 $\pm$ 0,15	4,27 $\pm$ 0,04	21,84 $\pm$ 0,25	7,28 $\pm$ 0,07
P9	M	407,0 $\pm$ 2,0	8,94 $\pm$ 0,10	2,98 $\pm$ 0,13	23,79 $\pm$ 0,27	7,93 $\pm$ 0,35
P10	M	370,0 $\pm$ 1,9	7,89 $\pm$ 0,09	2,63 $\pm$ 0,12	23,94 $\pm$ 0,28	7,98 $\pm$ 0,36
P11	F	333,0 $\pm$ 1,7	10,59 $\pm$ 0,12	3,53 $\pm$ 0,05	26,73 $\pm$ 0,31	8,91 $\pm$ 0,13
P12	M	333,0 $\pm$ 1,7	6,75 $\pm$ 0,08	2,25 $\pm$ 0,11	23,97 $\pm$ 0,28	7,99 $\pm$ 0,39
P13	F	333,0 $\pm$ 1,7	9,72 $\pm$ 0,11	3,24 $\pm$ 0,06	26,94 $\pm$ 0,31	8,98 $\pm$ 0,17
P14	M	444,0 $\pm$ 2,2	11,76 $\pm$ 0,14	3,92 $\pm$ 0,10	28,71 $\pm$ 0,33	9,57 $\pm$ 0,24
P15	M	444,0 $\pm$ 2,2	10,53 $\pm$ 0,12	3,51 $\pm$ 0,12	23,82 $\pm$ 0,28	7,94 $\pm$ 0,27
P16	F	444,0 $\pm$ 2,2	11,58 $\pm$ 0,13	3,86 $\pm$ 0,11	26,16 $\pm$ 0,30	9,72 $\pm$ 0,28
P17	M	444,0 $\pm$ 2,2	8,52 $\pm$ 0,10	2,84 $\pm$ 0,05	29,04 $\pm$ 0,34	9,68 $\pm$ 0,17
P18	M	444,0 $\pm$ 2,0	9,15 $\pm$ 0,11	3,05 $\pm$ 0,12	26,61 $\pm$ 0,31	8,87 $\pm$ 0,35
P19	F	333,0 $\pm$ 1,7	12,81 $\pm$ 0,15	4,27 $\pm$ 0,11	21,84 $\pm$ 0,25	7,28 $\pm$ 0,19
P20	M	407,0 $\pm$ 2,0	14,34 $\pm$ 0,17	4,78 $\pm$ 0,03	24,18 $\pm$ 0,28	8,06 $\pm$ 0,05
Média $\pm$	-	385 $\pm$	10,06 $\pm$	3,35 $\pm$	25,68 $\pm$	8,56 $\pm$
1DP	-	52,87	2,11	0,70	2,37	0,79

Tabela 21. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida efetiva e taxa de dose medida à 2 m para pacientes submetidos a exames de cintilografia do miocárdio com $^{99m}\text{Tc-MIBI}$

Paciente	Atividade residual na liberação do paciente ($\pm 1\text{DP}$) [%]	Meia-vida efetiva ($\pm 1\text{DP}$) [h]	Taxa de dose ($\pm 1\text{DP}$) $[(\mu\text{Sv/h})/\text{MBq}] \times 10^{-3}$
P1	45,3 $\pm$ 0,11	1,09 $\pm$ 1,8	15,0 $\pm$ 0,9
P2	32,7 $\pm$ 0,11	1,36 $\pm$ 1,5	7,0 $\pm$ 0,3
P3	31,0 $\pm$ 0,03	2,01 $\pm$ 2,1	7,0 $\pm$ 0,8
P4	38,7 $\pm$ 0,05	1,93 $\pm$ 1,0	7,0 $\pm$ 0,1
P5	26,2 $\pm$ 0,02	3,09 $\pm$ 1,0	8,0 $\pm$ 0,3
P6	37,6 $\pm$ 0,11	2,16 $\pm$ 1,5	7,0 $\pm$ 0,9
P7	36,1 $\pm$ 0,03	5,72 $\pm$ 1,3	9,0 $\pm$ 0,3
P8	58,7 $\pm$ 0,04	1,22 $\pm$ 1,0	13,0 $\pm$ 0,4
P9	37,6 $\pm$ 0,13	3,53 $\pm$ 1,8	7,0 $\pm$ 0,4
P10	33,0 $\pm$ 0,12	1,99 $\pm$ 1,7	7,0 $\pm$ 0,1
P11	39,6 $\pm$ 0,05	2,19 $\pm$ 1,7	11,0 $\pm$ 0,2
P12	28,2 $\pm$ 0,11	2,97 $\pm$ 1,0	7,0 $\pm$ 0,2
P13	36,1 $\pm$ 0,06	1,75 $\pm$ 1,0	10,0 $\pm$ 0,8
P14	41,0 $\pm$ 0,10	1,45 $\pm$ 1,0	9,0 $\pm$ 0,8
P15	44,2 $\pm$ 0,12	3,16 $\pm$ 1,3	8,0 $\pm$ 0,3
P16	44,3 $\pm$ 0,11	1,91 $\pm$ 1,5	9,0 $\pm$ 0,1
P17	29,3 $\pm$ 0,05	5,02 $\pm$ 2,0	6,0 $\pm$ 0,1
P18	34,4 $\pm$ 0,12	4,02 $\pm$ 2,1	7,0 $\pm$ 0,3
P19	58,7 $\pm$ 0,11	1,46 $\pm$ 1,6	13,0 $\pm$ 0,5
P20	59,3 $\pm$ 0,03	4,07 $\pm$ 1,8	12,0 $\pm$ 0,3
P21	40,1 $\pm$ 0,08	3,01 $\pm$ 1,7	9,0 $\pm$ 0,2
P22	9,8 $\pm$ 0,04	1,83 $\pm$ 1,3	20,0 $\pm$ 0,1
Média $\pm$ 1DP	45,3 $\pm$ 32,7	2,61 $\pm$ 1,31	15,0 $\pm$ 0,7

Figura 19: Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ para o exame de cintilografia do miocárdio, Paciente P1

Figura 20: Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos à cintilografia do miocárdio com $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ no momento da liberação da clínica de Medicina Nuclear, considerando as duas administrações.

4.5.1 Dosimetria Interna - Cintilografia do Miocárdio - ^{99m}Tc -MIBI

Para o procedimento em questão, a meia-vida efetiva média para todos os pacientes foi de $2,61 \pm 1,31$ h, com tempo de residência em corpo total estimado $3,77 \pm 1,90$ h. Os dados da Tabela 22 refletem a estimativa de dose interna para este tipo de radiofármaco.

Tabela 22. Estimativa de dose interna – Cintilografia do miocárdio com ^{99m}Tc - MIBI

Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$	Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$
Adrenal	$2,30 \pm 1,15$	Tecido muscular	$1,80 \pm 0,90$
Mama	$1,38 \pm 0,69$	Ovários	$2,48 \pm 1,24$
Cérebro	$1,67 \pm 0,33$	Pâncreas	$2,45 \pm 1,23$
Vesícula biliar	$2,42 \pm 1,23$	Medula óssea	$1,84 \pm 0,92$
Intestino delgado	$2,42 \pm 1,21$	Pele	$1,26 \pm 0,63$
Intestino grosso	$2,37 \pm 1,19$	Baço	$2,12 \pm 1,06$
Coração	$2,20 \pm 1,10$	Testículos	$1,77 \pm 1,00$
Rins	$2,12 \pm 1,10$	Timo	$1,96 \pm 1,00$
Pulmões	$1,93 \pm 1,00$	Tireoide	$2,00 \pm 1,00$
Fígado	$2,13 \pm 1,10$	Bexiga	$2,30 \pm 1,15$
Útero	$2,50 \pm 1,25$	Corpo inteiro	$1,95 \pm 1,00$
Dose efetiva estimada no exame: $(2,06 \pm 1,03) \times 10^{-3}$ mSv/MBq			

4.6 Cintilografia Cerebral – ^{99m}Tc – MIBI

Foram analisados 5 pacientes submetidos ao exame de cintilografia cerebral administrados com o radiofármaco ^{99m}Tc -MIBI. A quantidade de paciente relativamente menor em relação ao restante dos procedimentos estudados nesta pesquisa se deu por conta da baixa demanda do procedimento na clínica onde o estudo foi realizado, no entanto, a veracidade dos dados possui o mesmo teor dos demais procedimentos estudados. No protocolo para o procedimento em questão, a atividade administrada variou de 1.069 ± 6 MBq à 1.154 ± 6 MBq, resultando em

uma média de 1.121 ± 35 MBq de atividade administrada para todos os pacientes, Tabela 23.

A taxa de dose média inicial para todos os pacientes incluídos nesse grupo, logo após a incorporação do radiofármaco, foi de $15,76 \pm 0,71$ $\mu\text{Sv/h}$ à 1,0 m e $5,25 \pm 0,24$ $\mu\text{Sv/h}$ à 2,0 m. Após serem liberados da clínica de Medicina Nuclear, a média de taxa de dose apresentada pelos pacientes a 1,0 e 2,0 metros foi de, respectivamente, $7,73 \pm 0,85$ $\mu\text{Sv/h}$ e $2,57 \pm 0,28$ $\mu\text{Sv/h}$. O que corresponde a uma atividade de $549,83 \pm 0,15$ MBq, Tabela 23.

Por meio do ajuste de uma função exponencial simples para a taxa de dose apresentada pelo paciente em função do tempo decorrido após a administração do radiofármaco, identificou-se uma meia-vida efetiva média de $3,95 \pm 0,65$ h para todos os pacientes incluídos nesse grupo. O ajuste da função pode ser representado pela Figura 21. Pelos cálculos, estima-se que em média esses pacientes oferecem uma taxa de dose por atividade administrada de $(4,7 \pm 0,3) \times 10^{-3}$ ($\mu\text{Sv/h}$)/MBq durante todo período em que os mesmos permanecem na Clínica de Medicina Nuclear, Tabela 24.

Para este procedimento, após as micções, diminui-se, em média, 11,83% do radiofármaco inicialmente administrado. A Figura 22 representa a variação da taxa de dose, com consequente relação com a eliminação efetiva do radiofármaco administrado, e a Figura 23 apresenta o percentual da taxa de dose com a qual os pacientes são liberados em relação ao valor inicialmente medido.

Tabela 23. Taxa de dose inicial e final monitorada em pacientes submetidos ao exame de cintilografia cerebral ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ - MIBI)

Paciente	Sexo	Atividade administrada ($\pm 1\text{DP}$) [MBq]	Taxa de dose inicial ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]		Taxa de dose final ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]	
			1,0 m	2,0 m	1,0 m	2,0 m
P1	M	1.154 ± 6	$15,36 \pm 0,18$	$5,12 \pm 0,08$	$7,92 \pm 0,09$	$2,64 \pm 0,04$
P2	M	1.117 ± 6	$15,75 \pm 0,18$	$5,25 \pm 0,07$	$8,22 \pm 0,09$	$2,74 \pm 0,04$
P3	F	1.147 ± 6	$14,94 \pm 0,17$	$4,98 \pm 0,11$	$8,49 \pm 0,10$	$2,83 \pm 0,06$

P4	M	1.069 ± 5	$15,93 \pm 0,18$	$5,31 \pm 0,07$	$7,74 \pm 0,09$	$2,58 \pm 0,03$
P5	M	1.117 ± 6	$16,83 \pm 0,19$	$5,60 \pm 0,07$	$6,3 \pm 0,07$	$2,10 \pm 0,03$
Média $\pm$	-	$1.121 \pm$	$15,76 \pm$	$5,25 \pm$	$7,73 \pm$	$2,57 \pm$
1DP	-	35,5	0,71	0,24	0,85	0,28

Tabela 24. Meia-vida efetiva e taxa de dose oferecido por pacientes à 2 metros durante a estadia no Serviço de Medicina Nuclear quando submetidos a exames de cintilografia cerebral com $^{99m}\text{Tc-MIBI}$

Paciente	Atividade residual na liberação do paciente ($\pm 1\text{DP}$) [%]	Meia-vida efetiva ($\pm 1\text{DP}$) [h]	Taxa de dose ($\pm 1\text{DP}$) $[(\mu\text{Sv/h})/\text{MBq}] \times 10^{-2}$
P1	$48,44 \pm 0,08$	$3,22 \pm 1,0$	$44,0 \pm 2,0$
P2	$47,81 \pm 0,07$	$3,28 \pm 1,3$	$47,0 \pm 4,0$
P3	$43,17 \pm 0,11$	$4,41 \pm 1,2$	$43,0 \pm 8,0$
P4	$51,41 \pm 0,07$	$4,58 \pm 1,0$	$50,0 \pm 3,0$
P5	$62,57 \pm 0,07$	$3,28 \pm 1,0$	$50,0 \pm 2,0$
Média $\pm$	$50,68 \pm$	$3,95 \pm$	$47,0 \pm$
1DP	6,50	0,65	3,0

Figura 21. Representação do ajuste de uma função exponencial simples para os valores de taxa de dose medidos para o paciente P1, visando calcular a meia-vida efetiva do radiofármaco em seu organismo.

Figura 22: Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco $^{99\text{m}}\text{Tc-MIBI}$ para cintilografia cerebral, Paciente P1.

Figura 23: Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos a cintilografia cerebral com ^{99m}Tc – MIBI.

4.6.1 Dosimetria Interna - Cintilografia Cerebral – ^{99m}Tc – MIBI

Para o procedimento em questão, a meia-vida efetiva média foi de $3,95 \pm 0,65$ h, com tempo de residência em corpo total estimado em $5,71 \pm 0,94$ h. Os dados da Tabela 25 refletem a estimativa de dose interna para este tipo de radiofármaco.

Tabela 25. Estimativa de dose interna – Cintilografia cerebral com o ^{99m}Tc – MIBI

Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$	Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$
Adrenal	$3,48 \pm 1,38$	Tecido muscular	$2,72 \pm 0,90$
Mama	$2,09 \pm 1,15$	Ovários	$3,75 \pm 1,45$
Cérebro	$2,53 \pm 1,18$	Pâncreas	$3,71 \pm 1,52$
Vesícula biliar	$3,67 \pm 1,27$	Medula óssea	$2,79 \pm 0,93$
Intestino delgado	$3,67 \pm 1,22$	Pele	$1,91 \pm 0,81$
Intestino grosso	$3,58 \pm 1,23$	Baço	$3,21 \pm 1,34$
Coração	$3,34 \pm 1,14$	Testículos	$2,67 \pm 0,90$
Rins	$3,21 \pm 1,37$	Timo	$2,98 \pm 0,97$

Pulmões	$2,93 \pm 1,00$	Tireoide	$3,02 \pm 1,10$
Fígado	$3,23 \pm 1,22$	Bexiga	$3,48 \pm 1,35$
Útero	$3,79 \pm 1,45$	Corpo inteiro	$2,96 \pm 0,93$
Dose efetiva estimada no exame: $(3,12 \pm 1,12) \times 10^{-3}$ mSv/MBq			

4.7 Cintilografia de Corpo Total – ^{99m}Tc – MIBI

Foram analisados 20 pacientes submetidos ao exame de cintilografia de corpo total com o radiofármaco ^{99m}Tc –MIBI. A primeira administração do radiofármaco foi feita com 15 minutos de antecedência da realização da imagem. A atividade administrada variou entre 825 ± 4 MBq à 895 ± 5 MBq, resultando em uma média de 866 ± 17 MBq, Tabela 26.

A taxa de dose média inicial para todos os pacientes incluídos nesse grupo, logo após a incorporação do radiofármaco, foi de $15,8 \pm 1,6$ $\mu\text{Sv/h}$ à 1,0 m e $5,27 \pm 0,52$ $\mu\text{Sv/h}$ à 2,0 m. Após serem liberados da clínica de Medicina Nuclear, a média de taxa de dose apresentada pelos pacientes a 1,0 e 2,0 metros foi de, respectivamente, $14,9 \pm 1,2$ $\mu\text{Sv/h}$ e $4,96 \pm 0,39$ $\mu\text{Sv/h}$, o que corresponde a uma atividade de $817,0 \pm 1,5$ MBq.

Para o exame em questão, não houve eliminação (micção) no Setor, pois, após a realização do exame o paciente era liberado da clínica. Neste caso, não houve a execução do ajuste exponencial para a obtenção da meia-vida efetiva. Assim, para os cálculos foi utilizado o $T_{1/2}$ efetivo encontrado no procedimento de cintilografia cerebral (^{99m}Tc – MIBI), onde, o radiofármaco utilizado possui o mesmo modelo de biodistribuição e eliminação. Pelos cálculos, estima-se que em média esses pacientes oferecem uma taxa de dose por atividade administrada de $62,0 \pm 6,2 \times 10^{-3}$ ($\mu\text{Sv/h}$)/MBq durante todo período em que os mesmos permanecem na Clínica de Medicina Nuclear, Tabela 27.

A Figura 24 representa a variação da taxa de dose, com consequente relação com a eliminação efetiva do radiofármaco administrado durante a permanência do paciente na clínica e a Figura 25 apresenta o percentual da taxa de dose com a qual os pacientes são liberados em relação ao valor inicialmente monitorado.

Tabela 26. Taxa de dose inicial e final monitorada de pacientes submetidos ao exame de cintilografia de corpo total (^{99m}Tc - MIBI)

Paciente	Sexo	Atividade administrada ($\pm 1\text{DP}$) [MBq]	Taxa de dose inicial ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]		Taxa de dose final ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]	
			1,0 m	2,0 m	1,0 m	2,0 m
P1	F	825,0 $\pm$ 4	18,75 $\pm$ 0,22	6,25 $\pm$ 0,05	17,46 $\pm$ 0,20	5,82 $\pm$ 0,05
P2	F	877,0 $\pm$ 4	17,94 $\pm$ 0,21	5,98 $\pm$ 0,04	17,25 $\pm$ 0,20	5,75 $\pm$ 0,04
P3	M	895,0 $\pm$ 5	15,78 $\pm$ 0,18	5,26 $\pm$ 0,03	15,15 $\pm$ 0,17	5,05 $\pm$ 0,03
P4	F	855,0 $\pm$ 4	15,57 $\pm$ 0,18	5,19 $\pm$ 0,05	14,94 $\pm$ 0,17	4,98 $\pm$ 0,05
P5	F	884,0 $\pm$ 4	16,38 $\pm$ 0,19	5,46 $\pm$ 0,02	15,39 $\pm$ 0,18	5,13 $\pm$ 0,02
P6	M	862,0 $\pm$ 4	18,45 $\pm$ 0,21	6,15 $\pm$ 0,08	14,34 $\pm$ 0,17	4,78 $\pm$ 0,06
P7	M	854,0 $\pm$ 4	18,63 $\pm$ 0,22	7,64 $\pm$ 0,05	16,41 $\pm$ 0,19	5,47 $\pm$ 0,04
P8	F	854,0 $\pm$ 4	14,79 $\pm$ 0,17	4,93 $\pm$ 0,03	14,43 $\pm$ 0,17	4,81 $\pm$ 0,03
P9	M	873,0 $\pm$ 4	15,87 $\pm$ 0,18	5,29 $\pm$ 0,04	14,58 $\pm$ 0,17	4,86 $\pm$ 0,04
P10	M	855,0 $\pm$ 4	15,84 $\pm$ 0,18	5,28 $\pm$ 0,04	14,94 $\pm$ 0,17	4,98 $\pm$ 0,04
P11	M	858,0 $\pm$ 4	14,52 $\pm$ 0,17	4,84 $\pm$ 0,11	13,68 $\pm$ 0,16	4,56 $\pm$ 0,10
P12	M	855,0 $\pm$ 4	15,72 $\pm$ 0,18	5,24 $\pm$ 0,03	15,00 $\pm$ 0,17	5,00 $\pm$ 0,03
P13	F	873,0 $\pm$ 4	13,74 $\pm$ 0,16	4,58 $\pm$ 0,02	13,53 $\pm$ 0,16	4,51 $\pm$ 0,02
P14	F	851,0 $\pm$ 4	12,48 $\pm$ 0,14	4,16 $\pm$ 0,05	12,27 $\pm$ 0,14	4,09 $\pm$ 0,05
P15	F	866,0 $\pm$ 4	14,67 $\pm$ 0,17	4,89 $\pm$ 0,05	13,92 $\pm$ 0,16	4,64 $\pm$ 0,05
P16	F	870,0 $\pm$ 4	15,45 $\pm$ 0,18	5,15 $\pm$ 0,06	14,85 $\pm$ 0,17	4,95 $\pm$ 0,06
P17	M	847,0 $\pm$ 4	15,75 $\pm$ 0,18	5,25 $\pm$ 0,11	15,18 $\pm$ 0,18	5,06 $\pm$ 0,11
P18	F	833,0 $\pm$ 4	15,45 $\pm$ 0,18	5,15 $\pm$ 0,05	14,85 $\pm$ 0,18	4,95 $\pm$ 0,05
P19	F	892,0 $\pm$ 5	15,69 $\pm$ 0,18	5,23 $\pm$ 0,03	14,61 $\pm$ 0,17	4,87 $\pm$ 0,03
P20	M	873,0 $\pm$ 4	16,05 $\pm$ 0,19	5,35 $\pm$ 0,03	15,3 $\pm$ 0,17	5,10 $\pm$ 0,03

Média $\pm$	-	866 $\pm$	15,80 $\pm$	5,27 $\pm$	14,90 $\pm$	4,96 $\pm$
1DP	-	17,30	1,60	0,52	1,20	0,39

Tabela 27. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida e taxa de dose medida à 2,0 m para pacientes submetidos a exames de cintilografia de corpo inteiro com ^{99m}Tc -MIBI

Paciente	Atividade residual na liberação do paciente ($\pm$ 1DP) [%]	Meia-vida efetiva [h]	Taxa de dose ($\pm$ 1DP) [$\mu\text{Sv}/\text{MBq}$] $\times 10^{-2}$
P1	93,12 $\pm$ 0,05	-	7,6 $\pm$ 3,0
P2	96,15 $\pm$ 0,04	-	6,8 $\pm$ 2,0
P3	96,01 $\pm$ 0,03	-	5,9 $\pm$ 1,2
P4	95,95 $\pm$ 0,05	-	6,1 $\pm$ 1,2
P5	93,96 $\pm$ 0,02	-	6,2 $\pm$ 1,5
P6	77,72 $\pm$ 0,08	-	7,1 $\pm$ 2,1
P7	88,08 $\pm$ 0,05	-	8,9 $\pm$ 1,2
P8	97,57 $\pm$ 0,03	-	5,6 $\pm$ 1,2
P9	91,87 $\pm$ 0,04	-	6,1 $\pm$ 1,2
P10	94,32 $\pm$ 0,04	-	6,2 $\pm$ 1,2
P11	94,21 $\pm$ 0,11	-	5,6 $\pm$ 2,5
P12	95,42 $\pm$ 0,03	-	6,1 $\pm$ 1,0
P13	98,47 $\pm$ 0,02	-	5,2 $\pm$ 2,1
P14	98,32 $\pm$ 0,05	-	4,9 $\pm$ 1,2
P15	94,89 $\pm$ 0,05	-	5,6 $\pm$ 2,1
P16	96,12 $\pm$ 0,06	-	5,9 $\pm$ 2,2

P17	$96,38 \pm 0,11$	-	$6,2 \pm 1,0$
P18	$96,12 \pm 0,05$	-	$6,2 \pm 2,0$
P19	$93,12 \pm 0,03$	-	$5,9 \pm 1,2$
P20	$95,33 \pm 0,03$	-	$6,1 \pm 1,0$
Média $\pm$	$94,30 \pm$	3,95	$6,2 \pm$
1DP	93,12	-	3,6

Figura 24. Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ para cintilografia de corpo total, Paciente P1.

Figura 25. Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos a cintilografia de corpo total com o radiofármaco ^{99m}Tc – MIBI

4.7.1 Dosimetria Interna - Cintilografia de Corpo Total – ^{99m}Tc – MIBI

Para o procedimento em questão, a meia-vida efetiva média utilizada foi a mesma encontrada para o procedimento de cintilografia cerebral, ou seja, $3,95 \pm 0,65$ h, com tempo de residência em corpo total estimado em $5,70 \pm 0,91$ h, Tabela 28.

Tabela 28. Estimativa de dose interna – cintilografia de corpo total - ^{99m}Tc -MIBI

Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$	Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$
Adrenal	$3,48 \pm 0,56$	Tecido muscular	$2,72 \pm 0,43$
Mama	$2,09 \pm 0,33$	Ovários	$3,75 \pm 1,00$
Cérebro	$2,53 \pm 0,40$	Pâncreas	$3,71 \pm 1,00$
Vesícula biliar	$3,67 \pm 0,60$	Medula óssea	$2,79 \pm 0,45$
Intestino delgado	$3,67 \pm 0,60$	Pele	$1,91 \pm 0,31$
Intestino grosso	$3,58 \pm 0,58$	Baço	$3,21 \pm 0,51$
Coração	$3,34 \pm 0,53$	Testículos	$2,67 \pm 0,43$
Rins	$3,21 \pm 0,51$	Timo	$2,98 \pm 0,48$
Pulmões	$2,93 \pm 0,47$	Tireoide	$3,02 \pm 0,45$

Fígado	$3,23 \pm 0,52$	Bexiga	$3,48 \pm 1,00$
Útero	$3,79 \pm 0,61$	Corpo inteiro	$2,96 \pm 0,47$
Dose efetiva estimada no exame: $(3,12 \pm 0,50) \times 10^{-3} \text{ mSv/MBq}$			

4.8 ^{18}F -FDG - PET/CT

Foram analisados 20 pacientes submetidos ao exame diagnóstico utilizando o ^{18}F -FDG - PET/CT, Tabela 28. Todos os pacientes ingeriram quatro copos com 250 mL de água em aproximadamente 50 minutos antecedendo a aquisição de imagem. Todos os pacientes foram orientados a esvaziar a bexiga antes da realização do exame, sendo padronizada a primeira micção em 50 minutos após administração do material radioativo. A atividade administrada variou de $196,69 \pm 1,10 \text{ MBq}$ à $423,65 \pm 2,00 \text{ MBq}$, resultando em uma média de $263,13 \pm 59,64 \text{ MBq}$ de atividade administrada para todos os pacientes, Tabela 29.

A taxa de dose média inicial para todos os pacientes incluídos nesse grupo, logo após a incorporação do radiofármaco, foi de $27,10 \pm 0,31 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ à 1,0 m e $9,03 \pm 2,70 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ à 2,0 m. Após serem liberados da clínica de Medicina Nuclear a média de taxa de dose apresentada pelos pacientes a 1,0 e 2,0 metros foi de, respectivamente, $6,18 \pm 0,31 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ e $2,06 \pm 0,10 \text{ } \mu\text{Sv/h}$. O que corresponde a uma atividade de $234,81 \pm 0,09 \text{ MBq}$.

Por meio do ajuste de uma função exponencial simples para a taxa de dose apresentada pelos pacientes em função do tempo decorrido após a administração do radiofármaco, identificou-se uma meia-vida efetiva de $1,48 \pm 0,32 \text{ h}$ para todos os pacientes incluídos nesse grupo. O ajuste da função pode ser representado pela Figura 26. Pelos cálculos, estima-se que em média esses pacientes oferecem uma taxa de dose por atividade administrada de $(4,0 \pm 0,9) \times 10^{-2} \text{ (} \mu\text{Sv/h)/MBq}$ durante todo período em que os mesmos permanecem na clínica de Medicina Nuclear, Tabela 30.

Para este procedimento, após a primeira micção diminui-se, em média, 21,54% do radiofármaco inicialmente administrado. A Figura 27 representa a variação da taxa de dose, com conseqüente relação com a eliminação efetiva do radiofármaco administrado, e a Figura 28 apresenta o percentual da taxa de dose

com a qual os pacientes são liberados da clínica de Medicina Nuclear em relação ao valor inicialmente medido.

Tabela 29. Taxa de dose inicial e final monitorada em pacientes submetidos ao exame diagnóstico com o ^{18}F -FDG - PET/CT

Paciente	Sexo	Atividade administrada ($\pm 1\text{DP}$) [MBq]	Taxa de dose inicial ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]		Taxa de dose final ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]	
			1,0 m	2,0 m	1,0 m	2,0 m
P1	M	242,87 $\pm$ 1,3	30,42 $\pm$ 0,4	10,14 $\pm$ 0,12	2,73 $\pm$ 0,35	0,91 $\pm$ 0,12
P2	F	231,32 $\pm$ 1,1	26,49 $\pm$ 0,3	8,83 $\pm$ 0,13	6,75 $\pm$ 0,31	2,25 $\pm$ 0,10
P3	F	261,96 $\pm$ 1,1	23,85 $\pm$ 0,3	7,95 $\pm$ 0,08	5,55 $\pm$ 0,28	1,85 $\pm$ 0,09
P4	F	275,28 $\pm$ 1,2	22,23 $\pm$ 0,3	7,41 $\pm$ 0,09	4,59 $\pm$ 0,26	1,53 $\pm$ 0,09
P5	M	248,64 $\pm$ 1,3	22,35 $\pm$ 0,3	7,45 $\pm$ 0,08	6,45 $\pm$ 0,26	2,15 $\pm$ 0,09
P6	M	196,69 $\pm$ 1,1	25,83 $\pm$ 0,3	8,61 $\pm$ 0,09	5,07 $\pm$ 0,30	1,69 $\pm$ 0,10
P7	M	218,45 $\pm$ 1,1	11,46 $\pm$ 0,1	3,82 $\pm$ 0,11	5,31 $\pm$ 0,13	1,77 $\pm$ 0,04
P8	F	195,80 $\pm$ 1,1	21,45 $\pm$ 0,2	7,15 $\pm$ 0,09	5,16 $\pm$ 0,25	1,72 $\pm$ 0,08
P9	F	336,55 $\pm$ 1,7	25,14 $\pm$ 0,3	8,38 $\pm$ 0,12	6,87 $\pm$ 0,29	2,29 $\pm$ 0,10
P10	F	264,62 $\pm$ 1,4	27,84 $\pm$ 0,3	9,28 $\pm$ 0,13	9,99 $\pm$ 0,32	3,33 $\pm$ 0,11
P11	F	293,48 $\pm$ 1,1	24,63 $\pm$ 0,3	8,21 $\pm$ 0,07	5,58 $\pm$ 0,28	1,86 $\pm$ 0,09
P12	M	264,18 $\pm$ 1,1	27,03 $\pm$ 0,3	9,01 $\pm$ 0,05	10,44 $\pm$ 0,31	3,48 $\pm$ 0,10
P13	M	330,34 $\pm$ 1,7	34,59 $\pm$ 0,4	11,5 $\pm$ 0,11	9,03 $\pm$ 0,40	3,01 $\pm$ 0,13
P14	M	273,06 $\pm$ 1,5	21,30 $\pm$ 0,2	7,1 $\pm$ 0,08	6,30 $\pm$ 0,25	2,10 $\pm$ 0,08
P15	M	293,93 $\pm$ 1,5	22,32 $\pm$ 0,3	7,4 $\pm$ 0,12	5,88 $\pm$ 0,26	1,96 $\pm$ 0,09
P16	M	214,00 $\pm$ 1,1	25,59 $\pm$ 0,3	7,53 $\pm$ 0,05	4,50 $\pm$ 0,30	1,50 $\pm$ 0,10
P17	M	276,61 $\pm$ 1,5	25,77 $\pm$ 0,3	8,6 $\pm$ 0,11	3,96 $\pm$ 0,30	1,32 $\pm$ 0,10
P18	M	423,65 $\pm$ 2,0	47,73 $\pm$ 0,6	15,91 $\pm$ 0,6	7,17 $\pm$ 0,55	2,39 $\pm$ 0,18
P19	F	157,99 $\pm$ 1,0	30,48 $\pm$ 0,4	10,16 $\pm$ 0,40	5,49 $\pm$ 0,35	1,83 $\pm$ 0,12

P20	F	232,32 ± 1,0	45,54 ± 0,5	15,18 ± 0,06	6,81 ± 0,53	2,27 ± 0,18
Média ±	-	263,13 ±	27,10 ±	9,03 ±	6,18 ±	2,06 ±
1DP	-	59,64	8,11	2,70	1,91	0,64

Tabela 30. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida efetiva e taxa de dose medida à 2,0 m para pacientes submetidos ao exame diagnóstico com o PET/CT - ^{18}F -FDG

Paciente	Atividade residual na liberação do paciente (± 1DP) [%]	Meia-vida efetiva (± 1DP) [h]	Taxa de dose (± 1DP) [($\mu\text{Sv/h}$)/MBq] $\times 10^{-2}$
P1	9,53 ± 0,12	1,22 ± 1,2	3,9 ± 0,5
P2	24,54 ± 0,13	1,29 ± 1,5	4,0 ± 0,5
P3	19,69 ± 0,08	1,24 ± 2,0	3,6 ± 0,7
P4	17,47 ± 0,09	1,54 ± 1,3	3,2 ± 0,3
P5	30,06 ± 0,08	1,63 ± 1,0	2,9 ± 0,3
P6	77,69 ± 0,09	1,72 ± 1,0	4,0 ± 0,5
P7	19,99 ± 0,11	1,72 ± 1,5	1,7 ± 0,5
P8	26,64 ± 0,09	1,41 ± 1,2	3,3 ± 0,3
P9	26,83 ± 0,12	1,59 ± 1,3	2,5 ± 0,7
P10	38,13 ± 0,13	1,47 ± 1,2	3,3 ± 0,3
P11	17,40 ± 0,07	1,62 ± 1,0	3,6 ± 0,5
P12	33,05 ± 0,05	1,39 ± 1,0	4,0 ± 0,5
P13	26,90 ± 0,11	1,67 ± 1,5	3,4 ± 0,7
P14	31,98 ± 0,08	2,17 ± 1,5	2,4 ± 0,7
P15	26,83 ± 0,12	1,21 ± 1,0	2,5 ± 0,5
P16	21,09 ± 0,05	1,67 ± 1,3	3,8 ± 0,3

P17	$27,69 \pm 0,11$	$1,76 \pm 1,0$	$2,9 \pm 0,3$
P18	$15,02 \pm 0,05$	$0,59 \pm 1,2$	$3,8 \pm 0,5$
P19	$18,01 \pm 0,11$	$1,25 \pm 1,0$	$6,4 \pm 0,4$
P20	$14,95 \pm 0,12$	$1,48 \pm 1,0$	$6,5 \pm 0,3$
Média $\pm$	26,17	1,48	4,0
1DP	13,70	0,32	0,9

Figura 26. Representação do ajuste de uma função exponencial simples para os valores de taxa de dose medidos para o Paciente P1, visando calcular a meia-vida efetiva do radiofármaco ^{18}F -FDG em seu organismo.

Figura 27: Ilustração do decréscimo da taxa de dose em função do tempo após a administração do radiofármaco ^{18}F -FDG para o exame diagnóstico com o PET/CT, Paciente P1.

Figura 28: Percentual da taxa de dose em relação ao valor inicialmente medido para pacientes submetidos ao PET/CT oncológico com o radiofármaco ^{18}F -FDG.

4.8.1 Dosimetria Interna - ^{18}F -FDG - PET/CT

Para este grupo de pacientes, a meia-vida efetiva média foi de $1,48 \pm 0,32$ h, com tempo de residência em corpo total estimado em $2,13 \pm 0,46$ h. Os dados da Tabela 30 refletem a estimativa de dose interna para este tipo de radiofármaco.

Tabela 31. Estimativa de dose interna PET/CT oncológico com o ^{18}F - FDG

Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$	Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$
Adrenal	$11,60 \pm 1,04$	Tecido muscular	$10,10 \pm 0,91$
Mama	$8,61 \pm 0,80$	Ovários	$12,40 \pm 1,12$
Cérebro	$9,21 \pm 0,82$	Pâncreas	$12,20 \pm 1,10$
Vesícula biliar	$12,20 \pm 1,10$	Medula óssea	$9,57 \pm 0,90$
Intestino delgado	$12,20 \pm 1,10$	Pele	$8,12 \pm 0,73$
Intestino grosso	$12,00 \pm 1,08$	Baço	$11,20 \pm 1,01$
Coração	$11,40 \pm 1,02$	Testículos	$10,10 \pm 0,91$
Rins	$11,20 \pm 1,01$	Timo	$10,60 \pm 1,00$
Pulmões	$10,20 \pm 0,92$	Tireoide	$10,50 \pm 1,00$
Fígado	$11,20 \pm 1,01$	bexiga	$11,90 \pm 1,07$
Útero	$12,50 \pm 1,23$	Corpo inteiro	$10,30 \pm 1,01$
Dose efetiva estimada no exame: $(10,60 \pm 1,00) \times 10^{-3}$ mSv/MBq			

4.9 Pesquisa de Corpo Inteiro (PCI) - Pré Terapia – ^{131}I -NaI

Foram analisados 20 pacientes submetidos ao procedimento de pesquisa de corpo inteiro com o radiofármaco ^{131}I -NaI. No protocolo para o procedimento em questão, a atividade administrada variou de $111,0 \pm 0,6$ MBq à $118,0 \pm 0,6$ MBq, resultando em uma média de $115,0 \pm 0,6$ MBq de atividade administrada para todos os pacientes, Tabela 32. Após serem administrados com o material radioativo, cada paciente foi liberado para retornar a sua residência. Após 48 horas da administração do radiofármaco, os pacientes retornaram à clínica e realizaram o procedimento de aquisição de imagem cintilográfica.

A taxa de dose média inicial para todos os pacientes incluídos nesse grupo, logo após a incorporação do radiofármaco, foi de $6,83 \pm 1,09 \mu\text{Sv/h}$ à 1,0 m e $2,28 \pm 0,07 \mu\text{Sv/h}$ à 2,0 m. Após serem liberados da clínica de Medicina Nuclear (após o retorno para a realização do exame), a média de taxa de dose apresentada pelos pacientes a 1,0 e 2,0 metros foi de, respectivamente, $5,30 \pm 0,70 \mu\text{Sv/h}$ e $1,76 \pm 0,23 \mu\text{Sv/h}$, o que corresponde a uma atividade de $88,50 \pm 0,07 \text{MBq}$.

Estima-se que em média esses pacientes oferecem uma taxa de dose por atividade administrada de $(19,86 \pm 0,3) \times 10^{-2} (\mu\text{Sv/h})/\text{MBq}$ a 2,0 m, Tabela 33.

A quantidade de pontos monitorados foi insuficiente para ajustar uma função exponencial simples a eles para que se pudesse obter a meia-vida efetiva. No entanto, para a realização dos cálculos, utilizou-se a meia-vida efetiva média encontrada no trabalho de Willegaignon e colaboradores^[45].

Tabela 32. Taxa de dose inicial e final (48 horas decorridas da administração do radiofármaco) monitorada em pacientes submetidos ao procedimento de pesquisa de corpo inteiro ($^{131}\text{I-Nal}$)

Paciente	Sexo	Atividade administrada ($\pm 1\text{DP}$) [MBq]	Taxa de dose inicial ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]		Taxa de dose final ($\pm 1\text{DP}$) [$\mu\text{Sv/h}$]	
			1,0 m	2,0 m	1,0 m	2,0 m
P1	F	$115,8 \pm 0,6$	$7,08 \pm 0,08$	$2,36 \pm 0,11$	$5,61 \pm 0,06$	$1,87 \pm 0,09$
P2	F	$116,6 \pm 0,6$	$7,95 \pm 0,09$	$2,65 \pm 0,07$	$6,36 \pm 0,07$	$2,12 \pm 0,06$
P3	F	$115,4 \pm 0,6$	$7,08 \pm 0,08$	$2,36 \pm 0,11$	$5,97 \pm 0,07$	$1,99 \pm 0,09$
P4	F	$114,3 \pm 0,6$	$7,05 \pm 0,08$	$2,35 \pm 0,02$	$5,79 \pm 0,07$	$1,93 \pm 0,02$
P5	M	$112,5 \pm 0,6$	$7,95 \pm 0,09$	$2,65 \pm 0,07$	$5,97 \pm 0,07$	$1,99 \pm 0,05$
P6	M	$111,0 \pm 0,6$	$7,35 \pm 0,08$	$2,45 \pm 0,09$	$5,37 \pm 0,06$	$1,79 \pm 0,07$
P7	F	$113,9 \pm 0,6$	$5,97 \pm 0,07$	$1,99 \pm 0,07$	$5,43 \pm 0,06$	$1,81 \pm 0,06$
P8	M	$116,6 \pm 0,6$	$5,07 \pm 0,06$	$1,69 \pm 0,04$	$4,71 \pm 0,05$	$1,57 \pm 0,04$
P9	F	$111,7 \pm 0,6$	$6,39 \pm 0,07$	$2,13 \pm 0,05$	$5,13 \pm 0,06$	$1,71 \pm 0,04$

P10	F	117,7 ± 0,6	7,95 ± 0,09	2,65 ± 0,03	6,30 ± 0,07	2,10 ± 0,02
P11	F	113,9 ± 0,6	7,35 ± 0,08	2,45 ± 0,04	5,94 ± 0,07	1,98 ± 0,03
P12	F	111,0 ± 0,6	5,55 ± 0,06	1,85 ± 0,08	5,16 ± 0,06	1,72 ± 0,07
P13	F	118,0 ± 0,6	5,52 ± 0,06	1,84 ± 0,05	5,25 ± 0,06	1,75 ± 0,05
P14	M	118,0 ± 0,6	5,07 ± 0,06	1,69 ± 0,11	3,69 ± 0,04	1,23 ± 0,08
P15	M	106,9 ± 0,5	5,04 ± 0,06	1,68 ± 0,04	4,17 ± 0,05	1,39 ± 0,03
P16	F	115,4 ± 0,6	7,47 ± 0,09	2,49 ± 0,08	4,98 ± 0,06	1,66 ± 0,05
P17	F	115,4 ± 0,6	8,25 ± 0,10	2,75 ± 0,11	5,61 ± 0,06	1,87 ± 0,07
P18	F	116,6 ± 0,6	7,89 ± 0,09	2,63 ± 0,08	4,68 ± 0,05	1,56 ± 0,05
P19	F	116,6 ± 0,6	6,93 ± 0,08	2,31 ± 0,04	5,22 ± 0,06	1,74 ± 0,03
P20	M	115,4 ± 0,6	7,77 ± 0,09	2,59 ± 0,02	4,41 ± 0,05	1,47 ± 0,01
Média ±	-	115 ±	6,83 ±	2,28 ±	5,30 ±	1,76 ±
1SD	-	2,82	1,09	0,36	0,70	0,23

Tabela 33. Percentual de atividade retida pelo organismo, meia-vida efetiva e taxa de dose medida à 2,0 m para pacientes submetidos a exames de pesquisa de corpo inteiro (^{131}I -NaI)

Paciente	Atividade residual na liberação do paciente (± 1DP) [%]	Meia-vida efetiva (± 1DP) [h]	Taxa de dose (± 1DP) [($\mu\text{Sv/h}$)/MBq] x 10^{-2}
P1	79,24	-	20,38 ± 0,2
P2	80,00	-	22,74 ± 0,3
P3	84,32	-	20,44 ± 0,4
P4	82,13	-	20,55 ± 0,3
P5	75,09	-	23,56 ± 0,3
P6	73,06	-	22,07 ± 0,2

P7	90,95	-	17,46 ± 0,1
P8	92,90	-	14,50 ± 0,3
P9	80,28	-	19,06 ± 0,2
P10	79,25	-	22,52 ± 0,3
P11	80,82	-	21,50 ± 0,2
P12	92,97	-	16,67 ± 0,3
P13	95,11	-	15,59 ± 0,3
P14	72,78	-	14,32 ± 0,2
P15	82,74	-	15,71 ± 0,1
P16	66,67	-	21,57 ± 0,3
P17	68,00	-	23,82 ± 0,2
P18	59,32	-	22,57 ± 0,2
P19	75,32	-	19,82 ± 0,4
P20	56,76	-	22,44 ± 0,5
Média	78,39	11,41 ^I	19,86
Desvio Padrão	10,51	-	0,3

^I Valor apresentado na pesquisa de Willegaignon e colaboradores, 2016

4.9.1 Dosimetria interna - Pesquisa de corpo inteiro (pré terapia) – ¹³¹I-NaI

Para este grupo de pacientes, a meia-vida efetiva média apresentada foi de 11,41 h, com tempo de residência em corpo total estimado em 16 h, Os dados da Tabela 34 refletem a estimativa de dose interna para este tipo de radiofármaco.

Tabela 34. Estimativa de dose interna – PCI pré terapia - ^{131}I -NaI

Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$	Órgão	Dose Absorvida ($\pm 1\text{DP}$) [mGy/MBq] $\times 10^{-3}$
Adrenal	48,60	Tecido muscular	43,30
Mama	38,70	Ovários	50,80
Cérebro	41,00	Pâncreas	50,40
Vesícula biliar	50,30	Medula óssea	38,20
Intestino delgado	50,30	Pele	37,20
Intestino grosso	49,60	Baço	46,90
Coração	47,60	Testículos	43,30
Rins	46,90	Timo	45,10
Pulmões	44,00	Tireoide	45,10
Fígado	46,90	Bexiga	49,00
Útero	51,10	Corpo inteiro	44,30
Dose efetiva estimada no exame: $44,30 \times 10^{-3} \text{ mSv/MBq}$			

4.10 Potencial de dose efetiva acumulada

Baseando-se na taxa de dose final, momento da alta do paciente da clínica de Medicina Nuclear, até a completa eliminação do radiofármaco pelo seu organismo, foi possível estimar o potencial de dose acumulada a 1,0 e 2,0 metros dos pacientes para todos os procedimentos diagnósticos estudados. Tal estimativa, como já citado, foi realizada pela integral do gráfico (taxa de dose [$\mu\text{Sv/h}$] $\times$ tempo decorrido da administração do radiofármaco [h]). Assim, calculou-se a dose efetiva acumulada oferecida à terceiros (familiares e indivíduos do público) em até 24 horas após a liberação dos pacientes do Serviço de Medicina Nuclear, Tabela 35 e Figuras 29, 30 e 31.

Tabela 35. Potencial de dose efetiva acumulada oferecida à terceiros durante o período de 24 horas.

Exame diagnóstico	Radiofármaco	Potencial de dose efetiva acumulada a 1,0 m [μSv]¹	Potencial de dose efetiva acumulada a 2,0 m [μSv]¹
Cintilografia renal estática	^{99m} Tc - DMSA	53,19	17,73
Cintilografia renal dinâmica	^{99m} Tc - DTPA	71,01	23,67
Cintilografia cerebral	^{99m} Tc - MIBI	66,63	22,21
Cintilografia miocárdio	^{99m} Tc - MIBI	218,28	72,76
Cintilografia corpo inteiro	^{99m} Tc - MIBI	73,19	28,48
Cintilografia óssea	^{99m} Tc - MDP	38,22	12,74
PET/CT	¹⁸ F - FDG	21,24	7,08
PET/CT	¹⁸ F - NaF	23,04	7,68
Pesquisa de corpo inteiro (PCI)	¹³¹ I- NaI	74,37	34,27

¹ Potencial de dose efetiva acumulada considerando desde o momento da administração do radiofármaco até a sua completa eliminação. Doses estimadas considerando as meia-vidas efetivas encontradas neste trabalho.

Figura 29. Variação da taxa de dose a 1,0 m de distância considerando a meia-vida efetiva para um paciente submetido ao exame de PET/CT com o radiofármaco ^{18}F -FDG, e estimativa de eliminação pós alta do Setor.

Figura 30: Variação da taxa de dose a 2,0 m de distância considerando a meia-vida efetiva para um paciente submetido ao exame de PET/CT com o radiofármaco ^{18}F -FDG, e estimativa de eliminação pós alta do Setor.

Figura 31. Comparação da estimativa de dose acumulada a 1,0 e 2,0 metros de distância no período de 24 horas após a liberação da clínica de Medicina Nuclear para todos os procedimentos estudados.

Os cálculos do potencial de dose efetiva acumulada foram baseados na meia-vida efetiva encontrada neste estudo, qual possui diferença considerável com relação à meia vida física de cada radioisótopo, Figura 32. Geralmente quando se faz a estimativa do potencial de dose oferecido a terceiros, tem-se utilizado a meia-vida física, no entanto, pelos dados aqui apresentados observamos que a meia-vida efetiva difere da física de um mínimo de 35%, máximo 79% e em média 57%.

Figura 32. Diferença de eliminação entre meia-vida física e meia-vida efetiva, neste caso para procedimentos de envolvendo o radiofármaco ^{18}F -FDG.

A Figura 33 representa a variação da taxa de dose apresentada pelos pacientes desde o momento da liberação da clínica de Medicina Nuclear até o período de 24 horas após a administração do radiofármaco, considerando para isto a meia-vida efetiva encontrada em cada procedimento. A dose oferecida à terceiros pelos pacientes radioativos está diretamente relacionada com a meia-vida efetiva e o tempo de permanência de pessoas próximas aos paciente. No

entanto, é importante enfatizar que o potencial de dose oferecido pelos pacientes durante a estadia na clínica representa 75% do total de dose, enquanto que após sua liberação o paciente poderia estar oferecendo um potencial de até 20% do total que ele poderia oferecer até a completa eliminação do radiofármaco administrado. Para procedimentos de cintilografia de miocárdio, nota-se que o paciente é liberado do Serviço de Medicina Nuclear com uma taxa de dose superior aos demais procedimentos, fato que pode ser justificado pelas duas administrações do radiofármaco, o que resulta em maior potencial de dose, Figura 33.

Figura 33. Estimativa da variação da taxa de dose apresentada pelos pacientes radioativos no período de 24 horas logo após a liberação da clínica de Medicina Nuclear.

Os procedimentos que utilizaram o radioisótopo ^{18}F , na sua forma de ^{18}F -FDG ou ^{18}F -NaF, apresentaram menor potencial de dose a terceiros após os pacientes serem liberados da clínica de Medicina Nuclear, isto tendo como principais justificativas a meia-vida efetiva do radiofármaco e o tempo de permanência do paciente radioativo dentro da clínica. Observou-se que em um período de

aproximadamente até 10 horas após a liberação do Serviço, pacientes injetados com tais substâncias conseguem eliminá-las quase que por completo.

Quando os resultados encontrados neste estudo são comparados com a literatura científica, observamos que existem divergências em relação aos dados encontrados, por exemplo: as taxas de dose medidas nos pacientes para cintilografia óssea logo após a incorporação do radiofármaco, $18,32 \pm 1,60 \mu\text{Sh/h}$ a 1 metro e $5,83 \pm 0,70 \mu\text{Sh/h}$ a 2 metros, são compatíveis com os resultados indicados por Standard e colaboradores [46], os quais indicaram taxas de dose de $16 \pm 3 \mu\text{Sh/h}$ a 1 metro e $6 \pm 1 \mu\text{Sh/h}$ a 2 metros, correspondendo a uma diferença de aproximadamente 13% e 3%, respectivamente, a 1 e 2 metros. Cronin e colaboradores [47] encontraram semelhante resultado para a taxa de dose por atividade administrada no exame de PET/CT em que se administrou ^{18}F -FDG ($0,04 (\mu\text{Sh/h})/\text{MBq}$), o que é similar ao encontrado nesse estudo. Já Mountford e colaboradores [48] encontraram uma taxa de dose de $0,01 (\mu\text{Sh/h})/\text{MBq}$ a 1,0 metro para o estudo de cintilografia óssea com $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP, enquanto nosso estudo indicou um valor de $0,02 (\mu\text{Sh/h})/\text{MBq}$. Embora tenha sido utilizado semelhante método de monitoramento de pacientes, não foi possível levantar a razão de tal discrepância; todavia, os equipamentos utilizados para o monitoramento de pacientes foram diferentes e a taxa de dose é fortemente influenciada pelo campo de radiação na proximidade do detector e o que sabemos é que um Serviço de Medicina Nuclear apresenta variação da taxa de dose em seus diferentes ambientes de acordo com a movimentação dos pacientes radioativos.

Alguns estudos têm contribuído para avaliar as diferenças entre as taxas de exposição emitidas por fontes radioativas pontuais e aquelas advindas de pacientes radioativos. Yi e colaboradores [35] identificaram que pacientes radioativos podem apresentar taxas de exposição com valores de até 73%, 50% e 60% inferiores às aquelas apresentadas, respectivamente, por fontes de ^{131}I , ^{18}F e $^{99\text{m}}\text{Tc}$, como já indicado anteriormente neste trabalho. Willegaignon e colaboradores [32] identificaram semelhante diferença para o ^{131}I , além de estudar a variação da taxa de exposição proveniente de pacientes ao longo do tempo após a incorporação deste radioisótopo. Esta informação é importante tendo em vista que os cuidados de radioproteção são traçados com base, geralmente, em fontes pontuais e não em

pacientes radioativos reais, muito menos no decréscimo dessa taxa de dose em função do tempo, conforme evidenciamos no presente estudo.

A diferença entre as taxas de dose reais apresentadas pelos pacientes e aquelas estimadas por modelos matemáticos para fontes pontuais, não deveria ser negligenciada durante a elaboração de cuidados de radioproteção com pacientes radioativos, pois ao se considerar a taxa de dose real apresentada por eles, há de se esperar, inequivocadamente, uma flexibilidade nos cuidados de radioproteção com impacto direto nos custos sociais. Um exemplo de tal impacto em cuidados de radioproteção pode se dado pela série de estudos realizados por Willegaignon^[32,36] e colaboradores em que ficou demonstrada a possibilidade, em se partindo do real potencial de dose a terceiros apresentado por pacientes tratados com ^{131}I , proceder este tipo de terapia em regime ambulatorial e não de internação hospitalar obrigatório, algo que ao mesmo tempo humaniza e reduz custos associados a procedimentos de Medicina Nuclear e aqui, o mesmo pensamento pode ser aplicado para exames diagnósticos empregando-se diferentes radiofármacos.

Khanal e colaboradores^[20], para calcular o potencial de dose oferecido a terceiros por pacientes submetidos a cintilografia renal dinâmica, monitoraram os pacientes em dois momentos, em 25 minutos e 3 horas após a administração do radiofármaco. Em 25 minutos após a administração, a taxa de dose apresentada a 1 e 2 metros foi de, respectivamente, $7,2 \pm 2,1 \mu\text{Sh/h}$ e $4,5 \pm 1,3 \mu\text{Sh/h}$ para uma média de atividade administrada de $423,42 \pm 2,0 \text{ MBq}$. Através destes dados, o mesmo realizou um cálculo para estimar a dose oferecida a terceiros por tais pacientes radioativos a uma distância de 0,25 metros o que trouxe um potencial de dose acumulada de $234,4 \pm 74,8 \mu\text{Sv}$, estando assim, familiares e indivíduos do público sujeitos a uma dose dentro dos limites aceitáveis e estabelecidos pelas comissões regulamentadoras. O potencial de dose apresentada por Khanal possui grande diferença da encontrada neste trabalho, visto que os resultados da presente pesquisa foram levantados com base na biocinética e taxa de dose real apresentada pelos pacientes individualmente. No entanto, considerando a dose total acumulada, partindo-se do momento em que o paciente é liberado do Serviço de Medicina Nuclear e aplicando-se a mesma metodologia adotado por Khanal e colaboradores, este trabalho permite indicar um valor de dose acumulada de 1,01 mSv, o que, considerando as incertezas, está dentro dos limites aceitáveis para membros do público, bem como bem abaixo do limite para exposições em que os familiares

poderiam receber (exposições médicas), que seria no patamar de 5,0 mSv por procedimento^[26].

Em procedimentos diagnósticos em Medicina Nuclear, Kim e colaboradores^[28] monitoraram um grupo de pacientes utilizando a mesma metodologia apresentada neste trabalho, monitorando os procedimentos de cintilografia óssea com ^{99m}Tc -MDP e PET/CT com ^{18}F -FDG. Nesse trabalho, Kim identificou uma redução de aproximadamente 70% na taxa de dose decorridos 90 minutos da administração do radioisótopo ^{18}F em exames de PET/CT e mesma redução em 200 minutos da administração do ^{99m}Tc para cintilografia óssea, isto quando comparadas com as taxas de dose apresentadas pelos pacientes logo após a incorporação dos radioisótopos. No nosso trabalho, encontramos uma redução na taxa de dose de aproximadamente 74% e 75% para os respectivos exames durante o intervalo em que esses pacientes permaneceram dentro da clínica de Medicina Nuclear, ou seja, cerca de 3,5 horas para exames de PET/CT e 5 horas para exames de cintilografia óssea.

Pelos dados apresentados nesse estudo, observamos que, para todos os exames diagnósticos, o máximo potencial de dose acumulado para qualquer indivíduo que permanece próximo aos pacientes após serem liberados da clínica e até a completa excreção do radiofármaco por eles não ultrapassaria 218 μSv à 1,0 e 73 μSv à 2,0 metros (cintilografia do miocárdio com ^{99m}Tc – MIBI), isto permitindo concluir que cuidados de radioproteção baseados no potencial de exposição oferecido por esses pacientes a terceiros poderiam ser mais brandos ou inexistentes tendo em vista que no pior cenário possível, esse potencial de dose não ultrapassaria os valores estabelecidos em norma, ou seja, 1,0 mSv para membros do público e 5,0 mSv para familiares.

Em relação à exposição interna devido a ingestão ou contaminação interna por elementos radioativos excretados pelos pacientes, o pior cenário seria o de pacientes em período de lactação. Em um estudo feito por Svegborg e colaboradores^[46], mostrando a excreção de diversos radiofármacos administrados em lactantes, para analisar o nível de excreção do material radioativo através do leite e consequentemente a dose oferecida ao filho, foram analisados 16 radiofármacos, dentre eles 5 são estudados nesta pesquisa. O pesquisador analisou o leite retirado em diversos momentos e por meio destes resultados estimou a dose

oferecida ao filho. Concluiu que para lactantes administradas com $^{131}\text{I-Nal}$, radiofármaco presente neste estudo, deverá suspender a amamentação por um período de até 12 horas. Para os outros radiofármacos, entre eles, $^{99\text{m}}\text{Tc-MDP}$, $^{99\text{m}}\text{Tc-DMSA}$, $^{99\text{m}}\text{Tc-MIBI}$ e $^{18}\text{F-FDG}$, a amamentação não precisaria ser cessada em nenhum momento após a alta do Serviço de Medicina Nuclear. Tal informação complementa a presente pesquisa para a afirmação de que os cuidados de radioproteção, mesmo para lactantes poderiam ser mais brandos, bem como dependeriam do radiofármaco administrado.

Barllet^[34] em uma pesquisa envolvendo 12 procedimentos diagnósticos de Medicina Nuclear, 4 deles presentes neste trabalho ($^{99\text{m}}\text{Tc-MDP}$, $^{99\text{m}}\text{Tc-DMSA}$, $^{99\text{m}}\text{Tc-MIBI}$, $^{18}\text{F-FDG}$), monitorou a taxa de dose oferecida por pacientes quando da liberação deles da clínica, observando que a maior taxa de dose foram originadas por pacientes submetidos aos exames de cintilografia do miocárdio ($^{99\text{m}}\text{Tc-MIBI}$) e PET/CT ($^{18}\text{F-FDG}$), tendo como justificativa a dupla administração e o tempo de permanência dos pacientes no setor, respectivamente. Através dos valores coletados, Barllet^[34] também estimou a dosimetria interna de acordo com o modelo oferecido pela ICRP ^[44]. Os valores encontrados em dosimetria são compatíveis com os encontrados e demonstrados nesta presente pesquisa, o que torna os resultados de nosso estudo compatíveis com os da literatura. Em questões de proteção radiológica, a dose oferecida a terceiros, de acordo com a pesquisadora, é relativamente baixa e dentro do estipulado por comissões regulamentadoras internacionais, reforçando a não necessidade de cuidados de radioproteção para pacientes submetidos a procedimentos diagnósticos em Medicina Nuclear, salvo situações mais específicas como a amamentação, mesmo para pacientes que são liberados com a taxa de dose mais elevada, pois neste caso, observa-se que a meia-vida efetiva também é menor, resultando em uma menor dose a terceiros. No entanto, tal observação é questionável pelos dados aqui levantados, tendo em vista a relação entre a meia-vida efetiva encontrada para o $^{99\text{m}}\text{Tc-MIBI}$, taxa de dose com a qual o paciente foi liberado da clínica e potencial de dose que pacientes injetados com este radiofármaco é capaz de oferecer a terceiros.

Este estudo permitiu levantar o potencial de dose oferecido por pacientes radioativos a outros indivíduos durante a realização de exames diagnósticos em Medicina Nuclear, conduzindo a um questionamento sobre a real necessidade de se

atribuir cuidados de radioproteção nesses procedimentos, isto tendo por base, a taxa de dose proveniente dos pacientes, a meia-vida efetiva, o potencial de dose nos piores cenários possíveis, o público crítico exposto (familiares) e limites de dose indicados em normas nacionais e internacionais.

5 TRABALHOS FUTUROS

Com esta pesquisa científica houveram questionamentos a serem respondidos em trabalhos futuros, dos quais estarão relacionados com o tema abordado. São eles:

- Aumento de maior número de procedimentos diagnósticos, por exemplo, inclusão do ^{67}Ga e ^{11}C ;
- Estudo da viabilidade de se otimizar as atividades administradas nos exames de cintilografia do miocárdio, visando reduzir o potencial de dose que esses pacientes podem oferecer a terceiros;
- Estudo da aplicação dos resultados desta pesquisa em cálculos de blindagem, visando estimar a redução de custos devido o potencial de dose real oferecido por pacientes radioativos ao invés de fontes pontuais,
- Estudo das doses envolvidas em procedimentos inalatórios de Medicina Nuclear

6 CONCLUSÕES

Com esta pesquisa foi possível identificar o potencial de dose oferecido por pacientes radioativos à terceiros, além da dosimetria interna de pacientes devido a incorporação de radiofármacos. Também foi possível estimar a biocinética, em alguns casos estimulada por hidratação (água), e a meia-vida efetiva dos radiofármacos administrados.

A atividade administrada ao paciente por peso corpóreo (MBq/kg) não é proporcional à dose oferecida a terceiros, visto que, cada paciente possui índice de massa corporal diferente, o que permite uma possível blindagem natural e específica de cada um para a mesma quantidade de atividade administrada, além de apresentar uma biocinética particular, interferindo diretamente na taxa e potencial de dose apresentada por eles.

Para procedimentos envolvendo emissores de pósitrons espera-se que a taxa de dose emitida pelos pacientes logo após a administração do radiofármaco seja maior quando comparada com os outros elementos radioativos, no entanto, quando considerado o período pós alta do Serviço de Medicina Nuclear, a dose oferecida a outros indivíduos é menor que os outros elementos estudados neste trabalho. Tal fato é explicado pelo período que este tipo de paciente permanece no Setor, a meia-vida física do radioisótopo ^{18}F aliada a sua excreção biológica. No entanto, profissionais da saúde e, ou, todos os envolvidos durante o procedimento diagnóstico, tendem a receber uma maior exposição.

Baseando-se nos dados levantados neste trabalho, constatou-se que pacientes submetidos a procedimentos diagnósticos em Medicina Nuclear não necessitariam de cuidados de radioproteção visando proteger terceiros das exposições, visto que a dose oferecida aos mesmos é razoavelmente baixa, ou seja, abaixo dos limites preconizados por comissões nacionais e internacionais, seja para para indivíduos do público (1,0 mSv) ou para familiares (5,0 mSv por procedimento).

REFERENCIAS

- [1] Willegaignon, J. Princípios Básicos da Terapia com Radionuclídeos. In: Fausto Haruki Hironaka; Marcelo Tatit Sapienza; Carla Rachel Ono; Marcos Santos Lima; Carlos Alberto Buchpiguel. (Org.). Medicina Nuclear: Princípios e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Atheneu, 2012, v. 1, p. 433-442.
- [2] Fausto Haruki Hironaka; Marcelo Tatit Sapienza; Carla Rachel Ono; Marcos Santos Lima; Carlos Alberto Buchpiguel. Medicina Nuclear, princípios e aplicações. 2 ed. São Paulo: Atheneu, 2017, v. 2, p. 113-125.
- [3] Bushong SC. Ciência radiológica para tecnólogos. 9ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier; 2010.
- [4] Thomas HM, Balukrishna S, Devakumar D, Muthuswamy P, Samuel EJ. Can positron emission tomography be more than a diagnostic tool? A survey on clinical practice among radiation oncologists in India. Indian J Cancer. 2014 Apr-Jun;51(2):145-9
- [5] Blumgrst, H.L.; Yens, O.C. Studies on the velocity of blood flow: I. The method utilized. J. Clin. Invest. v.4, n.1, p.1-13, 1926
- [6] Hertz, S.; Robert, A.; Evans, R.D. Radioactive iodine as an indicator in the study of thyroid physiology. Proc. Soc. Exptl. Biol.Med., v.38, p.510-513, 1938
- [7] Harper PV, Beck R, Charleston D, Lathrop KA. Optimization of a scanning method using technetium-99m. Nucleonics. 1964;22(1):50–4.
- [8] Oliveira, R. S; Leão, A. M.A. História da radiofarmácia e as implicações da Emenda Constitucional N.49.Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences vol. 44, n. 3, ± jul./set., 2008
- [9] Pozzo L, Coura Filho G, Osso Júnior JA, Squair PL. SUS in nuclear medicine in Brazil: analysis and comparison of data provided by Datasus and CNEN. Radiol Bras. 2014 May-Jun;47(3):141-8.
- [10] Silva, C. B. Caracterização de uma matriz detectora cintiladora para aquisição de imagem 2D da região folicular da glândula tireóide por emissão radioativa usando

simulação Monte Carlo. Rio de Janeiro: 2007. Tese (Doutorado). – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE.

[11] Bitteli, T. Física e dosimetria das radiações. Atheneu. 308 – 310, 2006.

[12] Thrall. J. Ziessman, H. Nuclear Medicine: the requisites. 2 ed. Boston: Copyright 2001. p 12-13.

[13] Philip Ward. EANM: PET and PET/CT scans grow by 21% a year. [<http://www.auntminnieeurope.com/index.aspx?sec=ser&sub=def&pag=dis&ItemID=60566>]. Acessado em 19 set 2018.

[14] Beyer T, Czernin J, Freudenberg LS. Variations in clinical PET/CT operations: results of an international survey of active PET/CT users. J Nucl Med. 2011 Feb;52(2):303-10.

[15] International Atomic Energy Agency (IAEA). Justification of Medical Exposure in Diagnostic Imaging. Proceedings Series. Vienna, 2011.

[16] International Commission on Radiological Protection. Radiological Protection in Medicine. ICRP 105. 2007.

[17] Ninkovic MM, Raicevic JJ, Adrovic F. Air kerma rate constants for gamma emitters used most often in practice. Radiat Prot Dosimetry. 2005;115(1-4):247-50.

[18] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2012 Report. New York, 2015

[19] Lee SY, Lim HS, Lee J, Kim HS. Evaluation of diagnostic medical exposure in Republic of Korea. Radiat Prot Dosimetry. 2015 May 21. Pag.1-8.

[20] Krawczyk E, Piñero-García F, Ferro-García MA. Discharges of nuclear medicine radioisotopes in Spanish hospitals. J Environ Radioact. 2013 Feb;116:93-8.

[21] Petrucci C, Traino AC. Focus on the legislative approach to short half life radioactive hospital waste releasing. Phys Med. 2015 Nov;31(7):726-32.

[22] International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. 2007.

- [23] Prekeges JL. Radiation hormesis, or, could all that radiation be good for us? J Nucl Med Technol. 2003 Mar;31(1):11-7.
- [24] Stabin, Michael G. Fundamentals of Nuclear Medicine dosimetry. Tennessee: Springer, 2008. V.1, p. 171-172.
- [25] Tahuata, Luis; Salati, Ivan; Di Prinzio, Renato; Di Prinzio, Antonieta R. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. Instituto de Radioproteção e dosimetria. Comissão Nacional de Energia Nuclear do rio de Janeiro. Novembro, 2013. P, 119-130.
- [26] Comissão Nacional de Energia Nuclear. Restrição de dose, níveis de referencias ocupacionais e classificação de áreas. CNEN NN 3.01. Abril 2011
- [27] Willegaignon J, Stabin MG, Guimarães MI, Malvestiti LF, Sapienza MT, Maroni M, Sordi GM. Evaluation of the potential absorbed doses from patients based on whole-body ¹³¹I clearance in thyroid cancer therapy. Health Phys. 2006 Aug;91(2):123-7.
- [28] H. S. Kim , J. H. Cho , S. G. Shin , K. R. Dong , W. K. Chung & J. E. Chung (2013) A study on quantitative analysis of exposure dos
- [29] American Thyroid Association Taskforce On Radioiodine Safety¹, Sisson JC, Freitas J, McDougall IR, Dauer LT, Hurley JR, Brierley JD, Edinboro CH, Rosenthal D, Thomas MJ, Wexler JA, Asamoah E, Avram AM, Milas M, Greenlee C. Radiation safety in the treatment of patients with thyroid diseases by radioiodine ¹³¹I : practice recommendations of the American Thyroid Association. Thyroid. 2011 Apr;21(4):335-46.
- [30] Willegaignon J, Sapienza M, Ono C, Watanabe T, Guimarães MI, Gutterres R, Marechal MH, Buchpiguel C. Could the treatment of differentiated thyroid carcinoma with 3.7 and 5.55 GBq of (¹³¹I)NaI, on an outpatient basis, be safe? Nucl Med Commun. 2009 Jul;30(7):533-41.
- [31] Barrington SF, O'Doherty MJ, Kettle AG, Thomson WH, Mountford PJ, Burrell DN, Farrell RJ, Batchelor S, Seed P, Harding LK. Radiation exposure of the families of outpatients treated with radioiodine (iodine-131) for hyperthyroidism. Eur J Nucl Med. 1999 Jul;26(7):686-92.

- [32] Willegaignon J, Sapienza M, Ono C, Watanabe T, Guimarães MI, Gutterres R, Marechal MH, Buchpiguel C. Outpatient radioiodine therapy for thyroid cancer: a safe nuclear medicine procedure. *Clin Nucl Med*. 2011 Jun;36(6):440-5.
- [33] International Commission on Radiological Protection. Release of Patients After Radionuclide Therapy with Unsealed Radionuclides, Publication 94, Elsevier, Oxford (2004).
- [34] Bartlett ML. Estimated Dose from Diagnostic Nuclear Medicine Patients to People Outside the Nuclear Medicine Department. *Radiat Prot Dosimetry*. 2013 Nov;157(1):44-52.
- [35] Yi Y, Stabin MG, McKaskle MH, Shone MD, Johnson AB. Comparison of measured and calculated dose rates near nuclear medicine patients. *Health Phys*. 2013 Aug;105(2):187-91.
- [36] Díaz Barreto M, López Bejerano GM, Varela Corona C, Fleitas Estévez I. On the safety of persons accompanying nuclear medicine patients. *Radiat Prot Dosimetry*. 2012 Dec;152(4):313-6.
- [37] Gomez-Palacios M, Terrón JA, Domínguez P, Vera DR, Osuna RF. Radiation doses in the surroundings of patients undergoing nuclear medicine diagnostic studies. *Health Phys*. 2005 Aug;89(2 Suppl):S27-34.
- [38] *Liv-Inger Stenstad, Geir Andre Pedersen, Andreas Dypvik Landmark, Berit Brattheim*. Nuclear radiation dose to the surroundings from patients who are undergoing nuclear medicine examinations. *Radiography Open* 2014 Vol. 1, pg:10-18.
- [39] Cherry. S. R; Sorenson, J.A; Phelps, M.E. *Physics in Nuclear Medicine*. 3° ed. Saunders. USA, 2003. p. 405-406.
- [40] Mcparland, B.J. *Nuclear Medicine Radiation Dosimetry. Advanced Theoretical Principles*. Ed Springer. USA, 2010. p. 455-461.
- [41] Comissão Nacional de Energia Nuclear. Restrição de dose, níveis de referencias ocupacionais e classificação de áreas. CNEN NN 3.01. Abril 2011

- [20] O. B. Khanal, D. Thapa, B. R. Shah, D. D. Mulmi, A. Shah, K. Adhikari, S. K. Aryal. Study of the Exposure Rate from the Patients Injected with Radiopharmaceutical. *Int J Appl Sci Biotechnol*, Vol. 2(3): 336-341.
- [42] Willegaignon, J; Sapienza, Marcelo; Buchpiguel, Carlos. Comparison os diferente dosimetric methods for red marrow absorbed dose calculatiom in thyroid câncer therapy. Oxford University Press, 2012
- [43] Stabin, Michael G; Siegel, Jeffry A. RADAR Dose Estimate Report: A Compendium of Radiopharmaceutical Dose Estimates Based on OLINDA/EXM Version 2.0. *Journal Nuclear Medicine*, 2018.
- [44] International Commission on Radiological Protection. The 2008 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 106. 2008.
- [45] Willegaignon J, Pelissoni RA, Lima BCGD, Sapienza MT, Coura-Filho GB, Queiroz MA, Buchpiguel CA. Estimating 131I biokinetics and radiation doses to the red marrow and whole body in thyroid cancer patients: probe detection versus image quantification. *Radiol Bras*. 2016 Mai/Jun;49(3):150–157.
- [46] Svegborg,S; Emamifar, A; Hess, S. FDG-PET/CT Findings in a Patient with Polymyalgia Rheumatica and Accompanying Remitting Seronegative Symmetrical Synovitis with Pitting Edema. *Razavi int J Med*. Nov, 2016
- [47] Cronin, P; Haywood, M; Masterson, L. Improving the efficacy of PET-CT imaging in head and neck cancer management and surveillance through the multidisciplinary team: A multicentre, retrospective cohort analysis of 51 patients. *Clinical Otolaryngology*. Fev, 2018.
- [48] Mountford, M.J; O'Doherty b, M,J. Exposure of critical groups to nuclear medicine patients. *Science Direct*, 1999.

ANEXO A

Data: ____/____/____

Nome do paciente: _____

Idade: _____

Peso (kg): _____ Altura: _____

Atividade Administrada: _____ mCi Horário: ____:____

Exame realizado: _____

Mensuração de taxa de dose											
MOMENTOS		Hora	BG da sala [μSv/h]			Média [μSv/h]	Hora	Taxa de dose do paciente [μSv/h]			Média [μSv/h]
1º Monitoração (Pós- administração)	1 m										
	2 m										
2º Monitoração (Antes do exame e antes micção)	1 m										
	2 m										
3º Monitoração (Antes do exame e pós micção)	1 m										
	2 m										
4º Monitoração (Alta do setor)	1 m										
	2 m										

Tempo médio que permaneceu no Setor (após a administração): _____.

Estimativa de atividade na alta: _____ mCi - _____ GBq

Tempo médio decorrido da administração até a primeira micção: _____.