



Validação do IMSure como *software* de verificação secundária de dose na rotina clínica do Instituto Nacional de Câncer (INCa)

Silva^a M.S., Santos^a M.R., Silveira^a T.B, Silva^a L.P., Fortes^a S.S.

^aInstituto Nacional de Câncer, 20230-130, Praça da Cruz Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
mardeysantsilv@hotmail.com

RESUMO

Com o crescente uso clínico de técnicas de radioterapia com modulação da intensidade do feixe (IMRT) tem-se exigido mais esforços no controle da qualidade paciente específico. A grande maioria dos centros de radioterapia do país atualmente garante a qualidade de um plano de tratamento comparando o que foi calculado pelo sistema de planejamento com o que se é medido ao irradiar o plano em um fantoma. Essa rotina de verificação pode tornar-se muito onerosa ao físico-médico em função da complexidade do plano, ou principalmente em função da quantidade de pacientes tratados. Este trabalho busca estabelecer, na rotina do Instituto Nacional de Câncer (INCa) no Rio de Janeiro, Brasil, parâmetros que permitam a validação de um *software* de verificação secundária de dose, IMSure (versão 3.7, Standard Imaging), em planejamentos de radioterapia por intensidade modulada (IMRT). Uma análise retrospectiva conduzida em planos de pacientes tratados nos últimos sete meses no instituto concluiu que, apenas 6% dos planos são reprovados em análise pelo índice gama executada pelo IMSure, segundo critérios de até 4% de diferença de dose e 4 mm de distância para concordância. Isto significa uma redução de cerca de 94% do tempo gasto na execução de controles de qualidade plano-específico. Tais resultados evidenciam, com algumas ressalvas, o potencial de uso do IMSure na rotina de grandes centros, visto sua praticidade, confiabilidade e rápida execução para os casos analisados.

Palavras-chave: radioterapia, IMRT, IMSure, MapCheck, Instituto Nacional de Câncer.

ABSTRACT

The fast increase of modern technologies in radiotherapy, for instance intensity-modulated radiation therapy (IMRT), has required extra efforts on pre-treatment verification quality assurance. Nowadays, most of the radiotherapy centers in Brazil assure the quality of a treatment plan by comparing the data obtained from the planning system with in-phantom measurements. Such verification method can become extremely time-consuming when a high number of patients are treated at the radiotherapy center. This work aims at establishing, at the clinical routine of the Instituto Nacional de Câncer (INCa) in Rio de Janeiro, Brazil, tolerance levels that can allow the validation of the IMSure software (version 3.7, Standard Imaging) as an independent monitor unit calculation for IMRT plans. A retrospective study conducted on patients' radiotherapy plans who started treatment in the last seven months, concluded that, when using thresholds up to 4% for dose difference and 4 mm for distance-to-agreement in a gamma analysis, only 6% of the radiotherapy plans fail. It suggests a reduction of approximately 94% of the time consumed in radiotherapy plan-specific pre-treatment verification. Such results highlight, in most cases, the potential of the IMSure implementation at the clinical routine of big centers by virtue of its practicality, reliability and fast performance.

Keywords: radiotherapy, IMRT, IMSure, MapCheck, Instituto Nacional de Câncer.

INTRODUÇÃO

O avanço em tecnologias de planejamento da entrega de dose em radioterapia faz com que técnicas de tratamento que modulam o feixe através de um sistema terciário de colimação em lâminas (MLC, do inglês *multileaf colimator*) se tornem cada vez mais comuns. O uso da radioterapia de intensidade modulada, técnica denominada IMRT (do inglês, *intensity modulated radiation therapy*) oferece uma entrega da dose prescrita mais conformada ao alvo, permitindo uma menor irradiação de tecidos sadios adjacentes ao sítio tratado. Em contrapartida, por exigir maior precisão de movimentação e localização do MLC, os procedimentos de controle de qualidade do tratamento passam a ser altamente necessários, exigindo mais tempo para a verificação dos planos de tratamento de técnicas moduladas [1,2].

Atualmente, a norma 6.10 da CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), estabelece que exista um segundo sistema de cálculo de dose para verificação do planejamento de tratamento [3,4]. Na prática, para planejamentos radioterápicos menos complexos, cuja modalidade de planejamento é 2D ou 3D, executa-se um cálculo manual simples para conferência da dose a ser entregue. Já para planejamentos com técnica IMRT, a qualidade do plano pode ser garantida, dentre outras formas, irradiando-se uma matriz planar de detectores, capaz de verificar em termos de dose absoluta, a distribuição planar da dose entregue segundo metodologia de avaliação já bem estabelecida na literatura [5,6].

Os controles de qualidade atuais de técnica modulada são em sua grande maioria plano-específicos, ou seja, os respectivos planos de cada paciente são testados individualmente, onde a dose medida é comparada com a dose planejada. Em um centro com um grande número de pacientes, como o Instituto Nacional de Câncer (INCa) no Rio de Janeiro, controles de qualidade de técnicas moduladas chegam a exigir uma carga de trabalho superior a nove horas semanais, segundo estatística interna. Com uma média de cem pacientes tratados com técnica modulada por mês, e vinte e cinco minutos em média dedicados à preparação, irradiação e análise dos mesmos, cerca de quarenta e duas horas são gastas por mês apenas em controles de qualidade plano-específicos. A irradiação de planos de controle de qualidade ainda contribui para um maior tempo de uso de

máquina, levando a um maior desgaste das mesmas em longo prazo, além de exigir um físico em horários fora do expediente de tratamento, evitando comprometer o fluxo normal dos pacientes.

Com o crescente número de tratamentos modulados, se faz necessário um segundo sistema de verificação de dose que seja mais prático em termos de execução e que garanta a mesma confiabilidade. Em paralelo, nos últimos anos, diversos desenvolvedores de *software* especializados em soluções oncológicas têm dedicado esforços ao desenvolvimento de programas independentes capazes de verificar a dose de planos de tratamento em radioterapia [3]. Tais programas são alimentados com os dados dosimétricos de comissionamento das máquinas de tratamento do usuário, o que os tornam capazes de prever a dose por campo de tratamento através da fluência produzida para cada campo na fase de planejamento. Temos, portanto, nesse caso, um comparativo do que foi planejado no sistema de planejamento com o que foi calculado pelo *software* independente. Neste caso há redução de demanda profissional e tempo de máquina, e uma otimização do fluxo de tarefas.

Considerando-se a importância de sistemas de verificação secundária de dose que sejam práticos em execução e que garantam a mesma confiabilidade da avaliação da dose planar por índice gama, mediante a crescente utilização de técnica modulada em planejamentos radioterápicos e o grande número de pacientes no Instituto Nacional de Câncer, o objetivo principal deste trabalho consiste na validação de *software* de verificação secundária (IMSure QATM, Standard Imaging) para planejamentos radioterápicos executados a partir de técnica IMRT em sistema de planejamento Eclipse e tratados no acelerador linear Clinac-600 Series C, ambos da Varian Medical Systems. O processo de validação busca avaliar a confiabilidade na verificação secundária com o *software* IMSure para estabelecer um nível de ação, onde os controles de qualidade plano-específico possam ser irradiados somente quando os índices de análise no IMSure não forem respeitados.

1. MATERIAIS E MÉTODOS

O primeiro passo para o uso do IMSure consiste em alimentar o *software* com os dados dosimétricos do feixe provenientes do comissionamento, dentre esses, os valores de razão tecido máximo (TMR, do inglês *tissue maximum ratio*), percentual de dose na profundidade (PDD, do inglês *percentage depth dose*), fator de correção para desvio do eixo central, fatores filtro, fator

espalhamento, dados nominais como energia do feixe, profundidade de dose máxima e profundidade de calibração do feixe, e os valores de transmissão do MLC e do *dosimetric leaf gap*.

Em seguida, os dados foram validados com planejamentos conformacionais de geometria simples (campos diretos e quatro campos com e sem cunhas) em fantoma uniforme e fantoma antropomórfico simulador de corpo humano. Posteriormente foram validados planejamentos mais complexos em geometria, acessórios e número de campos. Somente então foram validados com planejamentos modulados.

Foi então realizada uma análise retrospectiva dos controles de qualidade de técnica modulada realizados nos últimos sete meses no acelerador linear Clinac 600C (Varian) do Instituto Nacional de Câncer. Como critério de seleção, todos os planos produzidos com a técnica IMRT no serviço que foram aprovados pelos médicos 15 e iniciaram tratamento nesse período, estavam aptos à análise pelo IMSure. Esses planos foram então divididos por sítios de tratamento em função da complexidade de entrega de dose do plano. Os planos ficaram então divididos em: próstata (Pro), sistema nervoso central (SNC), torác e abdome (TeA), pelves (Pel), e cabeça e pescoço (CeP).

Todos os planos selecionados passaram inicialmente pelo controle de qualidade plano específico atualmente realizado na instituição. O protocolo atual do instituto exige que os planos calculados sejam irradiados em um setup específico e então comparados com o que foi medido por uma matriz 2D detectora (Mapcheck v.1, Sun Nuclear Corporation) através do *software* SNC Patient, v. 6.2.3 também da Sun Nuclear Corporation. Como critério de avaliação da qualidade do plano, é realizada uma avaliação com o índice gama campo a campo, analisando o intervalo de doses compreendido entre a dose máxima e o valor que corresponde a 20% da mesma (ou seja, *threshold* de 20%), distância para concordância (DTA) de 3 mm e diferença de dose (DD) de 3%, valores tipicamente utilizados em técnicas moduladas de planejamentos radioterápicos [5-9]. Ainda segundo metodologia do instituto, os campos irradiados devem possuir aprovação igual ou superior a 90% quando confrontados com o planejado. Caso algum campo possua aprovação inferior a 90%, o plano ainda é considerado aprovado se a média de aprovação de todos os campos do plano for igual ou superior a 95%.

Uma vez selecionados e categorizados os planos, foi adicionado aos mesmos, um ponto secundário de cálculo de dose, a fim de comparar a dose planejada pelo TPS com a calculada no ponto pelo IMSure. Os planos, a tomografia, o conjunto de estruturas e a fluência de dose são

exportados em formato DICOM. Os dados são então importados no IMSure e calculados em termos de dose absoluta, com mapa de dose obtido a partir da fluência do MLC. Por fim, os campos foram normalizados pela dose máxima, realizando em seguida uma análise gama, seguindo os mesmos limites de avaliação já executados em protocolo clínico do nosso instituto (DTA 3 mm e DD 3%). O IMSure, entretanto, não elimina os pontos calculados que mais se destoam da distribuição, ou seja, este analisa todos pontos calculados, não aplicando o uso do *threshold*. O percentual de diferença de dose no ponto bem como o percentual de aprovação gama campo a campo foram registrados e analisados em *software* analítico da Microsoft Excel, v. 2016. Os campos que falharam na primeira análise executada foram reavaliados com novos parâmetros de avaliação. Estes parâmetros consistem em: primeiro, passar os parâmetros de análise gama para 4 mm/3%; segundo, passar os parâmetros de análise gama para 4 mm/4%; e, terceiro, se a falha fosse na dose pontual, a posição deste ponto foi trocada.

O ponto de cálculo deve ser posicionado levando-se em conta as particularidades do plano, sempre priorizando sua localização em uma região de baixo gradiente. Como abordagem de escolha da posição do ponto de cálculo, para os casos de próstata e sistema nervoso central, optou-se pelo isocentro, visto que nestes planos, o isocentro está habitualmente no centro do volume de tratamento, região sem grande influência de quaisquer colimações. Para as demais categorias, o ponto foi alocado individualmente. Observou-se sempre a localização deste ponto de referência de forma que sua dose absoluta não divergisse além de 2% da dose de prescrição. Em adição, verificando-se campo a campo, garantiu-se que o ponto não estivesse em uma região próxima à colimação primária (ou nas bordas do volume de tratamento), nem que ficasse bloqueado por muito tempo pelo colimador terciário (MLC). Ainda, para volumes de tratamento muito extensos, os quais geram campos segmentados em subcampos devido a limitações mecânicas do MLC, garantiu-se que o ponto não se situasse próximo à região de segmentação.

Os pontos que divergissem em mais de 4% do planejado em termos de dose absoluta, eram reposicionados para uma região com menos fatores de influência. O limite de 4% de divergência entre a dose do TPS e do IMSure foi estabelecido em razão do documento *Task Group 71* (TG 71) [10], da Associação Americana de Físicos em Medicina (AAPM, do inglês *American Association of Physicists in Medicine*) que sugere um limite de 3% para planejamentos não-modulados (2D e 3D), podendo haver exceções salvo o entendimento do físico da complexidade do plano.

Todos os planos analisados são planos aprovados no protocolo atualmente realizado no Instituto. Este trabalho, portanto, não comparou a capacidade do IMSure em detectar falhas com a capacidade do atual método de controle de qualidade em fazer o mesmo. Tal investigação já foi conduzida por outros autores, que concluíram que não existe uma correlação direta entre uma falha encontrada pelo IMSure com uma falha encontrada pelo MapCheck, independentemente de sítio de tratamento, campo de tratamento ou mesmo índice gama de aprovação [9].

O IMSure da *Standard Imaging* é um *software* destinado à verificação secundária de planejamentos radioterápicos. Uma vez implementado, o *software* pode reduzir tempo e esforço gastos no controle de qualidade plano específico de pacientes visto o intuito da instituição é dispensar as irradiações com o seu uso. O *software* basicamente conduz o controle de qualidade em duas etapas. Na primeira etapa, a dose entregue por cada campo de tratamento ou pela combinação de todos eles em um ou múltiplos pontos pode ser comparada ao calculado pelo *software*. Os parâmetros do plano importado são usados para cálculo pelo algoritmo *3-Source Model* descrito por Yang et al [11]. Uma segunda etapa de verificação consiste em comparar o mapa de fluência predito pelo sistema de planejamento (TPS, do inglês *treatment planning system*) com o que foi calculado independentemente pelo IMSure. Nesta etapa algumas formas de comparação são oferecidas pelo *software*, dentre as quais os mapas de diferença de dose, coeficiente de correlação (um método patenteado que mede o grau de concordância entre as fluências analisadas) e a análise gama, método bem estabelecido na literatura e aqui utilizado.

O índice gama é um método de avaliação de mapas de dose descrito por Low et al em 1998 [5]. O poder de análise desse índice consiste no fato deste incluir tanto a diferença absoluta de dose entre os dois mapas quanto a distância para concordância entre estes sendo, portanto, uma comparação ponderada de ambos DTA e DD em relação a limites pré-estabelecidos.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados dosimétricos de comissionamento que foram inseridos no Eclipse para a validação do algoritmo de cálculo de dose AAA foram adaptados para uso no IMSure. O *software* permite um ajuste quadrático dos fatores *off axis* e fatores de espalhamento, os quais podem ser modificados de

acordo com os resultados da validação. Estes foram ajustados para que, no processo de validação em planejamentos conformacionais, as diferenças obtidas em doses pontuais não ultrapassassem 1% no fantoma uniforme e 2% no fantoma antropomórfico. Foi observado que o IMSure tem uma incerteza maior em pontos na penumbra do MLC ou fora do campo de tratamento, chegando a desvios de 8%. Porém, para pontos fora dessas condições em regiões de baixo gradiente, os desvios não ultrapassaram 3%.

Após a etapa de validação de tratamentos conformacionais, foi executada a validação de planos de tratamento de técnica modulada em função do sítio. Para o sítio próstata foram analisados um total de setenta e sete planos, correspondendo a quatrocentos e setenta e oito campos de tratamento. Para o sítio de Tórax e Abdome (TeA) e Cabeça e Pescoço (CeP) foram analisados vinte e dois planos de cada, o que corresponde a cento e onze campos de tratamento para TeA e cento e vinte e cinco campos para CeP. Para o sítio Pelve (Pel) foram analisados vinte planos somando cento e doze campos de tratamento. E finalmente, para sistema nervoso central (SNC) foram analisados apenas doze planos que totalizaram cinquenta e cinco campos de tratamento.

Todos os planos foram analisados separadamente respeitando as especificidades de cada sítio. Para a comparação de dose no ponto, um ponto secundário foi criado e posicionado manualmente no volume de tratamento. A dose no ponto planejada pelo TPS foi então confrontada com a dose calculada pelo IMSure.

Dos setenta e sete casos de próstata, apenas um falhou segundo o critério de 4% de diferença na dose estabelecido. O caso foi investigado, adicionando-se uma série de pontos nas mais diversas posições, que pudessem justificar a diferença verificada. Porém, dos sítios de tratamento considerados, o sítio de próstata é o que geralmente gera os planos menos complexos, com fluências simples e poucas limitações quanto à locação do ponto. Todas as análises consecutivas para este plano falharam, com diferença de dose em torno de 14%, valor este bastante significativo [Figura 1]. Porém quando o mesmo plano de tratamento foi calculado e exportado no fantoma de controle de qualidade usado para verificação por irradiação (protocolo atual do instituto), o qual consiste da tomografia de uma matriz de diodos 2D com 5 cm de água sólida em seu topo, a dose em um ponto secundário de verificação planejada divergiu em apenas 0,6% da dose calculada pelo IMSure. Tal fato sinaliza a possibilidade de uma falha de cálculo de dose pelo IMSure em natureza da

tomografia do paciente, ou mesmo de um falso positivo na análise por irradiação, visto que na mesma não houve detecção de falha.

Dos outros sítios, alguns pontos falharam em primeira análise, porém passaram em análises consecutivas, após realocação dos pontos, o que contribuiu para a observação dos fatores limitantes de posicionamento do ponto mencionados anteriormente [Figuras 2-5].

Figura 1: *Diferença percentual de dose absoluta no ponto de cálculo de dose para planejamentos do sítio de Próstata (Pro).*

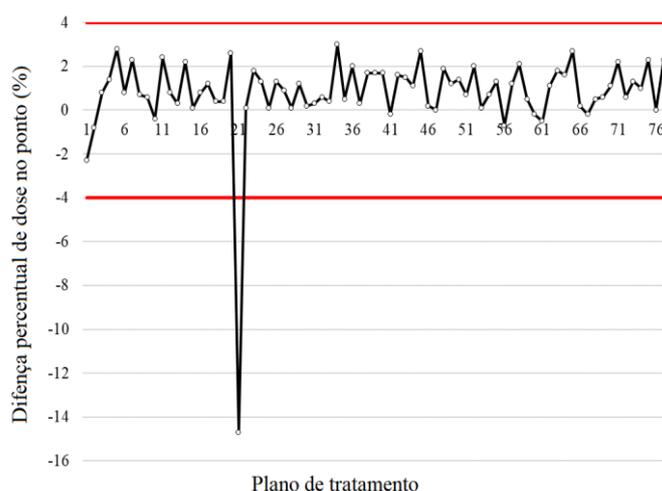
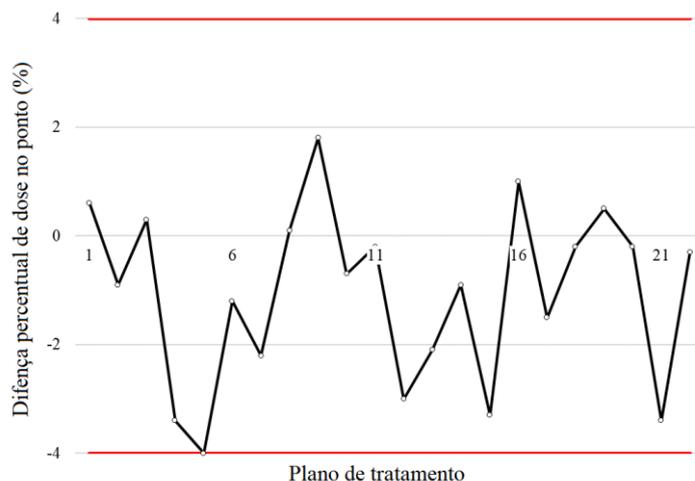


Figura 2: *Diferença percentual de dose absoluta no ponto de cálculo de dose para planejamentos do sítio de Tórax e Abdome (TeA).*



Como pode ser visto na Figura 2, o sítio de Tórax e Abdome (TeA) apresentou uma tendência a diferenças de dose negativas, isto é, a dose calculada pelo IMSure é maior que a dose planejada. Especula-se que tal tendência pode ser justificada devido ao uso de correção de heterogeneidade em tal sítio, porém, o número de casos não permitiu que uma investigação mais detalhada fosse conduzida por parte dos autores a fim de explicar tal fenômeno.

Figura 3: *Diferença percentual de dose absoluta no ponto de cálculo de dose para planejamentos do sítio sistema nervoso central (SNC).*

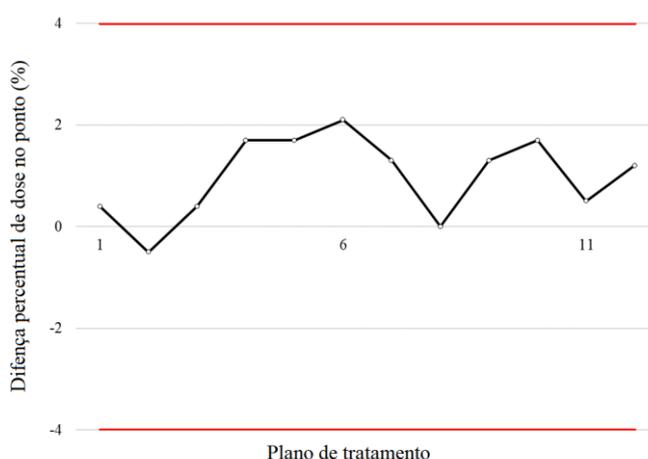


Figura 4: *Diferença percentual de dose absoluta no ponto de cálculo de dose para planejamentos do sítio pelves (Pel).*

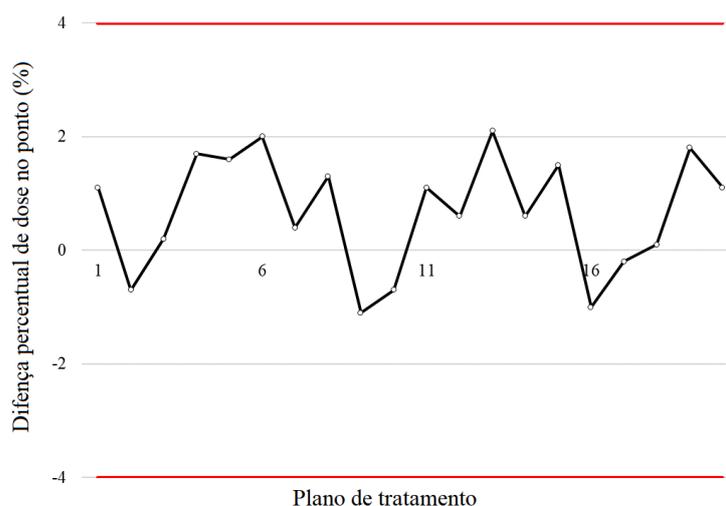
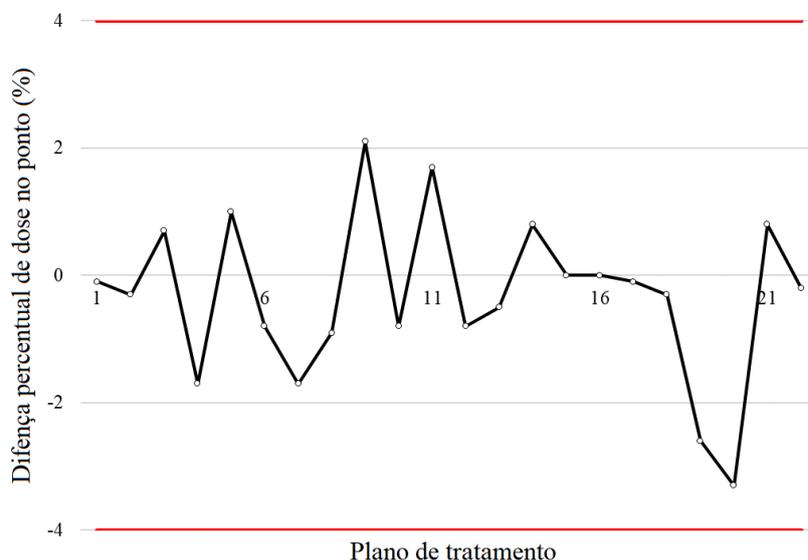


Figura 5: Diferença percentual de dose absoluta no ponto de cálculo de dose para planejamentos do sítio cabeça e pescoço (CeP).



A segunda parte de análise consistiu em realizar a avaliação do índice gama de todos os campos de tratamento. Cada mapa de dose predito pelo TPS foi confrontado com seu respectivo mapa de dose calculado pelo IMSure em função do sítio no qual foi alocado. Como já mencionado, a análise gama realiza um comparativo baseado em limites pré-estabelecidos, a princípio 3% DD e 3 mm DTA.

A Figura 6 apresenta a quantidade de campos que foram reprovados (R) ou aprovados (A) em função do sítio seguindo os limites de 3% DD e 3 mm DTA, ou em segunda análise caso houvesse falha na primeira, com limites mais permissíveis de 4% DD e 4 mm DTA.

Quando observada a análise 4% DD e 4 mm DTA, a razão de campos reprovados em função do número total de campos nunca supera 4% em nenhum sítio de tratamento.

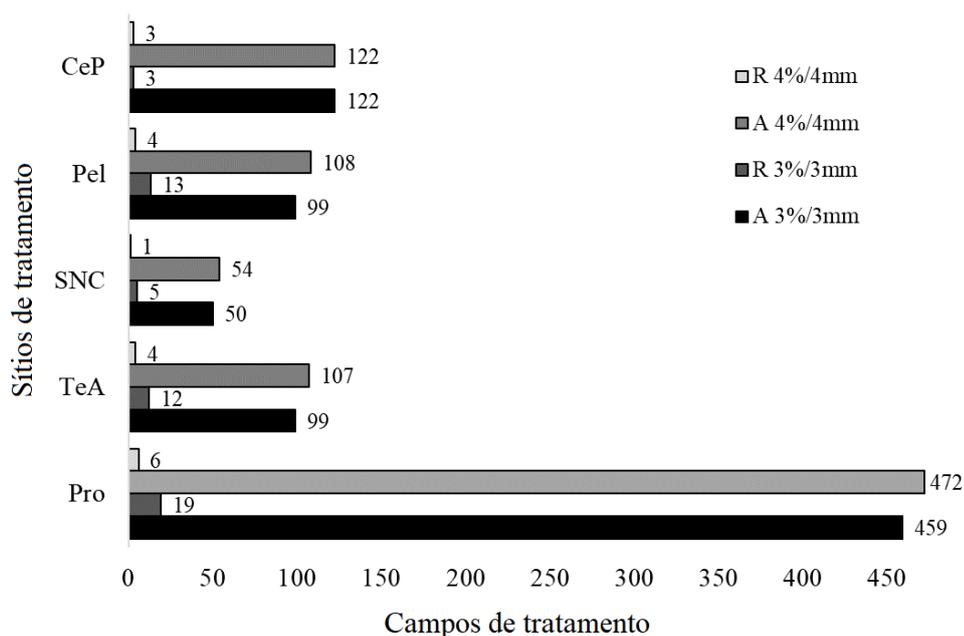
Embora todos os resultados tenham sido agrupados em função do sítio de tratamento, não houve para a análise gama realizada pelo IMSure comprovação estatística de que planos de maior complexidade apresentassem mais falhas. Tal fato não é verdade para a análise de dose no ponto, visto que casos de alta complexidade requerem análise cuidadosa para escolha do ponto de verificação secundária.

Como critério de aprovação de um plano de tratamento em um controle de qualidade, de acordo com o protocolo atualmente utilizado no instituto, exige-se que a quantidade de pontos aprovados

segundo os limites de DD e DTA seja maior ou igual a 90% dos pontos analisados em cada campo analisado separadamente. Se algum campo possuir aprovação inferior a 90%, e a média de todos os campos for maior que 95% de aprovação, o plano ainda pode ser dado como aprovado, vista a boa concordância da maioria dos campos de tratamento. Seguindo esta metodologia, e aceitando limites de DD em até 4% e DTA em até 4 mm, dos cento e cinquenta e três planos analisados, apenas dez não seriam aprovados, o que corresponde a 6% do total.

Sendo assim, a metodologia proposta para análise secundária no IMSure é avaliar o plano pelo *software* da mesma maneira que é avaliado pelos parâmetros do Instituto já citados. Se o plano reprovar nestes parâmetros, ele é candidato a irradiação do plano específico do paciente para análise por índice gama.

Figura 6: Histograma dos campos aprovados (A) e reprovados (R) segundo diferentes limites de análise para DD e DTA em função do sítio de tratamento.



Estes casos que seriam reprovados pelo *software* IMSure, necessitariam de uma maior investigação dos pontos de falha. A determinação da aceitabilidade de um plano clínico para tratamento é uma decisão importante a ser tomada pelo físico médico na avaliação de técnicas moduladas. Regiões pequenas de falha, que correspondem a um ou dois pixels de dimensão de 0,25

cm, representam pouca ou até mesmo nenhuma relevância clínica, visto o cenário global de tratamento. Regiões maiores, porém, de cinco ou mais pixels conectados, podem resultar em discrepâncias clinicamente significantes.

A variabilidade da dose no ponto observada neste trabalho também já foi discutida em trabalhos de outros autores [3]. Tuazon et al. discute em seu trabalho a grande variância dos dados fornecidos pelo IMSure quando comparado com outros *softwares* de mesmo propósito, levantando a questão da consistência dos resultados fornecidos pelo mesmo.

3. CONCLUSÕES

A metodologia de verificação secundária dos planejamentos empregando o *software* IMSure aqui descrita representa um método complementar para análise de planejamentos com técnicas moduladas. As tolerâncias e níveis de ação empregados nas análises dos resultados foram adequados ao aparato instrumental e histórico de controle de qualidade do serviço de radioterapia do INCA. Estes valores, porém, não devem ser replicados de forma corriqueira para todos os cenários de planejamento e controle de qualidade, cabendo ao físico da instituição estabelecer os limites mais adequados para cada planejamento analisado, bem como quaisquer testes adicionais que possam garantir a entrega segura do tratamento.

A validação do IMSure para implementação na rotina clínica do aparelho Clinac 600 do INCA mostrou que apenas 6% do total de planos de tratamento analisados apresentaram variação do TPS superior a limites pré-estabelecidos. Entretanto, pode-se inferir que a implementação do *software* IMSure na rotina do serviço potencialmente reduziria em 94% o tempo gasto na execução de controles de qualidade plano-específico para os casos dessa máquina de tratamento, incluso tempo de irradiação e análise dos resultados, confinando a metodologia de verificação pré-tratamento por irradiação somente para casos em que o IMSure divergisse do TPS. Os percentuais de redução de tempo para outras unidades de tratamento da instituição bem como outros tipos de tratamento ainda precisam ser estudados.

Deve-se destacar ainda que os métodos utilizados atualmente para controle de qualidade pré-tratamento são pouco específicos, geralmente com pouca resolução espacial e sensibilidade,

demonstrando fraca correlação com informação clínica para inferência do impacto dos erros, mas ao mesmo tempo, consumindo muito esforço e tempo para sua execução.

O trabalho aqui conduzido evidencia, portanto, o potencial do IMSure na rotina clínica de grandes centros de radioterapia. O mesmo não substitui o conhecimento e experiência do físico na avaliação clínica dos planos de tratamento, porém serve como ferramenta de tomada de decisão no fluxo de tarefas de controle de qualidade na radioterapia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao representante Fernando Cossu da Invita Medical, empresa que representa a *Standard Imaging* no Brasil, pelo fornecimento de licença do *software* IMSure para teste e à Shannon Holmes, física médica da *Standard Imaging*, pela assistência remota nos permitindo explorar melhor o *software* nesse período de testes no INCA.

REFERÊNCIAS

- [1] TAYLOR, A. Et al. **Intensity-modulated radiotherapy—what is it?**. Cancer Imaging, v. 4, n. 2, p. 68, 2004.
- [2] INTENSITY MODULATED RADIATION THERAPY COLLABORATIVE WORKING GROUP et al. **Intensity-modulated radiotherapy: current status and issues of interest**. International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics, v. 51, n. 4, p. 880-914, 2001.
- [3] TUAZON, B. et al. **Evaluation and comparison of second-check monitor unit calculation software with Pinnacle3 treatment planning system**. Physica Medica, v. 45, p. 186-191, 2018.
- [4] CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Norma CNEN NN 6.10 - Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Serviços de Radioterapia**. Resolução CNEN 214/17. DOU 30.06.2017, Rio de Janeiro, 2017. 18p.

- [5] LOW, D. A. et al. **A technique for the quantitative evaluation of dose distributions.** Medical Physics, v. 25, n. 5, p. 656-661, 1998.
- [6] LOW, D. A. et al. **Dosimetry tools and techniques for IMRT.** Medical Physics, v. 38, n. 3, p. 1313-1338, 2011.
- [7] EZZELL, G. A. et al. **IMRT commissioning: multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119.** Medical Physics, v. 36, n. 11, p. 5359-5373, 2009.
- [8] MIFTEN, M. et al. **Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: Recommendations of AAPM Task Group No. 218.** Medical Physics, v. 45, n. 4, p. e53-e83, 2018.
- [9] BASRAN, P. S. et al. **An analysis of tolerance levels in IMRT quality assurance procedures.** Medical Physics, v. 35, n. 6, Part 1, p. 2300-2307, 2008.
- [10] GIBBONS, J. P. et al. **Monitor unit calculations for external photon and electron beams: Report of the AAPM Therapy Physics Committee Task Group No. 71.** Medical physics, v. 41, n. 3, 2014.
- [11] YANG, Y. et al. **A three source model for the calculation of head scatter factors.** Medical physics, v. 29, n. 9, p. 2024-2033, 2002.