



# Probabilidade de Causalidade para Câncer Radioinduzido e seu Uso em Demandas Compensatórias no Brasil

M.S.M. Souza<sup>a</sup>, A.C.M. Dovaes<sup>a</sup>, L.H.S. Veiga<sup>a</sup>

*<sup>a</sup>Instituto de Radioproteção e Dosimetria, IRD/CNEN, 22783-127, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

*marinademello@yahoo.com.br*

---

## RESUMO

Vários países possuem sistemas de compensação para doenças radioinduzidas, tendo em vista as demandas compensatórias de indivíduos expostos à radiação ionizante por motivos ocupacionais ou em decorrência de acidentes radiológicos ou nucleares. No Brasil, embora existam vários casos de solicitação de compensação financeira devido ao desenvolvimento de câncer após exposição à radiação ionizante, não existe nenhum sistema formal para julgar estes pedidos de compensação. Desta forma, o objetivo desse trabalho foi fazer uma revisão não sistemática dos sistemas de compensação para doenças radioinduzidas existentes no mundo e com base nas vantagens e desvantagens dos mesmos, propor ideias para um sistema de compensação para o Brasil. Adicionalmente, verificamos a aplicabilidade de diferentes critérios de qualificação para compensação, através de estudos de caso hipotéticos utilizando o programa RadRisk Brasil para a estimativa da Probabilidade de Causalidade (PC) com as incertezas associadas. A avaliação dos casos hipotéticos mostrou que o uso de valores no percentil 99<sup>o</sup> da distribuição da PC permite que mais pessoas possam ser qualificadas para receber compensações financeiras, evitando assim que casos meritórios não sejam devidamente compensados. Uma vez que a PC para câncer radioinduzido se baseia no conhecimento científico existente sobre o risco de câncer em decorrência da exposição à radiação, o seu uso em um sistema de compensação se constitui na melhor opção científica para avaliar a relação de causalidade para câncer radioinduzido em demandas compensatórias. Neste contexto, este trabalho poderá auxiliar no desenvolvimento e na implementação de um sistema formal de compensação para doenças radioinduzidas no Brasil.

*Palavras-chave:* Sistema de Compensação, Câncer Radioinduzido, Probabilidade de Causalidade.

---

## ABSTRACT

Several countries have compensation programmes for ionizing radiation-related diseases due to compensatory claims of individuals exposed to ionizing radiation for occupational reasons or as a result of radiological or nuclear accidents. In Brazil, although there are several cases requesting compensation due to potentially radiation-related diseases after exposure to ionizing radiation, there is no formal system to judge these compensation claims. Therefore, the aim of this study was to perform a non-systematic review of the existing compensation programmes for ionizing radiation-related diseases worldwide, and based on their advantages and disadvantages propose ideas for a compensation programme in Brazil. In addition, we evaluated the applicability of different qualification criteria for compensation, through hypothetical case studies using the RadRisk Brasil program to estimate the Probability of Causation (PC) with the associated uncertainties. The assessment of the hypothetical cases showed that the use of the 99<sup>th</sup> percentile values of the PC distribution allows more individuals to be qualified for compensation benefits, avoiding that meritorious cases are not properly compensated. As the estimation of PC for radiation related cancers is based on the existing scientific knowledge about cancer risk due to radiation exposure, its use in compensation programmes has been considered the best scientific option to evaluate the causal relationship for radiogenic cancers in compensations requests. In this context, this work may support the development and implementation of a formal compensation programme for radiation-related cancer in Brazil.

*Keywords:* Compensation Program, Radiogenic Cancer, Probability of Causation.

---

## 1. INTRODUÇÃO

O aparecimento de doenças após exposição à radiação ionizante por motivos ocupacionais ou em decorrência de acidentes radiológicos ou nucleares tem gerado demandas compensatórias em vários países [1–5]. Alguns desses países possuem sistemas formais para avaliar essas demandas, podendo ser do tipo qualitativo ou quantitativo. Enquanto os sistemas qualitativos se baseiam apenas no tipo de exposição e câncer desenvolvido, os sistemas quantitativos estimam a probabilidade de que o câncer desenvolvido tenha sido causado pela exposição à radiação ionizante [1,3,6,7].

No Brasil, existem vários casos de solicitação de compensação financeira devido ao desenvolvimento de câncer após exposição à radiação por motivos ocupacionais [8,9] e, principalmente, em decorrência do acidente radiológico de Goiânia, em 1987 [10]. Entretanto, não há no país nenhum sistema formal estabelecido para avaliar e julgar estes pedidos de compensação. Cada caso é avaliado de forma independente, sem nenhuma ferramenta científica para nortear a avaliação da relação de causalidade entre a exposição à radiação ionizante e o desenvolvimento do câncer.

Embora a radiação ionizante seja um conhecido agente carcinogênico, o câncer é uma doença multifatorial e, conseqüentemente, não é possível distinguir se um determinado câncer foi induzido pela radiação ionizante ou por outros fatores de risco. Atualmente, não existe nenhum meio de diagnóstico que possa diferenciar um câncer radioinduzido daqueles com outras etiologias [1]. Alternativamente, pode-se utilizar uma abordagem estatística para estimar a probabilidade de causalidade (PC), isto é, a probabilidade de um câncer em particular ter sido causado por determinada exposição à radiação ionizante [1,6,7,11]. As estimativas da PC são baseadas nos modelos de risco de câncer obtidos através dos estudos epidemiológicos, principalmente aqueles com os sobreviventes das bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki [1,12,13]. Essas estimativas são influenciadas por fatores como sexo do indivíduo, idade na exposição, idade ao diagnóstico, dose de radiação no órgão que desenvolveu o câncer, e ainda, outros fatores de riscos relevantes (p. ex., fumo para o câncer de pulmão).

Recentemente o Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) desenvolveu, em parceria com o National Cancer Institute dos Estados Unidos da América (NCI), o programa RadRisk Brazil [14], que é uma adaptação para a população brasileira dos programas norte-americanos *Interactive Radioepidemiological Program* (IREP) [15] - que estima a PC de um câncer radioinduzido e *Radiation Risk Assessment Tool* (RadRat) [16] - que estima o risco de desenvolvimento de câncer ao longo da vida após exposição externa à radiação ionizante. O RadRisk Brazil estima a PC especificamente para a população brasileira, pois leva em consideração a expectativa de vida [17,18], o risco basal de câncer [19] e a prevalência de fumantes [20] da população do país como um todo ou, para cada uma das suas cinco diferentes regiões geográficas.

O objetivo desse trabalho é fazer uma revisão dos sistemas de compensação para doenças radioinduzidas existentes no mundo, discutir as vantagens e desvantagens dos mesmos e propor algumas abordagens para o estabelecimento de um sistema de compensação para o Brasil, utilizando as estimativas da PC. Este trabalho servirá para subsidiar as entidades envolvidas e/ou as autoridades competentes no Brasil na formulação de um sistema de compensação para câncer radioinduzido que seja economicamente e socialmente eficiente.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Revisão dos sistemas de compensação existentes

Foi realizada uma revisão não sistemática da literatura sobre diferentes tipos de sistema de compensação para doenças ligadas à radiação. Os portais de busca bibliográfica utilizados foram: Periódicos Capes, Pubmed, Scielo e Scholar Google. Como descritores, foram usadas as expressões: *compensation scheme AND cancer induced by ionizing radiation; probability causation of cancer caused by ionizing radiation; compensation claims AND cancer caused by ionizing radiation; indemnity and ionizing radiation induced cancer*. A seleção inicial considerou os seguintes critérios de inclusão: a) modalidade de publicação e produção científica: artigos em periódicos indexados, leis, *sites* e relatórios de instituições oficiais e b) idioma: inglês, português,

francês ou espanhol. Posteriormente, publicações com aderência ao tema foram selecionadas a partir do título e/ou da leitura dos resumos dos mesmos.

A comparação dos diferentes sistemas foi feita considerando o tipo de avaliação (qualitativa ou quantitativa), a população coberta, as doenças cobertas, os critérios de avaliação e o tipo de compensação e benefícios.

## 2.2. RadRisk Brazil

O RadRisk Brazil é uma adaptação para a população brasileira dos programas IREP e RadRat, desenvolvidos pelo NCI [15,16]. Maiores detalhes sobre a metodologia empregada foram descritos por Berrington de Gonzalez *et al.* (2012) [16], e podem ser acessados através do link: <https://www.irep.nci.nih.gov> [21]. O IREP e o RadRat se baseiam nos modelos de risco de câncer do Conselho Nacional de Pesquisa Americano - BEIR VII [13] para 11 tipos de câncer (estômago, cólon, fígado, pulmão, mama, útero, ovário, próstata, bexiga, tireoide e leucemia). Além desses, 8 novos modelos de risco desenvolvidos pelo NCI foram incluídos nesses programas (região da orofaringe, esôfago, vesícula, pâncreas, reto, rins, cérebro/sistema nervoso central e outros cânceres sólidos, exceto câncer de pele não-melanoma). Nesses programas as estimativas médias do risco e da probabilidade de causalidade são acompanhadas de um intervalo de incerteza de até 95%, considerando não somente as incertezas estatísticas, como também as incertezas das várias hipóteses envolvidas nos cálculos. No entanto, estes modelos foram desenvolvidos para a população norte-americana e assim só podem ser adequadamente utilizados em populações com expectativa de vida e taxas basais de câncer similares às de uma população de um país desenvolvido.

O RadRisk Brazil se baseia nos mesmos conceitos e modelos de risco de câncer do programa norte-americano RadRat [16], mas leva em consideração o risco basal de câncer da população brasileira como um todo (ou de cada uma de suas regiões geográficas), permitindo assim estimativas apropriadas para a população brasileira. O risco basal de câncer da população brasileira foi estimado a partir dos dados de incidência de câncer por sexo e faixa etária de 17 Registros de Câncer de Base Populacional do Brasil obtidos no site do Instituto Nacional de Câncer (INCA) para

o período de 2001-2005 [19], e a curva de expectativa de vida da população brasileira, por sexo e faixa etária foi obtida no DATASUS [17,18]. Recentemente, o programa norte-americano RadRat incluiu em sua versão *online* [21] a opção de estimar o risco de câncer devido a exposição à radiação ionizante para outras populações, incluindo a do Brasil. Além de estimar a probabilidade de um dado câncer ser atribuído a um histórico prévio de exposição à radiação ionizante, o RadRisk Brazil também permite estimar o risco subsequente de câncer para toda a vida após exposição à radiação. Ambas as estimativas só podem ser feitas para doses no órgão de até 1 Gy, pois os modelos de risco utilizados foram derivados de estudos epidemiológicos para doses menores ou iguais a 1 Gy.

### 2.3. Cálculo da PC

A PC permite identificar os casos de câncer que são mais provavelmente atribuíveis à exposição à radiação e, portanto, podem ser considerados mais relevantes para compensação [11,15,22]. A PC é basicamente a parte do risco que é atribuível à radiação, calculada em função do Excesso de Risco Relativo (ERR) pela seguinte fórmula [23,24]:

$$PC = \frac{\text{Risco devido a exposição à radiação}}{\text{Risco basal} + \text{Risco devido a exposição à radiação}} \times 100$$

ou

$$PC = \frac{ERR}{ERR + 1} \times 100$$

Onde o  $ERR = \frac{\text{Excesso de risco}}{\text{Risco basal}}$

O ERR é estimado através da aplicação dos modelos de risco para diferentes tipos de câncer, ajustados por sexo, idade na exposição, idade alcançada e dose de radiação.

### 2.4. Abordagem para um sistema brasileiro de compensação

Na concepção de qualquer sistema para avaliação de demandas compensatórias daqueles que potencialmente foram prejudicados pela exposição à radiação ionizante, deve-se considerar várias questões de natureza técnica, política e cultural do país e/ou organizações envolvidas [11].

Com base na avaliação das vantagens e desvantagens dos diferentes sistemas de compensação existentes e ainda, considerando o cálculo da PC, apontamos algumas estratégias que podem ser utilizadas em um sistema de compensação no Brasil.

Utilizando o RadRisk Brazil, estimamos a PC para os tipos de câncer mais frequentes na população feminina e masculina no Brasil em função da dose de radiação no respectivo órgão, para idade na exposição e idade no diagnóstico de câncer determinadas.

Para exemplificar, avaliamos quatro casos hipotéticos de demandas compensatórias para câncer potencialmente radioinduzido:

- Caso hipotético 1 - Mulher com exposição aguda à radiação gama externa aos 10 anos de idade, com dose na tireoide estimada em 10 cGy e posterior diagnóstico de câncer de tireoide aos 40 anos de idade.
- Caso hipotético 2 - Mulher com exposição aguda à radiação gama externa aos 25 anos de idade, com dose na tireoide estimada em 10 cGy e posterior diagnóstico de câncer de tireoide aos 40 anos de idade.
- Caso hipotético 3 - Homem com exposição aguda à radiação gama externa aos 20 anos de idade, com dose estimada no estômago de 40 cGy e posterior diagnóstico de câncer de estômago aos 40 anos de idade.
- Caso hipotético 4 - Homem com exposição crônica à radiação gama externa dos 20 anos aos 40 anos de idade, com dose estimada no estômago de 40 cGy (2 cGy/ano por 20 anos) e posterior diagnóstico de câncer de estômago aos 40 anos de idade.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1. Principais componentes de um sistema de compensação**

A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), a Organização Internacional do Trabalho (OIT) e a Organização Mundial da Saúde (OMS) desenvolveram um guia sobre a formulação e a aplicação da PC em programas de compensação para câncer radioinduzido [11]. De acordo com

este guia, a concepção de qualquer sistema para avaliar demandas compensatórias daqueles que potencialmente foram prejudicados pela exposição à radiação ionizante deve levar em consideração alguns pontos importantes, descritos a seguir [25,26].

Primeiramente, um sistema de compensação deve definir a população que será coberta. Tipicamente, em um sistema de compensação voltado para a exposição ocupacional, a população coberta é definida pelo local e tipo de trabalho, ou pela atividade/ocupação desempenhada. No caso de países que tiveram acidentes nucleares e/ou radiológicos, um sistema de compensação se aplica também à população por eles afetada. É importante enfatizar que sistemas de compensação não se aplicam a indivíduos expostos em decorrência de procedimentos médicos, sejam eles diagnósticos ou terapêuticos, tendo em vista que a exposição à radiação proveniente destes procedimentos é intencional e para o benefício direto do paciente [27].

O segundo critério é a elegibilidade (individual). Dentro da população inicialmente coberta, é necessário aplicar critérios de elegibilidade para refinar e identificar os indivíduos que sofreram exposição à radiação, tenha sido essa exposição monitorada ou não. Geralmente são elegíveis indivíduos que tenham registros de dose (ou evidências que sugiram a exposição) ou aqueles que tenham trabalhado em uma unidade específica, por um período de tempo específico, quando a probabilidade de exposição era razoável. Também deve ser necessário que o indivíduo tenha sido diagnosticado com uma doença considerada potencialmente radioinduzida (ou que essa tenha sido a causa de seu óbito) [26].

Uma vez identificados os indivíduos elegíveis, a avaliação da pertinência da compensação será determinada pela força da relação causal. Isso depende da dose recebida pelo requerente, entre outros fatores, como o tipo de exposição (aguda ou crônica), o tipo de radiação, o período de latência, a idade na exposição e o tipo de doença resultante [26]. Nas exposições ocupacionais a dose pode ser obtida através dos registros de dose individual [28]. As doses também podem ser estimadas considerando o local de trabalho, o tipo de atividade/ocupação e/ou o tempo trabalhado. No caso de acidentes, registros médicos e métodos de reconstrução de dose podem ser úteis. Na reconstrução de doses, o benefício de qualquer dúvida deve ser dado ao requerente, a fim de que a compensação não seja negada a pessoas potencialmente meritórias [26].

Um sistema de compensação deve ainda estabelecer critérios de compensação (ou não compensação). Os critérios não devem ser definidos tão estritamente de modo que poucos indivíduos satisfaçam os requisitos de inclusão, nem devem ser tão amplos que permitam que os requerentes com pouca prova de causalidade sejam indenizados. Ainda, os sistemas de compensação devem levar em consideração a realidade de cada país e a existência de outros métodos de compensação para outras exposições que não à radiação ionizante [26].

### **3.2. Comparação de diferentes sistemas de compensação existentes no mundo**

Identificamos ao menos 10 (dez) diferentes tipos de sistema de compensação para doenças potencialmente relacionadas à exposição à radiação ionizante, sendo cinco sistemas qualitativos e cinco quantitativos. Para cada um destes sistemas, identificamos a população coberta, a quantidade de doenças cobertas, o critério de elegibilidade e a pertinência da compensação, o tipo de compensação e benefícios.

A tabela 1 apresenta as principais características dos 5 diferentes sistemas de compensação do tipo qualitativo avaliados. São do tipo qualitativo os sistemas de compensação da Argentina [11,29,30], França [11,31,32], Rússia [11,33–35] e alguns dos sistemas dos Estados Unidos da América (EUA) [2,36,37]. Esses sistemas se baseiam na presunção de causalidade e são mais simples e mais fáceis de serem implementados. A principal desvantagem é a possibilidade de compensação de indivíduos que desenvolveram cânceres com fraca ou nenhuma associação com a exposição à radiação ionizante [11,29,38].

A elegibilidade depende da comprovação de realização de uma das atividades incluídas em uma lista que elenca situações de potencial exposição à radiação ionizante e ainda, da presença de uma das enfermidades elencadas numa lista de doenças potencialmente radioinduzidas [11,30,32,35,38]. Cada sistema tem sua própria lista, mas frequentemente estão incluídos certos tipos de câncer (p.ex.: leucemia e câncer de pulmão) e algumas doenças não malignas potencialmente

radioinduzíveis [11], como catarata, anemia, leucopenia, trombocitopenia [30,39] e alterações reprodutivas [30]. Os sistemas russo, argentino e o programa de veteranos norte-americano permitem que doenças potencialmente radioinduzidas, mas que não estejam incluídas na lista sejam avaliadas por uma comissão de especialistas para análise da possibilidade de compensação [11,30,34].

Nesses sistemas a compensação é frequentemente do tipo tudo ou nada. A compensação geralmente inclui alguma indenização financeira, com valor pré-estabelecido, e em alguns sistemas, também prevê benefícios de assistência à saúde, auxílio funeral e pensão [2,11,30,32,33,36,38].

**Tabela 1:** Características dos sistemas de compensação qualitativos.

País	Argentina	EUA		França	Rússia
		Programa de Veteranos	RECA <sup>a</sup>		
<b>População coberta</b>	-Indivíduos ocupacionalment e expostos	-Indivíduos expostos à radiação durante serviço militar -Esposas e dependentes de veteranos expostos à radiação	-Mineiro de urânio, moleiros, transportadores de minérios -Participantes locais de testes nucleares -Residentes em locais na direção do vento em relação aos testes nucleares em Nevada	-Indivíduos ocupacionalmente expostos	-Trabalhadores expostos em circunstâncias especiais <sup>b</sup> -Indivíduos ocupacionalmente expostos
<b>Doenças Cobertas</b>	-4 tipos de cânceres e 14 doenças não malignas -Outras doenças julgadas caso-a-caso	-Todos os tipos de câncer e 3 doenças não malignas -Outras doenças julgadas caso-a-caso	-Mineiros: câncer de pulmão e 5 doenças não malignas -Moleiros e transportadores de minério: 2 tipos de câncer e 6 doenças não malignas -Participantes locais e residentes em locais na direção do vento em relação aos testes nucleares em Nevada: 19 tipos de câncer	-3 tipos de cânceres e 13 doenças não malignas	-Trabalhadores expostos em circunstâncias especiais: todos os tipos de cânceres e 4 doenças não malignas -Indivíduos ocupacionalmente expostos: 18 tipos de cânceres e 3 doenças não malignas -Outras doenças julgadas caso-a-caso
<b>Critérios de</b>	-Exposição	-Exposição	-Exposição da população	-Exposição	-Histórico

<b>elegibilidade / Pertinência da compensação</b>	ocupacional incluída na lista de ocupações -Diagnóstico de doença coberta	durante o serviço militar -Diagnóstico de doença coberta	coberta -Diagnóstico de doença coberta	ocupacional incluída na lista de ocupações -Diagnóstico de doença coberta	ocupacional com registro de dose -Histórico médico e diagnóstico de doença coberta -Causalidade avaliada por conselho de especialistas
<b>Tipo de compensação / Benefícios</b>	-Indenização financeira associada ao tipo de doença (valor fixo) -Reembolso com gastos médicos	-Indenização financeira por incapacidade -Benefícios de saúde	-Indenização financeira (valor fixo) -Benefício de saúde apenas para mineiros	-Montante fixo ou prêmio anual por incapacidade -Indenização por dias de trabalho perdidos -Reembolso com gastos médicos	-Indenização financeira depende de incapacidade e do salário -Benefícios de saúde e sociais -Isenção de taxas e impostos
<b>Referências</b>	[29,30]	[36]	[2,37]	[11,32,39]	[11,34,35]

<sup>a</sup>RECA: *Radiation Exposure Compensation Act* (Programa de Compensação à Exposição à Radiação).

<sup>b</sup>Trabalhadores expostos em circunstâncias especiais: trabalhadores envolvidos nos acidentes (ou nas ações de remediação) ocorridos na Central Nuclear de Chernobyl em 1986, na instalação de Mayak em 1957, em submarinos, navios ou armas nucleares e associados às descargas de radionuclídeos na bacia do rio Techa.

A tabela 2 apresenta as principais características dos sistemas de compensação quantitativos. Nesses sistemas, a qualificação para compensação é baseada nas estimativas da PC, isto é, na probabilidade de um determinado câncer ter sido induzido em decorrência de determinada exposição à radiação [6,7,11]. O valor da PC também é frequentemente levado em consideração para a definição da compensação devida. Sistemas desse tipo são adotados na Coreia do Sul [5,38,40], Japão [11,41–44], Reino Unido [1,11,45] e para alguns grupos nos EUA [3,11,36,46].

A PC pode ser calculada como um valor absoluto, sem considerar as incertezas estatísticas e subjetivas dos modelos de risco. Alternativamente, as estimativas da PC podem levar em conta as incertezas associadas. Nesse caso, o valor do percentil de 99º da distribuição da PC ( $PC_{99^\circ}$ ) é geralmente utilizado como critério para avaliar a pertinência da compensação.

No sistema japonês, a PC é calculada usando os modelos de risco derivados dos estudos epidemiológicos com os sobreviventes da bomba atômica, sem levar em consideração as incertezas associadas [42,43]. São compensados todos os indivíduos com valor de PC maior ou igual a 50%,

não havendo compensação quando a PC for inferior a 10%. Quando o valor da PC está entre 10 e 50% a demanda compensatória é reavaliada por um grupo de especialistas [11,43].

O sistema do Reino Unido (*Compensation Scheme for Radiation-Linked Diseases – CSRLD*) adota os coeficientes de risco do BEIR VII para o cálculo da PC, e também usa o valor absoluto da PC, não levando em consideração as incertezas associadas. A compensação aos requerentes é baseada no “*Quantum*”, que é um valor acordado entre o sindicato dos trabalhadores e o empregador. Não são compensados indivíduos com PC menor que 20% e indivíduos com PC maior ou igual a 50% recebem o valor total do “*Quantum*”. Para PC entre 20 e 50% o valor do “*Quantum*” a ser pago é proporcional ao valor da PC estimada [45]. Essa gradação visa proteger aqueles requerentes potencialmente meritórios, mas que devido às incertezas inerentes e não estimadas do método obtiveram valores de PC inferiores a 50%. O CSRLD já avaliou 1496 casos desde 1982, com apenas 156 casos sendo qualificados para compensação [45].

**Tabela 2:** Características dos sistemas de compensação quantitativos.

País	EUA		Japão	Reino Unido	Coreia do Sul <sup>c</sup>
	EEIOCPA Parte B <sup>a</sup>	USCG LORSTA <sup>b</sup>			
<b>População coberta</b>	-Indivíduos ocupacionalmente expostos	-Veteranos da Guarda Costeira que trabalharam em estações de navegação de longo alcance	-Sobreviventes das bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki	-Indivíduos ocupacionalmente expostos	-Indivíduos ocupacionalmente expostos
<b>Doenças Cobertas</b>	-22 tipos de câncer	-22 tipos de câncer	-Doença possivelmente causada pela radiação da bomba atômica	-15 tipos de câncer e 1 doença não maligna	-29 tipos de câncer
<b>Critérios de elegibilidade/ Pertinência da compensação</b>	-Diagnóstico de doença coberta -Registro de emprego no DOE <sup>c</sup> ou empresa contratada pelo DOE <sup>c</sup> -Datas de início e fim da atividade ocupacional -Registro de dose ou dose estimada	-Diagnóstico de doença coberta -Registro de dose -Exposição durante serviço militar	-Certificado de sobrevivente das bombas atômicas -Diagnóstico de doença causada pela radiação ionizante da bomba atômica -Em casos de câncer o cálculo da PC é necessário	-Registro de emprego -Registro de dose -Empresa empregadora ser membro do CSRLD <sup>d</sup> -Filiação sindical -Diagnóstico de doença coberta	-Histórico ocupacional -Análise do ambiente de trabalho -Registros médicos -Diagnóstico de doença coberta -Investigação epidemiológica -Avaliação por comitê julgador
<b>Compensação por valor de PC</b>	-PC <sub>99%</sub> < 50%: Não -PC <sub>99%</sub> ≥ 50%: Sim	-PC <sub>99%</sub> < 50%: Não -PC <sub>99%</sub> ≥ 50%: Sim	-PC < 10%: Não -10% ≤ PC < 50%: julgado individualmente -PC ≥ 50%: Sim	-PC < 20%: Não -20% ≤ PC < 30%: ¼ <i>Quantum</i> <sup>e</sup> -30% ≤ PC < 40%: ½ <i>Quantum</i> <sup>e</sup> -40% ≤ PC < 50%: ¾ <i>Quantum</i> <sup>e</sup> -PC ≥ 50%: 100% <i>Quantum</i> <sup>e</sup>	-PC <sub>99%</sub> < 50%: Não -PC <sub>99%</sub> ≥ 50%: Sim
<b>Tipo de Compensação/ Benefícios</b>	-Indenização financeira -Benefício de saúde	-Indenização financeira -Benefício de saúde	-Benefícios médicos variados -Subsídio mensal -Auxílio funeral	-Indenização financeira	-Indenização Financeira -Benefício de saúde -Auxílio funeral -Pensão
<b>Referências</b>	[3,7],[46]	[36,47]	[41–44]	[1,45]	[5,38,40]

<sup>a</sup>EEIOCPA parte B: *Energy Employees Occupational Illness Compensation Program Act of 2000* (Ato de 2000 do Programa de Compensação de Doença Ocupacional para Trabalhadores da Energia nos EUA– Parte B).

<sup>b</sup>USCG LORSTA: *United States Coast Guard Veterans Stationed at Long Range Navigation Stations from 1942-2010* (Veteranos da Guarda Costeira dos EUA estacionados nas estações de navegação de longo alcance de 1942-2010).

<sup>c</sup>DOE: *US Department of Energy* (Departamento de Energia dos EUA).

<sup>d</sup>CSRLD: *Compensation Scheme for Radiation-Linked Diseases* (Esquema de compensação para doenças ligadas à radiação).

<sup>e</sup>Quantum é um valor financeiro acordado entre o sindicato dos trabalhadores e o empregador.

Nos sistemas norte-americanos [3,36] o cálculo da PC é feito pelo programa “National Institute of Occupational Safety and Health – Interactive Radioepidemiological Safety and Health” (NIOSH-IREP) [3,7], uma adaptação do programa IREP [15], e inclui as estimativas das incertezas associadas no cálculo da PC. Os requerentes são considerados qualificados para receber compensação quando o valor de PC<sub>99<sup>o</sup></sub> for maior ou igual a 50%. Foram indenizados 113.732 indivíduos entre 249.560 requerentes até 2015 pelo sistema norte-americano EEOICPA [48].

No sistema de compensação sul-coreano os casos de câncer potencialmente radioinduzidos passam por uma avaliação epidemiológica por especialistas do “Radiation Health Research Institute” (RHRI). A PC é estimada com as incertezas associadas, utilizando o programa “*Radiation Health Research Institute - Program for Estimating the Probability of Causation*” (RHRI-PEPC), desenvolvido para a população sul-coreana. O requerente recebe a compensação se o valor da PC<sub>99<sup>o</sup></sub> for maior que 50%, enquanto que os valores inferiores a 50% não qualificam os requerentes. No entanto, alguns casos com PC<sub>99<sup>o</sup></sub> menor que 50% foram aceitos para compensação após análises pelo comitê julgador, pois a dose foi considerada subestimada [5,40]. De 2005 a 2014, 5 dentre 16 requerentes foram qualificados para receber compensação [40].

Enquanto todos os sistemas quantitativos oferecem alguma indenização financeira ao requerente qualificado, os benefícios de assistência à saúde, auxílio funeral e pensão variam de acordo com o sistema (Tabela 2) [3,41,45]. O Reino Unido é o único país no qual a indenização financeira é o único tipo de compensação concedida [45].

### **3.2. Proposta de um sistema de compensação para câncer radioinduzido no Brasil**

Considerando as vantagens e desvantagens dos programas de compensação existentes e a disponibilidade de uma ferramenta de cálculo da PC, específica para a população brasileira, (RadRisk Brazil), a concepção de um sistema de compensação quantitativo para cânceres potencialmente radioinduzidos no Brasil deveria considerar os seguintes aspectos:

**População coberta** – Toda população ocupacionalmente exposta à radiação no Brasil deveria estar coberta por um sistema de compensação de cânceres potencialmente radioinduzidos. O sistema brasileiro deveria incluir também os indivíduos afetados pelo acidente radiológico de Goiânia, que são a maioria dos casos de solicitação de compensação por doenças potencialmente radioinduzidas no país. Outras exposições acidentais também poderiam ser consideradas, mas exposições em áreas de radiação natural ou de pacientes em procedimentos médicos estariam fora do escopo do sistema proposto.

**Critérios de elegibilidade** – Deveriam ser considerados elegíveis os indivíduos da população coberta que comprovarem ter desenvolvido câncer subsequentemente à exposição ocupacional ou acidental à radiação ionizante. Doenças não malignas potencialmente radioinduzidas não serão consideradas nessa proposta de sistema de compensação brasileiro. A neoplasia poderá ser comprovada através de diagnóstico clínico, de imagem, molecular e/ou histopatológico de câncer, ou por certidão de óbito indicando neoplasia como causa *mortis*. A comprovação da exposição ocupacional poderá se dar por meio documental (carteira de trabalho, relatórios de registro de dose, declaração do empregador, *etc.*) ou testemunhal. A exposição acidental frequentemente pode ser comprovada por registros, feitos pelo empregador ou ainda, por órgãos governamentais, como o Corpo de Bombeiros ou a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). No caso do acidente de Goiânia, em particular, a CNEN conduziu a monitoração e o registro de 112.800 indivíduos, tendo sido identificados 249 indivíduos com taxa de exposição indicativa de contaminação interna e/ou externa [49].

**Avaliação da pertinência da compensação** - Sugerimos que o Brasil adote um sistema de compensação para câncer radioinduzido do tipo quantitativo, com a utilização do programa RadRisk Brazil para calcular a estimativa da PC nos casos que atenderam aos critérios de elegibilidade estabelecidos. Nessa abordagem, a adequação da compensação é determinada pela força da relação causal, expressa pela magnitude da PC. Ou seja, quanto maior a PC, maior é a probabilidade de que o câncer desenvolvido tenha sido resultante da exposição à radiação.

Após a determinação da PC, propomos dois critérios para determinar a pertinência da compensação devida aos requerentes:

*Critério 1* – Compensação baseada no valor do percentil de 99º da distribuição da PC ( $PC_{99^\circ}$ ): com base neste critério, o requerente seria qualificado para o recebimento da compensação quando a  $PC_{99^\circ}$  for maior ou igual a 50%. O uso da  $PC_{99^\circ}$  adota o princípio de “favorecimento” ao requerente, isto é, reduz a chance de que um pedido meritório seja negado. Entretanto, existe a possibilidade de que pedidos não meritórios possam ser indevidamente compensados [50], uma vez que a  $PC_{99^\circ}$  é um valor bastante conservativo. Nesse critério, a compensação seria do tipo tudo ou nada, isto é, somente o requerente com  $PC_{99^\circ}$  maior ou igual a 50% seria considerado apto a receber a compensação, tendo então direito a todos os benefícios previstos.

*Critério 2* – Compensação baseada no valor médio da distribuição da PC ( $PC_{\text{médio}}$ ): neste critério, o requerente seria qualificado para o recebimento integral da compensação quando o  $PC_{\text{médio}}$  for maior ou igual a 50%. Como este critério é pouco conservativo, as chances de um pedido potencialmente meritório ser indevidamente negado são maiores. A fim de minimizar esse problema, sugere-se que sejam pagos valores parciais de compensação, proporcionais aos valores da PC, para  $PC_{\text{médio}}$  entre 20 e 50%. Para  $PC_{\text{médio}}$  menor que 20% não haveria nenhuma compensação.

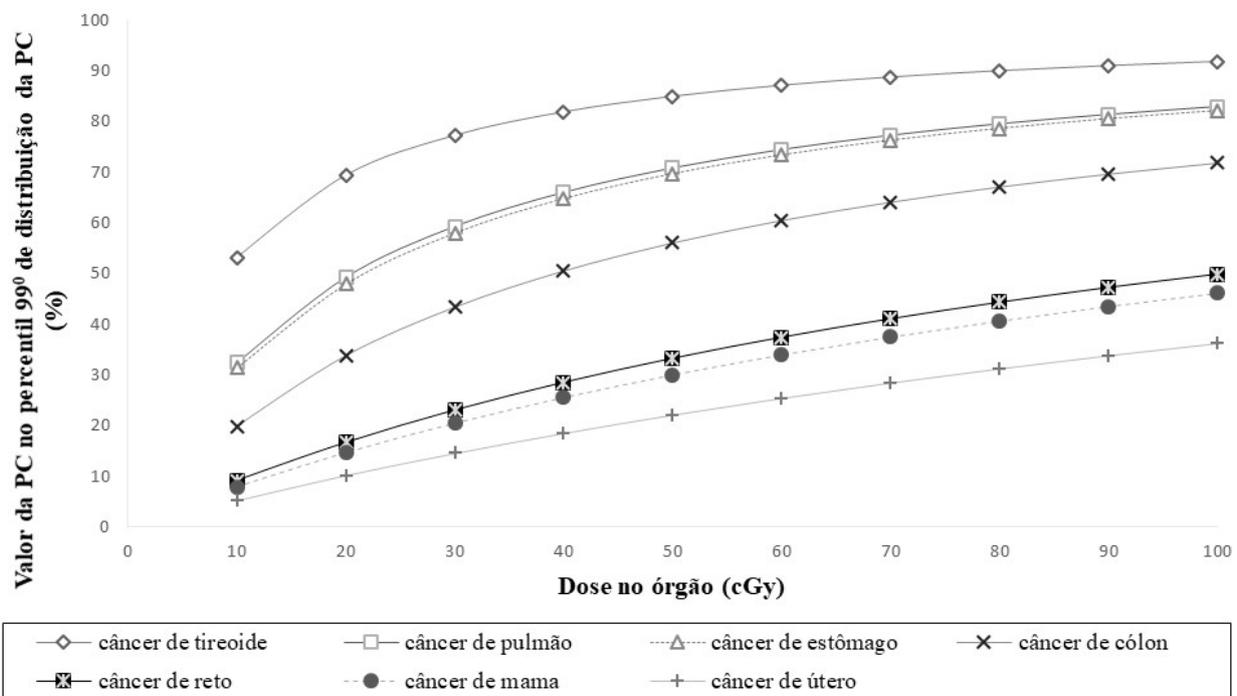
**Tipo de compensação/benefícios** – A determinação do valor financeiro da indenização e a disponibilização de outros benefícios, como auxílio saúde ou funeral e pensão para dependentes, entre outros, deverão ser previamente discutidos por todas as organizações governamentais. Caso haja necessidade de mudança legislativa caberá ao Congresso Nacional a implementação, levando-se em consideração aspectos sociais, éticos e econômicos, incluindo o número potencial de casos a serem compensados.

### **3.3. Avaliação da aplicabilidade da PC calculada pelo RadRisk Brazil para determinação da pertinência da compensação**

Considerando a implantação de um sistema quantitativo de compensação para câncer radioinduzido no Brasil, avaliamos a aplicabilidade da PC estimada pelo RadRisk Brazil como parâmetro para determinar a pertinência da compensação em alguns estudos de caso hipotéticos. Inicialmente, calculamos a PC para os tipos de câncer mais frequentes em mulheres, em função da dose do órgão. Assumiu-se que as mesmas foram expostas à radiação gama externa aos 20 anos de

idade e diagnosticadas com a doença 20 anos após a exposição (logo, um período de latência de 20 anos). A figura 1 apresenta os valores do PC<sub>99<sup>o</sup></sub>, calculados em função da dose no órgão, para os tipos de câncer mais frequentes em mulheres no Brasil.

**Figura 1:** Valor da PC no percentil de 99<sup>o</sup> da distribuição para diferentes tipos de câncer em função da dose no respectivo órgão (cGy), em mulheres expostas à radiação externa do tipo gama aos 20 anos de idade e diagnosticadas com a doença 20 anos após a exposição.



O câncer de tireoide, seguido pelos tumores de pulmão, estômago e cólon apresentam os maiores valores de PC<sub>99<sup>o</sup></sub> para todas as doses avaliadas. Logo, demandas compensatórias de mulheres que desenvolveram estes tipos de câncer após exposição à radiação ionizante seriam mais frequentemente reconhecidas como pertinentes. Por outro lado, demandas de portadoras de tumores de reto, mama e útero, que apresentam os menores valores de PC<sub>99<sup>o</sup></sub> para todas as faixas de doses, seriam menos frequentemente reconhecidas como meritórias de compensação.

A tabela 3 apresenta os valores estimados de  $PC_{\text{médio}}$  [intervalo de confiança de 95% (95% IC)] e  $PC_{99^{\circ}}$  para dois casos hipotéticos (casos 1 e 2). No caso 1, o valor de  $PC_{99^{\circ}}$  estimado foi 72,2%. A requerente seria indicada a receber o valor total da compensação caso fosse usado o critério de compensação baseado no  $PC_{99^{\circ}} > 50\%$  (critério 1). Entretanto, pelo critério baseado no  $PC_{\text{médio}}$ , que adota a proporcionalidade da compensação de acordo com o valor de  $PC_{\text{médio}}$  quando esse valor está entre 20 e 50% (critério 2), a compensação seria parcial. No caso 2, representando uma exposição mais tardia, aos 25 anos de idade, com a doença aparecendo após um período de latência mais curto (15 anos), não haveria qualificação para compensação por nenhum dos critérios propostos (tabela 3).

**Tabela 3:** Estimativa do valor médio de distribuição (95% IC) e valor do percentil de 99º da distribuição da PC (%) para câncer de tireoide em uma mulher exposta à radiação gama externa (dose aguda de 10 cGy na tireoide).

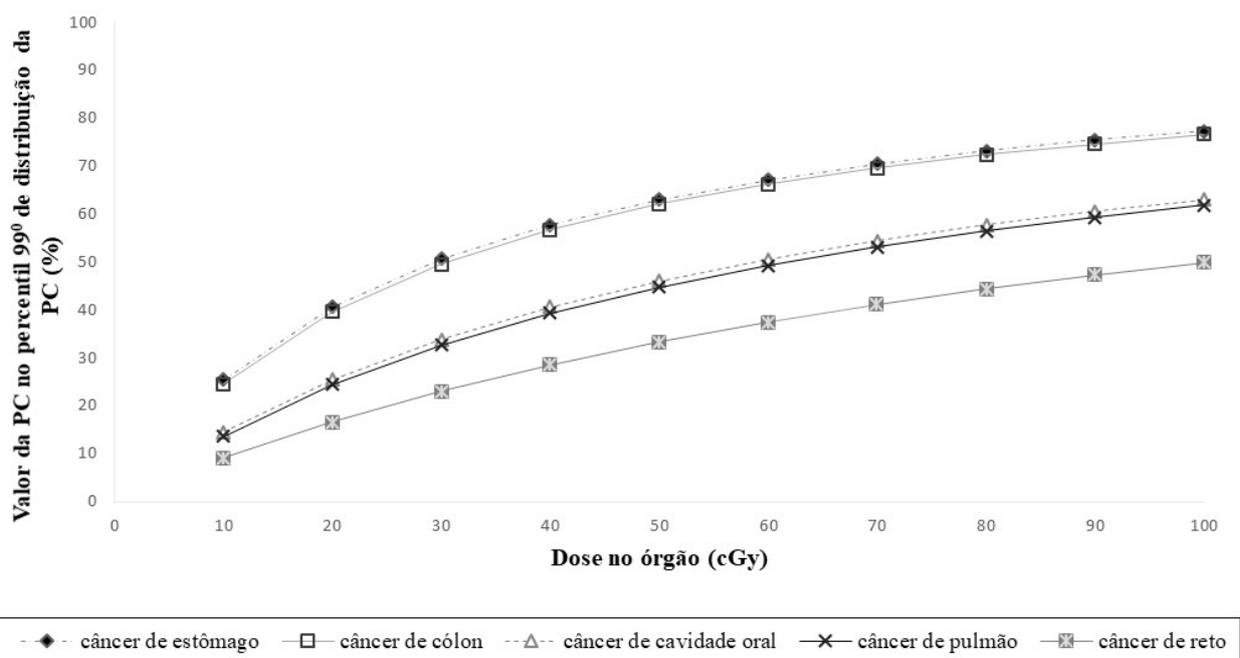
Estudo de caso	Idade na exposição (anos)	Idade ao diagnóstico (anos)	$PC_{\text{médio}}$ (%) (95%IC)	$PC_{99^{\circ}}$ (%)	Qualificação para Compensação	
					Critério 1 <sup>a</sup>	Critério 2 <sup>b</sup>
Caso 1	10	40	40,3 (12,6-66,7)	72,2	Sim, integral	Sim, parcial
Caso 2	25	40	16,3 (4,0-36,6)	42,8	Não	Não

<sup>a</sup> Qualificado para compensação integral somente se o valor de  $PC_{99^{\circ}} \geq 50\%$ .

<sup>b</sup> Qualificado para compensação integral se o valor de  $PC_{\text{médio}} \geq 50\%$ ; qualificado para compensação parcial quando o valor de  $PC_{\text{médio}}$  estiver entre 20% e 50%; e não qualificado para compensação se o valor de  $PC_{\text{médio}} < 20\%$ .

A figura 2 apresenta os valores da  $PC_{99^{\circ}}$  calculados pelo RadRisk Brasil, em função da dose no órgão, para os tipos de câncer mais frequentes em homens, assumindo exposição à radiação gama externa aos 20 anos de idade e diagnóstico 20 anos após a exposição. Os tumores de estômago e cólon são os que apresentam os maiores valores de PC, para todas as faixas de doses. Logo, estes tumores são os mais prováveis de serem reconhecidos como radioinduzidos após exposição à radiação ionizante na população masculina. Por outro lado, os tumores de pulmão, cavidade oral e reto apresentam as menores estimativas de PC em homens.

**Figura 2:** Valor da PC no percentil de 99° da distribuição para diferentes tipos de câncer, em função da dose no respectivo órgão (cGy), em homens expostos à radiação externa do tipo gama aos 20 anos de idade e diagnosticados com a doença 20 anos após a exposição.



A tabela 4 mostra os resultados dos valores de  $PC_{\text{médio}}$  (intervalo de confiança de 95%) e  $PC_{99^\circ}$  estimados para os casos hipotéticos 3 e 4. O requerente estaria qualificado para receber 100% da compensação caso fosse aplicado o critério 1, baseado no valor do percentil de 99° da distribuição da PC. A compensação seria apenas parcial se fosse usado o critério 2, baseado no valor de  $PC_{\text{médio}}$ . Entretanto, caso a mesma dose fosse recebida ao longo do tempo (2 cGy/ano por 20 anos), o requerente não seria indicado à compensação qualquer que fosse o critério usado.

**Tabela 4:** Estimativa do valor médio de distribuição (95% IC) e valor do percentil de 99º da distribuição da PC (%) para câncer de estômago em um homem exposto à radiação gama externa com dose no órgão de 40 cGy (exposição aguda ou crônica).

Estudos de caso	Exposição	Idade na exposição (anos)	Idade ao diagnóstico (anos)	PC <sub>médio</sub> (%) (95%IC)	PC <sub>99º</sub> (%)	Qualificação para Compensação	
						Critério 1 <sup>a</sup>	Critério 2 <sup>b</sup>
Caso 3	Aguda	20	40	28,6 (10,0-55,4)	57,7	Sim, integral	Sim, parcial
Caso 4	Crônica	20 aos 40	40	13,0 (3,0-34,1)	38,4	Não	Não

<sup>a</sup> Qualificado para compensação integral somente se o valor de PC<sub>99º</sub> ≥ 50%.

<sup>b</sup> Qualificado para compensação integral se o valor de PC<sub>médio</sub> ≥ 50%; qualificado para compensação parcial quando o valor de PC<sub>médio</sub> estiver entre 20% e 50%; e não qualificado para compensação se o valor de PC<sub>médio</sub> < 20%.

#### 4. DISCUSSÃO

Esse trabalho propõe o uso do programa de avaliação de risco RadRisk Brazil como uma ferramenta para a avaliação de demandas compensatórias de indivíduos que desenvolveram câncer após prévia exposição ocupacional ou acidental à radiação ionizante no Brasil. A avaliação de diferentes casos hipotéticos mostrou que as estimativas da PC obtidas usando o RadRisk Brazil permitiram identificar os indivíduos que mais provavelmente desenvolveram câncer em decorrência da exposição à radiação ionizante, estando assim qualificados para receber compensações de acordo com o critério de qualificação a ser escolhido.

Os modelos de avaliação do risco de desenvolvimento de câncer após exposição à radiação ionizante incorporam várias fontes de incertezas, como: erros de modelagem, variedades de mecanismos biológicos, diferentes estimativas de risco basais, incertezas nas estimativas de dose,

confundimentos, interações, outros fatores de risco fortes e exposição a outras fontes de exposição à radiação [51]. Existem também incertezas do próprio modelo de risco, já que dificilmente um modelo de risco será a representação perfeita da realidade [11], que também devem ser levadas em conta na formulação de um sistema de compensação. A avaliação da pertinência da compensação em sistemas quantitativos é frequentemente baseada em estimativas do valor de  $PC_{99^\circ}$  ou, alternativamente, do valor absoluto da PC. O uso do valor absoluto da PC não leva em consideração as incertezas associadas às estimativas da PC. Essa estratégia aumenta a possibilidade de negação a um pedido meritório. Essa possibilidade é reduzida quando se utiliza como critério o valor do percentil de 99º da distribuição da PC (critério 1), que incorpora as incertezas estatísticas e subjetivas associadas à estimativa da PC. Entretanto, o uso do valor de  $PC_{99^\circ}$  aumenta a chance de compensação de pedidos potencialmente não meritórios. O RadRisk Brazil apresenta as estimativas da PC na forma de distribuição de probabilidades, possibilitando o uso de  $PC_{\text{médio}}$  ou  $PC_{99^\circ}$  para a avaliação da adequação de demandas compensatórias.

A análise de casos hipotéticos mostrou que a aplicação dos critérios baseados nos valores de  $PC_{\text{médio}}$  ou  $PC_{99^\circ}$  estimados pelo RadRisk Brazil não resultou em diferenças na qualificação para compensação quando ambos os valores sugerem uma fraca associação causal (tabelas 3 e 4). Entretanto, há situações nas quais o critério baseado no valor de  $PC_{99^\circ}$  sugere uma associação causal forte, implicando na qualificação para compensação integral ao requerente, enquanto o que o critério baseado no valor de  $PC_{\text{médio}}$  indicaria uma associação fraca com subsequente compensação parcial (tabelas 3 e 4). Considerando a disponibilidade das estimativas de  $PC_{99^\circ}$  e o número relativamente baixo de demandas indenizatórias no Brasil, sugerimos a aplicação do  $PC_{99^\circ}$  para a avaliação da adequação das demandas compensatórias no Brasil, de modo similar ao Programa EEOICPA dos EUA [3,7] e ao sistema sul-coreano [38,40]

As estimativas da  $PC_{99^\circ}$  em função da dose no órgão para alguns dos tipos de câncer mais incidentes na população brasileira mostraram os tumores mais frequentemente induzidos por prévia exposição à radiação ionizante seriam os de estômago e colón em homens e os de tireoide e pulmão em mulheres. Ainda, observamos que para um mesmo tipo de câncer e mesma dose recebida, há diferença na indução de câncer pela exposição à radiação ionizante entre os sexos masculino e

feminino. Enquanto para homens uma  $PC_{99\%}$  maior que 50% para câncer de pulmão é estimada para dose no órgão de cerca de 70 cGy, em mulheres esse valor é atingido para doses pouco acima de 20 cGy (Figuras 1 e 2). Esta diferença é explicada pelo fato de que o coeficiente de risco para câncer de pulmão em mulheres ( $ERR/Gy=1,4$  (95% IC: 0,94-2,1) é cerca de 4 vezes maior do que o coeficiente de risco para homens ( $ERR/Gy=0,32$  (95% IC:0,15–0,70) [13,16].

O risco de desenvolvimento de câncer é inversamente proporcional à idade na exposição para vários tipos de câncer [13,42]. Para o câncer de tireoide, em particular, o risco diminui com o aumento da idade na exposição, há um período de latência de no mínimo 5 anos entre a exposição e o desenvolvimento da doença e o excesso de risco persiste por mais de 30 anos após a exposição [52]. Nossa avaliação de casos hipotéticos de mulheres com câncer de tireoide, nos quais a principal variação foi a idade na exposição e o período de latência, demonstrou que o método proposto também considerou adequadamente esses parâmetros como fatores modificadores do risco de câncer de tireoide. Uma dose de 10 cGy na tireoide aos 10 anos resultou numa estimativa de  $PC_{99\%}$  de 72,2% para o desenvolvimento de um câncer nesse órgão aos 40 anos (caso hipotético 1), enquanto a estimativa para uma exposição com a mesma dose aos 25 anos de idade foi de apenas 42,8% para desenvolvimento de câncer após um período de latência de 15 anos (caso hipotético 2). Resultados similares foram observados para as estimativas de  $PC_{médio}$  (40,3% para exposição aos 10 anos e 16,3% para exposição aos 25 anos) (tabela 3).

Os valores de PC para câncer de tireoide nos casos hipotéticos 1 e 2 são os mesmos caso o risco basal de câncer da utilizado seja o da população norte-americana. Isto ocorre porque o modelo de risco adotado para câncer de tireoide se baseia apenas no modelo de ERR, que independe do risco basal de câncer, pois expressa um aumento proporcional no risco basal de câncer. O modelo de risco de câncer de tireoide é o único que é expresso somente pelo modelo de ERR. As estimativas para todos os outros tipos de câncer se baseiam na combinação dos modelos de ERR e de Excesso de Risco Absoluto (EAR), dado pelo risco de câncer adicional acima do risco basal de câncer, conforme descrito em Berrington de Gonzalez et al. , 2012 [16].

O risco de desenvolvimento de câncer também é influenciado pela taxa de dose [15,16]. O modelo usado no RadRisk Brazil aplica a distribuição de probabilidade log-normal ao fator de eficiência da dose e taxa de dose (*Dose and Dose Rate Effectiveness Factor* - DDREF), com média geométrica igual a 1,5 e desvio geométrico de 1,35, resultando valores da PC mais baixos para exposições crônicas [16]. Estimamos PC<sub>99º</sub> igual a 57,7% para câncer de estômago após a exposição aguda desse órgão à 40 cGy (caso hipotético 3), enquanto que a mesma dose recebida ao longo do tempo (20 anos) resultou numa PC<sub>99º</sub> de 38,4% (caso hipotético 4). As estimativas de PC<sub>médio</sub> para câncer de estômago em homens também foram menores para exposição crônicas (PC<sub>médio</sub> = 28,6%) do que para exposições agudas (PC<sub>médio</sub> = 13,0%) (tabela 4).

Utilizando o risco basal de câncer da população americana para calcular a PC de câncer de estômago no caso hipotético 3, obteve-se valores de PC muito maiores (PC<sub>médio</sub> igual a 51,9% e PC<sub>99º</sub> igual a 84,25%) do que utilizando o risco basal de câncer da população brasileira. As taxas de incidência basal de câncer de estômago para homens entre 40 e 44 anos de idade são menores nos EUA do que no Brasil (3,2 e 11,7/100.000 habitantes, respectivamente) [14,20]. Esta menor taxa de incidência de câncer de estômago nos EUA, quando aplicada nos modelos de EAR, confere uma maior PC, pois o incremento de risco absoluto é proporcionalmente maior quando aplicado a um menor risco basal de câncer do que a um valor maior de risco basal de câncer. Isso corrobora a importância em usar o risco basal de câncer específico da população de estudo para o cálculo da PC.

Uma dificuldade dos sistemas quantitativos de compensação é que o cálculo da PC depende de estimativas da dose absorvida no órgão afetado pela doença. Nas exposições ocupacionais, essas estimativas frequentemente podem obtidas a partir dos registros de dose ocupacionais. Na ausência desses registros, as doses ainda podem ser estimadas, usando metodologias de reconstrução de dose baseadas em registros ocupacionais, dados de monitoramento de áreas e/ou modelos matemáticos [53]. Nos casos de exposições acidentais, as doses também podem ser estimadas a partir do cenário do acidente radiológico, como feito nos sistemas norte-americano USCG LORSTA [47] e EEIOCPA [53]. No Brasil, indivíduos ocupacionalmente expostos devem obrigatoriamente ser submetidos à monitoração individual, de acordo com a Norma CNEN NN 3.01 (Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica) [28]. Ainda, as doses resultantes da exposição à radiação no acidente de

Goiânia foram estimadas por metodologias de dosimetria interna (bioensaio e monitoramento de corpo inteiro) e dosimetria externa (estimativas da reconstrução de dose e avaliação dos efeitos da radiação), ou ainda, através de análise citogenética (análise de aberrações cromossômicas) [49,54].

Uma limitação do sistema aqui proposto é a impossibilidade de usar esta abordagem para doenças não malignas potencialmente radioinduzidas, como por exemplo, catarata, anemia ou radiodermite crônica [30]. Alguns sistemas quantitativos listam doenças não malignas, indicando a compensação aos requerentes quando há evidência suficiente de que houve exposição à radiação ionizante, mesmo sem estimativas da PC. Por exemplo, isso ocorre para catarata no CSRLD [45]. O sistema de compensação aqui proposto contempla apenas câncer, mas é possível que uma lista de doenças não malignas associadas à exposição à radiação ionizante possa ser incorporada futuramente para uso em casos de demandas compensatórias para estas doenças.

Existem diversos desafios para implantação de um sistema de compensação financeira voltado a indivíduos com câncer radioinduzidos no Brasil. Um importante aspecto a ser considerado é que todo tipo de compensação por dano no Brasil é feito, quase que exclusivamente, pelo poder judiciário. A legislação brasileira carece de norma que permita a utilização do RadRisk Brazil para definir quem tem direito à compensação financeira. O sistema jurídico vigente tem por regra o livre convencimento motivado do juiz que, em apertada síntese, confere ao magistrado amplo poder discricionário para avaliar e sopesar as provas trazidas ao processo. Desta forma, na ausência de lei em sentido diverso, o juiz brasileiro não está obrigado a julgar em conformidade com qualquer programa de cálculo de probabilidades, por mais exato e seguro que este seja. Portanto, cada juiz poderá julgar um processo de forma diversa, com base em provas de qualquer natureza trazidas pelas partes, podendo, até mesmo, dar mais peso a provas menos científicas do que a eventual cálculo estatístico sem que, assim o fazendo, cometa qualquer ilegalidade [55].

Uma vez que as estimativas de probabilidade de causalidade para câncer radioinduzido se baseiam no melhor conhecimento científico existente sobre os riscos de desenvolvimento de câncer em decorrência da exposição à radiação ionizante, o uso dessas estimativas é a melhor opção para avaliar a relação de causalidade em demandas compensatórias de indivíduos com câncer

alegadamente radioinduzido. Neste contexto, o programa RadRisk Brazil, que estima a PC com as incertezas associadas, poderá auxiliar na implementação de um sistema formal de compensação para doenças radioinduzidas no Brasil. O objetivo deste artigo foi demonstrar a aplicabilidade da PC em demandas compensatórias no Brasil, utilizando o programa Radisk Brazil. No entanto, a implementação e a adoção do mesmo num sistema de compensação para doenças radioinduzidas no Brasil é uma questão que deverá ser discutida com as diversas instituições envolvidas, incluindo as que possuem competência para regulamentar o assunto.

## 5. CONCLUSÃO

O Brasil não conta com um sistema formal para compensação de indivíduos que desenvolveram câncer após exposição à radiação ionizante. A presente proposta de utilização da PC para câncer radioinduzido calculada pelo programa RadRisk Brazil na avaliação de demandas compensatórias de indivíduos que desenvolveram câncer após prévia exposição ocupacional ou acidental à radiação ionizante poderá servir de guia para o desenvolvimento de um sistema formal, quantitativo, de avaliação e atendimentos dessas demandas no Brasil.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro (bolsa de doutorado) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) para o desenvolvimento desse trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] WAKEFORD, R.; ANTELL, B.A.; LEIGH, W.J. A review of probability of causation and its use in a compensation scheme for nuclear industry workers in the United Kingdom. **Health Phys** v. 74, p. 1-9, 1998.

- [2] SZYMENDERA, S.D. The radiation exposure compensation act (RECA): compensation related to exposure to radiation from atomic weapons testing and uranium mining. **CRS Report - Congressional Research Service**, 2017.
- [3] SILVER, K. The energy employees occupational illness compensation program act: new legislation to compensate affected employees. **AAOHN J**, v. 53, n. 6, p. 267-277, 2005.
- [4] PARASCANDOLA, M.J. Compensating for cold war cancers. **Environ Health Perspect**, v. 110, n. 7, p. 404-407, 2002.
- [5] JIN, Y.W.; JEONG, M., MOON, K.; JO, M.H., KANG, S.K. Ionizing radiation-induced diseases in Korea. **J Korean Med Sci**, v.25, p.70-76, 2010.
- [6] WILSON, R. Probability of causation: it's use in compensation schemes. **Nucl News**, 2001.
- [7] Guidelines for determining the probability of causation under the energy employees occupational illness compensation program act of 2000. **Federal Register**, vol. 66, No. 194, 2001.
- [8] Trabalhador exposto a radiação receberá indenização por receio de adquirir doenças oncológicas. Disponível em: [http://www.tst.jus.br/noticias/-/asset\\_publisher/](http://www.tst.jus.br/noticias/-/asset_publisher/). Acessado em 20 de junho de 2017.
- [9] BRASIL. Tribunal Superior do Trabalho. Agravo de Instrumento Recurso de Revista nº 1105-27.2012.5.03.0149. Agravante: José Wagner Tomazoli e Indústrias Nucleares do Brasil S.A. - INB. Agravada: os mesmos. Ministro Relator: Mauricio Godinho Delgado.
- [10] Acidente radioativo com o Césio-137. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/jurisprudencia/busca?q=ACIDENTE+RADIOATIVO+COM+O+CÉSIO-137>. Acessado em 20 de junho de 2017.
- [11] NIU, S.; DEBOODT, P.; ZEEB, H. Approaches to attribution of detrimental health effects to occupational ionizing radiation exposure and their application in compensation programmes for cancer - a practical Guide. IAEA, ILO e WHO. **Occupational Safety and Health Series, No. 73**. Geneva, ILO, 2010.
- [12] WAKEFORD, R. Occupational exposure, epidemiology and compensation. **Occup Med**, v. 56, p. 173-179, 2006.

