

**Revista Eletrônica
Paulista de Matemática**

ISSN 2316-9664
v. 25, 2025
Edição Ermac

Daniela Renata Cantane

Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Biociências
(IBB), Botucatu,
daniela.cantane@unesp.br

Richard Castro Júnior

Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Biociências
(IBB), Programa de Pós-graduação
em Biometria, Botucatu

Diogo José Sousa Leão

Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Biociências
(IBB), Botucatu

Felipe Melo Silva

Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Biociências
(IBB), Botucatu

Tutorial do *software* matRad para o planejamento da radioterapia

The matRad software tutorial to radiotherapy planning

Resumo

O matRad é um *software* eficaz na aprendizagem e no desenvolvimento de técnicas avançadas para o planejamento de radioterapia. Foi desenvolvido pelo *German Cancer Research Center* DKFZ para planejar tratamentos que utilizam fótons, prótons e íons de carbono e destaca-se por calcular a dose com planejamento inverso e apresentar planos de tratamento. O uso deste programa contribui para o aprimoramento de resultados clínicos, entregando a dose mais conformada ao tumor e reduzindo os efeitos colaterais. Este artigo descreve os passos para obtenção, instalação e utilização do *software* matRad. Uma aplicação em um tratamento de câncer de fígado é apresentada com o objetivo de elaborar o planejamento radioterapêutico, investigando toda interface gráfica.

Palavras-chave: Matemática Aplicada à Física. Terapia por Radiação. Pesquisa Operacional. Otimização

Abstract

The matRad is an effective software for learning and developing advanced techniques in radiotherapy planning. It was developed by the German Cancer Research Center DKFZ to plan treatments that utilize photons, protons, and carbon ions, and it stands out for calculating dose with inverse planning and presenting treatment plans. The use of this program contributes to the enhancement of clinical outcomes by delivering a more conformal dose to the tumor and reducing side effects. This article describes the steps for obtaining, installing, and using the matRad software. An application in liver cancer treatment is presented to develop a radiotherapy plan, investigating the entire graphical interface.

Keywords: Mathematics Applied to Physics. Radiation Therapy. Operational Research. Optimization.



1 Introdução

O câncer é um termo abrangente que se refere a um vasto grupo de doenças que pode afetar qualquer parte do corpo. Uma característica distintiva do câncer é a rápida formação de células anormais, que invadem áreas adjacentes do corpo e se disseminam para outros órgãos, chamada de metástase, que é a principal causa de morte relacionada ao câncer. Os principais fatores para o desenvolvimento de câncer incluem o tabagismo, o consumo excessivo de álcool, uma dieta inadequada e a inatividade física. Apesar disso, há chances consideráveis de cura se os tumores forem detectados precocemente e tratados adequadamente [1].

De acordo com a Organização Nacional da Saúde (OMS), o número estimado de novos casos de câncer, exceto câncer de pele não melanoma, entre 2022 até 2050 terá um aumento de 81% no Brasil e de 74,33% no mundo [2].

Tipo de Câncer	Número Absoluto	Percentual (%)
Pulmão	90.550	12,1
Colorretal	73.446	9,8
Próstata	60.792	8,1
Mama	59.701	8,0
Estômago	57.803	7,7
Fígado	39.259	5,3
Outros	365.809	48,9
Total	747.360	100

Tabela 1: Mortalidade por tipo de câncer em 2022 na América Latina e Caribe. Dados fornecidos pela IARC [2].

Estima-se que neste mesmo período haverá um avanço de 98,8% na incidência de câncer de fígado e ductos biliares intra-hepáticos no Brasil. Na América Latina e no Caribe, o câncer de fígado é o sexto com maior taxa de mortalidade, configurando 5,3% das mortes por câncer em 2022, conforme a Tabela 1 [2].

A radioterapia é uma das alternativas para o tratamento de câncer. Trata-se um tratamento que utiliza radiação ionizante para destruir células cancerosas, danificando seu DNA e impedindo sua replicação. Existem dois tipos principais de radioterapia, dependendo do tipo de câncer, sua localização e extensão, além da condição de saúde do paciente: teleterapia, que usa máquinas para direcionar radiação ao tumor; e braquiterapia, que coloca materiais radioativos diretamente no tumor. No entanto, efeitos colaterais agudos e tardios, como fadiga e fibrose, podem surgir no decorrer do tratamento e alguns tumores podem apresentar resistência à radiação. Por isso, os avanços na radioterapia, como a utilização do feixe de prótons e modalidades e técnicas adaptativas, têm melhorado a eficácia na entrega de dose ao paciente, evitando essas reações adversas [3].

A Radioterapia de Intensidade Modulada (IMRT, do inglês *Intensity Modulated Radiotherapy*) é uma técnica que se destaca dentre as modalidades de radioterapia. A IMRT permite a modulação precisa da intensidade dos feixes de radiação, conformando a dose ao volume alvo enquanto minimiza a exposição dos tecidos saudáveis. Três componentes principais são essenciais para a IMRT: as imagens tomográficas computadorizadas (CT, do inglês *Computed Tomography*), que permitem uma representação tridimensional do paciente e ajudam a delinear o tumor; o colimador *multileaf*, que ajusta dinamicamente a forma do feixe de radiação; e o planejamento inverso, que utiliza algoritmos para calcular e otimizar a distribuição da dose de radiação [4–6].

Em trabalhos anteriores, a técnica IMRT tem sido explorada com a aplicação do *software* matRad em diferentes contextos, como no planejamento de radioterapia utilizando feixe de prótons para o tratamento de câncer de próstata [7] e na radioterapia de intensidade modulada para câncer de cabeça e pescoço com o uso de íons de carbono [8]. Esta modalidade de tratamento radioterápico foi abordada em trabalhos como: “Uma estrutura de otimização de ângulo de feixe multiobjetivo para radioterapia modulada por intensidade” [9]; e “Uma abordagem de otimização de dois níveis automatizada para IMRT” [10], visando o controle da escolha dos ângulos de feixe e as intensidades ótimas de radiação definidas pelos volumes a serem tratados. Essas pesquisas destacam a versatilidade do matRad na otimização de tratamentos radioterapêuticos, mostrando sua flexibilidade em personalizar planos de tratamento de acordo com as necessidades específicas dos pacientes.

Neste sentido, esse artigo tem como objetivo fornecer um tutorial para o uso do matRad com uma aplicação no planejamento de tratamento de câncer de fígado com feixe de fótons. Na Seção 2 é apresentado o matRad, explicando as principais características e o funcionamento do programa. Esta seção está dividida em duas subseções, 2.1, em que é explicada a instalação do *software*, e 2.2, em que é apresentada a operação da interface gráfica do usuário, isto é, como funciona o planejamento de tratamento. Na Seção 3 é descrito o modelo matemático utilizado pelo programa. Por fim, na Seção 4, é apresentado um planejamento de tratamento realizado pelo matRad para câncer de fígado, com a discussão dos resultados obtidos.

2 O *software* matRad

O matRad é um *software* de código aberto, voltado para fins educacionais e de pesquisa, desenvolvido pelo grupo de pesquisadores *Radiotherapy Optimization* no *German Cancer Research Center* DKFZ em Heidelberg, Alemanha. Inteiramente escrito em MATLAB®, o programa permite planejar o tratamento de cada paciente utilizando fótons de intensidade modulada, prótons ou íons de carbono como feixe de radiação. O *software* compreende funções do MATLAB® para executar todo o fluxo de trabalho de planejamento de tratamento, incluindo rastreamento de raios, cálculo da dose de fótons, prótons e íons de carbono, planejamento inverso baseado na dose física e no efeito biológico, sequenciamento de colimador *multileaf*. Além disso, pode gerar imagens gráficas para visualizar o planejamento e auxiliar na avaliação do plano de tratamento. Também disponibiliza-se dados de exemplos de pacientes e informações físicas e biológicas necessárias para os cálculos [11].

2.1 Instalação do *software*

Para a instalação do matRad, existem algumas formas que permitem acesso livre ao usuário, utilizadas através do MATLAB®. O matRad pode ser executado de duas maneiras. A primeira é baixar e descompactar o arquivo *matRad.zip*, que encontra-se no *site* do programa [11]. A segunda maneira é clonar o repositório do matRad, que é recomendado pela equipe desenvolvedora do *software* e refere-se ao processo de copiar todo o conteúdo do repositório do matRad, necessário para que se tenha uma cópia completa do código-fonte e dos arquivos associados do matRad. Desse modo, existem as opções de utilizar a interface gráfica ou o roteiro do matRad [12].

A utilização da interface gráfica do matRad exige que o usuário siga os seguintes passos:

1. abrir o arquivo *.zip* no MATLAB®;
2. iniciar a interface gráfica do matRad inserindo o comando *matRadGUI*;

3. executar o planejamento carregando os dados do paciente, seja pelo banco de dados CORT (*Common Optimization for Radiation Therapy*) [13] ou pela importação de imagens em formato DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*);
4. definir os parâmetros do plano e da otimização do tratamento;
5. visualizar a distribuição de dose na interface gráfica do matRad.

Por outro lado, ao utilizar o roteiro do matRad, o processo é um pouco diferente:

1. iniciar com a abertura do arquivo *.zip* no MATLAB®;
2. definir os parâmetros específicos do paciente, como o ângulo de posicionamento e o feixe de radiação a ser utilizado;
3. configurar esses parâmetros na janela de comando do MATLAB® antes de abrir a interface gráfica;
4. utilizar o comando *matRadGUI* para carregar os dados do paciente e visualizar a interface gráfica do programa [12].

Para usuários que não tem o MATLAB® instalado em seu computador, existe uma forma autônoma para a instalação do matRad, que está restrito ao uso do aplicativo exclusivo do *software*. Sendo assim, para a instalação do aplicativo deve-se baixar o matRad da versão mais recente para o seu sistema, seja *Microsoft Windows*, *Mac OS X* ou *Linux*. Caso apareça um aviso dizendo que o matRad é de um desenvolvedor não verificado, é necessário abrir o instalador no menu de contexto e executar o aplicativo mesmo com a verificação ausente. O aplicativo será instalado no computador do usuário e poderá prosseguir para o planejamento de tratamento, uma vez que, os arquivos do paciente são incluídos no instalador e serão atribuídos no local especificado [12].

2.2 Interface gráfica do usuário

A interface gráfica do usuário (GUI, do inglês *Graphical Usuary Interface*) do matRad, representada pela Figura 1, é uma ferramenta abrangente para o planejamento de tratamentos de radioterapia [14]. Após a execução do arquivo no MATLAB®, pode-se utilizar a interface para iniciar o planejamento de tratamento. A interface pode ser dividida em 5 seções principais: *Workflow*, *Plan*, *Objectives & Constraints*, *Visualization* e *Display Options*.

Para facilitar a compreensão, aqui estão alguns dos termos utilizados pelo matRad: a angulação do *gantry* determina a rotação do acelerador linear em torno do paciente, direcionando em diferentes ângulos a estrutura que permite a saída do feixe, que é o fluxo direcionado de radiação ionizante; a radiação é entregue em uma pequena área, similar ao *pixel* de uma imagem, chamado de *bixel* (do inglês *Beamlet Pixel*) ou entregue em um pequeno volume chamado de *voxel*, ajudando a calcular e distribuir a dose no alvo com precisão, com todos os feixes convergindo em um ponto no espaço no qual rotacionam o *gantry* e a mesa de tratamento, chamada de isocentro, que geralmente é posicionado no centro do tumor. O *gantry* pode rotacionar de 0° a 360° ao redor da mesa do paciente, mas nem sempre são utilizados todos os ângulos disponíveis devido ao tempo e custo do tratamento. Os ângulos variam dependendo da posição do tumor no corpo e proteção necessária para os órgãos ao redor [15].

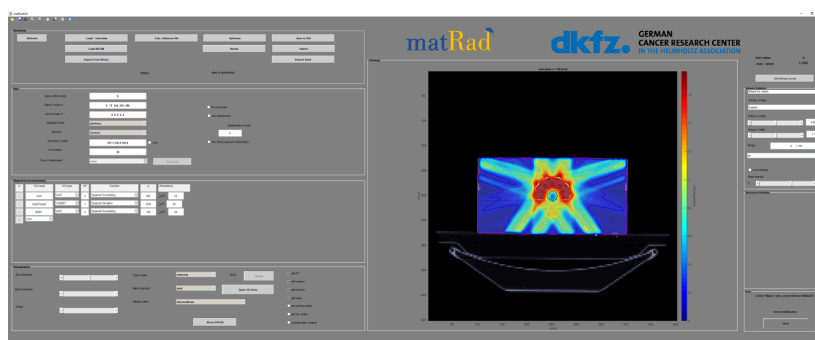


Figura 1: Interface Gráfica do Usuário [14].

A seção superior, denominada *Workflow* (Figura 2), disponibiliza funcionalidades essenciais como a carga de dados a partir de arquivos *.mat* ou DICOM, cálculo de matrizes de fluência de dose, otimização do plano e exportação dos resultados. Também permite a importação de doses previamente calculadas [14].

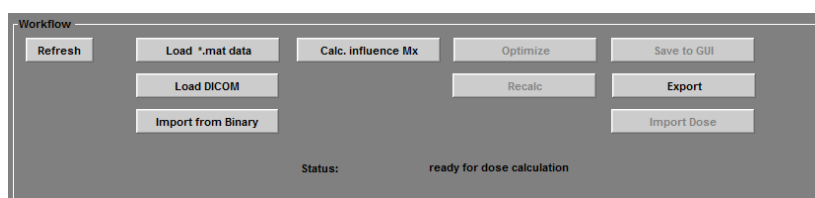


Figura 2: Seção *Workflow* [14].

A seção *Plan* (Figura 3) possibilita a configuração de parâmetros críticos do tratamento, incluindo a largura do *bixel*, ângulos do *gantry* e do *couch* (mesa, onde está o paciente), tipo de radiação - fótons, prótons e íons de carbono - e a definição do número de frações. É possível ajustar o isocentro manual ou automaticamente, escolher o tipo de otimização e trabalhar com vários feixes.

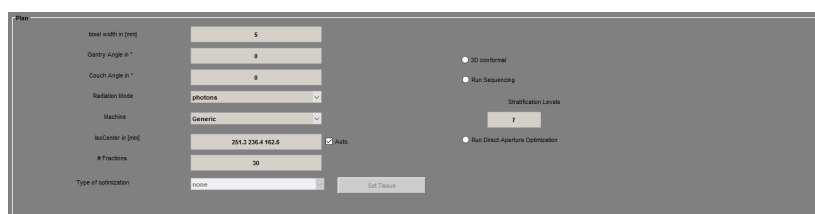


Figura 3: Seção *Plan* [14].

Em *Objectives & Constraints* (Figura 4), o usuário define funções objetivo e restrições para diversos volumes de interesse (VOI, do inglês *Volume of Interest*). Cada VOI pode ter múltiplas restrições para assegurar a proteção de órgãos de risco (OAR, do inglês *Organ at Risk*) e a efetividade do tratamento nos volumes-alvo planejados. Isso inclui especificar qual é o volume alvo, se ele é um órgão de risco, se há sobreposição de estruturas e ponderação de cada função objetivo e restrição. As funções objetivo associadas à interface são: subdosagem quadrada, sobredosagem quadrada, desvio quadrado, dose média, dose uniforme equivalente, máximo do histograma de dose por volume (DVH, do inglês *Dose Volume Histogram*), mínimo do DVH, restrição do DVH, restrição de dose mínima e máxima, e restrição de dose média [14].

Objectives & constraints						
+/-	VOI name	VOI type	OP	Function	p	Parameters
-	BRAIN_STE	OAR	2	Max DVH	100	d: 60 V ^{max} : 1
-	PAROTID_L	OAR	1	Mean Dose	10	d ^{ref} : 26
-	PTV70	TA...	1	DVH_constraint	----	d ^{ref} : 66.5 V ^{min} : 95 V ^{max} : 100
-	PTV70	TA...	1	Mean Dose	10	d ^{ref} : 70
-	SKIN	OAR	3	Squared Over...	10	d ^{max} : 30
-	SPINAL_CO	OAR	2	Max DVH	100	d: 50 V ^{max} : 1
+	BRAI...					

Figura 4: Seção *Objectives & Constraints* (Exemplo).

A visualização dos dados, na seção *Visualization* (Figura 5), permite a análise detalhada dos planos de tratamento. À direita, uma janela de visualização exibe a distribuição da dose em cortes axiais, sagitais e coronais, com a possibilidade de ajustar a visualização através do *Window Preset*, níveis de isodose e opacidade da dose. As ferramentas para plotagem de contornos, isolinhas, e centros isocêntricos auxiliam na interpretação visual dos dados.

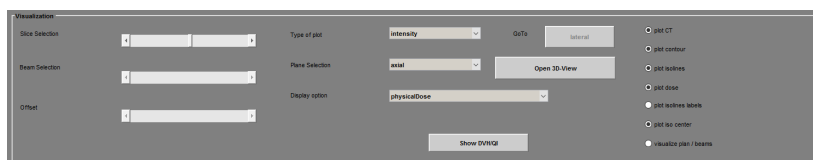


Figura 5: Seção *Visualization* [14].

Adicionalmente, a interface inclui funcionalidades para salvar e recarregar planos, facilitando o processo iterativo de otimização. Há também opções para selecionar diferentes tipos de gráficos (Intensidade de dose e DVH) e configurações de exibição (visualização em 3D).

3 A otimização abordada pelo matRad

Para o planejamento de tratamento radioterapêutico, o matRad utiliza um algoritmo baseado na modalidade IMRT. O planejamento de tratamento do câncer no matRad é uma etapa que envolve a otimização de estratégias terapêuticas para maximizar a eficácia e minimizar os efeitos colaterais. A partir dos algoritmos do programa, a distribuição de dose é otimizada, considerando objetivos clínicos e restrições do tratamento, e a seleção dos melhores feixes de radiação para tratamento [16, 17].

3.1 Modelo de otimização do software

O matRad utiliza um modelo de otimização especializado para encontrar a distribuição de dose ótima do tratamento [18], representado pelo modelo (1)-(4):

$$\text{minimizar} \quad \sum_{i=1}^n p_i f_i(w) \quad (1)$$

$$\text{sujeito a} \quad Dw = d \quad (2)$$

$$c_l \leq c(w) \leq c_u \quad (3)$$

$$w \geq 0, \quad (4)$$

em que $f(w) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $c(w) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$.

A função objetivo (1) minimiza a fluência de radiação $f_i(w)$ incorporando metas como dosagem máxima e mínima de dose-volume, subdosagem e superdosagem, em que p_i , para $i = 1, \dots, n$, são as ponderações de $f_i(w)$ para determinar a fluência de radiação ideal. A matriz D de deposição de dose, representada pela Equação (2), é a contribuição da dose para cada *voxel* i do feixe j , onde w é o vetor de dose modulada dos n feixes. As restrições de desigualdade são definidas pela Equação (3), que limitam a dose recebida nos tecidos críticos, $c(w)$, inferior e superiormente c_l e c_u , respectivamente. A Equação (4) garante que apenas fluências de radiação positivas sejam consideradas. O modelo de otimização utilizado pelo matRad, ao integrar múltiplos objetivos e restrições em uma função objetivo, permite a personalização do tratamento, atendendo às necessidades individuais dos pacientes e garantindo um planejamento de tratamento preciso [18].

3.2 Funções disponíveis para a otimização

Inicialmente, seleciona-se os arquivos que contenham as matrizes das imagens tomográficas e os dados do paciente. Se o usuário optar por escolher o conjunto de dados CORT [13], deve-se seguir para a célula *Load.mat* e carregar o arquivo na pasta denominada *phantoms*. Caso deseje inserir os dados próprios do paciente, deve-se seguir para a célula *Load DICOM* para a seleção do arquivo. Após o ajuste de todos os parâmetros, o cálculo da dose e a otimização da fluência são iniciados, acessando as células *Calc. influence Mx* e *Optimize*, respectivamente. Pelo cálculo da matriz de deposição de dose em *Calc. influence Mx*, a densidade de dose é encontrada para cada unidade de feixe de radiação [19].

Do mesmo modo, em *Optimize* na *Workflow*, segue-se a etapa da otimização da fluência para determinar um conjunto de pesos para feixes que resulte na melhor distribuição de dose possível, atendendo aos objetivos clínicos e restrições específicas do tratamento [20]. Os objetivos e restrições individuais são definidos por estrutura, a serem escolhidos pelo usuário, e incluem, entre outros elementos:

- objetivo de superdosagem ao quadrado;
- objetivo de subdosagem quadrada;
- objetivo de desvio de dose ao quadrado;
- objetivo de dose média;
- objetivo de dose uniforme equivalente;
- restrições de dose mínima/máxima;
- objetivos e restrições pontuais do DVH.

Essa abordagem estende-se à implementação de problemas de otimização, que combinam os objetivos individuais em uma função objetivo e organiza as restrições para apresentar um problema padrão [21]. O matRad utiliza por padrão o pacote de otimização de pontos interiores (IPOpt, do inglês *Interior Point Optimization*) para otimização não linear de grande porte. A escolha do otimizador pode ser alterada configurando o comando *pln.propOpt.optimizer* no *script*. A classe *matRad_OptimizationProblem* também permite a implementação de problemas de planejamento avançados, como a otimização direta de abertura, implementada em *matRad_OptimizationProblemDAO* [22].

4 Resultados e discussões

O planejamento de tratamento para câncer de fígado foi realizado por meio do uso da interface gráfica do usuário do matRad. As configurações utilizadas constam nas Tabelas 2 e 3.

Largura do feixe	5mm
Ângulo do gantry	0° 72° 144° 216° 288°
Ângulo da mesa	22° 22° 22° 22° 22°
Tipo de radiação	Fótons
Número de sessões	30
Níveis de estratificação	7

Tabela 2: Configuração da seção *Plan* para fígado. Fonte autoral.

Para o feixe de radiação de fótons, existe a opção de executar um sequenciamento do colimador *multileaf*, onde se definem o número de níveis de estratificação, que refere-se ao número de níveis de intensidade utilizados para converter um perfil de fluência contínuo em segmentos discretos que podem ser entregues.

Estrutura	Classificação	Sobreposição	Função	Peso	Parâmetro de Dose
GTV	Alvo	1	Desvio Quadrático	1000	referência: 45Gy
CTV	Alvo	1	Desvio Quadrático	1000	referência: 45Gy
PTV	Alvo	1	Desvio Quadrático	1000	referência: 45Gy
SKIN	Órgão de Risco	2	Sobredosagem Quadrática	300	máxima: 25Gy
STOMACH	Órgão de Risco	2	Sobredosagem Quadrática	300	máxima: 25Gy
LIVER	Órgão de Risco	2	Sobredosagem Quadrática	300	máxima: 25Gy
SPINAL CORD	Órgão de Risco	2	Sobredosagem Quadrática	300	máxima: 25Gy

Tabela 3: Configuração da seção *Objectives & Constraints* para fígado. Fonte autoral.

Na Tabela 3, as configurações de objetivos e restrições são definidas da seguinte maneira: a estrutura utilizada no planejamento; a classificação, que indica se a estrutura é um alvo ou um órgão de risco; a sobreposição, que determina como as estruturas sobrepostas são tratadas durante o processo de otimização, como por exemplo duas estruturas, A e B , com prioridades p_A e p_B . Se ambas as estruturas incluem o *voxel* i , ele será atribuído exclusivamente à estrutura A caso $p_A < p_B$. No entanto, se $p_A = p_B$, o *voxel* será considerado pertencente à ambas as estruturas; a função, que especifica de que forma a estrutura será incorporada no processo de otimização; o peso, que representa o fator de importância atribuído à restrição associada à estrutura, destacando sua relevância em relação às outras; e, por fim, os parâmetros de dose, que correspondem ao limite de dose aplicada [14].

Define-se o GTV (do inglês *Gross Tumor Volume*) como a porção do tumor que pode ser visualizada diretamente. O CTV (do inglês *Clinical Target Volume*) abrange todo o tecido que contém o tumor, incluindo possíveis extensões microscópicas não visíveis. Durante o planejamento, é estabelecido o PTV (do inglês *Planning Target Volume*), que é um volume um pouco maior do que o CTV, garantindo que todos os tecidos dentro do CTV recebam a dose de radiação adequada [23]. Os órgãos de risco selecionados na seção *Objectives & Constraints* foram pele (do inglês *SKIN*), estômago (do inglês *STOMACH*), fígado (do inglês *LIVER*) e medula espinhal (do inglês *SPINAL CORD*).

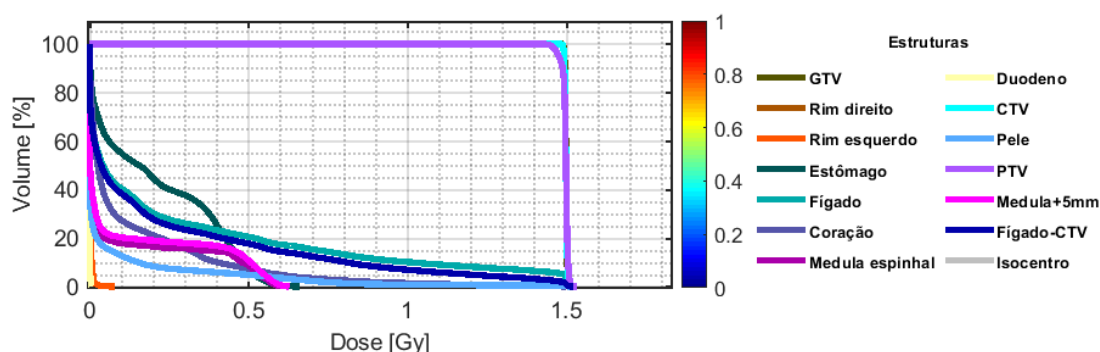


Figura 6: Histograma de dose por volume do planejamento de tratamento para câncer de fígado. Imagem gerada pelo matRad.

O histograma de dose por volume, representado na Figura 6, é uma ferramenta prática na análise do planejamento radioterápico, e neste caso, especificamente para o câncer de fígado. Ele oferece uma visão quantitativa da distribuição da dose de radiação em relação ao volume do tumor e aos tecidos circundantes. No DVH observa-se a distribuição da dose em diversas estruturas (diferenciadas pela cor), evidenciando a eficácia do planejamento em atingir a dose prescrita no volume-alvo (tumor), enquanto minimiza a exposição dos órgãos adjacentes. Este equilíbrio contribui para maximizar o controle da dose tumoral e minimizar os efeitos colaterais, especialmente em órgãos como o fígado, onde a preservação da função hepática é necessária [24].

No planejamento da radioterapia com o matRad, a definição dos órgãos-alvo e suas respectivas funções objetivo são configuradas conforme descrito na Tabela 3 da seção *Objectives & Constraints* da interface gráfica. No entanto, na ilustração do DVH aparecem também outras estruturas além das planejadas, pois o *software* considera outros órgãos de risco, que são estruturas adjacentes ou próximas ao tumor, sensíveis à radiação, como os rins, coração e duodeno.

O conjunto de Figuras 7 exibe a distribuição de dose em diferentes planos anatômicos (sagital, coronal, axial e tridimensional) para o planejamento de radioterapia de um caso de câncer de fígado. Cada plano de imagem oferece uma perspectiva distinta para a compreensão da deposição da dose e da cobertura do tumor, além da preservação dos órgãos adjacentes.

No plano sagital (Figura 7a), observa-se a distribuição longitudinal da dose, útil para avaliar a extensão da cobertura ao longo do eixo anteroposterior do corpo. Por este plano, pode-se verificar a conformidade da dose na direção do eixo médio do corpo, fornecendo informações sobre a proteção da medula espinhal e outros tecidos sensíveis.

O plano coronal (Figura 7b) oferece uma visualização frontal da distribuição da dose, importante para avaliar a simetria da distribuição em relação ao eixo lateral. A análise desse plano permite verificar se a dose está uniformemente distribuída em relação aos lados direito e esquerdo do corpo, indicando se a região tumoral recebe a dose planejada enquanto os órgãos críticos são preservados.

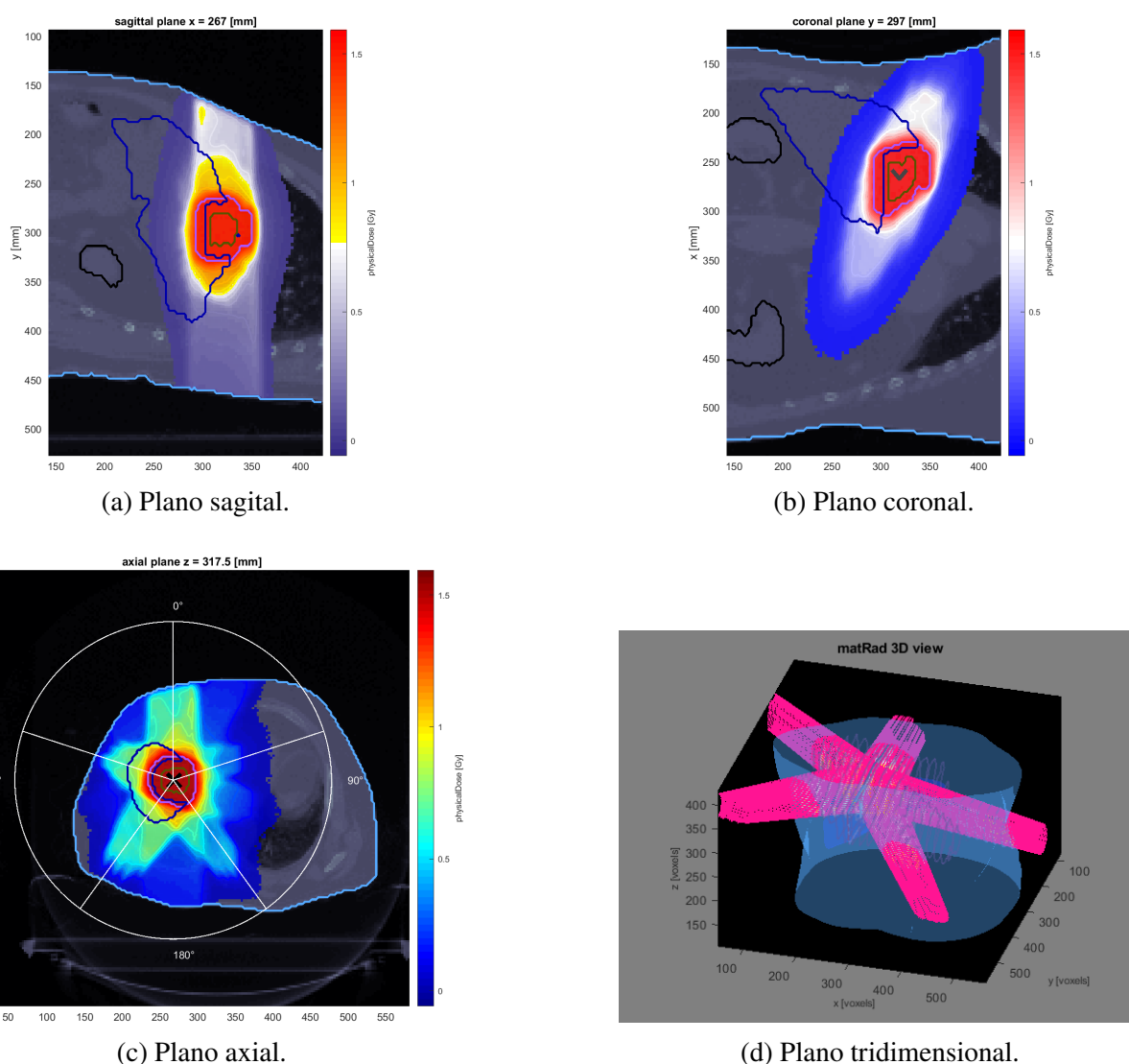


Figura 7: Distribuição da intensidade de dose de radiação em diferentes planos para o planejamento de tratamento de câncer de fígado. Imagens geradas pelo matRad.

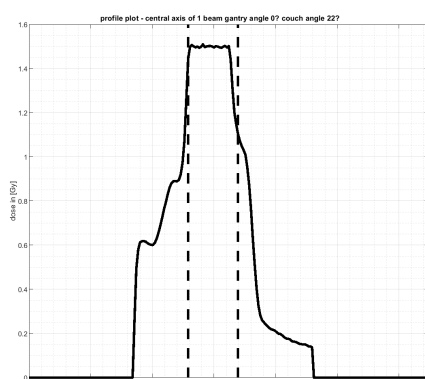
O plano axial (Figura 7c) fornece uma visão transversal do corpo, mostrando a distribuição da dose ao longo dos eixos horizontal e vertical. Esse plano possibilita visualizar se a dose está concentrada no tumor e minimizada nos órgãos circundantes, como o fígado saudável e os rins. É útil para verificar a adequação da dose em camadas sucessivas de tecido, e também permite a verificação dos ângulos de irradiação dos feixes pelo *gantry*.

O padrão de cores das imagens 7a, 7b e 7c permite a visualização da intensidade de dose em cada estrutura do planejamento. As cores mais quentes são usadas para indicar as áreas que recebem as doses mais altas de radiação. Essas cores geralmente correspondem ao alvo, recebendo a dose necessária para combater o câncer, como o PTV. As cores mais frias representam as áreas que recebem doses mais baixas de radiação e são associadas aos órgãos de risco e aos tecidos saudáveis que circundam o tumor, minimizando a exposição desses tecidos à radiação.

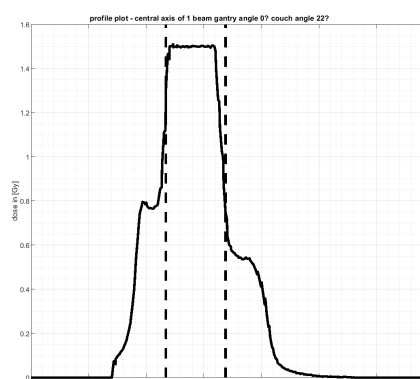
Por fim, a representação tridimensional (Figura 7d) integra as informações dos planos sagital, coronal e axial, permitindo uma visão global da distribuição da dose no volume tratado. Essa

visualização é eficiente para a avaliação geral do planejamento, auxiliando a visualizar se a dose prescrita foi alcançada em todas as dimensões do tumor, enquanto as doses nos órgãos críticos foram minimizadas.

Nas Figuras 8 a 12, são apresentadas as visões laterais e longitudinais de cada um dos cinco feixes utilizados no planejamento. Cada feixe é configurado para incidir em diferentes ângulos e intensidades, de modo a maximizar a dose no tumor e minimizar a exposição dos tecidos saudáveis. As linhas verticais tracejadas paralelas representam a delimitação do alvo. A visão lateral de cada feixe permite analisar a incidência da radiação ao longo da lateralidade do corpo, enquanto a visão longitudinal revela a distribuição da dose ao longo do comprimento do feixe. Essa configuração multicamadas é uma característica do tratamento com IMRT, que possibilita a entrega de doses moduladas, proporcionando uma maior precisão no tratamento. A análise dessas figuras possibilita verificar a complexidade do planejamento radioterápico, para que o tratamento seja satisfatório e seguro para o paciente.

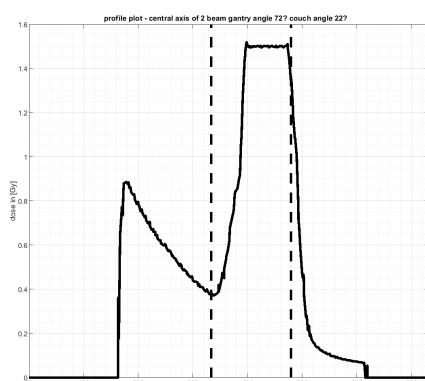


(a) Vista lateral - Feixe 1

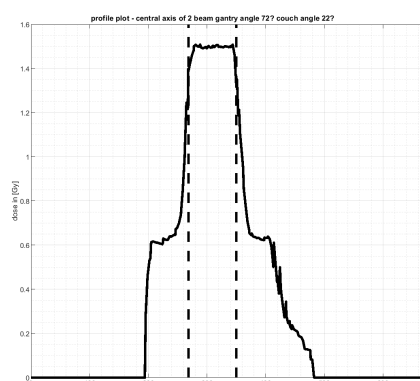


(b) Vista longitudinal - Feixe 1

Figura 8: Visões lateral e longitudinal do Feixe 1. Imagens geradas pelo matRad.

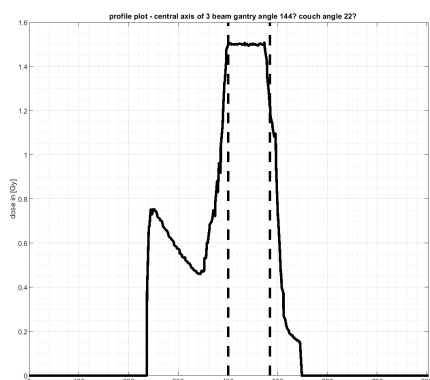


(a) Vista lateral - Feixe 2

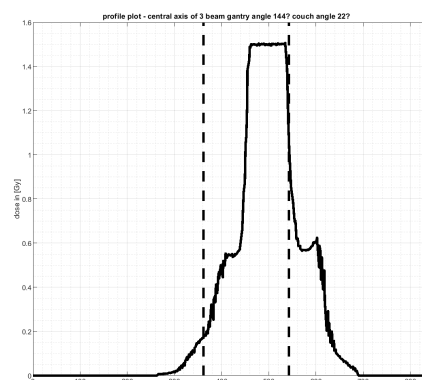


(b) Vista longitudinal - Feixe 2

Figura 9: Visões lateral e longitudinal do Feixe 2. Imagens geradas pelo matRad.

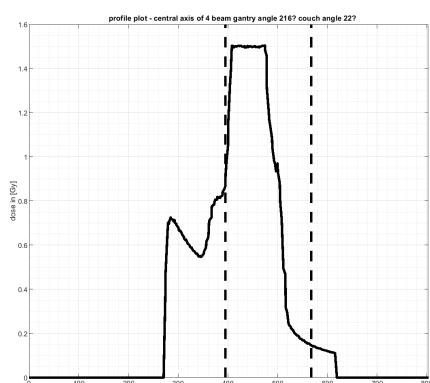


(a) Vista lateral - Feixe 3.

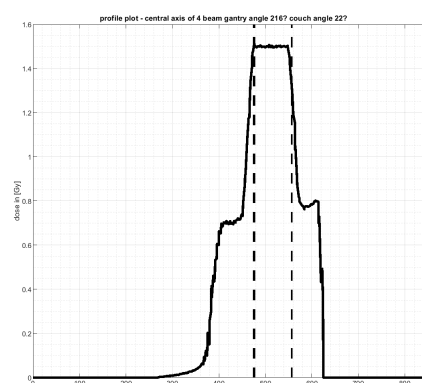


(b) Vista longitudinal - Feixe 3

Figura 10: Visões lateral e longitudinal do Feixe 3. Imagens geradas pelo matRad.

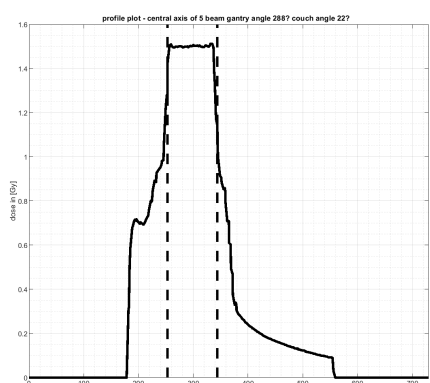


(a) Vista lateral - Feixe 4

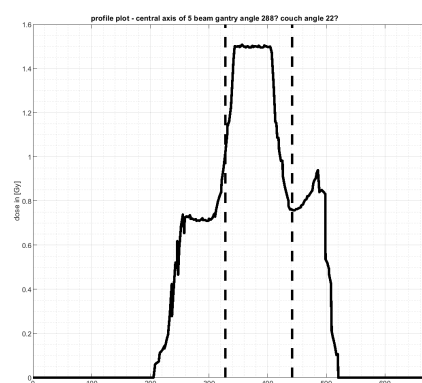


(b) Vista longitudinal - Feixe 4

Figura 11: Visões lateral e longitudinal do Feixe 4. Imagens geradas pelo matRad.



(a) Vista lateral - Feixe 5



(b) Vista longitudinal - Feixe 5

Figura 12: Visões lateral e longitudinal do Feixe 5. Imagens geradas pelo matRad.

5 Conclusão

Este artigo apresenta um tutorial do *software* matRad e também uma aplicação no planejamento da IMRT para o tratamento do câncer de fígado, com foco em otimizar a distribuição de dose, maximizando a dose no tumor e minimizando a exposição de órgãos adjacentes. Os principais aspectos técnicos do planejamento de tratamento no matRad são abordados e o processo inclui a definição da geometria dos feixes, onde a seleção dos ângulos de incidência e tipo de radiação são ajustados para obtenção da fluência de dose otimizada. Com base nos resultados obtidos verifica-se que o matRad oferece uma boa solução para o planejamento da radioterapia de intensidade modulada em casos de câncer de fígado, combinando precisão na entrega da dose com a flexibilidade necessária para ajustar os parâmetros conforme as necessidades clínicas. Além disso, é possível realizar planejamentos para tratamentos de outros tipos de cânceres. Assim, pode-se concluir que o matRad é uma ferramenta eficaz para personalização de planos de tratamento por radiação.

Agradecimentos

Agradecemos à bolsa de iniciação científica CNPQ (114490/2023-6), à bolsa de iniciação científica VUNESP pelo Programa Vestibular Unesp e Inclusão dos Alunos da Escola Pública na Universidade (21001031), ao Programa de Pós-graduação em Biometria, à CAPES (o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001), ao Projeto Universal CNPQ (405716/2021-4) e aos Processos FAPESP nº 2024/056595-1 e 2021/14373-0.

Referências

- [1] ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (PAHO). **Câncer**. Washington: OPAS/OMS, 2020. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/topicos/cancer>. Acesso em: 15 jul. 2024.
- [2] INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). **Cancer tomorrow**. Global Cancer Observatory. Lyon: IARC, 2024. Disponível em: [https://gco.iarc.who.int/tomorrow/en/dataviz/bubbles?populations=931\\$single_unit=50000](https://gco.iarc.who.int/tomorrow/en/dataviz/bubbles?populations=931$single_unit=50000). Acesso em: 29 jul. 2024.
- [3] AMERICAN CANCER SOCIETY. **Radiation therapy for cancer**. [Atlanta]: American Cancer Society, 2024. Disponível em: <https://www.cancer.org/cancer/cervical-cancer/treating/radiation.html>. Acesso em: 15 jul. 2024.
- [4] HALL, E. J.; GIACCIA, A. J. **Radiobiology for the radiologist**. 8th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer, 2019. Acesso em: 17 jul. 2024.
- [5] NILL, S. **Development and application of a multi-modality inverse treatment planning system**. 2001. 88 f. PhD Thesis (Doctor of Natural Sciences) - University of Heidelberg, Heidelberg, 2001. Disponível em: <https://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/1802/>. Acesso em: 24 jul. 2024.

- [6] LOW, D. A.; MORAN, J. M.; DEMPSAY, J. F.; DONG, L.; OLDHAM, M. Dosimetry tools and techniques for IMRT. **Medical Physics**, v. 38, n. 3, p. 1313-1338, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1118/1.3514120>. Acesso em: 31 jul. 2024.
- [7] SILVA, F. M.; CANTANE, D. R. Planejamento em radioterapia utilizando feixe de prótons para o tratamento de câncer de próstata. ENCONTRO REGIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 7., 2024, Bauru. **Caderno de trabalhos completos e resumos [...]**. Bauru: Unesp, 2024. p. 334-335. Disponível em: <https://www.fc.unesp.br/#!/departamentos/matematica/eventos2341/ermac-2024/caderno-de-trabalhos-e-resumos/>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [8] LEÃO, D. J. S.; CANTANE, D. R. Radioterapia de intensidade modulada para câncer de cabeça e pescoço com o uso de íons de carbono no matRad. ENCONTRO REGIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 7., 2024, Bauru. **Caderno de trabalhos completos e resumos [...]**. Bauru: Unesp, 2024. p. 334-335. Disponível em: <https://www.fc.unesp.br/#!/departamentos/matematica/eventos2341/ermac-2024/caderno-de-trabalhos-e-resumos/>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [9] FREITAS, J. C.; CANTANE, D. R.; ROCHA, H.; DIAS, J. A multiobjective beam angle optimization framework for intensity-modulated radiation therapy. **European Journal of Operational Research**, v. 318, n. 1, p. 286-296, 2024. ISSN 0377-2217. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221724003412>. Acesso em: 18 dez. 2024.
- [10] CARRASQUEIRA, P.; ALVES, M. J.; DIAS, J. M.; ROCHA, H.; VENTURA, T.; FERREIRA, B. C.; LOPES, M. C. An automated bi-level optimization approach for IMRT. **International Transactions in Operational Research**, v. 30, n. 1, p. 224-238, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/itor.13068>. Acesso em: 18 dez. 2024.
- [11] MATRAD - an open source multi-modality radiation treatment planning system. Heidelberg: DKFZ, [202-]. Disponível em: <https://e0404.github.io/matRad/>. Acesso em: 17 jul. 2024.
- [12] BENNAN, A. **Setting up matRad**. [San Francisco]: GitHub, 2024. Disponível em: <https://github.com/e0404/matRad/wiki/Setting-up-matRad>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- [13] CRAFT, DAVID; BANGERT, MARK; LONG, TROY; PAPP, DÁVID; UNKELBACH, JAN. Shared data for intensity modulated radiation therapy (IMRT) optimization research: the CORT dataset. **GigaScience**, Volume 3, Issue 1, December 2014, 2047–217X–3–37. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/2047-217X-3-37>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [14] PALKMA, M. **The matRad GUI**. [San Francisco]: GitHub, 2024. Disponível em: <https://github.com/e0404/matRad/wiki/The-matRad-GUI>. Acesso em: 28 ago. 2024.
- [15] FREITAS, J. C.; FLORENTINO, H. O.; BENEDITO, A. S.; CANTANE, D. R. Optimization model applied to radiotherapy planning problem with dose intensity and beam choice. **Applied Mathematics and Computation**, v. 387, Article Number 124786, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.124786>. Acesso em: 16 dez. 2024.

- [16] BREEDVELD, S.; STORCHI, P. R. M.; VOET, P. W. J.; HEIJMEN, B. J. M. iCycle: Integrated, multicriterial beam angle, and profile optimization for generation of coplanar and noncoplanar IMRT plans. **Medical Physics**, v. 39, p. 951-963, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1118/1.3676689>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [17] BREEDVELD, S.; STORCHI, P. R. M.; KEIJZER, M.; HEEMINK, A. W.; HEIJMEN, B. J. M. A novel approach to multi-criteria inverse planning for IMRT. **Physics in Medicine & Biology**, v. 52, n. 20, p. 6339, out. 2007. DOI: 10.1088/0031-9155/52/20/016. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/52/20/016>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [18] WIESER, H. P.; CISTERNAS, E.; WAHL, N.; ULRICH, S.; STADLER, A.; MESCHER, H.; MÜLLER, L. R.; KLINGE, T.; GABRYS, H.; BURIGO, L.; MAIRANI, A.; ECKER, S.; ACKERMANN, B.; ELLERBROCK, M.; PARODI, K.; JÄKEL, O.; BANGERT, M. Development of the open-source dose calculation and optimization toolkit matRad. **Medical Physics**, v. 44, n. 6, p. 2556-2568, 2017.. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/mp.12251>. Acesso em: 18 dez. 2024.
- [19] BANGERT, M. **Dose influence matrix calculation**. [San Francisco]: GitHub, 2024. Disponível em: <https://github.com/e0404/matRad/wiki/Dose-influence-matrix-calculation>. Acesso em: 23 jul. 2024.
- [20] WAHL, N. **Fluence optimization**. [San Francisco]: GitHub, 2024. Disponível em: <https://github.com/e0404/matRad/wiki/Fluence-optimizatyon>. Acesso em: 23 jul. 2024.
- [21] BREEDVELD, S.; STORCHI, P. R. M.; HEIJMEN, B. J. M. The equivalence of multi-criteria methods for radiotherapy plan optimization. **Physics in Medicine and Biology**, v. 54, n. 23, p. 7199-7209, 2009. DOI: 10.1088/0031-9155/54/23/011. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0031-9155/54/23/011>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [22] VIGERSKE, S. **Ipopt: Interior Point Optimizer**. [San Francisco]: GitHub, 2024. Disponível em: <https://github.com/coin-or/Ipopt>. Acesso em: 23 jul. 2024.
- [23] FREITAS, J. C. de; CANTANE, D. R. Uma abordagem da otimização de um plano de tratamento por radiação com o auxílio de imagem. **C.Q.D. - Revista Eletrônica Paulista de Matemática**, Bauru, v. 7, 2022. Disponível em: <https://sistemas.fc.unesp.br/ojs/index.php/revistacqd/article/view/87>. Acesso em: 29 ago. 2024.
- [24] DE POOTER, J. A.; WUNDERINK, W.; MÉNDEZ ROMERO, A.; STORCHI, P. R.; HEIJMEN, B. J. (2007). PTV dose prescription strategies for SBRT of metastatic liver tumours. **Radiotherapy and oncology: journal of the European Society for Therapeutic Radiology and Oncology**, 85(2), 260–266. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2007.08.004>. Acesso em: 30 ago. 2024.