

Correlação entre dose efetiva e riscos radiológicos: conceitos gerais*

Correlation between effective dose and radiological risk: general concepts

Paulo Roberto Costa¹, Elisabeth Mateus Yoshimura², Denise Yanikian Nersissian³, Camila Souza Melo⁴

Costa PR, Yoshimura EM, Nersissian DY, Melo CS. Correlação entre dose efetiva e riscos radiológicos: conceitos gerais. Radiol Bras. 2016 Mai/Jun; 49(3):176–181.

Resumo Este trabalho de revisão pretende oferecer uma abordagem educacional relacionada às limitações na utilização da grandeza dose efetiva como ferramenta para quantificação de doses decorrentes de aplicações em diagnóstico médico utilizando radiações ionizantes. Os autores apresentam uma análise crítica sobre as grandezas aceitas e utilizadas atualmente para a avaliação dosimétrica em procedimentos de diagnóstico médico por imagem, tendo como base estudos publicados na literatura. Destacam-se as formas de utilização dessas grandezas para a avaliação do risco atribuído ao procedimento e para o cálculo da dose efetiva e sua correta utilização e interpretação.

Unitermos: Dosagem de radiação; Efeitos da radiação; Diagnóstico por imagem/efeitos adversos; Eficiência biológica relativa.

Abstract The present review aims to offer an educational approach related to the limitations in the use of the effective dose magnitude as a tool for the quantification of doses resulting from diagnostic applications of ionizing radiation. We present a critical analysis of the quantities accepted and currently used for dosimetric evaluation in diagnostic imaging procedures, based on studies published in the literature. It is highlighted the use of these quantities to evaluate the risk attributed to the procedure and to calculate the effective dose, as well as to determine its correct use and interpretation.

Keywords: Radiation dosage; Radiation effects; Diagnostic imaging/adverse effects; Relative biological effectiveness.

INTRODUÇÃO

Grande parte da motivação no estabelecimento de métodos dosimétricos relacionados a procedimentos de diagnóstico por imagem está baseada no interesse em estimar riscos à saúde do paciente que é submetido a um dado tipo de exame utilizando radiações ionizantes. Esta motivação tem forte correlação com a necessidade de estabelecer balanços entre riscos e benefícios ao se introduzir uma nova modalidade diagnóstica ou com a garantia de que a modalidade escolhida é aquela que trará ao paciente os menores efeitos potencialmente prejudiciais à sua saúde, quando comparada a outras opções diagnósticas.

No presente trabalho será apresentada uma análise crítica sobre as grandezas aceitas e utilizadas atualmente para a avaliação dosimétrica em procedimentos de diagnóstico médico por imagem, tendo como base estudos publicados

na literatura. Será dada ênfase às formas de utilização dessas grandezas para a avaliação do risco atribuído ao procedimento e para o cálculo da dose efetiva (E) e sua correta utilização e interpretação.

DOSES EFETIVAS E RISCOS RADIOLÓGICOS

O método apresentado pela International Commission on Radiation Protection (ICRP) para o cálculo da grandeza E baseia-se na aplicação de fatores de risco multiplicativos, aplicados em grandezas mais fundamentais, como a dose absorvida⁽¹⁾. Por trás dos fatores de risco publicados pela ICRP está a oportunidade de se utilizar o conhecimento associado aos efeitos biológicos da radiação ionizante em longo prazo, reunido desde o início do século passado⁽²⁾, para se correlacionar a exposição de radiações em seres vivos e os efeitos biológicos associados a essas exposições. Drexler et al.⁽³⁾ fazem uma interpretação detalhada desta grandeza, ainda chamada de “dose equivalente efetiva”, utilizando conceitos de efeitos estocásticos. Os autores preveem sua associação com doses de pequenos grupos ou até de indivíduos. Nestes casos, deixam claro que não é possível calcular riscos ou detrimientos reais utilizando os fatores apresentados, afirmando que os dados disponíveis nas publicações oficiais de proteção radiológica da época são aplicáveis à população média de trabalhadores e que os coeficientes de detrimento para outras populações seriam, naturalmente, diferentes. Esclarecem, ainda, que a utilização da E se justifica para o atendimento do princípio da limitação de indivíduos ocupacionalmente expostos, considerando exposições uniformes

* Trabalho realizado pelo Grupo de Dosimetria das Radiações e Física Médica do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), São Paulo, SP, Brasil.

1. Doutor, Professor do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), São Paulo, SP, Brasil.

2. Doutora, Professora Titular do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), São Paulo, SP, Brasil.

3. Doutora, Física do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), São Paulo, SP, Brasil.

4. Especialista em Física de Radiodiagnóstico, Física do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), São Paulo, SP, Brasil.

Endereço para correspondência: Dr. Paulo Roberto Costa. Instituto de Física da Universidade de São Paulo – Física Nuclear. Rua do Matão, 1371, Cidade Universitária. São Paulo, SP, Brasil, 05508-090. E-mail: pcosta@if.usp.br.

Recebido para publicação em 26/9/2014. Aceito, após revisão, em 12/5/2015.

de corpo inteiro. O conceito de E pode ser usado para situações de irradiação não uniforme, mas os resultados derivados de modelos para este tipo de situação não podem ser associados às grandezas básicas de proteção radiológica.

Drexler et al.⁽⁴⁾ enfatizam que a aplicação dos conceitos de E na proteção radiológica de pacientes é *enganosa e sem sentido* quando usada para estimativa de riscos individuais ou coletivos de pacientes. Esses autores discutem a utilização desta grandeza para apoiar a otimização de procedimentos, comparar riscos entre métodos, definir níveis de restrição de dose e estimar riscos a indivíduos e populações submetidos a procedimentos de diagnóstico por imagem. A partir de sua argumentação, demonstram a sustentação de sua interpretação anterior, afirmando que sua utilização é incorreta devido a simplificações inapropriadas dos mecanismos biológicos subjacentes e à inadequação da utilização dos fatores de ponderação conectados à definição de E para uma dada população de pacientes.

Encontramos, atualmente, grande quantidade de trabalhos publicados em revistas de grande circulação associando a grandeza E a procedimentos de diagnóstico por imagem. Estas ocorrências aparecem em trabalhos relacionados a exames de imagem que apresentam a possibilidade de altas doses, como a radiologia intervencionista⁽⁵⁾ e a tomografia computadorizada (TC)⁽⁶⁾, e outras modalidades⁽⁷⁾.

CALCULANDO E INTERPRETANDO A GRANDEZA E

Segundo a regulamentação nacional⁽⁸⁾ e internacional⁽¹⁾, E pode ser calculada pela soma das doses equivalentes ponderadas nos diversos órgãos e tecidos:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T \sum_R w_T w_R D_{T,R} \xrightarrow{\text{fótons}} E = \sum_T w_T D_T \quad (1)$$

onde: H_T e $D_{T,R}$ representam a dose equivalente no tecido ou órgão T e a dose absorvida no tecido ou órgão T pela radiação do tipo R . Os fatores w_T e w_R fornecem pesos para os diferentes tecidos ou órgãos do corpo, relacionados às sensibilidades à radiação dos tecidos e para o tipo de radiação que atinge o órgão⁽⁹⁾.

Segundo a publicação ICRP 103⁽¹⁾, deve-se levar em consideração que as grandezas E e H_T não são diretamente mensuráveis. Desta forma, grandezas operacionais foram definidas e são obtidas por instrumentos de medição⁽¹⁰⁾ para a determinação das grandezas de proteção radiológica para fins de avaliação de exposições ocupacionais.

O simulador numérico do corpo humano (*phantom* computacional) recomendado pela ICRP para a determinação dos fatores de conversão é baseado nas pesquisas de Zankl et al.⁽¹¹⁻¹³⁾. A partir da correlação entre os voxels fornecidos por estes modelos computacionais com os órgãos do corpo humano, foram realizados ajustes para a adequação destes modelos com relação às massas dos órgãos do homem e da mulher de referência, definidos na publicação ICRP 89⁽¹⁴⁾. Estes simuladores de referência foram adotados para a determinação dos fatores de conversão reproduzidos no ICRP 103

e que correlacionam grandezas físicas, tais como o kerma no ar e a fluência de partículas para irradiações externas, e atividade incorporada para a exposição interna, com as grandezas de proteção radiológica como H_T e E .

Em seu parágrafo B132, a publicação ICRP 103⁽¹⁾ apresenta o método de obtenção da E independente do gênero. Este método foi utilizado para a definição de fatores de conversão unificados e que possam ser utilizados de forma simples para propósitos de proteção radiológica. O documento detalha que E é calculada a partir das doses equivalentes obtidas para órgãos e tecidos do homem de referência, H_T^H , e da mulher de referência, H_T^M , ou seja:

$$E = \sum_T w_T \left[\frac{H_T^H + H_T^M}{2} \right] \quad (2)$$

Como consequência da média independente do gênero representada pela equação 2, a grandeza E , para fins de proteção radiológica, fornece valores que levam em consideração condições de exposição da “pessoa de referência”, e nunca as características de um indivíduo específico. Ao se utilizar a grandeza como definida pela ICRP, deve-se levar em consideração que os fatores de ponderação são obtidos a partir de valores médios sobre uma grande quantidade de indivíduos de ambos os gêneros. A Figura 1 apresenta o método adotado pela ICRP para determinação da E independente do gênero, por meio dos valores ponderados médios para a pessoa de referência.

No ano de 2000, antes da publicação do ICRP 103⁽¹⁾, McCollough et al.⁽¹⁵⁾ fizeram uma importante contribuição na interpretação da grandeza E e nos seus métodos de cálculo. As autoras descrevem as diferentes definições desta grandeza apresentadas nas diversas publicações da ICRP desde 1977. Além disso, enfatizam que os valores correspondentes à aplicação dos fatores de ponderação e a associação com o detrimento total relacionado são relevantes somente à população e às condições de irradiação a partir da qual esses fatores foram derivados. Desta forma, concordando com a interpretação de Drexler et al.^(3,4), reafirmam que o detrimento resultante da aplicação do conceito de E só faz sentido para a população em geral ou para populações específicas de trabalhadores, não sendo apropriado seu uso para pacientes, em razão das diferenças relacionadas a idade e gênero. Por fim, ressaltam a inconsistência relacionada à utilização dos fatores de ponderação, pois a normalização não pode ser aplicada em casos de irradiações não homogêneas.

Porém, não se deve desprezar a importância de serem estabelecidos métodos para a estimativa de riscos relacionados à exposição médica. De acordo com McCollough et al.⁽¹⁵⁾, a mais completa abordagem para a estimativa de risco é o conhecimento das doses em todos os órgãos pertinentes e os coeficientes de risco para esses órgãos, associados e relacionados a idade e gênero. O ponto importante dessa discussão é a correta definição dos limites de aplicabilidade dos fatores de ponderação estabelecidos pela ICRP para a correlação dose-risco em procedimentos médicos que usem

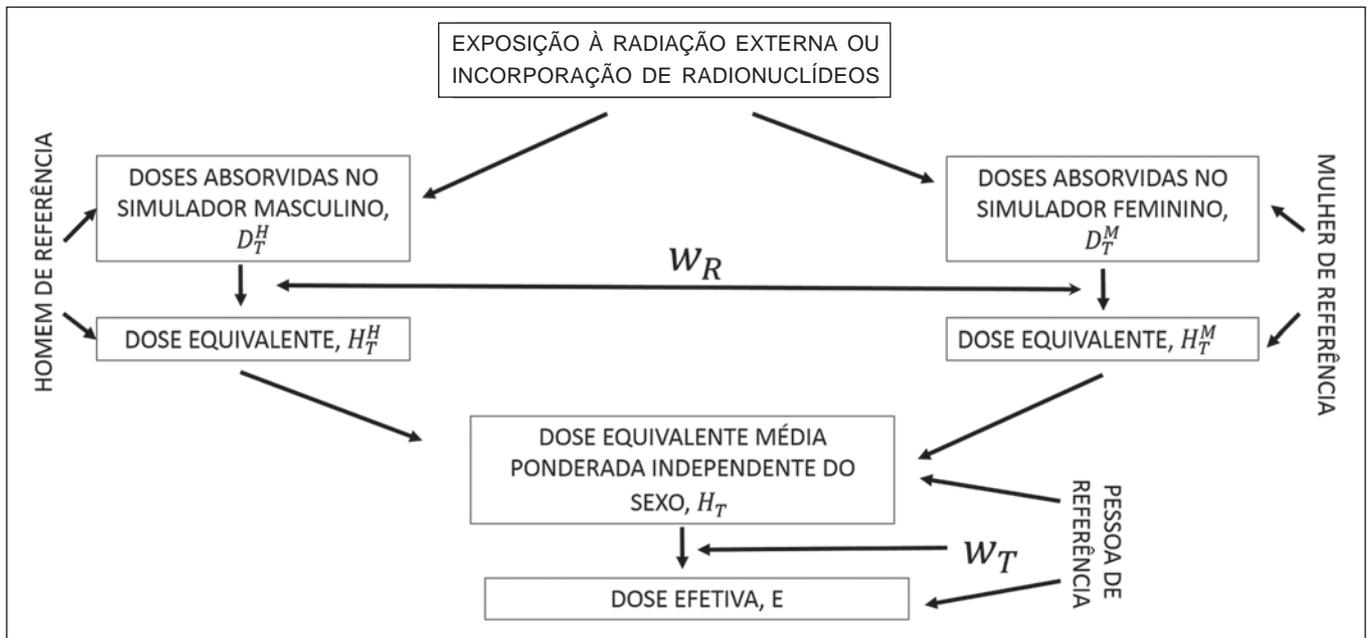


Figura 1. Método adotado pela ICRP para determinação da E independente do gênero por meio dos valores ponderados médios para a pessoa de referência. (Baseado na publicação ICRP 103⁽⁴⁾).

radiações ionizantes. Assim, E pode ser utilizada para comparar detrimientos relativos entre procedimentos radiológicos diferentes e ajudar na comparação entre detrimientos na aplicação de diferentes fontes de radiação, mas em ambos os casos deve ser calculada para populações de pacientes com idade e gênero compatíveis.

Apesar dessas limitações, encontra-se grande número de publicações recentes na literatura correlacionando E s a procedimentos de diagnóstico por imagens^(16–18). Nem todas essas publicações trazem as limitações, incertezas e adequações de interpretação que devem ser associadas a esta quantificação de dose e o fato desta grandeza não poder ser associada ao risco de indivíduos⁽¹⁹⁾.

O trabalho de Verdun et al.⁽²⁰⁾, no qual os autores fazem uma revisão de conceitos e grandezas de proteção radiológica, deixa clara a origem estocástica da grandeza E e a correlaciona com riscos à saúde da seguinte forma: “Esta grandeza (dose efetiva) considera o risco à saúde (cânceres fatais e não-fatais, levando em consideração o período de latência, bem como desordens hereditárias severas) de um paciente ‘padrão’ que foi exposto não-uniformemente a um campo de radiação e a transpõe para a situação na qual este paciente tivesse sido uniformemente exposto a um campo de radiação. Este método é usado para a monitoração de trabalhadores expostos à radiação ionizante”. O conceito de paciente padrão está apresentado no ICRP 103⁽¹⁾, que descreve, em seu capítulo 7, que a E pode ser útil, em caso de exposições médicas, para fins de comparação entre diferentes procedimentos e para comparar o uso de técnicas e procedimentos semelhantes em diferentes hospitais ou países, bem como o uso de equipamentos diferentes para o mesmo tipo de exame. Isso é válido desde que o paciente de referência ou a população de pacientes sejam semelhantes

com respeito a idade e gênero. A publicação alerta que a interpretação da E referente a exposições médicas é problemática quando órgãos e tecidos são parcialmente expostos e para casos de exposições heterogêneas.

Ao tratar das limitações relacionadas ao método da ICRP para a determinação das E s, Verdun et al.⁽²⁰⁾ deixam claro que, em função das diferenças nos fatores de risco relacionados às características corporais, idade e gênero, a E não deve ser utilizada para inferir o excesso de risco relativo de um indivíduo em particular⁽²¹⁾. Por fim, os autores desencorajam o uso destas correlações para associação com riscos relacionados ao uso das radiações em procedimentos de diagnóstico por imagens.

CONTROVÉRSIAS SOBRE O USO DA E EM DIAGNÓSTICO POR IMAGEM

O início da popularização e da utilização sistemática da E como métrica dosimétrica para avaliação de doses em procedimentos médicos pode ter-se iniciado com o trabalho de Martin⁽²²⁾, em 2007. Nesse trabalho, o autor apresenta uma profunda reflexão sobre a natureza estocástica do cálculo do dano, que origina os fatores de ponderação empregados no cálculo da E , e sobre as incertezas envolvidas no seu cálculo. Em especial, o autor destaca o excesso de atenção dada aos cálculos de E s referentes a procedimentos médicos e à sua associação aos riscos, sem os devidos cuidados na verificação da justificativa para essas associações. Por fim, realiza estimativas que levam a valores de incertezas de cerca de 40% no cálculo de E para um paciente padrão. Cabe ressaltar o uso do conceito de E para estimar o risco para um indivíduo submetido a um procedimento de diagnóstico por imagens, o que não é recomendado pela ICRP. No final de seu trabalho, Martin argumenta que E é

a única grandeza disponível associada ao risco de detrimento à saúde. Deixa claro que a E não deve ser relacionada a um indivíduo, mas sim a um paciente de referência, hermafrodita, para o qual os riscos foram determinados com base na população média padrão. O autor argumenta que, para o cálculo do risco de um paciente individual, o melhor indicador deverá estar relacionado à estimativa das doses em todos os órgãos e tecidos radiosensíveis e na combinação destes valores com coeficientes de risco específicos para estes órgãos, dependentes da idade e gênero.

É incontestável a grande complexidade que está por trás do entendimento das grandezas adotadas para proteção radiológica⁽²³⁾, o que implica grande cuidado que se deve tomar ao utilizar esta linguagem.

A adequação da utilização da E como grandeza adotada para representar doses relativas a exposições em pacientes ou populações de pacientes é origem de preocupações com sua correta interpretação⁽²⁰⁾ e de diversas controvérsias na comunidade científica. Estas controvérsias surgiram com a utilização de uma grandeza originalmente introduzida para representar, quantitativamente, detrimientos estocásticos potenciais, em especial câncer e efeitos hereditários, resultantes da exposição de populações de trabalhadores e público geral⁽²⁴⁾, como grandeza representativa da dose de pacientes submetidos a exames radiológicos.

Esta controvérsia originou um debate na seção “Ponto e contraponto” da revista **Medical Physics** de julho de 2010⁽²⁵⁾. Por um lado, a professora Borrás arguiu contrariamente ao uso da E como grandeza representativa de doses em procedimentos médicos, e o professor Huda arguiu favoravelmente. O professor Huda foi, também, protagonista de outro debate, desta vez com o doutor Cohen, apresentado na revista **Radiology** em 2011⁽²⁶⁾.

O Comitê das Nações Unidas para Efeitos da Radiação Atômica, no Anexo A de seu relatório de 2008⁽²⁷⁾, aponta as inúmeras dificuldades em se obter estimativas confiáveis das doses absorvidas e, conseqüentemente, das E s correspondentes a exames clínicos, ressaltando que essa grandeza deve sempre estar correlacionada com populações compatíveis. Nessa publicação, ficam ressaltadas três abordagens principais para a obtenção de doses em pacientes em procedimentos radiológicos: a) medições de dose diretamente em um paciente; b) medições de dose em objetos simuladores (*phantoms*) físicos; c) cálculos utilizando o método Monte Carlo. Em cada caso, ressalta as incertezas associadas⁽²⁸⁾ e suas dificuldades e, ainda, a fraca associação que estes resultados podem ter com estimativas de risco ou de detrimento.

McCullough et al.⁽²⁹⁾ retomaram, recentemente, este tema. No seu artigo, esses autores iniciam com a abordagem da situação de um paciente, após o exame, perguntando ao médico: “Qual foi minha dose?”. O trabalho debate que o que este paciente realmente quer saber é qual o risco associado ao procedimento realizado. Além disso, outros profissionais médicos passaram a ter mais acesso a informações referentes a riscos de efeitos estocásticos decorrentes, por

exemplo, de procedimentos de TC, em publicações dedicadas à classe médica⁽³⁰⁾.

Levando em conta as limitações e as incertezas associadas à utilização da E como apoio à determinação de riscos decorrentes de procedimentos radiológicos, McCullough et al.⁽²⁹⁾ apontam para sua utilidade como ferramenta para realização de comparações entre diferentes tipos de exposição à radiação e para desmembrar a complexa distribuição de doses em vários tecidos e órgãos em um único parâmetro dosimétrico. Apontam, assim, para a aplicação desta grandeza como uma espécie de valor de dose “equivalente ao corpo inteiro”, relacionada a riscos decorrentes de irradiações não uniformes e que possa ser aplicada a diferentes modalidades diagnósticas. Com esta abordagem, é possível comparar valores de doses em modalidades distintas de exames com finalidades semelhantes, tais como a angiografia coronária convencional, a angiotomografia e a perfusão miocárdica com medicina nuclear.

A IMPORTÂNCIA DA CORRETA INTERPRETAÇÃO DA GRANDEZA E

A publicação do trabalho “Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII – Phase 2”, de 2006⁽³¹⁾, define E como a soma das doses absorvidas por diferentes órgãos decorrentes de diferentes tipos de radiação multiplicadas por fatores de ponderação para os órgãos e fatores de ponderação referentes aos tipos de radiação. Esta definição é semelhante à da ICRP 103⁽¹⁾. A unidade da grandeza E é o sievert (Sv), sendo: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$. Excluindo-se diferenças relacionadas a gênero e idade, E s iguais correspondem a aproximadamente o mesmo risco global. Para uma exposição de corpo inteiro, uniforme, por um tipo específico de radiação, a E é igual à dose absorvida multiplicada pelo fator de ponderação da radiação.

A publicação ICRP 103 enfatiza que a E é calculada para uma “pessoa de referência” e não para um indivíduo. Adicionalmente, a publicação ICRP 116⁽³²⁾ esclarece que os fatores utilizados para ponderar doses absorvidas para tecidos específicos são invariantes com a idade e o gênero, e a utilização da soma ponderada para a obtenção da E não é aplicável a um indivíduo específico. Assim, a E serve para apoiar os dispositivos regulatórios e para avaliações comparativas de práticas profissionais.

Deve-se destacar que a E foi estabelecida como uma grandeza aplicável a situações planejadas. A ICRP 105⁽³³⁾ esclarece que as distribuições de idades de trabalhadores e da população em geral podem ser significativamente diferentes das distribuições de idades de uma dada população submetida a um dado tipo de procedimento médico utilizando radiações ionizantes. Estas distribuições de idades, utilizadas na derivação do valor de E , podem ter outras particularidades relacionadas, por exemplo, ao gênero dos pacientes submetidos a estes procedimentos.

A necessidade de estabelecer correlações entre doses e riscos decorrentes da realização de procedimentos radioló-

gicos pode ser questionada, uma vez que os princípios da justificação e o da otimização (princípio ALARA) tenham sido adequadamente aplicados e o balanço risco/benefício seja aceitável. Contudo, a conveniência na utilização de parâmetros quantitativos que permitam qualificar um dado procedimento em termos de seu potencial de risco à saúde dos pacientes, em comparação com condutas alternativas, ou ainda a aplicação de uma nova técnica, em contraste a outras em uso, é, obviamente, tentadora. No caso dessas correlações associadas à técnica da TC, Dixon⁽³⁴⁾ ressalta a necessidade de treinamento de todos os trabalhadores envolvidos, incluindo a adequação da educação de estudantes de medicina, técnicos/tecnólogos e médicos de outras modalidades sobre doses e suas implicações. Destaca, ainda, a aparente incoerência de instituições que investem centenas de milhares de dólares ou euros (ou reais) na aquisição de uma nova modalidade em TC, mas relutam em investir em treinamento de seu corpo técnico, na educação continuada de seus médicos ou em obter suporte de profissionais de física médica para a correta monitoração de aspectos relacionados à dose em TC e em outras modalidades.

CONCLUSÕES

O presente trabalho de revisão pretende oferecer aos leitores uma abordagem educacional relacionada às limitações na utilização da grandeza E como ferramenta para quantificação de doses, e de seus riscos relacionados à saúde, decorrentes de aplicações em diagnóstico médico utilizando radiações ionizantes. Esta grandeza pode ser utilizada para comparar detrimientos relativos entre procedimentos radiológicos e outras fontes de radiação quando calculada para populações de pacientes com idade e gênero compatíveis. Além disso, pode ser útil para fins de comparação entre diferentes procedimentos e técnicas ou entre diferentes hospitais ou países, desde que o paciente de referência ou a população de pacientes sejam semelhantes com respeito a idade e gênero.

Entretanto, deve-se considerar que a estimativa do risco para um indivíduo submetido a um procedimento de diagnóstico por imagens utilizando a E não é recomendada pela ICRP. Isto ocorre porque esta grandeza foi introduzida para representar detrimientos estocásticos potenciais resultantes da exposição de populações de trabalhadores e público geral. Assim, é incorreto empregar a E como estimador de riscos individuais para pacientes submetidos a exames radiológicos.

Em resumo, a E pode ser útil para: a) estimativa do dano relativo para casos de irradiações não uniformes e parciais do corpo; b) otimização de procedimentos radiológicos envolvendo múltiplos órgãos ou tecidos; c) comparações entre procedimentos alternativos e/ou níveis de radiação ambiental natural; d) estimativa do dano relativo relacionado a múltiplas exposições ou diferentes modalidades.

A E serve para apoiar os dispositivos regulatórios e para avaliações comparativas de práticas profissionais, apesar de

a grandeza não ser capaz de representar o risco estocástico à saúde decorrente de exposições de um dado trabalhador ou de um indivíduo do público.

Para a comunidade médica, o princípio da justificação de procedimentos radiológicos é mais importante que a determinação de doses por grandezas que não são aplicáveis para a estimativa de riscos⁽³⁵⁾. Entende-se que este é um fator que impacta mais significativamente a proteção radiológica do que a determinação da dose individual.

REFERÊNCIAS

1. International Commission on Radiation Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann ICRP. 2007;37(2-4):1-332.
2. Jennings W. Evolution over the past century of quantities and units in radiation dosimetry. J Radiol Prot. 2007;27:5-16.
3. Drexler G, Williams G, Zankl M. The meaning and the principle of determination of the effective dose equivalent in radiation protection. Radiat Prot Dosimetry. 1985;12:95-100.
4. Drexler G, Panzer W, Petoussi N, et al. Effective dose – how effective for patients? Radiat Environ Biophys. 1993;32:209-19.
5. Struelens L, Bacher K, Vanhavere F, et al. DAP to effective dose conversion in cardiology and vascular/interventional radiology. [cited 2014 May 13]. Available from: www.fanc.fgov.be/GED/00000000/2300/2369.pdf.
6. Huda W, Magill D, He W. CT effective dose per dose length product using ICRP 103 weighting factors. Med Phys. 2011;38:1261-5.
7. Osei EK, Darko J. A survey of organ equivalent and effective doses from diagnostic radiology procedures. ISRN Radiol. 2012;2013:204346.
8. Brasil. Ministério de Ciência e Tecnologia. Comissão Nacional de Energia Nuclear. CNEN-NN-3.01 – Diretrizes básicas de proteção radiológica. Resolução N° 027, de 17 de dezembro de 2004. D.O.U. 06/01/2005.
9. Okuno E, Yoshimura EM. Física das radiações. São Paulo, SP: Oficina de Textos; 2010.
10. McDonald JC. Calibration measurements and standards for radiation protection dosimetry. Radiat Prot Dosimetry. 2004;109:317-21.
11. Zankl M, Fill U, Petoussi-Hens N, et al. Organ dose conversion coefficients for external photon irradiation of male and female voxel models. Phys Med Biol. 2002;47:2367-85.
12. Zankl M, Petoussi-Hens N, Fill U, et al. The application of voxel phantoms to the internal dosimetry of radionuclides. Radiat Prot Dosimetry. 2003;105:539-48.
13. Zankl M, Becker J, Fill U, et al. GSF male and female adult voxel models representing ICRP reference man – the present status. Paper presented at: The Monte Carlo Method: Versatility Unbounded in a Dynamic Computing World. 2005 April 17-21; Chattanooga, TN, USA. American Nuclear Society; 2005.
14. International Commission on Radiation Protection. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. A report of age- and gender-related differences in the anatomical and physiological characteristics of reference individuals. ICRP Publication 89. Ann ICRP. 2002;32(3-4):5-265.
15. McCollough CH, Schueler BA. Calculation of effective dose. Med Phys. 2000;27:828-37.
16. Smith-Bindman R, Miglioretti DL. CTDIvol, DLP, and effective dose are excellent measures for use in CT quality improvement. Radiology. 2011;261:999.
17. Brink JA. Radiation dose reduction in renal colic protocol CT: are

- we doing enough to ensure adoption of best practices? *Radiology*. 2014;271:323–5.
18. Ward VL, Strauss KJ, Barnewolt CE, et al. Pediatric radiation exposure and effective dose reduction during voiding cystourethrography. *Radiology*. 2008;249:1002–9.
 19. Harrison JD, Streffer C. The ICRP protection quantities, equivalent and effective dose: their basis and application. *Radiat Prot Dosimetry*. 2007;127:12–8.
 20. Verdun FR, Bochud F, Gundinchet F, et al. Quality initiatives radiation risk: what you should know to tell your patient. *Radiographics*. 2008;28:1807–16.
 21. Okuno E. Epidemiologia do câncer devido a radiações e a elaboração de recomendações. *Rev Bras Fís Méd*. 2009;3:43–55.
 22. Martin CJ. Effective dose: how should it be applied to medical exposures? *Br J Radiol*. 2007;80:639–47.
 23. Nickoloff EL, Lu ZF, Dutta AK, et al. Radiation dose descriptors: BERT, COD, DAP, and other strange creatures. *Radiographics*. 2008;28:1439–50.
 24. Böhm J, Thompson IM. Adaptation of the present concept of dosimetric radiation protection quantities for external radiation to radiation protection practice. *Radiat Prot Dosimetry*. 2004;109:311–5.
 25. Borrás C, Huda W, Orton CG. Point/counterpoint. The use of effective dose for medical procedures is inappropriate. *Med Phys*. 2010;37:3497–500.
 26. Garcia-Bennett A, Nees M, Fadeel B. In search of the Holy Grail: folate-targeted nanoparticles for cancer therapy. *Biochem Pharmacol*. 2011;81:976–84.
 27. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. Annex A: Medical radiation exposures. New York, NY: United Nations Publication; 2010.
 28. Durand DJ, Dixon RL, Morin RL. Utilization strategies for cumulative dose estimates: a review and rational assessment. *J Am Coll Radiol*. 2012;9:480–5.
 29. McCollough CH, Christner JA, Kofler JM. How effective is effective dose as a predictor of radiation risk? *AJR Am J Roentgenol*. 2010;194:890–6.
 30. Pearce MS, Salotti JA, Little MP, et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet*. 2012;380:499–505.
 31. Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. Washington, DC: The National Academies Press; 2006.
 32. Petoussi-Hens N, Bolch WE, Eckerman KF, et al. ICRP Publication 116. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. *Ann ICRP*. 2010;40(2-5):1–125.
 33. International Commission on Radiation Protection. ICRP Publication 105. Radiological protection in medicine. *Ann ICRP*. 2007;37(6):1–63.
 34. Dixon AK. Benefits and costs, an eternal balance [Editorial]. *Ann ICRP*. 2007;37(1):1–3.
 35. World Health Organization. Bonn call-for-action. Joint position statement by the IAEA and WHO. [cited 2014 Dec 3]. Available from: http://www.who.int/ionizing_radiation/medical_exposure/Bonn_call_action.pdf.