



## ALGUNS DESAFIOS FUTUROS PARA O SISTEMA INTERNACIONAL DE PROTEÇÃO CONTRA A RADIAÇÃO

**Abel Julio Gonzalez**

### 1. INTRODUÇÃO

O sistema internacional de proteção contra a exposição às radiações ionizantes, conhecido como sistema de proteção radiológica, tem uma longa tradição. Após mais de um século de atividade profissional, consolida-se como um sistema global de segurança para radiações ionizantes, tornando-se um dos mais significativos sucessos internacionais e intergovernamentais.

O sistema é universal e consensual e se baseia em um acordo internacional e intergovernamental ampliado, conforme segue:

- baseia-se em ciência internacionalmente aceita acordada pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR, 2010a, 2010b, 2015) e endossada pelo mais alto órgão intergovernamental internacional, a Assembleia Geral das Nações Unidas (UNGA, 2012);
- baseia-se no paradigma universalmente aceito desenvolvido ao longo de anos pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP, 2007a);
- deu origem a um regime intergovernamental de padrões que, sob os auspícios da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 1960, 1976), são copatrocinados por todas as organizações internacionais relevantes, a Comunidade Europeia de Energia Atômica (Euratom), as Nações Unidas para Alimentação e Agricultura das Nações Unidas (FAO), a Organização Internacional do Trabalho (OIT), a Organização Marítima Internacional (IMO), a Agência de Energia Nuclear da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE/NEA), a Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS), o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Mundial da Saúde (OMS), que inclui *inter alia*: princípios fundamentais de segurança (Euratom et al., 2006); normas básicas de proteção contra a radiação e de segurança das fontes de radiação (EC et al., 2014) (identificadas com a sigla BSS da expressão em inglês *Basic Safety Standards*); e um glossário internacional de termos (IAEA, 2019).
- é aplicado por meio de obrigações assumidas pelos Estados, como a Convenção nº 115 da OIT, de 1960, sobre a proteção contra a radiação ocupacional (ILO, 1960) e as muitas convenções e códigos de conduta acordados sob os auspícios da IAEA;

- inclui disposições para aplicações práticas endossadas por todas as organizações internacionais relevantes.

Apesar de seu sucesso, após quase um século de bons serviços, o sistema pode precisar de alguma revisão. Por exemplo, o paradigma da ICRP é um modelo ético, científico e internacional, mas já foi discutido que pode precisar ser atualizado, embora deva ser evitado intrometer-se nele. Algumas sugestões foram feitas para fortalecê-lo sem alterar suas raízes, tais como:

- o paradigma deve assimilar as novas demandas de licença social;
- a ética por trás dos princípios nos quais o paradigma se baseia deve ser descrita;
- um princípio de proteção das gerações futuras e de seu habitat deve ser especificamente incorporado;
- os limites de dose e sua justificativa precisariam de uma revisão completa;
- seria necessário rever a transição entre as situações durante e depois de uma emergência;
- os princípios de proteção ocupacional devem se estender à radiação natural, aos trabalhadores não envolvidos diretamente com a radiação, aos trabalhadores voluntários e aos “socorristas” de emergência (ou “liquidadores”), e até mesmo aos “consoladores” de pacientes;
- as exposições médicas devem ser separadas em diagnósticas e terapêuticas para pacientes, e discricionárias daquelas que confortam pacientes ou daquelas que se voluntariam para pesquisa médica;
- novas recomendações sobre magnitudes e unidades devem ser incorporadas, distinguindo claramente as magnitudes intensivas das extensivas e as magnitudes físicas das de proteção;
- deve ficar claro o alcance do paradigma, incluindo os conceitos de exclusão e isenção, integrando as situações de exposição à radiação natural e resolvendo o problema da regulação dos bens de consumo que contenham substâncias radioativas;
- deve-se esclarecer a sigla LNT, que se traduz como “relação linear (dose-efeitos) sem limiar”, seja como modelo de proteção radiológica, como conjectura epidemiológica ou como teoria biológica (ICRP, 2005);
- os temores de baixos níveis de radioatividade em bens de consumo precisam ser abordados (aqueles que causam danos psicológicos e estragos econômicos); e, por último e mais importante,
- o paradigma revisado deve reconhecer as limitações de sua base científica, levando em conta, entre outras coisas, a diferença epistemológica entre os conceitos de atribuição de efeitos de radiação e a inferência de risco de radiação.

As limitações de espaço neste capítulo o impedem de abordar todos esses tópicos. A discussão sobre o necessário aprimoramento do paradigma da ICRP tem sido apresentada em diversos encontros científicos (González, 2020a, 2021a). A análise neste capítulo incidirá apenas em três tópicos, descritos em seções distintas, que se consideram prioritários, nomeadamente:

- a Seção 2 trata da diferenciação epistemológica entre atribuição de efeitos de radiação e inferência de risco de radiação (González, 1993, 2002, 2011a, 2014a, 2014b, 2014c, 2022);
- a Seção 3 trata do problema de grandezas e unidades (González, 2021b);
- a Seção 4 trata da regulamentação de bens de consumo (González, 2021c).
- Como epílogo, uma Seção 5 final discute a limitação do sistema, que se refere apenas às radiações ionizantes e ignora as radiações não ionizantes, e a necessidade de sua extensão às radiações não ionizantes, que já foi tratado na literatura (González; Touzet, 2021).

## **2. EPISTEMOLOGIA DOS EFEITOS DA RADIAÇÃO: ATRIBUIÇÃO DE EFEITOS VIS-À-VIS INFERÊNCIA DE RISCO**

### *(a) Compreensão básica*

No estudo dos efeitos nocivos da exposição à radiação, são utilizados uma série de conceitos que geralmente são mal compreendidos e, portanto, devem ser descritos em detalhes da seguinte forma:

- O termo “epistemologia” refere-se à teoria do conhecimento, especialmente no que diz respeito aos seus métodos, validade e alcance. Esta parte, portanto, refere-se às teorias do conhecimento sobre os danos à saúde que podem estar associados à exposição à radiação, particularmente a validade e o alcance dessas teorias.
- O conceito de “dano de radiação” é usado para se referir a quaisquer efeitos à saúde da radiação sofridos por indivíduos ou populações identificadas (ou coortes) que podem ser comprovadamente infligidos pela exposição à radiação. O termo “radiação” é usado para se referir apenas à radiação ionizante (as implicações desta limitação serão discutidas na Seção 5). Quando o termo “efeito” (radiação na saúde) é usado, ele se refere a qualquer efeito na saúde resultante da exposição à radiação.
- O conceito de “situações de exposição à radiação” é usado para se referir a qualquer conjunto de circunstâncias em que as pessoas estão sujeitas a estados ou condições de serem irradiadas por radiação ionizante, seja de uma fonte externa ao corpo ou de uma fonte embutida no corpo, em que uma fonte é qualquer entidade que pode causar exposição à radiação.
- O termo “atribuição” é usado para se referir à atribuição de um efeito à saúde causado pela exposição à radiação, com base em evidências completas e usando evidências factuais objetivas.

- O termo “inferência” (em contraste com atribuição) é usado para se referir ao processo de tirar conclusões a partir de suposições subjetivas que envolvem observações científicas indiretas e raciocínio na presença de incerteza. O uso de inferência geralmente se concentra em deduzir, coletar, derivar, concluir e destacar o risco (veja o próximo parágrafo) apenas prospectivamente. No entanto, o que muitas vezes é chamado de “parte atribuída” ou “probabilidade de causalidade” também é uma inferência, mas retrospectiva.
- O termo “risco de radiação” é usado para se referir à probabilidade de que um efeito à saúde resultante da exposição à radiação (por exemplo, o desenvolvimento de câncer) possa ocorrer durante um determinado período, por exemplo, pelo resto da vida após uma exposição. Em outras palavras, o risco é uma noção prospectiva. Os riscos de radiação só devem ser atribuídos com base em evidências factuais, como taxas de doenças em populações previamente expostas com base em resultados concretos de investigações epidemiológicas. Ou seja, a atribuição de risco é baseada em evidências passadas; no entanto, deve-se notar que os resultados dessas análises retrospectivas também têm sido usados para fazer inferências sobre o risco de outras situações de exposição envolvendo diferentes populações para as quais dados epidemiológicos diretos não estavam disponíveis. O conceito de risco de exposição à radiação tem sido amplamente discutido na literatura (González, 2019).
- O termo “atestado” é usado para significar que uma testemunha especializada fornece evidências claras ao declarar formalmente que um efeito de radiação existe ou é o caso de sua ocorrência. O perito especialista em efeitos de radiação pode apresentar seu laudo pericial sem ter testemunhado qualquer fato relacionado a um julgamento ou processo criminal ligado à radiação, mas apenas da ocorrência real dos efeitos. Especialistas em atribuição de efeitos e inferência de risco vêm das seguintes disciplinas científicas:
  - Os *radiopatologistas* são especialistas na real ocorrência dos efeitos da radiação na saúde individual que podem ser diagnosticados em cada indivíduo exposto, ou seja, são cientistas reconhecidos e certificados que diagnosticam as causas e os efeitos das doenças induzidas pela radiação nos indivíduos, principalmente, através do exame de amostras de tecido corporal no laboratório para fins diagnósticos ou forenses.
  - Os *radioepidemiologistas* são especialistas em estimar os efeitos da radiação na saúde que não podem ser diagnosticados individualmente, mas só podem ser estimados em populações estudando estatisticamente as mudanças na incidência desses efeitos em certas coortes. Ou seja, são cientistas reconhecidos e certificados com experiência em estatísticas médicas que lidam com a incidência e distribuição de doenças associadas à exposição à radiação.
  - Os *radiobiólogos* são especialistas no estudo das alterações biológicas atribuíveis à exposição à radiação, através da análise de amostras especializadas em bioensaios, como algumas amostras hematológicas e citogenéticas. Ou seja, são

cientistas reconhecidos e certificados com experiência na área de a da biologia relacionada com os efeitos da radiação em organismos, órgãos, tecidos e células.

- Os *radioprotecionistas* (também conhecidos como especialistas em proteção contra radiação ou físicos da saúde) são especialistas em conjecturar e inferir riscos de radiação e decidir ações de proteção. Ou seja, são cientistas certificados devidamente reconhecidos por sua expertise na proteção das pessoas dos efeitos nocivos da exposição às radiações ionizantes e nos meios para alcançar tal proteção.

Finalmente, destaca-se que ultimamente tem havido muitos casos legais associados à exposição à radiação e seus efeitos. Neste contexto, convém referir-se ao conceito de “imputação legal”, que é utilizado para se referir a ações baseadas na lei para atribuir danos de radiação a situações de exposição à radiação, uso muito comum em diversas jurisdições legais (por exemplo, nas regiões legais da Ibero-América). No entanto, seu uso não é tão comum em algumas culturas jurídicas (por exemplo, em algumas jurisdições anglo-saxônicas). A imputação e seus derivados são gramaticalmente corretos, pois significam atribuir algo ruim (neste caso, algo ruim causado pela exposição à radiação) a alguém (por exemplo, aos empregadores, pelos trabalhadores expostos à radiação, ou aos operadores relacionados à radiação, pelo público afetado). Em suma, imputar significa atribuir culpa a alguém, seja uma pessoa real ou jurídica. Outros termos relacionados são usados para fins legais semelhantes, incluindo os seguintes: processar, que se refere à instauração de processos judiciais após a exposição à radiação; indiciar, que se refere à acusação formal de um crime legal (por exemplo, violação de normas de proteção radiológica); acusar, que significa denunciar formalmente de um crime (por exemplo, matar uma pessoa com radiação); e, claro, juiz, que é usado para proferir um veredito por um funcionário público nomeado para decidir casos em um tribunal de justiça. Ressalta-se que as descrições relativas à imputação legal são aplicáveis *mutatis mutandis* a qualquer um desses conceitos. Deve-se notar que acusar é diferente de imputar, mas infelizmente os termos têm sido usados internacionalmente como sinônimos (OIT et al., 2010). Neste contexto de implicações jurídicas, convém distinguir dois conceitos: (i) o conceito de sentença clássica resultante de uma ação judicial, que é utilizado para se referir a processos de uma parte ou partes (danificados por radiação) com imputação legal a outrem (resultando em exposição à radiação) em um tribunal civil; e (ii) o conceito de ação coletiva (denominado ação coletiva na legislação anglo-saxônica), que é usado para se referir a uma ação judicial em que uma das partes é um grupo de pessoas expostas à radiação representado coletivamente por um membro desse grupo.

*(b) O consenso internacional sobre os efeitos da radiação*

Ao longo dos anos, o Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR) concordou internacionalmente com um consenso universal sobre

as estimativas dos efeitos da radiação na saúde, que tem sido amplamente divulgado rotineiramente à Assembleia Geral das Nações Unidas(UNGA). O UNSCEAR é a organização intergovernamental internacional designada pela UNGA para estimar os níveis globais e os efeitos da radiação.

As teses fundamentais subjacentes a este consenso internacional são apresentadas de forma simplista como segue:

- Existe um consenso científico de que a exposição a altos níveis de dose de radiação por um tempo relativamente curto produz efeitos nocivos agudos (ou seja, críticos, graves) em indivíduos expostos. Esses efeitos podem ser diagnosticados, testados e testemunhados por radiopatologistas qualificados. Em resumo, um efeito de saúde observado em um indivíduo pode ser inequivocamente atribuído à exposição à radiação se o indivíduo experimentar reações teciduais (muitas vezes referidas como efeitos determinísticos ou determinísticos), e um diagnóstico patológico diferencial pode ser alcançado, descartando possíveis causas alternativas. Tais efeitos determinísticos são experimentados como resultado de altas doses de radiação incorridas em um período relativamente curto, como pode ocorrer após exposições à radiação devido a acidentes em instalações nucleares ou na indústria convencional. Embora na radioterapia as doses usadas, em geral, sejam altas, os campos são bem definidos e a região de tratamento bem localizada, observando-se como regra geral os limites de dose nos órgãos em volta do volume alvo, mas,, quando acidentes ocorrem, os efeitos que alcançam os órgãos sadios podem ser fatais. Na radiologia, em especial a intervencionista, e em alguns procedimentos com tomografia, as doses podem ser significativamente mais altas que em outros procedimentos e, quando acidentes ocorrem, os danos na região onde o feixe incide podem ser significativos. Tais efeitos determinísticos podem, portanto, ser imputados individualmente à situação por meio de um julgamento clássico.
- Em baixas doses, as populações expostas podem sofrer danos coletivos, que podem ser expressos como aumentos na incidência de determinados efeitos. Tais aumentos podem ser avaliados, testados e testemunhados por radioepidemiologistas qualificados. Esses efeitos sabidamente associados à exposição à radiação, como certas malignidades induzíveis por radiação e, teoricamente, efeitos hereditários nos descendentes da população exposta, não podem ser inequivocamente atribuídos à exposição à radiação, pois a exposição à radiação não é a única causa possível e atualmente não existem biomarcadores específicos de exposição à radiação. Esses efeitos são chamados de “efeitos estocásticos”, devido à aleatoriedade de sua ocorrência. O diagnóstico patológico diferencial inequívoco não é possível para efeitos estocásticos. Somente se a incidência espontânea de um tipo particular de efeito estocástico fosse baixa e a radiosensibilidade para tal efeito alta (como é o caso de alguns cânceres de tireoide pediátricos) poderia ser inferido que um efeito em um determinado indivíduo na exposição à radiação é ostensivamente atribuível à exposição, especialmente se essa exposição foi alta. No entanto, mesmo nesses casos, o efeito em um indivíduo não pode ser atribuído inequivocamente à exposição

à radiação, devido a possíveis causas concorrentes de outros efeitos de forma sinérgica, como, por exemplo, os efeitos da quimioterapia que são aplicados de forma concomitante, adjuvante ou neoadjuvante à radioterapia, além de inúmeros agentes físicos e químicos que o homem está sujeito. Lembrando que, embora o objetivo da quimioterapia seja de controlar as células tumorais, ela também é citotóxica, atuando de forma sistêmica, e não estritamente localizada. Em resumo, uma maior incidência de efeitos estocásticos em uma população pode ser atribuída à exposição à radiação por meio de análise epidemiológica, desde que, entre outras coisas, a maior incidência de efeitos estocásticos seja suficiente para superar as incertezas estatísticas inerentes. Nesse caso, um aumento da incidência de efeitos estocásticos na população exposta poderia ser adequadamente verificado e atribuído à exposição. Deve-se notar que, embora tenha sido demonstrado em estudos com animais, o aumento da incidência de efeitos hereditários em populações humanas não pode ser atribuído atualmente à exposição à radiação; uma razão para isso é a grande flutuação na incidência espontânea desses efeitos. Em algumas jurisdições, os danos de radiação de efeitos estocásticos podem ser atribuídos coletivamente (mas não individualmente) à situação, talvez como uma ação coletiva.

- Amostras de ensaios biológicos especializados, como amostras hematológicas e citogenéticas, que indicam alterações biológicas atribuíveis à exposição à radiação, podem ser diagnosticadas em indivíduos expostos por radiobiologistas qualificados. Esses espécimes podem ser usados como indicadores biológicos de exposição à radiação mesmo em baixos níveis de exposição. Deve-se notar, no entanto, que a presença de tais indicadores biológicos em amostras coletadas de um indivíduo não significa necessariamente que ele sofrerá efeitos à saúde devido à exposição. Não está claro se o “dano” pode ser imputado nesses casos.
- Houve recentemente um acordo internacional de que os efeitos da radiação na saúde não são atribuíveis a situações envolvendo baixas doses (ou seja, doses semelhantes às doses de radiação de fundo naturais típicas), mas ainda podem ser inferidos a partir dessas situações “riscos”, como suposições subjetivas.

A questão da atribuição dos efeitos da radiação às situações de exposição à radiação foi amplamente discutida na literatura (González, 1993, 2002, 2011a, 2014a, 2014b, 2014c).

O UNSCEAR refinou o entendimento de suas estimativas abordando e diferenciando a atribuição de efeitos à saúde resultante da exposição à radiação em relação à inferência de risco. A Assembleia Geral das Nações Unidas recebeu por unanimidade este relatório científico do UNSCEAR com apreço. As estimativas do UNSCEAR foram resumidas pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) em um livreto cujas principais descobertas e ilustrações relevantes são usadas neste capítulo (UNEP, 2016). Esse importante acordo global tem sido amplamente divulgado na literatura, mas ainda está longe de ser implementado na prática regulatória. A Comissão de Normas de Segurança (CSS) da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) tem abordado o problema, e

um relatório está sendo preparado (a CSS é o órgão internacional que apoia as normas internacionais de segurança que são estabelecidas sob os auspícios da IAEA com o copatrocinio de todas as organizações internacionais relevantes).

Em resumo, os aumentos na incidência de efeitos na saúde em populações não podem ser atribuídos de forma confiável à exposição crônica à radiação em níveis que são típicos dos níveis médios globais de radiação de fundo. O número de efeitos à saúde induzidos por radiação em uma população exposta a doses incrementais em níveis iguais ou abaixo dos níveis naturais de base não deve ser calculado multiplicando doses muito baixas por um grande número de pessoas e pelo risco subjetivo inferido. Essas situações são muito comuns na prática, e a imputação legal de danos de radiação hipoteticamente atribuídos a elas é controversa. Assinalou-se que as agências de saúde pública, para alocar recursos adequadamente, podem precisar fazer projeções do número de efeitos à saúde, mesmo em doses baixas, para fins comparativos. Este método, baseado em premissas não testáveis, poderia ser útil para tais propósitos se fosse aplicado de forma consistente, se as incertezas nas avaliações fossem totalmente levadas em consideração e se os efeitos projetados para a saúde não fossem inferidos como diferentes dos efeitos nominais teóricos.

Um problema que tem gerado curiosidade científica é como considerar os grupos que vivem em áreas com altos níveis de radiação natural terrestre ou em cidades de alta altitude com altos níveis de radiação cósmica. Esses grupos populacionais não sofrem efeitos determinísticos, apesar de a soma da radiação que recebem ao longo da vida ultrapassar os limites para a ocorrência desses efeitos. Eles também não mostram uma maior incidência de efeitos estocásticos, embora a probabilidade de ocorrência desses efeitos seja tão baixa que o número de pessoas necessário para que os estudos epidemiológicos não sejam limitados por incertezas estatísticas é geralmente muito maior do que sua população.

### *(c) A relação dose-resposta*

A relação entre as doses de radiação recebidas pelas pessoas e a probabilidade de ocorrência de efeitos na saúde (chamada de relação dose-resposta), que pode ser derivada das estimativas do UNSCEAR, foi sintetizada peloPNUMA no gráfico mostrado na Figura 1.



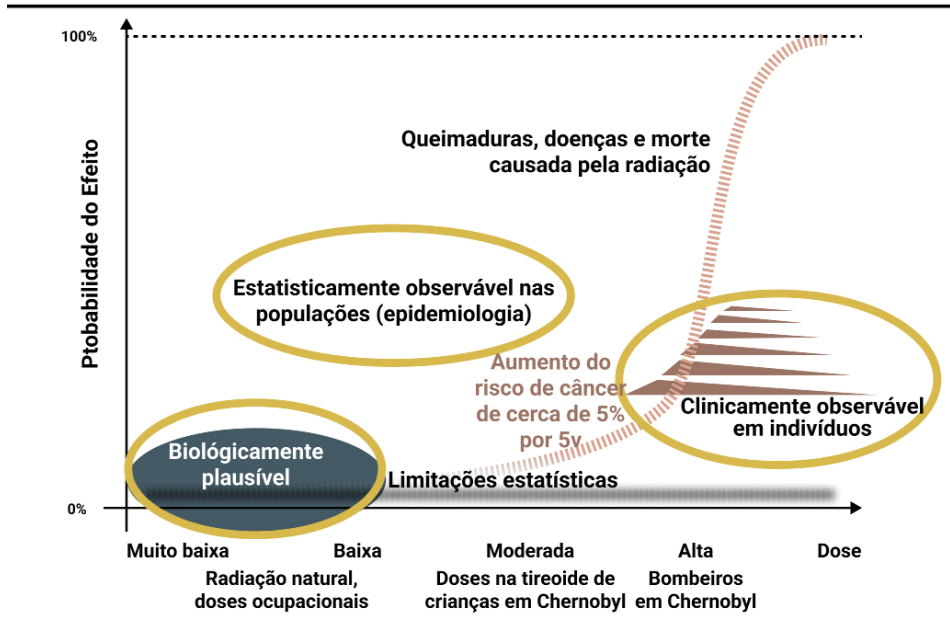


Figura 1 – Probabilidade do efeito *versus* dose, mostrando: efeitos clinicamente observáveis em indivíduos e em pacientes, efeitos estatisticamente observáveis nas populações e efeitos biologicamente plausíveis.

Fonte: Adaptado UNEP (2016).

As doses são expressas como:

- *altas doses* - cerca de uma dose efetiva sievert (a dose média de fundo natural é de 0,0024 sievert por ano, portanto, um sievert é milhares de vezes maior que os níveis anuais de radiação de fundo natural);
- *doses moderadas* - cerca de centenas de milisieverts (um milisievert é um milésimo de um sievert);
- *baixas doses* - cerca de dezenas de milisieverts;
- *doses muito baixas* - em torno de um milisievert.

As probabilidades são expressas em porcentagens entre 0% e 100%, onde 100% corresponde à certeza de que o efeito ocorrerá e 0% corresponde à certeza de que o efeito não ocorrerá.

Deve-se notar que as probabilidades estimadas pelo UNSCEAR são de dois tipos distinguíveis:

- *Probabilidades frequentistas*, que se encontram na zona de alta dose, com base na existência real e verificável dos efeitos da radiação na saúde, e são definidas como o limite da frequência relativa de incidência do efeito em uma série de estudos epidemiológicos;
- *Probabilidades subjetivas* (também chamadas de “Bayesianas”), que estão na área de baixa dose, expressas como uma possível expectativa de que os efeitos da radiação na saúde ocorram e sejam quantificados por crença pessoal ou julgamento de especialistas, mas não são apoiadas pela frequência ou propensão para que os efeitos realmente ocorram.
- Tanto as probabilidades frequentistas quanto as subjetivas são matematicamente compatíveis, mas muito diferentes do ponto de vista epistemológico: a primeira é baseada em evidências e a segunda em conjecturas.

O UNSCEAR destacou (veja ovais na Figura 1) a importância de distinguir entre:

- observações verificadas dos efeitos na saúde das pessoas e populações expostas, que permitem atribuir esses efeitos de forma inequívoca às situações de exposição que os geraram; e
- projeções plausíveis de efeitos na saúde, cuja ocorrência é factível, mas não verificável, ou seja, aquelas projeções que permitem apenas inferir alguns riscos.

Para ambas as situações, é importante levar em conta tanto as incertezas quanto as imprecisões associadas às estimativas.

Em resumo, conforme marcado por ovais na Figura, o UNSCEAR fez uma distinção clara entre três regiões separadas da relação dose-resposta em relação à observância dos efeitos, a saber:

- a região onde os efeitos são clinicamente observáveis nos indivíduos, por meio de diagnóstico radiopatológico e comprovação por atestado certificado por radiopatologista;
- a região onde os efeitos são apenas observáveis estatisticamente em populações (mas não identificáveis em indivíduos), através de estimativas radioepidemiológicas e atestados certificados por um radioepidemiologista (as probabilidades disponíveis são frequentistas);
- a região onde os efeitos não são observáveis, mas podem ser biologicamente plausíveis e só podem ser inferidos por meio de julgamento subjetivo de especialistas (ou seja, as probabilidades são apenas subjetivas).

#### *(d) Fatos verificáveis versus suposições subjetivas*

Decorre da discussão acima que a abscissa da relação dose-resposta, que quantifica a dose, pode ser dividida em duas áreas distinguíveis (conforme apresentado na Figura 2):

- doses que levam a efeitos decorrentes de fatos objetivamente verificáveis com comprovação científica, ou seja, fatos verídicos e não interpretáveis, que ocorram de forma indiscutível e não sejam influenciados por sentimentos ou opiniões pessoais; e
- doses que apenas levam a inferências subjetivas baseadas em suposições, ou seja, opiniões ou conclusões baseadas em informações incompletas, não comprovadas e talvez influenciadas por sentimentos ou opiniões pessoais.

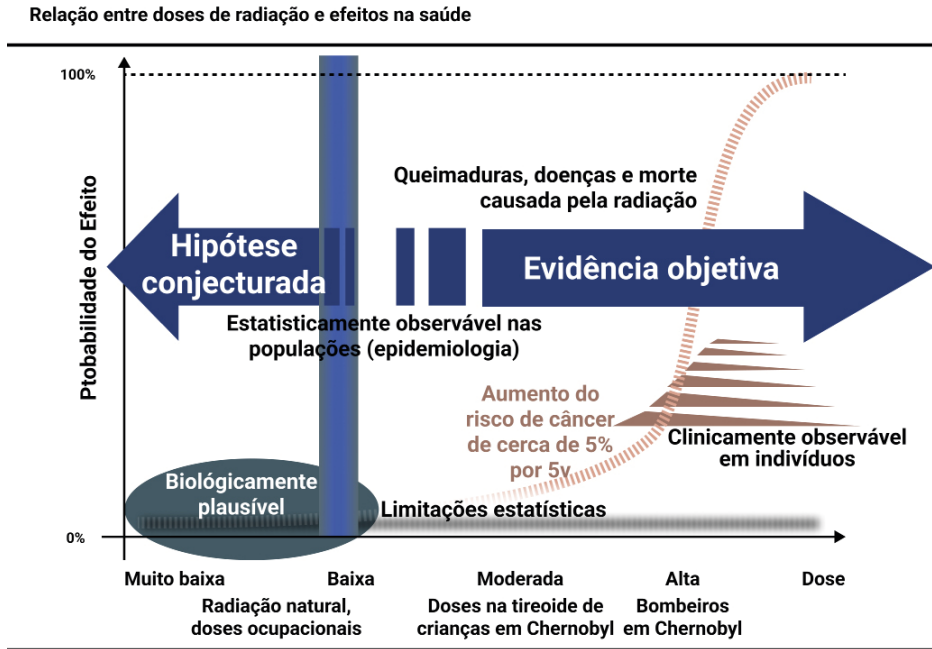


Figura 2 – Efeitos objetivamente verificáveis *versus* inferências subjetivas.

Fonte: Adaptado UNEP (2016).

(e) *Atestado*

Conforme discutido acima, a certificação da ocorrência de efeitos de radiação pode ser feita por radiopatologistas, para efeitos determinísticos em indivíduos, e por radioepidemiologistas, para efeitos estocásticos em populações. A atestação não é viável quando há apenas o julgamento de especialistas. A área de dose-resposta na qual os efeitos são atribuíveis ainda pode ser dividida em duas subáreas, como segue e conforme mostrado na Figura 3.

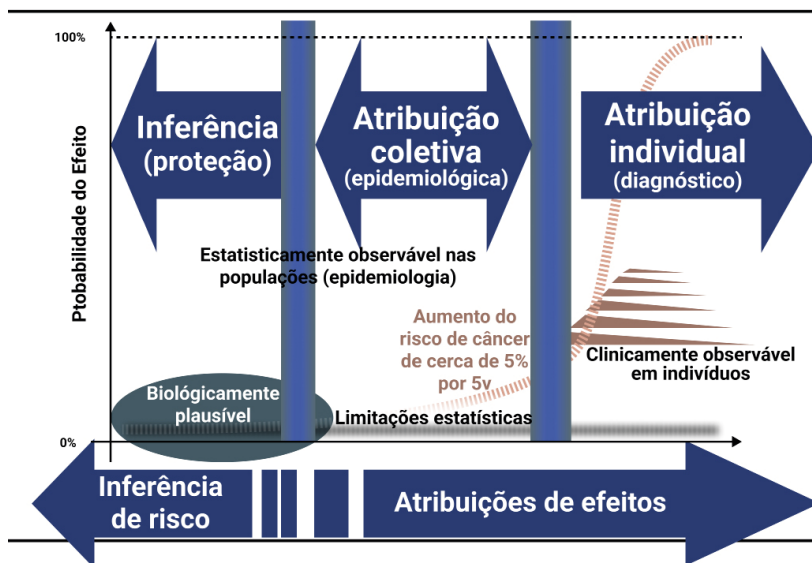


Figura 3 – Atestação (certificação) da ocorrência de efeitos de radiação.

Fonte: Adaptado UNEP (2016).

Na região de alta dose, pode-se diagnosticar a ocorrência de efeitos em indivíduos expostos. Na região de dose moderada, apenas as mudanças na incidência dos efeitos nas populações expostas podem ser avaliadas, geralmente por cálculos estatísticos, ou seja, estimados por meio de estudos epidemiológicos. Na região de dose baixa e muito baixa, há apenas a possibilidade de julgamento de especialistas e extrapolação de conhecimento, mas não há possibilidade de diagnóstico individual ou determinação de alterações na incidência coletiva de efeitos na pessoa exposta.

Portanto, é possível a seguinte distinção adicional na atribuição de efeitos, conforme apresentado na Figura 3:

- na área da zona de alta dose, os efeitos podem ser atribuídos individualmente, ou seja, é possível diagnosticar e atestar por procedimentos patológicos que um indivíduo exposto incorreu no efeito;
- na área da zona de dose moderada, os efeitos podem ser estimados coletivamente, ou seja, é possível avaliar se há um aumento na incidência de efeitos em uma população exposta, embora não seja viável diagnosticar esses efeitos individualmente;
- na área restante da zona de baixa dose, os efeitos não podem ser atribuídos, nem individual nem coletivamente, embora se possa inferir um “risco” expresso como uma probabilidade subjetiva que não se baseia em frequências mensuráveis, mas em julgamentos pessoais de especialistas ou decisões regulamentares.
- Como pode ser deduzido da Figura 3, o processo requer diferentes certificações profissionais, como segue:

- a atribuição individual de efeitos só pode ser feita por diagnóstico seguido de atestado formal emitido por um radiopatologista qualificado;
- a atribuição coletiva de efeitos só pode ser feita por estimativa estatística seguida de atestado formal por um radioepidemiologista qualificado;
- a inferência subjetiva de efeitos pode exigir uma opinião consensual de um corpo profissional de especialistas relevantes, principalmente radiobiólogos e radioepidemiologistas atuando como radioprotecionistas, que devem expressar seu “julgamento especializado” sobre os riscos, se houver, bem como suas incertezas e limitações; tal julgamento deve ser validado por decisões regulatórias.

*(f) Consequências legais*

A capacidade de atribuir efeitos à saúde relacionados a situações específicas de exposição pode influenciar a capacidade de atribuir legalmente danos por aqueles que sofreram os efeitos. A imputação pode incluir a atribuição de responsabilidade por danos físicos deliberadamente infligidos ou efeitos nocivos àqueles que causam a exposição. Por exemplo, os trabalhadores podem culpar seus empregadores e os membros do público podem imputar licenciados de instalações que operam em seu habitat. No entanto, a legislação relativa à atribuição dos efeitos da radiação na saúde, com a inferência de risco de radiação e, em particular, com a imputação de danos é heterogênea, incoerente e inconsistente entre os países, bem como nos casos que são realizados em jurisdições dentro de um país. Uma distinção importante resulta da comparação da legislação jurisprudencial com a legislação codificada.

### **Imputação individual versus imputação coletiva versus imputação fictícia**

A atribuição de danos associados à exposição ligada à radiação continua sendo um enigma legal. Pode ser mais simples de resolver em sistemas jurídicos jurisprudenciais, caso a caso, mas é particularmente complicado para a legislação codificada, em que as abordagens caso a caso não são viáveis. Conforme apresentado na Figura 4, as seguintes situações são possíveis:

- na região de alta dose, a imputação é direta do afetado ao culpado;
- na região de dose média, parece que apenas uma imputação coletiva ou grupal é viável;
- na região de baixa dosagem, a situação é no mínimo questionável: é possível imputar as consequências percebidas devido aos riscos de radiação com base em julgamentos subjetivos?

Na região de altas doses, os efeitos individuais na saúde são clinicamente atribuíveis e verificáveis e, portanto, a imputação de danos ao indivíduo afetado é viável. Na região de dose média, o aumento da incidência de efeitos nocivos em grupos populacionais é epidemiologicamente atribuível e verificável e, portanto, a imputação do grupo afetado é

viável. Na área de baixas doses, em que os danos de radiação não são atribuíveis ou comprováveis, individuais ou coletivos, mas o risco de radiação também pode ser inferido, a situação parece estar no limbo legal.

#### *(g) Conclusão*

Após uma longa jornada, parece que a comunidade científica chegou a um consenso no âmbito do UNSCEAR sobre a atribuição de danos em situações de exposição à radiação. Este importante consenso científico deve agora ser convertido em instrumentos jurídicos que abordem a questão da imputação legal, e seus derivados de processar, acusar e julgar, após situações de exposição à radiação. Embora, seguindo esses desenvolvimentos, a transição da ciência da atribuição e inferência para a imputação legal tenha sido discutida preliminarmente, ela ainda não foi cristalizada em abordagens universais.

Parece que chegou a hora de os juristas transformarem as conquistas científicas sobre a atribuição dos efeitos da radiação e a inferência de riscos de radiação após situações de exposição à radiação em orientação legal.

Dadas as diferenças culturais, regulatórias e legislativas entre os países, considera-se prudente e necessário abordar a questão jurídica com dois objetivos fundamentais:

- promover um entendimento jurídico comum das políticas relacionadas com os danos de radiação atribuídos a situações de exposição à radiação;
- explorar a viabilidade de uma interpretação legislativa universal para regular a aplicação da lei nestas situações, o que poderia servir de insumo potencial para diferentes legislações nacionais.

### **3. O SISTEMA INTERNACIONAL DE GRANDEZAS E UNIDADES**

#### *(a) Introdução*

O sistema internacional de grandezas e unidades para proteção contra radiação é uma das histórias de sucesso internacional e intergovernamental mais significativas. Ele é universal e consensual; fundamentado em ciência internacionalmente aceita; baseado em um paradigma universal recomendado pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) e pela Comissão Internacional de Unidades e Medições de Radiação (ICRU); adotado pelo Bureau Internacional de Pesos e Medições (BIPM); e estabelecido nas normas internacionais de segurança de todas as organizações intergovernamentais relevantes desenvolvidas sob os auspícios da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA). Apesar de seu sucesso, após quase um século de bons serviços, o sistema pode precisar de alguma revisão.

#### *(b) Crítica*

## Lições de Fukushima

Após o acidente do reator nuclear na Usina Nuclear de Fukushima Dai-ichi, no Japão, a ICRP convocou um grupo de trabalho para coletar as lições aprendidas sobre o sistema de proteção contra radiação. Estes incluíam problemas com o sistema internacional de grandezas e unidades usado pela ICRP.

Em um memorando de mais de 80 páginas, os membros da força-tarefa expressaram suas opiniões pessoais sobre os problemas que surgiram durante e após o acidente. Embora os indivíduos afetados tenham sido amplamente protegidos da exposição à radiação e ninguém tenha sofrido uma dose letal de radiação (ou uma dose grande o suficiente para causar doença por radiação), muitos problemas de proteção contra radiação foram levantados. Um problema identificado foi que o sistema de grandezas e unidades de proteção contra radiação causava uma confusão considerável e problemas de comunicação (González et al., 2013). As diferenças entre as grandezas não foram bem compreendidas pelos afetados, mesmo pelo público altamente educado. Por exemplo, as diferenças entre dose absorvida, dose equivalente e dose efetiva não foram compreendidas. A distinção entre grandezas de proteção radiológica e grandezas operacionais era ainda mais difícil de entender; por exemplo, a diferença entre dose equivalente e equivalente de dose, nomeações que também apresentam um problema gramatical de tradução com mesmo significado para outras línguas. A prática de usar uma única unidade para diferentes grandezas, sem especificar a grandeza, aumentou a confusão e a incompreensão; por exemplo, o uso de uma unidade comum (Sievert ou Rem) para a dose equivalente em um órgão, a dose efetiva no corpo e o equivalente de dose de um campo de radiação.

Não ficou claro para o público ou seus representantes por que tantas grandezas e unidades diferentes eram necessárias para proteger as pessoas da radiação.

O Grupo de Trabalho da ICRP concluiu que a comunidade de proteção radiológica tem o dever ético de aprender com as lições de Fukushima e resolver os desafios identificados, um dos quais está relacionado ao sistema internacional de grandezas e unidades de proteção radiológica. O Grupo de Trabalho aconselhou que, antes que ocorra outro grande acidente, a confusão sobre o sistema internacional de grandezas e unidades de proteção contra radiação deve ser resolvida.

## Avaliação da metrologia

De 23 a 25 de novembro de 2014, o Primeiro Congresso Brasileiro de Metrologia de Radiação Ionizante (CBMRI) aconteceu no Rio de Janeiro, Brasil (Peixoto et al., 2016). O objetivo principal foi revisar vários conceitos, questões fundamentais e métodos relacionados às medições primárias ou secundárias de radiações ionizantes. Seguindo a abordagem proposta pelo BIPM Comité Consultatif pour les Etalons de Mesures des

Rayonnements Ionisants, o CBMRI dedicou-se a três diferentes aspectos da metrologia, a saber: radionuclídeos e radioatividade; raios X, raios gama, elétrons e partículas carregadas; e metrologia de nêutrons. Também abordou questões de rastreabilidade, padrões primários (absolutos) e secundários (relativos), avaliação de incertezas, instrumentação nuclear e infraestrutura laboratorial. Mas um tópico importante foi uma revisão crítica do sistema internacional de grandezas e unidades.

Esta revisão crítica permitiu um amplo debate sobre a conveniência de melhorar o sistema de grandezas e unidades de proteção radiológica (González; de Almeida; Spano, 2016). O sistema global de grandezas e unidades foi revisado criticamente e foi reconhecido que o sistema provou ser bem-sucedido em ajudar a proteção contra radiação a se tornar uma disciplina profissional uniforme, consistente e coerente em todo o mundo. No entanto, como em qualquer outro desenvolvimento bem-sucedido, verificou-se que a experiência adquirida ao longo do tempo mostra que o sistema pode se beneficiar de algumas melhorias. Sugeriu-se que parece ter chegado o momento de realizar uma profunda revisão do atual sistema de grandezas e unidades para atualizá-lo, levando em consideração uma série de lições aprendidas, principalmente após acidentes nucleares e em a proteção dos pacientes nas práticas de radiodiagnóstico, radiologia intervencionista e radioterapia.

As dificuldades do sistema foram analisadas e algumas soluções viáveis foram sugeridas. Descobriu-se que o sistema foi usado com sucesso por mais de 30 anos para controlar a exposição ocupacional e a exposição pública em situações normais, prospectivamente no projeto de instalações e planejamento de operações e retrospectivamente para demonstrar conformidade regulatória. No entanto, verificou-se que o uso também tem apresentado grandes dificuldades na comunicação das informações radiológicas a profissionais não especializados e ao público. Essas dificuldades de compreensão de grandezas e unidades parecem ser consequência da complexidade do sistema que utiliza mais de uma grandeza e combina dados de exposição física com dados científicos sobre risco de radiação para órgãos e tecidos.

Além disso, considerou-se que, embora o sistema e as grandezas tenham se mostrado muito adequados para proteção radiológica ocupacional, eles são menos adequados para uso em domínio público, onde é necessária a comunicação com não especialistas, principalmente com a imprensa em situações de emergência.

A discussão concluiu que havia uma série de possibilidades para melhorar a situação em curto prazo. Por exemplo: evitar o uso de doses equivalentes sem especificar o órgão ou tecido em questão; assim, uma dose equivalente à tireoide, por exemplo, em vez do uso do termo mais curto e mais simples “dose de órgão” para dose de órgão equivalente em comunicações, recomenda-se o termo “dose na tireoide”, que já é comum em muitas práticas de proteção radiológica. Outra solução para minimizar a confusão é sempre



adicionar a grandeza ao usar a unidade Sievert. Outra solução seria considerar renomear as unidades, mas isso exigiria uma deliberação cuidadosa.

Uma importante deficiência confirmada foi que o sistema atual não contempla a simplificação com o único propósito de informação pública. Os puristas que trabalham em grandezas e unidades provavelmente rejeitariam a ideia. A simplificação sempre acarretará em perda do rigor científico essencial na quantificação. Mas o rigor já não é violado no atual sistema de grandezas de proteção? De fato, concluiu-se que as grandezas de proteção não atendem aos requisitos essenciais para grandezas. Uma maior simplificação seria bem-vinda, se isso aliviasse o grave problema da comunicação pública.

Concluiu-se também que um sistema de informação pública de grandezas deve ser adaptado para transmitir, de forma completa e facilmente compreensível e credível, os efeitos e riscos da radiação. Isso pelo menos evitaria os graves efeitos psicológicos associados à má compreensão da radiação e sua quantificação. De fato, a desconfiança pública é gerada quando as autoridades transmitem informações de forma quantitativa que não são compreensíveis não apenas pelo público em geral, mas também por muitos especialistas.

Foi sugerido que tal sistema talvez pudesse incluir grandezas simplificadas para transmitir, por exemplo, a presença de substâncias radioativas no ambiente, incluindo sua variação temporal. O ideal seria ter poucas, ou mesmo uma única grandeza, de forma simplificada todos os elementos atualmente abrangidos pela atividade, doses absorvidas, fatores de ponderação, variação temporal etc. Concluiu-se que foi difícil responder se essa possibilidade é realmente viável. No entanto, fica claro que é viável e desejável estudar as possibilidades de desenvolvimento de um sistema de grandezas para comunicação pública.

Em resumo, a discussão no CBMRI concluiu que as grandezas utilizadas para fins de proteção e medição radiológica são um tanto sofisticadas e sua aplicação requer conhecimento profissional. No entanto, os profissionais de proteção radiológica não estão sozinhos no uso dessas grandezas, pois os tomadores de decisão de emergência, que não necessariamente conhecem os detalhes, confiam neles para suas opções de intervenção, e, no recebimento, o público exige simplicidade no entendimento. Desentendimentos sobre grandezas após um acidente podem levar a dificuldades adversas, interpretações incorretas de possíveis consequências, decisões equivocadas e, afinal, graves danos psicológicos e sociais à população. Logo, são urgentemente necessários meios para melhorar e promover a troca de informações e educação e para desenvolver material de fácil leitura sobre o sistema de grandezas e unidades de proteção contra radiação.

Recentemente, em novembro de 2020, foi realizado virtualmente no VII CBMRI. Os mesmos assuntos foram novamente discutidos (González, 2020b). Mas desta vez a crítica foi estendida aos problemas epistemológicos do sistema atual, tema que será discutido mais adiante.

### *(c) Revisões em andamento*

Após várias críticas ao sistema, a ICRP criou um grupo de trabalho (ICRP- Task Group 79), no âmbito do Committee 2, sobre o uso de dose efetiva como grandeza de proteção radiológica relacionada ao risco. O Grupo de Trabalho de dose efetiva forneceu orientações sobre quando a grandeza de “dose efetiva” deve ou não ser usada. A ICRP indicou que a experiência demonstrou que a “dose efetiva”, que foi definida e introduzida pela ICRP para fins de gerenciamento de risco, ou seja, para limitação e otimização de risco, é amplamente utilizada na proteção contra radiações e áreas afins, além de sua finalidade original, em alguns casos incorretamente. Orientações úteis sobre restrições de uso de grandeza são fornecidas nas principais recomendações da ICRP. A ICRP considera que esta orientação deve ser ampliada e propostas devem ser feitas para controle de exposição e gestão de risco em situações em que o termo “dose efetiva” não deve ser usado. As recomendações da ICRP sobre o uso de dose efetiva como grandeza de proteção radiológica estão sendo apresentadas (Harrison, 2021).

Enquanto isso, o Comitê ICRU 26 também abordou uma revisão das grandezas operacionais de proteção contra radiação para radiação externa. O conceito e as implicações práticas das novas definições da ICRU e ICRP de grandezas operatórias para radiação externa foram apresentados (Menzel, 2021). As mudanças propostas incluem, entre outras coisas: descontinuar o uso de dose equivalente de órgão (HT em Sievert) e, em vez disso, usar dose absorvida em órgãos (DT em Gray); descontinuar o uso de equivalente de dose ambiente ( $H^*(d)$ , equivalente de dose direcional ( $H'(d, \Omega)$ ) e equivalente de dose pessoal ( $H_p(d)$ ) e substituí-los por dose ambiente ( $H^*$  em Sievert), dose pessoal ( $H_p$  em Sievert), dose absorvida pessoal ( $D_p$  em Gray) e dose absorvida direcional ( $D'(\Omega)$  em Gray).

Essas mudanças são bem-vindas, mas podem não resolver alguns desafios fundamentais de comunicação e epistemológicos com grandezas e unidades de proteção radiológica, como será discutido mais adiante. A indústria está reagindo com certo ceticismo: a World Nuclear Association apresentou algumas visões negativas sobre essas mudanças por parte dos profissionais de proteção contra radiação na indústria nuclear (de Roivo, 2021).

### *(d) Questões epistemológicas restantes*

Há pelo menos duas anomalias epistemológicas no sistema atual. A primeira refere-se ao uso da mesma grandeza e unidade para abordar os efeitos na saúde atribuíveis à radiação e a inferência de riscos de radiação. A segunda está relacionada à confusão atual entre grandezas intensivas e extensivas.

## Grandezas e unidades para atribuir efeitos e inferir riscos

Um problema epistemológico fundamental com o sistema atual é que a mesma grandeza, a dose efetiva, e a mesma unidade, o Sievert, sem quaisquer condições, são usadas para avaliar os efeitos à saúde atribuíveis à exposição à radiação e também para inferir riscos conjecturais de radiação. Como observado acima, o Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR) chegou a um consenso intergovernamental internacional sobre a atribuição de efeitos da radiação demonstráveis *versus* a inferência de risco conjecturado à saúde.

Em termos simples, a situação pode ser descrita da seguinte forma: o risco nominal prejudicial ajustado para uma população nominal é estimado em cerca de 5% per Sievert de dose efetiva; este número é matematicamente equivalente a 0,005% por miliSievert de dose efetiva; no entanto, os coeficientes matematicamente iguais de 5% por Sievert e 0,005% por miliSievert são muito diferentes epistemologicamente, porque descrevem ciências diferentes: evidências epidemiológicas factuais *versus* estimativas conjecturais.

Apesar dessas diferenças epistemológicas fundamentais, uma grandeza comum, a dose efetiva, e uma unidade comum, o Sievert, são usadas tanto para a atribuição de efeitos quanto para a inferência de risco. Isso implica usar a mesma abordagem de quantificação para situações muito diferentes, como:

- resultados distintos, como os que são clinicamente observáveis, estatisticamente observável ou biologicamente plausíveis;
- conceitos diferentes, como quais efeitos são atribuídos a altas doses e risco e inferidos a baixas doses;
- resultados diversos, como diagnóstico de efeito individual, estimativas de incidências coletivas ou julgamento de risco;
- resultados de saúde fornecendo evidências formais por radiopatologistas, radioepidemiologistas e radioprotetores; e, por último, mas não menos importante,
- atribuição de danos individuais ou coletivos ou presunções de risco.

Esta é uma anomalia epistemológica do sistema que, como visto na seção anterior, merece uma discussão profunda.

O acordo global alcançado pelo UNSCEAR tem sido relatado na literatura (González, 2014b, 2014c), mas ainda está longe de ser implementado na prática regulatória. Atualmente, não são usados nos padrões de proteção contra radiação dos regulamentos intergovernamentais internacionais e, conseqüentemente, no vasto corpo de regulamentos de segurança nuclear que são estabelecidos sob a égide da IAEA com o copatrocinio de todas as organizações intergovernamentais relevantes. A Comissão de Normas de Segurança da IAEA vem abordando a questão em um relatório está sendo preparado.

## Grandezas intensivas e grandezas extensivas

Um problema epistemológico adicional é que a mesma família de grandezas dosimétricas (sem ressalvas) é usada para expressar grandezas intensivas e grandezas extensivas. Isso não acontece em outras áreas da ciência que requerem quantificação.

A *dose* é uma grandeza intensiva, isto é, uma grandeza física cujo valor não depende da quantidade de matéria para a qual é medição; é semelhante à grandeza *temperatura*.

Ao contrário, a *dose coletiva* é uma grandeza extensiva, ou seja, uma grandeza física cujo valor é proporcional ao tamanho do sistema que descreve ou à grandeza no sistema; é semelhante à grandeza *energia*.

No entanto, apesar dessas diferenças, a mesma unidade, o Sievert, é utilizada para grandezas diversas, embora qualificada pelo nome de “homem” ou “pessoa” para a dose coletiva. Isso tem causado sérios problemas de interpretação entre os especialistas e de comunicação para o público. A dose coletiva serve apenas para comparações, dose per capita e jamais para se relacionar com o risco.

### (e) Grandezas, unidades e comunicação

Uma deficiência importante do sistema hoje é que as grandezas e unidades atuais não são úteis para informação e comunicação pública. As grandezas e unidades devem ser adaptadas para transmitir, de forma completa e facilmente compreensível e credível, os efeitos e riscos da radiação. Eles devem evitar os efeitos psicológicos que estão associados ao mal-entendido da radiação. A desconfiança pública é gerada quando as autoridades transmitem grandezas que não são compreensíveis não apenas para o público, mas também para muitos especialistas, conforme apresentado na Figura 5. Uma revisão deve facilitar a solução do problema de comunicação.

# O problema de comunicação



Figura 5 – A deficiência do sistema atual para comunicação.

Fonte: Autor.

## (f) Conclusão

A revisão do atual sistema internacional de grandezas e unidades precisa ser profunda e deve fazer uma distinção entre a quantificação dos efeitos de radiação atribuíveis e a quantificação do risco conjectural inferido. Deve também diferenciar claramente as grandezas dosimétricas intensivas das grandezas dosimétricas extensivas. Uma revisão substantiva inclusive pode ser uma oportunidade para melhorar a linguagem e a comunicação.

Organizações internacionais e intergovernamentais relevantes podem aproveitar esta oportunidade para melhorar o sistema atual não apenas em suas deficiências óbvias, mas também em suas deficiências epistemológicas e de comunicação.

## 4. O CONTROLE RADIOLÓGICO DE BENS DE CONSUMO

### (a) Introdução

Há uma necessidade internacional de abordagens simples e acordadas para regular a radioatividade em bens fornecidos para consumo público e distribuição universal. As abordagens atuais são complexas e contêm inconsistências e inconsistências.

Uma dificuldade regulatória diz respeito a problemas de semântica e terminologia, que resultam na ausência de entendimentos gerais para tais bens. Um desafio adicional tem sido o uso de grandezas dosimétricas para o paradigma de controle básico. Essas grandezas

dosimétricas não podem ser medições diretamente, e o controle deve ser baseado em quantidades de radioatividade.

Além disso, há uma série de questões básicas que não foram totalmente abordadas e precisam de uma resposta clara. Por exemplo, se é preciso diferenciarmos que:

- contêm radionuclídeos adicionados artificialmente daqueles que contêm radionuclídeos naturais e/ou artificiais adicionados devido a processos ambientais naturais;
- são consumidos daqueles que são apenas usados;
- são considerados comestíveis dos que não são;
- são consumidos ou utilizados preferencialmente por determinado sexo ou determinada faixa etária dos que são consumidos ou utilizados independentemente do sexo ou idade;
- incorporaram radionuclídeos de uma determinada situação de exposição inicial (situação existente, planejada ou emergencial) daqueles cuja situação inicial é desconhecida.
- Vale lembrar que radionuclídeos em bens de consumo podem:
  - já estar presentes no ambiente e de lá chegar aos bens (ou seja, a partir de uma situação de exposição existente);
  - estar lá devido a um download autorizado de um meio regulamentado (ou seja, a partir de uma situação de exposição planejada);
  - ser o resultado de uma situação imprevista (ou seja, uma emergência).
- Nos padrões internacionais atuais, essas situações estão sujeitas a diferentes abordagens regulatórias!

#### *(b) Semântica e terminologia*

Vários termos têm sido usados para regular os bens de consumo que causaram alguma incerteza. Particularmente confusos têm sido os termos “*commodity*” e “produto de consumo” e “bem de consumo”, e seus principais componentes para consumo público, como alimentos e água. Outro termo confuso que tem causado sérios danos é o termo “contaminação”, principalmente quando aplicado a alimentos ou água.

### **Commodities vis-à-vis produtos de consumo vis-à-vis bens de consumo**

O termo em inglês “*commodities*” tem sido amplamente utilizado: nas recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP, 2007b); em padrões internacionais BSS estabelecidos sob os auspícios da IAEA (EC et al., 2014); e até mesmo em resoluções da Conferência Geral da IAEA (2004a). O termo tem sido definido como produtos geralmente usados ou consumidos pelo público que podem conter substâncias radioativas. No entanto, em seu uso convencional, *commodities* referem-se a matérias-primas ou produtos agrícolas

primários. Além disso, é um termo que não admite tradução direta; na verdade, foi traduzido como *commodity*. Por todas essas razões, o uso desse termo deve ser desencorajado.

Em princípio, os termos “produto de consumo” e “bem de consumo” não apresentam diferenças significativas; podem ser usados como quase sinônimos. Na linguagem comum, ambos se referem a todos os bens de uso diário fornecidos para consumo ou uso público. No entanto, o glossário das normas internacionais vigentes define um produto de consumo como “um dispositivo ou artigo fabricado no qual radionuclídeos foram deliberadamente incorporados ou produzidos por ativação, ou que gera radiação ionizante, e que pode ser vendido ou disponibilizado aos membros do público sem vigilância especial ou controle regulatório pós-venda” (IAEA, 2019). Esta definição abrange apenas itens como detectores de fumaça e mostradores luminosos nos quais radionuclídeos foram deliberadamente incorporados, bem como tubos geradores de íons. Não inclui bens como materiais de construção, revestimentos cerâmicos, fontes termais, minerais e alimentos, e exclui produtos instalados em locais públicos. Esta definição de glossário não considera o termo “produto de consumo” como sinônimo de “bem de consumo”.

Em suma, para evitar confusão, sugere-se internacionalizar o uso do termo “bens de consumo” para se referir a todos os itens fornecidos para consumo ou uso público, incluindo mercadorias, produtos comestíveis e não comestíveis, materiais, bens e artigos.

## Produtos alimentícios

A comida é um bem de consumo por excelência, e o principal desafio é compartilhar um entendimento comum do conceito de comida. Nas denotações modernas, comida está substituindo o termo “nutrição”, que é derivado de *alere*, que significa nutrir. O Codex Alimentarius, a coleção de padrões reconhecidos internacionalmente, código de prática, diretrizes e outras recomendações relacionadas, usa o termo “alimento”.

Produção de alimentos e segurança alimentar é uma referência adequada para entender o significado do conceito. Para fins do Codex, “alimento” significa qualquer substância, seja ela processada, semiprocessada ou crua, destinada ao consumo humano, e inclui bebidas e qualquer substância que tenha sido utilizada na fabricação, preparação ou tratamento de alimentos; obviamente não inclui cosméticos ou tabaco ou substâncias usadas apenas como drogas (FAO, 2022a).

Ou seja, o alimento compreende qualquer substância nutritiva comestível que as pessoas ingerem para manter a vida e o crescimento.

No entanto, esse entendimento direto ainda apresenta algumas dúvidas básicas, por exemplo:

- Como a água é uma bebida, deve ser considerada alimento de acordo com a definição? E, em caso afirmativo, por que alimentos e água são regulamentados separadamente?

- As drogas não são a única substância que as pessoas ingerem. Outras substâncias comestíveis que as pessoas ingerem por prazer ou vício, não por nutrição, também devem ser consideradas alimentos?
- O significado de “comestível” é um tanto ambíguo e tem conotações culturais; substâncias que são comestíveis em algumas culturas são consideradas não comestíveis em outras; por exemplo, intestinos de animais são um prato gourmet em alguns países, mas em outros eles são usados apenas para cordas de instrumentos. Como essas diferenças devem ser consideradas na regulamentação?
- Crianças e adultos, mulheres e homens, têm preferências alimentares diferentes. Alguns alimentos são consumidos principalmente por bebês e crianças, enquanto outros são consumidos apenas por adultos; alguns são preferidos por mulheres e outros por homens. Como essas diferenças devem ser levadas em consideração ao decidir quais concentrações de radionuclídeos em alimentos podem exigir controle regulatório?
- A comida é um bem de consumo comestível?
- A comida inclui bebidas?

A Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, agência especializada que lidera os esforços internacionais para combater a fome e melhorar a nutrição e a segurança alimentar, possui um portal de termos para armazenar, gerenciar e atualizar conceitos, termos e definições (FAO, 2022b), mas essas questões básicas não são abordadas.

Parece, portanto, que uma questão básica a ser estabelecida para a regulação do bem de consumo é a definição precisa de alimento.

## Água

Parece que não deveria haver nada mais simples do que a definição de água. No entanto, quando a água é considerada um bem de consumo, surgem alguns problemas.

A água como bem de consumo é regulamentada sob o termo “água potável”. Mas o termo não é absolutamente claro. Ao utilizar o termo água potável, parece que a intenção era referir-se ao que normalmente é chamado de água da torneira, ou seja, água fornecida por tubulações *ad hoc*.

As chamadas águas engarrafadas são reguladas separadamente da água potável. São águas engarrafadas, que não as águas minerais naturais, que podem conter minerais, naturais ou adicionados intencionalmente, e dióxido de carbono, natural ou adicionado intencionalmente, mas não devem conter açúcares, adoçantes, aromatizantes ou outros alimentos.

As chamadas águas *minerais* também são regulamentadas separadamente, e embora sejam a água potável mais comum em muitos países, na verdade não são regulamentadas porque não há limite para seu conteúdo de radioatividade. As águas minerais incluem: água



mineral naturalmente gaseificada, água mineral natural, água mineral natural descarbonada e água mineral natural fortificada com dióxido de carbono da fonte.

Parece que essa separação em várias “águas” não ajuda a regular os bens de consumo.

## Contaminação

Talvez o conceito mais crucial para regular os bens de consumo seja aquele distinguido pelo termo “contaminação”. Ele foi formalmente definido como a presença de substâncias radioativas em superfícies, ou em materiais sólidos, líquidos ou gasosos (incluindo o corpo humano), quando não intencional ou indesejável, ou como o processo que dá origem a tal presença (González, 2022). Embora a definição formal mostre claramente que o termo não dá nenhuma indicação da magnitude do perigo envolvido, na prática o termo adquiriu uma conotação quase sinônima de uma situação perigosa.

Em relação aos bens de consumo, a contaminação tem uma conotação particular, pois transmite a ideia de perigo. O uso do termo “bem de consumo contaminado” causa preocupação pública, pois as pessoas o percebem como uma situação binária, ou seja, há contaminação e algum perigo, ou não. Além disso, aplicado aos alimentos, tem uma denotação religiosa, pois seu significado primitivo (do latim *contaminare*) é tornar um alimento religiosamente impuro (por exemplo, “não *kosher*”).

Com isso, o conceito de “baixos níveis de contaminação em um bem de consumo” tornou-se incompreensível para muitas pessoas, ou seja, ou há contaminação e perigo ou impureza ou não há contaminação. Esses antecedentes causaram ansiedade às pessoas, principalmente após acidentes, e confusão às autoridades ao lidar ou discutir a radioatividade em bens de consumo. O uso do termo é particularmente inútil para bens de consumo.

### (c) Situação regulatória

O controle regulatório de bens de consumo que apresentam níveis de radioatividade historicamente não tem sido fácil e continua sendo ambíguo. Existem alguns acordos intergovernamentais internacionais separados, incluindo padrões básicos de segurança e padrões específicos para alimentos, água potável, outras águas e outros bens, mas eles eram e continuam sendo incoerentes e inconsistentes.

A regulamentação da radioatividade em bens de consumo era regida pelas Normas Básicas de Segurança (BSS) internacionais. A edição de 1962 da BSS estabelecia que as exigências de notificação, registro e licenciamento poderiam ser dispensadas se as substâncias radioativas fosse usadas em concentração que não excedesse os valores especificados, exceto para a adição intencional de radionuclídeos na fabricação de bens de consumo como alimentos, produtos farmacêuticos, cosméticos e brinquedos; além disso, para limitar a exposição à radiação por ingestão e inalação, foram estabelecidas concentrações máximas permissíveis de radionuclídeos individuais no ar e na água (IAEA,

1962). Essencialmente a mesma abordagem foi mantida nas edições de 1967 e 1982 do BSS (IAEA, 1967, 1982).

No final da década de 1980, chegou-se a um consenso internacional sobre os princípios para o escopo do controle regulatório (Linsley; González, 1988), e em 1988 chegou-se a um consenso sobre os critérios para determinar quais fontes e práticas podem, em um sentido geral, ser isentas de controle regulatório por apresentarem riscos e danos triviais de radiação (IAEA, 1988). Portanto, na edição de 1996 do BSS, os valores de isenção foram desenvolvidos usando critérios de dose (IAEA, 1996). Usando um critério dosimétrico de 10  $\mu\text{Sv}$  em um ano, modelos conservadores e incertos foram usados para calcular a concentração de atividade e valores de atividade total abaixo dos quais se assumiu que o cumprimento do critério de dose estava assegurado.

Em 2000, a Conferência Geral da IAEA adotou uma resolução pedindo o desenvolvimento de critérios radiológicos para radionuclídeos de vida longa em *commodities* (González, 2014c), mas nenhum acordo foi alcançado e, em vez disso, foi fornecida orientação sobre a aplicação dos conceitos de exclusão, isenção e autorização, desenvolvida e publicada em 2004 (IAEA, 2004b).

Em 2007, a ICRP emitiu recomendações para definir o escopo do controle regulatório (González, 2014c), que sugeria abordagens às autoridades nacionais para definir, por meio de regulamentos, o escopo das medições de controle de proteção radiológica, inclusive de bens de consumo.

Enquanto isso, o controle de alimentos passou a ser regulamentado pela Comissão do Codex Alimentarius, estabelecida pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) e pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (FAO, 2009).

A chamada “água potável” é regulada implicitamente seguindo as diretrizes de água potável da OMS (2011, 2018), embora a água engarrafada e a água mineral sejam reguladas separadamente pela FAO (2001, 2011). Assim, a edição 2011 da BSS sintetiza o *status quo* da situação reunindo todos os critérios recomendados, mas sem homogeneizá-los em uma única abordagem para o controle regulatório de bens de consumo.

Em resumo, os documentos relevantes produzidos pela IAEA, a Comissão do Codex Alimentarius, a FAO e a OMS foram considerados inconsistentes em relação ao escopo, aos critérios de proteção contra radiação e à terminologia (IAEA, 2016). Sem surpresa, nos últimos anos, a Conferência Geral da IAEA ordenou que o Secretariado da IAEA cooperasse com organizações internacionais relevantes no desenvolvimento de uma estrutura harmonizada para o controle da radioatividade no consumo de bens.

#### *(d) Apreciação dos Países.*

A IAEA e a Autoridade Reguladora Nuclear Argentina (ARN) organizaram um workshop

para representantes dos Países em Buenos Aires, Argentina, para discutir a aplicação das atuais normas internacionais para a gestão da radioatividade em bens de consumo. A IAEA organizou um workshop semelhante em Xi'an, China. Dessas reuniões e de outras consultas foram extraídas as opiniões pertinentes dos representantes dos países, que incluíam o seguinte:

- as normas internacionais devem ser harmonizadas;
- as mercadorias de diferentes situações de exposição não serão diferenciadas;
- os valores naturais de radioatividade no habitat, para alimentos, água potável e produtos não alimentícios, devem ser usados como referência;
- o Codex Alimentarius deve incluir níveis de radionuclídeos naturais nos alimentos;
- a dose indicativa total da OMS de 0,1 mSv/a causa confusão com o nível de referência de 1 mSv/a nos padrões internacionais de segurança (os países não podem atingir esse valor, pois possuem valores mais altos em seu ambiente natural), o valor da OMS não é padrão mas um guideline com valor indicativo, acima do qual se deve averiguar as razões, uma vez que a OMS assina o BSS onde o valor é 10 vezes maior;
- os mesmos critérios devem ser aplicados à água potável, água engarrafada e água mineral natural;
- as faixas de valores não devem ser utilizadas para regular a atividade em bens de consumo, pois as pessoas e autoridades tendem a acreditar que os valores mínimos são seguros;
- deve haver um acordo internacional sobre o status de quaisquer números que venham a ser definidos, a saber: alertas, limites, limites superiores, limites inferiores, níveis de ação, níveis de gatilho etc.;
- devem ser evitadas situações em que mercadorias não regulamentadas não possam ser transportadas livremente e vice-versa;
- o controle regulatório de bens de consumo deve ser baseado em valores de atividade, pois a estimativa de doses pode ter muita incerteza, devido à variabilidade dos parâmetros.

#### (e) Conclusão

Conclui-se que:

- Os termos “*commodities*” e “produtos de consumo” devem ser substituídos pelo termo “bens de consumo”, que é definido da seguinte forma: bens de consumo são aqueles produtos fornecidos para consumo ou uso público, incluindo mercadorias, produtos alimentícios básicos e não alimentícios e outros materiais, bens ou artigos. Essa nova definição não inclui artigos aos quais substâncias radioativas são adicionadas intencionalmente, para os quais o termo existente “produtos de consumo” deve ser usado.

- O termo “poluição” deve ser evitado quando se refere a bens de consumo. Em vez de se referir a bens de consumo contaminados, deve ser feita referência à presença de radionuclídeos nesses bens.
- A grandeza que deve ser utilizada para regular os bens de consumo é a (radio) atividade e seus derivados, por exemplo, a atividade por unidade de volume ou por unidade de peso ou por unidade de área do bem em questão. Não é razoável, por razões práticas e epistemológicas, utilizar grandezas dosimétricas como base principal para monitorar a presença de radioatividade em bens de consumo. Essas grandezas geralmente não são mensuráveis em relação ao consumo ou uso de bens de consumo, e sua estimativa requer modelos subjetivos, muitas vezes com incertezas substanciais.
- A presença de radionuclídeos em bens de consumo deve ser regulamentada, independentemente da origem dos radionuclídeos, pois os riscos de radiação são independentes da origem da atividade. Em outras palavras, especificamente, os bens de consumo que contenham radionuclídeos naturais e artificiais devem ser regulamentados com os mesmos critérios e padrões. Não obstante o exposto, a regulamentação também pode levar em conta a possibilidade de controle e, possivelmente, também as expectativas sociais dos afetados. ***(Nota: Este é um conundrum complicado. Existem bens de consumo com radioatividade naturalmente existente e sem problema algum. Qual seria a solução então? Sugerir a mesma concentração de atividade para os artificiais? Não tem sentido usar o valor superior de referência de dose dos artificiais para os naturais. O valor de dispensa para o uso de materiais com radionuclídeos naturais é 1mSv/ano. A solução deste conundrum não é simples)***
- A quantidade de radionuclídeos naturais presentes em bens de consumo amplamente disponíveis pode servir como um bom indicador de níveis aceitáveis de radioatividade de qualquer fonte de bens de consumo. É importante estabelecer a variabilidade que existe nas concentrações de vários radionuclídeos em bens de consumo (incluindo alimentos e água atualmente disponíveis gratuitamente no mercado).
- As estruturas nacionais devem ser coerentes e consistentes com as orientações de consenso internacional estabelecidas pelos órgãos dirigentes das organizações intergovernamentais internacionais relevantes. Isso é essencial, devido à onipresença e à distribuição global geral de bens de consumo.
- A regulação de bens de consumo não deve se basear na situação de exposição da qual derivam (por exemplo, planejada, emergencial ou existente) nem no tipo de exposição incorrida (por exemplo, ocupacional ou pública); isto é, todos os afetados por bens de consumo devem ser considerados membros do público em situação de exposição sem qualificação. A razão é que nem sempre é possível identificar com precisão a situação de exposição à radiação que gerou a presença de radioatividade em bens de consumo. Para o consumidor é irrelevante que tipo de situação de exposição deu origem à presença de radioatividade nos bens de consumo.

- Os critérios de controle regulatório para bens de consumo devem levar em conta visões conflitantes sobre salubridade. A separação dos bens de consumo entre os comestíveis e os considerados não comestíveis não é universal, porque a definição de comestibilidade implica atitudes culturais. No entanto, como os bens de consumo geralmente reconhecidos como mantimentos podem ser de interesse particular para as pessoas, nesses casos, deve ser considerada uma abordagem *ad hoc* para tratar separadamente os bens de consumo comestíveis e não comestíveis.
- Os níveis de atividade em bens de consumo considerados seguros para mulheres e crianças devem ser usados como critério primário, que deve ser estabelecido com base na consideração de uma “pessoa” teórica representativa das pessoas em maior risco. Critérios de controle para bens de consumo que introduzem diferenças de gênero ou idade são difíceis de implementar na prática; e mulheres e crianças são geralmente mais sensíveis à radiação do que homens adultos.
- Os elementos para o controle de bens de consumo podem ser enquadrados nos seguintes critérios:
  - [i] os Estados devem estabelecer níveis de radioatividade abaixo dos quais os bens de consumo podem ser excluídos do controle regulatório, porque tal controle é inaceitável (por exemplo, doses recebidas de <sup>40</sup>K na dieta são normalmente excluídas da regulação devido ao fato de serem controladas homeostaticamente no corpo); e
  - os reguladores devem estabelecer níveis de radioatividade abaixo dos quais os bens de consumo podem ser isentos de alguns ou de todos os requisitos de controle regulatório, porque tais requisitos regulatórios não são justificados.

Espera-se que essas sugestões sejam úteis para esclarecer uma série de questões relacionadas ao controle da radioatividade em bens de consumo. Até agora, essas questões não foram devidamente resolvidas e foram sujeitas a diferentes interpretações e confusão.

## 5. UM SISTEMA INCOMPLETO DE PROTEÇÃO CONTRA RADIAÇÃO NÃO IONIZANTE

### (a) Histórico

Para radiações não ionizantes, não há sistema de proteção comparável ao sistema de radiação ionizante. O único órgão internacional que trata do assunto é a Comissão Internacional de Proteção contra Radiações Não Ionizantes (ICNIRP); e algumas atividades são realizadas pela OMS.

A ICNIRP foi criado pela Associação Internacional de Proteção contra Radiações (IRPA), associação que agrupou os profissionais de radioproteção, em maio de 1992, em Montreal, com o objetivo de dar continuidade ao trabalho anteriormente realizado pelo Comitê Internacional de Radiação Não Radiológica. Radiação Ionizante da IRPA Seu leitmotiv foi “avançar a proteção contra radiações não ionizantes em benefício das pessoas e do meio ambiente”.

Em tese, pelo menos, a IRPA e a ICNIRP deveriam ter um forte relacionamento nesta questão com organizações relevantes no campo das radiações ionizantes, como o UNSCEAR, a ICRP ou a IAEA. Por mandato legal, a ICNIRP deveria ter submetido suas recomendações formais sobre proteção contra radiação não ionizante ao Conselho Executivo da IRPA e às Sociedades Associadas da IRPA antes da publicação. A IRPA contribui com uma bolsa anual para a ICNIRP. Portanto, embora a ICNIRP tenha sido criada como um órgão independente, do ponto de vista científico, seu mandato estatutário requer uma forte associação com a IRPA e suas sociedades constituintes.

Mas nada disso aconteceu na prática, e o paradigma internacional de proteção contra radiações não ionizantes está em um verdadeiro limbo.

*(b) Abordagens diferentes*

## **Ciência consensuada**

A base de consenso científico para proteção contra radiação ionizante é fornecida pelo UNSCEAR. Se o nome apropriado dessa organização única, criada pela Assembleia Geral das Nações Unidas em 1955, se refere à “radiação atômica”, dando a impressão de que poderia lidar tanto com radiações ionizantes quanto não ionizantes, seu mandato, no entanto, limitou-se a avaliar e relatar apenas os níveis e efeitos da exposição à radiação ionizante (UNGA, 1955). Governos e organizações de todo o mundo confiam nas estimativas do UNSCEAR como base científica para estabelecer medições de proteção contra radiações ionizantes.

Conforme descrito na Seção 2, o UNSCEAR forneceu estimativas da atribuição de efeitos à saúde ligados à radiação ionizante em contraste epistemológico com a inferência de riscos de radiação ionizante. Conforme descrito, a Assembleia Geral das Nações Unidas recebeu por unanimidade com apreço o relatório científico do UNSCEAR sobre este assunto. As estimativas do UNSCEAR foram resumidas pelo UNEP e condensadas em uma relação simplificada de exposição à radiação ionizante, como foi apresentado na Figura 1.

Não existe um processo semelhante para alcançar um consenso científico internacional sobre os efeitos das radiações não ionizantes. Não há nenhuma organização intergovernamental internacional semelhante ao UNSCEAR que alcance o consenso necessário no mais alto nível governamental. A ICNIRP parece estar agindo como um *proxy* para este processo.

Alcançar uma ciência consensual reconhecida internacionalmente parece ser difícil para as radiações não ionizantes. Apenas como exemplo, destaca-se o desacordo entre a ICNIRP e outras instituições relevantes sobre a questão crucial da plausibilidade biológica dos efeitos cancerígenos atribuíveis à exposição ligada à radiação não ionizante. São mais alguns exemplos:

- O Programa Nacional de Toxicologia dos EUA (NTP) concluiu que a exposição prolongada a campos eletromagnéticos (EMFs) de radiofrequência (RF) associados a telefones celulares (ou celulares) ou estações base parece ser cancerígena. O NTP fornece a base científica para programas, atividades e políticas dos EUA que promovem a saúde ou levam à prevenção de doenças. Fundado em 1978, o NTP desempenha um papel crítico na geração, interpretação e troca de informações sobre elementos potencialmente perigosos e se esforça para permanecer na vanguarda da pesquisa científica e do desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias. O NTP está envolvido em um grande número de estudos de carcinogênese associado à radiação não ionizante.
- O prestigioso Instituto Ramazzini na Itália relatou conclusões semelhantes sobre a carcinogenicidade da radiação não ionizante. O Instituto Ramazzini é uma prestigiada cooperativa social sem fins lucrativos que se dedica à luta contra o câncer há mais de duas décadas. As suas atividades centram-se em três áreas de atuação: investigação científica, diagnóstico precoce e divulgação. O Instituto colabora com o Collegium Ramazzini, uma academia internacional com cerca de 180 bolsistas em 32 países.
- Muitas outras instituições proeminentes vêm investigando a plausibilidade carcinogênica da radiação não ionizante. Estas incluem a prestigiosa Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC), uma agência intergovernamental que faz parte da OMS, cujo papel é conduzir e coordenar pesquisas sobre as causas do câncer (IARC, 2011).
- A literatura sobre a plausibilidade dos efeitos cancerígenos das radiações não ionizantes é extensa. Por exemplo, uma compilação substantiva pode ser encontrada nos documentos de Critérios de Saúde Ambiental da OMS, que fornecem análises internacionais críticas dos efeitos da radiação não ionizante sobre, entre outras coisas, a saúde humana e o meio ambiente.

Apesar desta vasta disponibilidade de informações discutindo a plausibilidade biológica da exposição à radiação não ionizante ser cancerígena, a ICNIRP (2020a) concluiu que limitações substanciais em seus estudos impedem tirar conclusões sobre radiofrequência, campos eletromagnéticos e carcinogênese.

Parece, então, que ainda não há um consenso completo para atribuir efeitos inequivocamente prejudiciais à saúde relacionados à exposição à radiação não ionizante.

# Diferentes critérios para o risco de câncer de radiações não ionizantes

		Animais			
		Suficiente	Limitado	Inadequado	Sugerindo falta
Humanos	Suficiente	1	1	1	1
	Limitado	2A (1)	2B (2A)	2B (2A)	2B (2A)
	Inadequado	2B (1,2A,3)	3 (2B)	3	3 (4)
	Sugerindo falta	3 (1)	3	3	4

Figura 6 – Diferentes critérios para o risco de câncer de radiações não ionizantes.

Fonte: Autor.

Aparentemente, segundo a ICNIRP, seriam necessários estudos epidemiológicos maiores e bem desenhados de populações humanas, além dos disponíveis. Mas as evidências parecem ser esmagadoras para um consenso sobre a plausibilidade biológica de que a exposição à radiação não ionizante pode ser cancerígena. No entanto, tal consenso não está disponível e não há instituição internacional semelhante ao UNSCEAR conseguindo tal consenso.

Em resumo, parece que não há nenhum mecanismo internacional disponível para alcançar um consenso científico universal sobre os efeitos nocivos à saúde ligados à exposição à radiação não ionizante. Uma questão básica permanece sem resposta: como pode ser construído um paradigma de proteção universalmente aceito para as radiações não ionizantes se não houver uma ciência internacional acordada para apoiá-lo?

## Paradigma universal

O paradigma universal que rege a proteção contra radiações ionizantes foi recomendado pela ICRP e é utilizado em todo o mundo. Como se sabe, a ICRP é uma instituição filantrópica sem fins lucrativos registrada na Charity Commission for England and Wales, que foi criada em 1928, no segundo Congresso Internacional de Radiologia, para responder às crescentes preocupações sobre os efeitos das radiações ionizantes. A ICRP se autodenomina “uma



organização internacional independente que promove para o benefício público a ciência da proteção contra radiações, em particular fornecendo recomendações e orientações sobre todos os aspectos da proteção contra radiações ionizantes”. O paradigma da ICRP foi construído ao longo dos anos com base em fortes doutrinas éticas e valores centrais consistentes. As últimas recomendações da ICRP refletem esse paradigma.

As doutrinas éticas básicas subjacentes ao paradigma da ICRP têm sido discutidas na literatura (González, 2011b). Elas compreendem doutrinas éticas orientadas para o indivíduo e para a sociedade.

A ética orientada para o indivíduo inclui:

- a *ética deontológica*, baseada no dever, na responsabilidade e na obrigação (não faça aos outros o que não devem fazer a você); e
- a *ética areté* (ἀρετή), baseada na virtude e no bem (faça o bem aos outros, mesmo que não seja retribuído).

A ética orientada para a sociedade inclui:

- a *ética teleológica*, baseada na consequência e no resultado (os fins justificam os meios); e
- a *ética utilitária*, baseada na utilidade e na eficiência (fazer o bem para o maior número de pessoas).

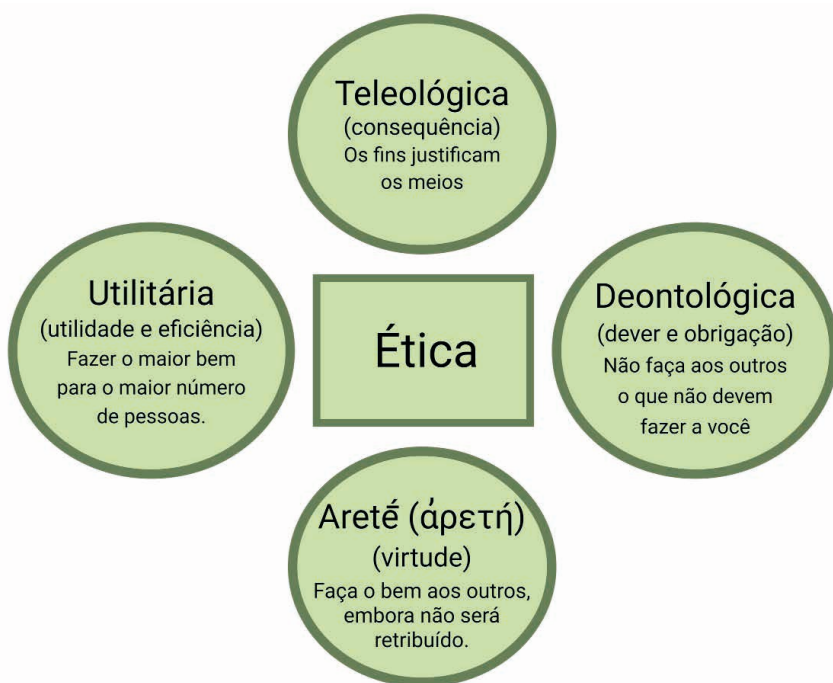


Figura 7 – Doutrinas éticas básicas subjacentes ao paradigma da ICRP.

Fonte: Autor.

Um equilíbrio adequado dessas doutrinas éticas um tanto díspares foi usado para formular os princípios do paradigma de proteção contra radiação ionizante desenvolvido pela ICRP.

Os fundamentos éticos do paradigma da proteção contra radiações ionizantes foram traduzidos em valores fundamentais. Estes foram relatados pela ICRP (2018) e incluem o seguinte:

- *beneficência e não maleficência*, que evitam efeitos nocivos ao ser humano e ao meio ambiente;
- *prudência*, que permite levar em conta as incertezas;
- *justiça*, que garante equidade social e equidade nas decisões; e
- *dignidade*, que considera o respeito que deve ser demonstrado às pessoas.

Sobre essas bases, foram construídos os princípios básicos do paradigma de proteção contra radiações ionizantes. Eles compreendem, como é bem conhecido pela comunidade de proteção contra radiações, o seguinte:

- a *justificação* das decisões que envolvam alterações na exposição às radiações ionizantes, com base na ética teleológica;
- a *otimização da proteção*, selecionando as melhores opções de proteção contra radiações ionizantes, com base na ética utilitarista;
- a *limitação ou restrição de exposições individuais*, com base na ética deontológica; e
- a *proteção das gerações futuras e do meio ambiente*, com base na ética areté, que é um princípio integrado aos da ICRP, reconhecido como um princípio independente nos fundamentos de segurança das organizações intergovernamentais internacionais.

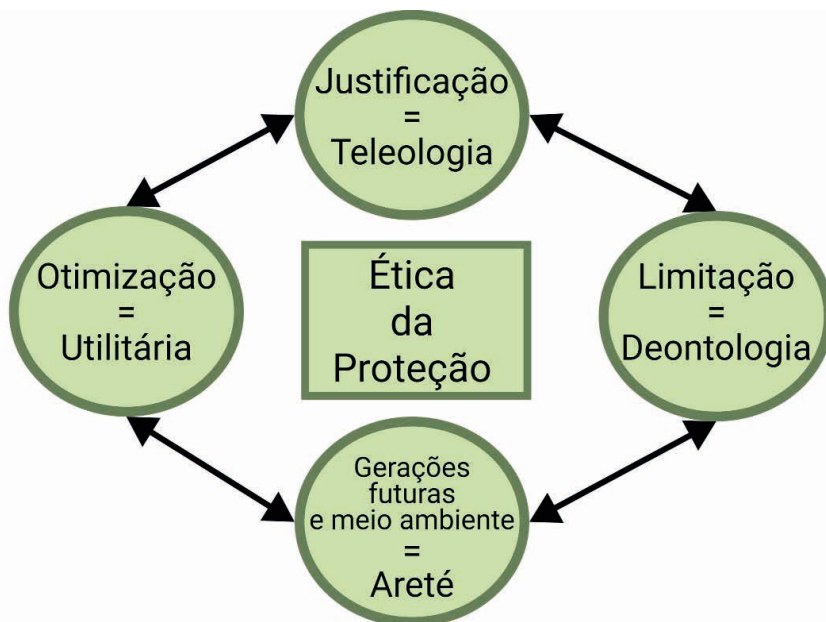


Figura 8 – Correlação entre os princípios de proteção e as doutrinas éticas.

Fonte: Autor.

Outra classificação do paradigma da ICRP inclui as situações que dão origem à exposição:

- *existente*: situações em que tem que tomar uma decisão sobre controle, incluindo radiação de fundo natural e resíduos de práticas passadas que foram operados fora das normas de segurança ou que permaneça após uma emergência (radiação de fundo está sendo entendida como não mexida/alterada pelo homem, o que não foi a intenção. Toda a exposição à radioatividade natural deve ser considerada existente, seja exposição devido ao local, seja ao uso de materiais);
- *planejada*: situações cotidianas que envolvem a operação planejada de fontes, incluindo o desmantelamento, a eliminação de resíduos radioativos e a reabilitação dos terrenos anteriormente ocupados; e
- *emergencial*: situações inesperadas que ocorrem durante a operação de uma prática, e que exigem medições urgentes.

E o tipo de exposição:

- *ocupacional*: exposições incorridas pelos trabalhadores no trabalho, exceto 1) exposições de atividades isentas, 2) exposições médicas e 3) exposições devidas ao fundo local de origem natural;

- *pública*: exposições incorridas por membros do público a partir de fontes de radiação, excluindo qualquer exposição profissional ou médica ou radiação natural local normal; e
- *paciente*: exposições incorridas pelos pacientes, como parte de um diagnóstico ou tratamento médico ou dentário; e por voluntários, no apoio e conforto dos pacientes ou em um programa de pesquisa biomédica.

*Observação: Não existe paradigma semelhante para proteção contra radiações não ionizantes.*

A principal função pretendida pela IRPA para a ICNIRP parece ter sido a recomendar um paradigma de proteção contra radiações não ionizantes, seguindo, *mutatis mutandi*, aquele paradigma construído ao longo dos anos pela ICRP para proteção contra radiações ionizantes. Não ficou claro, no entanto, em que base ética esse paradigma de proteção contra radiações não ionizantes seria construído. Como resultado, não está claro quais deveriam ser os princípios de proteção radiológica desse paradigma.

Após muito questionamento a esse respeito, recentemente, quase seis décadas após sua constituição, a ICNIRP emitiu a Declaração da ICNIRP sobre Princípios de Proteção contra Radiações Não Ionizantes. Esses princípios afirmam que “os princípios gerais de proteção contra radiações não ionizantes são baseados nos princípios bem estabelecidos na ICRP 2007 e nos valores éticos subjacentes publicados pela ICRP” (ICNIRP, 2020b).

Esta declaração foi muito bem recebida, porque pela primeira vez em muitos anos foi declarado um quadro claro de princípios de proteção contra radiações nãoionizantes.

No entanto, apesar desta declaração ter sido muito bem recebida, não está claro como ela será implementada adequadamente na prática. Por exemplo:

- Para o princípio de justificação, tanto a ICRP quanto a ICNIRP afirmam que “qualquer decisão que altere a situação de exposição à radiação deve fazer mais bem do que mal”. No entanto, há uma condição da ICNIRP indicando que os problemas sociais e econômicos não devem ser abordados explicitamente, pois são considerados de responsabilidade dos governos e autoridades competentes. Desse modo, não está claro como o princípio da justificação poderia ser tratado sem abordar questões sociais e econômicas.
- Pelo princípio da otimização da proteção, enquanto a ICRP visa a melhor proteção nas circunstâncias prevaletentes, a ICNIRP estabelece que quando as restrições de exposição estabelecidas pela ICNIRP estiverem bem abaixo dos níveis limiares para efeitos adversos à saúde, uma redução adicional nos valores-limite não leva a benefícios adicionais à saúde e, portanto, a otimização não é necessária.
- Pelo princípio da limitação, enquanto a ICRP recomenda limites de exposição individuais para limitar os riscos inferidos de efeitos estocásticos, ou seja, efeitos biologicamente plausíveis, mas não necessariamente atribuíveis, e que estão

bem abaixo dos limites para efeitos determinísticos e limites epidemiológicos para detecção de aumentos na incidência de efeitos estocásticos, a ICNIRP afirma que a exposição é limitada abaixo do nível com risco aceito de efeitos adversos, ou abaixo do nível limite de efeitos adversos à saúde, em que é viável reduzir a exposição abaixo desses limites .

- Para o princípio de proteção das gerações futuras e do meio ambiente, que é implicitamente reconhecido pela ICRP e estabelecido nas fundações internacionais de segurança, enquanto a ICRP recomenda limitar o comprometimento da exposição cometida, em vez da exposição incorrida, e proteger o meio ambiente para manter a segurança e diversidade biológica e para garantir a conservação das espécies e proteger a saúde e o estado dos habitats naturais, comunidades e ecossistemas, não está totalmente claro qual é a posição da ICNIRP sobre essas questões cruciais.

Parece haver uma incompatibilidade entre as intenções do paradigma da ICRP e a compreensão da ICNIRP desse paradigma.

### **Regime intergovernamental**

O sistema de organizações intergovernamentais internacionais criou, ao longo de mais de meio século, um regime de segurança intergovernamental muito abrangente sobre a segurança das atividades que envolvem exposição a radiações ionizantes. Foi desencadeada por resoluções dos órgãos reguladores da IAEA.

## **Regime de segurança** do sistema de organizações intergovernamentais internacionais

---



Figura 9 – Regime de segurança do organizações intergovernamentais internacionais.

Fonte: Autor.

O sistema é baseado em os Princípios Fundamentais de Segurança que incluem:

- responsabilidade pela segurança;
- papel do governo;
- liderança e gestão para a segurança;
- justificação das ações;
- otimização de proteção;
- limitação de riscos para as pessoas;
- proteção das gerações presentes e futuras;
- prevenção de acidentes;
- preparação e resposta às emergências; e
- ações de proteção para riscos de radiação existentes ou não regulamentados.

Além dos Princípios Fundamentais de Segurança, que apresentam o objetivo fundamental de segurança e os princípios de proteção e segurança em relação às radiações ionizantes, o sistema inclui uma infinidade de normas e regulamentos distinguidos como Requisitos de Segurança e Guias de Segurança.

Os Requisitos de Segurança são um conjunto integrado e consistente de documentos regulatórios que estabelecem o que deve ser cumprido para garantir a proteção das pessoas e do meio ambiente contra as radiações ionizantes, tanto agora como no futuro. Os requisitos *primus inter pares* para proteção contra radiações ionizantes são os chamados e descritos BSS. Se os requisitos não forem atendidos, etapas devem ser tomadas para atingir ou restaurar o nível de segurança necessário.

O formato e estilo desses requisitos internacionais facilitam seu uso para o estabelecimento, de forma harmonizada, de um marco regulatório nacional. Os requisitos são expressos como declarações “devem”.

Os Guias de Segurança fornecem recomendações e orientações sobre como cumprir os Requisitos de Segurança, indicando um consenso internacional de que as ações recomendadas ou ações alternativas equivalentes precisam ser tomadas.

Os guias de segurança apresentam boas práticas internacionais e refletem cada vez mais as melhores práticas para ajudar os usuários que buscam altos níveis de segurança. A orientação fornecida nos guias de segurança é expressa como declarações “deveria”.

O *corpus* de Fundamentos, Requisitos e Guias de Segurança compreende centenas de documentos que estabelecem padrões de segurança precisos para proteção contra radiações ionizantes.

- Observação: Não existe um regime internacional e intergovernamental semelhante para radiações não ionizantes.

De fato, nada equivalente ou mesmo similar ao regime internacional de segurança intergovernamental para radiações ionizantes existe para radiações não ionizantes. O estabelecimento de um regime de segurança internacional e intergovernamental de normas e obrigações para proteção contra radiações não ionizantes está além da competência legal da ICNIRP e nenhuma organização intergovernamental lida com o problema.

### Disposições para aplicações práticas

Existe um sistema para prever a aplicação das normas e diretrizes estabelecidas pelo regime internacional de segurança intergovernamental que inclui, entre outras coisas:

- prestar assistência técnica aos solicitantes;
- promover a troca de informações entre especialistas;
- promover a educação e formação de novos profissionais;
- coordenar pesquisa e desenvolvimento entre centros e laboratórios especializados; e, por último, mas não menos importante,
- prestar de serviços de avaliação para verificar o cumprimento das normas.

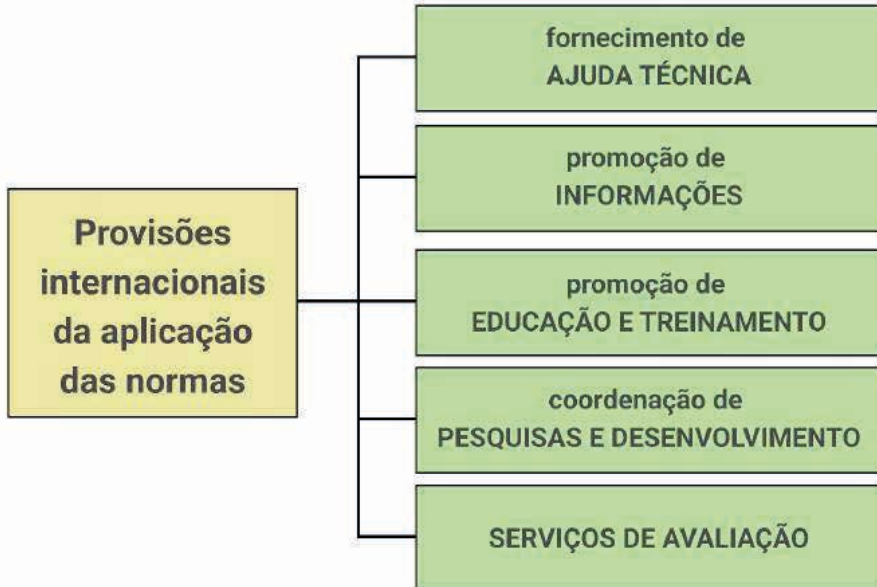


Figura 10 – Sistema para prever a aplicação das normas e diretrizes estabelecidas pelo regime internacional de segurança intergovernamental.

Fonte: Autor.

Para as radiações não ionizantes, não há nada equivalente ou mesmo semelhante ao sistema de disposições para a aplicação de normas para radiações ionizantes.

A ICNIRP tem tido algumas iniciativas neste sentido de tentar promover a troca de informação, como, por exemplo, a organização do Workshop Internacional sobre radiações não ionizantes, que foi planejado no âmbito do Congresso IRPA15 e teve de ser cancelado. Mas eles não são nem comparáveis ao sistema existente de radiação ionizante.

## 6. CONCLUSÃO

O sistema de proteção contra as radiações ionizantes precede o das radiações não ionizantes. Consciente dos desafios da radiação não ionizante, a IRPA criou devidamente um Comitê Internacional de Radiação Não Ionizante e, em seguida, em 1992, a ICNIRP. Apesar destas boas intenções, 30 anos depois, permanecem várias questões fundamentais que merecem respostas inequívocas:

- Qual é o consenso científico internacional sobre os efeitos nocivos à saúde ligados à exposição a radiações não ionizantes?
- Qual é a ética racional do paradigma da proteção contra radiações não ionizantes? Quais são seus princípios de proteção usados para radiação não ionizante?
- Qual é o sistema intergovernamental de normas e obrigações designado para formalizar internacionalmente a proteção contra radiações não ionizantes?
- Que disposições estão estabelecidas para as aplicações práticas das normas de proteção contra radiações não ionizantes?

Os anos estão passando e muitos colegas podem questionar se estamos tratando a proteção contra radiação não ionizante com as mesmas considerações éticas que tratamos a proteção contra radiação ionizante. Parece essencial que as sociedades nacionais de proteção radiológica que constituem a IRPA e sua infinidade de profissionais de proteção radiológica, bem como a própria IRPA, busquem respostas claras e inequívocas para as questões colocadas até agora.

Parece que chegou a hora de fechar a lacuna entre a proteção contra as radiações ionizantes e a proteção contra as radiações não ionizantes!

## REFERÊNCIAS

DE ROVO, A. *WNA-Views from Radiation Protection Practitioners in the Nuclear Industry*. IRPA15 – 15<sup>th</sup> International Congress of the International Radiation Protection Association, Seoul, Korea, 18-22 jan. 2021.

EC, FAO, IAEA, ILO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO. *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. No. GSR Part 3. IAEA, Vienna: IAEA, 2014.



Euratom, FAO, IAEA, ILO, IMO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO. *Fundamental Safety Principles*. Vienna: IAEA, 2006.

FAO. CODEX ALIMENTARIUS. *Glossary of terms*. 2022a. Disponível em: <http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/dbs/vetdrugs/glossary/en/>. Acesso em: 20 fev. 2022.

FAO. *General Standard for Bottled/Packaged Drinking Waters other than natural mineral waters*. CODEX STAND 227-2001. Rome: FAO, 2001.

FAO. *General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed*. CODEX STAN 193-1995. Rome: FAO, 2009.

FAO. *Term Portal*. 2022b. Disponível em: <http://www.fao.org/faoterm/en/?defaultCollId=4>. Acesso em: 20 fev. 2022.

FAO. *The Codex Standard for Natural Mineral Waters*. CODEX STANDARD 108-1981. Rome: FAO, 2011.

GONZÁLEZ, A. J. *Análises sobre o sistema internacional de grandezas e unidades de proteção contra radiação*. VII Congresso Brasileiro de Metrologia das Radiações Ionizantes (CBMRI). Online, 23-25 nov. 2020b.

GONZÁLEZ, A. J. Clarifying the Paradigm for Protection Against Low Radiation Doses: Retrospective Attribution of Effects vis-à-vis Prospective Inference of Risk. *Radiation Protection in Australasia*, v. 31, p. 2-12, 2014c.

GONZÁLEZ, A. J. Clarifying the Paradigm on Radiation Effects & Safety Management: UNSCEAR Report on Attribution of Effects and Inference of Risks. *Nuclear Engineering and Technology*, v. 46, n. 4, p. 467-474, 2014b.

GONZÁLEZ, A. J. *Emerging challenges for the International System of Radiation Protection Quantities and Units*. IRPA15 – 15<sup>th</sup> International Congress of the International Radiation Protection Association, Seoul, Korea, 18-22 jan. 2021b.

GONZÁLEZ, A. J. *Emerging Challenges in Radiation Protection*. International Conference on Radiation Safety: Improving Radiation Protection in Practice. IAEA, Vienna, Áustria, 9-13 nov. 2020a.

GONZÁLEZ, A. J. Epistemology on the attribution of radiation risks and effects to low radiation dose exposure situations. *International Journal of Low Radiation*, v. 8, n. 3, p. 172-197, 2011a.

GONZÁLEZ, A. J. Keynote address: Imputability of health effects to low-dose radiation exposure situations. In: MANÓVIL, R. M. (ed.). *Nuclear Law in Progress*. Buenos Aires: Legis Argentina S.A., 2014a.

GONZÁLEZ, A. J. Las bases éticas de los principios internacionales de la protección radiológica. *Radio-protección*, v. XIX, n. 69, 2011b.

GONZÁLEZ, A. J. Legal Imputation of Radiation Harm to Radiation Exposure Situations. In: *Nuclear Law: The Global Debate*. Vienna: IAEA Editor, Asser Press, Springer, 2022.

GONZÁLEZ, A. J. *Prospects on the ICRP Paradigm for Protection against Ionizing Radiation*. The Future Of Radiological Protection: A Digital Workshop. ICRP, Amsterdam, Holanda, 19-20 out. 2021a.

GONZÁLEZ, A. J. *Radioactivity in Goods Supplied for Public Consumption or Use: Towards an Internationally Harmonized Regulatory Framework*. IRPA15 – 15<sup>th</sup> International Congress of the International Radiation Protection Association, Seoul, Korea, 18-22 jan. 2021c.

GONZÁLEZ, A. J. *The Concept of Radiation Risk*. The 2<sup>nd</sup> NEA Workshop on Stakeholder Involvement: Risk Communication. Session on “Risk Communication: What and Why”, OECD/NEA Conference Centre, Paris, France, 24-26 set. 2019.

GONZÁLEZ, A. J. The debate on the health effects attributable to low radiation exposure. *Pierce Law Review*, v. 1, p. 39-67, 2002.

GONZÁLEZ, A. J. The radiological health consequences of Chernobyl: the dilemma of causation. In: *Nuclear Accidents: Liabilities and Guarantees*. Paris: OECD/NEA, 1993.

GONZÁLEZ, A. J.; AKASHI, M.; BOICE JR., J. D.; CHINO, M.; HOMMA, T.; ISHIGURE, N.; KAI, M.; KUSUMI, S.; LEE, J. K.; MENZEL, H. G.; NIWA, O.; SAKAI, K.; WEISS, W.; YAMASHITA, S.; YONEKURA, Y. Radiological protection issues arising during and after the Fukushima nuclear reactor accident. *Journal of Radiological Protection*, v. 33, n. 3, p. 497-571, 2013.

GONZÁLEZ, A. J.; de ALMEIDA, C. E.; SPANO, F. Radiation Protection Quantities and Units: Desirable Improvements. In: PEIXOTO, J. G. P. (ed.) et al. *Ionizing Radiation Metrology*. Rio de Janeiro: Departamento de Metrologia, Instituto de Radioproteção e Dosimetria; Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2016.

GONZÁLEZ, A. J.; TOUZET, R. *Protection against ionizing radiation vis-à-vis Protection against non-ionizing radiation: Different approaches*. IRPA15 – 15<sup>th</sup> International Congress of the International Radiation Protection, Seoul, Korea, 18-22 jan. 2021.

HARRISON, J. *The Use of Effective Dose as a Radiological Protection Quantity*. IRPA15 – 15<sup>th</sup> International Congress of the International Radiation Protection Association, Seoul, Korea, 18-22 jan. 2021.

IAEA. *Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance*. Vienna: IAEA, 2004b. IAEA. *Basic Safety Standards for Radiation Protection*. Vienna: IAEA, 1962.

IAEA. *Basic Safety Standards for Radiation Protection*. Vienna: IAEA, 1967. IAEA. *Basic Safety Standards for Radiation Protection*. Vienna: IAEA, 1982.

IAEA. *IAEA Safety Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection*. 2018 Edition. Vienna: IAEA, 2019.

IAEA. *International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*. Vienna: IAEA, 1996.

IAEA. *Principles for the Exemption of Radiation Sources and Practices from Regulatory Control*. Vienna: IAEA, 1988.

IAEA. *Radiological Criteria for Radionuclides in Commodities*. Resolution of the IAEA General Conference GC[48]/RES/10 under 805 A., 4., pt. 23. Vienna: IAEA, 2004a.

- IAEA. TECDOC-1788. *Criteria for Radionuclide Activity Concentrations for Food and Drinking Water*. Vienna: IAEA, 2016.
- IAEA. *The Agency's Health and Safety Measures*. INFCIRC/18. Vienna: IAEA, 1960.
- IAEA. *The Agency's Health and Safety Measures*. INFCIRC/18/Rev. 1. Vienna: IAEA, 1976.
- IARC. *Non-ionizing radiation: Radiofrequency electromagnetic fields*. Lyon, France: IARC, 2011.
- ICNIRP. ICNIRP Note: Critical Evaluation of Two Radiofrequency Electromagnetic Field Animal Carcinogenicity Studies Published in 2018. *Health Phys.*, v. 118, n. 5, p. 533-542, 2020a.
- ICNIRP. ICNIRP Statement: Principles for Non-Ionizing Radiation Protection. *Health Phys*, v. 118, n. 5, p. 477-482, 2020b.
- ICRP. Ethical Foundations of the System of Radiological Protection. ICRP Publication 138. *Annals of the ICRP*, Amsterdam, v. 47, n. 1, 2018.
- ICRP. Low-dose extrapolation of radiation-related cancer risk. ICRP Publication 99. *Annals of the ICRP*, Amsterdam, v. 35, n. 4, 2005.
- ICRP. Scope of Radiological Protection Control Measures. ICRP Publication 104. *Annals of the ICRP*, Amsterdam, v. 37, n. 5, 2007b.
- ICRP. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*, Amsterdam, v. 37, n. 2-4, 2007a.
- ILO. Radiation Protection Convention n° 115, 1960. Disponível em: [https://www.ilo.org/dyn/normlex/en/f?p=NORMLEXPUB:12100:0::NO::P12100\\_INSTRUMENT\\_ID](https://www.ilo.org/dyn/normlex/en/f?p=NORMLEXPUB:12100:0::NO::P12100_INSTRUMENT_ID):  
31. Acesso em: 1 mar. 2022.
- LINSLEY, G. S.; GONZÁLEZ, A. J. *Exemption from regulatory control: An international consensus. A summary of essential features and concepts*. Vienna: IAEA, 1988.
- MENZEL, H. G. New Definitions of ICRU and ICRP Operational Quantities for External Radiation: Concept and Practical Implications. IRPA15 – 15<sup>th</sup> International Congress of the International Radiation Protection Association, Seoul, Korea, 18-22 jan. 2021.
- OMS. *Guidance on Management of Radioactivity in Drinking-water*. Geneva: OMS, 2018. OMS. *Guidelines for drinking-water quality, fourth edition*. Geneva: OMS, 2011.
- PEIXOTO, J. G. P. (ed.); POTIENS, M. P.; MCEWEN, M.; CUNHA, P. G.; GONZÁLEZ, A. J.; DE ALMEIDA, C. E.; SPANO, F.; PEREIRA, W. W.; LEITE, S. P.; DELGADO, J. U.; COSTA, P. R.; NERISSIAN, D. Y.; SALATA, C. *Ionizing Radiation Metrology*. Rio de Janeiro: Departamento de Metrologia, Instituto de Radioproteção e Dosimetria; Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2016.
- UNEP. *Radiation: effects and sources*. New York: United Nations Environment Programme, 2016.

UNGA. *Effects of atomic radiation*. Resolution 67/112. Report of the Special Political and Decolonization Committee (Fourth Committee) (A/67/421). New York: United Nations; 2012.

UNGA. *The UNSCEAR founding resolution*. Resolution 913 (X), 3 dez. 1955.

UNSCEAR. *Sources and effects of ionizing radiation*. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. I. New York: United Nations, 2010a. Disponível em: [https://www.unscear.org/docs/publications/2008/UNSCEAR\\_2008\\_Report\\_Vol.I-CORR.pdf](https://www.unscear.org/docs/publications/2008/UNSCEAR_2008_Report_Vol.I-CORR.pdf). Acesso em: 1 mar. 2022.

UNSCEAR. *Sources and effects of ionizing radiation*. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. II. New York: United Nations, 2010b. Disponível em: [https://www.unscear.org/docs/publications/2008/UNSCEAR\\_2008\\_Report\\_Vol.II.pdf](https://www.unscear.org/docs/publications/2008/UNSCEAR_2008_Report_Vol.II.pdf). Acesso em: 1 mar. 2022.

UNSCEAR. *Sources and effects of ionizing radiation*. UNSCEAR 2012 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York: United Nations; 2015. Disponível em: [https://www.unscear.org/docs/publications/2012/UNSCEAR\\_2012\\_Report.pdf](https://www.unscear.org/docs/publications/2012/UNSCEAR_2012_Report.pdf). Acesso em: 1 mar.2022.