

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E  
NUCLEARES  
PROTEN/UFPE – CRCN-NE/CNEN**

**VANILDO JÚNIOR DE MELO LIMA**

**DESENVOLVIMENTO DE FANTOMAS MESH INFANTIS,  
MORFOLOGICAMENTE CONSISTENTES COM A ANATOMIA HUMANA, PARA  
USO EM DOSIMETRIA**

**RECIFE**

**2011**

VANILDO JÚNIOR DE MELO LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE FANTOMAS MESH INFANTIS,  
MORFOLOGICAMENTE CONSISTENTES COM A ANATOMIA HUMANA, PARA  
USO EM DOSIMETRIA**

Tese submetida ao Doutorado do programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, da Universidade Federal de Pernambuco, como um dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Área de Concentração: Dosimetria e Instrumentação Nuclear.

**Orientador:** Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

**Co-orientadores:** Prof. Dr. Richard Kramer e Prof. Dr. José Wilson Vieira

RECIFE

2011

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Marcos Aurélio Soares da Silva, CRB-4 / 1175

L732d

Lima, Vanildo Júnior de Melo.

Desenvolvimento de fantomas mesh infantis, morfológicamente consistentes com a anatomia humana, para uso em dosimetria / Vanildo Júnior de Melo Lima - Recife: O Autor, 2011.

89 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Drº. Carlos Alberto B. de Oliveira Lira.

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

Inclui Referências e Apêndices.

1. Energia Nuclear. 2.Dosimetria. 3.Fantoma de Criança. 4.Fantoma mesh. 5.Código Monte Carlo I.Lira, Carlos Alberto Brayner de Oliveira (orientador). II. Título.

612.01448 CDD (22. ed.)

UFPE

BCTG/2011-262

**DESENVOLVIMENTO DE FANTOMAS MESH INFANTIS,  
MORFOLOGICAMENTE CONSISTENTES COM A ANATOMIA  
HUMANA, PARA USO EM DOSIMETRIA**

**Vanildo Júnior de Melo Lima**

**APROVADO EM: 16.05.2011**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira**

**CO-ORIENTADORES: Prof. Dr. Richard Kramer**

**Prof. Dr. José Wilson Vieira**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Fernando Roberto de Andrade Lima – CRCN-NE/CNEN**

---

**Prof. Dr. Richard Kramer – DEN/UFPE- Professor Visitante**

---

**Prof. Dr. Borko Stosic – DEINFO/UFRPE**

---

**Prof. Dr. Eduardo César de Miranda Loureiro – Escola Politécnica/UFPE**

---

**Prof. Dr. Hélio Yurlyaz – IPEN-CNEN/SP**

**Visto e permitida a impressão**

---

**Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE**

Aos meus pais,

Vanildo de Melo Lima e

Maria do Socorro de Novaes Melo.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus excelentes orientadores, Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira, Richard Kramer e José Wilson Vieira. Ao talentoso Vagner Ferreira Cassola. A tio José de Melo. Ao Departamento de Energia Nuclear e ao Departamento de Anatomia da UFPE. À minha família e meus amigos. Aos meus alunos.

Agradeço a Magali, Nilvânia, Adene, André Maciel Neto, Elmo Silvano de Araújo, Patrícia Araújo, Williams Barbosa, Pietro, Antônio Jorge, Marcos Ely, prof. Elias, prof. Clóvis Hazin, prof. Fernando, Auricéa Fraga, sr. Antônio, sr. Edvaldo, Edevaldo, Iane, Carlos Almeida, Mariana Brayner, Marcela, Adriano, Alexandra Carolina, Fernanda, Paula, Irami, Samuel, profa. Helen Khoury, Edvane, Êudice Vilela, Eduardo Loureiro, prof. Arno, Wagner Eustáquio, Jair, Cláudio Meneses, Ferdinand, Maria, Paulo Peixoto, Viriato, Igor, Kléber, Konrado, Alex, Antonio Edson, Iane, João Filho, prof. Colaço, Vieira, Matias, Fernanda Villarouco, Ademar, Alexandre Bittencourt, Tetsuo Tashiro, Gil Clemente, Hans Menzel, Salete, Rodrigo, Aldo, Accioly, Cláudia Sampaio, Lindeval, prof. Rajendra, Jennecey Cavalcanti, Eliane Gama, prof. Geraldo, profa. Irmã Clara, D. Erilda, prof. Edinaldo, Helmut, Gleyce, Lívio Bruno, prof. Chico, Odnilson e prof. Antonino, em nome dos quais agradeço aos meus colegas, parceiros, amigos, entusiastas e professores, por terem me tratado com fraternidade e presteza e por terem dedicado um pouco de seu tempo ao meu desenvolvimento técnico-científico e pessoal. Tentei citar a todos, esqueci alguns, é certo, sem designar em que teriam contribuído, por perceber que, em várias situações, diversos valores e experiências se entrecruzaram. Neste momento, o que me ocorre para com todos é gratidão.

Agradeço a todos os professores que me acompanharam, em toda a minha vida. Esta conquista, que se materializa neste texto, é resultado direto do seu trabalho e dedicação.

“Se as coisas não saíram como planejei,  
posso ficar feliz por ter hoje para recomeçar”.  
(Charles Chaplin)

# **DESENVOLVIMENTO DE FANTOMAS MESH INFANTIS, MORFOLOGICAMENTE CONSISTENTES COM A ANATOMIA HUMANA, PARA USO EM DOSIMETRIA**

**Autor:** Vanildo Júnior de Melo Lima

**Orientador:** Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

**Co-orientadores:** Prof. Dr. Richard Kramer e Prof. Dr. José Wilson Vieira

## **Resumo**

Para o propósito de evitar os efeitos deletérios determinísticos e minimizar a ocorrência dos efeitos estocásticos, em pessoas expostas à radiação ionizante, se faz necessário conhecer as doses equivalentes ou absorvidas em órgãos e tecidos radiosensíveis do corpo humano. Entretanto, estes valores não podem ser medidos diretamente no indivíduo exposto e, por esta razão, são usados fantomas humanos, que são representações físicas ou computacionais, utilizados para determinar coeficientes de conversão entre a dose absorvida nos órgãos e tecidos e grandezas mensuráveis. O procedimento de uso dos fantomas físicos é sabido ser caro e demanda muito tempo, devido a um laborioso procedimento experimental e restrições de segurança. Com o advento dos métodos de simulação Monte Carlo e o surgimento dos computadores, tornou-se gradualmente possível estimar doses absorvidas em órgãos e tecidos em fantomas computacionais. Cada fantoma computacional define não somente as características exteriores do corpo humano, mas inclui detalhes sobre órgãos internos tais como seus volumes e formas. Quando são usadas informações sobre densidade e composição elementar dos tecidos, um fantoma computacional pode ser acoplado a um código de transporte de radiação Monte Carlo para simular interações teciduais e deposição de energia no corpo humano por diversos tipos de radiação. Embora a fonte da radiação tenha que ser matematicamente modelada, o procedimento computacional é, em geral, muito vantajoso em termos da sua versatilidade, eficiência, precisão e segurança. A mais recente geração de fantomas computacionais recebeu a denominação de fantomas mesh. Para sua

construção não são essenciais imagens de tomografia computadorizada ou de ressonância magnética e sim a descrição anatômica detalhada das estruturas de interesse. Estes fantasmas permitem representar o indivíduo em diferentes posturas e em diferentes estágios do desenvolvimento do corpo humano, e ainda evitam implicações éticas provocadas pelas técnicas de obtenção das imagens dos indivíduos. Neste trabalho são apresentados dois casais de fantasmas mesh referenciais, para crianças com 5 anos e 10 anos de idade. Eles foram construídos utilizando-se ferramentas computacionais usadas pela comunidade de computação gráfica, para a criação de filmes de animação. Os parâmetros adotados para as massas dos diferentes órgãos e tecidos foram os recomendados pela publicação 89 da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), para estudos populacionais. Os volumes destes órgãos e tecidos foram calculados utilizando-se densidades fornecidas pela Comissão Internacional de Unidades e Medidas Radiológicas (ICRU). Quanto à disposição dos diferentes órgãos e tecidos, foram consultadas descrições da anatomia humana. As versões voxelizadas dos fantasmas foram conectadas ao código Monte Carlo EGSnrc. As aplicações dosimétricas apresentadas mostram exemplos de que doses absorvidas para órgãos e tecidos, estimadas com estes fantasmas infantis, são razoáveis e comparáveis com dados correspondentes obtidos em outros fantasmas.

**Palavras-chave:** fantoma de criança, fantoma mesh, dosimetria, Monte Carlo, EGSnrc.

# **DEVELOPMENT OF PAEDIATRIC MESH PHANTOMS, MORFOLOGICALLY CONSISTANT WITH HUMAN ANATOMY, FOR USE IN DOSIMETRY**

**Author:** Vanildo Júnior de Melo Lima

**Advisor:** Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

**Co-advisors:** Prof. Dr. Richard Kramer and Prof. Dr. José Wilson Vieira

## Abstract

In order to avoid deleterious deterministic effects and to minimize the occurrence of stochastic effects in humans exposed to ionising radiation, it is necessary to know the absorbed or equivalent doses in radiosensitive organs and tissues of the human body. However, as these quantities cannot be measured directly in an exposed individual, phantoms, which are physical or computational representations of the human body, are used to determine conversion coefficients (CCs) between organ and tissue absorbed doses and measurable quantities. The use of physical phantoms is known to be expensive and time consuming because of laborious experimental procedures and security constraints. The development of modern computers and especially numerical tools like the Monte Carlo method made it possible to calculate organ and tissue absorbed doses in computational human phantoms. Every computational phantom describes not only the body surface but also many details about internal organs, like their volume and form. When using information about elemental tissue compositions and densities, computational phantoms can be coupled to a Monte Carlo radiation transport code to simulate tissue interactions and energy depositions for any type of radiation. Once the radiation source has mathematically been modelled, Monte Carlo dosimetry turned out to be very efficient, precise and free of security issues. Mesh phantoms, based on polygon mesh surfaces, represent the latest generation of anthropomorphic human models. For their development, only human atlases and 3D modelling software are necessary, i.e. using CT or NMR images of real persons is not anymore needed. Mesh phantoms can be modelled to represent individuals in different postures or in different stages of anatomical

development without having to face ethical problems when it comes to the acquisition of medical images. This study presents two couples of paediatric mesh phantoms, representing 5 and 10 year old male and female children. They have been modelled using computational tools developed by the computer graphics community for the production of animated films. Organ and tissue masses of the paediatric phantoms were taken from Publication No. 89 of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). Using tissue densities published by the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), corresponding organ and tissue volumes have been calculated. Shape, form and position of the organs have been determined based on the latest publications in the area of anatomy. The voxelized versions of the paediatric mesh phantoms were connected to the EGSnrc Monte Carlo code for the purpose of dosimetric calculations. The results show that organ and tissue absorbed doses in the paediatric phantoms are reasonable and comparable with corresponding data for other phantoms.

**Keywords:** paediatric phantoms, mesh phantoms, dosimetry, Monte Carlo, EGSnrc.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

		Página
<b>Figura 1</b>	Vista frontal dos fantasmas ORNL revisados: recém-nascido, 1 ano, 5 anos, 10 anos, 15 anos e adulto. (LEE <i>et al.</i> , 2007a).....	20
<b>Figura 2</b>	Vista frontal da série B de fantasmas computacionais de crianças da Universidade da Flórida. As imagens correspondem aos fantasmas de 9 meses (masculino), de 4 e 8 anos (femininos), de 11 e 14 anos (masculinos), respectivamente, da esquerda para direita (LEE <i>et al.</i> , 2006).....	22
<b>Figura 3</b>	Vista anterior da série de fantasmas híbridos da Universidade da Flórida (LEE <i>et al.</i> , 2010).....	23
<b>Figura 4</b>	A Família Virtual: Duke, Ella, Billie, Thelonious (da esquerda para a direita) (CHRIST <i>et al.</i> , 2010).....	24
<b>Figura 5</b>	Os modelos 3D RPI-P3, RPI-P6 e RPI-P9 (da esquerda para a direita) (XU <i>et al.</i> , 2007).....	25
<b>Figura 6</b>	Vista anterior dos fantasmas RPI-AM (à esquerda) e RPI-AF (à direita), são vistos ossos e alguns órgãos internos (ZHANG <i>et al.</i> , 2009).....	26
<b>Figura 7</b>	Vista frontal (A) e lateral esquerda (B) do fantoma FASH e vista frontal (C) e lateral esquerda (D) do fantoma MASH (CASSOLA <i>et al.</i> , 2010).....	26
<b>Figura 8</b>	Objetos 3D do esqueleto e de alguns órgãos, usados na construção dos fantasmas FASH e MASH (CASSOLA <i>et al.</i> , 2010, tradução nossa).....	27
<b>Figura 9</b>	Cenário da exposição antero-posterior do abdome para o fantoma MASH2_sta (em pé) em comparação com o MASH2_sup (deitado). FW = largura do campo; FH = altura do campo; o tamanho do campo do receptor da imagem está em azul e na entrada está em preto (CASSOLA <i>et al.</i> , 2010c, tradução nossa).....	27
<b>Figura 10</b>	Rim direito e glândula supra-renal. A, Glândula supra-renal. B, Rim, vista da superfície. C, secção longitudinal do rim mostrando a pelve. (transcrição da figura 17-14 do original) (GRAY, 1977).....	31

<b>Figura 11</b>	Vista ventral das vísceras abdominais após remoção do peritônio da parede abdominal dorsal, mostrando rins, glândulas supra-renais e grandes vasos. (transcrição da figura 17-15 do original) (GRAY, 1977).....	32
<b>Figura 12</b>	Faces ventrais dos rins mostrando as áreas de contato das vísceras vizinhas. (transcrição da figura 17-17 do original) (GRAY, 1977).....	32
<b>Figura 13</b>	Dissecção das vísceras abdominais; vista dorsal, mostrando relação dos rins ( <i>topographischen Anatomie</i> , de Corning, in Eycleshymer e Jones.). (transcrição da figura 17-16 do original) (GRAY, 1977).....	33
<b>Figura 14</b>	Face dorsal dos rins mostrando as áreas de relação com as paredes. (transcrição da figura 17-18 do original) (GRAY, 1977).....	34
<b>Figura 15</b>	Imagem da janela principal do software makeHuman, versão 0.9.1 RC1 (makeHuman, 2009), exibindo os itens de escolha do sexo, idade, forma do corpo, dentre outras opções.....	35
<b>Figura 16</b>	Imagem da janela 3D View do software Blender, versão 2.49b (Blender, 2010), exibindo órgãos como estômago, baço, parte dos pulmões e coração e o fígado sendo editado.....	36
<b>Figura 17</b>	Imagem da visão da câmera do software Blender (ROOSENDAAL, 2009), exibindo o contorno exterior do corpo do fantoma masculino de 10 anos.....	37
<b>Figura 18</b>	Imagem da janela principal do software ImageJ - versão 1.43k (RASBAND, 2009).....	37
<b>Figura 19</b>	Imagens da vista anterior (à esquerda), lateral esquerda (no centro) e posterior (à direita) de todos os órgãos e tecidos dos fantasmas masculinos de 5 e 10 anos de idade.....	41
<b>Figura 20</b>	Imagens da vista anterior (à esquerda), lateral esquerda (no centro) e posterior (à direita) de todos os órgãos e tecidos dos fantasmas femininos de 5 e 10 anos de idade.....	41
<b>Figura 21</b>	Imagens da vista anterior (à esquerda) e lateral (à direita) dos órgãos do sistema respiratório do fantoma de 10 anos de idade.....	43
<b>Figura 22</b>	Imagens da vista anterior (à esquerda) e posterior (à direita) dos órgãos do sistema digestório do fantoma de 10 anos de idade.....	44
<b>Figura 23</b>	Vista anterior dos fantasmas de 10 anos (A e C) e 5 anos (B e D), mostrando os sistemas circulatório (A e B) e linfático (C e D). Em vermelho, estão representadas as principais artérias dos membros, pescoço e tronco. Em azul, estão representadas as grandes veias do pescoço e tronco. Em verde, estão os linfonodos.....	47

<b>Figura 24</b>	Imagens da vista anterior (à esquerda) e lateral (à direita) dos órgãos do sistema urogenital feminino do fantoma de 5 anos de idade.....	48
<b>Figura 25</b>	Imagens da vista anterior (à esquerda) e lateral (à direita) dos órgãos do sistema urogenital masculino do fantoma de 5 anos de idade.....	49
<b>Figura 26</b>	Imagens da vista anterior dos fantasmas de 10 anos (à esquerda) e 5 anos (à direita), mostrando o esqueleto.....	50
<b>Figura 27</b>	Imagens da vista anterior (à esquerda), lateral esquerda (no centro) e posterior (à direita) dos esqueletos dos fantasmas de 5 e 10 anos de idade.....	51
<b>Figura 28</b>	Imagens da vista anterior (acima) e lateral esquerda (abaixo) dos dentes dos fantasmas de 5 anos (à esquerda) e 10 anos (à direita).....	52
<b>Figura 29</b>	Imagens da vista anterior (à esquerda), lateral esquerda (no centro) e posterior (à direita) dos fantasmas masculinos de 5 e 10 anos de idade....	53
<b>Figura 30</b>	Imagens da vista anterior (à esquerda), lateral esquerda (no centro) e posterior (à direita) dos fantasmas femininos de 5 e 10 anos de idade.....	53
<b>Figura 31</b>	Imagens da vista anterior (à esquerda) e lateral esquerda (à direita) de alguns dos demais órgãos e tecidos do fantoma de 5 anos de idade.....	54
<b>Figura 32</b>	Imagens de uma secção sagital (acima, à esquerda), de uma secção frontal (à direita) e de uma secção transversal (abaixo, à esquerda), em diferentes alturas do fantoma de 10 anos de idade. Alguns órgãos e tecido estão indicados.....	58
<b>Figura 33</b>	Vista lateral dos fantasmas infantis M05 e F10 e adultos MASH e FASH.....	61
<b>Figura 34</b>	Dose equivalente normalizada por kerma no ar na medula óssea vermelha (RBM) e nas células na superfície do osso (BSC) para exposição de corpo inteiro AP nos fantasmas masculinos infantil M05 e adulto MASH.....	62
<b>Figura 35</b>	Dose equivalente normalizada por kerma no ar na medula óssea vermelha (RBM) e nas células na superfície do osso (BSC) para exposição de corpo inteiro AP nos fantasmas femininos infantil F10 e adulto FASH.....	62
<b>Figura 36</b>	Dose equivalente normalizada por kerma no ar na parede do intestino delgado e nos rins para exposição de corpo inteiro AP nos fantasmas masculinos infantil M05 e adulto MASH.....	63
<b>Figura 37</b>	Dose equivalente normalizada por kerma no ar no pulmão e na parede do estômago para exposição de corpo inteiro PA nos fantasmas femininos infantil F10 e adulto FASH.....	64

<b>Figura 38</b>	Dose equivalente normalizada por kerma no ar nas glândulas salivares para exposição de corpo inteiro AP nos fantomas infantis F10 e MIRD5 de 10 anos (LEE <i>et al.</i> , 2007).....	65
<b>Figura 39</b>	Dose equivalente normalizada por kerma no ar no cérebro para exposição de corpo inteiro PA nos fantomas infantis M05 e MIRD5 de 5 anos (LEE <i>et al.</i> , 2007).....	66
<b>Figura 40</b>	Dose equivalente normalizada por kerma no ar na parede do coração para exposição de corpo inteiro ROT nos fantomas infantis M10 e MIRD5 de 10 anos (LEE <i>et al.</i> , 2007).....	66
<b>Figura 41</b>	Fração absorvida específica SAF (rins←pulmão) em função da energia dos fótons para os fantomas infantis F05, M10 e os fantomas MIRD5 de 5 e 10 anos usados pelo software OLINDA (STABIN <i>et al.</i> , 2005)....	67
<b>Figura 42</b>	Fração absorvida específica SAF (pulmão←tireóide) em função da energia dos fótons para os fantomas infantis F05, M10 e os fantomas MIRD5 de 5 e 10 anos usados pelo software OLINDA (STABIN <i>et al.</i> , 2005).....	67
<b>Figura 43</b>	Fração absorvida específica SAF (baço←fígado) em função da energia dos fótons para os fantomas infantis F05, M10 e os fantomas MIRD5 de 5 e 10 anos usados pelo software OLINDA (STABIN <i>et al.</i> , 2005)....	68

## LISTA DE TABELAS

		Página
<b>Tabela 1</b>	Principais características dos fantomas de 5 e 10 anos voxelizados.....	57
<b>Tabela 2</b>	Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma masculino de 5 anos com as da ICRP89.....	76
<b>Tabela 3</b>	Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma feminino de 5 anos com as da ICRP89.....	80
<b>Tabela 4</b>	Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma masculino de 10 anos com as da ICRP89.....	83
<b>Tabela 5</b>	Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma feminino de 10 anos com as da ICRP89.....	86
<b>Tabela 6</b>	Somatório das massas dos tecidos constituintes do esqueleto dos fantomas de 5 anos de idade e comparação com as massas de referência da ICRP89.....	89
<b>Tabela 7</b>	Somatório das massas dos tecidos constituintes do esqueleto dos fantomas de 10 anos de idade e comparação com as massas de referência da ICRP89.....	89

## SUMÁRIO

	Página
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Objetivo geral.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>18</b>
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Fantomas matemáticos.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 Fantomas de voxels.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3 Fantomas híbridos .....</b>	<b>22</b>
<b>3.4 Fantomas mesh .....</b>	<b>25</b>
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
<b>4.1 Construção tridimensional dos fantomas .....</b>	<b>29</b>
4.1.1 Anatomia dos órgãos e tecidos .....	29
4.1.2 Volume dos órgãos e tecidos .....	34
4.1.3 Construção dos órgãos e tecidos.....	35
<b>4.2 Avaliações dosimétricas .....</b>	<b>39</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>40</b>
<b>5.1 Órgãos e tecidos dos fantomas.....</b>	<b>42</b>
5.1.1 Sistema respiratório .....	42
5.1.2 Sistema digestório .....	44
5.1.3 Sistemas circulatório e linfático .....	46
5.1.4 Sistema urogenital .....	47
5.1.5 Sistema esquelético.....	49
5.1.6 Sistema tegumentar .....	52
5.1.7 Outros órgãos e tecidos.....	54
<b>5.2 Fantomas voxelizados.....</b>	<b>56</b>
<b>5.3 Avaliações dosimétricas .....</b>	<b>60</b>
5.3.1 Comparação com fantomas adultos.....	60
5.3.2 Comparação com fantomas infantis MIRD5 .....	64
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os seres vivos sempre estiveram expostos à radiação ionizante, proveniente de várias fontes naturais. No entanto, a descoberta dos raios-X por Roentgen, em 1895, e da radioatividade por Becquerel, em 1896, trouxeram, além de grandes benefícios, também danos inesperados. Por volta do ano de 1922, cerca de 100 radiologistas já tinham morrido por causa da exposição excessiva a este tipo de radiação (UNSCEAR, 1958). Tão logo os pesquisadores da época perceberam esses efeitos indesejáveis, eles procuraram determinar sob que condições era possível o uso com segurança da radiação ionizante.

Surgiu assim a radioproteção, com o propósito de evitar os efeitos deletérios determinísticos - opacidade do cristalino, por exemplo - , e minimizar os eventuais efeitos estocásticos - câncer, por exemplo - , em pessoas expostas à radiação. Para isso, se faz necessário conhecer as doses absorvidas em órgãos e tecidos radiosensíveis. Entretanto, estes valores não podem ser medidos diretamente no indivíduo exposto e, por esta razão, são usados fantasmas humanos, que são representações físicas ou computacionais, utilizados para estimar coeficientes de conversão entre a dose absorvida nos órgãos e tecidos e grandezas mensuráveis (CASSOLA *et al.*, 2010b).

Um fantoma físico é feito de materiais sólidos, equivalentes a ossos e tecido mole, que podem ser modelados nas formas da anatomia humana e então cortados em fatias, contendo cavidades para a colocação de dosímetros para radiação. O procedimento de uso de tais fantasmas físicos é sabido ser caro e demanda muito tempo, devido a um tedioso procedimento experimental e de segurança. Com o advento dos métodos de simulação Monte Carlo e o surgimento da primeira geração de computadores, para o propósito das pesquisas sobre armas nucleares nos anos 1940, tornou-se gradualmente possível estimar doses em órgãos em fantasmas computacionais. Cada fantoma computacional define não somente as características exteriores do corpo humano, mas inclui detalhes sobre órgãos internos tais como seus volumes, massas e formas. Acoplado a informações sobre densidade e composição química dos tecidos, um fantoma computacional permite a um código Monte Carlo simular interações e deposição de energia no corpo humano por diversos tipos de radiação. Embora um trabalho adicional seja necessário para especificar a fonte da radiação, o procedimento computacional é, em geral, muito vantajoso em termos da sua versatilidade, eficiência, precisão e segurança. (XU; ECKERMAN, 2010, p. 4, tradução nossa)

A primeira geração de fantasmas computacionais foi construída a partir da descrição matemática de sólidos geométricos, em que elipsóides, troncos de cone - dentre outros - representavam os órgãos e tecidos do corpo humano. Com o avanço das técnicas de obtenção

de imagens do corpo humano para finalidades médicas surgiram os fantasmas computacionais de voxel (também referenciados como fantasmas tomográficos), até então os mais sofisticados modelos virtuais (KRAMER *et al.*, 2003). Eles são construídos, predominantemente, a partir de imagens de tomografia computadorizada (TC) ou de ressonância magnética (RM) de indivíduos reais. Mas, por causa da própria proteção radiológica, é difícil encontrar imagens TC ou RM consecutivas do corpo humano completo. Além disso, praticamente todas as imagens TC ou RM do tronco humano são obtidas em decúbito dorsal (posição deitada de costas para o solo), o que causa compressão dos pulmões pelos órgãos abdominais. Naturalmente, essas posições dos órgãos não são realísticas quando se procura uma representação de uma pessoa em pé (CASSOLA *et al.*, 2010c).

A intenção de construir fantasmas antropomórficos mais realistas levou alguns pesquisadores a utilizarem softwares comumente usados pela comunidade de computação gráfica para produzirem órgãos puramente virtuais. Desse modo, objetos 3D foram criados para representar órgãos específicos, em casos não só em uma condição estática do corpo humano, mas em uma situação dinâmica, como a respiração ou com o coração em movimento (SEGARS, 2001); ou mesmo em situações em que imagens tomográficas estivessem indisponíveis, como no caso de criar um útero realístico para diferentes meses de gestação de uma mulher (XU *et al.*, 2007).

A mais recente geração de fantasmas computacionais antropomórficos é construída unicamente por objetos 3D e, por causa disto, receberam a denominação de fantasmas mesh. Para sua construção não são essenciais imagens de TC ou de RM e sim a descrição anatômica detalhada das estruturas de interesse. Estes fantasmas permitem representar o indivíduo em diferentes posturas e em diferentes estágios do desenvolvimento do corpo humano, e ainda evitam implicações éticas provocadas pelas técnicas de obtenção das imagens dos indivíduos.

Neste trabalho são apresentados dois casais de fantasmas mesh referenciais, para crianças com 5 anos e 10 anos de idade. Eles foram construídos tendo como parâmetros para os diferentes órgãos e tecidos as massas referenciais recomendadas pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP publicação 89, 2003). Quanto à disposição dos diferentes órgãos e tecidos foram consultadas descrições da anatomia humana. Esta ciência descreve a disposição dos órgãos e tecidos do corpo humano (TESTUT; LATARJET, 1949; GRAY, 1977; MOORE, 2007). Isto permitiu maior fidelidade dos modelos, visto que a sua implementação computacional é feita sob medida para atender às recomendações da ICRP para os indivíduos de referência.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

- Construir dois fantomas masculinos e dois fantomas femininos, com idades de 5 e 10 anos, de acordo com as especificações da ICRP89, e anatomicamente referenciados.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Criar imagens virtuais do corpo humano.
- Salvar essas imagens em arquivos de imagem seqüenciados.
- Empilhar esses arquivos num arquivo binário, formando uma matriz 3D.
- Classificar esta matriz, isto é, associar o número da cor ao número identificador do órgão ou tecido.
- Ajustar as massas dos órgãos e tecidos aos dados da ICRP.
- Converter esse arquivo binário em um arquivo de texto que possa ser lido pelo código Monte Carlo.
- Acoplar os novos fantomas ao código Monte Carlo EGSnrc e realizar avaliações dosimétricas.

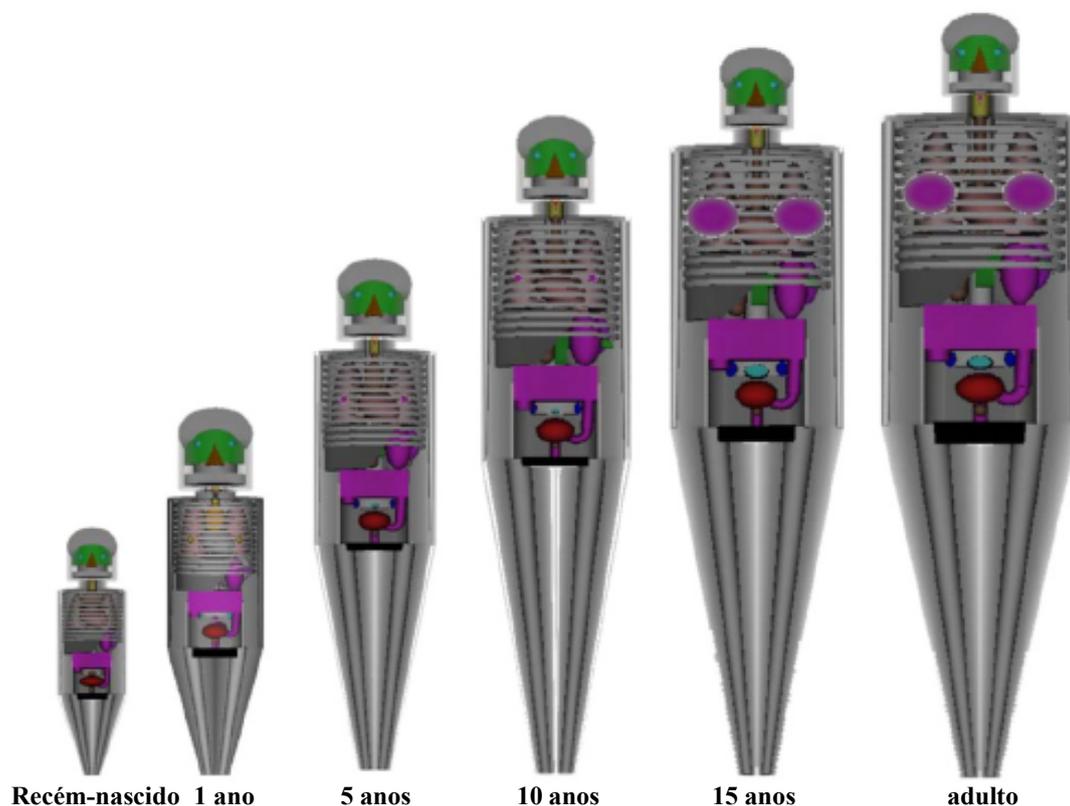
### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Aqui é apresentada a evolução do conhecimento sobre fantomas computacionais, especialmente fantomas infantis. Até o presente, quatro tipos de fantomas computacionais foram desenvolvidos e são usados em avaliações dosimétricas para diversos fins: os fantomas matemáticos, os fantomas de voxels, os fantomas híbridos e os fantomas mesh.

#### 3.1 Fantomas matemáticos

Em 1967 e 1968, Fisher e Snyder produziram o primeiro fantoma matemático humano. Este fantoma foi melhorado por Snyder e colaboradores em 1974 e em 1978, durante a compilação do relatório do grupo de trabalho sobre o homem de referência da ICRP23 (publicada em 1975). Desde então ele tem sido conhecido como fantoma MIRD-5 (descrever sigla), um fantoma matemático de um adulto masculino, no qual os órgãos são representados por expressões matemáticas de planos, esferas, etc. A partir de então, outros fantomas matemáticos foram desenvolvidos para adultos de ambos os sexos (KRAMER *et al.*, 1982; ECKERMAN *et al.*, 1996) e também para crianças (ECKERMAN *et al.*, 1996).

A série de fantomas ORNL (*Oak Ridge National Laboratory*) desenvolvida por Cristy inclui um recém-nascido, indivíduos com idades de 1, 5, 10 e 15 anos, e adulta. O fantoma do indivíduo do sexo masculino de 15 anos de idade também representa o indivíduo do sexo feminino adulto. Todos os fantomas são hermafroditas, com exceção do fantoma do indivíduo adulto masculino (ECKERMAN *et al.*, 1996). A Figura 1 mostra a vista frontal destes fantomas. A pele e os músculos estão semitransparentes para facilitar a visão dos órgãos internos e do esqueleto (LEE *et al.*, 2007a).



**Figura 1** – Vista frontal dos fantomas ORNL revisados: recém-nascido, 1 ano, 5 anos, 10 anos, 15 anos e adulto. (LEE *et al.*, 2007a).

### 3.2 Fantomas de voxels

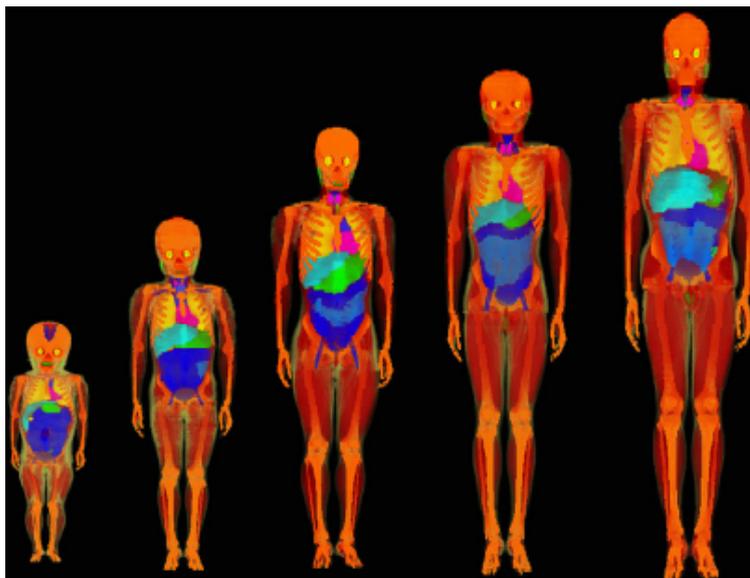
O avanço da tecnologia em computadores e o desenvolvimento de métodos para a obtenção de imagens tridimensionais do corpo humano tornaram possível a construção de fantomas mais realistas, baseados em elementos de volume, os chamados voxels (volume pixels). Para a construção destes fantomas são usadas imagens de TC, de RM e até fotografias de secções de cadáveres. Estas imagens, por si só, não são suficientes para que se obtenha o fantoma desejado. Elas são submetidas aos processos chamados segmentação e classificação, em que cada órgão ou tecido de interesse recebe cor e número únicos, capazes de separar estas estruturas das vizinhas e assim estabelecer sua individualidade (VIEIRA, 2004). Deste modo, são obtidos cada um dos órgãos de interesse e, como resultado final, o fantoma. Atualmente, há diversos fantomas de voxels disponíveis para adultos (KRAMER *et al.*, 2003, 2004, 2006a), e para crianças (CAON *et al.*, 1999; NIPPER *et al.*, 2002; PETOUSSI-HENSS *et al.*, 2002; LEE *et al.*, 2005, 2006).

Um fantoma do tronco de uma jovem de 14 anos de idade foi desenvolvido na Austrália. Ele foi construído a partir de 54 imagens TC consecutivas, possui voxels com 2,53mm x 2,53mm x 10,0mm e recebeu o nome de Adelaide (CAON *et al.*, 1999).

O GSF (*Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung*) produziu uma família de fantasmas de voxels. Ela inclui dois fantasmas de crianças, o Baby e o Child. Ambos são do sexo feminino e foram construídos a partir de imagens TC de corpo inteiro de indivíduos reais. O Baby foi construído a partir de imagens de um indivíduo com 8 semanas de idade e o Child foi construído a partir de imagens de um indivíduo de 7 anos de idade. As resoluções dos fantasmas foram determinadas pelos equipamentos TC que fizeram as imagens. Os autores são claros em informar que esses fantasmas não representam indivíduos de referência para estudos populacionais (PETOUSSI-HENSS *et al.*, 2002).

Nipper e colaboradores (2002) criaram dois fantasmas de crianças a partir de imagens TC. O primeiro, de um recém-nascido, feminino, de 6 dias de idade; o segundo, de um indivíduo masculino equivalente a 2 meses de idade.

A Universidade da Flórida construiu duas séries de fantasmas: a série A (LEE *et al.*, 2005) e a série B (LEE *et al.*, 2006). A série A é composta de fantasmas de cabeça, pescoço e tronco de 5 crianças com diferentes idades (um com 9 meses e os demais com 4, 8, 11 e 14 anos). Eles foram construídos a partir de imagens TC de indivíduos vivos. A série B foi construída a partir dos fantasmas da série A, com as seguintes modificações: - foram incluídos membros superiores e inferiores, construídos a partir de imagens de um indivíduo adulto saudável; - e, enquanto na série A as massas dos órgãos e tecidos preservaram àquelas dos indivíduos originais, na série B foi feito um esforço para que estivessem mais de acordo com a ICRP. A Figura 2 mostra as vistas frontais dos fantasmas da série B.



**Figura 2** – Vista frontal da série B de fantasmas computacionais de crianças da Universidade da Flórida. As imagens correspondem aos fantasmas de 9 meses (masculino), de 4 e 8 anos (femininos), de 11 e 14 anos (masculinos), respectivamente, da esquerda para direita (LEE *et al.*, 2006).

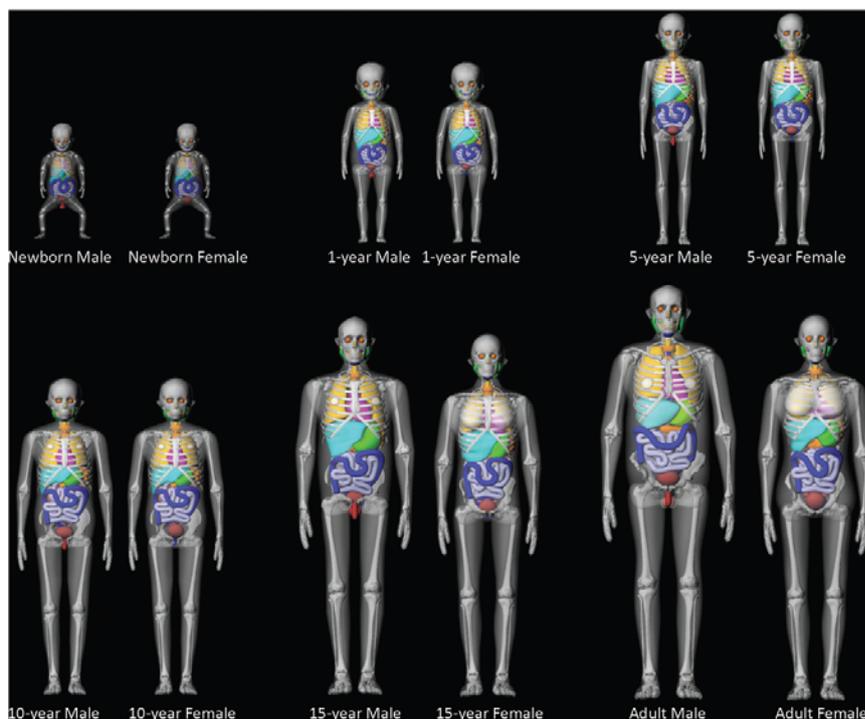
### 3.3 Fantasmas híbridos

Nos anos 2000 surgiu uma outra geração de fantasmas antropomórficos, são os fantasmas híbridos. Eles aliam o realismo anatômico dos fantasmas de voxels à facilidade em deformar as estruturas e alterar a postura do indivíduo, características dos fantasmas matemáticos (SEGARS, 2001).

Os fantasmas híbridos são construídos a partir de superfícies NURBS (*Non Uniform Rational Basis Spline*) e de malhas poligonais. Essas superfícies são usadas para descrever as fronteiras dos órgãos internos e do contorno exterior do corpo. Estas são técnicas de modelagem comumente utilizadas pela comunidade de computação gráfica para a geração de curvas e superfícies. Elas oferecem um procedimento matemático para representar não somente formas analíticas padrões, mas curvas e superfícies livres, muito apropriadas para descrever estruturas complexas (PIEGL, 1991). Mais ainda, estas técnicas fornecem a flexibilidade necessária para criar uma grande variedade de formas, através da manipulação de pontos de controle da superfície. Esta característica torna possível modificar mais facilmente os volumes dos órgãos e o contorno do corpo (LEE *et al.*, 2008).

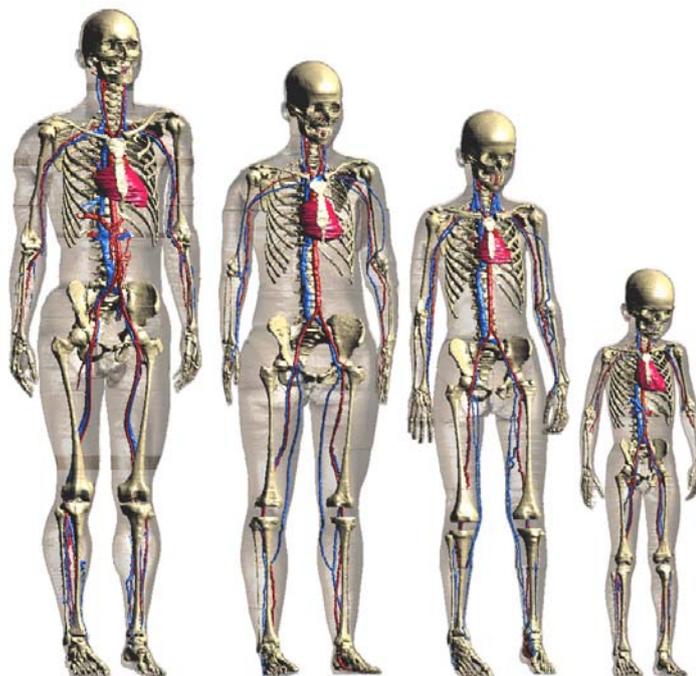
Uma família inteira de fantasmas híbridos foi construída por Lee e colaboradores (2010). Eles são conhecidos como a família de fantasmas híbridos da Universidade da Flórida

e estão apresentados na Figura 3. Estes fantomas tiveram como referência para o posicionamento dos órgãos os fantomas da série B da Universidade da Flórida e algumas modificações foram feitas para que esta família tivesse as massas de seus órgãos e tecidos ajustados de acordo com aquelas da ICRP89, para os indivíduos de referência.



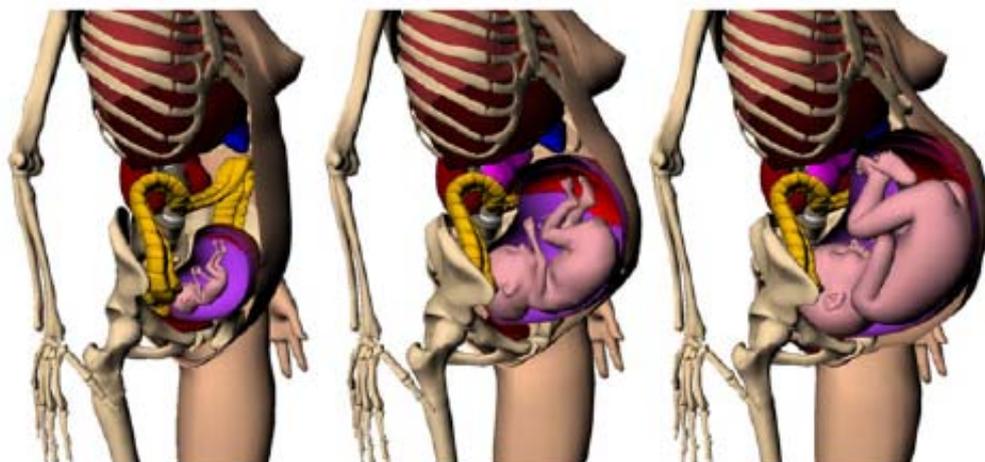
**Figura 3** – Vista anterior da série de fantomas híbridos da Universidade da Flórida (LEE *et al.*, 2010).

Christ e colaboradores (2010) construíram dois fantomas de crianças, um de seis anos e outro de onze anos, a partir de imagens de RM de corpo inteiro de indivíduos saudáveis feitas especificamente para esta finalidade. Estas imagens originaram objetos 3D dos órgãos e tecidos de interesse que foram voxelizados para a obtenção do fantoma final. Além destes, outros dois fantomas de adultos foram construídos. A Figura 4 mostra os fantomas da Família Virtual construídos por Christ e colaboradores (2010). Estes fantomas representam os indivíduos escaneados e nenhum ajuste foi feito com a intenção de adequá-los aos indivíduos de referência.



**Figura 4** – A Família Virtual: Duke, Ella, Billie, Thelonious (da esquerda para a direita) (CHRIST *et al.*, 2010).

As ferramentas de construção dos fantomas híbridos possibilitaram modelar órgãos e tecidos sem o uso de imagens reais, necessitando apenas da descrição anatômica. Em 2007, Xu e colaboradores desenvolveram modelos de mulheres grávidas com 3, 6 e 9 meses de gestação (os chamados modelos RPI-P3, RPI-P6 e RPI-P9). Eles utilizaram três fontes de dados: 1) imagens de TC de uma grávida de 30 semanas; 2) imagens do fantoma VIP-Man; e 3) modelos anatômicos 3D de determinados órgãos, produzidos pela comunidade de computação gráfica. Apenas três conjuntos de tecidos foram considerados para a construção dos modelos dos fetos: o cérebro, o esqueleto e o tecido mole. O modelo da mãe considerou as alterações esperadas para cada período de gestação. Os órgãos que não puderam ser obtidos através da segmentação das imagens, foram produzidos em softwares para edição de objetos 3D, a partir das informações anatômicas disponíveis. A modelagem dos três períodos gestacionais pode ser vista na Figura 5. Ela exigiu a alteração das formas e volumes das estruturas da mãe e dos fetos.



**Figura 5** - Os modelos 3D RPI-P3, RPI-P6 e RPI-P9 (da esquerda para a direita) (XU *et al.*, 2007).

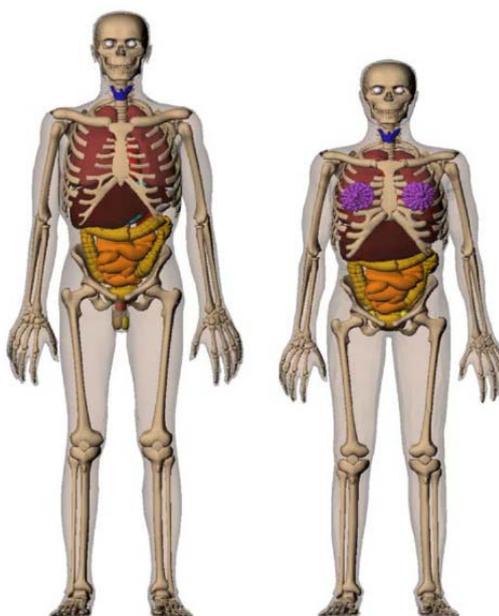
### 3.4 Fantomas mesh

É a mais nova geração de fantomas antropomórficos. Eles surgiram quando alguns pesquisadores perceberam que as ferramentas para edição de objetos 3D permitiam não só construir órgãos e tecidos complementares, mas fantomas inteiros. Esses fantomas são chamados neste trabalho de fantomas mesh, uma alusão à malha poligonal (*poligonal mesh*) usada como técnica principal para a criação dos objetos 3D destes modelos.

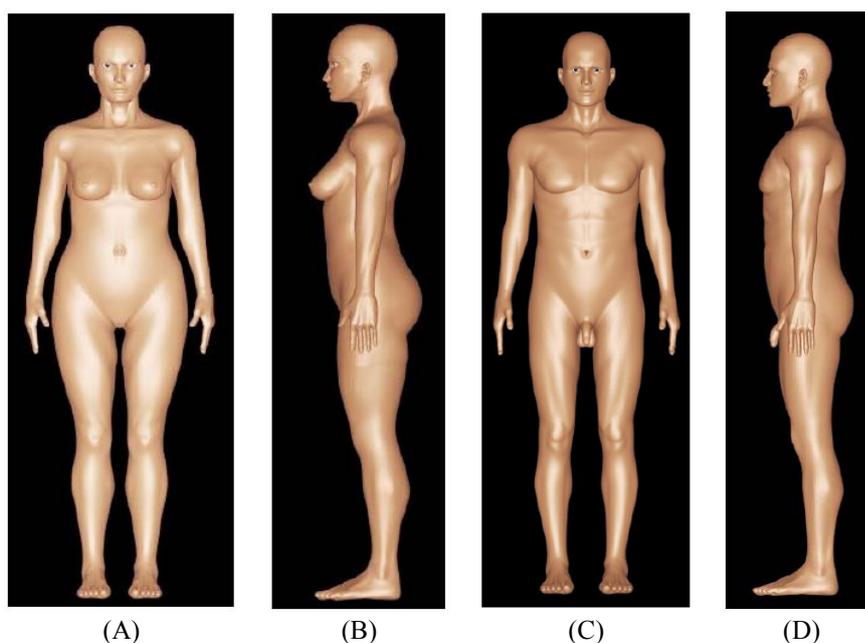
Os primeiros a produzir fantomas com essa abordagem foram Zhang e colaboradores (2009). Eles produziram os fantomas RPI-AM, masculino, e RPI-AF, feminino, baseados nos dados da ICRP89 para os indivíduos de referência. A Figura 6 mostra a visão anterior destes fantomas, na qual são vistos ossos e alguns órgãos internos. Os seus objetos 3D foram adquiridos em um site da internet ([www.anatomium.com](http://www.anatomium.com)) e, com a ajuda de anatomistas, foram re-esculpidos por especialistas em modelagem 3D.

No ano seguinte, Cassola e colaboradores (2010a) desenvolveram dois fantomas de adultos, o masculino MASH e o feminino FASH, mostrados na Figura 7, usando como ponto de partida somente objetos 3D gratuitos, obtidos em sites da internet. A Figura 8 mostra os objetos 3D do esqueleto e de alguns órgãos, usados na construção desses fantomas. Estes objetos foram reunidos e modificados, bem como novos objetos foram criados pelos autores. Estudos dosimétricos foram realizados e os resultados foram comparados com fantomas de voxels tradicionais (KRAMER *et al.*, 2010). A partir destes, dois outros foram criados, um

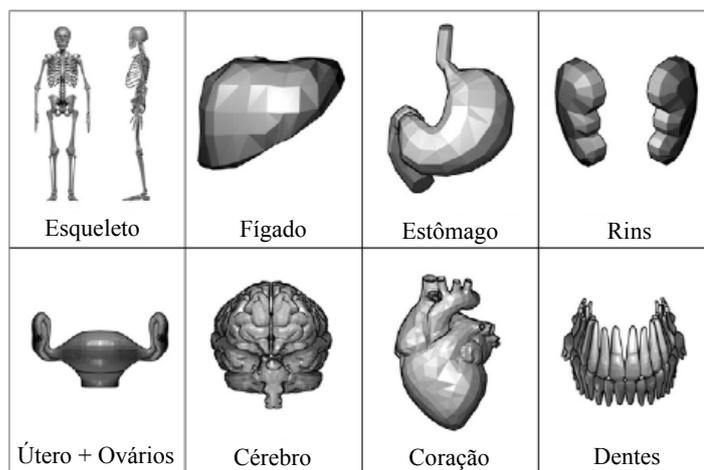
masculino e outro feminino, em uma condição particular: eles representam estes mesmos indivíduos, porém deitados (CASSOLA *et al.*, 2010c). A Figura 9 mostra as mudanças nas posições dos órgãos e tecidos em um cenário de exposição antero-posterior de raios X do abdome para os fantasmas MASH2\_sta (em pé) em comparação com o MASH2\_sup (deitado). Estes quatro fantasmas apresentam suas massas ajustadas de acordo com os valores da ICRP89 para os indivíduos de referência.



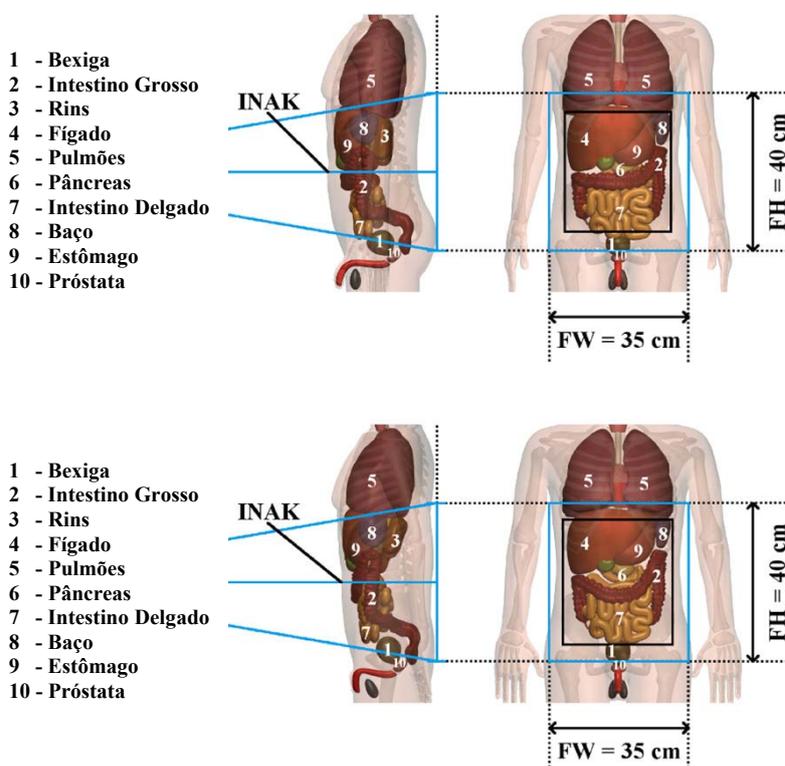
**Figura 6** – Vista anterior dos fantasmas RPI-AM (à esquerda) e RPI-AF (à direita), são vistos ossos e alguns órgãos internos (ZHANG *et al.*, 2009).



**Figura 7** – Vista frontal (A) e lateral esquerda (B) do fantoma FASH e vista frontal (C) e lateral esquerda (D) do fantoma MASH (CASSOLA *et al.*, 2010).



**Figura 8** – Objetos 3D do esqueleto e de alguns órgãos, usados na construção dos fantasmas FASH e MASH (CASSOLA *et al.*, 2010, tradução nossa).



**Figura 9** – Cenário da exposição antero-posterior do abdome para o fantoma MASH2\_sta (em pé) em comparação com o MASH2\_sup (deitado). FW = largura do campo; FH = altura do campo; o tamanho do campo do receptor da imagem está em azul e na entrada está em preto (CASSOLA *et al.*, 2010c, tradução nossa).

Os fantasmas mesh se mostraram especialmente úteis nos casos em que há dificuldade em se obter imagens apropriadas de indivíduos reais ou mesmo quando se dispõe delas, porém estas não retratam uma determinada situação de interesse.

Em todos os casos de fantasmas mesh e híbridos aqui relatados, os autores tiveram que converter os objetos 3D em voxels, devido ao acoplamento aos códigos Monte Carlo. Para

isso, cada grupo criou ferramentas apropriadas para o processo de “voxelização”, e outras ferramentas foram necessárias para retirar das imagens convertidas os eventuais artefatos decorrentes deste processo.

## 4 METODOLOGIA

Para a construção dos fantasmas foram necessários: 1) objetos 3D dos órgãos e tecidos de interesse; 2) descrição suficientemente detalhada de cada estrutura anatômica desejada; 3) ferramentas computacionais capazes de manipular estes objetos, criar novos, converter os objetos 3D em pilhas de voxels e ainda, realizar os ajustes no ambiente voxel. Os métodos utilizados para a realização destas tarefas são descritos a seguir, desde a obtenção dos dados primários até os últimos ajustes.

### 4.1 Construção tridimensional dos fantasmas

Os fantasmas foram construídos utilizando-se ferramentas computacionais apropriadas e tiveram o relatório 89 da ICRP (ICRP, 2003) como fonte principal dos dados sobre os indivíduos de referência. As informações das posições e formas dos órgãos e tecidos foram obtidas em livros-texto e atlas de anatomia humana (TESTUT; LATARJET, 1949; GRAY, 1977; MACGREGOR, 2000; CHAMLEY *et al.*, 2005; SCHÜNKE *et al.*, 2006a, 2006b, 2006c; WOLF-HEIDEGGER, 2006; MOORE; DALLEY, 2007) bem como em sites da Internet (BERGMAN *et al.*; DISCIPLINA DE ANATOMIA DA FACULDADE DE MEDICINA DE PETRÓPOLIS, 2010).

#### 4.1.1 Anatomia dos órgãos e tecidos

Os objetos 3D obtidos por meio do software MakeHuman (BASTIONI, 2009) - como representativos da pele - apresentam todos os elementos característicos do contorno exterior do corpo. Eles possuem toda a morfologia externa esperada para o corpo humano com uma grande riqueza de detalhes, destacadamente nas orelhas, nariz, pálpebras, estruturas muito refinadas da anatomia da cabeça, bem como mãos, pés e genitália externa de ambos os sexos.

Uma vez obtido o objeto 3D mais próximo à idade de 10 anos, modificações nas proporções entre os segmentos corporais deste objeto foram feitas para atender às características morfológicas descritas por Godin (1916) e Snyder *et al.* (1977) para indivíduos médios.

O passo seguinte foi alterar as dimensões do esqueleto utilizado no fantoma MASH (CASSOLA *et al.*, 2010) de modo a inseri-lo no contorno da criança de dez anos. Alguns ossos sofreram mudanças em suas dimensões, outros foram redesenhados, para que o encaixe entre o contorno exterior e o esqueleto fosse o mais próximo de um indivíduo real.

Com estas duas referências, o contorno exterior do corpo e o esqueleto, foram inseridos os demais órgãos e tecidos.

Foram utilizados como referência para a construção tridimensional dos órgãos dos fantasmas informações da anatomia humana sobre a forma exterior, interior e relações de vizinhança dos órgãos e tecidos de interesse. Para isso foram consultados livros-texto clássicos e recentes de Anatomia Humana, atlas esquemáticos, artísticos e fotográficos, bem como foram feitas observações em peças cadavéricas reais e modelos anatômicos pertencentes ao Departamento de Anatomia da UFPE.

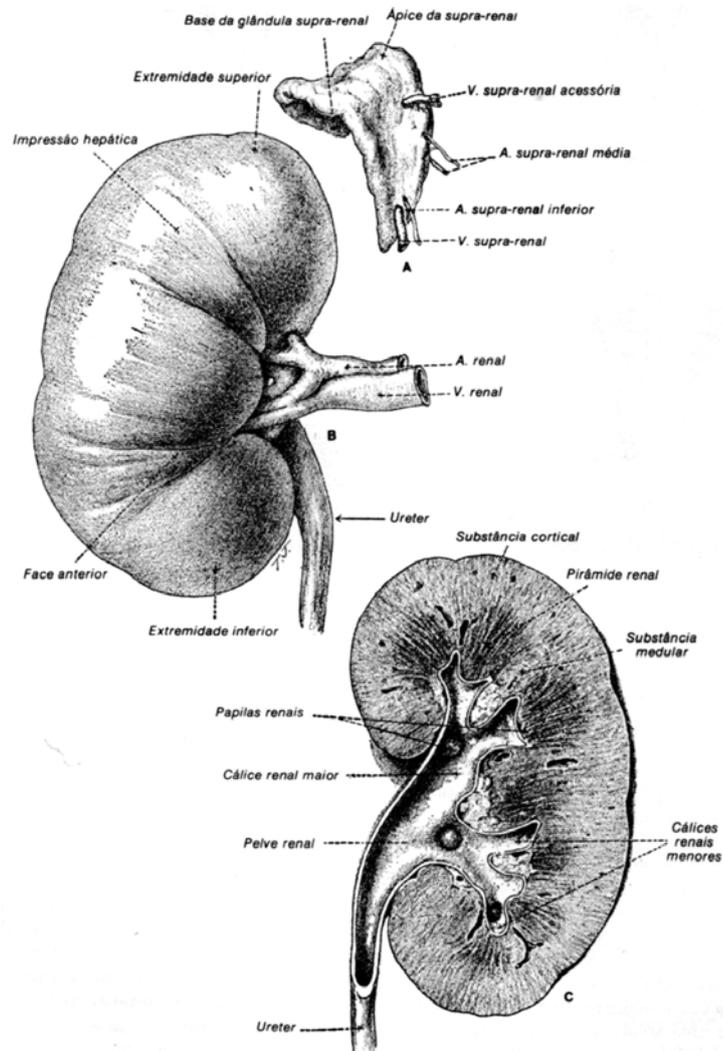
Com a intenção de demonstrar como a ciência Anatomia contribuiu para a realização deste trabalho, aqui está o texto sobre a morfologia externa e relações dos rins, transcrito do livro Anatomia (GRAY, 1977). Este texto é apoiado por figuras, também reproduzidas.

Os rins situam-se na parte dorsal do abdome, de um e de outro lado da coluna vertebral, recobertos pelo peritônio e circundados por uma massa de gordura e de tecido areolar frouxo. Suas extremidades superiores estão ao nível da borda cranial da décima segunda vértebra torácica, e as inferiores, ao nível da terceira lombar. O rim direito em geral é um pouco mais caudal que o esquerdo, provavelmente devido à presença do fígado. O longo eixo de cada rim é paralelo à coluna vertebral. Cada rim tem cerca de 11,25cm de comprimento, 5 a 7,5cm de largura e um pouco mais de 2,5cm de espessura. O esquerdo é um pouco mais comprido e mais estreito que o direito. O peso do rim no homem adulto varia entre 125 a 170g; na mulher adulta, entre 115 a 155g. O peso total dos dois rins, em proporção ao do corpo, é de cerca de 1 para 240. No recém-nascido os rins são cerca de três vezes maiores, em proporção ao peso do corpo, que no adulto. O rim tem uma forma característica, semelhante a um feijão, e apresenta ao exame duas faces, duas margens, e uma extremidade superior e outra inferior (ver Figura 10).

**Faces.** A **face anterior** (ver Figura 11) de cada rim é convexa, voltada ventral e um pouco lateralmente. Suas relações com vísceras adjacentes diferem tão completamente nos dois lados que exigem descrições separadas.

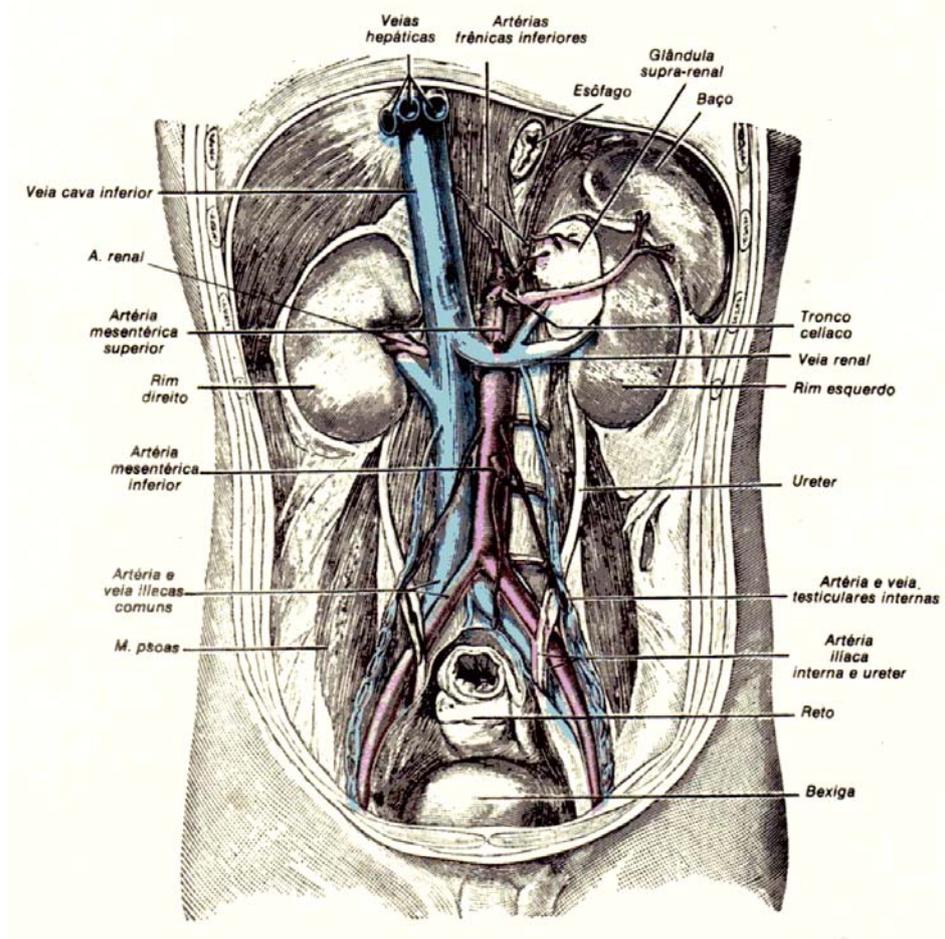
**Face anterior do rim direito** (ver Figura 12). Uma estreita porção da extremidade superior está em relação com a glândula supra-renal direita. Uma ampla área, logo abaixo desta, envolvendo cerca de três quartas partes da face, situa-se na impressão renal da face visceral do fígado, e uma área estreita, porém variável, junto à margem medial está em contato com a parte descendente do duodeno. A parte caudal da face anterior está lateralmente em contato com a flexura direita do cólon, e medialmente, como norma, com

o intestino delgado. As áreas em relação com o fígado e intestino delgado são cobertas pelo peritônio; as áreas supra-renal, duodenal e cólica são desprovidas dele.

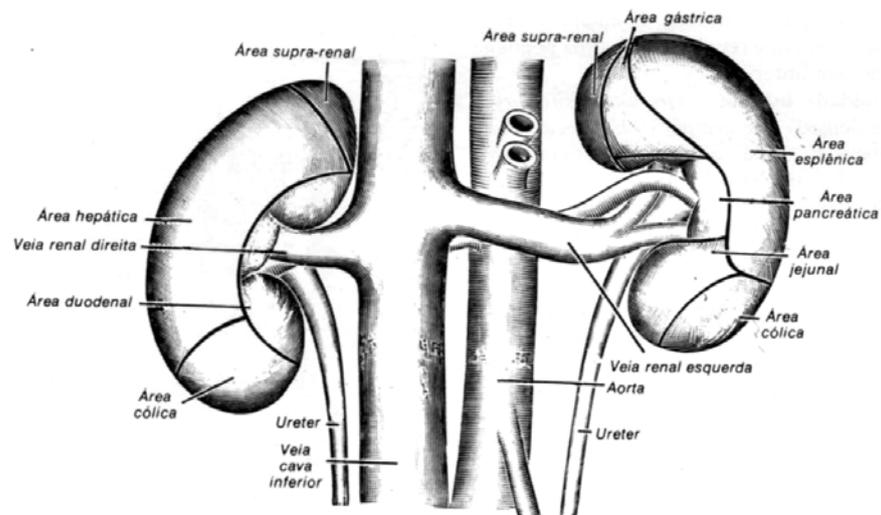


**Figura 10** – Rim direito e glândula supra-renal. A, Glândula supra-renal. B, Rim, vista da superfície. C, secção longitudinal do rim mostrando a pelve. (transcrição da Figura 17-14 do original) (GRAY, 1977)

**Face anterior do rim esquerdo** (ver Figura 12). Uma pequena área ao longo da parte cranial da margem medial está em relação com a glândula supra-renal esquerda, e junto à margem lateral há uma estreita faixa em contato com a impressão renal no baço. Uma área um tanto quadrilátera, aproximadamente no meio da face anterior, marca o lugar de contato com o corpo do pâncreas, em cuja face profunda estão os vasos lienais. Acima deste há uma porção triangular entre as áreas supra-renal e esplênica, em contato com a face posterior do estômago. Caudalmente à área pancreática, a parte lateral está relacionada com a flexura cólica esquerda, e a medial, com o intestino delgado. As áreas em contato com o estômago e baço são cobertas pelo peritônio da bolsa omental, enquanto que a relacionada com o intestino delgado é revestida pelo peritônio da grande cavidade abdominal, dorsalmente à qual correm alguns ramos dos vasos cólicos esquerdos. São no entanto desprovidas de peritônio as áreas supra-renal, pancreática e cólica.



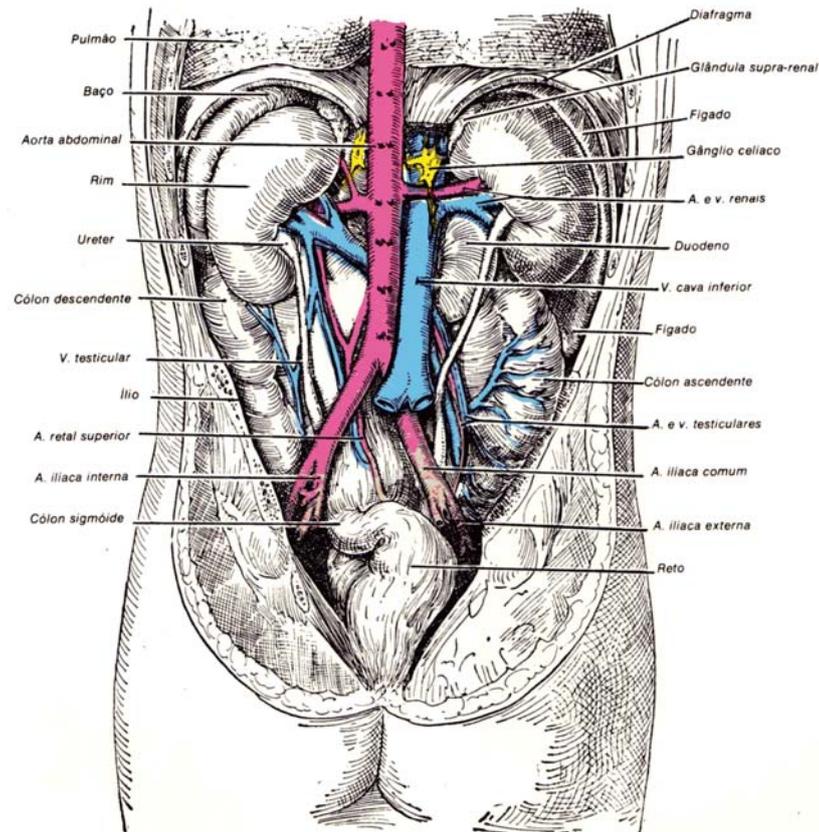
**Figura 11** – Vista ventral das vísceras abdominais após remoção do peritônio da parede abdominal dorsal, mostrando rins, glândulas supra-renais e grandes vasos. (transcrição da Figura 17-15 do original) (GRAY, 1977)



**Figura 12** – Faces ventrais dos rins mostrando as áreas de contato das vísceras vizinhas. (transcrição da Figura 17-17 do original) (GRAY, 1977)

A **face posterior** (ver Figuras 13 e 14) de cada rim é dirigida para trás e medialmente. Incluída em tecido areolar e gorduroso, é inteiramente desprovida de revestimento peritoneal. Ela apóia-se sobre o diafragma, sobre os ligamentos arqueados medial e

lateral, sobre o psoas maior e quadrado dos lombos, sobre o tendão do transverso do abdome, sobre o subcostal, sobre uma ou duas das mais superiores artérias lombares, e sobre os nervos último torácico, ílio-hipogástrico e ilioinguinal. A extremidade superior do rim direito repousa sobre a duodécima costela e a do esquerdo, comumente sobre a décima primeira e décima segunda. O diafragma separa o rim da pleura, que se prolonga para baixo para formar o seio frenocostal, embora suas fibras musculares quase sempre sejam incompletas ou ausentes em uma área triangular imediatamente acima do ligamento arqueado lateral; quando isso ocorre o tecido areolar perinefrético entra em contato com a pleura diafragmática.

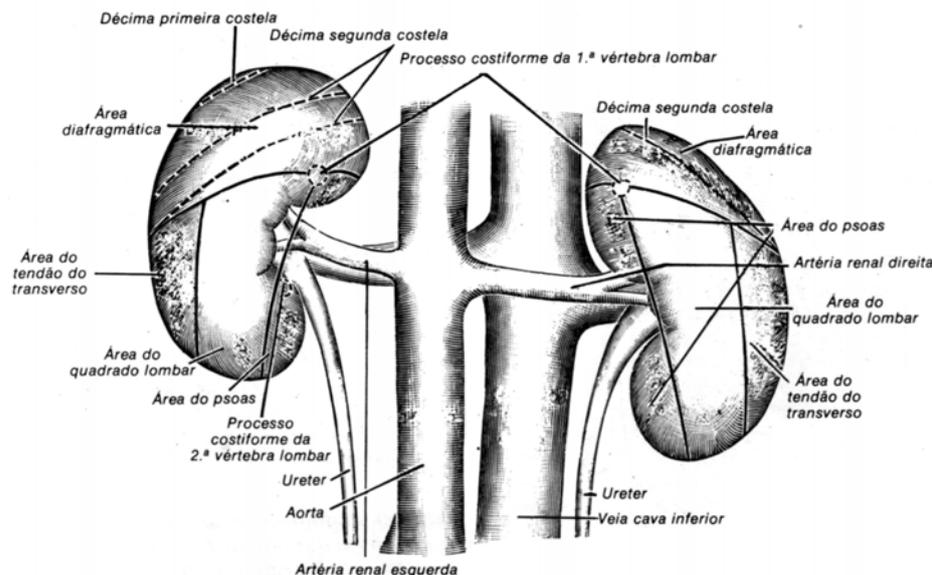


**Figura 13** – Dissecção das vísceras abdominais; vista dorsal, mostrando relação dos rins (*topographischen Anatomie*, de Corning, in Eycleshymer e Jones.). (transcrição da Figura 17-16 do original) (GRAY, 1977)

**Margens.** A **margem lateral** é convexa e dirige-se para a parede póstero-lateral do abdome. No lado esquerdo, está em contato com o baço, na sua parte cranial.

A **margem medial** é côncava no centro e convexa em ambas as extremidades. Dirige-se ventral e um pouco caudalmente. Sua parte central apresenta uma profunda fissura longitudinal limitada por proeminentes saliências (lábios ventral e dorsal). Esta fissura é denominada **hilo**, e dá passagem aos vasos, aos nervos e ao ureter. Acima do hilo a margem medial está em relação com a glândula supra-renal, e abaixo do hilo, com o ureter.

A posição recíproca das principais estruturas no hilo é a seguinte: a veia é ventral, a artéria no meio e o ureter dorsal é dirigido caudalmente. Com freqüência, entretanto, ramos da artéria e veias estão situados atrás do ureter.



**Figura 14** – Face dorsal dos rins mostrando as áreas de relação com as paredes. (transcrição da Figura 17-18 do original) (GRAY, 1977)

**Extremidades.** A **extremidade superior** é espessa e arredondada e mais próxima da linha mediana que a inferior. É encimada pela glândula supra-renal, que recobre ainda uma pequena porção da sua face anterior.

A **extremidade inferior** é menor e mais delgada que a superior e mais afastada da linha mediana. Estende-se até 5cm da crista ilíaca. (GRAY, 1977, p. 1045-1048)

Foram tomados cuidados para que as informações obtidas tivessem validade para a descrição do corpo humano nas idades de interesse deste estudo.

#### 4.1.2 Volume dos órgãos e tecidos

Os fantasmas foram construídos com a intenção de se atender às descrições dos órgãos e tecidos para os indivíduos de referência contidos na ICRP89 (ICRP, 2003).

Essencialmente, a ICRP89 estabelece as massas dos órgãos e tecidos bem como a altura, massa total e área da superfície corporal. Para a construção dos fantasmas é necessário o volume dos órgãos e tecidos. Esses volumes puderam ser obtidos pela divisão dos valores das massas da ICRP89 pelas densidades dos respectivos órgãos e tecidos disponíveis na publicação 46 da ICRU (ICRU 46, 1992) bem como na própria ICRP89. No caso dos volumes de cada conjunto de ossos recorreu-se à ICRP60 e da densidade das lentes dos olhos recorreu-se à ICRP23. A partir destes dados foram construídas tabelas que nortearam todo o trabalho.

#### 4.1.3 Construção dos órgãos e tecidos

Para a construção dos fantasmas virtuais foram utilizados softwares que permitiram criar e/ou editar as estruturas tridimensionais no ambiente 3D, converter estes objetos 3D em voxels (neste texto este processo é chamado “voxelizar”), editar o fantoma voxelizado, contar o número de voxels e, por fim, conferir o número de voxels de cada estrutura a partir de seu número identificador (ID). Foram utilizados, neste trabalho, os softwares: MakeHuman (BASTIONI, 2009), Blender (ROOSENDAAL, 2009), ImageJ (RASBAND, 2009), Microsoft Excel (MICROSOFT CORPORATION, 2002), QtVoxel (Software de edição automática construído por Vagner Ferreira Cassola), Fantasmas (VIEIRA *et al.*, 2005) e DIP (VIEIRA; LIMA, 2009).

No início, foi gerado o contorno tridimensional do exterior do corpo do indivíduo de 10 anos usando o software MakeHuman. A Figura 15 mostra a janela de edição de contornos do software, exibindo as ferramentas de escolha do sexo e idade, entre outras, e um contorno sendo criado. Mesmo sendo capaz de gerar objetos 3D de algumas outras estruturas do corpo humano, o programa MakeHuman permite editar apenas o objeto 3D representativo da superfície do indivíduo. Deste modo, este objeto 3D foi exportado para o software Blender.

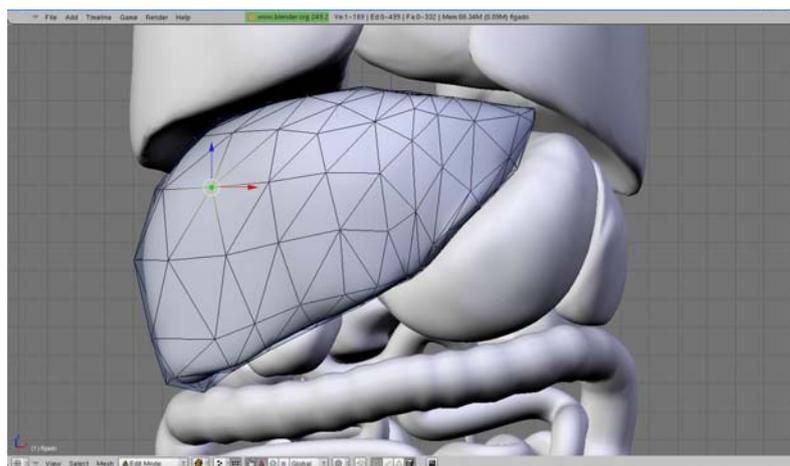


**Figura 15** – Imagem da janela principal do software makeHuman, versão 0.9.1 RC1 (BASTIONI, 2009), exibindo os itens de escolha do sexo, idade, forma do corpo, dentre outras opções.

O software Blender foi a principal ferramenta de edição dos objetos 3D. Ele serviu não somente à edição, mas também à voxelização e geração das imagens ilustrativas dos fantasmas. Por meio dele, foram reunidos os objetos 3D representativos do contorno exterior,

dos ossos e dos demais órgãos. Exceto o objeto 3D do contorno exterior, gerado pelo MakeHuman, os demais objetos foram escolhidos dentre aqueles utilizados na construção dos fantasmas FASH e MASH (CASSOLA *et al.*, 2010), gentilmente cedidos por Vagner Ferreira Cassola (alguns desses órgãos foram criados pelo autor e outros foram obtidos originalmente em sites de modelos 3D, na Internet).

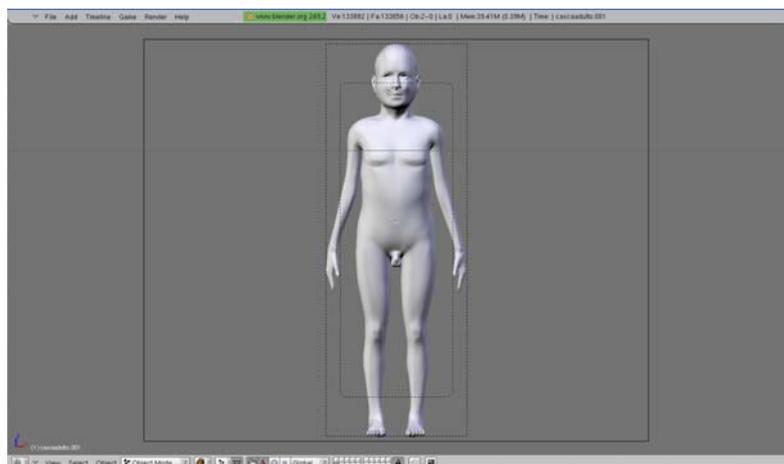
A primeira etapa do processo de edição foi a reunião do objeto 3D do contorno exterior a aqueles dos ossos. Em seguida, foi modelado o esqueleto de acordo com o contorno, porém, em algumas regiões, quem sofreu alteração foi o contorno. Na etapa seguinte foram inseridos os demais órgãos e tecidos, tendo o esqueleto e o contorno do corpo como principais referências de volume e posição. Todos esses objetos foram editados para atenderem às características anatômicas do indivíduo de 10 anos de idade. A Figura 16 exibe a janela “3D View” do software Blender e o modelo do fígado do fantoma de 10 anos sendo editado. Duas técnicas de modelagem 3D foram utilizadas: a modelagem por subdivisão e a modelagem por extrusão (BRITO, 2008). A modelagem por subdivisão tem por característica a divisão de arestas de um objeto 3D sem perder a continuidade da malha, o que cria novas arestas (naturalmente, provoca a criação de novos vértices e faces). Já a modelagem por extrusão tem por característica a criação de novas faces (do mesmo modo, ocorre a criação de novas arestas e vértices) a partir da extensão de faces já existentes, estabelecendo a continuidade da malha por meio da criação de novas faces.



**Figura 16** – Imagem da janela 3D View do software Blender, versão 2.49b (ROOSENDAAL, 2009), exibindo órgãos como estômago, baço, parte dos pulmões e coração e o fígado sendo editado.

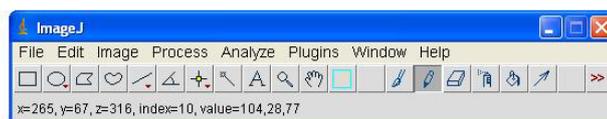
Uma vez terminada a edição dos objetos 3D e a finalização dos fantasmas no ambiente vetorial, foi feita a voxelização. Para isto, foi definido o número de linhas, colunas e fatias

que o fantoma deveria apresentar após a voxelização. Desse modo, foi criado um plano coronal que percorreu o fantoma seguindo o eixo sagital e foram geradas imagens coronais da intersecção do plano com os objetos (órgãos e tecidos) modelados. A Figura 17 apresenta a visão da câmera do contorno externo do fantoma de 10 anos.



**Figura 17** – Imagem da visão da câmera do software Blender (ROOSENDAAL, 2009), exibindo o contorno exterior do corpo do fantoma masculino de 10 anos.

O software ImageJ foi a ferramenta utilizada para a criação da pilha tridimensional a partir das imagens 2D geradas pelo Blender e conseqüente obtenção do fantoma voxelizado. O ImageJ apresenta uma série de recursos, alguns deles estão exibidos na Figura 18. Um deles, a geração de histogramas (acessível por meio do menu Analyze), foi utilizado para a verificação do número de voxels de cada órgão e tecido, reconhecidos pelos IDs a eles associados. A lista obtida foi exportada para uma planilha do Microsoft Excel e o número de voxels foi comparado com o número desejado. A meta final desejada foi alcançar a menor diferença possível, já na edição dos objetos 3D. Algumas estruturas, por apresentarem características particulares, foram trabalhadas considerando a etapa do ajuste automático e/ou manual do seu número de voxels, exemplo da parede dos intestinos grosso e delgado.



**Figura 18** – Imagem da janela principal do software ImageJ - versão 1.43k (RASBAND, 2009).

Para o ajuste automático dos volumes dos órgãos e tecidos dos fantasmas já voxelizados foram utilizados os softwares QtVoxel, Fantasmas e DIP. Esses programas foram

especialmente construídos para a edição de fantasmas de voxels e processamento de imagens digitais. Várias de suas ferramentas foram utilizadas neste trabalho. Após a conclusão da edição automática do número de voxels, foi realizada a visualização fatia-a-fatia e tridimensional, de cada uma das estruturas, para verificar se ocorreu descaracterização das formas e relações anatômicas desejadas.

Quando necessário, foi realizado o ajuste manual dos volumes dos órgãos e tecidos dos fantasmas. Nesta tarefa foram utilizadas ferramentas de desenho do software ImageJ, tais como lápis, pincéis, borracha, etc. A tarefa compreendeu, essencialmente, em alterar os IDs das imagens 2D. Para tal, cada ID foi associado a uma cor. Para facilitar a percepção da disposição dos diversos tecidos nas fatias foi preciso utilizar uma tabela de cores que permitisse a visualização inequívoca das diferentes estruturas.

Por fim, foram gerados os dois arquivos para o acoplamento ao código Monte Carlo. Um deles foi o arquivo .dat, contendo a pilha de voxels com a distribuição espacial dos tecidos, ou seja, o resultado final da construção antropomórfica do fantoma. O outro foi a planilha .xls com os nomes dos tecidos, IDs e número de voxels de cada tecido.

Uma vez concluídos os fantasmas dos indivíduos masculino e feminino de 10 anos, foram construídos os fantasmas dos indivíduos masculino e feminino de 5 anos de idade. Estes últimos foram inteiramente construídos a partir dos objetos 3D dos fantasmas de 10 anos.

Observando-se de um ponto de vista mais global, a intenção foi de reproduzir as características anatômicas dos indivíduos adultos MASH e FASH, quando estes tinham as idades de 5 e 10 anos.

## 4.2 Avaliações dosimétricas

As versões voxelizadas dos fantomas infantis, chamados F05, M05, F10 e M10, foram conectados ao código Monte Carlo EGSnrc (KAWRAKOW, 2000), versão V4-2.3.1, obtido em 19 de fevereiro de 2010, no site <http://irs.inms.nrc.ca/software/egsnrc/>. O EGSnrc é avaliado como um dos melhores códigos Monte Carlo para transporte associado de fótons e elétrons, com uma variação dinâmica de energias cinéticas de partículas carregadas que vai desde poucas dezenas de keV a poucas centenas de GeV, e de energias de fótons que vai desde 1 keV a várias centenas de GeV. Todos os parâmetros de transporte do EGSnrc e as opções de seção de choque foram deixadas em seus valores padrões, determinados para a obtenção da melhor precisão que o EGSnrc pode alcançar. O acoplamento dos fantomas ao código Monte Carlo foi feito usando os mesmos métodos já aplicados para os fantomas MASH e FASH (KRAMER *et al.*, 2010).

Os esqueletos de todos os fantomas foram segmentados em osso cortical, esponjosa, medula óssea amarela e cartilagem para permitir o uso de imagens  $\mu$ CT de osso trabecular para a dosimetria do esqueleto (KRAMER *et al.*, 2006b, 2007). As imagens  $\mu$ CT para os fantomas de 5 e 10 anos de idade foram derivadas das imagens  $\mu$ CT dos adultos, usadas nos fantomas MASH e FASH, por meio da reamostragem das imagens com 60 a 70  $\mu$ m de resolução e aumento das frações do volume do osso trabecular para os diferentes ossos, de acordo com os dados para crianças fornecidos pela ICRP70 (ICRP, 1995).

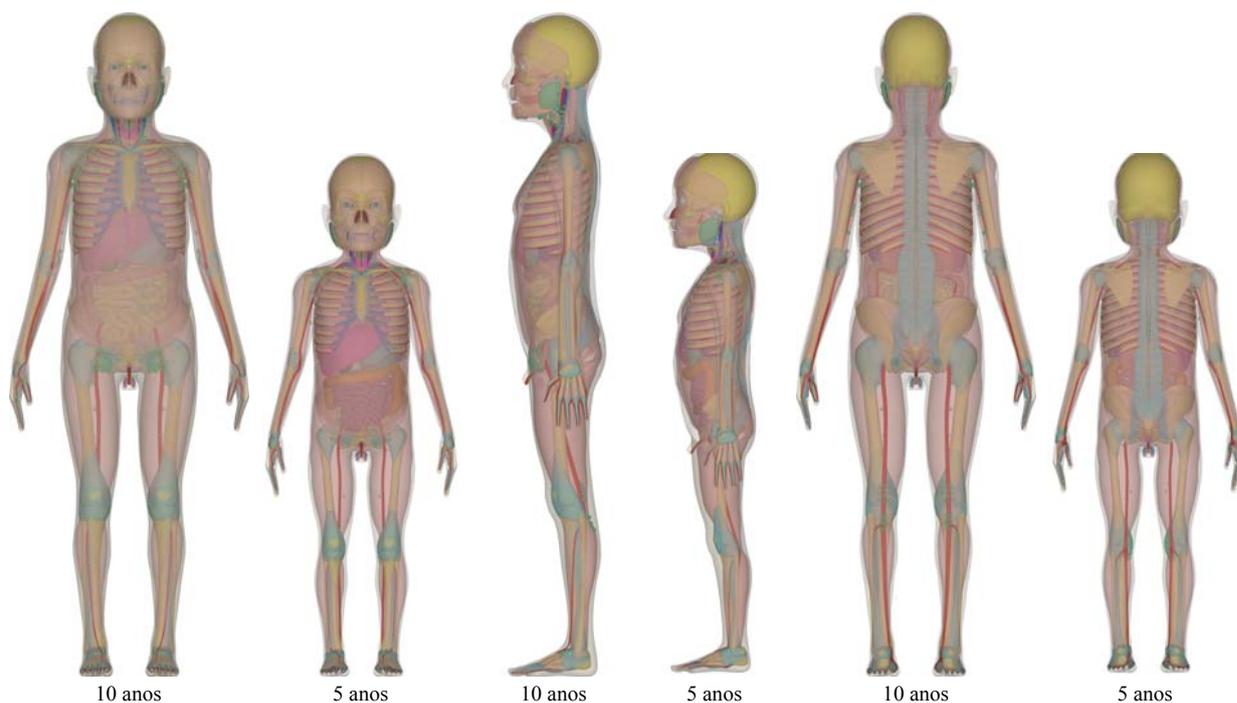
Os cálculos foram realizados em um computador com processador Intel® Core™2 Quad CPU Q9650 @ 3.00GHz, 4 Gb RAM e placa mãe P5KPL-AM (ASUS). O sistema operacional foi o LINUX/Ubuntu 9.10 64 bits usando o compilador Intel ifort 11.1 64 bits. O tamanho da matriz dos fantomas é 176 Mb para o MASH, 247 Mb para o M05 e 427 Mb para o M10. Para a simulação da exposição de corpo inteiro AP com 18 pontos de energia entre 10 keV e 10 MeV, o tempo de execução foi 3:13 horas para o fantoma adulto MASH, 3:16 horas para o fantoma M05 e 3:49 horas para o fantoma M10.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

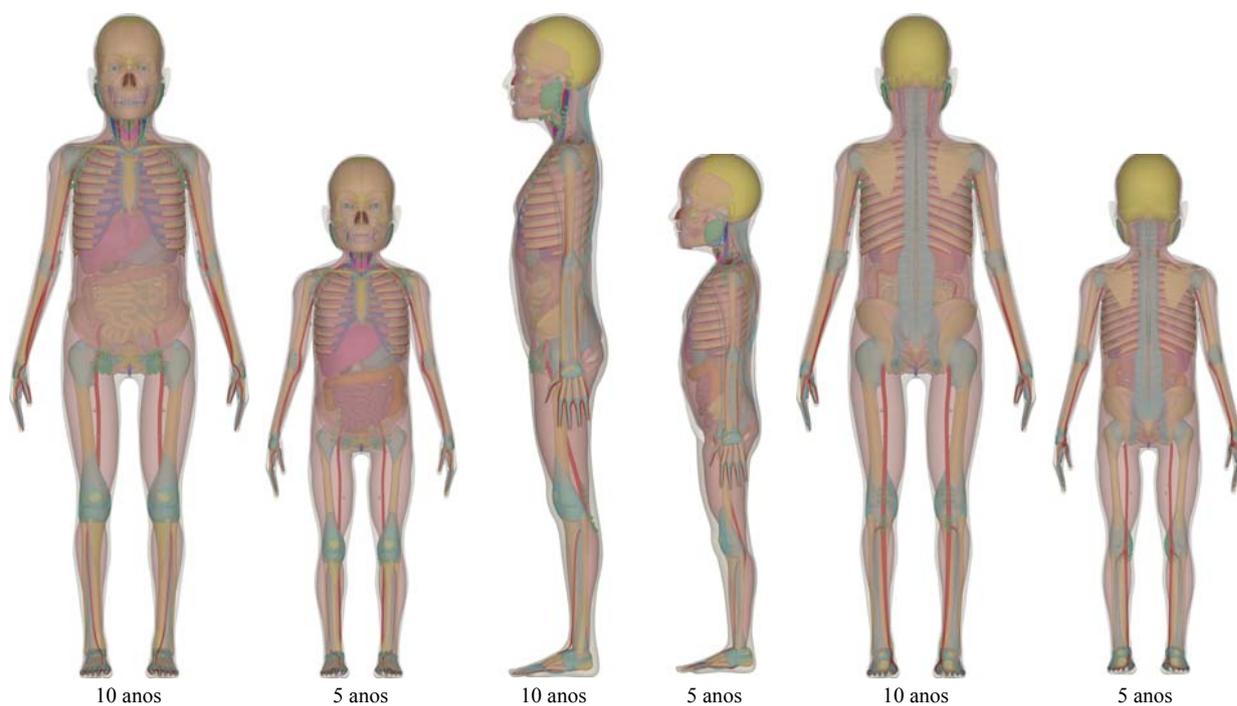
Cada indivíduo possui sua própria morfologia. Mesmo pertencendo à mesma raça e ao mesmo sexo, possuindo a mesma idade e biótipo, a anatomia de dois indivíduos é significativamente diferente. A intenção de construir modelos que representem indivíduos médios deve levar em conta esta premissa fundamental. Muitas pesquisas já foram feitas tentando estabelecer as características relevantes para a construção de modelos válidos para os diferentes grupos populacionais. Esses dados encontram-se compilados em diversas referências. Às vezes, porém, estão dispersos em estudos com interesses diferentes, mas com o mesmo objeto, o corpo humano médio. A ICRP89 reúne as informações relevantes para a construção de modelos de referência para estudos populacionais, no que se refere ao uso de radiação ionizante.

Baseados em suas descrições foram construídos quatro fantomas, dois representando indivíduos médios de 10 anos de idade, um masculino e outro feminino, e dois outros, novamente um masculino e outro feminino, representando indivíduos médios de 5 anos de idade. A Figura 19 mostra os fantomas masculinos de 5 e 10 anos e a Figura 20 mostra os fantomas femininos de 5 e 10 anos. As imagens destes fantomas foram colocadas lado a lado de acordo com o sexo, e em escala, para melhor comparar a disposição dos órgãos e tecidos dos indivíduos. Estas imagens exibem todos os tecidos segmentados, com algum grau de transparência. Podem ser percebidas desde a pele, na superfície, até a vesícula biliar, víscera profundamente situada.

Estes fantomas foram feitos com a intenção de alcançar os indivíduos médios, já que todos os órgãos e tecidos foram concebidos para essa finalidade. Isto contrasta com todos os fantomas de crianças já construídos. Todos eles, de algum modo, foram construídos utilizando-se imagens de indivíduos reais, segmentadas por especialistas. Dificilmente as imagens obtidas pelos equipamentos de uso médico conseguem capturar todas as características relevantes de tecidos e órgãos vizinhos, que possuam a mesma densidade. Na etapa seguinte, a segmentação das imagens, além da dificuldade do pesquisador em reconhecer os tecidos vizinhos com tons de cinza parecidos, mesmo que a imagem seja suficientemente detalhada, ainda é preciso empilhar uma imagem sobre a outra sem perda de continuidade dos órgãos.



**Figura 19** – Imagens da vista anterior (à esquerda), lateral esquerda (no centro) e posterior (à direita) de todos os órgãos e tecidos dos fantomas masculinos de 5 e 10 anos de idade.



**Figura 20** – Imagens da vista anterior (à esquerda), lateral esquerda (no centro) e posterior (à direita) de todos os órgãos e tecidos dos fantomas femininos de 5 e 10 anos de idade.

Mesmo que essas limitações técnicas possam ser superadas, a obtenção de imagens de corpo inteiro de crianças não é uma tarefa fácil. Além da dificuldade de se encontrar indivíduos próximos àqueles de referência - quando a intenção é a construção de fantomas

para estudos populacionais - há limitações provocadas pelas implicações éticas do uso da radiação ionizante para a obtenção das imagens, nesta faixa etária. A alternativa ao uso da radiação ionizante é o uso da ressonância magnética, como realizado por Christ e colaboradores (2010). Mesmo assim há a necessidade da aprovação por comitê de ética em pesquisa. O método usado neste trabalho não carece destas aprovações. Exceto pelo método utilizado para a dosimetria no esqueleto, que exige imagens  $\mu$ CT de ossos verdadeiros, todos os outros órgãos e tecidos foram construídos no ambiente 3D. Foram usadas imagens reais de indivíduos como referência para a construção dos objetos 3D e diversas fontes de dados foram utilizadas, inclusive o estudo em peças cadavéricas e modelos anatômicos.

A seguir, são descritos os órgãos e tecidos presentes nestes fantomas. No segundo sub-item estão descritos os fantomas voxelizados, eles são o que efetivamente é acoplado ao código Monte Carlo. No terceiro sub-item é feita a descrição de algumas avaliações dosimétricas realizadas com estes fantomas.

## **5.1 Órgãos e tecidos dos fantomas**

Aqui serão descritos, de forma sucinta, os órgãos e tecidos que compõem os fantomas na seqüência como aparecem na ICRP89. Considerações acerca das particularidades de tais órgãos e tecidos são feitas, bem como comparações com outros fantomas similares.

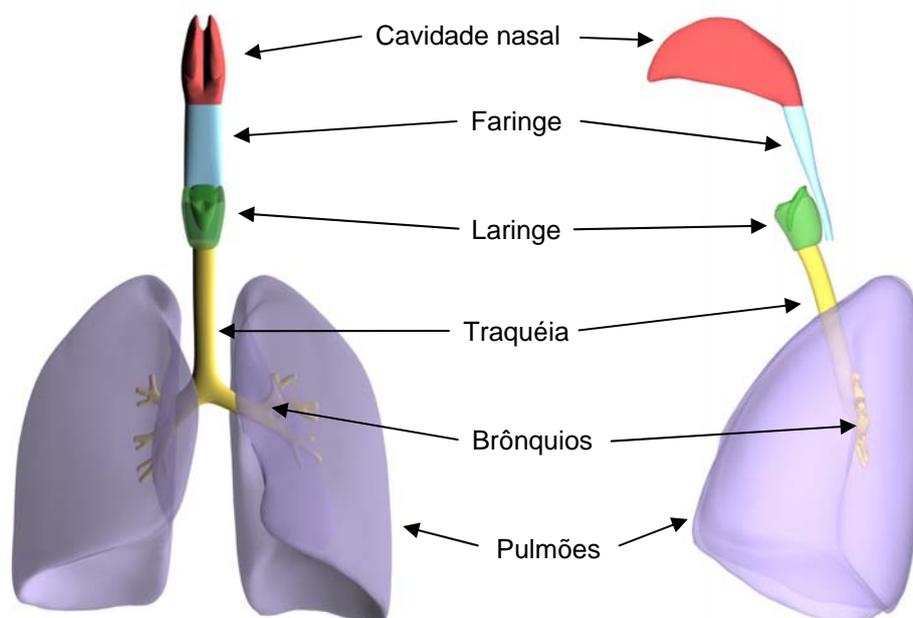
### **5.1.1 Sistema respiratório**

Como pode ser visto na Figura 21, o sistema respiratório está constituído, nestes fantomas, pelas cavidades nasais, faringe, laringe, traquéia, brônquios e pulmões.

As cavidades nasais não estão listadas na tabela de órgãos e tecidos da ICRP89. Estão segmentadas como tecido mole. As duas cavidades nasais se continuam com a faringe.

A faringe conecta as cavidades nasais à cavidade bucal e à laringe, e se continua com o esôfago. Ela é percorrida pelo ar atmosférico que passa das cavidades nasais para a laringe, e vice-versa, e é percorrida pelo alimento que passa da cavidade bucal até o esôfago. Este órgão

serve assim aos sistemas respiratório e digestório. A faringe, mesmo descrita pela ICRP89, não possui massa na lista de órgãos. Está segmentada nestes fantasmas e recebeu a densidade do tecido mole.



**Figura 21** – Imagens da vista anterior (à esquerda) e lateral (à direita) dos órgãos do sistema respiratório do fantoma de 10 anos de idade.

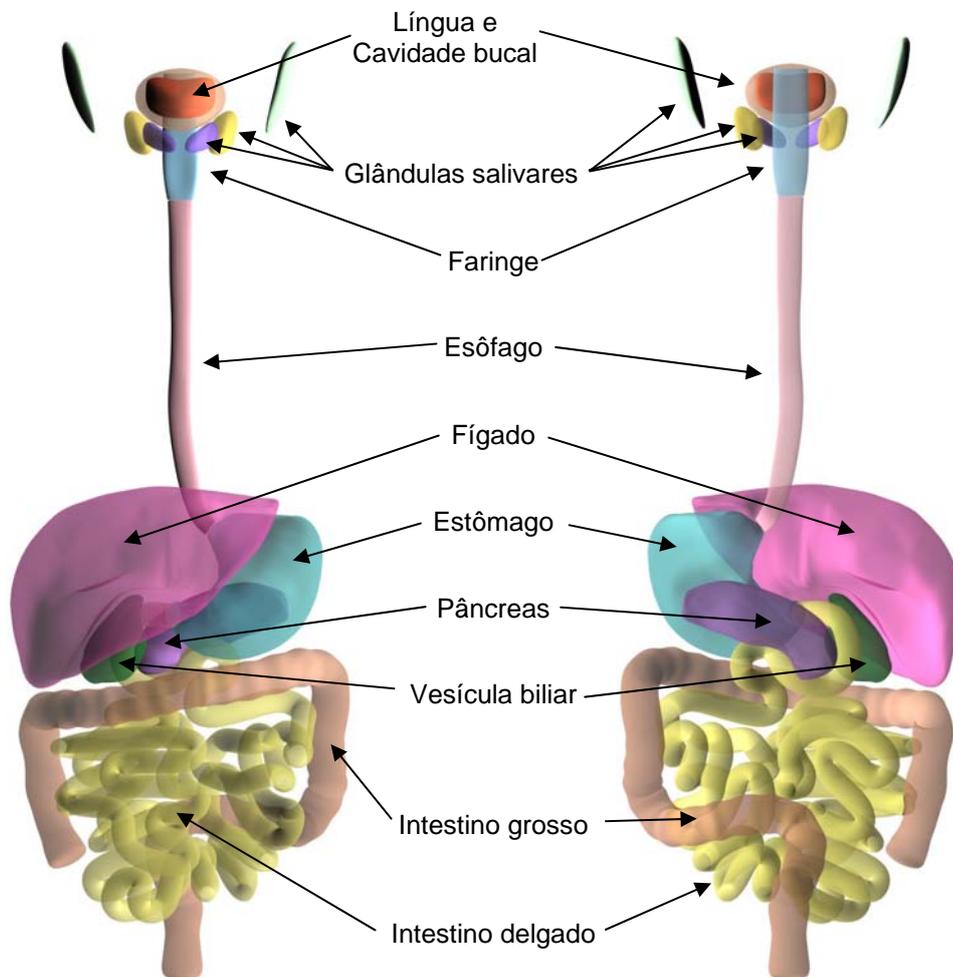
A laringe é um órgão que serve à passagem do ar atmosférico da faringe à traquéia, ou vice-versa. Nestes fantasmas, este órgão foi modelado como sendo compacto e homogêneo.

A traquéia é um órgão tubular que segue desde a laringe até o início dos brônquios principais. Este órgão apresenta parede e conteúdo, sendo o conteúdo preenchido por ar atmosférico. Logo após a traquéia, foram segmentados nestes fantasmas os brônquios principais e os brônquios lobares, que têm origem nos anteriores, e ainda alguns brônquios segmentares, todos com estrutura similar à da traquéia. Estes últimos tecidos não constam da lista de tecidos da ICRP89. A parede dos brônquios recebeu a densidade do tecido mole.

Os pulmões, os principais órgãos da respiração, ocupam a maior parte da cavidade torácica. Possuem relações de vizinhança com o coração, traquéia, esôfago, timo, vasos sanguíneos, bem como com as estruturas da parede do tórax. As diferenças entre os pulmões foram consideradas e a modelagem atendeu ainda à fase da respiração, já que nestes modelos os pulmões estão em inspiração.

### 5.1.2 Sistema digestório

A Figura 22 mostra os órgãos deste sistema no fantoma de 10 anos de idade. Ele está composto pela cavidade bucal, língua, faringe, esôfago, estômago, intestino delgado e intestino grosso - que, em verdade, são segmentos do tubo digestório; e pelo fígado, pâncreas e glândulas salivares, que são glândulas que lançam suas secreções no interior deste tubo.



**Figura 22** – Imagens da vista anterior (à esquerda) e posterior (à direita) dos órgãos do sistema digestório do fantoma de 10 anos de idade.

A cavidade bucal é a cavidade delimitada entre o palato (acima), assoalho da boca (abaixo), istmo da garganta (posteriormente), lábios e bochechas (anterior e lateralmente). Não está listada na tabela de órgãos e tecidos da ICRP89 e recebeu a densidade do tecido mole. No seu interior localiza-se a língua, esta sim presente na lista da ICRP89. Quando o

alimento deixa a cavidade bucal ele segue para a faringe, já descrita no tópico sobre o sistema respiratório, e daí para o esôfago.

Dispostas no entorno da cavidade bucal estão as glândulas salivares. São elas as glândulas parótidas, sublinguais e submandibulares. Elas compõem as chamadas glândulas salivares maiores e derramam suas secreções dentro da cavidade bucal por meio de ductos excretores, não modelados nestes fantomas.

O esôfago é um órgão em forma de cilindro elipsóide que comunica a extremidade inferior da faringe ao cárdia do estômago. Tem início no pescoço, atravessa o tórax e termina no abdome. É um órgão de passagem.

A forma do estômago lembra a letra “J”. Possui como características morfológicas duas paredes, duas curvaturas, duas incisuras, todas elas reproduzidas nestes fantomas. Apresenta parede e conteúdo. Especial atenção foi dedicada aos locais de união do estômago com o esôfago e com o intestino delgado, para que estas transições reproduzissem a continuidade do tubo digestório.

O intestino delgado apresenta três setores: o duodeno, o jejuno e o íleo. A primeira porção, o duodeno, recebe as secreções digestivas do fígado e do pâncreas. Ele possui estreita relação com a cabeça do pâncreas e seus vizinhos; nesta região do abdome há uma grande proximidade entre vários órgãos importantes, tais como fígado, vesícula biliar, rins, supra-renais, ureteres, dentre outros. As alças do jejuno e da maior porção do íleo foram postas na região central do abdome, preenchendo o espaço deixado pelas outras vísceras. A união do intestino delgado com o grosso, chamada junção ileocecal, foi feita seguindo a descrição da Anatomia. As relações de vizinhança também foram consideradas. Este órgão apresenta parede e conteúdo. Todo ele foi modelado como um tubo contínuo, sem angulações acentuadas, capazes de impedir, no vivo, a passagem do conteúdo.

O fígado ocupa a maior parte do quadrante superior direito do abdome. Possui relações com o músculo diafragma. Especial atenção foi dedicada à morfologia da sua face visceral, quando das relações com os seus vizinhos abdominais. Logo abaixo do fígado existe um reservatório para a bile que ele produz, chamada vesícula biliar. Esta bolsa possui estreita relação com a face visceral do fígado. Tem forma parecida com a fruta pêra. Suas características morfológicas foram reproduzidas e seus três segmentos - fundo, corpo e colo - estão representados. Este órgão apresenta parede e conteúdo e consta na lista da ICRP89.

O pâncreas teve todos os seus setores modelados e uma atenção especial foi dedicada às suas relações com os vizinhos. Um exemplo da dificuldade de segmentação deste órgão em

imagens utilizadas para a construção de fantomas tomográficos foi o relatado por Christ e colaboradores (2010) que, mesmo utilizando técnicas de imagem apropriadas para partes moles (ressonância magnética), não conseguiram discernir este tecido em três dos seus modelos, tendo sucesso em apenas um deles.

O intestino grosso destes fantomas apresenta o ceco, os cólons ascendente, transverso, descendente e sigmóide, além do reto. Ou seja, dos segmentos do intestino grosso, somente o canal anal não foi modelado em toda a sua extensão. Cada um destes segmentos está em suas respectivas posições, dentro do que descreve a Anatomia. Este órgão apresenta parede e conteúdo. Todo ele foi modelado como um tubo contínuo, sem angulações capazes de impedir a passagem do conteúdo.

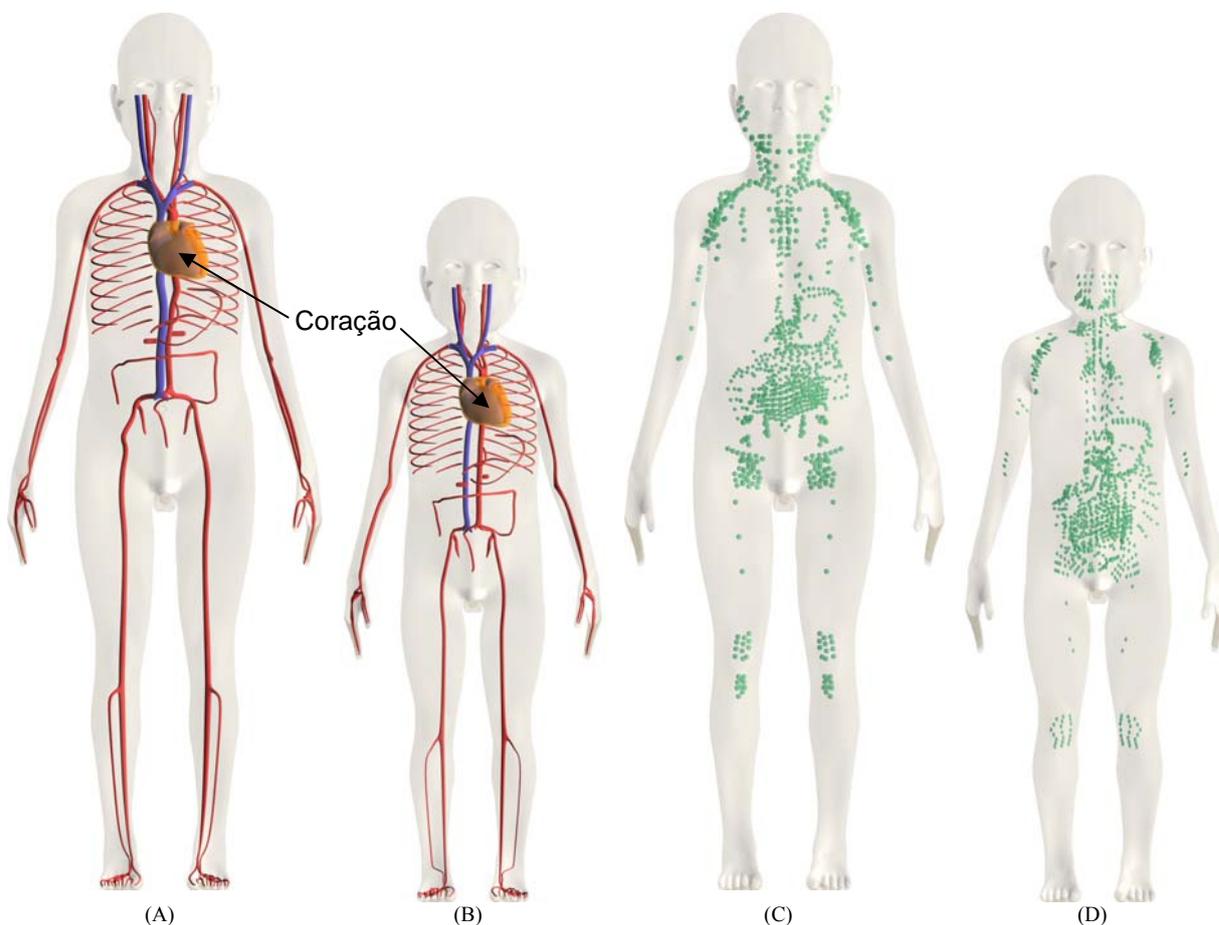
### 5.1.3 Sistemas circulatório e linfático

Foram modeladas a parede do coração e as suas câmaras, preenchidas por sangue. Os principais vasos sanguíneos do pescoço, tronco, membros superiores e inferiores também foram modelados.

A Figura 23 mostra as visões anteriores dos fantomas de 10 e de 5 anos, lado a lado, e em escala. Nos itens A e B desta figura, podem ser observados os grandes vasos do pescoço, tais como, as artérias carótidas comuns direita e esquerda e veias jugulares internas direita e esquerda. No tronco, podem ser vistos a artéria aorta, os vários pares de artérias intercostais, as artérias gástricas direita e esquerda, as artérias renais e o arco cólico. No membro superior, podem ser vistas as artérias subclávia, axilar, braquial, radial, ulnar e o arco arterial palmar superficial com seus ramos. No membro inferior, são mostradas as artérias femoral, poplítea, tibial anterior, tibial posterior, além do arco arterial plantar e seus ramos. Nestes casos, nenhum dos vasos recebeu um ID próprio, o sangue dentro dos vasos é que está segmentado. Mesmo tendo sido segmentado o sangue no interior dos mais calibrosos vasos sanguíneos do corpo humano, a maior quantidade do sangue está no interior de inúmeros pequenos vasos, localizados na periferia de vísceras e músculos. Por isso, a maior parte do sangue está segmentada como tecido mole.

Os linfonodos estão representados por grupos de estruturas esféricas ou elipsóides colocadas naquelas regiões reconhecidamente portadoras de linfonodos, tais como o pescoço,

as fossas axilares, os trígonois femorais, e ao redor dos grandes vasos do tórax e abdome. Muitos linfonodos são também encontrados na vizinhança dos intestinos delgado e grosso, principalmente entre estes órgãos e a parede posterior do abdome. A Figura 23, itens C e D, exibe a disposição destes linfonodos pelas regiões destes fantomas.



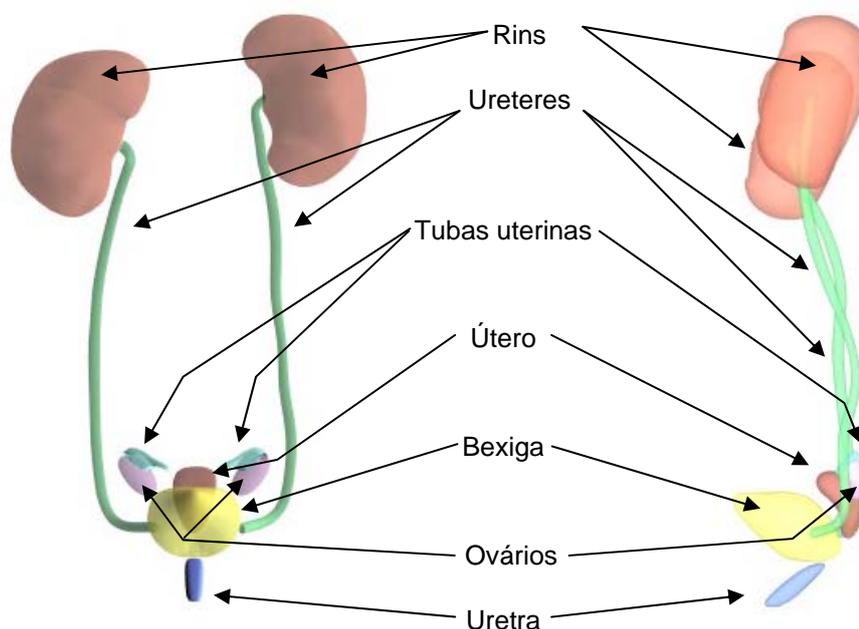
**Figura 23** – Vista anterior dos fantomas de 10 anos (A e C) e 5 anos (B e D), mostrando os sistemas circulatório (A e B) e linfático (C e D). Em vermelho, estão representadas as principais artérias dos membros, pescoço e tronco. Em azul, estão representadas as grandes veias do pescoço e tronco. Em verde, estão os linfonodos.

#### 5.1.4 Sistema urogenital

Ele é composto pelos rins, ureteres, bexiga e uretra, órgãos comuns aos dois sexos. No sexo feminino estão ainda presentes o útero, os ovários e as tubas uterinas, como mostra a Figura 24. No sexo masculino, estão presentes os testículos, os epidídimos e a próstata, mostrados na Figura 25.

A morfologia externa de cada um dos rins foi considerada, já que existem pequenas diferenças entre eles. O rim direito foi colocado um pouco abaixo do rim esquerdo para atender ao que está descrito pela Anatomia. Cada rim foi construído como uma massa homogênea, os seus componentes internos não foram modelados. Caso haja interesse no futuro, os outros constituintes podem ser inseridos.

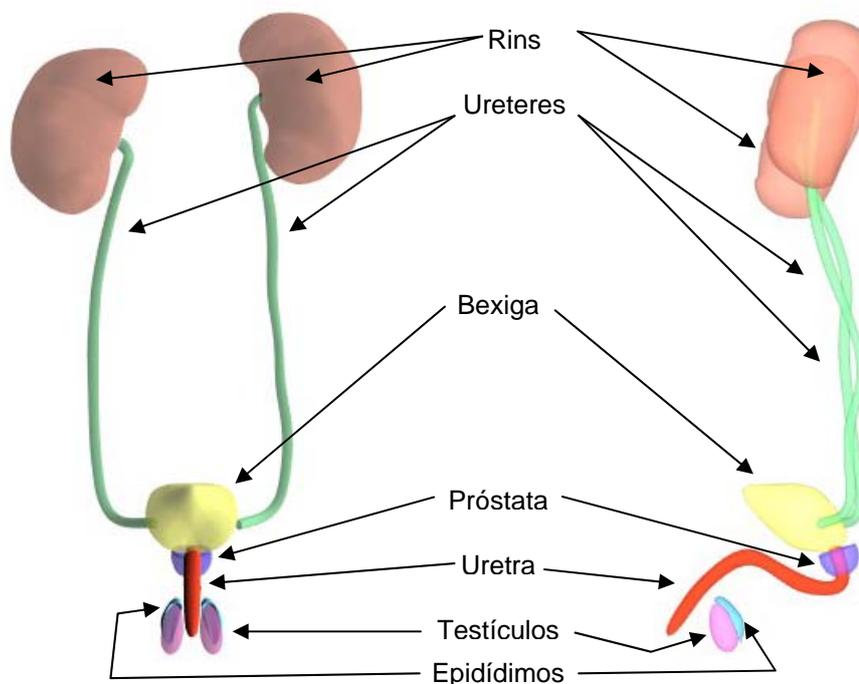
Os ureteres são os dois condutos que levam a urina produzida pelos rins até a bexiga. Estão localizados próximos à parede posterior do abdome e possuem estreitas relações com o intestinos. A bexiga está localizada no interior da cavidade pélvica. Sua forma varia de acordo com a quantidade de urina que aloja. Nestes fantasmas, a bexiga foi segmentada como se estivesse vazia. A bexiga tem origem na cavidade abdominal e, durante o crescimento, migra para a cavidade pélvica. Sua forma também muda com a idade, no recém-nascido, ela é fusiforme, e, no adulto, ela é elipsóide. Na Figura 24 pode ser vista a forma intermediária, aos 5 anos de idade, entre a do recém-nascido e a do adulto, mais facilmente percebida na imagem lateral. Aos 10 anos, a semelhança com a forma do adulto é bem maior.



**Figura 24** – Imagens da vista anterior (à esquerda) e lateral (à direita) dos órgãos do sistema urogenital feminino do fantoma de 5 anos de idade.

A uretra varia de acordo com o sexo. No sexo feminino, é curta e oblíqua, como mostra a Figura 24. No sexo masculino, é bem mais comprida e tortuosa, como mostra a

Figura 25. Uma diferença marcante entre os sexos é que, enquanto a uretra feminina serve apenas ao sistema urinário, a uretra masculina serve aos sistemas urinário e genital.



**Figura 25** – Imagens da vista anterior (à esquerda) e lateral (à direita) dos órgãos do sistema urogenital masculino do fantoma de 5 anos de idade.

Como pode ser visto na Figura 24, o útero se localiza acima e atrás da bexiga. A cada um de seus lados, estão presentes as tubas uterinas e os ovários. Por serem órgãos muito móveis, foram modelados na posição descrita como mais freqüente, porém as variações são muitas, tanto na posição quanto na forma destes órgãos.

A Figura 25 mostra a próstata, logo abaixo da bexiga, sendo atravessada pela uretra, que, por sua vez, segue anteriormente até a glândula do pênis. Abaixo da uretra, estão os testículos e os epidídimos, contidos nas bolsas escrotais.

### 5.1.5 Sistema esquelético

Como mostra a Figura 26, os esqueletos destes fantomas apresentam características próprias destas idades. Os ossos são proporcionais a cada um dos segmentos corporais e

trazem consigo as diferenças que aparecem durante o crescimento. Por exemplo, na idade de 5 anos o volume da maioria dos órgãos da cabeça já está bem próximo daquele do adulto e há pequena diferença em relação ao de 10 anos. O que não acontece com os membros inferiores, que são menores na idade de 5 anos e um pouco maiores na idade de 10 anos, e ainda crescerão mais após os 10 anos, até alcançarem as dimensões do adulto.

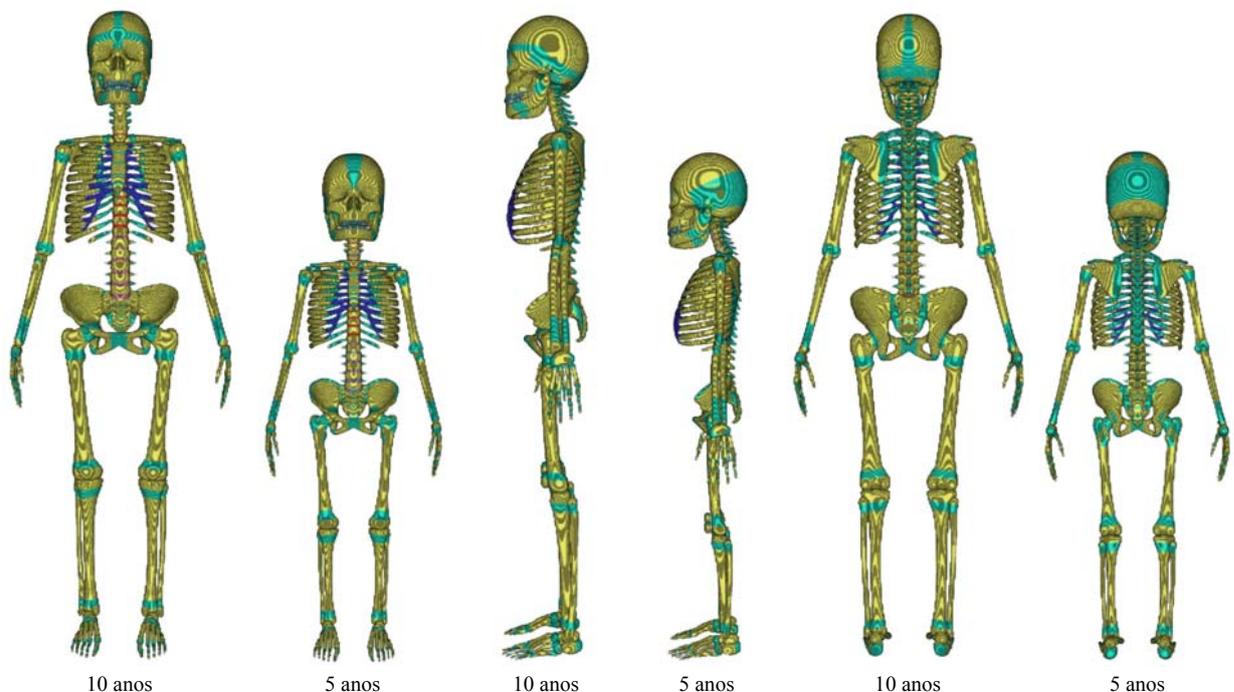


**Figura 26** – Imagens da vista anterior dos fantasmas de 10 anos (à esquerda) e 5 anos (à direita), mostrando o esqueleto.

As cartilagens costais, constituídas por cartilagem hialina, e os discos intervertebrais, constituídos por fibrocartilagem, estão segmentadas. Na contagem geral das massas de cada tecido do esqueleto, as cartilagens costais foram incluídas como parte do tecido cartilágneo das costelas e os discos intervertebrais foram incluídos como parte do tecido cartilágneo da coluna vertebral.

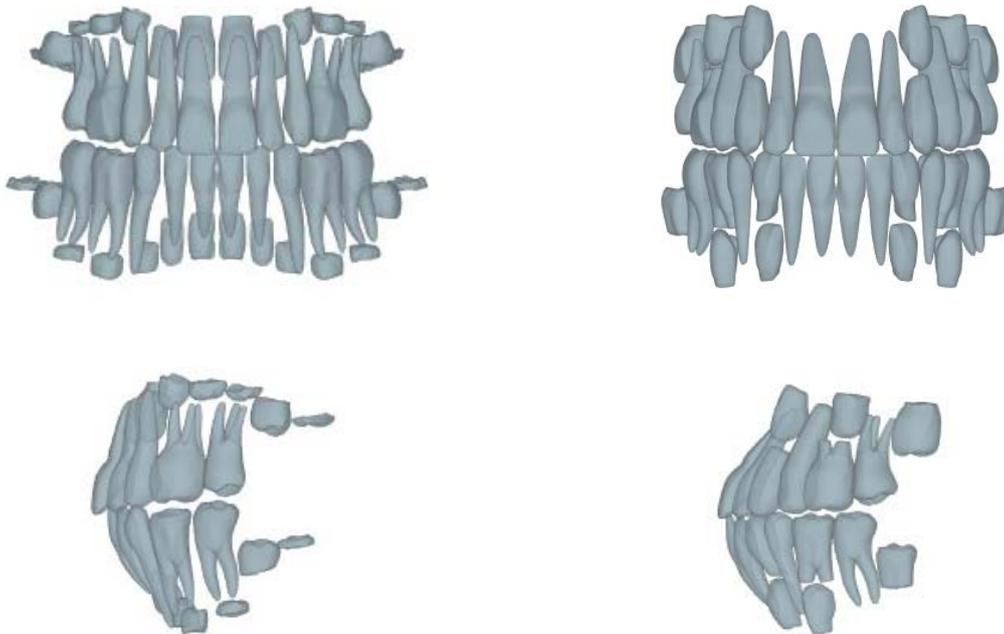
Dentro dos ossos da cabeça foram segmentados os seios paranasais e as cavidades dos ouvidos médio e interno. Eles receberam IDs específicos mas, para efeito do código Monte Carlo, fazem parte do tecido mole.

Nas crianças, uma das diferenças mais marcantes é a disposição dos tecidos do esqueleto. Enquanto, no adulto, os ossos já terminaram seu crescimento, nas crianças ele ainda ocorre. A Figura 27 mostra as regiões de osso compacto, em amarelo, já na condição que terá no adulto; e zonas de cartilagem de crescimento, em verde, presentes nestas idades. O crescimento dos ossos leva em consideração a forma geométrica que eles apresentam. Os ossos longos crescem apresentando um trecho de cartilagem de crescimento entre as extremidades e o corpo do osso. Os ossos largos apresentam cartilagem de crescimento na periferia do osso e os ossos curtos apresentam cartilagem de crescimento em regiões diversas, na dependência dos centros de ossificação.



**Figura 27** – Imagens da vista anterior (à esquerda), lateral esquerda (no centro) e posterior (à direita) dos esqueletos dos fantasmas de 5 e 10 anos de idade.

Os dentes também apresentam diferenças entre estas idades, como pode ser observado na Figura 28. Em crianças com 5 anos de idade, erupcionaram 5 dentes em cada hemi-arcada: o incisivo central, o incisivo lateral, o canino, o primeiro molar da dentição temporária e o segundo molar da dentição temporária. Já crianças com 10 anos de idade apresentam 6 dentes em cada hemi-arcada: o incisivo central, o incisivo lateral, o canino, o primeiro molar da dentição temporária, o segundo molar da dentição temporária e o primeiro molar da dentição permanente. O primeiro molar da dentição permanente já surge por volta dos 6 anos de idade. Foram modelados, além dos dentes já “nascidos”, aqueles em desenvolvimento, dentro dos ossos da cabeça.

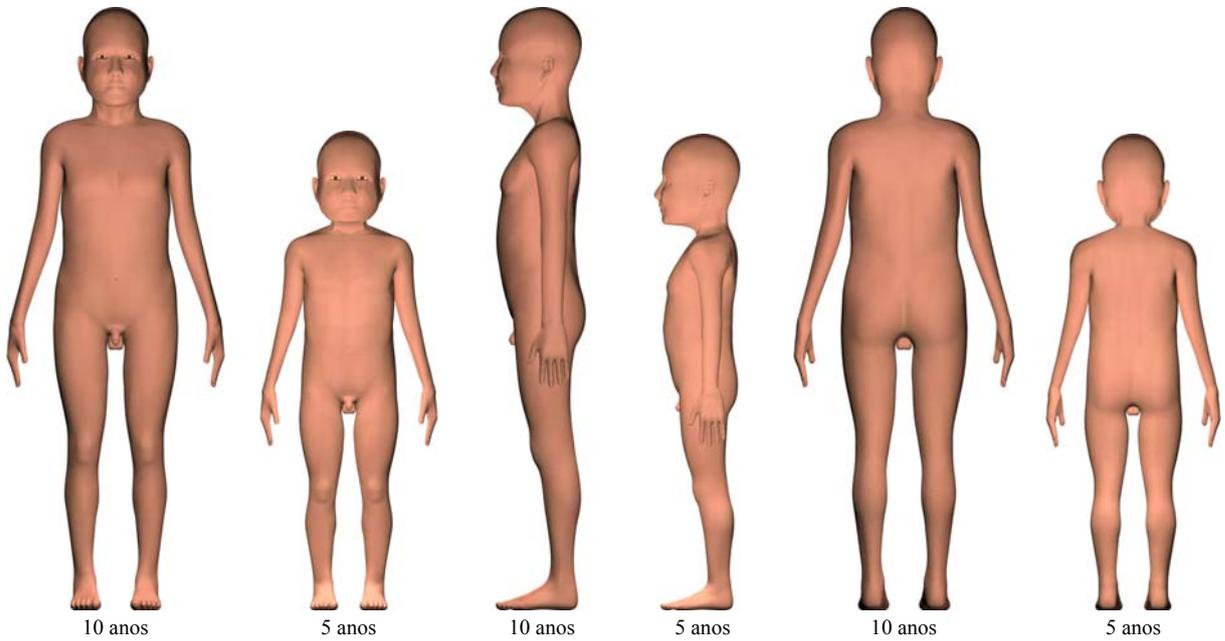


**Figura 28** – Imagens da vista anterior (acima) e lateral esquerda (abaixo) dos dentes dos fantomas de 5 anos (à esquerda) e 10 anos (à direita).

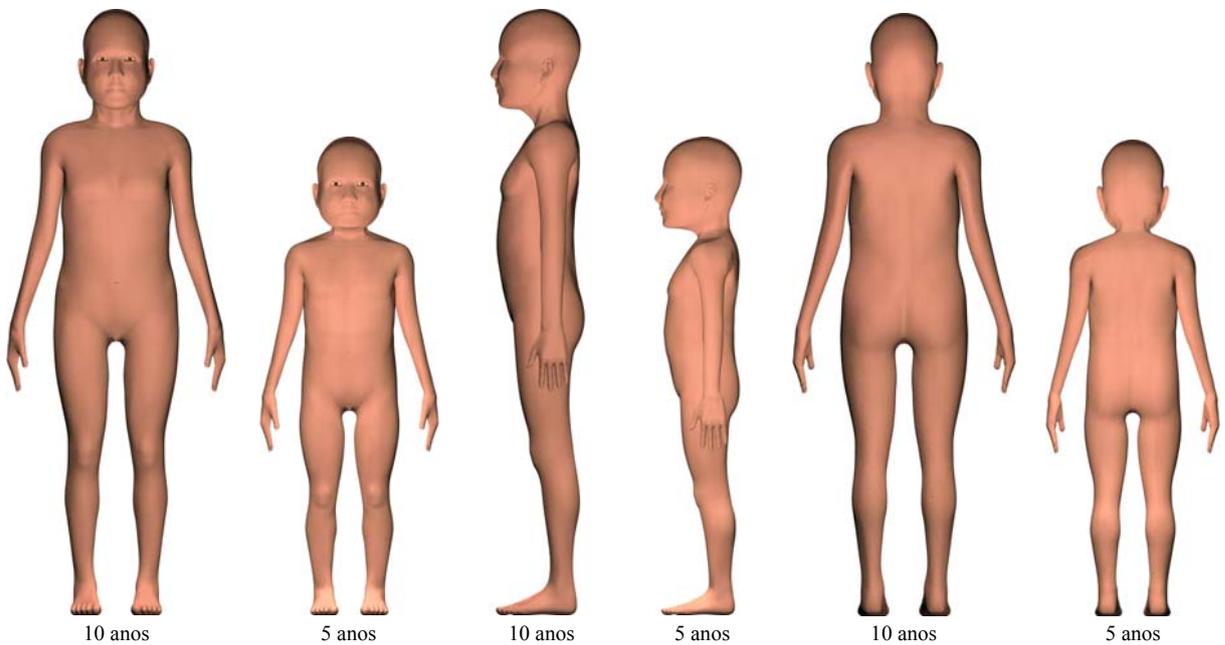
#### 5.1.6 Sistema tegumentar

De todos os componentes do sistema tegumentar, apenas a pele foi segmentada. Unhas e cabelos não foram segmentados. As Figuras 29 e 30 mostram a pele dos fantomas

masculinos e femininos, respectivamente. A pele só não cobre a face anterior dos olhos, pois os fantasmas estão com os olhos abertos.



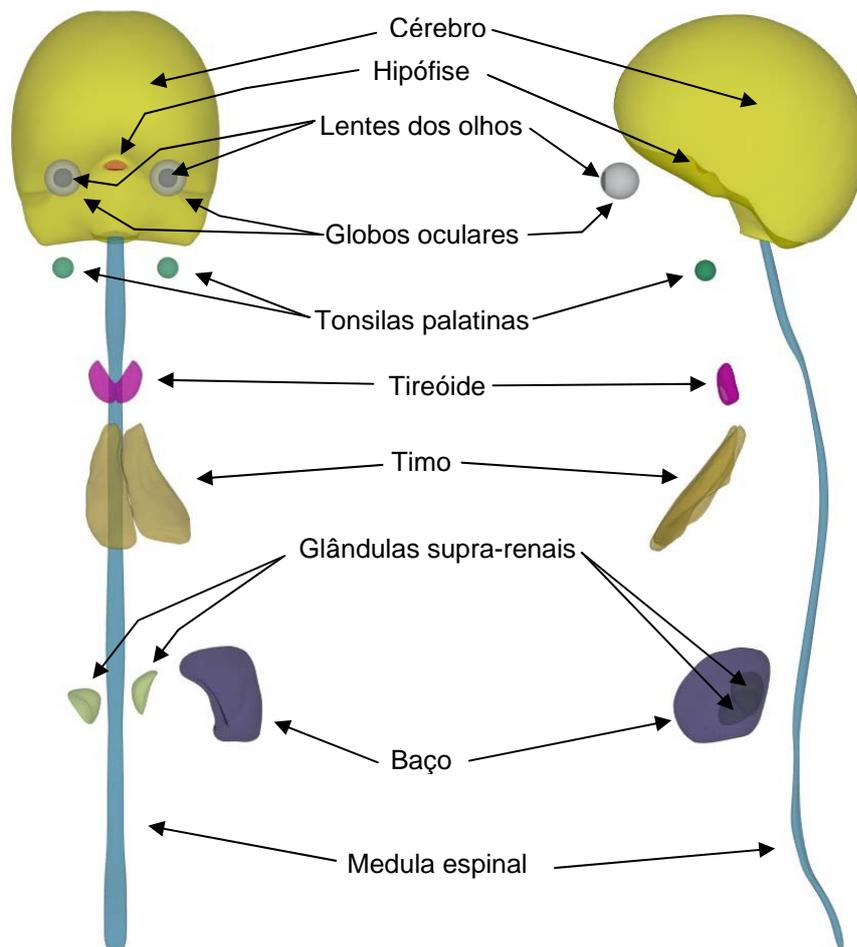
**Figura 29** – Imagens da vista anterior (à esquerda), lateral esquerda (no centro) e posterior (à direita) dos fantasmas masculinos de 5 e 10 anos de idade.



**Figura 30** – Imagens da vista anterior (à esquerda), lateral esquerda (no centro) e posterior (à direita) dos fantasmas femininos de 5 e 10 anos de idade.

### 5.1.7 Outros órgãos e tecidos

Neste item, estão reunidos todos os demais órgãos e tecidos. São eles: globos oculares e lentes dos olhos, cérebro e hipófise, medula espinal, glândulas supra-renais, tecido muscular, timo, baço, tireóide, tonsilas palatinas, tecido conectivo, tecido mole e gordura. A maioria deles pode ser vista na Figura 31.



**Figura 31** – Imagens da vista anterior (à esquerda) e lateral esquerda (à direita) de alguns dos demais órgãos e tecidos do fantoma de 5 anos de idade.

Dois tecidos constituem os olhos destes fantasmas, o globo ocular e a lente dos olhos, o cristalino. A posição do cristalino foi colocada de tal forma a separar as câmaras anterior e posterior do globo ocular, localizadas anteriormente, da câmara vítrea do globo ocular, localizada posteriormente. Ou seja, nestes fantasmas o cristalino está dentro do espaço delimitado pelo globo ocular e não na face anterior deste globo.

O tecido aqui segmentado como cérebro merece um melhor esclarecimento: no texto em inglês da ICRP89, a palavra que nomeia este tecido é “*brain*”, que em português é corriqueiramente traduzido como cérebro. Porém, lendo-se a descrição deste tecido vê-se que ele engloba, além do cérebro em si, o tronco encefálico e o cerebelo, ou seja, o encéfalo. Mais ainda, ele reúne todo o conteúdo da cavidade craniana, incluindo as meninges e os espaços meníngeos. A única exceção é a hipófise, que, mesmo fazendo parte do cérebro, é descrita como um tecido à parte. O encéfalo feminino apresenta a massa, e, conseqüentemente, o volume, menor do que o masculino. Para a construção dos fantasmas femininos foram utilizados os modelos masculinos, já que as diferenças, no corpo como um todo, são pequenas nestas idades. Para atender a esta característica foi criado um novo tecido chamado “entorno do cérebro feminino” (segmentado como tecido mole), para ocupar a parte livre da cavidade craniana feminina.

A medula espinal não está na lista de órgãos e tecidos da ICRP89. Foi construída para manter a uniformização com os fantasmas adultos e outros construídos pelo grupo de pesquisa. Este órgão ocupa o canal vertebral desde a porção inferior do encéfalo até altura do disco intervertebral entre a primeira e segunda vértebras lombares. É segmentado como tecido mole.

As glândulas supra-renais são um órgão par em estreita relação com o rim de cada lado. Foram respeitadas suas formas e relações com os vizinhos, tais como, à direita, com o rim direito e o fígado, e, à esquerda, com o rim esquerdo, estômago e pâncreas.

Quanto ao tecido muscular, além de constituírem a maior parte dos tecidos encontrados nos membros superiores e inferiores, estão presentes em todas as paredes das grandes cavidades do corpo humano. Os fantasmas apresentam os músculos da face, pescoço, tronco, membros superiores e inferiores. Foram respeitadas suas relações anatômicas com os tecidos vizinhos, tais como vasos sanguíneos, gordura, cápsulas articulares, tendões, tecido mole e linfonodos, além das vísceras. Nestes fantasmas, o tecido muscular representa aquele voltado à locomoção, ou seja, tecido muscular estriado esquelético. O tecido muscular que compõe paredes de vísceras, geralmente tecido muscular liso ou, no caso do coração, tecido muscular estriado cardíaco, foi segmentado como parte da víscera, seguindo as descrições da ICRP89.

O timo é maior nas crianças do que nos adultos. Deste modo, um estudo anatômico mais detalhado foi feito para sua colocação nos espaços que poderiam ser ocupados no

mediastino. Merece destaque a diferença na sua massa entre os modelos masculino e feminino de 10 anos de idade. O masculino apresentando 40 g e o feminino 35 g.

A modelagem do baço atendeu a todas as relações anatômicas que este órgão possui com o pâncreas, estômago, rim esquerdo, intestino grosso e músculo diafragma.

Quanto à tireóide, encontra-se em torno das faces anterior e laterais da laringe, na porção anterior do pescoço. Foi modelada segundo a descrição mais freqüente para sua forma, apresentando dois lobos laterais, unidos anteriormente pelo istmo.

As tonsilas palatinas estão localizadas à direita e à esquerda da cavidade bucal, bem próximas à transição entre esta cavidade e a faringe. Elas estão entre os arcos palatoglossos e palatofaríngeo do istmo da garganta, na fossa tonsilar de cada lado.

O tecido conectivo reúne a fáscia muscular, tendões e tecido peri-articular. Devido à dificuldade em colocá-lo em torno do tecido muscular, este tecido não foi segmentado inteiramente como um tecido individualizado, parte dele está segmentado como tecido mole.

O tecido mole não consta na lista da ICRP89, mas sua densidade é descrita pela ICRU46. Sozinho, ele aparece nestes fantomas compondo a parte não segmentada do sangue e do tecido conectivo. Os tecidos sem densidade claramente estabelecida pela ICRU46 receberam a designação de tecido mole e foi usada a sua densidade para estes tecidos. Melhor dizendo, ele foi usado como um tecido “coringa”, ou seja, naqueles casos em que se desejava segmentar um tecido não descrito explicitamente pela ICRP89 foi colocado um ID representativo daquela estrutura, mas, para efeito da simulação Monte Carlo, estes tecidos pertencem ao tecido mole.

A gordura é encontrada compondo a camada logo abaixo da pele, na tela subcutânea, e no entorno de vísceras, como no abdome. A espessura desta camada varia de acordo com as regiões do corpo humano. No mais, este é um tecido de preenchimento. Em todos os locais dos fantomas onde não estão presentes outros tecidos, lá está a gordura.

## **5.2 Fantomas voxelizados**

Como já relatado anteriormente, para que fosse possível o acoplamento ao código Monte Carlo foi necessário voxelizar o fantoma mesh. Para isto, algumas variáveis tiveram

que ser determinadas. A mais importante foi o comprimento da aresta do voxel. Isto determinou o número de linhas, colunas e fatias dos fantomas.

Devido à espessura da pele de crianças até 10 anos ser de 0,066 cm, segundo a ICRP89, a aresta dos voxels destes fantomas possui 0,07 cm de aresta. Assim sendo, cada voxel tem um volume de  $0,000343\text{cm}^3$ .

A tabela 1 enumera as principais características dos fantomas de 5 e 10 anos tais como a altura dos fantomas, o número total de voxels, o número de colunas, linhas e fatias da pilha, dentre outras.

**Tabela 1** – Principais características dos fantomas de 5 e 10 anos voxelizados.

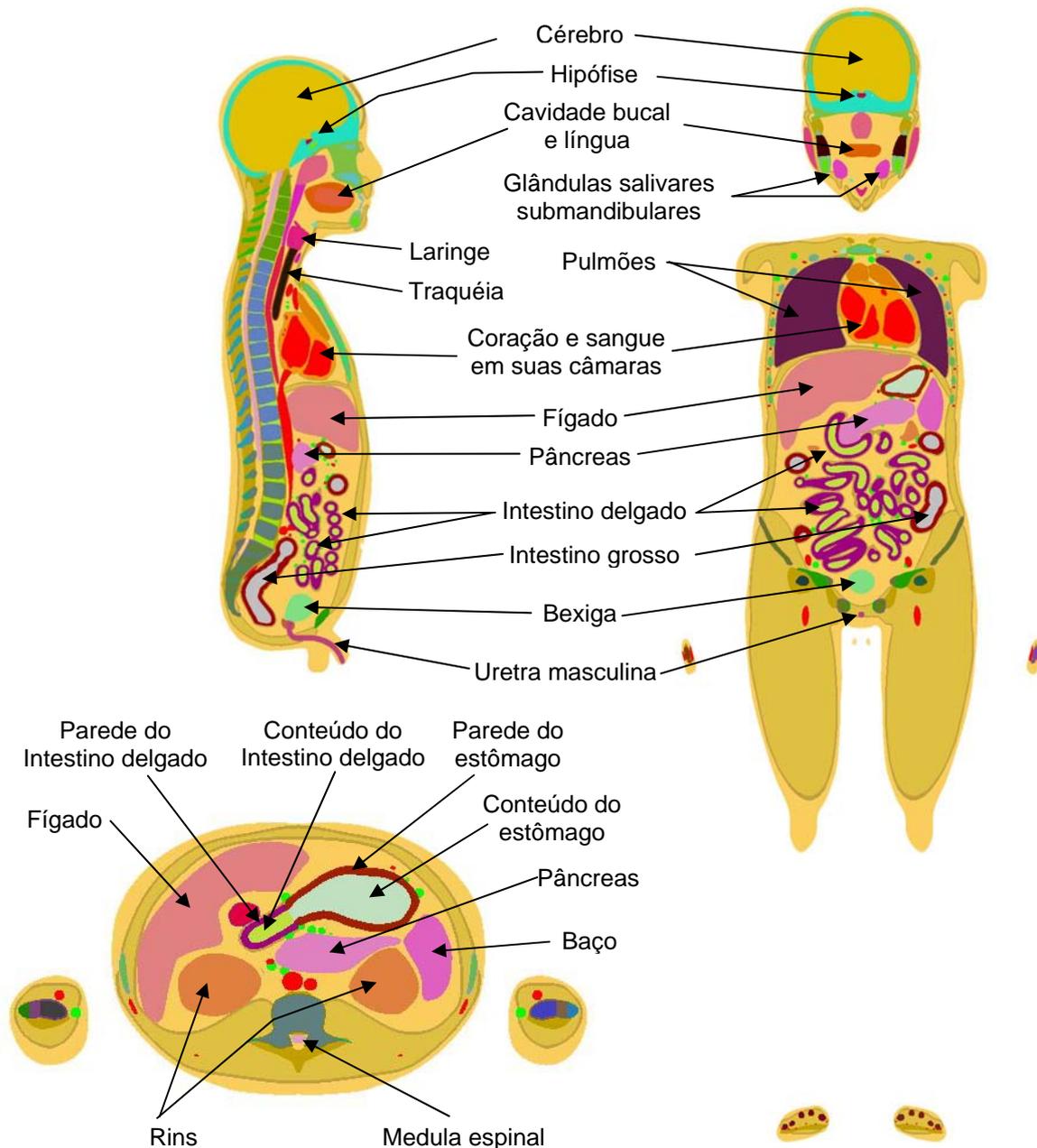
Propriedade	5 anos	10 anos
Altura do fantoma (cm)	108,99	137,97
Número de voxels de órgãos e tecidos do fantoma masculino	55.648.278	93.518.500
Número de voxels de órgãos e tecidos do fantoma feminino	55.585.461	93.400.147
Número de órgãos e tecidos segmentados do fantoma masculino	142	142
Número de órgãos e tecidos segmentados do fantoma feminino	143	143
Massa do fantoma masculino (kg)	19,16	32,39
Massa do fantoma feminino (kg)	19,15	32,34
Nome do fantoma masculino	M05	M10
Nome do fantoma feminino	F05	F10
Espessura da fatia (altura do voxel, cm)	0,07	0,07
Resolução do pixel no plano (cm x cm)	0,07 x 0,07	0,07 x 0,07
Volume do voxel ( $\text{cm}^3$ )	0,000343	0,000343
Número de colunas	568	706
Número de linhas	286	314
Número de fatias	1559*	1973*

\* Este número inclui duas fatias contendo somente ar, uma acima e outra abaixo daquelas que contém os órgãos e tecidos dos respectivos fantomas.

Após a voxelização, foram feitas tabelas enumerando cada órgão e tecido de cada um dos fantomas, com seu respectivo ID e número de voxels. Este é um dos arquivos necessários ao acoplamento. Estas tabelas, por serem extensas, estão disponíveis nos apêndices deste trabalho. São quatro tabelas, uma para cada fantoma. Elas trazem ainda colunas usadas para a comparação entre as massas dos órgãos e tecidos destes fantomas com as massas da ICRP89 e sua diferença percentual. Para a grande maioria dos tecidos, a diferença é menor que 1%.

O outro arquivo necessário é a pilha tridimensional das imagens bidimensionais, com a disposição espacial dos tecidos nos fantomas, ou seja, é o arquivo voxelizado do fantoma. Essas imagens são, geralmente, visualizadas como se o indivíduo tivesse se submetido a uma tomografia computadorizada, neste caso são vistas as imagens das secções transversais do fantoma. Porém, essa é uma escolha do observador. Usando ferramentas apropriadas, a vista

pode ser facilmente alterada. A Figura 32 mostra as imagens de três secções, uma sagital, outra coronal, e ainda uma transversal do fantoma masculino de 10 anos. Nela estão apontados alguns órgãos, tais como o baço, cérebro, hipófise, e outros. Merece destaque a visualização da parede e do conteúdo do estômago e intestino delgado. Estas três maneiras de visualizar são muito úteis para a verificação das posições dos órgãos e tecidos dos fantasmas.



**Figura 32** – Imagens de uma secção sagital (acima, à esquerda), de uma secção frontal (à direita) e de uma secção transversal (abaixo, à esquerda), em diferentes alturas do fantoma de 10 anos de idade. Alguns órgãos e tecido estão indicados.

Estes fantomas mesh de crianças aqui descritos permitem que a resolução da voxelização seja definida de acordo com o interesse que se tenha. A resolução é definida, essencialmente, no momento da voxelização.

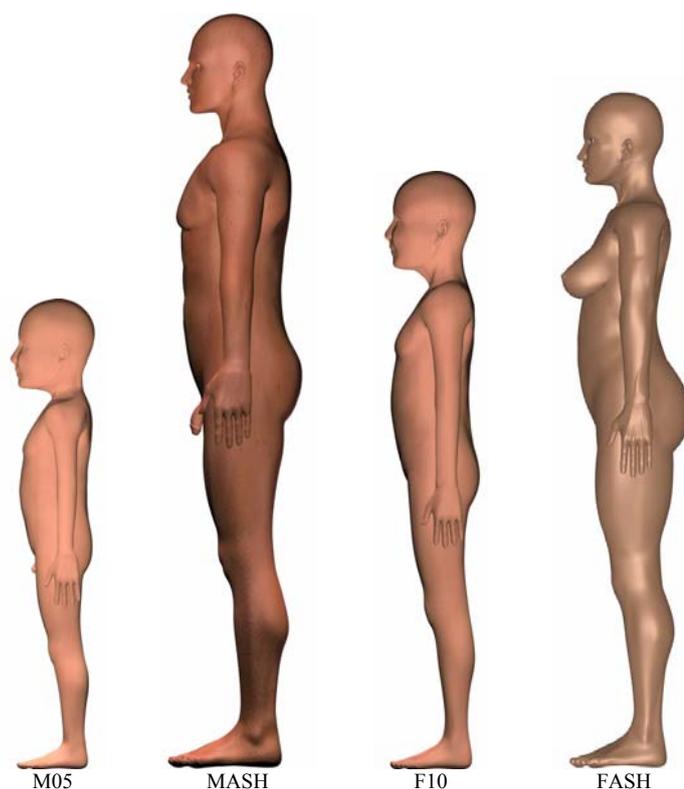
### 5.3 Avaliações dosimétricas

O objetivo deste estudo, que é o desenvolvimento de fantomas mesh de crianças do sexo masculino e feminino de 5 e 10 anos de idade, foi alcançado. Os resultados dosimétricos apresentados neste capítulo mostram alguns exemplos de que doses equivalentes para órgãos e tecidos, calculados com estes fantomas infantis, são razoáveis quando comparados com dados correspondentes de outros fantomas, tomando em conta as diferenças conhecidas entre os diversos modelos. Cálculos de doses equivalentes para todos os órgãos e tecidos radiosensíveis, para todos os cenários de exposição relevantes, estão além do escopo deste estudo e serão publicados em artigos em publicações científicas adequadas.

As doses equivalentes em órgãos e tecidos foram calculadas para os seguintes cenários de exposição: - exposição externa de corpo inteiro anterior-posterior (AP), posterior-anterior (PA) e rotacional (ROT), com um feixe paralelo de fótons; e - exposição interna com emissores gama concentrados em órgãos selecionados. As energias de corte foram 2 keV para fótons em todos os tecidos, 20 keV para elétrons em tecidos fora do esqueleto e 5 keV em tecidos do esqueleto. Os erros estatísticos estiveram normalmente bem abaixo de 1% ou abaixo de 5% para energias de fótons incidentes abaixo de 20 keV. As doses equivalentes em órgãos e tecidos para os fantomas infantis, chamados M05, F05, M10 e F10, foram comparados com dados correspondentes para fantomas mesh adultos e para fantomas infantis tipo MIRD5.

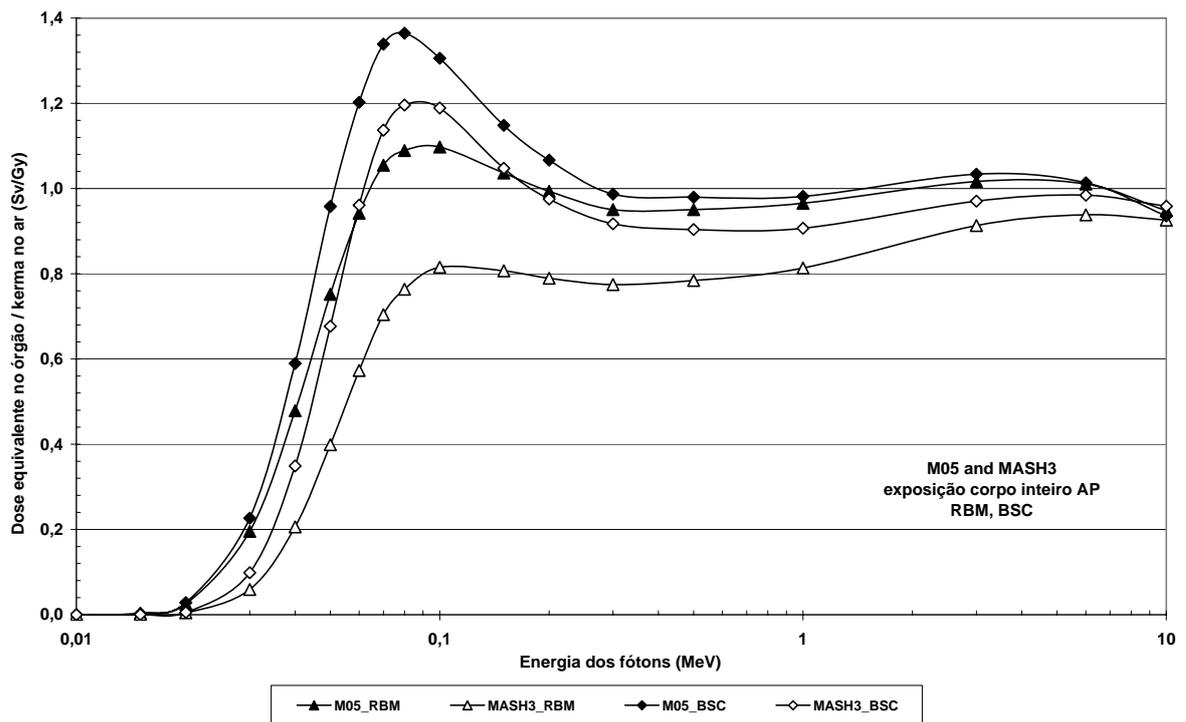
#### 5.3.1 Comparação com fantomas adultos

A Figura 33 mostra as vistas laterais dos fantomas infantis M05 e F10 juntos aos fantomas mesh adulto masculino MASH e adulto feminino FASH, respectivamente (CASSOLA et al., 2010). As diferenças nos diâmetros sagitais entre os corpos das crianças e dos adultos sugerem doses equivalentes maiores em órgãos e tecidos nos corpos das crianças para exposições externas, quando comparadas aos adultos, por causa da menor blindagem provocada tanto pela superposição de tecidos quanto por serem menores as massas dos órgãos.

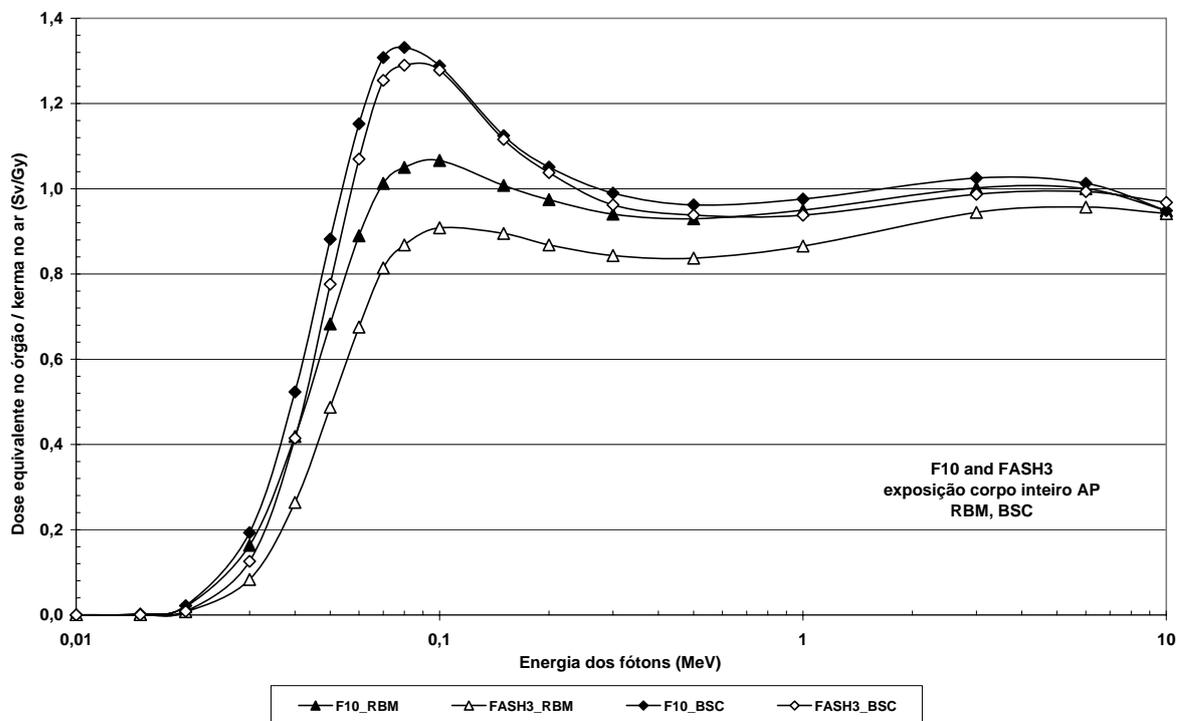


**Figura 33** – Vista lateral dos fantasmas infantis M05 e F10 e adultos MASH e FASH.

As doses equivalentes para medula óssea vermelha (RBM) e para as células da superfície dos ossos (BSC) por kerma no ar incidente são mostradas nas Figuras 34 e 35, para os fantasmas infantis e para os fantasmas adultos. Os cálculos Monte Carlo simularam exposição AP de corpo inteiro com fótons. Na Figura 34 as doses equivalentes para RBM e BSC para o M05 são mostradas juntas a dados correspondentes do fantoma MASH. Como esperado, as doses equivalentes para RBM e BSC no esqueleto do MASH são menores porque a maior massa corporal do adulto fornece maior atenuação para a radiação antes que ela alcance os ossos, quando comparadas ao corpo masculino de 5 anos de idade. Uma situação similar pode ser vista para o fantoma feminino de 10 anos de idade F10, em relação ao fantoma adulto feminino FASH. Entretanto, as diferenças entre as doses equivalentes para o RBM e BSC entre os fantasmas femininos adulto e infantil são menores, por causa da menor diferença entre a massa corporal do corpo feminino de 10 anos em relação ao do adulto.

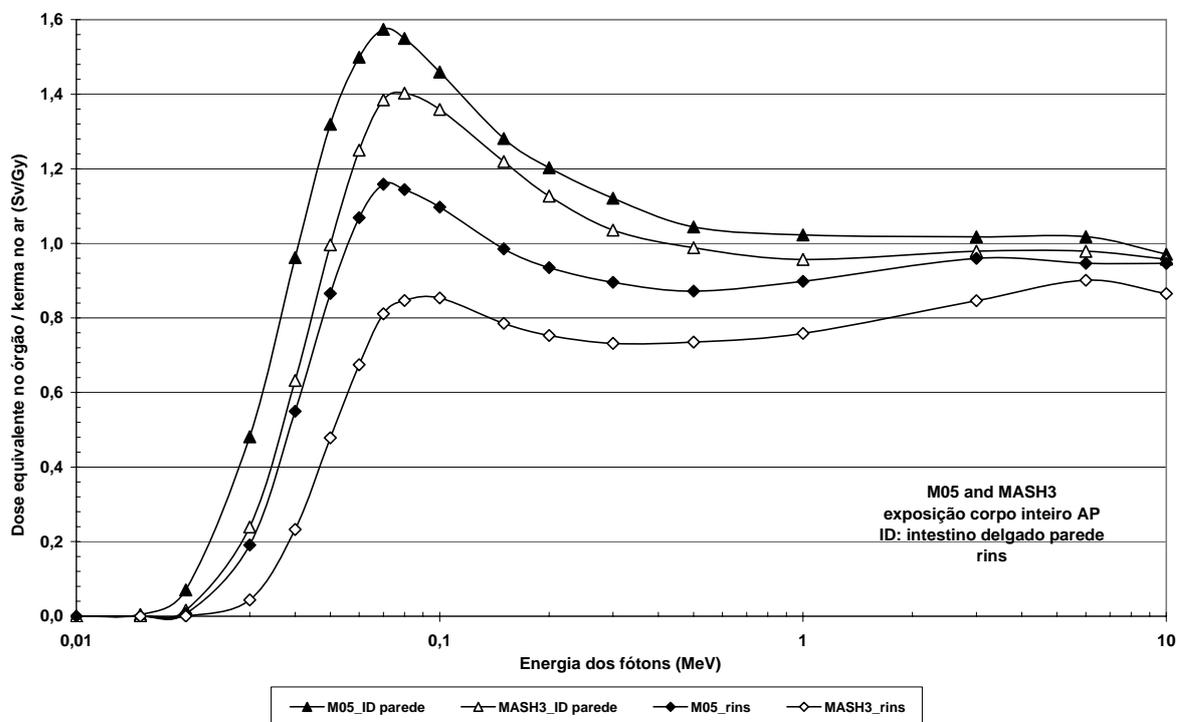


**Figura 34** - Dose equivalente normalizada por kerma no ar na medula óssea vermelha (RBM) e nas células na superfície do osso (BSC) para exposição de corpo inteiro AP nos fantasmas masculinos infantil M05 e adulto MASH.

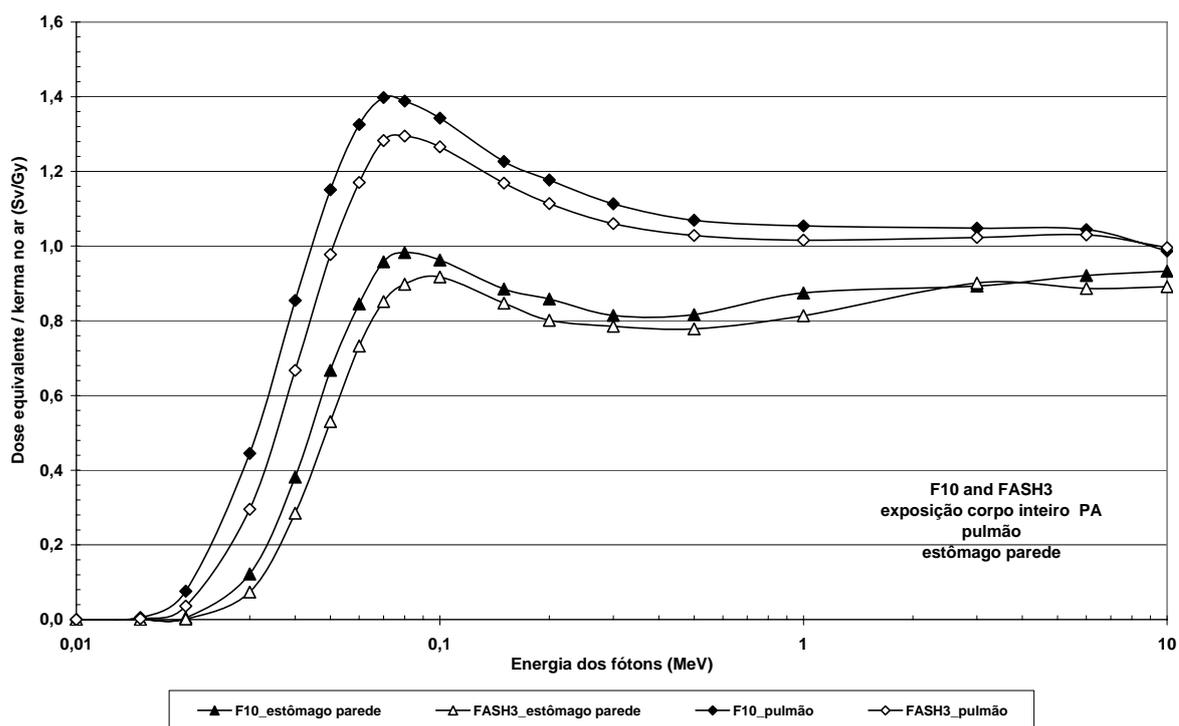


**Figura 35** - Dose equivalente normalizada por kerma no ar na medula óssea vermelha (RBM) e nas células na superfície do osso (BSC) para exposição de corpo inteiro AP nos fantasmas femininos infantil F10 e adulto FASH.

A Figura 36 mostra doses equivalentes na parede do intestino delgado e nos rins para exposição AP de corpo inteiro para fótons nos fantasmas M05 e MASH. Como esperado, as doses equivalentes na criança são maiores do que os correspondentes no adulto, para toda a variação das energias dos fótons incidentes. Uma situação similar é mostrada na Figura 37 para os fantasmas F10 e FASH para exposição PA. As doses equivalentes nos pulmões e na parede do estômago na criança são sempre maiores do que as doses equivalentes correspondentes no adulto. Conseqüentemente, para um dado cenário de exposição externa as crianças são normalmente mais vulneráveis aos danos provocados pela radiação do que os adultos.



**Figura 36** - Dose equivalente normalizada por kerma no ar na parede do intestino delgado e nos rins para exposição de corpo inteiro AP nos fantasmas masculinos infantil M05 e adulto MASH.



**Figura 37** - Dose equivalente normalizada por kerma no ar no pulmão e na parede do estômago para exposição de corpo inteiro PA nos fantasmas femininos infantil F10 e adulto FASH.

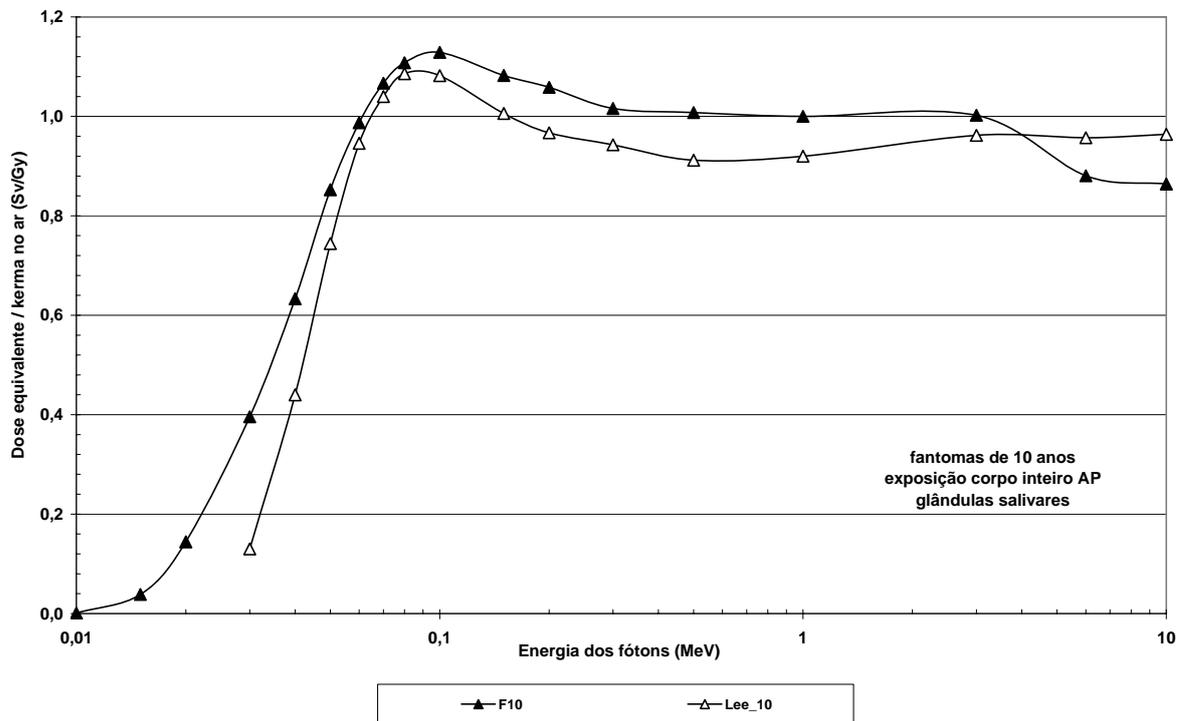
### 5.3.2 Comparação com fantasmas infantis MIRD5

Embora fantasmas infantis híbridos tenham sido desenvolvidos por Lee e colaboradores (2010), infelizmente, dados dosimétricos não estão disponíveis para estes modelos. Portanto, as comparações foram feitas com dados encontrados com o uso de fantasmas matemáticos tipo MIRD5, como aqueles mostrados na Figura 1, no item 3.1 deste trabalho.

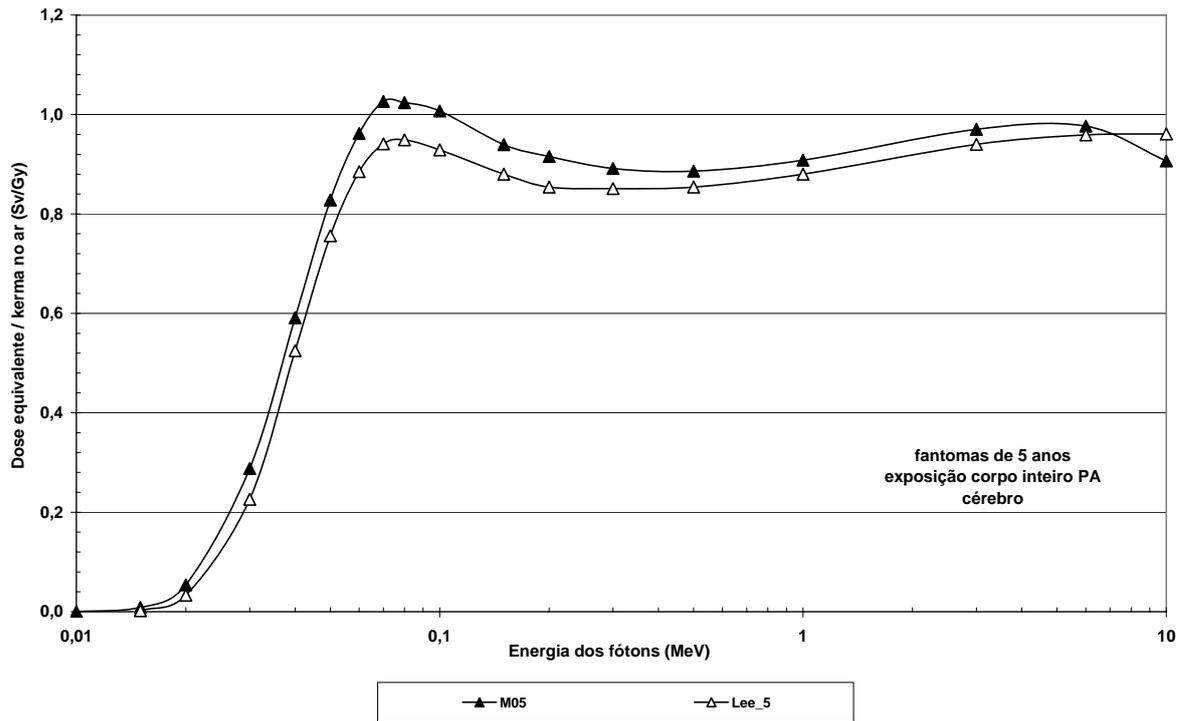
Comparações com dados obtidos no trabalho de Lee e colaboradores (2007) são mostradas nas Figuras 38-40 para as glândulas salivares, cérebro e parede do coração, respectivamente. Como imagens transversais dos fantasmas MIRD5 não estão disponíveis, é difícil explicar exatamente porque, nos fantasmas MIRD5, as doses equivalentes para as glândulas salivares na figura 38 e para o cérebro na figura 39 são menores do que os dados das crianças deste trabalho. Usualmente, tais diferenças significam que, no fantoma mostrando menores doses equivalentes, os órgãos ou tecidos estão localizados mais profundamente em relação à superfície corporal, estando assim mais blindados pela superposição de tecidos, como gordura, músculo, etc. Uma situação diferente pode ser vista

na Figura 40 para exposição ROT, quando a dose equivalente na parede do coração para o fantoma MIRD5 supera os dados correspondentes para o fantoma M10. Pode ser visto na Figura 1, no item 3.1 deste trabalho, que os ossos dos braços estão localizados dentro do tronco, isto é, os fantasmas MIRD5 não possuem os membros superiores completos, o que leva a uma menor blindagem para exposições laterais.

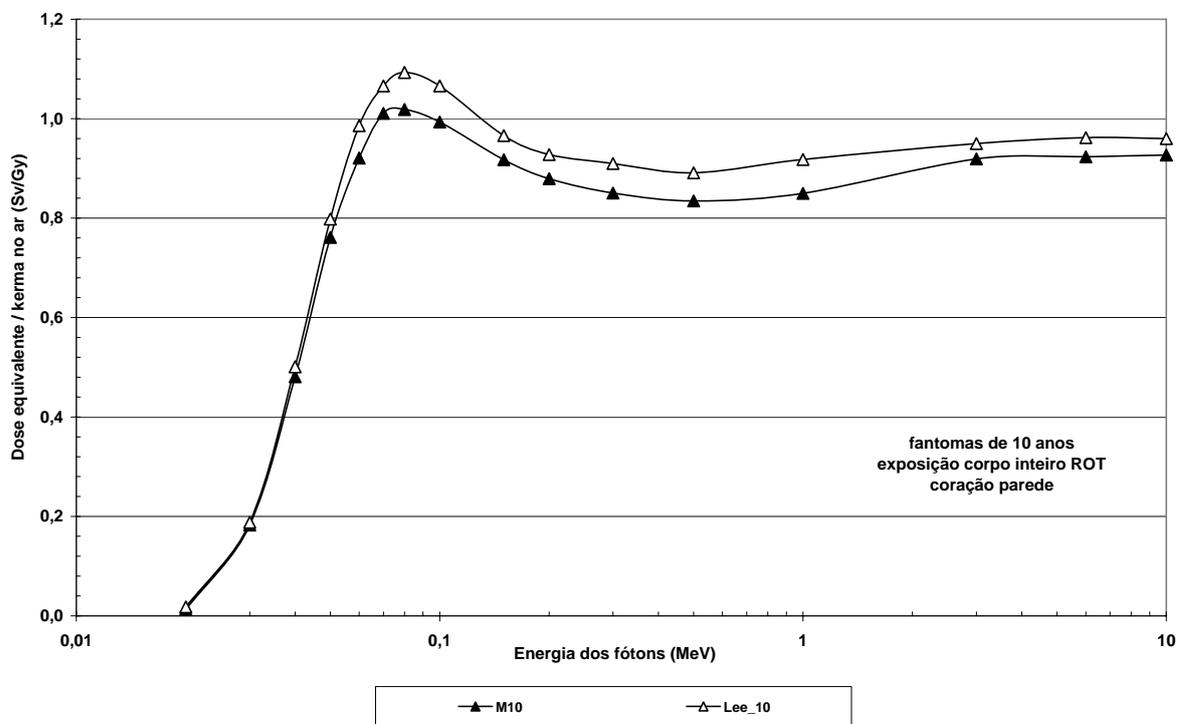
Frações absorvidas específicas (SAFs) são mostradas nas figuras 41-43 para os fantasmas F05 e M10, bem como para os fantasmas MIRD5 de 5 e 10 anos, usados pelo software OLINDA (STABIN *et al.*, 2005). Para todos os casos, os SAFs para os fantasmas MIRD5 são menores do que os SAFs do F05 e do M10, por causa da maior distância entre os órgãos nos fantasmas MIRD5. Para um dado cenário de exposição interna, a distância entre a fonte e o órgão alvo representa o parâmetro mais importante da exposição. Smith e colaboradores (2001) investigaram as distâncias entre os órgãos no fantoma de voxels GOLEM (ZANKL; WITTMAN, 2001) em relação ao fantoma adulto MIRD5 e encontraram diferenças até 3 vezes maiores.



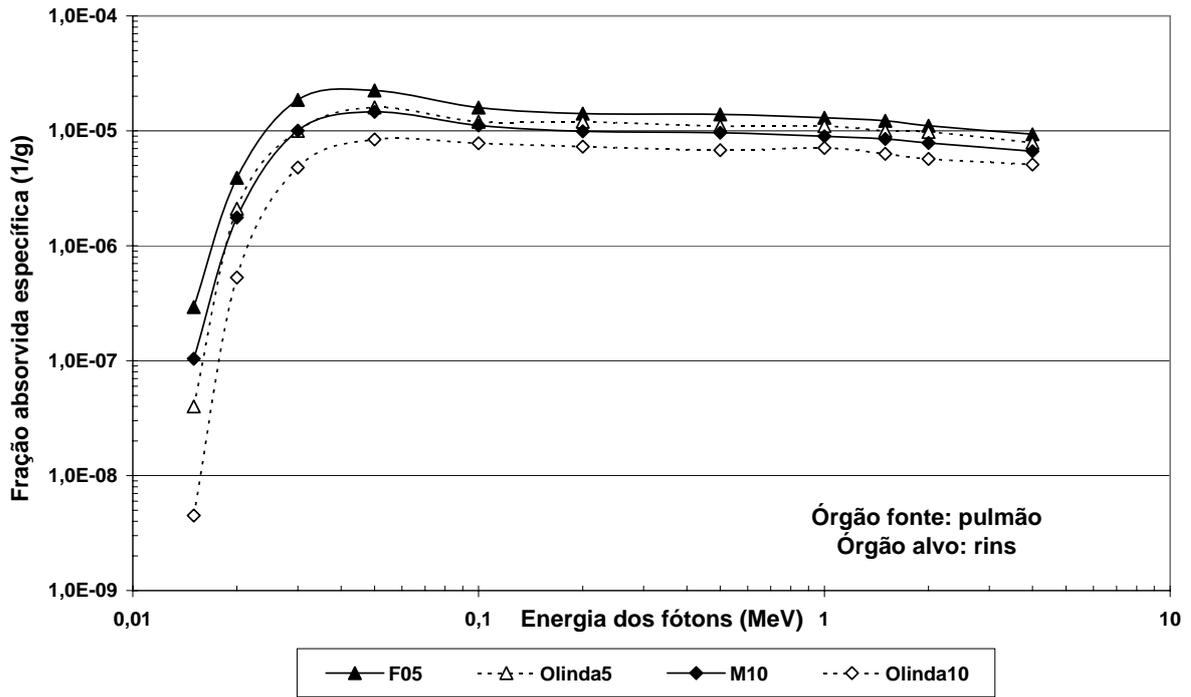
**Figura 38** - Dose equivalente normalizada por kerma no ar nas glândulas salivares para exposição de corpo inteiro AP nos fantasmas infantis F10 e MIRD5 de 10 anos (LEE *et al.*, 2007).



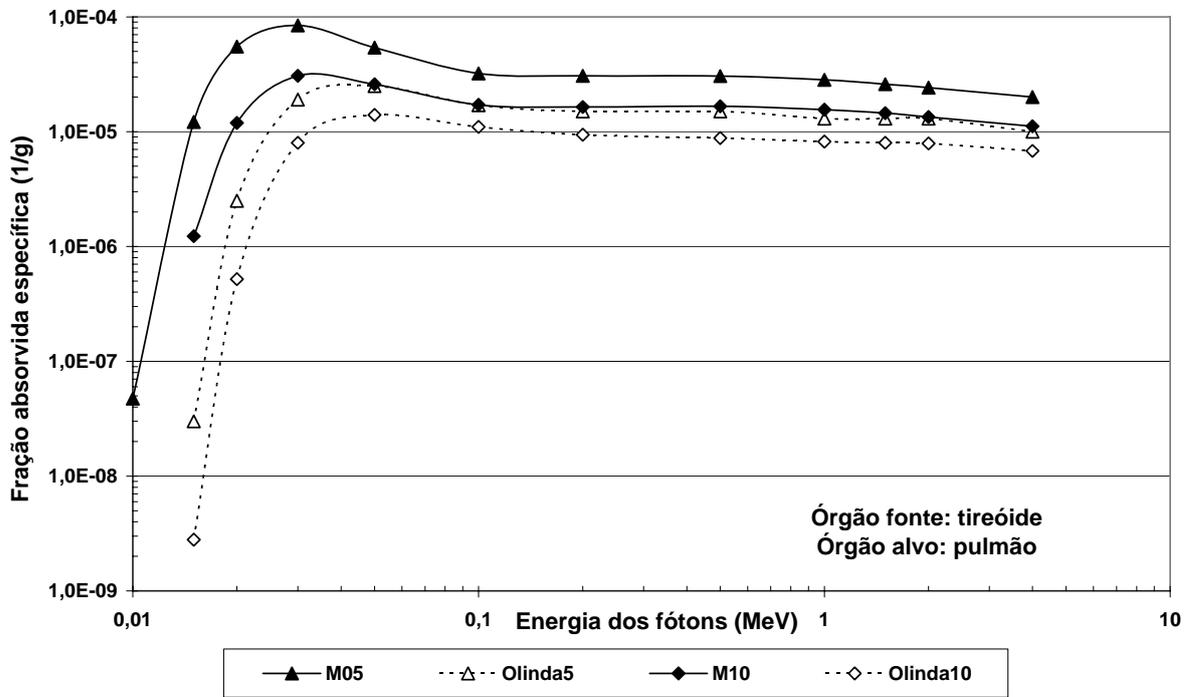
**Figura 39** - Dose equivalente normalizada por kerma no ar no cérebro para exposição de corpo inteiro PA nos fantomas infantis M05 e MIRD5 de 5 anos (LEE *et al.*, 2007).



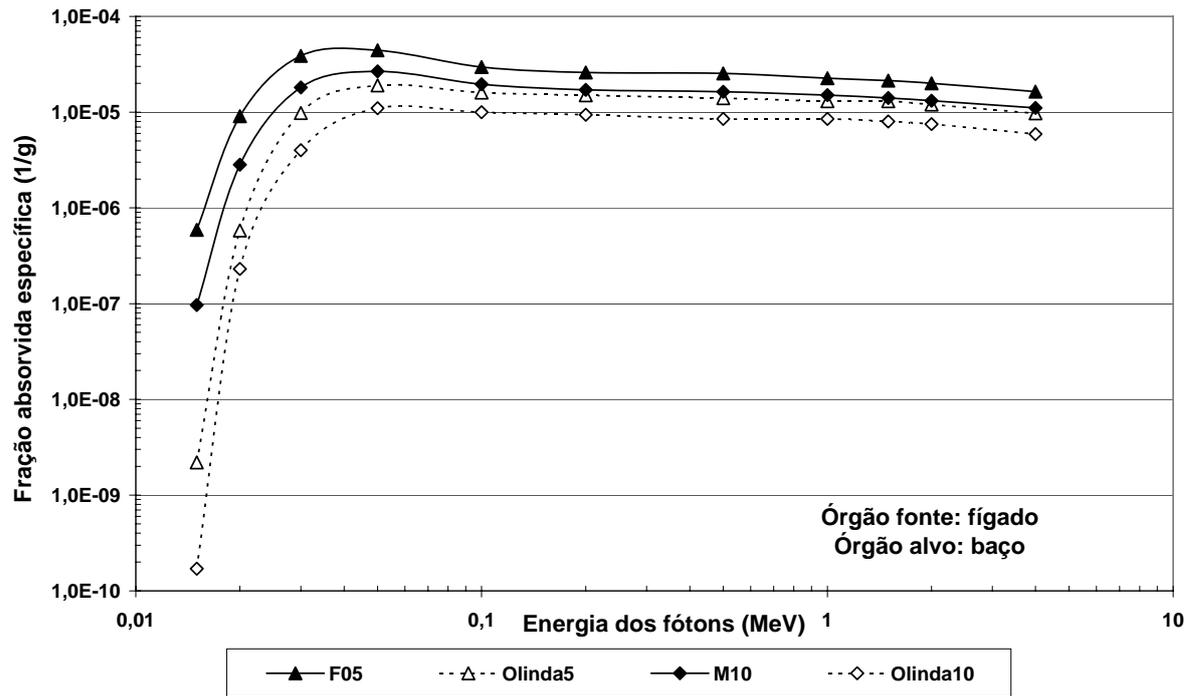
**Figura 40** - Dose equivalente normalizada por kerma no ar na parede do coração para exposição de corpo inteiro ROT nos fantomas infantis M10 e MIRD5 de 10 anos (LEE *et al.*, 2007).



**Figura 41** - Fração absorvida específica SAF (rins←pulmão) em função da energia dos fótons para os fantomas infantis F05, M10 e os fantomas MIRD5 de 5 e 10 anos usados pelo software OLINDA (STABIN *et al.*, 2005).



**Figura 42** - Fração absorvida específica SAF (pulmão←tireóide) em função da energia dos fótons para os fantomas infantis F05, M10 e os fantomas MIRD5 de 5 e 10 anos usados pelo software OLINDA (STABIN *et al.*, 2005).



**Figura 43** - Fração absorvida específica SAF (baço←fígado) em função da energia dos fótons para os fantomas infantis F05, M10 e os fantomas MIRD5 de 5 e 10 anos usados pelo software OLINDA (STABIN *et al.*, 2005).

## 6 CONCLUSÃO

Quatro fantomas mesh de crianças foram criados, dois para indivíduos de 5 anos de idade, um masculino e outro feminino; e outros dois, para indivíduos do sexo masculino e feminino, de 10 anos de idade. Eles foram construídos utilizando-se ferramentas computacionais usadas pela comunidade de computação gráfica, para a criação de filmes de animação. Para a modelagem bastou a descrição da anatomia, disponível em livros e atlas. A obtenção de imagens tomográficas ou de ressonância magnética de indivíduos destas idades pode ser difícil, por impedimentos de ordem ética ou quando há dificuldade de acesso a equipamentos para a geração das imagens, ou ainda, quando não se dispõe de recursos financeiros para financiá-las. Este método inovador permite reproduzir realisticamente a anatomia dos diferentes órgãos e tecidos do corpo humano, bem como alterar a morfologia destes órgãos com relativa facilidade, contribuindo para a criação de fantomas mais representativos das situações de interesse.

A construção destes fantomas faz parte do esforço do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco em construir uma família inteira de fantomas. Desse modo, a construção dos fantomas de recém-nascido, 1 ano e 15 anos é a continuidade natural desta obra, que já é uma seqüência do trabalho que resultou no desenvolvimento dos fantomas dos adultos. Um outro aspecto que merece destaque é o uso do conhecimento produzido no desenvolvimento destes modelos para o ensino e pesquisa em Anatomia, um vasto campo de atuação.

## REFERÊNCIAS

BASTIONI M. **MakeHuman 0.9.1 RC1**. Disponível em: <http://www.makehuman.org/>. Acesso em 24/03/2009.

BERGMAN R. A.; AFIFI A. K.; JEW J. J.; REIMANN P. C. **Anatomy atlases**. Disponível em: <http://www.anatomyatlases.org/> Acesso em 01/01/2010.

BRITO A. **Blender 3D - guia do usuário**. 3 ed., Novatec: São Paulo, 2008.

CAON M.; BIBBO G.; PATTISON J. **An EGS4-Ready Tomographic Computational Model of a Fourteen-Year-Old Female Torso for Calculating Organ Doses from CT Examinations**, *Phys. Med. Biol.*, **44**, 2213-2225, (1999).

CASSOLA V. F.; LIMA V. J. M.; KRAMER R.; KHOURY H. J. **FASH and MASH: female and male adult human phantoms based on polygon mesh surfaces: I. Development of the anatomy**, *Phys. Med. Biol.*, **55**, 133-162, (2010a).

CASSOLA V. F.; KRAMER R.; LIMA V. J. M.; KHOURY H. J. **Dois fantomas construídos a partir de superfícies *mesh* representando uma mulher adulta e um homem adulto**, *Revista Brasileira de Física Médica*, **4**(1), 93-97, (2010b).

CASSOLA V. F.; KRAMER R.; BRAYNER C.; KHOURY H. J. **Posture-specific phantoms representing female and male adults in Monte Carlo-based simulations for radiological protection**, *Phys. Med. Biol.*, **55**, 4399-4430, (2010c).

CHAMLEY C. A.; CARSON P.; RANDALL D.; SANDWELL M. **Developmental Anatomy and Physiology of Children - A Practical Approach**, Elsevier: London, UK, 2005.

CHRIST A.; KAINZ, W.; HAHN E. H.; HONEGGER K.; ZEFFERER M.; NEUFELD E.; RASCHER W.; JANKA R.; BAUTZ W.; CHEN J.; KIEFER B.; SCHMITT P.; HOLLENBACH H.-P.; SHEN J.; OBERLE M.; SZCZERBA D.; KAM A.; GUAG J. W.; KUSTER N. **The Virtual Family - development of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric simulations**, *Phys. Med. Biol.*, **55**, N23-N38, (2010).

DISCIPLINA DE ANATOMIA DA FACULDADE DE MEDICINA DE PETRÓPOLIS.  
**Resumo da anatomia do recém nascido.** Disponível em:  
<http://www.compuland.com.br/anatomia/nascido.htm>. Acesso em 18/01/2010.

ECKERMAN K. F.; CRISTY M.; RYMAN J. C. **The ORNL mathematical phantom series**, Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, (1996).

GODIN P. **Record of individual growth: a guide to parents, physicians and teachers.** Publications of the Training School at Vineland - New Jersey - Department of Research: Vineland, 1916.

GRAY H. **Anatomia**. 29 ed., Guanabara Koogan: Rio de Janeiro, 1977.

ICRP 23. **Report of the Task Group on Reference Man**, ICRP Publication 23, International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, (1975)

ICRP 60. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**, ICRP Publication 60, International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, (1991).

ICRP 89. **Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values**, International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, (2003).

ICRU 46. **Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues.** ICRU Report 46, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, (1992).

KAWRAKOW I. **Accurate condensed history Monte Carlo simulation of electron transport. I. EGSnrc, the new EGS4 version.** *Med. Phys.*, **27** (3), 485-498, (2000).

KRAMER R.; ZANKL M.; WILLIAMS G.; DREXLER G. **The Calculation of Dose from External Photon Exposures Using Reference Human Phantoms and Methods Monte Carlo. I. The Male (Adam) and Female (Eva) Adult Mathematical Phantoms.** GSF – Report S-885. GSF – National Research Center for Environment and Health, Neuherberg, Germany (1982).

KRAMER R.; VIEIRA J. W.; KHOURY H. J.; LIMA F. R. A.; FUELLE D. **All about MAX: A male adult voxel phantom for Monte Carlo calculations in the area of radiation protection dosimetry**, *Phys. Med. Biol.*, **48**, 1239-1262, (2003).

KRAMER R.; VIEIRA J. W.; KHOURY H. J.; LIMA F. R. A.; LOUREIRO E. C. M.; LIMA V. J. M.; HOFF G. **All about FAX: a female adult voxel phantom for Monte Carlo calculation in radiation protection dosimetry**, *Phys. Med. Biol.*, **49**, 5203-5216, (2004).

KRAMER R.; KHOURY H. J.; VIEIRA J. W.; LIMA V. J. M. **MAX06 and FAX06: update of two adult human phantoms for radiation protection dosimetry**, *Phys. Med. Biol.*, **51**, 3331-3346, (2006a).

KRAMER R.; KHOURY H. J.; VIEIRA J. W.; KAWRAKOW I. **Skeletal dosimetry in the MAX06 and the FAX06 phantoms for external exposure to photons based on vertebral 3D-microCT images**. *Phys. Med. Biol.*, **51**, 6265-6289, (2006b).

KRAMER R.; KHOURY H. J.; VIEIRA J. W.; KAWRAKOW I. **Skeletal dosimetry for external exposure to photons based on  $\mu$ CT images of spongiosa from different bone sites**. *Phys. Med. Biol.*, **52**, 6697-6716, (2007).

KRAMER R.; CASSOLA V. F.; KHOURY H. J.; VIEIRA J. W.; LIMA V. J. M.; BROWN K. R. **FASH and MASH: female and male adult human phantoms based on polygon mesh surfaces: II. Dosimetric calculations**, *Phys. Med. Biol.*, **55**, 163-189, (2010).

LEE C.; WILLIAMS J. L.; LEE C.; BOLCH W. E. **The UF series of tomographic computational phantoms of pediatric patients**. *Med. Phys.*, **32** (12), 3537-3548, (2005).

LEE C.; LEE C.; WILLIAMS J. L.; BOLCH W. E. **Whole-body voxel phantoms of paediatric patients - UF Series B**. *Phys. Med. Biol.*, **51**, 4649-4661 (2006).

LEE C.; LEE C.; HAN E. Y.; BOLCH W. E. **Consideration of the ICRP 2006 revised tissue weighting factors on age-dependent values of the effective dose for external photons**. *Phys. Med. Biol.*, **52**, 41-58, (2007).

LEE C.; LODWICK D.; WILLIAMS J. L.; BOLCH W. E. **Hybrid computational phantoms of the 15-year male and female adolescent: Applications to CT organ dosimetry for patients of variable morphometry**. *Med. Phys.*, **35** (6), 2366-2382, (2008).

LEE C.; LODWICK D.; HURTADO J.; PAFUNDI D.; WILLIAMS J. L.; BOLCH W. E. **The UF family of reference hybrid phantoms for computational radiation dosimetry.** *Phys. Med. Biol.*, **55**, 339-363, (2010).

MACGREGOR J. **Introduction to the anatomy and physiology of children.** Routledge: London, UK, 2000.

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Excel.** (2002).

MOORE K. L.; DALLEY A. F. **Anatomia orientada para a clínica.** 5 ed., Guanabara Koogan: Rio de Janeiro, 2007.

NIPPER J. C.; WILLIAMS J. L.; BOLCH W. E. **Creation of two tomographic voxel models of paediatric patients in the first year of life.** *Phys. Med. Biol.*, **47**, 3143–3164, (2002).

PETOUSSI-HENSS N.; ZANKL M.; FILL U.; REGULLA D. **The GSF family of voxel phantoms.** *Phys. Med. Biol.*, **47**, 89-106, (2002).

PIEGL L. **On NURBS: a survey.** *IEEE Compt. Graph. Appl.*, **11**, 55-71 (1991).

RASBAND W. **ImageJ 1.43k.** National Institutes of Health, USA. Disponível em: <http://rsbweb.nih.gov/ij/>. Acesso em 06/06/2009.

ROSENDAAAL T. **Blender 2.49b.** Disponível em: <http://www.blender.org/>. Acesso em 01/09/2009.

SCHÜNKE, M.; SCHULTE E.; SCHUMACHER U. **Prometheus, Atlas de anatomia: anatomia geral e aparelho locomotor,** Guanabara Koogan: Rio de Janeiro, 2006a.

SCHÜNKE, M.; SCHULTE E.; SCHUMACHER U. **Prometheus, Atlas de anatomia: pescoço e órgãos internos,** Guanabara Koogan: Rio de Janeiro, 2006b.

SCHÜNKE, M.; SCHULTE E.; SCHUMACHER U. **Prometheus, Atlas de anatomia: cabeça e neuroanatomia,** Guanabara Koogan: Rio de Janeiro, 2006c.

SEGARS W. P. **Development and application of the new dynamic NURBS-based Cardiac-Torso (NCAT) phantom.** Tese de Doutorado. Chapel Hill: Univ. North. Carol. 221 p. (2001)

SMITH T. J.; PHIPPS A. W.; PETOUSSI-HENSS N.; ZANKL M. **Impact on internal doses of photon SAFs derived with the GSF adult voxel phantom.** *Health Phys.*, **80**(5), 477-485, (2001).

SNYDER, R. G.; SCHNEIDER, L. W.; OWINGS, C. L.; REYNOLDS, H. M.; GOLOMB, D. H.; SCHORK M. A. **Anthropometry of Infants, Children, and Youths to Age 18 for Product Safety Design.** U. S. Consumer Product Safety Commission: Bethesda, 1977.

STABIN M. G.; SPARKS R. B.; CROWE E. **OLINDA/EXM: The Second-Generation Personal Computer Software for Internal Dose Assessment in Nuclear Medicine.** *J. Nucl. Med.*, **46**, 1023-1027, (2005).

TESTUT L.; LATARJET A. **Tratado de anatomía humana.** Salvat: Barcelona, 1949.

UNSCEAR 1958. **Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.** General assembly, Official records: thirteenth session, supplement n. 17, New York, (1958).

VIEIRA J. W. **Construção de um Modelo Computacional de Exposição para Cálculos Dosimétricos Utilizando o Código Monte Carlo EGS4 e Fantomas de Voxels,** Tese de Doutorado, UFPE-DEN, Recife-PE, (2004).

VIEIRA J. W.; STOSIC B.; LIMA F. R. A.; KRAMER R.; SANTOS A. M.; LIMA V. J. M. **Um Software para Editar Fantomas de Voxels e Calcular Coeficientes de Conversão para a Proteção Radiológica,** 1º Congresso Brasileiro de Proteção Radiológica, Rio de Janeiro, 02 a 05 de Novembro de 2005.

VIEIRA J. W.; LIMA F. R. A. **A Software to Digital Image Processing To Be Used in the Voxel Phantom Development,** *Cellular and Molecular Biology* (Online), **55**, 16-22, (2009).

XU X. G., TARANENKO V., ZHANG J., SHI C., **A boundary-representation method for designing whole-body radiation dosimetry models: pregnant females at the ends of three gestational periods—RPI-P3, -P6 and -P9.** *Phys. Med. Biol.*, **52**, 7023-7044, (2007).

XU X. G.; ECKERMAN K. F. **Handbook of anatomical models for radiation dosimetry.** CRC press: New York, 2010.

WOLF-HEIDEGGER G. **Atlas de Anatomia Humana.** 6 ed., 2 vol., Guanabara Koogan: Rio de Janeiro, 2006.

ZANKL M.; WITTMANN A. **The adult male voxel model “Golem” segmented from whole-body CT patient data.** *Radiat. Environ. Biophys.*, **40**, 153-162, (2001).

ZHANG J.; NA Y. N.; CARACAPPA P. F.; XU G. X. **RPI-AM and RPI-AF, a pair of mesh-based, size-adjustable adult male and female computational phantoms using ICRP-89 parameters and their calculations for organ doses from monoenergetic photon beams.** *Phys. Med. Biol.*, **54**, 5885-5908, (2009).

## APÊNDICE

Aqui estão apresentadas as tabelas dos órgãos e tecidos dos fantasmas de 5 anos, masculino e feminino, e dos fantasmas de 10 anos, masculino e feminino. As tabelas contêm os nomes de cada estrutura segmentada, seu respectivo número identificador, o número de voxels de cada ID no fantoma, bem como a comparação em termos percentuais com os dados da ICRP89.

**Tabela 2** – Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma masculino de 5 anos com as da ICRP89.

ID	Órgão	Nº voxels	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Massa (g)	ICRP89 (g)	Dif* (%)
1	Pele	1524594	522,94	1,09	570,00	570	0,00
2	gordura	15184645	5208,33	0,96	5000,00	5000	0,00
4	Olhos	31136	10,68	1,03	11,00	11	0,00
5	Lentes dos olhos	829	0,284	1,034	0,294	0,294	0,01
6	Músculo esquelético	15549077	5333,33	1,05	5600,00	5600	0,00
7	Cérebro (cavidade craniana) no fantoma masculino	3672348	1259,62	1,04	1310,00	1310	0,00
8	Medula espinal	35217	12,08	1,03	12,44		
9	Adrenais	14153	4,85	1,03	5,00	5	0,00
10	Pulmões	3363983	1153,85	0,26	300,00	300	0,00
11	Coração (parede)	240596	82,52	1,03	85,00	85	0,00
12	Pâncreas	98116	33,65	1,04	35,00	35	0,00
13	Fígado	1567743	537,74	1,06	570,00	570	0,00
14	Rins	305428	104,76	1,05	110,00	110	0,00
15	Timo	84916	29,13	1,03	30,00	30	0,00
16	Baço	137521	47,17	1,06	50,00	50	0,00
17	Passagem nasal	77086	26,44	1,03	27,23		
18	Língua	53780	18,45	1,03	19,00	19	0,00
19	Cavidade bucal propriamente dita	131869	45,23	1,03	46,59		
20	Glândulas salivares sub-mandibulares	28305	9,71	1,03	10,00	10	0,00
21	Glândulas salivares parótidas	56611	19,42	1,03	20,00	20	0,00
22	Glândulas salivares sub-linguais	11322	3,88	1,03	4,00	4	0,00
24	Faringe	31890	10,94	1,03	11,27		
25	Laringe	19814	6,80	1,03	7,00	7	0,00
26	Esôfago	28305	9,71	1,03	10,00	10	0,00
27	Traquéia	7076	2,43	1,03	2,50	2,5	0,00
28	Tiróide	9441	3,24	1,05	3,40	3,4	0,01
30	Conteúdo da vesícula biliar	42458	14,56	1,03	15,00	15	0,00
32	Conteúdo do estômago	234934	80,58	1,03	83,00	83	0,00
34	Conteúdo do intestino delgado	331173	113,59	1,03	117,00	117	0,00
36	Conteúdo do cólon	283054	97,09	1,03	100,00	100	0,00
37	Ureteres	11888	4,08	1,03	4,20	4,2	0,00
41	Linfonodos	169832	58,25	1,03	60,00	60	0,00
42	Tecido Mole no fantoma masculino	3397522	1165,35	1,03	1200,31		
43	Tecido conectivo (tecido periarticular e tendões)	1576292	540,67	1,05	567,70	700	-18,90
48	Sangue	723156	248,04	1,06	262,93	1500	-82,47
50	Próstata no fantoma masculino	3397	1,17	1,03	1,20	1,2	0,01

Continuação da Tabela 2 – Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma masculino de 5 anos...

ID	Órgão	Nº voxels	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Massa (g)	ICRP89 (g)	Dif* (%)
51	Testículos no fantoma masculino	4766	1,63	1,04	1,70	1,7	0,01
52	Epidídimos no fantoma masculino	1274	0,44	1,03	0,45	0,45	0,02
53	Uretra no fantoma masculino	7359	2,52	1,03	2,60	2,6	-0,01
61	Tonsilas palatinas	5661	1,94	1,03	2,00	2	0,00
62	Glândula pituitária	701	0,24	1,04	0,25	0,25	0,02
64	Cartilagens costais	42417	14,55	1,10	16,01		
65	Discos intervertebrais cervicais	10426	3,58	1,10	3,94		
66	Discos intervertebrais torácicos	31534	10,82	1,10	11,90		
67	Discos intervertebrais lombares	44638	15,31	1,10	16,84		
89	Vesícula biliar - Parede	7359	2,52	1,03	2,60	2,6	-0,01
91	Estômago - Parede	141527	48,54	1,03	50,00	50	0,00
93	Intestino delgado - Parede	622718	213,59	1,03	220,00	220	0,00
95	Intestino grosso - Parede	339664	116,50	1,03	120,00	120	0,00
97	Bexiga urinária - Parede	44853	15,38	1,04	16,00	16	0,00
99	Seios paranasais e ouvidos	35212	12,08	1,03	12,44		
100	Dentes	24431	8,38	1,79	15,00	15	0,00
101	Mandíbula - Osso Cortical	75956	26,05				
102	Crânio - Osso Cortical	761602	261,23				
103	Esterno - Osso Cortical	10156	3,48				
104	Costelas - Osso Cortical	152341	52,25				
105	Clavícula esquerda - Osso Cortical	7109	2,44				
106	Clavícula direita - Osso Cortical	7109	2,44				
107	Escápula esquerda - Osso Cortical	22343	7,66				
108	Escápula direita - Osso Cortical	22343	7,66				
109	Coluna Cervical - Osso Cortical	10804	3,71				
110	Coluna Torácica - Osso Cortical	26479	9,08				
111	Coluna Lombar - Osso Cortical	30852	10,58				
112	Sacro - Osso Cortical	38896	13,34				
113	Pelve - Osso Cortical	91408	31,35				
114	Úmero esquerdo - Osso Cortical	38038	13,05				
115	Rádio e Ulna esquerdas - Osso Cortical	31410	10,77				
116	Ossos Mão esquerda - Osso Cortical	17450	5,99				
117	Úmero direito - Osso Cortical	38038	13,05				
118	Rádio e Ulna direitas - Osso Cortical	31410	10,77				
119	Ossos Mão direita - Osso Cortical	17450	5,99				
120	Fêmur esquerdo - Osso Cortical	73830	25,32				
122	Tíbia, Fibula e Patela esquerdas - Osso Cortical	60779	20,85				
123	Ossos Pé esquerdo - Osso Cortical	30792	10,56				
124	Fêmur direito - Osso Cortical	73830	25,32				
126	Tíbia, Fibula e Patela direitas - Osso Cortical	60779	20,85				
127	Ossos Pé direito - Osso Cortical	30792	10,56				
128	Osso hióide	3159	1,08				
131	Mandíbula - Tecido Esponjoso	23244	7,97				
132	Crânio - Tecido Esponjoso	231352	79,35				
133	Esterno - Tecido Esponjoso	19896	6,82				
134	Costelas - Tecido Esponjoso	109359	37,51				
135	Clavícula esquerda - Tecido Esponjoso	5936	2,04				
136	Clavícula direita - Tecido Esponjoso	5936	2,04				
137	Escápula esquerda - Tecido Esponjoso	17666	6,06				
138	Escápula direita - Tecido Esponjoso	17666	6,06				
139	Coluna Cervical - Tecido Esponjoso	57322	19,66				

Continuação da Tabela 2 – Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma masculino de 5 anos...

ID	Órgão	Nº voxels	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Massa (g)	ICRP89 (g)	Dif* (%)
140	Coluna Torácica - Tecido Esponjoso	180187	61,80				
141	Coluna Lombar - Tecido Esponjoso	136895	46,95				
142	Sacro - Tecido Esponjoso	75237	25,81				
143	Pelve - Tecido Esponjoso	169738	58,22				
144	Úmero esquerdo - Tecido Esponjoso Superior	19749	6,77				
145	Rádio e Ulna esquerdas - Tecido Esponjoso	22209	7,62				
146	Ossos Mão esquerda - Tecido Esponjoso	22571	7,74				
147	Úmero direito - Tecido Esponjoso Superior	19749	6,77				
148	Rádio e Ulna direitas - Tecido Esponjoso	22209	7,62				
149	Ossos Mão direita - Tecido Esponjoso	22571	7,74				
150	Fêmur esquerdo - Tecido Esponjoso Superior	60682	20,81				
152	Tíbia, Fíbula e Patela esquerdas - Tecido Esponjoso	96240	33,01				
153	Ossos Pé esquerdo - Tecido Esponjoso	61770	21,19				
154	Fêmur direito - Tecido Esponjoso Superior	60682	20,81				
156	Tíbia, Fíbula e Patela direitas - Tecido Esponjoso	96240	33,01				
157	Ossos Pé direito - Tecido Esponjoso	61770	21,19				
161	Úmero esquerdo - Medula Óssea Amarela	7901	2,71				
162	Rádio e Ulna esquerdas - Medula Óssea Amarela	6093	2,09				
163	Úmero direito - Medula Óssea Amarela	7901	2,71				
164	Rádio e Ulna direitas - Medula Óssea Amarela	6093	2,09				
165	Fêmur esquerdo - Medula Óssea Amarela	10204	3,50				
166	Tíbia e Fíbula esquerda - Medula Óssea Amarela	7522	2,58				
167	Fêmur direito - Medula Óssea Amarela	10204	3,50				
168	Tíbia e Fíbula direita - Medula Óssea Amarela	7522	2,58				
180	Úmero esquerdo - Tecido Esponjoso Inferior	19661	6,74				
182	Úmero direito - Tecido Esponjoso Inferior	19661	6,74				
184	Fêmur esquerdo - Tecido Esponjoso Inferior	60885	20,88				
186	Fêmur direito - Tecido Esponjoso Inferior	60885	20,88				
191	Mandíbula - Cartilagem de Crescimento	64585	22,15				
192	Crânio - Cartilagem de Crescimento	645850	221,53				
193	Esterno - Cartilagem de Crescimento	8728	2,99				
194	Costelas - Cartilagem de Crescimento	88499	30,36				
195	Clavícula esquerda - Cartilagem de Crescimento	6109	2,10				
196	Clavícula direita - Cartilagem de Crescimento	6109	2,10				
197	Escápula esquerda - Cartilagem de Crescimento	19201	6,59				
198	Escápula direita - Cartilagem de Crescimento	19201	6,59				
199	Coluna Cervical - Cartilagem de Crescimento	24485	8,40				
200	Coluna Torácica - Cartilagem de Crescimento	53997	18,52				
201	Coluna Lombar - Cartilagem de Crescimento	28675	9,84				
202	Sacro - Cartilagem de Crescimento	41893	14,37				
203	Pelve - Cartilagem de Crescimento	82040	28,14				
204	Úmero esquerdo - Cartilagem de Crescimento	38402	13,17				
205	Rádio e Ulna esquerdas - Cartilagem de Crescimento	29674	10,18				
206	Ossos Mão esquerda - Cartilagem de Crescimento	14837	5,09				
207	Úmero direito - Cartilagem de Crescimento	38402	13,17				
208	Rádio e Ulna direitas - Cartilagem de Crescimento	29674	10,18				
209	Ossos Mão direita - Cartilagem de Crescimento	14837	5,09				
210	Fêmur esquerdo - Cartilagem de Crescimento	89023	30,53				
212	Tíbia, Fíbula e Patela esquerdas – Cart. de Cresc.	65458	22,45				
213	Ossos Pé esquerdo - Cartilagem de Crescimento	26183	8,98				
214	Fêmur direito - Cartilagem de Crescimento	89023	30,53				

Continuação da **Tabela 2** – Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma masculino de 5 anos...

ID	Órgão	Nº voxels	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Massa (g)	ICRP89 (g)	Dif* (%)
216	Tíbia, Fíbula e Patela direitas – Cart. de Crescimento	65458	22,45				
217	Ossos Pé direito - Cartilagem de Crescimento	26183	8,98				
219	Ar	15994	5,49	0,001205	0,01		
220	Brônquios - parede	5148	1,77	1,03	1,82		

\* Dif (%) = (Massa (g) – ICRP89 (g)) \* 100/ ICRP89 (g)

**Tabela 3** – Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma feminino de 5 anos com as da ICRP89.

ID	Órgão	Nº voxels	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Massa (g)	ICRP89 (g)	Dif* (%)
1	Pele	1524594	522,94	1,09	570,00	570	0,00
2	gordura	15184645	5208,33	0,96	5000,00	5000	0,00
4	Olhos	31136	10,68	1,03	11,00	11	0,00
5	Lentes dos olhos	829	0,284	1,034	0,294	0,294	0,01
6	Músculo esquelético	15549077	5333,33	1,05	5600,00	5600	0,00
7	Cérebro (cavidade craniana) no fantoma feminino	3307917	1134,62	1,04	1180,00	1180	0,00
8	Medula espinal	35239	12,09	1,03	12,45		
9	Adrenais	14153	4,85	1,03	5,00	5	0,00
10	Pulmões	3363983	1153,85	0,26	300,00	300	0,00
11	Coração (parede)	240596	82,52	1,03	85,00	85	0,00
12	Pâncreas	98116	33,65	1,04	35,00	35	0,00
13	Fígado	1567743	537,74	1,06	570,00	570	0,00
14	Rins	305428	104,76	1,05	110,00	110	0,00
15	Timo	84916	29,13	1,03	30,00	30	0,00
16	Baço	137521	47,17	1,06	50,00	50	0,00
17	Passagem nasal	77086	26,44	1,03	27,23		
18	Língua	53780	18,45	1,03	19,00	19	0,00
19	Cavidade bucal propriamente dita	131869	45,23	1,03	46,59		
20	Glândulas salivares sub-mandibulares	28305	9,71	1,03	10,00	10	0,00
21	Glândulas salivares parótidas	56611	19,42	1,03	20,00	20	0,00
22	Glândulas salivares sub-linguais	11322	3,88	1,03	4,00	4	0,00
24	Faringe	31890	10,94	1,03	11,27		
25	Laringe	19814	6,80	1,03	7,00	7	0,00
26	Esôfago	28305	9,71	1,03	10,00	10	0,00
27	Traquéia	7076	2,43	1,03	2,50	2,5	0,00
28	Tiróide	9441	3,24	1,05	3,40	3,4	0,01
30	Conteúdo da vesícula biliar	42458	14,56	1,03	15,00	15	0,00
32	Conteúdo do estômago	234934	80,58	1,03	83,00	83	0,00
34	Conteúdo do intestino delgado	331173	113,59	1,03	117,00	117	0,00
36	Conteúdo do cólon	283054	97,09	1,03	100,00	100	0,00
37	Ureteres	11888	4,08	1,03	4,20	4,2	0,00
41	Linfonodos	169832	58,25	1,03	60,00	60	0,00
42	Tecido Mole no fantoma feminino	3377731	1158,56	1,03	1193,32		
43	Tecido conectivo (tecido periarticular e tendões)	1576302	540,67	1,05	567,71	700	-18,90
48	Sangue	723156	248,04	1,06	262,93	1500	-82,47
55	Útero no fantoma feminino	8330	2,86	1,05	3,00	3	0,00
56	Ovários no fantoma feminino	5553	1,90	1,05	2,00	2	0,00
57	Tubas uterinas no fantoma feminino	972	0,33	1,05	0,35	0,35	0,02
58	Uretra no fantoma feminino	2208	0,76	1,03	0,78	0,78	0,01
61	Tonsilas palatinas	5661	1,94	1,03	2,00	2	0,00
62	Glândula pituitária	701	0,24	1,04	0,25	0,25	0,02
64	Cartilagens costais	42421	14,55	1,10	16,01		
65	Discos intervertebrais cervicais	10427	3,58	1,10	3,94		
66	Discos intervertebrais torácicos	31534	10,82	1,10	11,90		
67	Discos intervertebrais lombares	44638	15,31	1,10	16,84		
89	Vesícula biliar - Parede	7359	2,52	1,03	2,60	2,6	-0,01
91	Estômago - Parede	141527	48,54	1,03	50,00	50	0,00
93	Intestino delgado - Parede	622718	213,59	1,03	220,00	220	0,00
95	Intestino grosso - Parede	339664	116,50	1,03	120,00	120	0,00
97	Bexiga urinária - Parede	44853	15,38	1,04	16,00	16	0,00
99	Seios paranasais e ouvidos	35220	12,08	1,03	12,44		

Continuação da **Tabela 3** – Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma feminino de 5 anos...

ID	Órgão	Nº voxels	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Massa (g)	ICRP89 (g)	Dif* (%)
100	Dentes	24431	8,38	1,79	15,00	15	0,00
101	Mandíbula - Osso Cortical	75956	26,05				
102	Crânio - Osso Cortical	761602	261,23				
103	Esterno - Osso Cortical	10156	3,48				
104	Costelas - Osso Cortical	152341	52,25				
105	Clavícula esquerda - Osso Cortical	7109	2,44				
106	Clavícula direita - Osso Cortical	7109	2,44				
107	Escápula esquerda - Osso Cortical	22343	7,66				
108	Escápula direita - Osso Cortical	22343	7,66				
109	Coluna Cervical - Osso Cortical	10804	3,71				
110	Coluna Torácica - Osso Cortical	26479	9,08				
111	Coluna Lombar - Osso Cortical	30852	10,58				
112	Sacro - Osso Cortical	38896	13,34				
113	Pelve - Osso Cortical	91408	31,35				
114	Úmero esquerdo - Osso Cortical	38038	13,05				
115	Rádio e Ulna esquerdas - Osso Cortical	31410	10,77				
116	Ossos Mão esquerda - Osso Cortical	17450	5,99				
117	Úmero direito - Osso Cortical	38038	13,05				
118	Rádio e Ulna direitas - Osso Cortical	31410	10,77				
119	Ossos Mão direita - Osso Cortical	17450	5,99				
120	Fêmur esquerdo - Osso Cortical	73830	25,32				
122	Tíbia, Fibula e Patela esquerdas - Osso Cortical	60779	20,85				
123	Ossos Pé esquerdo - Osso Cortical	30792	10,56				
124	Fêmur direito - Osso Cortical	73830	25,32				
126	Tíbia, Fibula e Patela direitas - Osso Cortical	60779	20,85				
127	Ossos Pé direito - Osso Cortical	30792	10,56				
128	Osso hióide	3159	1,08				
131	Mandíbula - Tecido Esponjoso	23244	7,97				
132	Crânio - Tecido Esponjoso	231352	79,35				
133	Esterno - Tecido Esponjoso	19896	6,82				
134	Costelas - Tecido Esponjoso	109359	37,51				
135	Clavícula esquerda - Tecido Esponjoso	5936	2,04				
136	Clavícula direita - Tecido Esponjoso	5936	2,04				
137	Escápula esquerda - Tecido Esponjoso	17666	6,06				
138	Escápula direita - Tecido Esponjoso	17666	6,06				
139	Coluna Cervical - Tecido Esponjoso	57322	19,66				
140	Coluna Torácica - Tecido Esponjoso	180187	61,80				
141	Coluna Lombar - Tecido Esponjoso	136895	46,95				
142	Sacro - Tecido Esponjoso	75237	25,81				
143	Pelve - Tecido Esponjoso	169738	58,22				
144	Úmero esquerdo - Tecido Esponjoso Superior	19749	6,77				
145	Rádio e Ulna esquerdas - Tecido Esponjoso	22209	7,62				
146	Ossos Mão esquerda - Tecido Esponjoso	22571	7,74				
147	Úmero direito - Tecido Esponjoso Superior	19749	6,77				
148	Rádio e Ulna direitas - Tecido Esponjoso	22209	7,62				
149	Ossos Mão direita - Tecido Esponjoso	22571	7,74				
150	Fêmur esquerdo - Tecido Esponjoso Superior	60682	20,81				
152	Tíbia, Fibula e Patela esquerdas - Tecido Esponjoso	96240	33,01				
153	Ossos Pé esquerdo - Tecido Esponjoso	61770	21,19				
154	Fêmur direito - Tecido Esponjoso Superior	60682	20,81				
156	Tíbia, Fibula e Patela direitas - Tecido Esponjoso	96240	33,01				

Continuação da Tabela 3 – Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma feminino de 5 anos...

ID	Órgão	Nº voxels	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Massa (g)	ICRP89 (g)	Dif* (%)
157	Ossos Pé direito - Tecido Esponjoso	61770	21,19				
161	Úmero esquerdo - Medula Óssea Amarela	7901	2,71				
162	Rádio e Ulna esquerdas - Medula Óssea Amarela	6093	2,09				
163	Úmero direito - Medula Óssea Amarela	7901	2,71				
164	Rádio e Ulna direitas - Medula Óssea Amarela	6093	2,09				
165	Fêmur esquerdo - Medula Óssea Amarela	10204	3,50				
166	Tíbia e Fíbula esquerda - Medula Óssea Amarela	7522	2,58				
167	Fêmur direito - Medula Óssea Amarela	10204	3,50				
168	Tíbia e Fíbula direita - Medula Óssea Amarela	7522	2,58				
180	Úmero esquerdo - Tecido Esponjoso Inferior	19661	6,74				
182	Úmero direito - Tecido Esponjoso Inferior	19661	6,74				
184	Fêmur esquerdo - Tecido Esponjoso Inferior	60885	20,88				
186	Fêmur direito - Tecido Esponjoso Inferior	60885	20,88				
191	Mandíbula - Cartilagem de Crescimento	64585	22,15				
192	Crânio - Cartilagem de Crescimento	645850	221,53				
193	Esterno - Cartilagem de Crescimento	8728	2,99				
194	Costelas - Cartilagem de Crescimento	88495	30,35				
195	Clavícula esquerda - Cartilagem de Crescimento	6109	2,10				
196	Clavícula direita - Cartilagem de Crescimento	6109	2,10				
197	Escápula esquerda - Cartilagem de Crescimento	19201	6,59				
198	Escápula direita - Cartilagem de Crescimento	19201	6,59				
199	Coluna Cervical - Cartilagem de Crescimento	24484	8,40				
200	Coluna Torácica - Cartilagem de Crescimento	53997	18,52				
201	Coluna Lombar - Cartilagem de Crescimento	28675	9,84				
202	Sacro - Cartilagem de Crescimento	41893	14,37				
203	Pelve - Cartilagem de Crescimento	82040	28,14				
204	Úmero esquerdo - Cartilagem de Crescimento	38402	13,17				
205	Rádio e Ulna esquerdas - Cartilagem de Crescimento	29674	10,18				
206	Ossos Mão esquerda - Cartilagem de Crescimento	14837	5,09				
207	Úmero direito - Cartilagem de Crescimento	38402	13,17				
208	Rádio e Ulna direitas - Cartilagem de Crescimento	29674	10,18				
209	Ossos Mão direita - Cartilagem de Crescimento	14837	5,09				
210	Fêmur esquerdo - Cartilagem de Crescimento	89023	30,53				
212	Tíbia, Fíbula e Patela esquerdas – Cart. de Cresc.	65458	22,45				
213	Ossos Pé esquerdo - Cartilagem de Crescimento	26183	8,98				
214	Fêmur direito - Cartilagem de Crescimento	89023	30,53				
216	Tíbia, Fíbula e Patela direitas – Cart. de Crescimento	65458	22,45				
217	Ossos Pé direito - Cartilagem de Crescimento	26183	8,98				
219	Ar	15994	5,49	0,001205	0,01		
220	Brônquios - parede	5148	1,77	1,03	1,82		
221	Entorno do cérebro feminino	364431	125,00	1,03	128,75		

\* Dif (%) = (Massa (g) – ICRP89 (g)) \* 100/ ICRP89 (g)

**Tabela 4** – Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma masculino de 10 anos com as da ICRP89.

ID	Órgão	Nº voxels	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Massa (g)	ICRP89 (g)	Dif* (%)
1	Pele	2193276	752,29	1,09	820,00	820	0,00
2	gordura	22776968	7812,50	0,96	7500,00	7500	0,00
4	Olhos	33966	11,65	1,03	12,00	12	0,00
5	Lentes dos olhos	829	0,284	1,034	0,294	0,294	0,01
6	Músculo esquelético	30542829	10476,19	1,05	11000,00	11000	0,00
7	Cérebro (cavidade craniana) no fantoma masculino	3924647	1346,15	1,04	1400,00	1400	0,00
8	Medula espinal	46349	15,90	1,03	16,37		
9	Adrenais	19814	6,80	1,03	7,00	7	0,00
10	Pulmões	5606638	1923,08	0,26	500,00	500	0,00
11	Coração (parede)	396275	135,92	1,03	140,00	140	0,00
12	Pâncreas	168199	57,69	1,04	60,00	60	0,00
13	Fígado	2282854	783,02	1,06	830,00	830	0,00
14	Rins	499792	171,43	1,05	180,00	180	0,00
15	Timo no fantoma masculino	113221	38,83	1,03	40,00	40	0,00
16	Baço	220034	75,47	1,06	80,00	80	0,00
17	Passagem nasal	122679	42,08	1,03	43,34		
18	Língua	90577	31,07	1,03	32,00	32	0,00
19	Cavidade Bucal propriamente dita	117992	40,47	1,03	41,69		
20	Glândulas salivares sub-mandibulares	36797	12,62	1,03	13,00	13	0,00
21	Glândulas salivares parótidas	73594	25,24	1,03	26,00	26	0,00
22	Glândulas salivares sub-linguais	14153	4,85	1,03	5,00	5	0,00
24	Faringe	32853	11,27	1,03	11,61		
25	Laringe	33966	11,65	1,03	12,00	12	0,00
26	Esôfago	50950	17,48	1,03	18,00	18	0,00
27	Traquéia	12737	4,37	1,03	4,50	4,5	0,00
28	Tiróide	21935	7,52	1,05	7,90	7,9	0,00
30	Conteúdo da Vesícula Biliar	73594	25,24	1,03	26,00	26	0,00
32	Conteúdo do estômago	331173	113,59	1,03	117,00	117	0,00
34	Conteúdo do intestino delgado	461377	158,25	1,03	163,00	163	0,00
36	Conteúdo do cólon	396275	135,92	1,03	140,00	140	0,00
37	Ureteres	19814	6,80	1,03	7,00	7	0,00
41	Linfonodos	509496	174,76	1,03	180,00	180	0,00
42	Tecido Mole no fantoma masculino	6112910	2096,73	1,03	2159,63		
43	Tecido conectivo (tecido periarticular e tendões)	2686893	921,60	1,05	967,68	1100	-12,03
48	Sangue	1430859	490,78	1,06	520,23	2500	-79,19
50	Próstata no fantoma masculino	4529	1,55	1,03	1,60	1,6	0,00
51	Testículos no fantoma masculino	5607	1,92	1,04	2,00	2	0,01
52	Epidídimos no fantoma masculino	1698	0,58	1,03	0,60	0,6	-0,02
53	Uretra no fantoma masculino	12454	4,27	1,03	4,40	4,4	0,00
61	Tonsilas palatinas	8492	2,91	1,03	3,00	3	0,00
62	Glândula pituitária	981	0,34	1,04	0,35	0,35	-0,02
64	Cartilagens costais	78129	26,80	1,10	29,48		
65	Discos intervertebrais cervicais	3774	1,29	1,10	1,42		
66	Discos intervertebrais torácicos	49230	16,89	1,10	18,58		
67	Discos intervertebrais lombares	84239	28,89	1,10	31,78		
89	Vesícula biliar - Parede	12454	4,27	1,03	4,40	4,4	0,00
91	Estômago - Parede	240596	82,52	1,03	85,00	85	0,00
93	Intestino delgado - Parede	1047298	359,22	1,03	370,00	370	0,00
95	Intestino grosso - Parede	594413	203,88	1,03	210,00	210	0,00
97	Bexiga urinária - Parede	70083	24,04	1,04	25,00	25	0,00
99	Seios paranasais e ouvidos	42637	14,62	1,03	15,06		

Continuação da Tabela 4 – Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma masculino de 10 anos...

ID	Órgão	Nº voxels	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Massa (g)	ICRP89 (g)	Dif* (%)
100	Dentes	48862	16,76	1,79	30,00	30	0,00
101	Mandíbula - Osso Cortical	105573	36,21				
102	Crânio - Osso Cortical	1037451	355,85				
103	Esterno - Osso Cortical	21608	7,41				
104	Costelas - Osso Cortical	248530	85,25				
105	Clavícula esquerda - Osso Cortical	14411	4,94				
106	Clavícula direita - Osso Cortical	14411	4,94				
107	Escápula esquerda - Osso Cortical	43224	14,83				
108	Escápula direita - Osso Cortical	43224	14,83				
109	Coluna Cervical - Osso Cortical	17243	5,91				
110	Coluna Torácica - Osso Cortical	43115	14,79				
111	Coluna Lombar - Osso Cortical	49513	16,98				
112	Sacro - Osso Cortical	66106	22,67				
113	Pelve - Osso Cortical	217259	74,52				
114	Úmero esquerdo - Osso Cortical	79700	27,34				
115	Rádio e Ulna esquerdas - Osso Cortical	67164	23,04				
116	Ossos Mão esquerda - Osso Cortical	36401	12,49				
117	Úmero direito - Osso Cortical	79700	27,34				
118	Rádio e Ulna direitas - Osso Cortical	67164	23,04				
119	Ossos Mão direita - Osso Cortical	36401	12,49				
120	Fêmur esquerdo - Osso Cortical	177143	60,76				
122	Tíbia, Fibula e Patela esquerdas - Osso Cortical	145131	49,78				
123	Ossos Pé esquerdo - Osso Cortical	74627	25,60				
124	Fêmur direito - Osso Cortical	177143	60,76				
126	Tíbia, Fibula e Patela direitas - Osso Cortical	145131	49,78				
127	Ossos Pé direito - Osso Cortical	74627	25,60				
128	Osso hióide	3435	1,18				
131	Mandíbula - Tecido Esponjoso	35742	12,26				
132	Crânio - Tecido Esponjoso	372850	127,89				
133	Esterno - Tecido Esponjoso	48193	16,53				
134	Costelas - Tecido Esponjoso	258826	88,78				
135	Clavícula esquerda - Tecido Esponjoso	13654	4,68				
136	Clavícula direita - Tecido Esponjoso	13654	4,68				
137	Escápula esquerda - Tecido Esponjoso	42537	14,59				
138	Escápula direita - Tecido Esponjoso	42537	14,59				
139	Coluna Cervical - Tecido Esponjoso	111913	38,39				
140	Coluna Torácica - Tecido Esponjoso	372296	127,70				
141	Coluna Lombar - Tecido Esponjoso	283333	97,18				
142	Sacro - Tecido Esponjoso	171387	58,79				
143	Pelve - Tecido Esponjoso	410508	140,80				
144	Úmero esquerdo - Tecido Esponjoso Superior	47113	16,16				
145	Rádio e Ulna esquerdas - Tecido Esponjoso	54030	18,53				
146	Ossos Mão esquerda - Tecido Esponjoso	18986	6,51				
147	Úmero direito - Tecido Esponjoso Superior	47113	16,16				
148	Rádio e Ulna direitas - Tecido Esponjoso	54030	18,53				
149	Ossos Mão direita - Tecido Esponjoso	18986	6,51				
150	Fêmur esquerdo - Tecido Esponjoso Superior	183310	62,88				
152	Tíbia, Fibula e Patela esquerdas – Tec. Esponjoso	261593	89,73				
153	Ossos Pé esquerdo - Tecido Esponjoso	38917	13,35				
154	Fêmur direito - Tecido Esponjoso Superior	183310	62,88				
156	Tíbia, Fibula e Patela direitas - Tecido Esponjoso	261593	89,73				

Continuação da **Tabela 4** – Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma masculino de 10 anos...

ID	Órgão	Nº voxels	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Massa (g)	ICRP89 (g)	Dif* (%)
157	Ossos Pé direito - Tecido Esponjoso	38917	13,35				
161	Úmero esquerdo - Medula Óssea Amarela	44373	15,22				
162	Rádio e Ulna esquerdas - Medula Óssea Amarela	34985	12,00				
163	Úmero direito - Medula Óssea Amarela	44373	15,22				
164	Rádio e Ulna direitas - Medula Óssea Amarela	34985	12,00				
165	Fêmur esquerdo - Medula Óssea Amarela	117726	40,38				
166	Tíbia e Fíbula esquerda - Medula Óssea Amarela	86166	29,55				
167	Fêmur direito - Medula Óssea Amarela	117726	40,38				
168	Tíbia e Fíbula direita - Medula Óssea Amarela	86166	29,55				
180	Úmero esquerdo - Tecido Esponjoso Inferior	46542	15,96				
182	Úmero direito - Tecido Esponjoso Inferior	46542	15,96				
184	Fêmur esquerdo - Tecido Esponjoso Inferior	183082	62,80				
186	Fêmur direito - Tecido Esponjoso Inferior	183082	62,80				
191	Mandíbula - Cartilagem de Crescimento	70392	24,14				
192	Crânio - Cartilagem de Crescimento	689359	236,45				
193	Esterno - Cartilagem de Crescimento	14564	5,00				
194	Costelas - Cartilagem de Crescimento	89356	30,65				
195	Clavícula esquerda - Cartilagem de Crescimento	9709	3,33				
196	Clavícula direita - Cartilagem de Crescimento	9709	3,33				
197	Escápula esquerda - Cartilagem de Crescimento	29128	9,99				
198	Escápula direita - Cartilagem de Crescimento	29128	9,99				
199	Coluna Cervical - Cartilagem de Crescimento	39918	13,69				
200	Coluna Torácica - Cartilagem de Crescimento	59999	20,58				
201	Coluna Lombar - Cartilagem de Crescimento	7999	2,74				
202	Sacro - Cartilagem de Crescimento	55828	19,15				
203	Pelve - Cartilagem de Crescimento	152921	52,45				
204	Úmero esquerdo - Cartilagem de Crescimento	63110	21,65				
205	Rádio e Ulna esquerdas - Cart. de Crescimento	49760	17,07				
206	Ossos Mão esquerda - Cartilagem de Crescimento	24273	8,33				
207	Úmero direito - Cartilagem de Crescimento	63110	21,65				
208	Rádio e Ulna direitas - Cartilagem de Crescimento	49760	17,07				
209	Ossos Mão direita - Cartilagem de Crescimento	24273	8,33				
210	Fêmur esquerdo - Cartilagem de Crescimento	167485	57,45				
212	Tíbia, Fíbula e Patela esquerdas - Cart. de Cresc.	122580	42,04				
213	Ossos Pé esquerdo - Cartilagem de Crescimento	49760	17,07				
214	Fêmur direito - Cartilagem de Crescimento	167485	57,45				
216	Tíbia, Fíbula e Patela direitas - Cart. de Cresc.	122580	42,04				
217	Ossos Pé direito - Cartilagem de Crescimento	49760	17,07				
219	Ar	38726	13,28	0,001205	0,02		
220	Brônquios - parede	9526	3,27	1,03	3,37		

\* Dif (%) = (Massa (g) – ICRP89 (g)) \* 100/ ICRP89 (g)

**Tabela 5** – Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma feminino de 10 anos com as da ICRP89.

ID	Órgão	Nº voxels	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Massa (g)	ICRP89	Dif* (%)
1	Pele	2193276	752,29	1,09	820,00	820	0,00
2	gordura	22776968	7812,50	0,96	7500,00	7500	0,00
4	Olhos	33966	11,65	1,03	12,00	12	0,00
5	Lentes dos olhos	829	0,284	1,034	0,294	0,294	0,01
6	Músculo esquelético	30542829	10476,19	1,05	11000,00	11000	0,00
7	Cérebro (cavidade craniana) no fantoma feminino	3420049	1173,08	1,04	1220,00	1220	0,00
8	Medula espinal	46349	15,90	1,03	16,37		
9	Adrenais	19814	6,80	1,03	7,00	7	0,00
10	Pulmões	5606638	1923,08	0,26	500,00	500	0,00
11	Coração (parede)	396275	135,92	1,03	140,00	140	0,00
12	Pâncreas	168199	57,69	1,04	60,00	60	0,00
13	Fígado	2282854	783,02	1,06	830,00	830	0,00
14	Rins	499792	171,43	1,05	180,00	180	0,00
15	Timo no fantoma feminino	99069	33,98	1,03	35,00	35	0,00
16	Baço	220034	75,47	1,06	80,00	80	0,00
17	Passagem nasal	122679	42,08	1,03	43,34		
18	Língua	90577	31,07	1,03	32,00	32	0,00
19	Cavidade Bucal propriamente dita	117992	40,47	1,03	41,69		
20	Glândulas salivares sub-mandibulares	36797	12,62	1,03	13,00	13	0,00
21	Glândulas salivares parótidas	73594	25,24	1,03	26,00	26	0,00
22	Glândulas salivares sub-linguais	14153	4,85	1,03	5,00	5	0,00
24	Faringe	32853	11,27	1,03	11,61		
25	Laringe	33966	11,65	1,03	12,00	12	0,00
26	Esôfago	50950	17,48	1,03	18,00	18	0,00
27	Traquéia	12737	4,37	1,03	4,50	4,5	0,00
28	Tiróide	21935	7,52	1,05	7,90	7,9	0,00
30	Conteúdo da Vesícula Biliar	73594	25,24	1,03	26,00	26	0,00
32	Conteúdo do estômago	331173	113,59	1,03	117,00	117	0,00
34	Conteúdo do intestino delgado	461377	158,25	1,03	163,00	163	0,00
36	Conteúdo do cólon	396275	135,92	1,03	140,00	140	0,00
37	Ureteres	19814	6,80	1,03	7,00	7	0,00
41	Linfonodos	509496	174,76	1,03	180,00	180	0,00
42	Tecido Mole no fantoma feminino	6007105	2060,44	1,03	2122,25		
43	Tecido conectivo (tecido periarticular e tendões)	2686893	921,60	1,05	967,68	1100	-12,03
48	Sangue	1430859	490,78	1,06	520,23	2500	-79,19
55	Útero no fantoma feminino	11106	3,81	1,05	4,00	4	0,00
56	Ovários no fantoma feminino	9718	3,33	1,05	3,50	3,5	0,00
57	Tubas uterinas no fantoma feminino	1388	0,48	1,05	0,50	0,5	-0,02
58	Uretra no fantoma feminino	3680	1,26	1,03	1,30	1,3	0,01
61	Tonsilas palatinas	8492	2,91	1,03	3,00	3	0,00
62	Glândula pituitária	981	0,34	1,04	0,35	0,35	-0,02
64	Cartilagens costais	78129	26,80	1,10	29,48		
65	Discos intervertebrais cervicais	3774	1,29	1,10	1,42		
66	Discos intervertebrais torácicos	49230	16,89	1,10	18,58		
67	Discos intervertebrais lombares	84239	28,89	1,10	31,78		
89	Vesícula biliar - Parede	12454	4,27	1,03	4,40	4,4	0,00
91	Estômago - Parede	240596	82,52	1,03	85,00	85	0,00
93	Intestino delgado - Parede	1047298	359,22	1,03	370,00	370	0,00
95	Intestino grosso - Parede	594413	203,88	1,03	210,00	210	0,00
97	Bexiga urinária - Parede	70083	24,04	1,04	25,00	25	0,00
99	Seios paranasais e ouvidos	42637	14,62	1,03	15,06		

Continuação da **Tabela 5** – Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma feminino de 10 anos...

100	Dentes	48862	16,76	1,79	30,00	30	0,00
101	Mandíbula - Osso Cortical	105573	36,21				
102	Crânio - Osso Cortical	1037451	355,85				
103	Esterno - Osso Cortical	21608	7,41				
104	Costelas - Osso Cortical	248530	85,25				
105	Clavícula esquerda - Osso Cortical	14411	4,94				
106	Clavícula direita - Osso Cortical	14411	4,94				
107	Escápula esquerda - Osso Cortical	43224	14,83				
108	Escápula direita - Osso Cortical	43224	14,83				
109	Coluna Cervical - Osso Cortical	17243	5,91				
110	Coluna Torácica - Osso Cortical	43115	14,79				
111	Coluna Lombar - Osso Cortical	49513	16,98				
112	Sacro - Osso Cortical	66106	22,67				
113	Pelve - Osso Cortical	217259	74,52				
114	Úmero esquerdo - Osso Cortical	79700	27,34				
115	Rádio e Ulna esquerdas - Osso Cortical	67164	23,04				
116	Ossos Mão esquerda - Osso Cortical	36401	12,49				
117	Úmero direito - Osso Cortical	79700	27,34				
118	Rádio e Ulna direitas - Osso Cortical	67164	23,04				
119	Ossos Mão direita - Osso Cortical	36401	12,49				
120	Fêmur esquerdo - Osso Cortical	177143	60,76				
122	Tíbia, Fíbula e Patela esquerdas - Osso Cortical	145131	49,78				
123	Ossos Pé esquerdo - Osso Cortical	74627	25,60				
124	Fêmur direito - Osso Cortical	177143	60,76				
126	Tíbia, Fíbula e Patela direitas - Osso Cortical	145131	49,78				
127	Ossos Pé direito - Osso Cortical	74627	25,60				
128	Osso hióide	3435	1,18				
131	Mandíbula - Tecido Esponjoso	35742	12,26				
132	Crânio - Tecido Esponjoso	372850	127,89				
133	Esterno - Tecido Esponjoso	48193	16,53				
134	Costelas - Tecido Esponjoso	258826	88,78				
135	Clavícula esquerda - Tecido Esponjoso	13654	4,68				
136	Clavícula direita - Tecido Esponjoso	13654	4,68				
137	Escápula esquerda - Tecido Esponjoso	42537	14,59				
138	Escápula direita - Tecido Esponjoso	42537	14,59				
139	Coluna Cervical - Tecido Esponjoso	111913	38,39				
140	Coluna Torácica - Tecido Esponjoso	372296	127,70				
141	Coluna Lombar - Tecido Esponjoso	283333	97,18				
142	Sacro - Tecido Esponjoso	171387	58,79				
143	Pelve - Tecido Esponjoso	410508	140,80				
144	Úmero esquerdo - Tecido Esponjoso Superior	47113	16,16				
145	Rádio e Ulna esquerdas - Tecido Esponjoso	54030	18,53				
146	Ossos Mão esquerda - Tecido Esponjoso	18986	6,51				
147	Úmero direito - Tecido Esponjoso Superior	47113	16,16				
148	Rádio e Ulna direitas - Tecido Esponjoso	54030	18,53				
149	Ossos Mão direita - Tecido Esponjoso	18986	6,51				
150	Fêmur esquerdo - Tecido Esponjoso Superior	183310	62,88				
152	Tíbia, Fíbula e Patela esquerdas – Tec. Esponjoso	261593	89,73				
153	Ossos Pé esquerdo - Tecido Esponjoso	38917	13,35				
154	Fêmur direito - Tecido Esponjoso Superior	183310	62,88				
156	Tíbia, Fíbula e Patela direitas - Tecido Esponjoso	261593	89,73				
157	Ossos Pé direito - Tecido Esponjoso	38917	13,35				

Continuação da **Tabela 5** – Comparação das massas dos órgãos e tecidos do fantoma feminino de 10 anos...

ID	Órgão	Nº voxels	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Massa (g)	ICRP89 (g)	Dif* (%)
161	Úmero esquerdo - Medula Óssea Amarela	44373	15,22				
162	Rádio e Ulna esquerdas - Medula Óssea Amarela	34985	12,00				
163	Úmero direito - Medula Óssea Amarela	44373	15,22				
164	Rádio e Ulna direitas - Medula Óssea Amarela	34985	12,00				
165	Fêmur esquerdo - Medula Óssea Amarela	117726	40,38				
166	Tíbia e Fíbula esquerda - Medula Óssea Amarela	86166	29,55				
167	Fêmur direito - Medula Óssea Amarela	117726	40,38				
168	Tíbia e Fíbula direita - Medula Óssea Amarela	86166	29,55				
180	Úmero esquerdo - Tecido Esponjoso Inferior	46542	15,96				
182	Úmero direito - Tecido Esponjoso Inferior	46542	15,96				
184	Fêmur esquerdo - Tecido Esponjoso Inferior	183082	62,80				
186	Fêmur direito - Tecido Esponjoso Inferior	183082	62,80				
191	Mandíbula - Cartilagem de Crescimento	70392	24,14				
192	Crânio - Cartilagem de Crescimento	689359	236,45				
193	Esterno - Cartilagem de Crescimento	14564	5,00				
194	Costelas - Cartilagem de Crescimento	89356	30,65				
195	Clavícula esquerda - Cartilagem de Crescimento	9709	3,33				
196	Clavícula direita - Cartilagem de Crescimento	9709	3,33				
197	Escápula esquerda - Cartilagem de Crescimento	29128	9,99				
198	Escápula direita - Cartilagem de Crescimento	29128	9,99				
199	Coluna Cervical - Cartilagem de Crescimento	39918	13,69				
200	Coluna Torácica - Cartilagem de Crescimento	59999	20,58				
201	Coluna Lombar - Cartilagem de Crescimento	7999	2,74				
202	Sacro - Cartilagem de Crescimento	55828	19,15				
203	Pelve - Cartilagem de Crescimento	152921	52,45				
204	Úmero esquerdo - Cartilagem de Crescimento	63110	21,65				
205	Rádio e Ulna esquerdas - Cart. de Crescimento	49760	17,07				
206	Ossos Mão esquerda - Cartilagem de Crescimento	24273	8,33				
207	Úmero direito - Cartilagem de Crescimento	63110	21,65				
208	Rádio e Ulna direitas - Cartilagem de Crescimento	49760	17,07				
209	Ossos Mão direita - Cartilagem de Crescimento	24273	8,33				
210	Fêmur esquerdo - Cartilagem de Crescimento	167485	57,45				
212	Tíbia, Fíbula e Patela esquerdas - Cart. de Cresc.	122580	42,04				
213	Ossos Pé esquerdo - Cartilagem de Crescimento	49760	17,07				
214	Fêmur direito - Cartilagem de Crescimento	167485	57,45				
216	Tíbia, Fíbula e Patela direitas - Cart. de Cresc.	122580	42,04				
217	Ossos Pé direito - Cartilagem de Crescimento	49760	17,07				
219	Ar	38726	13,28	0,001205	0,02		
220	Brônquios - parede	9526	3,27	1,03	3,37		
221	Entorno do cérebro no fantoma feminino	504598	173,08	1,03	178,27		

\* Dif (%) = (Massa (g) – ICRP89 (g)) \* 100/ ICRP89 (g)

Quanto à comparação com as massas de referência da ICRP89, nas tabelas 2, 3, 4 e 5, os únicos tecidos que apresentam alguma dificuldade para visualização do somatório são os tecidos do esqueleto. Para que fosse feita a segmentação, cada conjunto de ossos recebeu IDs específicos, necessários para as finalidades dos fantasmas, mas isto dificulta a percepção da massa total destes tecidos. Para superar esta dificuldade, são apresentadas as Tabelas 6 e 7, com o somatório destes tecidos para efeito de comparação com a ICRP89.

**Tabela 6** – Somatório das massas dos tecidos constituintes do esqueleto dos fantasmas de 5 anos de idade e comparação com as massas de referência da ICRP89.

Órgão	Nº voxels	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Massa (g)	ICRP89 (g)	Dif*** (%)
Somatório do osso compacto	1761996	604,36	1,70	1027,41	1010	1,72
Somatório da espongiosa	1777968	609,84	1,18	719,61*	728,68	-1,25
Somatório da medula óssea amarela	63440	21,76	0,98	21,32**	21,32	0,00
Somatório da cartilagem de crescimento + Diversos (perióstio e vasos sanguíneos dos ossos)	1745541	598,74	1,1	658,61	655	0,55
Total				2426,95	2415	0,50

\* Parte da medula óssea amarela foi somada ao osso trabecular e à medula óssea vermelha, num total de 719,61 g.

\*\* Das 160 g de medula inativa, determinadas pela ICRP89, 21,32 g foram segmentados como medula óssea amarela, dentro do canal medular dos ossos dos braços, antebraços, coxas e pernas.

\*\*\* Dif (%) = (Massa (g) – ICRP89 (g)) \* 100/ ICRP89 (g)

**Tabela 7** – Somatório das massas dos tecidos constituintes do esqueleto dos fantasmas de 10 anos de idade e comparação com as massas de referência da ICRP89.

Órgão	Nº voxels	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Massa (g)	ICRP89 (g)	Dif*** (%)
Somatório do osso compacto	3082000	1057,13	1,75	1849,98	1840	0,54
Somatório da espongiosa	3844576	1318,69	1,18	1556,05*	1529,58	1,73
Somatório da medula óssea amarela	566500	194,31	0,98	190,42**	190,42	0,00
Somatório da cartilagem de crescimento + Diversos (perióstio e vasos sanguíneos dos ossos)	2436210	835,62	1,1	919,18	910	1,01
Total				4515,63	4470	1,02

\* Parte da medula óssea amarela foi somada ao osso trabecular e à medula óssea vermelha, num total de 1556,05 g.

\*\* Das 630 g de medula inativa, determinadas pela ICRP89, 190,42 g foram segmentados como medula óssea amarela, dentro do canal medular dos ossos dos braços, antebraços, coxas e pernas.

\*\*\* Dif (%) = (Massa (g) – ICRP89 (g)) \* 100/ ICRP89 (g)

