

Aplicativo para dosimetria interna usando a distribuição biocinética de fótons baseada em imagens de medicina nuclear*

Application for internal dosimetry using biokinetic distribution of photons based on nuclear medicine images

Viriato Leal Neto¹, José Wilson Vieira², Fernando Roberto de Andrade Lima³

Leal Neto V, Vieira JW, Lima FRA. Aplicativo para dosimetria interna usando a distribuição biocinética de fótons baseada em imagens de medicina nuclear. Radiol Bras. 2014 Set/Out;47(5):275-282.

Resumo Objetivo: Este artigo apresenta uma forma de se obterem estimativas de dose em pacientes submetidos a tratamentos radioterápicos a partir da análise das regiões de interesse em imagens de medicina nuclear.

Materiais e Métodos: Foi desenvolvido o *software* denominado DoRadlo (Dosimetria das Radiações Ionizantes), que recebe as informações sobre os órgãos fontes e o órgão alvo e retorna resultados gráficos e numéricos. As imagens de medicina nuclear utilizadas foram obtidas de catálogos disponibilizados por físicos médicos. Nas simulações utilizaram-se modelos computacionais de exposição constituídos por fantasmas de voxels acoplados ao código Monte Carlo EGSnrc. O *software* foi desenvolvido no Microsoft Visual Studio 2010 com o modelo de projeto Windows Presentation Foundation e a linguagem de programação C#.

Resultados: Da aplicação das ferramentas foram obtidos: o arquivo para otimização das simulações Monte Carlo utilizando o EGSnrc, a organização e compactação dos resultados dosimétricos com todas as fontes, a seleção das regiões de interesse, a contagem da intensidade dos tons de cinza nas regiões de interesse, o arquivo das fontes ponderadas e, finalmente, todos os resultados gráficos e numéricos.

Conclusão: A interface de usuários pode ser adaptada para uso em clínicas de medicina nuclear como ferramenta computacional auxiliar na estimativa da atividade administrada.

Unitermos: Medicina nuclear; Distribuição biocinética; Avaliações dosimétricas; Atividade administrada.

Abstract Objective: This article presents a way to obtain estimates of dose in patients submitted to radiotherapy with basis on the analysis of regions of interest on nuclear medicine images.

Materials and Methods: A software called DoRadlo (Dosimetria das Radiações Ionizantes [Ionizing Radiation Dosimetry]) was developed to receive information about source organs and target organs, generating graphical and numerical results. The nuclear medicine images utilized in the present study were obtained from catalogs provided by medical physicists. The simulations were performed with computational exposure models consisting of voxel phantoms coupled with the Monte Carlo EGSnrc code. The software was developed with the Microsoft Visual Studio 2010 Service Pack and the project template Windows Presentation Foundation for C# programming language.

Results: With the mentioned tools, the authors obtained the file for optimization of Monte Carlo simulations using the EGSnrc; organization and compaction of dosimetry results with all radioactive sources; selection of regions of interest; evaluation of grayscale intensity in regions of interest; the file of weighted sources; and, finally, all the charts and numerical results.

Conclusion: The user interface may be adapted for use in clinical nuclear medicine as a computer-aided tool to estimate the administered activity.

Keywords: Nuclear medicine; Biokinetic distribution; Dosimetric evaluations; Administered activity.

* Trabalho realizado no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE, Brasil.

1. Doutor, Professor e Pesquisador do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), Recife, PE, Brasil.

2. Doutor, Pesquisador Membro do Programa de Pós-graduação do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Professor da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco (UPE), Recife, PE, Brasil.

3. Doutor, Pesquisador Membro do Programa de Pós-graduação do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Pesquisador do Centro Regional de Ciências Nucleares (CRCN), Recife, PE, Brasil.

Endereço para correspondência: Dr. Viriato Leal Neto. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco. Avenida Professor Luís Freire, 500, Cidade Universitária. Recife, PE, Brasil, 50740-540. E-mail: viriatoleal@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

Para diagnóstico e terapia de várias doenças, a medicina nuclear utiliza os radiofármacos, substâncias que possuem na sua composição um radionuclídeo. As características físico-químicas do radiofármaco determinam a sua biocinética, isto é, a sua fixação no órgão alvo, metabolização e eliminação pelo organismo, enquanto as características físicas do radionuclídeo determinam a aplicação do composto em diagnóstico ou terapia.

Recebido para publicação em 13/3/2013. Aceito, após revisão, em 28/10/2013.

As imagens resultantes de pacientes submetidos a tratamento com substâncias radioativas podem ser utilizadas para avaliar a distribuição da atividade a ser administrada. A quantidade de atividade administrada é geralmente de responsabilidade do médico nuclear, que tem como base imagens com projeções anteroposterior e posteroanterior de varredura de corpo inteiro do paciente (varredura pré-dose). De acordo com a presença de áreas quentes mostradas nas imagens, o médico estima a atividade a ser administrada no tratamento.

Para se estimar a distribuição de dose advinda da atividade administrada em órgãos e tecidos, diversas tarefas são necessárias. Tarefas que vão desde a escolha do fantoma, do seu acoplamento ao código Monte Carlo (MC), com algoritmos adicionais para simular fontes específicas, até a organização e apresentação de tabelas e gráficos da dose absorvida por atividade acumulada em órgãos alvos escolhidos em função de diversos valores da energia do fóton. Neste trabalho foi desenvolvido o *software* chamado de DoRadIo (Dosimetria das Radiações Ionizantes), para integrar em uma única ferramenta computacional as tarefas citadas. Estão, claramente, separadas em menus as tarefas de obtenção de dados e sua organização em tabelas e gráficos para análise posterior. A atual versão do *software* se destina a pesquisadores em dosimetria. Com os dados dosimétricos disponíveis na atual versão é possível interpolar resultados quando a fonte for um emissor gama monoenergético. Neste caso, o usuário deverá salvar a tabela de dose absorvida por atividade acumulada para a situação do problema que lhe interessa. No *software*, ele precisa apenas escolher o órgão fonte, o alvo, selecionar os dados na tabela de resultados que envolvam a energia de interesse. A interpolação deve ser feita em outro *software*. Também é possível obter resultados quando os fótons são emitidos de diversos órgãos fontes. As técnicas que permitem estas avaliações dosimétricas adicionais caracterizam as inovações implementadas.

O *software* DoRadIo é parte integrante do Sistema de Informações Dosimétricas (SID)⁽¹⁾, desenvolvido e mantido pelo Grupo de Pesquisa em Dosimetria Numérica (GDN/CNPq), cujo sítio é: <http://dosimetrianumerica.org/>.

MATERIAIS E MÉTODOS

A construção do *software* foi no Microsoft Visual Studio 2010 com o modelo de projeto WPF Application⁽²⁾. Diversas ferramentas foram transladadas de outros *softwares* do GDN, tais como *MonteCarlo*⁽³⁾ e *Digital Image Processing (DIP)*⁽⁴⁾. Como as simulações MC foram restritas a emissores gama, recorreu-se ao código EGSnrc (*Electron Gamma Shower National Research Council*)⁽⁵⁾. Na parte de usuário deste sistema, foi inserido o modelo computacional de exposição (MCE) MSTA (*Mash STANding*)⁽⁶⁾, disponível pelo Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Brasil, em: www.caldose.org. O MCE MSTA consiste de um fantoma de voxels representando um adulto masculino acoplado ao EGSnrc. O código de usuário do MSTA contém 13 simuladores

de fontes para dosimetria externa e um para dosimetria interna, este com 27 arquivos de texto com informações sobre fontes recomendadas pela prática médica. A compilação do MSTA foi realizada na interface de usuários (UI – *User Interface*) do EGSnrc e a execução com o *prompt* de comando do Windows. Todos os *softwares* necessários foram instalados nos computadores (processador Intel Core i7 X990[®] 3,47 GHz, memória instalada (RAM) 24 GB com o sistema operacional Windows 7 Ultimate de 64 bits) do Laboratório de Dosimetria Numérica (LDN) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE).

A seguir, descrevem-se os métodos incorporados aos menus *Arquivos* e *Processamento de Imagens Digitais* do *software* DoRadIo com os detalhes das funcionalidades de cada menu.

O menu *Arquivos*

O menu *Arquivos* foi desenvolvido para realizar tarefas computacionais relacionadas com leitura e escrita de arquivos de texto, bem como a compactação/descompactação de arquivos. Ele possui os itens de menu exibidos na Figura 1.

a) *Item Criar o MCE_DI.bat*

O item de menu *Criar o MCE_DI.bat* é usado para criar o arquivo de texto que otimiza a simulação MC. O arquivo produzido traz informações que permitem a execução de todas as fontes internas disponíveis para MCE MSTA. Cada linha do arquivo é uma instrução para executar, via *prompt* de comando do Windows, um MCE com um dado arquivo contendo as informações sobre as seções de choque dos materiais que compõem o fantoma usado no MCE e outro arquivo contendo informações adicionais.

b) *Item Criar o ArquivoDados_DI.txt*

A simulação produz diversos arquivos de texto com resultados dosimétricos específicos. O item de menu *Criar o ArquivoDados_DI.txt*, exposto na Figura 1, foi desenvolvido para ler estes arquivos e os escrever em um único arquivo denominado *ArquivosDados_DI.txt*. Os mecanismos de leitura e escrita de arquivos de texto nesta e em outras atividades implementadas no DoRadIo estão nas classes *FileStream*, *StreamWriter* e *StreamReader* do *namespace System.IO*, contido na biblioteca de classes *NET Framework*⁽²⁾.

c) *Item Compactar/Descompactar Arquivos txt*

Como o arquivo *ArquivoDados_DI.txt* é relativamente grande para ser adicionado como recurso ao executável do DoRadIo, criou-se uma ferramenta com métodos de compactação e descompactação nativos do *namespace System.IO*. As classes principais usadas na implementação destas atividades são *MemoryStream* e *DeflateStream*, isto é, o fluxo de dados é armazenado na memória durante a execução. A diferença entre a implementação para compactar ou descompactar um arquivo de texto neste mecanismo é informada por um dos dois itens da enumeração *CompressionMode*: compactação ou descompactação.

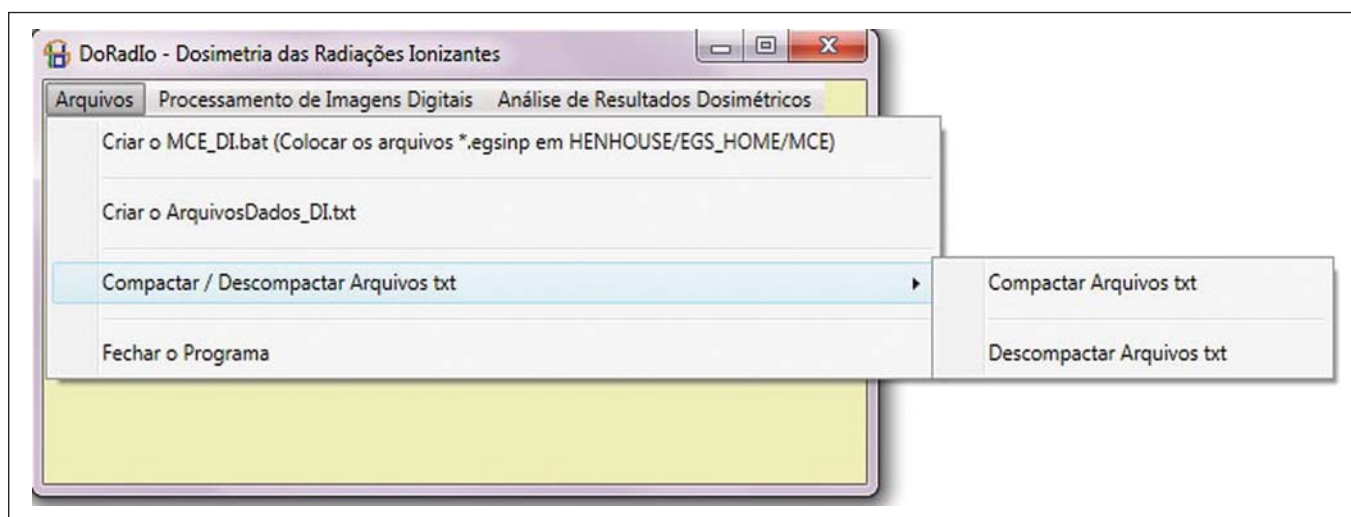


Figura 1. O menu *Arquivos*, seus itens e subitens.

O menu *Processamento de Imagens Digitais*

O menu *Processamento de Imagens Digitais* é o segundo exibido na interface da Figura 1. Ele traz dois itens de menu: um para selecionar e salvar determinada região de interesse (ROI) em uma imagem e outro para fazer a contagem da intensidade de pixels das imagens salvas. Estas contagens por ROI são usadas para ponderar resultados dosimétricos quando se utiliza mais de uma fonte na simulação. A razão entre a contagem em uma dada ROI e a contagem total na imagem é usada como o fator pelo qual o resultado dosimétrico de cada fonte envolvida deve ser multiplicado. Cada simulação é sempre monoenergética e os fótons emergem de um único órgão fonte. No início de cada história de uma simulação, a posição e largura do fóton e sua direção inicial de voo são funções densidade de probabilidade uniformes no paralelepípedo contendo o órgão fonte, como na formulação MIRD (*Medical Internal Radiation Dose*)⁽⁷⁾. Uma das vantagens de realizar a simulação monoenergética e ponderar os resultados é diminuir os erros estatísticos, uma vez que todas as simulações são realizadas com o mesmo número de histórias e a ponderação é feita sobre os resultados dosimétricos obtidos com as fontes simples.

A intensidade dos pixels nas regiões quentes de uma imagem de 8 bits de medicina nuclear reflete a distribuição da atividade. Assim, contando-se cumulativamente as intensidades de uma dada ROI, obtém-se um número que informa a quantidade de fótons oriunda desta ROI. Repetindo-se o procedimento para todas as ROIs da imagem, obtêm-se quantidades que, divididas pela soma delas, tornam-se fatores que ponderam as quantidades de fótons oriundas de cada ROI. Os resultados da dose absorvida por atividade acumulada que são dados de entrada do *software* DoRadIo foram obtidos como se estes fatores fossem iguais a 1, isto é, cada órgão fonte foi simulado separadamente. Quando houver mais de um órgão fonte envolvido na simulação, os resultados dosimétricos obtidos com as simulações separadas destes órgãos são ponderados por estes fatores.

a) *Obtenção de imagem de regiões de interesse*

A imagem de uma ROI é obtida realizando a operação lógica AND envolvendo uma máscara com dimensões definidas que passa sobre todos os pixels da imagem. Cada pixel de saída resulta da convolução dos pixels definidos na região da imagem com as mesmas dimensões da máscara pelos pesos atribuídos à operação AND (1 ou *true*). Esta operação foi implementada no DoRadIo lendo, em cada ponto (x,y) , a intensidade do pixel da imagem de medicina nuclear (a) e a correspondente intensidade em uma máscara (b). A máscara tem as mesmas dimensões da imagem, com intensidade de pixel 0 em todos os locais, exceto na ROI desejada, que é selecionada com o *mouse*. O valor retornado pela operação é $a \text{ AND } b$, isto é, a imagem resultante contém o fundo da máscara e os pixels da imagem de medicina nuclear localizados na ROI⁽⁸⁾.

b) *O item de menu Conta Intensidade dos Pixels em uma Imagem*

O item de menu *Conta Intensidade dos Pixels em uma Imagem* tem implementada uma ferramenta que calcula as somas das intensidades de pixels em uma imagem. Para isto, foi desenvolvida uma função em C# que recebe uma imagem contendo apenas uma ROI e fundo preenchido por 0's. Em um vetor de pontos inteiros com tamanho 256 são contadas, cumulativamente, as frequências (y) de cada tom de cinza na imagem (x). Para frequências diferente de 0, a função realiza a convolução do tom de cinza pela frequência. O resultado é retornado como a soma das intensidades dos pixels da ROI contida na imagem de entrada.

Na sequência, são apresentados os resultados deste artigo. Para tanto, foi escolhida uma sequência que mostra as principais funcionalidades do *software* desenvolvido, quando um hipotético usuário estiver interessado não só nos resultados dosimétricos, mas, também, em como preparar as entradas de dados no formato requerido pelos MCEs disponíveis pelo DEN-UFPE.

RESULTADOS

Provavelmente, as funcionalidades do *software* DoRadIo que irão despertar maior interesse em pesquisadores de dosimetria interna sejam os itens relacionados à obtenção de resultados gráficos e numéricos. Este usuário pode estar interessado em analisar distribuições de dose advindas de um único órgão fonte (fontes simples) ou de um conjunto de órgãos (fontes ponderadas). Os resultados usando fontes simples podem ser obtidos apenas com um clique. Porém, para o caso das fontes ponderadas é exigido um pouco mais de ações do usuário.

Para ilustrar as potencialidades do aplicativo, são apresentados e discutidos, na sequência, os passos que um usuário deve percorrer desde a preparação dos arquivos de entrada para execução do MCE MSTa até a análise gráfica e numérica dos resultados.

Preparação dos arquivos de entrada e a simulação Monte Carlo

Entre o material disponível sobre o MCE MSTa (em: www.caldose.org) há 27 arquivos de texto com informações sobre os órgãos fontes mais comumente usados na prática médica. Tais arquivos padrões estão prontos para executar um hipotético espectro de 15 energias: 10, 15, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 100, 200, 500, 1.000, 1.500, 2.000, 4.000 keV. Este intervalo de energia engloba as fontes emissoras de fótons usadas em medicina. Se o usuário lidar com uma energia intermediária, poderá interpolar os resultados dosimétricos disponíveis no aplicativo. Alguns ajustes foram feitos nos arquivos com as fontes padrões. O número de histórias foi fixado em 10^8 , independentemente da energia e do órgão fonte, e os nomes dos arquivos de saída foram personalizados.

Ao clicar no item *Criar o MCE_DI.bat* do menu *Arquivos*, o usuário pode criar um arquivo de texto, o *MCE_DI.bat*, com informações para executar as 27 fontes simples. A simulação foi disparada e levou em torno de 30 dias contínuos em um PC do LDN-IFPE. Caso cada fonte tivesse sido simulada separadamente, seria necessária a interferência do usuário pelo menos 27 vezes. Ao final obtiveram-se 405 arquivos (15 energias \times 27 fontes) com resultados dosimétricos específicos.

Organização e compactação de dados

Ao acionar o item *Criar ArquivosDados_DI.txt* do menu *Arquivos*, o programa lê os 405 arquivos com resultados dosimétricos específicos obtidos no item anterior e os organiza em um único denominado *ArquivosDados_DI.txt*. Este arquivo é usado para obter resultados dosimétricos em um alvo considerando: uma fonte (Fontes Simples) ou N fontes (Fontes Ponderadas).

O arquivo *ArquivoDados_DI.txt* é relativamente grande (27.066 kB) para ser adicionado como recurso do DoRadIo. Por meio do item *Compactar/Descompactar Arquivos.txt* do menu *Arquivos*, o arquivo foi compactado para 8.721 kB,

reduzindo o espaço de armazenamento em 67,8%. O arquivo compactado foi adicionado como recurso e é lido e descompactado em tempo de execução pelas interfaces do *software* para apresentar resultados específicos.

Obtenção de fatores para uma Fonte Ponderada

Para estimar o peso de órgãos fontes em uma simulação, podem ser usadas imagens de medicina nuclear. No exemplo aqui apresentado usou-se a imagem de uma adulta, exibida na Figura 2, obtida em um catálogo construído pela referência⁽⁹⁾. De posse da imagem, foram definidas ROIs com base nas intensidades dos pixels. Na Figura 2 é possível visualizar três ROIs: uma mais intensa na região do pescoço (tireoide), outra na região da alça intestinal (intestino delgado) e a outra na região do quadril (bexiga).

A seguir, apresenta-se um passo-a-passo da aplicação da ferramenta AND na imagem da Figura 2.

Passo 1: Ao clicar no item de menu que realiza a operação AND, é carregada a interface mostrada na Figura 3.

Passo 2: Na interface clica-se em (1) para abrir uma imagem. No contêiner à esquerda a imagem da Figura 2 é ajustada.

Passo 3: Seleciona-se a primeira ROI (região do pescoço) com um clique no botão esquerdo do *mouse* para selecionar

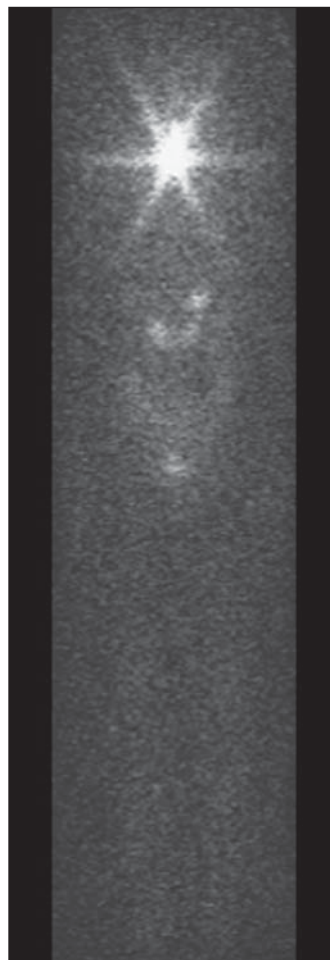


Figura 2. Imagem de medicina nuclear obtida de um catálogo⁽⁹⁾.

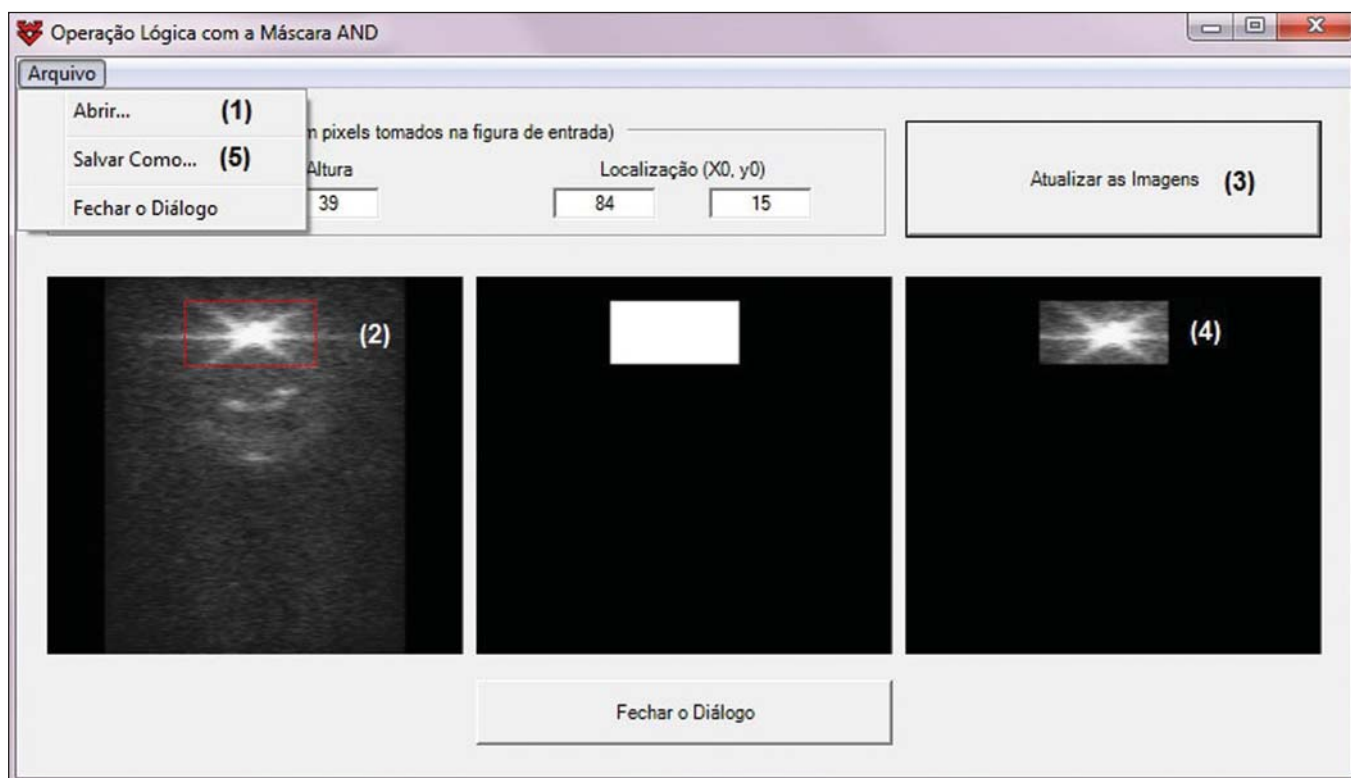


Figura 3. Interface com as imagens de medicina nuclear da Figura 2, da máscara e da ROI.

o canto superior esquerdo da ROI e, na sequência, outro clique no botão direito do *mouse* para selecionar o canto inferior direito, de modo a formar um retângulo (2). Deve-se clicar no botão (3) para gerar e/ou atualizar as imagens da máscara e da ROI (4).

Passo 4: Finalmente, clica-se em (5) para salvar as imagens da máscara e da ROI.

Passo 5: Repetem-se os passos de 1 a 4 para salvar as outras imagens de ROIs.

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos, em uma única imagem, da aplicação da ferramenta nas três regiões com as respectivas imagens das ROIs salvas. A imagem da Figura 4 contém 0's como fundo e tons de cinza no intervalo [0, 255] nas ROIs. Usando o item *Conta Intensidade de Pixels de uma Imagem* no menu *Processamento de Imagens Digitais*, obtém-se um total de 3.042, 1.271 e 432 para as somas das intensidades de pixels para a tireoide, intestino delgado e bexiga, respectivamente. Estes valores divididos pela soma total foram usados como fatores de ponderação destas fontes.

Para obter uma distribuição de dose realística advinda de fótons emitidos das três fontes, esta contagem é imprescindível, já que os totais de intensidades nas ROIs são proporcionais às quantidades de fótons cujas histórias iniciam nestas regiões. Assim, as razões entre os totais de intensidades em cada ROI, mostradas na Figura 4, e o total na imagem são, respectivamente, os pesos normalizados das fontes simuladas 0,641, 0,268 e 0,091. Estes pesos são aplicados sobre os dados dosimétricos embutidos no *software* e o usuário pode salvar os resultados em arquivo externo.

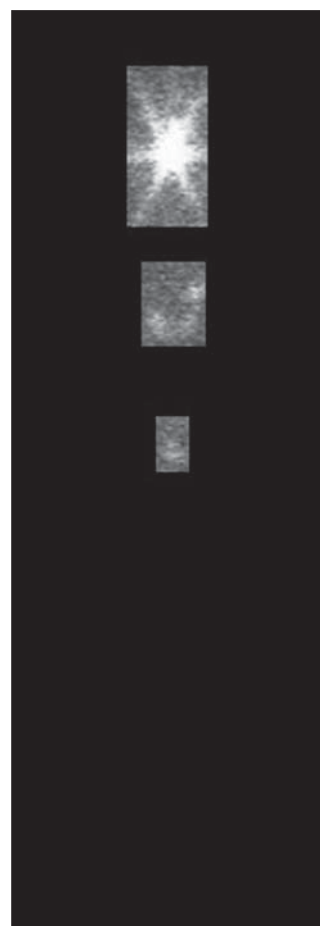


Figura 4. Imagem das ROIs selecionadas na Figura 2.

Apresentação e análise de resultados dosimétricos

A Figura 5 mostra quatro itens de menu, onde somente o MCE MSTA está habilitado na versão atual do DoRadIo. Os itens deste menu permitem exibir resultados dosimétricos de fontes simples e criar e exibir resultados de fontes ponderadas.

a) Resultados dosimétricos utilizando Fontes Simples

Ao acionar o subitem *Resultados Dosimétricos: Fontes Simples*, mostrado na Figura 5, o usuário pode obter resul-

tados numéricos e gráficos da ação de determinado órgão fonte sobre determinado órgão alvo. Por exemplo, a Figura 6 foi a UI carregada quando se escolheu um órgão fonte (TIREOIDE), um órgão alvo (FÍGADO) e se clicou no botão *Tabelas com Resultados Dosimétricos*. Com esta ação foi carregada a tabela com os valores dos seguintes coeficientes de conversão para 15 energias: Dose/Atividade Acumulada, Dose/Partícula Emitida, Fração Absorvida e Fração Absorvida Específica. O erro estatístico, avaliado usando a função coeficiente de variância⁽¹⁰⁾, também é mostrado na tabela.

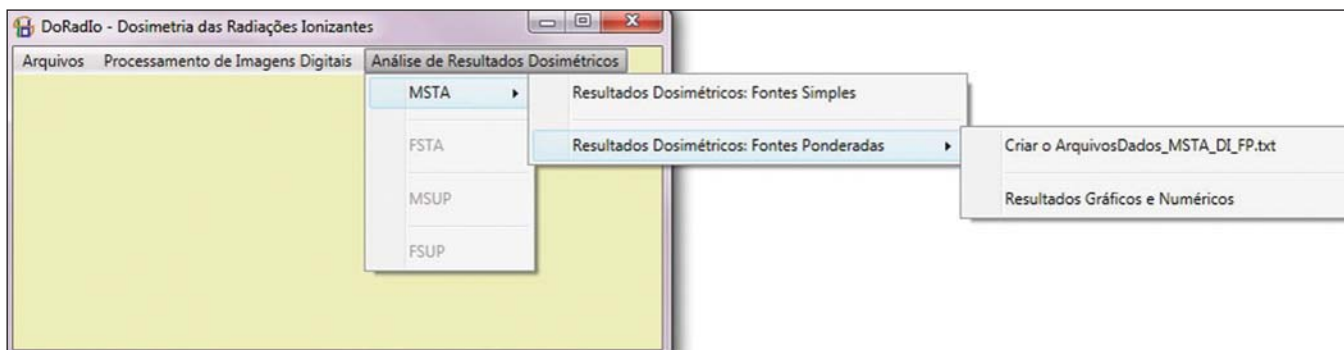


Figura 5. O menu *Análise de Resultados Dosimétricos* e seus submenus.

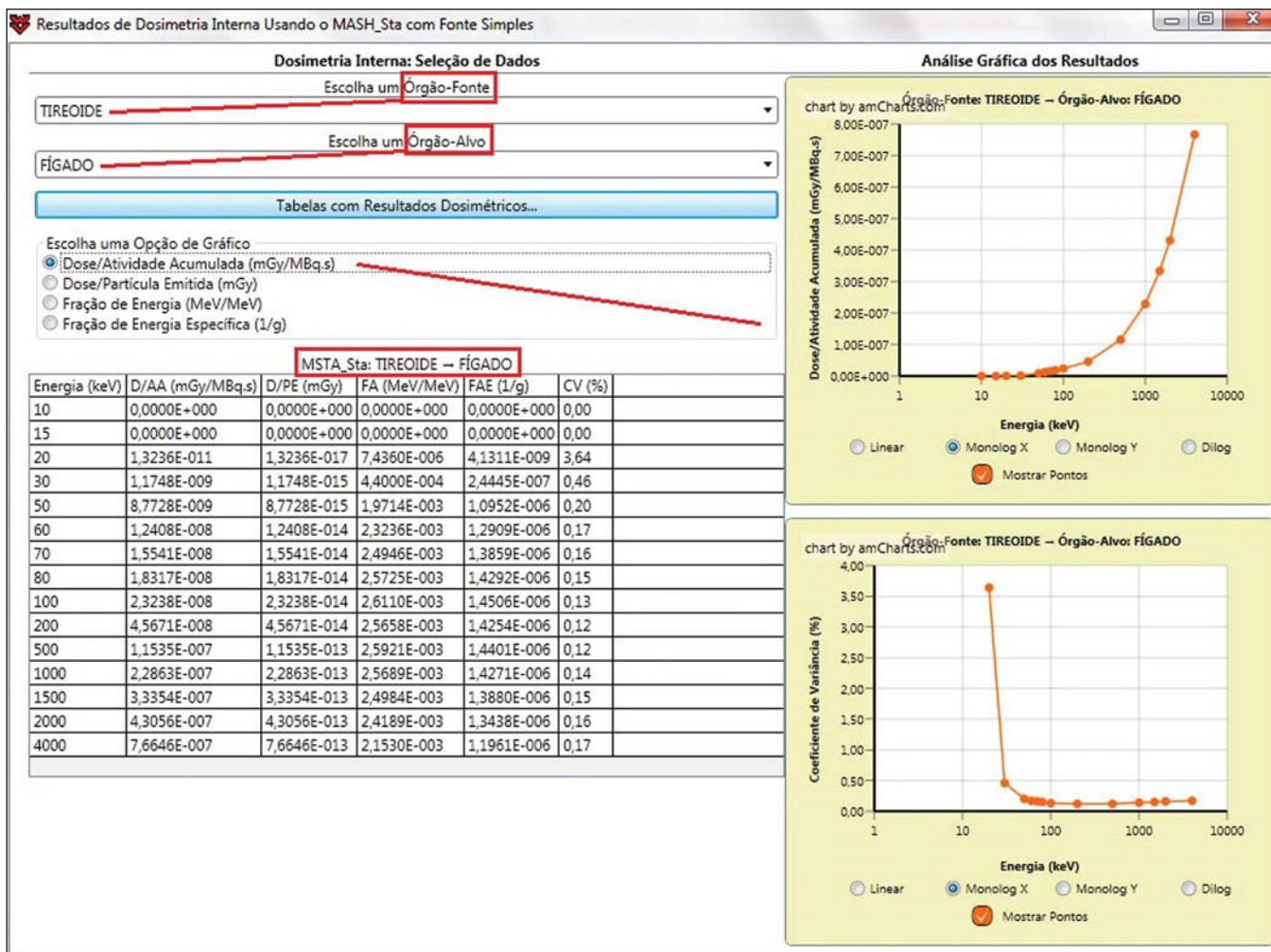


Figura 6. Janela resultante do submenu *Resultados Dosimétricos: Fonte Simples* com um exemplo de escolhas do usuário.

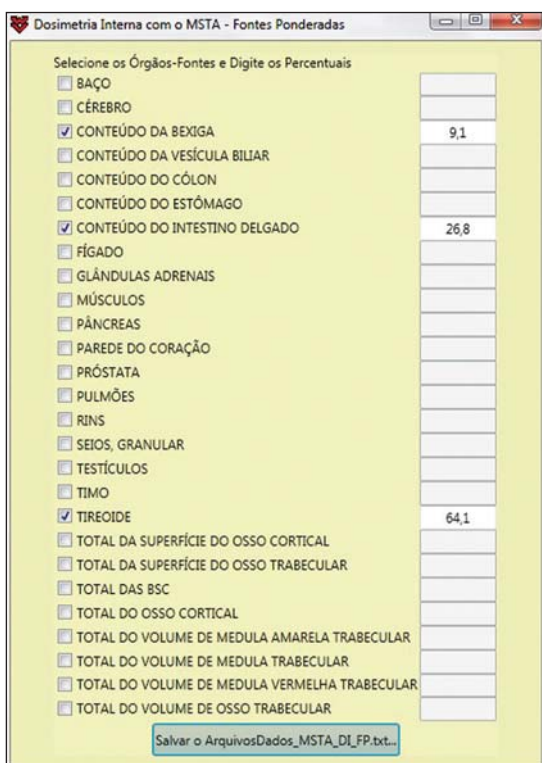


Figura 7. Interface para a definição dos órgãos fontes e os respectivos pesos.

Na caixa *Escolha uma Opção de Gráfico*, foi marcada a opção *Dose/Atividade Acumulada (mGy/MBq.s)*. Como resultado, dois gráficos são exibidos: *Dose/Atividade Acumulada (mGy/MBq.s) × Energia (keV)* e *Coefficiente de Variância (%) × Energia (keV)*.

b) Resultados dosimétricos utilizando Fontes Ponderadas

O subitem de menu *Resultados Dosimétricos: Fontes Ponderadas* permite ao usuário criar um arquivo com resultados da ação de mais de um órgão fonte sobre um órgão alvo e analisá-los. Como mostrado na Figura 5, este subitem é composto por dois itens: *Criar o ArquivoDados_MSTA_DI_FP.txt* e *Resultados Gráficos e Numéricos*.

Ao acionar o item *Criar o ArquivoDados_MSTA_DI_FP.txt*, foi carregada a UI da Figura 7, onde foram digitados os pesos normalizados obtidos no item **Obtenção de fatores para uma Fonte Ponderada**. Clicou-se no botão *Salvar ArquivoDados_MSTA_DI_FP.txt* para salvar um arquivo de texto com o nome da legenda. Este arquivo contém os resultados dosimétricos ponderados para todos os alvos disponíveis no MSTA e é usado na análise gráfica e numérica.

Acionando o item *Resultados Gráficos e Numéricos* mostrado na Figura 5, o *software* carrega a interface da Figura 8, onde se pode escolher um órgão alvo (por exemplo, fígado).

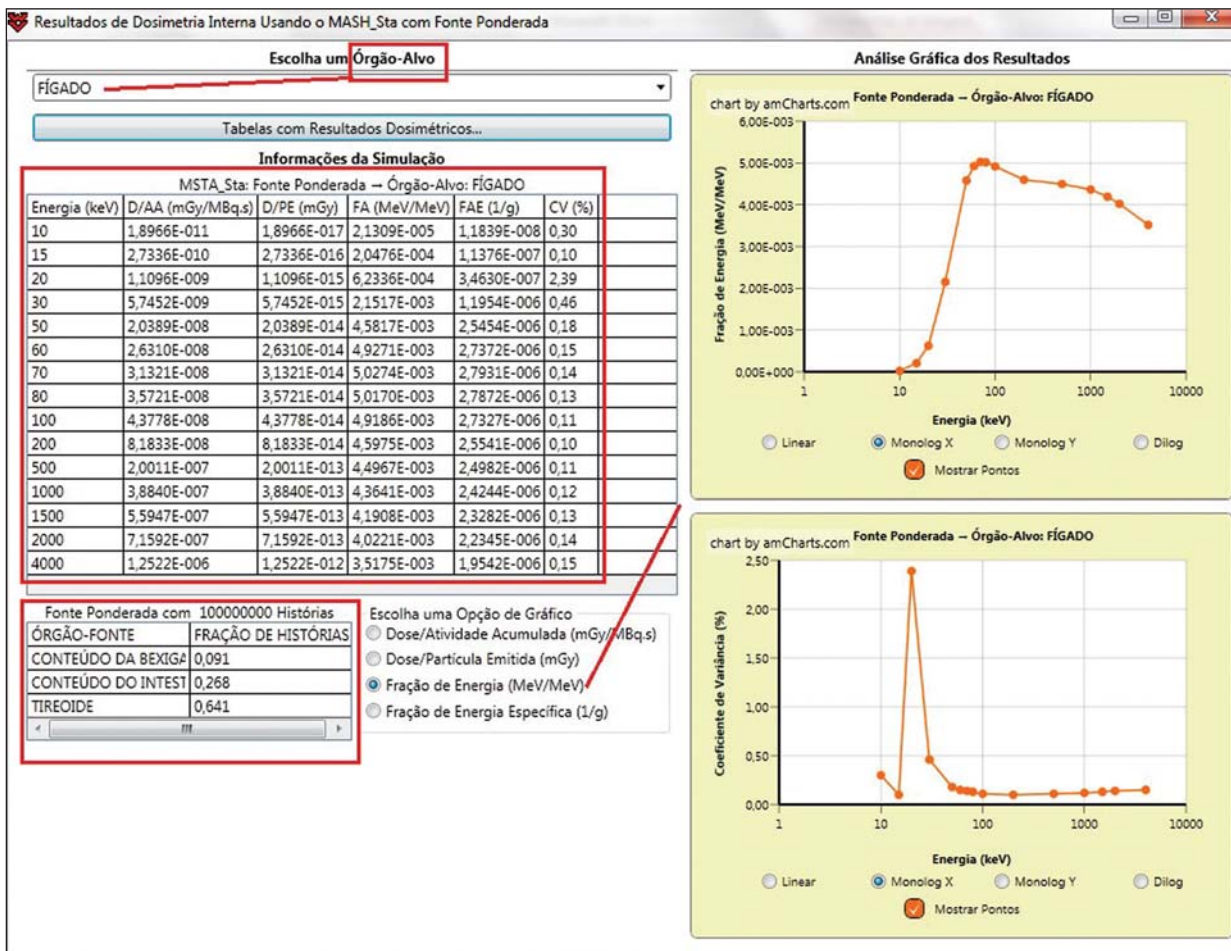


Figura 8. Interface para obter os resultados gráficos e numéricos com a atuação da fonte ponderada em um órgão alvo.

Clicando no botão *Tabela com Resultados Dosimétricos*, é exibida a tabela com os coeficientes de conversão e coeficiente de variância para o órgão alvo escolhido. Caso o usuário queira analisar o coeficiente em função da energia em keV, seleciona a opção correspondente.

DISCUSSÃO

Neste trabalho foram realizadas as simulações MC com algoritmos de fontes baseados em imagens de medicina nuclear, utilizando-se o fantoma de voxels MASH acoplado ao EGSnrc. Em grande parte dos casos, as imagens dos pacientes apresentam mais de uma área quente. Então, é mais frequente usar estimativas com fontes ponderadas. Em trabalho anterior⁽⁹⁾, as frações foram aplicadas ao número de histórias durante a simulação, o que resultou em erros estatísticos significativos causados pelo fracionamento deste número. Por exemplo, para as frações obtidas para este artigo, a simulação seria feita separadamente para as três fontes. Assim, o total de 10^8 fótons deveria ser ponderado entre fontes, ficando $6,41 \times 10^7$ na tireoide, $2,68 \times 10^7$ no intestino delgado e $9,1 \times 10^6$ na bexiga. Aqui, todas as simulações foram realizadas com 10^8 histórias. A ponderação foi aplicada aos resultados dosimétricos. Em trabalho futuro será demonstrada a precisão desta abordagem com a realização de simulações separadas para tireoide, intestino delgado e bexiga, com os respectivos números de história sorteados em tempo de execução. A análise comparativa será incorporada ao DoRadIo. Erros sistemáticos advindos dos MCEs utilizados pelo GDN/CNPq que possam comprometer a exatidão dos resultados dosimétricos estão, constantemente, sendo detectados e corrigidos ou minimizados.

Um ponto importante que pode ser melhorado no *software* DoRadIo consiste na determinação das ROIs na imagem de medicina nuclear. Além dos recursos de *mouse*, o usuário poderia avaliar um tom de cinza limiar para o contorno das ROIs e, automaticamente, o *software* carregaria, como padrão, as ROIs limitadas por este limiar. Ajustes posteriores seriam feitos pelo usuário.

Em conclusão, este trabalho apresenta a primeira versão do *software* DoRadIo, que oferece:

- A redução da complexidade nas avaliações dosimétricas internas utilizando imagens de medicina nuclear.
- A organização do trabalho de usuários em passos que vão desde a preparação das simulações MC até a análise dos resultados dosimétricos.
- A possibilidade de ajustes para uso em clínicas de medicina nuclear como ferramenta auxiliar na estimativa da atividade administrada com base nos resultados dosimétricos simulados.

As ferramentas computacionais desenvolvidas pelo GDN são livres e estão disponíveis em: <http://dosimetrianumerica.org/>. Além disso, estão em contínuo aperfeiçoamento.

REFERÊNCIAS

1. Leal Neto V. SID: um sistema computacional para obtenção e gerenciamento de informações sobre dosimetria das radiações ionizantes. [Tese de doutorado]. Recife: Universidade Federal de Pernambuco; 2013.
2. Sharp J. Visual C# 2010 step by step. 1ª ed. Washington: Microsoft Press; 2010.
3. Vieira JW, Leal Neto V, Lima Filho JM, et al. Transformation of the normal distribution for Monte Carlo modeling of regions of adult trabecular bones for use in computational models of exposure. 13th International Congress of International Radiation Protection Association; 2012 May 13–18; Glasgow, Scotland.
4. Vieira JW, Lima FRA. A software to digital image processing to be used in the voxel phantom development. Cell Mol Biol (Noisy-legrand). 2009;55:16–22.
5. Kawrakow I, Rogers DWO, Mainegra-Hing E, et al. The EGSnrc Code System: Monte Carlo simulation of electron and photon transport. Report No. PIRS-701. Ottawa, Canada: National Research Council Canada; 2011.
6. Cassola VF. Desenvolvimento de fantasmas humanos computacionais usando malhas poligonais em função da postura, massa e altura. [Tese de doutorado]. Recife: Universidade Federal de Pernambuco; 2011.
7. Zaidi H, Sgouros G. Therapeutic applications of Monte Carlo calculations in nuclear medicine. 1ª ed. Bristol: IOP Publishing; 2003.
8. Gonzalez RC, Woods RE. Digital image processing. 3ª ed. New Jersey: Prentice Hall; 2008.
9. Lopes Filho FJ. Avaliações dosimétricas em pacientes submetidos à radioiodoterapia com base em fantasmas de voxels e em imagens de medicina nuclear. [Tese de doutorado]. Recife: Universidade Federal de Pernambuco; 2007.
10. Santoro A, Oguri V, Mahon JR, et al. Estimativas e erros em experimentos de física. 2ª ed. Rio de Janeiro: UERJ; 2008.