

# Análise gama e medida de dose pontual, baseado na metodologia de controle estatístico de processo

## Analysis gamma and punctual dose measure, based on the statistical control process

Gustavo M. Moretto<sup>1</sup>, Victor A. B. Ribeiro<sup>1</sup>, Gabriela R. dos Santos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto do Câncer do Estado de São Paulo, Hospital das Clínicas da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

### Resumo

Controles da qualidade paciente-específico têm sido utilizados constantemente, como forma de garantir que os planejamentos de radioterapia que utilizam técnicas de intensidade modulada sejam reproduzidas de forma adequada pelos aceleradores lineares. A principal dificuldade neste processo é elaborar limites de tolerância e de ação institucionais, que permitam uma análise mais acurada e traduzam a confiabilidade e executabilidade desses tratamentos. Este trabalho buscou estabelecer os limites de tolerância e ação para casos de VMAT, utilizando a metodologia de controle estatístico de processo, dividindo os casos de acordo com cada acelerador linear e com cada sítio anatômico. Foram analisados para cada caso o índice gama e a medida de dose pontual, assim como o intervalo de confiança de 95%, após a atualização do sistema de planejamento da instituição. Os intervalos de confiança encontrados mostraram-se dentro da faixa esperada, quando comparados com outras instituições. Com relação à aplicação do controle estatístico de processo, foi possível elaborar *i-charts* para cada sítio anatômico e traçar perfis de aprovação para o índice gama e as medidas de dose pontual para cada caso. A implementação deste protocolo mostrou-se válida, tornando a análise do controle da qualidade paciente-específico mais importante e menos subjetiva dentro da instituição.

**Palavras-chave:** Índice gama, VMAT, controle da qualidade paciente-específico.

### Abstract

*Patient-specific quality assurance have been used as a way to ensure that radiotherapy planning utilizing intensity-modulated techniques are adequately reproduced by linear accelerators. The main difficulty in this process is to develop limits of institutional tolerance and action, which allow a more accurate analysis and translate the reliability and executability of these cases. This work sought the limits of tolerance and action for VMAT cases, using the methodology of statistical control process, dividing the cases according to each linear accelerator and with each anatomical site. The gamma index and the point dose measure were analyzed for each case, as well as the 95% confidence interval, after updating the institution's treatment system planning. The confidence intervals found were within the expected range when compared to other institutions. With respect to the application of the statistical control process, it was possible to generate *i-charts* for each anatomical site and to draw profiles of approval for the gamma index and the measures of point dose for each case. The implementation of this protocol proved to be valid, making the analysis of patient-specific quality control more important and less subjective within the institution.*

**Keywords:** *gamma index; VMAT; patient-specific quality assurance.*

### 1. Introdução

Os tratamentos de radioterapia têm evoluído amplamente e, além dos tratamentos tridimensionais, as novas técnicas que são capazes de modular a intensidade do feixe, têm aumentado consideravelmente não só a chance de cura de diferentes tumores, como permitem tornar muito menor a dose que chega aos órgãos em risco<sup>1,2</sup>.

Contudo, a evolução das técnicas de feixes externos de radioterapia requer também uma nova abordagem na dosimetria relacionada a estas técnicas. Para os tratamentos de VMAT (arcoterapia volumétrica modulada) é necessário verificar se o tratamento planejado computacionalmente conseguirá ser executado pelo acelerador linear de forma adequada; pois, diferentemente de um tratamento conformacional, não é viável calcular manualmente se as unidades monitoras entregues estão corretas. Esta verificação ocorre quase que totalmente pelo Controle da Qualidade

Paciente-Específico (QA paciente-específico), que compara a distribuição de dose calculada no TPS (do inglês, *Treatment Planning System*) e a fluência de dose entregue pelo Acelerador Linear designado para tal tratamento<sup>3</sup>.

Neste aspecto, surge a necessidade de uma análise mais acurada destes casos, utilizando ferramentas que vão além do simples olhar clínico<sup>4</sup>.

A maioria das instituições utiliza como critério primordial para aprovar um QA paciente-específico, o Índice Gama, proposto por Low et al<sup>5</sup>. Este formalismo matemático correlaciona a variação da dose em um determinado ponto, na distribuição de dose medida, com o valor esperado no mesmo ponto na distribuição de dose calculada e, também, a variação da distância entre a posição do ponto na distribuição de dose medida com a posição esperada deste ponto na distribuição de dose calculada, através do critério DTA (do inglês, *Distance To Agreement*)<sup>6</sup>.

Em 2009, o *Task Group 119 (TG-119)*, da AAPM (sigla em inglês da *American Association of Physicists in Medicine*)<sup>7</sup>, propôs um conjunto de testes para diferentes instituições, de forma a estabelecer um Limite de Confiança de 95% ( $CL(95\%) = \bar{X} - 1,96\sigma$ ) onde espera-se que 95% dos pontos medidos caiam dentro de tal limite, e efetuar uma comparação entre os planejamentos desenvolvidos em cada instituição. Além disso, estes testes auxiliam a verificação da acurácia do comissionamento dos TPS que planejam tais técnicas.

Mesmo mostrando-se com boa aceitação, diversos estudos mostraram grandes diferenças entre as formas de avaliação de QA paciente-específico e limites de confiança entre as instituições. Muito disso se deve às diferenças entre os dosímetros próprios para este tipo de Controle da Qualidade, os quais variam sua forma de obtenção dos dados, podendo ser compostos de arranjos de diodos, arranjos de câmaras de ionização ou filmes radiocrômicos, entre outros. Além disso, é comum as instituições realizarem uma medida pontual de dose, com uma câmara de ionização calibrada colocada em um objeto simulador homogêneo e em uma região onde a variação de dose dentro do volume da câmara de ionização seja menor que 5%, entre a dose máxima e mínima.

Tendo em vista estes fatores, o *Task Group 218*<sup>8</sup>, lançado 10 anos após o TG-119, trouxe conceitos mais elaborados sobre os limites de tolerância e metodologias utilizadas para QA paciente-específico. Com uma extensa revisão bibliográfica, tal documento ressalta os pontos que devem ser aprimorados neste tipo de análise, assim como quais questões devem ser respondidas ao se adquirir um sistema de dosimetria e quais questões devem ser respondidas após o resultado de QA paciente-específico de determinado planejamento.

Um ponto bastante discutido, é a necessidade de se observar diferenças no QA paciente-específico dependendo dos sítios anatômicos, citando diversos exemplos aonde casos de cabeça e pescoço (CP) encontram um índice de reprovação muito maior que os de próstata, como mostrado por Both et al. Utilizando o critério 3%/3mm, com limiar de dose de 10%, os estudos de próstata apresentaram índice de aprovação de 99,3%±1,41% e os de CP, índice de 96,22%±2,89%, com diferença significativa na medida de dose pontual média esperada, com câmara de ionização (Próstata: 0,419±0,42%; CP: 1,41±1,1%)<sup>9</sup>.

Estes resultados mostram a necessidade de rever e atualizar os limites de confiança na executabilidade dos QA paciente-específico, assim como aprimorar as técnicas de medida e conhecer a fundo o significado de cada ponto de avaliação. Porém, analisar estes valores sem ao menos tentar estabelecer limites de tolerância e ação, seria

inviável, pois ainda estariam presentes nestes QAs conceitos baseados em fatores antigos, que não acrescentariam muito aos novos protocolos de QA paciente-específico.

Desta forma, o TG-218 propõe a implementação de um controle estatístico de processo (SPC, do inglês *statistical process control*), que estabelece através de formalismos específicos, tais limites<sup>10</sup>.

Sanghangthum et al. aplicaram o SPC para verificação do controle da qualidade paciente-específico em casos de VMAT<sup>11</sup>, porém limitado somente a casos de carcinoma de nasofaringe.

Para estabelecer os valores dos limites de ação e tolerância, o SPC utiliza as seguintes equações:

$$\Delta A = \beta \sqrt{[\sigma^2 + (\bar{X} - T)^2]} \quad (1)$$

Onde  $\Delta A$  é a diferença entre os limites superiores (LAS) e inferiores (LAI) de ação.  $T$  é o alvo do processo – por exemplo: em uma análise gama o objetivo é que 100% dos pontos sejam aprovados, dessa forma  $T$  seria igual a 100.  $\sigma$  e  $\bar{X}$  são, respectivamente, o desvio-padrão e a média do processo. Já  $\beta$  é uma combinação de dois fatores: métrica de capacidade do processo e outro fator que balanceia erros do tipo I e erros do tipo II no processo, sendo que o TG-218 recomenda um valor de  $\beta$  igual a 6, o qual pode variar até 10. Para os limites de controle, que nada mais são que os limites de tolerância, são estabelecidas linhas superiores (LCS), inferiores (LCI) e a linha central, que corresponderão, portanto, a tais limites. Estes valores serão calculados seguindo as seguintes equações:

$$\text{Limite Central (LC)} = \frac{1}{n} \sum_1^n X \quad (2)$$

$$\text{Limite de Controle Inferior (LI)} = LC - 2,660 \cdot \overline{mR} \quad (3)$$

$$\text{Limite de Controle Superior (LS)} = LC + 2,660 \cdot \overline{mR} \quad (4)$$

Em que  $X$  representa cada medida individual de controle da qualidade paciente-específico,  $n$  é o número total de medidas e  $\overline{mR}$  (do inglês, *moving range*) é obtido da equação:

$$\overline{mR} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |x_i - x_{i-1}| \quad (5),$$

onde  $x_i$  são as medidas efetuadas, tanto para a dose quanto para a aprovação gama, em ordem cronológica. Com estes valores, é possível elaborar *i-charts* que demonstram os limites de controle que o processo possui.

Partindo desta recomendação, este trabalho tem por objetivo avaliar os limites de ação e tolerância para procedimentos de controle da qualidade paciente-específico através da análise gama com filmes radiocrômicos e dose pontual medida através de câmara de ionização, para casos clínicos de tumores de cabeça e pescoço e próstata e diferentes aceleradores lineares, além de reavaliar alterações sofridas nos limites de confiança de 95% baseados nos casos propostos pelo TG-119, após atualização do sistema de planejamento utilizado na instituição (Monaco® - Elekta).

## 2. Materiais e Métodos

Para este trabalho, foram planejados os casos propostos pelo TG-119 após a atualização da versão do sistema de planejamento Monaco® (Elekta - v. 5.1.1). Estes casos foram planejados em dois aceleradores lineares (AL) distintos, sendo um deles equipado com lâminas de 1,0 cm de espessura (AL Synergy Full® – Elekta) e outro com lâminas de 0,4 cm (AL Axesse® – Elekta), ambos com energia de 6 MV e técnica de VMAT. Para obtenção da dose pontual e da distribuição de dose planar, a fluência obtida do planejamento foi calculada em um objeto simulador homogêneo, seguindo também as recomendações do TG-119.

Para obtenção dos dados correspondentes à dose pontual foi usada uma câmara de ionização com volume 0,130 cm<sup>3</sup>, colocada nos pontos recomendados pelo TG-119, em objeto simulador homogêneo. Após a leitura, o valor foi comparado ao valor esperado, subtraído do *output* diário do AL.

Para a obtenção de novos limites de confiança da instituição através da análise gama, foram irradiados os planos recomendados pelo TG-119, colocados no mesmo objeto simulador homogêneo utilizado para a medida de dose pontual, utilizando porém filme radiocrômico EBT3®.

Após essa etapa, foram selecionados 20 casos de cabeça e pescoço (CP) e 20 casos de próstata planejados para o AL Synergy®, e 20 casos de próstata para o AL Axesse®. Este número de pacientes foi baseado na recomendação feita pelo TG-218. Para cada um dos casos foi obtido a distribuição de dose planar e a medida de dose pontual. Em relação aos critérios de avaliação gama, foram selecionados os limites: 3%/3 mm, 3%/2 mm, 2%/3 mm, 2%/2 mm para todos os sítios anatômicos. Todos os planos foram avaliados de maneira absoluta, em relação à curva de calibração de densidade óptica dos filmes versus dose, avaliados com normalização global, com relação ao ponto de máxima dose do plano, e normalização local, relativo a variação de dose ponto a ponto.

Os limites de ação e de tolerância foram calculados seguindo os formalismos descritos, de forma a garantir que os processos estão dentro de controle, ou seja, nenhum dos pontos medidos

excedia aos limites de tolerância. Para comparar a aprovação do índice gama para os diferentes sítios anatômicos e diferentes critérios, foi utilizado o teste *Anova*.

## 3. Resultados

### 3.1 Limites de Confiança – Índice Gama (normalização global)

Para um limite de confiança de 95% (IC 95%), obtido através do QA paciente-específico dos casos no TG-119, os resultados, após atualização do TPS são comparados na tabela 1 com os resultados do comissionamento e de outras instituições que constam no TG-119. Seguindo as recomendações, os critérios para análise gama foram de 3%/3 mm.

**Tabela 1** - Limites de Confiança para as instituições do TG-119 (A – J, Geral), para o comissionamento dos ALs e após atualização do TPS (3%/3 mm)

Instituições	IC (95%)
A	98,7%
B	84,2%
D	99,3%
E	93,1%
F	95,8%
G	80,3%
I	88,7%
J	91,8%
Geral (TG-119)	87,7%
Comissionamento Axesse	92,6%
Atualização TPS Axesse	97,4%
Comissionamento Synergy	91,4%
Atualização TPS Synergy	97,1%

Fonte: O autor (2019).

A tabela 2 mostra os limites de confiança em relação aos sítios anatômicos e diferentes aceleradores lineares. Quando comparados os casos de CP e próstata para o AL Synergy, não houve diferença entre os mesmos critérios. Entre os casos de próstata dos diferentes ALs, houve diferença significativa entre os diferentes grupos quando usado o critério 2%/2 mm.

### 3.2 Normalização global vs normalização local

A tabela 3 apresenta os dados para os critérios de avaliação do índice gama de 3%/3 mm e 3%/2 mm para cada sítio anatômico e acelerador linear, normalizados de maneira global e local, em termos de média e desvio-padrão. Estes critérios foram utilizados por se tratarem dos critérios atuais utilizados na rotina clínica da instituição (3%/3 mm) e os sugeridos pelo TG-218 (3%/2 mm).

### 3.3 I-charts

Seguindo as recomendações do TG-218, foram elaboradas as *i-charts*, com relação ao índice gama e as medidas de dose pontuais. Com relação aos diferentes sítios anatômicos, foram gerados *i-charts* para os critérios de 3%/2 mm. As Figuras 1 a 6 apresentam estes resultados.

**Tabela 2** - Média, desvio-padrão e limites de confiança entre parênteses (95%) para diferentes sítios anatômicos e casos do TG119 após atualização do TPS: letras iguais significam diferença estatística entre os grupos, com  $p < 0,05$

Sítio Anatômico	3%/3 mm	3%/ 2mm	2%/3 mm	2%/ 2mm
Próstata - Synergy	98,4±1,2% (96,2%) (a)	96,1±2,4% (91,5%) (a, b)	96,9±2,4% (92,1%) (b)	91,6±5,3% (81,4%) (a, b)
Próstata - Axesse	99,1±1,5% (96,2%) (c)	97,5±2,6% (92,5%) (c)	98,2±2,3% (93,7%) (d)	94,8±4,5% (86,0%) (c, d)
CP - Synergy	98,8±1,2% (96,5%) (e)	95,8±3,7% (88,6%) (e)	97,4±2,3% (92,8%) (f)	92,5±5,9% (81,0%) (e, f)
TG119 - Atualização TPS - Axesse	99,1±0,9% (97,4%)	97,5±1,9% (93,7%)	98,1±1,5% (95,2%)	95,4±2,5% (90,5%)
TG119 - Atualização TPS - Synergy	99,4±1,2% (97,2%)	97,3±3,6% (90,2%)	98,8±1,1% (96,6%)	94,7±5,7% (83,5%)

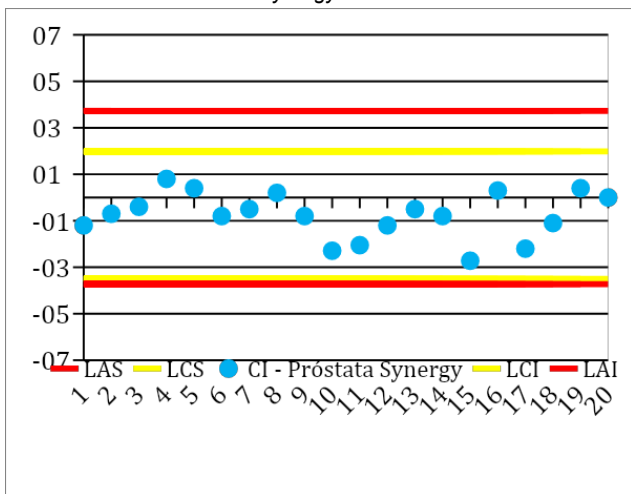
Fonte: O autor (2019).

**Tabela 3** - Média e desvio-padrão para diferentes sítios anatômicos para normalização global (G) e local (L): letras iguais significam diferença estatística entre os grupos, com  $p < 0,05$

Sítio Anatômico	3%/3 mm (G)	3%/3 mm (L)	3%/2 mm (G)	3%/2 mm (L)
Próstata - Synergy	98,4±1,2% (a)	95,7±3,1% (a, b)	96,1±2,4% (a, c)	88,6±6,9% (a, b, c)
Próstata - Axesse	99,1±1,5% (d)	96,9±3,6% (d, e)	97,5±2,6% (f)	91,5±7,7% (d, e, f)
CP - Synergy	98,8±1,2% (g)	95,2±4,1% (g, h)	95,8±3,7% (g, i)	89,1±7,9% (g, h, i)

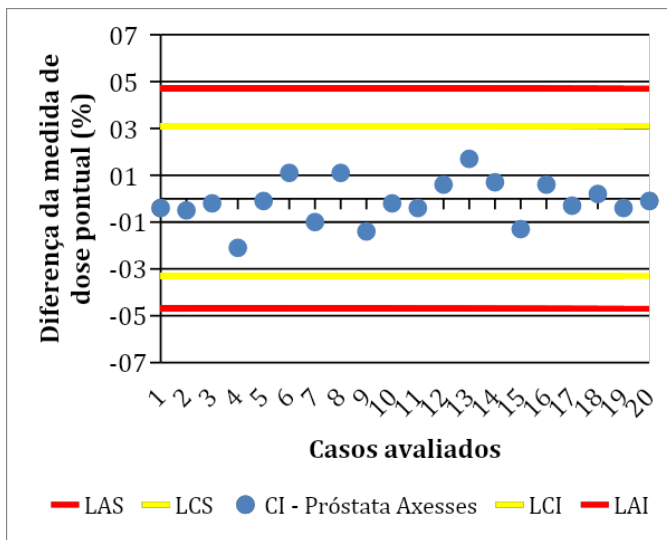
Fonte: O autor (2019).

**Figura 1** - I-chart para as medidas de dose pontual com câmara de ionização (CI) para próstata, no acelerador linear Synergy.



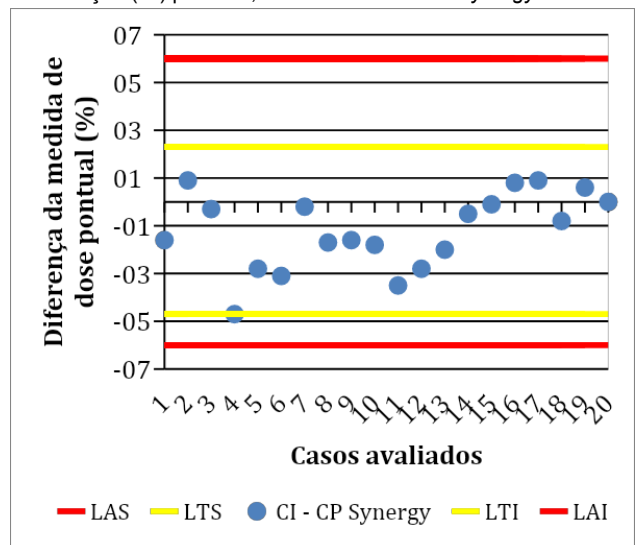
Fonte: O autor (2019).

**Figura 2** - I-chart para as medidas de dose pontual com câmara de ionização (CI) para próstata, no acelerador linear Axesse



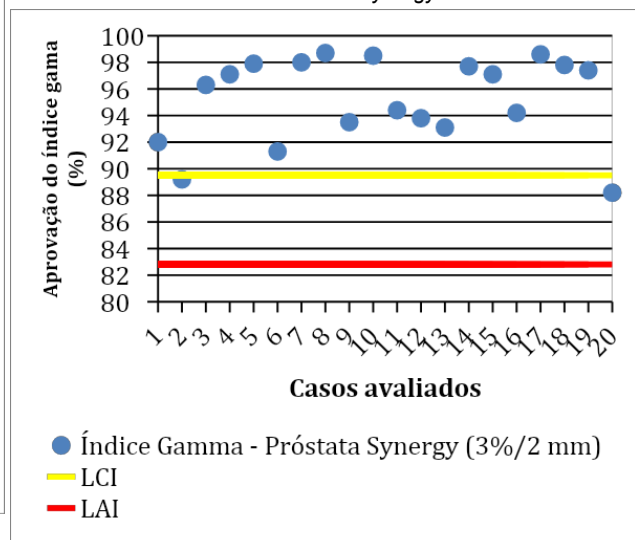
Fonte: O autor (2019).

**Figura 3** - I-chart para as medidas de dose pontual com câmara de ionização (CI) para CP, no acelerador linear Synergy.



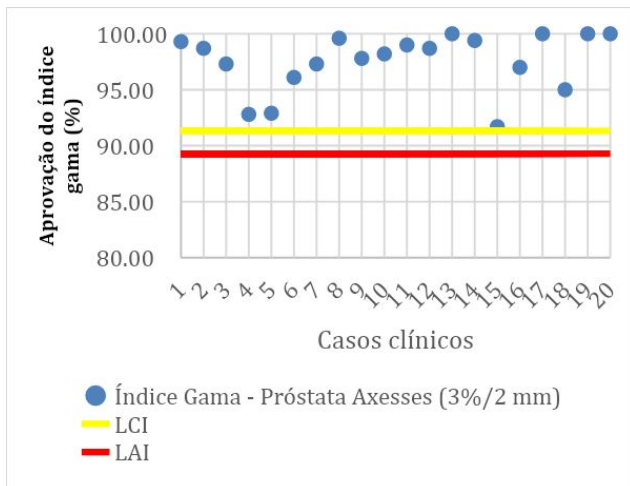
Fonte: O autor (2019).

**Figura 4** - I-chart para índice gama (3%/2 mm) para próstata, no acelerador linear Synergy.



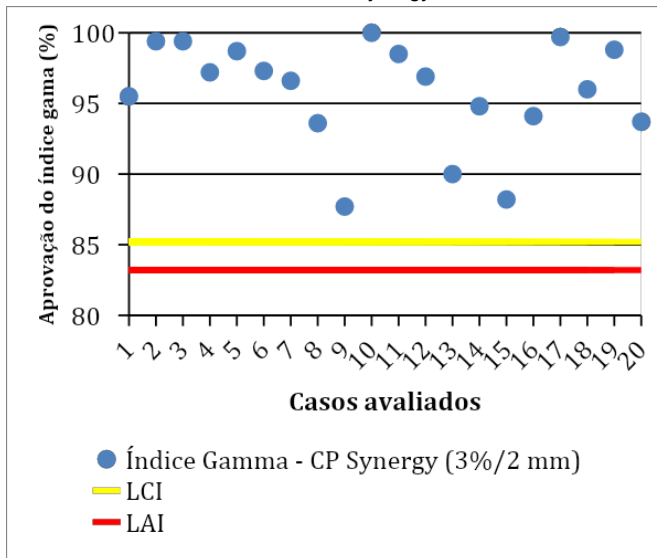
Fonte: O autor (2019).

**Figura 5** - *I-chart* para índice gama (3%/2 mm) para próstata, no acelerador linear Axesse.



Fonte: O autor (2019).

**Figura 6** - *I-chart* para índice gama (3%/2 mm) para CP, no acelerador linear Synergy.



Fonte: O autor (2019).

#### 4. Discussão

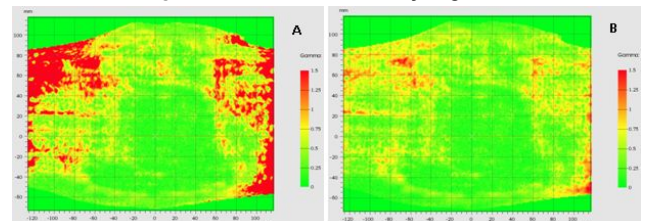
Após a atualização do TPS, os intervalos de confiança dos dois aceleradores lineares apresentaram valores superiores com relação aos dados do comissionamento das técnicas de VMAT e IMRT, além de estarem dentro do intervalo estabelecido pelas instituições participantes do TG-119. Esses resultados podem ser correlacionados a um melhor domínio da equipe sobre os processos de técnica de intensidade modulada durante os últimos anos, produzindo planos menos complexos, atingindo os mesmos objetivos de dose; ou ainda a atualizações no TPS que consegue fluências de doses otimizadas mais factíveis na entrega pelos aceleradores lineares.

Quando são utilizados critérios mais restritivos para o índice gama, percebe-se um decréscimo nos valores dos índices devido a maior reprovação de

pontos. Esse comportamento é ainda mais evidente quando realizada a normalização local, pois o critério de dose torna-se cada vez mais restritivo, principalmente em regiões com alto gradiente de dose. Como citado no TG-218, apesar da normalização local ser mais rigorosa, clinicamente é mais relevante para a normalização global, onde maiores variações de dose por fração tem maior influência nos parâmetros dosimétricos destes casos. Porém, é importante lembrar que através da normalização local, podemos analisar com maior cuidado as regiões onde os órgãos em risco estão presentes (geralmente regiões de baixa dose) e, desta forma, analisar com maior cuidado se a dose entregue à esses órgãos estão de acordo com os limites estabelecidos. Em casos de reirradiação, por exemplo, é importante que este tipo de avaliação seja feita, já que qualquer pequena falha pode ter influência no desfecho clínico do paciente.

É interessante ressaltar que apesar da maior reprovação em regiões de alto gradiente de dose, os pontos localizados na região de alta dose (região do volume alvo) continuam apresentando valores aceitáveis de aprovação (figura 7). Outro ponto que pode influenciar nesta reprovação, é a relação sinal-ruído encontrada no filme após seu escaneamento, já que este processo pode sofrer bastante variação devido ao escâner utilizado, ao posicionamento do filme e influências operador-dependente. Mesmo com um protocolo bem estabelecido, são encontradas leituras que não representam a real condição do plano medido.

**Figura 7** - A) Análise gama utilizando normalização local. B) Análise gama utilizando normalização global



Fonte: O autor (2019).

Ao plotar os dados com relação as *I-charts* e, mais uma vez, seguindo as recomendações do TG-218, verifica-se que, em relação às medidas com câmara de ionização, todos os pontos estão dentro dos limites de controle. Estes dados mostram que os planos, mais uma vez, estão sendo reproduzidos de maneira adequada no acelerador linear e que a medida de dose é um bom indicador de qualidade do plano.

Com relação à análise gama, são encontrados pontos fora dos limites de controle para casos de próstata (AL Synergy). Especificamente nestes casos, a análise gama foi reavaliada utilizando outra leitura do filme. Após esta leitura, o ponto apresentou um índice gama superior ao anterior, mais uma vez mostrando a influência do processo

de leitura do filme. Pontos fora da curva devem ser primeiramente serem reavaliados. Muitas vezes podem representar um falso negativo acarretado por algum erro embutido na medida (erros de *setup*, cálculo errôneo do plano de dose, comparação com critérios diferentes, entre outros). Neste sentido, os *i-charts* também auxiliam a rotina clínica, por mostrarem com mais clareza quais pontos tiveram comportamento anômalo. Seguindo a recomendação, devem ser acompanhados os próximos 20 casos, para uma segunda verificação destes limites. É importante notar que mesmo encontrando valores fora dos limites de controle estabelecidos pelo método citado, estes casos são aprovados nos critérios até então utilizados pela instituição - 95%, 3%/3 mm, com limiar de dose de 10% e normalização global.

Como se trata da implementação de um método novo, também é importante que sejam coletados uma maior quantidade de dados e que este processo seja acompanhado. Como o critério de 3%/2 mm ainda não é amplamente utilizado na rotina clínica, é importante que seja feita uma análise mais profunda destes casos, para que a equipe possa se adaptar aos novos limites e garantir que todo o processo, incluindo a curva de calibração dos filmes radiocrômicos, os planos de dose calculados, o posicionamento do objeto simulador e todos os outros processos envolvidos possam ser padronizados e reproduzidos.

Outra maneira de avaliar se estes limites estão realmente de acordo com a realidade da instituição, é a comparação com outro método de avaliação para o índice gama; porém, contemplar este item demanda maior custo as instituições e tem o viés ao se utilizar diferentes detectores. Além disso, os equipamentos comerciais possuem diferentes formas de normalização (global, local, em relação ao máximo, em relação a uma área, entre outros) e ferramentas de avaliação, que muitas vezes não podem ser alteradas, sendo definidas pelo próprio fabricante. O TG-218 ressalta esse ponto, trazendo uma tabela com as características de vários *softwares* para análise gama e o que cada um permite fazer.

## 5. Conclusão

Conclui-se que as metodologias empregadas pelo TG-218 representam uma nova abordagem na rotina de controle da qualidade específico, auxiliando as instituições a seguirem não apenas recomendações pré-estabelecidas, mas que também elaborem seus próprios critérios clínicos.

Baseado também nos diferentes sítios anatômicos e técnicas utilizadas, critérios mais restritos como 3%/2 mm, com 95% dos pontos aprovados, concentram grande parte dos casos dentro dos limites de controle e, portanto, representam um processo dentro do controle na instituição e são

bons parâmetros de avaliação dos casos clínicos. Este critério pode ser utilizado para qualquer um dos sítios anatômicos ou aceleradores lineares utilizados pela instituição, já que não apresentou diferença significativa entre os diferentes grupos.

Casos que excedam os limites de controle e/ou reprovem na análise gama devem ser avaliados de acordo com as regiões onde falham e qual a magnitude dessa falha. Em caso de necessidade de estudo de alguma região específica do plano, a análise local se mostrou mais útil, por apresentar com mais clareza qual região e por quê ela está falhando.

Os próximos passos desse trabalho serão avaliar quais critérios melhores se aplicam a técnicas que exigem elevada modulação, como são os casos das radiocirurgias estereotáxicas corpóreas.

## Agradecimentos

Ao Ministério da Saúde (SGTES) e ao Ministério da Educação (SESu) pelo apoio financeiro concedido durante o período da residência.

## Referências bibliográficas

1. Navran A, Heemsbergen W, Janssen T, et al. The impact of margin reduction on outcome and toxicity in head and neck cancer patients treated with image-guided volumetric modulated arc therapy (VMAT). *Radiotherapy and oncology : journal of the European Society for Therapeutic Radiology and Oncology*. 2018.
2. Munck Af Rosenschold P, Law I, Engelholm S, et al. Influence of volumetric modulated arc therapy and FET-PET scanning on treatment outcomes for glioblastoma patients. *Radiotherapy and oncology : journal of the European Society for Therapeutic Radiology and Oncology*. 2018.
3. Xue J, Wang H, Barbee D, Schmidt M and Das IJ. A Practical Method to Optimize Quality Assurance Results of Arc Therapy Plans in Beam Modeling. *Journal of medical physics*. 2018; 43: 106-11.
4. Low DA, Moran JM, Dempsey JF, Dong L and Oldham M. Dosimetry tools and techniques for IMRT. *Medical physics*. 2011; 38: 1313-38.
5. Low DA, Harms WB, Mutic S and Purdy JA. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions. *Medical physics*. 1998; 25: 656-61.
6. Bogner L, Scherer J, Treutwein M, Hartmann M, Gum F and Amediek A. Verification of IMRT: techniques and problems. *Strahlentherapie und Onkologie : Organ der Deutschen Röntgengesellschaft [et al]*. 2004; 180: 340-50.
7. Ezzell GA, Burmeister JW, Dogan N, et al. IMRT commissioning: multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119. *Medical physics*. 2009; 36: 5359-73.
8. Miften M, Olch A, Mihailidis D, et al. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: Recommendations of AAPM Task Group No. 218. *Medical physics*. 2018; 45: e53-e83.
9. Both S, Alecu IM, Stan AR, et al. A study to establish reasonable action limits for patient-specific quality assurance in intensity-modulated radiation therapy. *Journal of applied clinical medical physics*. 2007; 8: 1-8.
10. Pawlicki T, Whitaker M and Boyer AL. Statistical process control for radiotherapy quality assurance. *Medical physics*. 2005; 32: 2777-86.
11. Sanghangthum T, Suriyapee S, Srisatit S and Pawlicki T. Statistical process control analysis for patient-specific IMRT

and VMAT QA. *Journal of radiation research*. 2013; 54: 546-52.

12. Podgorsak EB. *Radiation Oncology Physics*. 2006.
13. Lewis D, Micke A, Yu X and Chan MF. An efficient protocol for radiochromic film dosimetry combining calibration and measurement in a single scan. *Medical physics*. 2012; 39: 6339-50.

**Contato:**

Autor Correspondente:

Gustavo Mortlin Moretto

Instituto do Câncer do Estado de São Paulo,  
Hospital das Clínicas da Universidade de São Paulo,  
São Paulo, Brasil

E-mail: [gustavomortlin92@gmail.com](mailto:gustavomortlin92@gmail.com)

Victor A. Bertotti Ribeiro

Instituto do Câncer do Estado de São Paulo,  
Hospital das Clínicas da Universidade de São Paulo,  
São Paulo, Brasil

E-mail: [victorabr0@gmail.com](mailto:victorabr0@gmail.com)

Gabriela Reis dos Santos

Instituto do Câncer do Estado de São Paulo,  
Hospital das Clínicas da Universidade de São Paulo,  
São Paulo, Brasil

E-mail: [reis.gabby@gmail.com](mailto:reis.gabby@gmail.com)