



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA



Ivan Paz Ribeiro

Estimativa dosimétrica de trabalhadores envolvidos em prospecção de
petróleo: abordagem utilizando o método Monte Carlo

Monte Carmelo - MG

Setembro de 2023

IVAN PAZ RIBEIRO

Estimativa dosimétrica de trabalhadores envolvidos na exploração de
petróleo: abordagem utilizando o método Monte Carlo

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado
ao Curso de Geologia do Instituto de Geografia
da Universidade Federal de Uberlândia, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. William de Souza Santos

Monte Carmelo – MG

Setembro/2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CAMPUS MONTE CARMELO
INSTITUTO DE GEOGRAFIA – CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

IVAN PAZ RIBEIRO

**ESTIMATIVA DOSIMÉTRICA DE TRABALHADORES ENVOLVIDOS NA
EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO: ABORDAGEM UTILIZANDO O MÉTODO
MONTE CARLO**

Trabalho Final de Graduação para obtenção do grau de Bacharel em Geologia

Banca Examinadora

Orientador: Prof. Dr. William de Souza Santos
Universidade Federal de Uberlândia

Prof.^a Dr.^a Josiane Branco Plantz
Universidade Federal do Uberlândia

Prof. Dr. Lucio Pereira Neves
Universidade Federal do Uberlândia

Monte Carmelo – MG
Setembro/2023

Dedico este trabalho *in memoriam* a minha avó, a senhora Marli Alves Paz, que me apoiou de todas as formas que pode, inexoravelmente.

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar aos meus pais, que desempenham um papel fundamental na minha vida e formação acadêmica. A minha mãe, quem me ensinou a dedicação ao estudo e, a meu pai, quem construiu meu senso crítico e me ensinou a pensar dialeticamente.

Agradeço a meus irmãos, tanto os inatos quanto aos que colhi ao longo da vida. Agradeço a meu irmão Jones pelos conselhos e pela paciência e fé neste trabalho.

Agradeço a meus avós, Justino e Marli, pelo apoio e carinho. Agradeço a minha tia Jaqueline, que sempre me encorajou a seguir meus próprios caminhos. A minha dinda Roxane pelo apoio.

Agradeço a meus sobrinhos e sobrinhas, que me trouxeram alegrias muito bem-vindas, e que facilitam qualquer trajetória.

Agradeço a meu orientador, a quem tenho por amigo, sua orientação, dedicação e paciência para comigo, foram fundamentais.

Agradeço a banca examinadora por aceitar o convite e pelas ponderações que refinam os conhecimentos destas páginas.

Agradeço a minha república QG, muito foi feito dentro de suas paredes, mas deixo meu agradecimento a seus membros que tanto me apoiaram ao longo dessa etapa, e representam um lar, para além dos tijolos e argamassas da casa.

Por fim, agradeço a Universidade Federal de Uberlândia e, especialmente ao curso de Graduação em Geologia.

Resumo

O petróleo é uma *commodity* fundamental para a sociedade. Seus derivados fazem parte de vida de bilhões diariamente, desde a queima de combustíveis fósseis até suas aplicações na indústria farmacêutica, por exemplo. Teve um papel chave na segunda revolução industrial, passando a ser a principal fonte de energia para a indústria. Apesar de sua importância, tornou-se conhecido pela comunidade científica que sua exploração pode vir acompanhada de risco de natureza radiológica àqueles envolvidos em sua extração. A questão tomou notoriedade internacional após a publicação da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, do inglês *International Atomic Energy Agency*) que alertava sobre o acúmulo de materiais radioativos de ocorrência natural (NORM do inglês *Natural Occurring Radioactive Material*) nos sítios de exploração em superfície e, a emissão de radiação ionizante associada a desintegração destes radionuclídeos. O objetivo deste trabalho é quantificar a exposição de trabalhadores a radiação ionizante durante a exploração de petróleo em sítios terrestres. Para alcançar os objetivos, foi utilizado o código de transporte de radiação Monte Carlo (MCNPX2.7.0) e uma dupla de simuladores antropomórficos masculino e feminino para representarem os trabalhadores. Os cenários simulados demonstraram que existe uma irradiação distinta entre gêneros dada as configurações de cada simulação. Foi calculado um conjunto de fatores de conversão para dose equivalente e efetiva para os trabalhadores. Os órgãos mais irradiados foram a medula óssea vermelha e pele. O cenário mais crítico foi para NORM presente no sludge, cujo resultado de FC para dose efetiva foi 1,4 Sv/Gy para o 40K.

Palavras-chave: NORM, produção de petróleo; dosimetria, método Monte Carlo; Radioproteção.

Abstract

Oil is a fundamental commodity for society. Its by-products are part of the lives of billions every day, from the burning of fossil fuels to their applications in the pharmaceutical industry, for example. It played a key role in the second industrial revolution, becoming the main source of energy for industry. Despite its importance, it has become known by the scientific community that its exploration might be accompanied by radiological risk to those involved in its extraction. The issue gained international notoriety after the publication of the International Atomic Energy Agency (IAEA) which warned about the accumulation of naturally occurring radioactive materials (NORM) in surface exploration sites and the emission of ionizing radiation associated with these radionuclides' disintegration. The objective of this work is to quantify the workers exposure to ionizing radiation during oil exploration in terrestrial sites. To this end, it is intended to use a simulation method with random evolution, known as the Monte Carlo method, and thus experiment with exposure levels in humans in a computational representation. The simulated scenarios demonstrated that there is a distinct radiosensitivity between organs given as configurations of each simulation. It was calculated a set of conversion factors for an equivalent and effective dose for workers. The most irradiated organs were the bone marrow and the skin. The most critical scenario involves NORM present in the sludge, whose CF result for effective dose was 1.4 Sv/Gy for 40K.

Keywords: Norm, oil production, Dosimetry, Monte Carlo method, Radioprotection.

Sumário

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | Radionuclídeos e radiação | 11 |
| 1.1.1 | Efeito fotoelétrico | 12 |
| 1.1.2 | Efeito Compton | 14 |
| 1.1.3 | Produção de par | 14 |
| 1.1.4 | A probabilidade relativa dos efeitos de interação..... | 15 |
| 1.2 | Efeitos da radiação ionizante na saúde humana..... | 16 |
| 1.2.1 | Única, fracionada ou periódica..... | 16 |
| 1.2.2 | Corpo inteiro, parcial ou colimada | 16 |
| 1.2.3 | Tipo de partícula..... | 16 |
| 1.2.5 | Efeito Estocástico | 18 |
| 1.2.4 | Efeito de reação tecidual..... | 18 |
| 1.2.5 | Efeito local..... | 18 |
| 1.2.6 | Efeito sistêmico | 18 |
| 1.3 | Grandezas Radiológicas utilizadas neste estudo..... | 19 |
| 1.3.1 | Dose absorvida (D)..... | 19 |
| 1.3.2 | Dose equivalente (H_T) | 19 |
| 1.3.3 | Dose efetiva (E)..... | 19 |
| 1.4 | Diretrizes Radiológicas utilizadas neste estudo | 20 |
| 1.5 | Aspectos gerais sobre o petróleo | 21 |
| 1.5.1 | Propriedades físico-químicas do petróleo..... | 22 |
| 1.6 | Os radionuclídeos na indústria do petróleo..... | 24 |
| 2 | MATERIAIS E MÉTODOS | 26 |
| 2.1 | Desenvolvimento do modelo computacional de exposição de trabalhadores em campos de petróleo por meio do código MCNPX2.7.0..... | 26 |
| 2.2 | Simuladores antropomórficos computacionais de referência | 27 |

| | | |
|-----|---|----|
| 2.3 | Cálculo de coeficiente de conversão..... | 28 |
| 2.4 | Modelo de solo natural de referência..... | 28 |
| 2.5 | Modelagem da crosta no interior do oleoduto | 29 |
| 2.6 | Modelagem do lodo produzido | 30 |
| 3 | OBJETIVOS..... | 30 |
| 4 | REFERENCIAL TEÓRICO | 31 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 36 |
| 5.1 | Cenário com solo contaminado..... | 36 |
| 5.2 | Cenário com <i>scale</i> | 37 |
| 5.3 | Cenário com lodo produzido..... | 38 |
| 6 | CONCLUSÃO | 41 |
| 7 | REFERÊNCIAS | 42 |
| 8 | ANEXOS..... | 46 |
| 8.1 | Anexo A | 46 |
| 8.2 | Anexo B | 47 |
| 8.3 | Anexo C | 48 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Radionuclídeos e radiação

O termo radionuclídeos compreende um grupo particular de átomos que modificam seu estado de energia emitindo partículas e/ou radiação gama, processo conhecido como decaimento radioativo. É possível se obter o tempo de meia vida ($T_{1/2}$), ou seja, o período demandado para que metade dos átomos do material mude de um estado de energia para outro (TAUHATA, 2003). Os radionuclídeos ditos primordiais são aqueles existentes desde a formação do planeta, sendo eles ^{40}K ($T_{1/2} = 1,28 \times 10^9$ anos), ^{232}Th ($T_{1/2} = 1,41 \times 10^{10}$ anos) e, ^{238}U ($T_{1/2} = 4,47 \times 10^9$ anos). Esses elementos radioativos aparecem em pequenas concentrações em diferentes materiais, por exemplo, urânio (^{235}U), tório (^{232}Th) e potássio (^{40}K), bem como seus elementos filhos (séries de decaimento para o ^{235}U e o ^{232}Th), aparecem como elementos traços, em rochas sedimentares, sendo quantificados em partes por milhão (ppm). O conteúdo radioativo dos materiais de ocorrência natural é referido como NORM – do inglês *Natural Occurring Radioactive Material* (WANG, 2016).

Existem processos industriais capazes de acumular NORMs em quantidades expressivas e que podem significar risco para a saúde dos trabalhadores. Atividades com potencial para o acúmulo nocivo de NORMs em suas plantas incluem: extração de óleo e gás, produção de fosfato, usinas baseadas na queima de carvão mineral, e o processamento de certos metais na indústria da mineração, tais como cobre, alumínio e ouro (REJAH, 2015; IAEA, 2003; IAEA, 2020). Por serem radionuclídeos concentrados a partir do emprego de tecnologia, esses elementos recebem o desígnio de TENORM, sigla em inglês que significa “materiais radioativos de ocorrência natural e tecnologicamente acumulados” em uma tradução livre (REJAH, 2015; WANG, 2016).

A radiação pode ser dividida entre as que possuem energia suficiente para liberar elétrons de um átomo, conhecida como radiação ionizante, e seu oposto, a radiação não-ionizante, ou seja, a radiação sem energia suficiente para arrancar elétrons dos átomos, como é o caso da luz visível (TAUHATA, 2003). Outra forma de classificar a radiação é relativa à sua proveniência, pois se pode separar entre fonte natural ou artificial. As fontes naturais referem-se aquelas cuja origem é encontrada na natureza, a exemplo da radiação cósmica. Outra fonte importante de radiação natural é o solo – as chamadas fontes terrestres – onde a exposição dos indivíduos é o resultado do decaimento de elementos naturalmente concentrados. Neste tipo de cenário, a dose efetiva média

mundial no período de um ano pode alcançar 0,48 mSv (UNEP, 1991). Fontes artificiais são de origem antrópica, como por exemplo, os equipamentos de raios-X médicos e industriais. Quanto ao tipo de exposição, pode-se classificar em fontes externas e internas. Fonte de radiação fora do corpo do indivíduo, é dita exposição externa, quando a fonte está localizada internamente, a exposição é classificada como exposição interna (UNEP, 1991).

O processo de ionização ocorre quando há interação da radiação com o meio material, cujo resultado é a remoção de elétrons de seus orbitais, formando elétrons livres, radicais livres e íons positivos. Quanto à radiação, é possível tipificá-la através das partículas, onde a radiação diretamente ionizante é aquela que apresenta partículas carregadas, tais como elétrons, partículas alfa e fragmentos de fissão, e a radiação indiretamente ionizante, tipo de radiação que não possui carga, como é o caso de feixes de fótons (radiação eletromagnética) ou de neutros, que pode interagir com o material transferindo energia e removendo elétrons (TAUHATA, 2003).

A interação da radiação com a matéria é um campo de estudo que considera diferentes tipos de radiação e de materiais, sejam sólidos, líquidos ou gases. Essas interações desempenham um papel fundamental em diversas áreas, como física, química, biologia e medicina. Aqui estão algumas das principais formas.

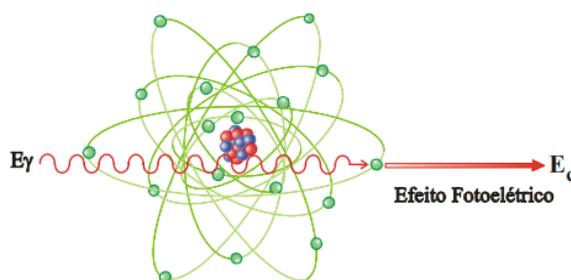
1.1.1 Efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é um fenômeno físico que descreve a liberação de elétrons por um material quando exposto a radiação eletromagnética de frequência adequada (Figura 1). O elétron ejetado possui energia cinética conhecida, segundo a Equação 1:

$$E_c = h\nu - B_e \quad (\text{Eq. 1})$$

onde h é a constante de Planck, ν é a frequência da radiação e B_e é a energia de ligação do elétron orbital.

Figura 1 – Esquema do efeito fotoelétrico.



Fonte: Tauhata, 2003.

O efeito fotoelétrico depende de vários parâmetros, que incluem energia do fóton, energia de ligação do elétron, tipo de material, intensidade da radiação e ângulo de incidência (TAUHATA, 2003).

- 1- Energia do fóton: O efeito fotoelétrico ocorre quando um fóton de energia suficiente interage com um átomo ou molécula. A energia do fóton deve ser igual ou maior que a energia de ligação do elétron no material.
- 2- Energia de ligação do elétron: Cada átomo ou molécula possui níveis de energia quantizados, incluindo os níveis de energia dos elétrons que orbitam em torno do núcleo. A energia de ligação é a energia mínima necessária para remover um elétron de um átomo ou molécula. Se a energia do fóton incidente for maior do que a energia de ligação do elétron, o elétron pode ser ejetado do material.
- 3- Tipo de material: O efeito fotoelétrico pode ocorrer em diferentes tipos de materiais, incluindo metais, semicondutores e gases. No entanto, a probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico varia de acordo com as propriedades do material. Em geral, os metais apresentam maior probabilidade de ejeção de elétrons por meio do efeito fotoelétrico devido à menor energia de ligação dos elétrons de valência.
- 4- Intensidade da radiação: A intensidade da radiação incidente afeta o número total de fótons que interagem com o material em um determinado intervalo de tempo. Uma maior intensidade de radiação resultará em uma taxa maior de ejeção de elétrons, mas a energia de cada elétron ejetado permanecerá a mesma, dependendo da energia do fóton.
- 5- Ângulo de incidência: O ângulo de incidência da radiação em relação à superfície do material também pode afetar o efeito fotoelétrico. Em geral, a

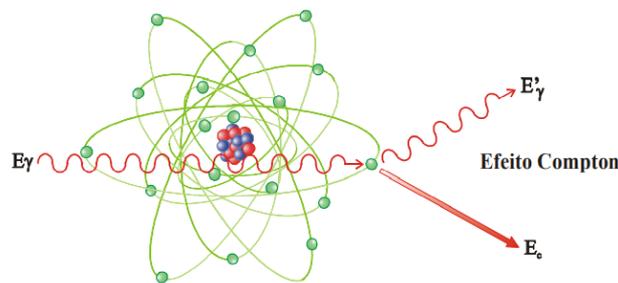
probabilidade de ejeção de elétrons é maior quando a radiação incide perpendicularmente à superfície do material.

1.1.2 Efeito Compton

O efeito Compton é uma forma de espalhamento inelástico da radiação, que ocorre quando fótons de alta energia interagem com elétrons livres ou fracamente ligados em um material. Durante essa interação, ocorre um desvio na direção da radiação e uma perda de energia, o que resulta no aumento do comprimento de onda da radiação espalhada (Figura 2). Esse efeito depende de alguns parâmetros importantes, incluindo (TAUHATA, 2003):

1. Energia do fóton incidente: O Efeito Compton ocorre quando um fóton de alta energia colide com um elétron livre ou fracamente ligado. A energia do fóton incidente deve ser suficientemente alta para causar uma mudança mensurável no comprimento de onda do fóton espalhado.
2. Ângulo de espalhamento: O Efeito Compton é caracterizado pela mudança na direção de propagação do fóton espalhado em relação à direção original do fóton incidente. O ângulo de espalhamento, chamado de ângulo de Compton, é medido entre a direção do fóton incidente e a direção do fóton espalhado.

Figura 2 - Esquema do efeito Compton.



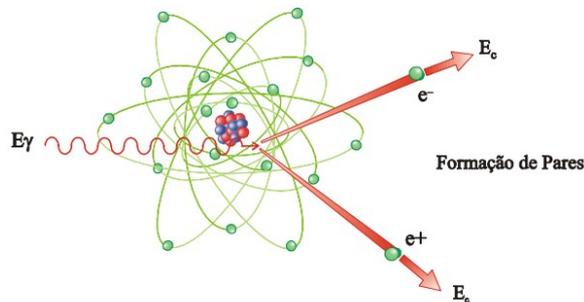
Fonte: Tauhata, 2003.

1.1.3 Produção de par

A produção de pares é um fenômeno que ocorre quando a energia de um fóton é convertida em massa (Figura 3), resultando na criação de um par partícula-antipartícula. Esse processo é governado pela famosa equação de Einstein, $E = mc^2$, que relaciona energia (E) e massa (m) através da velocidade da luz ao quadrado (c^2). Este fenômeno geralmente ocorre em presença de altas energias, como em colisões entre partículas de

alta energia ou na interação de partículas com campos eletromagnéticos intensos. Um exemplo bem conhecido de produção de pares é a criação de um elétron e um pósitron a partir de um fóton de alta energia (TAUHATA, 2003).

Figura 3 - Esquema formação de pares.

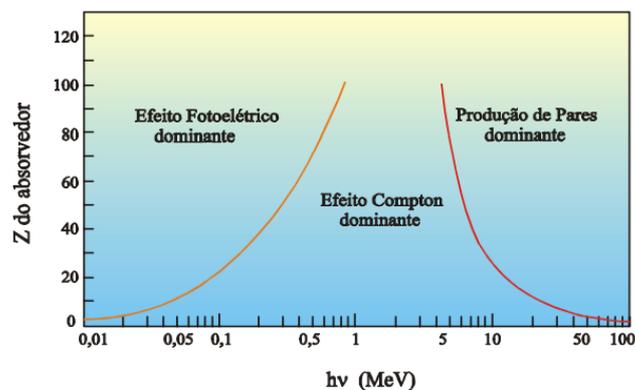


Fonte: Tauhata, 2003.

1.1.4 A probabilidade relativa dos efeitos de interação

A probabilidade relativa dos efeitos de interação depende do tipo de partícula incidente, da energia da partícula incidente e do material com o qual a partícula interage. Na Figura 4 estão apresentadas as principais regiões predominantes do efeito fotoelétrico, efeito Compton e formação de pares para diferentes energias e número atômico do material. O efeito fotoelétrico é mais provável de ocorrer com fótons de baixa energia interagindo com átomos em materiais. A probabilidade relativa do efeito fotoelétrico diminui à medida que a energia do fóton aumenta. No entanto, o efeito Compton ocorre quando fótons de alta energia interagem com elétrons livres ou fracamente ligados. A probabilidade relativa deste efeito aumenta com a energia do fóton e com o contínuo aumento da energia (TAUHATA, 2003).

Figura 4 - Probabilidade de produção dos diferentes efeitos da interação do fóton com a matéria em função do número atômico e energia do fóton.



Fonte: Tauhata, 2003.

1.2 Efeitos da radiação ionizante na saúde humana

Inicialmente, o estudo do efeito da radiação no organismo se valia de dados obtidos com pacientes expostos a altas doses, provenientes de acidentes nucleares e os sobreviventes dos atentados de Hiroshima e Nagasaki. Com advento da radioterapia, os dados obtidos passaram a ser de doses muito baixas. Os modelos atuais de radioproteção consideram uma correlação linear por extrapolação dos dados de baixa doses, ajustadas com valores de altas doses. Há de se entender a classificação da relação da radiação com o corpo humano.

1.2.1 *Única, fracionada ou periódica*

O tempo de exposição de um organismo a uma determinada dose de radiação é determinante para seu efeito. Como exemplo de dose fracionada cita-se o tratamento do câncer com radioterapia, onde uma determinada dose é aplicada em um determinado local, em um curto período com um intervalo pré-estabelecidos, com objetivo de destruir as células mutadas (TAUHATA, 2003). Dose única seria, por exemplo, se a dose total fosse aplicada de uma vez, provavelmente isso mataria o indivíduo pois transcende a capacidade de recuperação celular. No formato periódico, o indivíduo é submetido a doses constantes e, em regra, pequenas, por um longo tempo. (COELHO e MOTTA, 2017).

1.2.2 *Corpo inteiro, parcial ou colimada*

Trata do quanto do corpo foi irradiado. As irradiações de corpo inteiro, tal como apresenta o nome, são as que afetam o indivíduo com doses iguais em todos os sistemas. A parcial se refere a irradiações que afetam apenas parcelas do organismo. As colimadas são feixes usados na radioterapia, extremamente localizados e, em regra, com doses baixas (TAUHATA, 2003).

1.2.3 *Tipo de partícula*

Fótons, nêutrons ou partículas carregadas. Variam em poder de penetração, como vista no capítulo anterior (1.1).

Uma classificação recorrente dos efeitos da radiação ionizante nas células é quanto ao mecanismo, sendo dividido em mecanismo direto ou indireto, ou quanto à natureza, sendo as reações de natureza tecidual ou estocástica (WEISSMULLER, 2010; GONDIM, 2016).

O mecanismo direto é a interação da radiação com elementos vitais para a célula, de maneira a comprometer seu funcionamento ou levá-la a morte. O mecanismo indireto é quando a radiação atinge as moléculas de H₂O, presentes no interior da célula, e provoca o que é chamado de decomposição radiolítica da água (GONDIM, 2016). Este mecanismo é mais provável de ocorrer, visto que as moléculas de água constituem a maior parte da célula. Yoshimura (2009) aponta que 70% dos efeitos biológicos são indiretos. Na decomposição radiolítica, acontece, portanto, a hidrólise, lançando no interior da célula prótons na forma de hidrogênio e íons na forma de hidroxila. Por si só, esse efeito radiológico não apresenta mal a célula, uma vez que a presença destas partículas e moléculas (prótons e hidroxila) já existe como radicais livres no organismo. Entretanto, a recombinação destas partículas pode, também, não representar mal algum ao organismo, como quando se recombinam formando novamente uma molécula de água, ou podem formar peróxido de hidrogênio (H₂O₂), substância participante em danos celulares, abordados a seguir (WEISSMULLER, 2010; GONDIM, 2016). Em geral, a formação do peróxido de hidrogênio está associada a radiações com alta energia (DUGGAR, 1936).

Gondin (2016) divide a ação direta da radiação ionizante no corpo humano em quatro estágios, sendo eles: físico, físico-químico, químico e biológico. O efeito físico diz respeito a interação da radiação com os átomos e sua consequente ionização. A ionização dos átomos promove a desestabilização eletrostática das moléculas levando a quebra das ligações químicas, no estágio definido pelo autor como físico-químico. Na sequência, o estágio químico acontece a recombinação dos fragmentos das moléculas ionizadas, que podem acarretar um mal funcionamento de uma enzima ou proteína e danificar a célula. O efeito mais nocivo é a recombinação de moléculas do DNA.

Os danos as moléculas de DNA são rupturas nas hélices antiparalelas, mas especificamente nas bases nitrogenadas ou nas pontes de hidrogênio, o que gera problemas na reprodução da célula. Uma vez danificada a célula, se ativam mecanismos de reparo para corrigir as hélices. Nem sempre o mecanismo é capaz de reverter o dano causado pela radiação, deixando pontas em estado reativo. O oxigênio livre na célula pode se ligar as pontas reativas em um processo de peroxidação, tornando impossível o reparo, o que leva a morte da célula e a indução de efeitos mutagênicos. As hidroxilas livres produzidas na quebra da molécula de água pela radiação ou mesmo as pré-

existentes na célula, também pode atacar as hélices do DNA e causar danos por peroxidação (GONDIM, 2016).

A radiação pode ter vários efeitos no tecido biológico, dependendo do tipo de radiação, da dose recebida e da sensibilidade do tecido (ICRP 103, 2007; HENEINE, 2000; GONDIM, 2016; WEISSMÜLLER, 2010). Aqui estão alguns dos principais tipos de efeitos da radiação no tecido:

1.2.5 Efeito Estocástico

O efeito estocástico é causado por doses mais baixas de radiação e não possuem um limiar claro. A probabilidade de ocorrência desse efeito aumenta com a dose, mas sua severidade não está relacionada à dose recebida. O câncer e os efeitos genéticos hereditários são exemplos de efeitos estocásticos.

1.2.4 Efeito de reação tecidual

Este efeito é causado por doses importantes de radiação e tem uma relação direta com a dose recebida. Este tipo de efeito tem um limiar de dose abaixo do qual não ocorre. Alguns exemplos de efeitos de reação tecidual incluem queimaduras na pele, perda de cabelo, danos aos órgãos internos, síndrome aguda da radiação, esterilidade e catarata.

1.2.5 Efeito local

Esse efeito ocorre no tecido diretamente exposto à radiação. Ele pode incluir danos ao DNA, ruptura de ligações químicas, formação de radicais livres e alterações na estrutura celular.

1.2.6 Efeito sistêmico

Esse efeito ocorre em todo o corpo como resultado da exposição à radiação. Ele pode afetar órgãos e tecidos distantes do local de exposição. Exemplos incluem supressão do sistema imunológico, danos aos vasos sanguíneos e alterações no sistema hematopoiético.

É importante ressaltar que os efeitos da radiação podem variar dependendo do tipo de radiação, como raios-X, raios gama, partícula alfa ou beta, bem como da taxa de dose e do tempo de exposição. A proteção contra a radiação e a aplicação de princípios

de segurança radiológica são essenciais para minimizar os riscos associados à exposição.

1.3 Grandezas Radiológicas utilizadas neste estudo

1.3.1 Dose absorvida (D)

A dose absorvida é definida como o valor da energia média cedida pela radiação ionizante a um elemento de massa dm infinitesimal nas proximidades desse ponto. A dose absorvida, expressa pela unidade *Gray* (Gy) se aplica a qualquer tipo de partícula (TAUHATA, 2003).

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (\text{Eq. 1})$$

1.3.2 Dose equivalente (H_T)

Diferentes tipos de radiação causam diferentes efeitos nos tecidos biológicos. Para levar em conta essas diferenças, a dose absorvida é multiplicada por um fator de ponderação (w_r), que depende da natureza da radiação. O resultado é chamado de dose equivalente (H_T), definida pela Equação 2, cuja unidade pelo SI é o Sievert (Sv). Este estudo trabalha com a emissão de elétrons, que possuem w_r igual a 1, segundo ICPR 103 (ICRP, 2007).

$$H_T = \sum w_R \times D \quad (\text{Eq. 2})$$

1.3.3 Dose efetiva (E)

É um indicador dos riscos dos efeitos aleatórios, não diretamente mensurável. Ela permite relacionar uma exposição local a um efeito teórico em todo o organismo, levando em consideração os fatores de ponderação relacionados à radiosensibilidade dos tecidos, w_T (Tabela 1). A dose efetiva, expressa em Sievert (Sv), é obtida multiplicando a dose equivalente entregue a cada órgão, simultaneamente ou sucessivamente pelo fator de ponderação correspondente e, em seguida, somando o total, como definida na Equação 3, (TAUHATA, 2003).

$$E = \sum w_T \times H_T \quad (\text{Eq. 3})$$

Tabela 1 – Atributos de peso para o fator w_T

| Órgãos ou tecidos | Peso atribuído pelo fator w_T (ICRP 103) |
|-------------------------|--|
| Gônadas | 0,08 |
| Medula óssea (Vermelha) | 0,12 |
| Cólon | 0,12 |
| Pulmão | 0,12 |
| Estômago | 0,12 |
| Bexiga | 0,04 |
| Mama | 0,12 |
| Fígado | 0,04 |
| Esôfago | 0,04 |
| Tireoide | 0,04 |
| Pele | 0,01 |
| Superfície Óssea | 0,01 |
| Cérebro | 0,01 |
| Glândulas Salivares | 0,01 |
| Outros* | 0,12 |

* *Adrenals, região extratorácica, vesícula biliar, coração, rins, nódulos linfáticos, músculos, mucosa oral, pâncreas, próstata, intestino delgado, baço, tymus e útero.*

Fonte: ICRP, 2007.

1.4 Diretrizes Radiológicas utilizadas neste estudo

As convenções sobre grandezas e o estabelecimento de unidades de medida, no campo da radiometria, são realizadas por duas comissões internacionais, que atendem pelas siglas em inglês ICRP (*International Commission on Radiological Protection*) e, ICRU (*International Commission on Radiation Units and Measurements*). A ICRP ocupa-se com a definição das chamadas grandezas limitantes, que consiste na elaboração de limites de doses para prevenir efeitos deletérios aos organismos expostos, tal como valores máximos de segurança de dose equivalente ou dose efetiva. A ICRU, por sua vez, trata dos parâmetros voltados as grandezas operacionais, tais como parâmetros de medições para monitoramento individual ou de uma área (TAUHATA, 2003).

No Brasil, as diretrizes de radioproteção são estabelecidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), publicadas na resolução 164/14 de março de

2014, a norma mais atualizada, que atende pela sigla CNEN NN 3.01 (TAUHATA, 2003, ICRP, 1990).

1.5 Aspectos gerais sobre o petróleo

A relação entre o homem e o petróleo remonta aos tempos da antiguidade, embora não se possa afirmar quando exatamente este recurso natural tenha sido usado à primeira vez. O uso do petróleo como selante, laxante e até mesmo como arma, aparece em escritos antigos, tais como o velho testamento bíblico, onde se lê nas instruções recebidas por Noé:

“Faze para ti uma arca de madeira de Gofer, farás compartimentos na arca e a betumarás por dentro e por fora com betume”. (GÊNESIS 6:14)

Nos textos de Heródoto, tal como traduzido do grego para o francês por Larcher (1850), encontra-se a referência ao uso de betume nas muralhas da Assíria – cidade da antiguidade, onde hoje compreende a porção norte do Iraque. Lê-se nas descrições de Heródoto sobre a murada da cidade mesopotâmica:

“[...] o emprego que se deu à terra retirada do fosso circular e de que maneira foi construída a muralha. À medida que os construtores cavavam o fosso, convertiam a terra em tijolos, e quando já haviam reunido uma grande quantidade destes, levaram-nos ao forno. Em seguida, à guisa de cimento utilizavam o betume quente, e de trinta em trinta camadas de tijolos punham redes de caniços entrelaçados”
(LARCHER, 1850)

Na China, a exploração do petróleo remonta ao século I a.C., sendo utilizados ferramentas simples de bambu para perfurar poços. Todavia, a produção era focada na obtenção da salmoura, bem mais cobiçada à época, tendo o óleo como um subproduto com pouco valor (SELLEY, 1985). Foi somente em 1859, com as perfurações Edwin Drake no Estado da Pensilvânia, EUA, que a exploração de óleo por dutos atingiu valores significativos. A perfuração de Edwin alcançou cerca de 25 metros de profundidade e foi capaz de gerar entre 8 e 10 barris por dia (BJØRLYKKE, 2010). Neste período, a demanda por óleo fóssil aumentava consideravelmente tanto nos EUA quanto nos países europeus, motivada pela necessidade de substituir o óleo de baleia como combustível para a iluminação pública nas cidades mais populosas, uma vez que a pesca predatória tornava o recurso escasso e elevava seu preço de mercado (FORBES, 2009). A descoberta de Edwin e a eficiência da queima do petróleo impulsionaram a

indústria de exploração que, em 1970, correspondia a cinco milhões de barris por ano, nos EUA, maior produtor a época (BJØRLYKKE, 2010).

A invenção do motor a combustão interna e a primeira guerra mundial exigiram das potências uma maior produção de petróleo, e maior investimento em pesquisa de novas jazidas pelo globo. As novas demandas por óleo e a crescente abertura de novos poços promoveu o surgimento de países cuja economia se baseava em sua exportação, revelando verdadeiros *players* no mercado internacional, tal foi o caso da Arábia Saudita, Irã, Iraque e Venezuela.

O petróleo cru é um produto natural derivado da transformação da matéria orgânica na geosfera. A geração do óleo se inicia com a deposição de matéria orgânica com lamas argilosas onde, posteriormente, a ação de bactérias degrada o material. Em seguida o material é submetido a altas pressões em temperaturas em torno de 150°C, durante o soterramento, fazendo com que reações transformem as características físico-químicas do material (SPEERS e WHITEHEAD, 1969). A principal matéria orgânica envolvida no processo de formação do petróleo são seres fotossintetizantes, sendo as algas os mais predominantes na constituição do óleo, ainda que os zooplanktons sejam também um grupo expressivo. A relação entre esses seres fotossintetizantes e a produção de energia pós terceira revolução industrial permite uma ponderação interessante: sempre que se queima combustíveis fósseis se utiliza de energia solar armazenada (BJØRLYKKE, 2010).

Para que a matéria orgânica, transformada, possa se acumular de maneira a propiciar uma relevância econômica, é preciso que este material migre através da porosidade e/ou fraturas da rocha geradora e acumule-se, o caso de rochas sedimentares porosas e permeáveis capeadas por rochas impermeáveis (selantes) é um bom espaço para esta acumulação; dessa maneira o óleo cru pode acumular-se em grande quantidade (BJØRLYKKE, 2010).

1.5.1 Propriedades físico-químicas do petróleo

A primeira diferenciação que se pode fazer dentre os hidrocarbonetos é entre óleo e gás, grupos distintos em suas propriedades físico-químicas. Todavia, considerando o aspecto físico dos hidrocarbonetos, é possível diferenciá-los em mais grupos, a saber: os gasosos, os líquidos, os plásticos e os sólidos (SELLEY, 1985). Quimicamente, podem ser divididos quanto a sua estrutura molecular entre parafinas,

naftenos e aromáticos, ou ainda, caso haja a presença de outros elementos no composto, recebe a nomenclatura de heterocompostos (SELLEY, 1985; POSTHUMA, 1977).

Os compostos da família da parafina (alcanos) são hidrocarbonetos saturados – carbono e realiza apenas ligações simples – com fórmula geral dada por $C_nH_{(2n + 2)}$ (SELLEY, 1985). Na família da parafina, o valor de n é significativo para o comportamento físico do composto (Tabela 2). As cadeias de hidrocarbonetos desta família podem ser encontradas com cadeias simples ou ramificadas, ainda que, as cadeias simples sejam as mais abundantes (SELLEY, 1985; POSTHUMA, 1977).

Tabela 2 – Comportamento físico dos compostos da família da parafina a condições normais de temperatura e pressão

| Intervalo de n | Comportamento físico | Composto (fórmula química) |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| $n < 5$ | Gasoso | Metano (CH_4) |
| $5 < n < 15$ | Líquido | Pentano (C_5H_{12}) |
| $n > 15$ | Viscoso a sólido | |

Fonte: Selley (1985)

Logo abaixo da família das parafinas, no quantitativo de abundância nos óleos crus, encontra-se a família dos naftenos (cicloalcanos). Esta família é caracterizada pela estrutura de anéis de carbono, contendo cinco ou seis membros, e fórmula geral C_nH_{2n} . todos os compostos da família dos naftenos são líquidos nas condições normais de temperatura e pressão (SELLEY, 1985; POSTHUMA, 1977).

A família dos compostos aromáticos é também definida por estruturas em anéis feita por seis átomos de carbonos, cujo principal representante é o benzeno. Assim como os naftenos, todos os membros são líquidos e, dentre os três, os aromáticos são de menor expressão na constituição dos óleos crus, em torno de 10% (SELLEY, 1985; POSTHUMA, 1977).

Os hidrocarbonetos do grupo gasoso são organizados entre secos, representado unicamente pelo metano, e úmidos, variando entre etano, propano, butano, isobutano etc. Em geral, os gases de hidrocarbonetos são da família da parafina, sendo o metano o membro com menor peso molecular, mais leve que o ar, e mais abundante no meio natural. Os demais hidrocarbonetos gasosos com distribuição relevante no meio natural englobam o etano, propano, butano e pentano e, se diferenciam do metano em muitos

aspectos, incluindo sua origem, restrita, exclusivamente, ao processo de soterramento e maturação térmica da matéria orgânica.

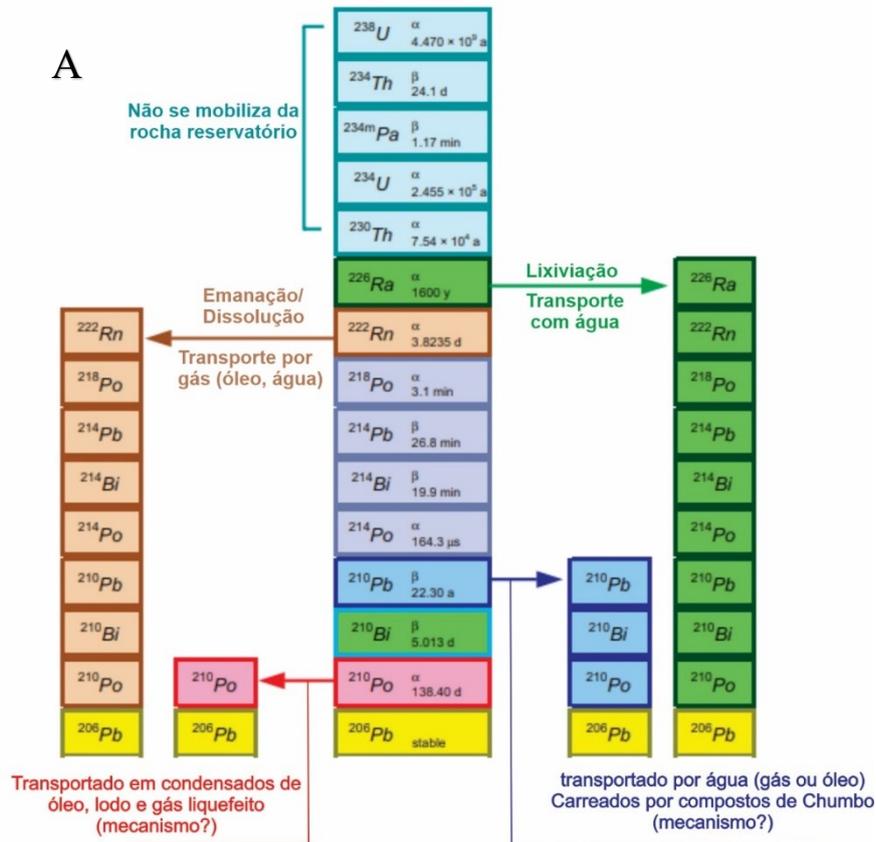
O grupo dos hidrocarbonetos líquidos compreende os óleos crus, também denominados petróleo bruto ou simplesmente petróleo. A definição de óleo cru admitida pela API e AAPG é toda mistura de hidrocarbonetos na fase líquida encontrados de maneira natural em subsuperfície e, que se mantém em estado líquido nas condições normais de temperatura em pressão, mesmo após os processos de separação em superfície. Um fator fundamental, dentre outros, se tratando de petróleo cru, é sua viscosidade. Esta varia conforme a temperatura na rocha reservatório, com a profundidade e com a idade do óleo. Alguns heterocompostos participam da composição do óleo cru, com destaque para o oxigênio, nitrogênio, enxofre e certos metais raros, como níquel e vanádio. Outros elementos aparecem na composição do óleo como traços, dentre eles o urânio (POSTHUMA, 1977), embora não seja possível estabelecer sua associação com a rocha reservatório, águas de formação, ou rocha geradora. Hobson e Tiratsoo (1975) identificaram e catalogaram grande parte desses elementos traços, demonstrando que muitos são formadores de rocha, como cálcio, silício e magnésio, mas há de modo recorrente metais, tais como ferro, cobre, chumbo, estanho, alumínio, prata e ouro. O níquel e o ferro citados acima participam dessa lista, mas apresentam uma particularidade, uma vez que, destoante dos demais, são metais comuns maioria dos óleos crus.

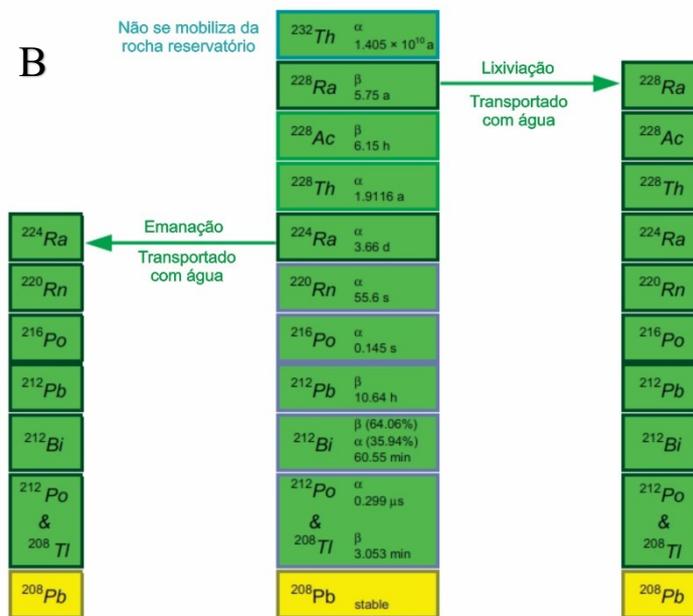
1.6 Os radionuclídeos na indústria do petróleo

Toda radiação presente na indústria do petróleo advém do decaimento de dois elementos primordiais: ^{238}U e ^{232}Th . Esses elementos aparecem naturalmente em diferentes tipos de rochas e em diferentes concentrações. Todavia, a contribuição destes elementos parentais para a radiação em superfície é desprezível, uma vez que são elementos incompatíveis com as fases fluidas, tendendo a permanecerem em subsuperfície. A água presente na rocha reservatório, por sua vez, contém, principalmente, elementos alcalinos-terrosos com concentração maiores de Ca, Sr, Ba e Ra. O Rádio pode aparecer na forma de dois isótopos ^{228}Ra e ^{224}Ra (IAEA, 2003). A presença destes dois isótopos é atribuída às diferentes series de decaimento do urânio (Figura 6A) e tório (Figura 6B) na rocha reservatório que, ao contrário de seus elementos parentais, possuem maior mobilidade e afinidade química com o meio aquoso nas condições de temperatura e pressão em subsuperfície (IAEA, 2003).

Com os processos de extração do óleo bruto, a água presente no reservatório é juntamente removida da rocha, numa mistura de água/óleo/gás. Em superfície, a mistura é desfeita em suas três fases no interior do separador, produzindo óleo, gás e água – referida como água produzida. (IAEA, 2003; WANG, 2016). A água produzida no separador é canalizada pela estrutura do sítio e, em regra, retorna para a rocha reservatório. Durante seu trânsito pela tubulação da planta de extração, a queda de temperatura e pressão diminui a solubilidade dos elementos dissolvidos, o que torna o líquido saturado em carbonatos e sulfatos, causando sua precipitação nos dutos. Ainda, há a contribuição de partículas, como argila e areia, que favorecem a nucleação dos carbonatos e sulfatos, catalisando a precipitação (IAEA, 2003). Dessa forma são gerados dois produtos, o *scale* e o lodo produzido. O rádio, na forma dos dois isótopos, é mobilizado com a água produzida, atingindo a superfície por meio dos dutos produtores. Ademais, participam da estrutura dos sulfatos e carbonatos (IAEA, 2003; WANG, 2016).

Figura 6 – A) Série de decaimento radioativo do ^{238}U . B) Série de decaimento radioativo do ^{232}Th





Fonte: Adaptado de IAEA (2003).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

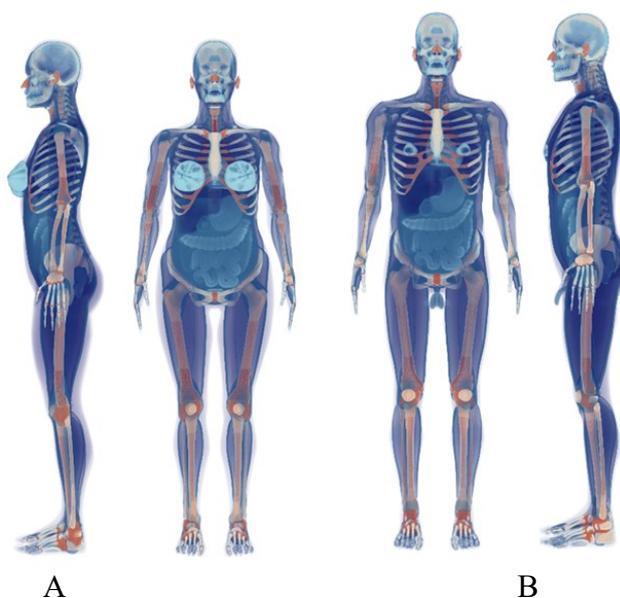
2.1 Desenvolvimento do modelo computacional de exposição de trabalhadores em campos de petróleo por meio do código MCNPX2.7.0

Para todas as simulações deste trabalho foi aplicado o código de transporte de radiação Monte Carlo de propósito geral MCNPX (*Monte Carlo N-Particle*), versão 2.7 (PELOWITZ, 2011). Por meio deste código foi criado um modelo computacional de exposição de trabalhadores da indústria do petróleo próximos aos materiais contaminados. O MCNPX2.7.0 é um código que tem sido utilizado e validado com sucesso em diversas aplicações radiológicas (SANTOS *et al.*, 2022; TEKIN *et al.*, 2018; AGBALAGBA *et al.*, 2013; CLOUVAS *et al.*, 2000). Outra característica importante é que este código é capaz de simular emissão espontânea de fótons de materiais constituintes dos oleodutos contaminados por NORM (AGBALAGBA *et al.*, 2013; AL-KINANI *et al.*, 2015; AL-MASRI *et al.*, 2005; HAMLAT *et al.*, 2001). Estas características são cruciais para desenvolver um modelo computacional o mais próximo possível de um sistema real de interesse e, conseqüentemente, determinar com boa precisão as doses de radiação em nível dos órgãos e tecidos dos trabalhadores representados por simuladores antropomórficos computacionais.

2.2 Simuladores antropomórficos computacionais de referência

Os simuladores antropomórficos são uma representação computadorizada do corpo humano com órgãos e tecidos de formatos geométricos, composições químicas e densidades mássicas anatomicamente realísticas. Dentre vários simuladores antropomórficos disponíveis na literatura, neste estudo, os simuladores antropomórficos de voxel adulto masculino e feminino utilizados foram o MASH3 (altura 175 cm e massa corporal 73 kg) e FASH3 (altura 163 cm e massa corporal 60 kg), que possuem características antropométricas de referências da Comissão Internacional em Proteção Radiológica (CASSOLA *et al*, 2010) (Figura 3), para simularem os trabalhadores comumente vistos nos campos de petróleo. O número de voxel dos simuladores antropomórficos FASH3 e MASH3, ao longo dos eixos x, y e z, é 221 x 128 x 677 e 239 x 129 x 731 voxels, respectivamente. Eles possuem voxels cúbicos com aresta de 0,24 cm cada. Estes simuladores antropomórficos possuem um conjunto de órgãos e tecidos com importâncias dosimétricas recomendados na publicação ICRP 103 (ICRP, 2007) e, por isso, são frequentemente empregados em estudos radiológicos para simular os efeitos da radiação em partes específicas do corpo humano. Algumas das informações antropométricas mais importantes desses simuladores estão apresentadas na Tabela 1.

Figura 8 - Representação gráfica dos simuladores antropomórficos adulto feminino FASH3 (A) e masculino MASH3(B)



Fonte: O autor, 2023.

2.3 Cálculo de coeficiente de conversão

Para estimar a dose absorvida no ar, foi modelada uma célula esférica de 1 cm de raio e preenchida de ar atmosférico. A dose absorvida em cada parte do corpo ou órgão é quantificada individualmente usando contagens F6 (deposição de energia calculada em uma célula em MeV/g/partícula) do código MCNPX2.7.0.

As doses absorvidas foram estimadas separadamente para cada radionuclídeo e tipo de material emissor e calculadas para diversos órgãos e tecidos. Os fatores de ponderação w_T para cada órgão e tecido, recomendados pela ICRP 103 (ICRP, 2007) foram aplicados aos coeficientes de conversão para dose equivalente ($CC[H_T]$) para cada órgão e tecido. Com esses valores, determinamos o coeficiente para dose efetiva ($CC[E]$), conforme indicado na Equação 1 (ICRP 116, 2010).

$$CC[E] = \sum_T w_T \left[\frac{CC(H_T)_{Macho} + CC(H_T)_{fêmea}}{2} \right] \quad (4)$$

Onde w_T é o fator de ponderação para cada órgão e tecido e $CC(H_T)_{Macho}$ é o coeficiente de conversão para dose equivalente para o simulador antropomórfico masculino e $CC(H_T)_{fêmea}$ é o coeficiente de conversão para dose equivalente para o simulador antropomórfico feminino.

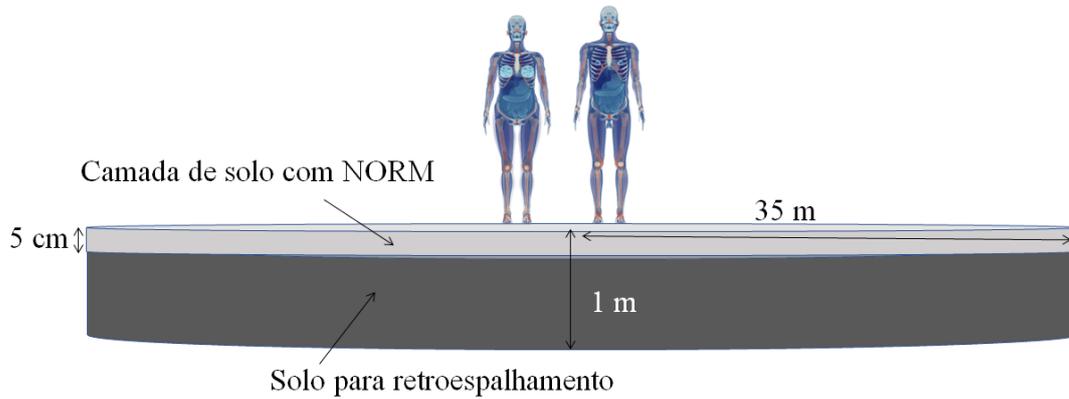
2.4 Modelo de solo natural de referência

Para modelar fontes NORM em grande escala, será desenvolvido um cenário de exposição para comparação com dados de taxa de dose absorvida de fóton calculada no ar a 1 m acima do solo devido a ^{40}K e as séries ^{238}U e ^{232}Th em solo natural de campos petrolíferos (PARMAKSIZ *et al.*, 2013). O detector será colocado 1m acima do solo que tem formato de disco que possui uma distribuição uniforme de radionuclídeos de ocorrência natural. O ^{40}K e as séries de decaimento do ^{238}U e do ^{232}Th serão modeladas separadamente. O raio do solo foi definido por um disco cilíndrico extenso de 35 m para simular uma fonte planar semi-infinita composta de uma camada de 5 cm contaminada uniformemente com NORM em campo aberto (CLOUVAS *et al.*, 2000).

Uma camada adicional de 1 m de solo será colocada abaixo da camada contaminada para levar em conta o retroespalhamento. Da mesma forma, o

retroespalhamento também ocorre no ar, especialmente para fótons abaixo de 100 keV. O efeito, chamado *Skyshine* (espalhamento da radiação no ar, simbolizado por K_{air}), é levado em consideração ao expandir o ar acima do simulador antropomórfico.

Figura 9 - Modelo geométrico do solo contaminado com NORM desenvolvido no código MCNPX2.7.0. Figura fora de escala.

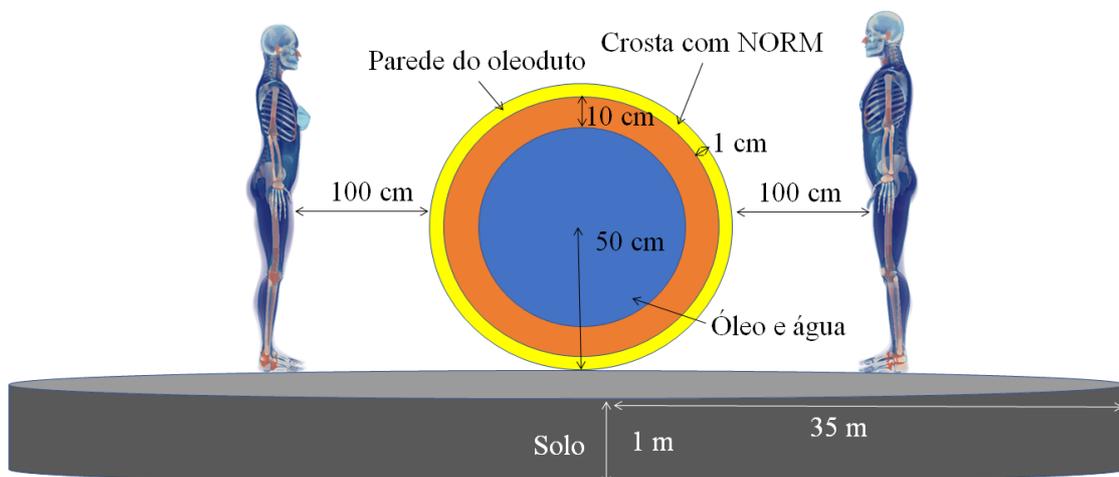


Fonte: O autor, 2023.

2.5 Modelagem da crosta no interior do oleoduto

Para simular os extensos oleodutos comumente vistos nos campos de petróleo, foram definidos três cilindros coaxiais para representarem as superfícies do oleoduto, crosta contaminada com NORM e uma mistura de óleo e água transportada pelo oleoduto (PARMAKSIZ *et al.*, 2013). A Figura 5 mostra o modelo computacional de exposição composto dos principais sistemas de tubulação. Outros componentes do modelo incluem o solo para contabilizar retroespalhamento e ar.

Figura 10 - Modelo da crosta contaminada por NORM do oleoduto desenvolvido com o código MCNPX2.7.0.



Fonte: O autor, 2023.

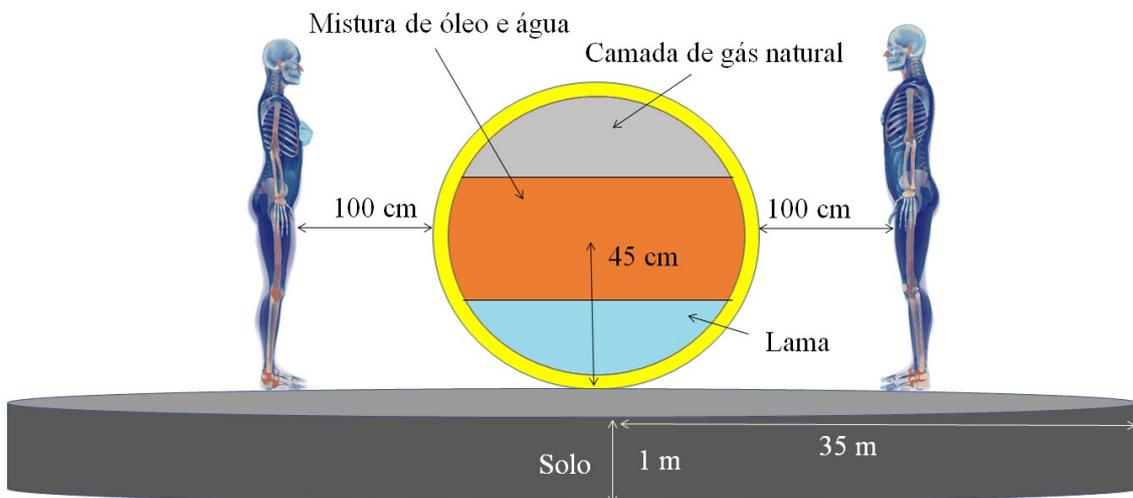
Para representar os trabalhadores, os simuladores antropomórficos computacionais, masculino e feminino foram posicionados a 1 m de distância da tubulação de 15 m de comprimento. Os resultados dosimétricos de dose em órgãos e tecidos dos simuladores serão normalizados pela dose absorvida no ar a 1 m de distância da superfície exterior do tubo.

2.6 Modelagem do lodo produzido

Os separadores são instrumentos complexos e, por isso, evidentemente o modelo desenvolvido por este estudo (Figura 11) é uma versão simplificada e com detalhes omitidos. O modelo construído tem um formato cilíndrico de comprimento 300 cm e raio 45 cm.

A Figura 11 mostra o simulador antropomórfico masculino adulto posicionado a 1 m de distância da superfície do separador. O conteúdo do separador são camadas de gás natural, mistura de óleo e água e lama. Para efeito de retroespalhamento, foi adicionado o solo na parte inferior do separador e do simulador antropomórfico.

Figura 11 - Modelo desenvolvido do separador com o código MCNPX2.7.0.



Fonte: O autor, 2023.

3 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho foi usar simulação Monte Carlo e simuladores antropomórficos, anatomicamente realísticos, e usar este modelo para determinar as doses absorvidas nos órgãos e tecidos dos trabalhadores envolvidos em atividades de prospecção de petróleo. Esses indivíduos são expostos à radiação

ionizante natural emitida pelas séries do ^{238}U e do ^{232}Th e pelo ^{40}K , que estão presentes nos materiais do petróleo. As grandezas dosimétricas calculadas neste trabalho são importantes na avaliação do risco dos indivíduos expostos a fontes de radiação natural, que são amplamente encontrados em diversos ambientes de atividade de mineração. Esses dados podem ser utilizados para obtenção de valores absolutos de dose equivalente e efetiva dos trabalhadores em situações reais.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

A primeira comprovação da presença do NORM em óleo cru, segundo KOLB e WOJCIK (1985) é atribuída aos pesquisadores Himstedt e Burton, que identificaram gás de radônio em plantas de extração no Canadá, em 1904. Já a presença em gás natural é atribuída a Czako (1913, *apud* KOLB & WOJCIK, 1985), ao realizar estudos em plantas pela Europa. Poucos anos depois é publicado na Rússia um estudo que demonstrou a emissão de 250 Bq/L oriunda da lama cascalhosa gerada como subproduto da separação da fração água (TCHEREPENNIKOV, 1928, *apud* KOLB & WOJCIK, 1985).

O primeiro estudo a tratar da dose de radiação externa, a qual os trabalhadores podem estar expostos, foi realizado pelo pesquisador Gessel (1975, *apud* KOLB & WOJCIK, 1985). Gessel calculou taxas de doses absorvida no ar de 80 mSv/h associadas ao acúmulo antropogênico de radônio, e seus elementos filho, em equipamentos destinados ao processamento de gás natural na linha de extração. Com avanços dos estudos dos malefícios dos radionuclídeos na indústria do petróleo, houve o estímulo para a regularização de novos sistemas de radioproteção em diversos países (REJAH, 2015) que, em 1991, culminou na recomendação da *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) para que o sistema de radioproteção, definido pela comissão, fosse também aplicado aos trabalhadores da indústria sujeitos a doses maiores que 1 mSv por ano (ICRP, 1991). Posteriormente, a recomendação foi reforçada pela IAEA que adotou as medidas (IAEA, 1996).

Em 1999 o departamento de conservação ambiental do Estado de Nova York, EUA fez um estudo para avaliar o risco aos trabalhadores e ao público geral, da exposição à radiação proveniente de plantas produtivas no Estado. Os pesquisadores

não encontraram valores diferenciáveis da radiação de fundo em nenhum dos materiais analisados, sendo que o estudo considerou a água produzida, *scale*, lama e sedimentos (PATAKI e CAHILL, 1999).

O relatório da IAEA nº 34 (IAEA, 2003) pode ser considerado como a principal fonte de informação sobre a presença dos NORM e TENORM na indústria do petróleo. Neste relatório, a agência comenta, em detalhes, sobre os aspectos e características acerca destes contaminantes, tais como os tipos de isótopos presentes na planta, as fontes, medições cabíveis, tratamento de material para descarte, e medidas de radioproteção.

Gazineu *et al.* (2004) coletaram amostras de lama e *scale* de instalações *onshore* no Estado do Sergipe, no Brasil, para quantificar a presença dos radionuclídeos através da análise do material por gama espectrometria. Os autores encontraram valores de 1399 kBq/kg para ^{226}Ra e 743 kBq/kg para ^{228}Ra nas amostras de lama e, 630 kBq/kg para ^{226}Ra e 403 kBq/kg for ^{228}Ra . Estudo semelhante foi realizado por Botezatu e Grecea (2004) em campos petrolíferos em Bacău e Brăila, dois importantes distritos romenos para produção de óleo do país. Os autores analisaram o conteúdo de rádio em amostras de *scale* e lama, constatando os valores de 9000 Bq/kg e 300 Bq/kg, respectivamente. Ademais, os autores comprovaram que há no solo e na vegetação do entorno dos campos, um aumento significativo de atividade radiológica.

O estudo de Swann *et al.* (2004) demonstrou que, das 37 plantas de óleo do Estado do Mississippi, EUA, a principal fonte de radiação é originada a partir de dois isótopos de rádio: ^{226}Ra e ^{228}Ra . Os autores basearam seus dados na análise de água produzida. Krieger (2005) argumenta que a emissão de partículas alfa e beta ficara contido no interior dos dutos e tanques dispostos na operação de produção de óleo e gás, enriquecidos em NORM no seu interior. Dessa maneira, o estudo conclui que não a risco de exposição para os trabalhadores que exercem suas funções próximos desses equipamentos.

O trabalho de Moebius *et al.* (2008) demonstrou que rádio, chumbo e polônio podem se acumular ao longo da linha de produção em campos petrolíferos, de tal maneira que, em certos equipamentos, a precipitação do lodo produzido e outros resíduos pode acarretar risco a saúde dos trabalhadores por diferentes vias, sendo ela exposição externa (radiação emitida de dentro para fora do equipamento), interna (em

caso dos trabalhadores entrarem nos dutos, para manutenção por exemplo) e, contaminação do ambiente por meio do descarte da água produzida.

Al-Farsi (2008) realizou a análise do conteúdo de NORM em lama e solo dos campos petrolíferos no sudeste de Omã. O autor conclui que os principais elementos NORM presentes nos subprodutos descartados pela indústria são rádio (nos isótopos da série do urânio e do tório), polônio, tório e actínio, em concentrações superiores a radiação de fundo presente no ambiente, podendo ter concentração com magnitude muitas ordens maiores que a radiação de fundo. O autor destaca que a lama produzida tratada apresentou valores de dose entre 0.06 e 0.43 $\mu\text{Sv/h}$ a 1 metro acima do chão, já a lama não tratada apresentou dose entre 0.07 e 1.78 $\mu\text{Sv/h}$.

Jamal (2010) demonstrou que a o ^{238}U e ^{232}Th permanecem na rocha reservatório, não sendo carreados durante a extração do óleo para a superfície. Todavia, a água produzida apresenta teores de ^{226}Ra (série do urânio) e ^{228}Ra (série do tório). O autor acrescenta, ainda, que esses elementos podem se precipitar em complexos sulfetados ou carbonáticos durante a formação do lodo produzido, apresentando concentrações que variam de 0.1 Bq/g a 15 000 Bq/g. Jamal (2010) também demonstra que o decaimento do ^{226}Ra produz ^{222}Rn que como o rádio tem mobilidade para atingir a superfície.

A dominância de ^{226}Ra e ^{228}Ra como principais NORM na indústria do petróleo foi estudada por Ahmed (2012), que verificou a presença destes agentes em diferentes plantas petrolíferas *onshore* na Líbia. O autor também pontua a discrepância na concentração de rádio nas plantas mais antigas em comparação com as mais recentes, sendo maior na primeira.

O subproduto descartado por sítios produtivos na Síria foi categorizado, segundo seu conteúdo NORM por Al-Masri & Suman (2010). Os autores descrevem três tipos de materiais descartados, *scale*, lama produzida, e solo contaminado. O *scale* apresentou altos teores de isótopos de rádio, e foram descartados em barris depositados em áreas controladas. Quanto a lama, pouco conteúdo de rádio foi identificado, e o descarte foi descrito como armazenado em fossos recobertos com plástico. O solo foi contaminado, segundo os autores, pelo contato com a água produzida com presença de radionuclídeos, descartada sem regulamentação apropriada.

Michalik *et.al* (2012) comenta sobre a regularização do sistema hidráulico dos sítios petrolíferos da Hungria, envolvendo os contaminantes NORM. A iniciativa do autor consiste em inspecionar a água e lama produzida, e materiais filtrados no sistema de canalização da planta, em 25 sítios espalhados pelo país, utilizando de espectrometria gama para avaliar as amostras. O estudo demonstra que a lama produzida e os materiais coletados nos filtros não apresentaram valores de NORM superiores aos valores médios do solo do país em alguns casos, todavia, outras amostras expressaram valores de atividade radioativa entre 10 e 15 vezes superior a essa média.

Rowan e Kraemer (2012) coletaram dezenove amostras de gás natural com intuito de investigar o conteúdo de gás radônio associado aos folhelhos e arenitos produtivos devonianos da bacia Apalache, na Pensilvânia, EUA. A atividade de ^{222}Rn obtida variou entre 1 e 79 pCi/L.

Abdul e Master (2012) utilizaram as concentrações de radônio para estimar a presença de NORM em dutos produtivos localizados na província de Basra, Iraque. O estudo obteve cem amostras coletadas em dez diferentes dutos, variando-se a profundidade da amostragem, dentre as quais, o maior valor de concentração de ^{222}Rn foi de 42485 Bq/m³, e o mínimo foi de 1223Bq/m³.

Rejah (2015), em sua tese de doutorado, busca responder a algumas problemáticas envolvendo elementos NORM nos campos petrolíferos Kirkuk, Salahuddin e Nineveh (todos *onshore*) localizadas no extremo norte do Iraque, que somam 16 plantas de extração. Sua pesquisa consiste em responder qual a concentração de ^{226}Ra , ^{228}Ac , ^{40}K , gás radônio e tório, isótopo do radônio (^{220}Rn), nestes campos, e avaliar o risco aos trabalhadores. As amostras selecionadas para o estudo foram coletadas de lama produzida tratada e não tratada, e óleo cru. Para aferir o risco, o autor utilizou os índices de atividade equivalente para cada elemento, e dose equivalente. Rejah obteve os seguintes resultados para cada tipo de elemento investigado:

- ^{226}Ra : foi encontrado o valor máximo de 133.24 Bq/kg na planta de Hinjeraa, e valor mínimo igual a 8.79 Bq/kg em Khabaz, na análise de óleo cru. Na lama produzida, o maior valor corresponde a 117.03 Bq/kg na planta de Bi Hassan, ao passo que o menor valor foi encontrado na planta de Baba e igual a 16.07 Bq/kg.

- ^{228}Ac : o valor máximo em amostras de óleo cru corresponde a 91.51 Bq/kg, e o valor mínimo ficou abaixo da capacidade de detecção. Em amostras de lama produzida, os autores obtiveram valores máximos de 2229.89 Bq/kg e mínimos novamente ficaram abaixo da capacidade de detecção.
- ^{40}K : apresentou valor 57.91 Bq/kg nas máximas, enquanto as mínimas escaparam a possibilidade de detecção. O maior valor de potássio quarenta na lama produzida foi de 383.51 Bq/kg e o menor não pode ser estimado por estar abaixo do valor mínimo de detecção.

Rejah (2015) estabelece uma relação entre a rugosidade do terreno dos campos amostrados e a concentração dos elementos radioativos investigados em sua tese. O autor determina que os maiores valores estão associados a campos localizados em meios a relevos com rugosidade elevada, descritas por ele como vales e cumes, já os valores menores estão associados com relevos planos.

Wang (2016) utiliza método Monte Carlo para avaliar a dose de radiação gama recebida pelos trabalhadores nas plantas de extração próximas a equipamentos contaminados. Nas simulações, o autor considerou três ambientes de contaminação, sendo eles, depósitos de *scale*, lodo e solo contaminado com água produzida. Para cada ambiente, Wang apresenta os seguintes resultados a partir da simulação computacional:

- Solo: aproximadamente 62% da dose absorvida pelo organismo foi acumulada no tecido pele. A caixa torácica foi eficiente em proteger os órgãos internos, absorvendo cerca de um quarto da dose absorvida. Os tecidos mais próximos do chão foram os mais afetados devido sua proximidade com o contaminante, no caso o solo. A dose anual neste cenário foi de 5,03 mSv/ano.
- *Scale*: a dose absorvida neste cenário foi a menor dentre os simulados equivalente a 0,02 mSv/ano. A pele foi responsável por reter cerca de 43.5% da dose, o tecido mais afetado.
- Lodo: por ser quimicamente semelhante ao solo, as relações de dose por tecido foram semelhantes, todavia, a concentração menor de radionuclídeos no lodo reflete em uma dose menor recebida pelo trabalhador, equivalente a 1,51 mSv/ano.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este estudo determinou um conjunto de coeficiente de conversão para dose equivalente e efetiva normalizadas pelo o *kerma* no ar (K_{air}). Esta grandeza pode ser obtida a partir de medições ambientais e, por isso, é um bom estimador dosimétrico para os indivíduos expostos a radioatividade natural presente em ambiente de exploração de petróleo. Neste tipo de cenário, as concentrações de radionuclídeos naturais presentes nos materiais *scale*, lodo produzido e solo contaminado são bastante comuns e, por isso, eles foram avaliados neste estudo. Na Tabela 3 são apresentados as médias de dose efetiva obtidas para cada cenário e série de radionuclídeo. Informações de CC para dose equivalente para os três cenários avaliados estão apresentadas nos anexos A, B e C.

Dos três cenários avaliados, os maiores valores foram obtidos para o ^{40}K (Tabela 2) no cenário envolvendo o lodo produzido. O segundo maior valor corresponde à série de decaimento do ^{238}U no cenário referente ao *scale*. Considerando os três cenários abordados neste estudo, o solo contaminado demonstrou os menores valores de dose equivalente.

Tabela 3. FCs para dose efetiva (em Sv/Gy) calculados para os simuladores antropomórficos masculino e feminino para os três cenários de exposição avaliados.

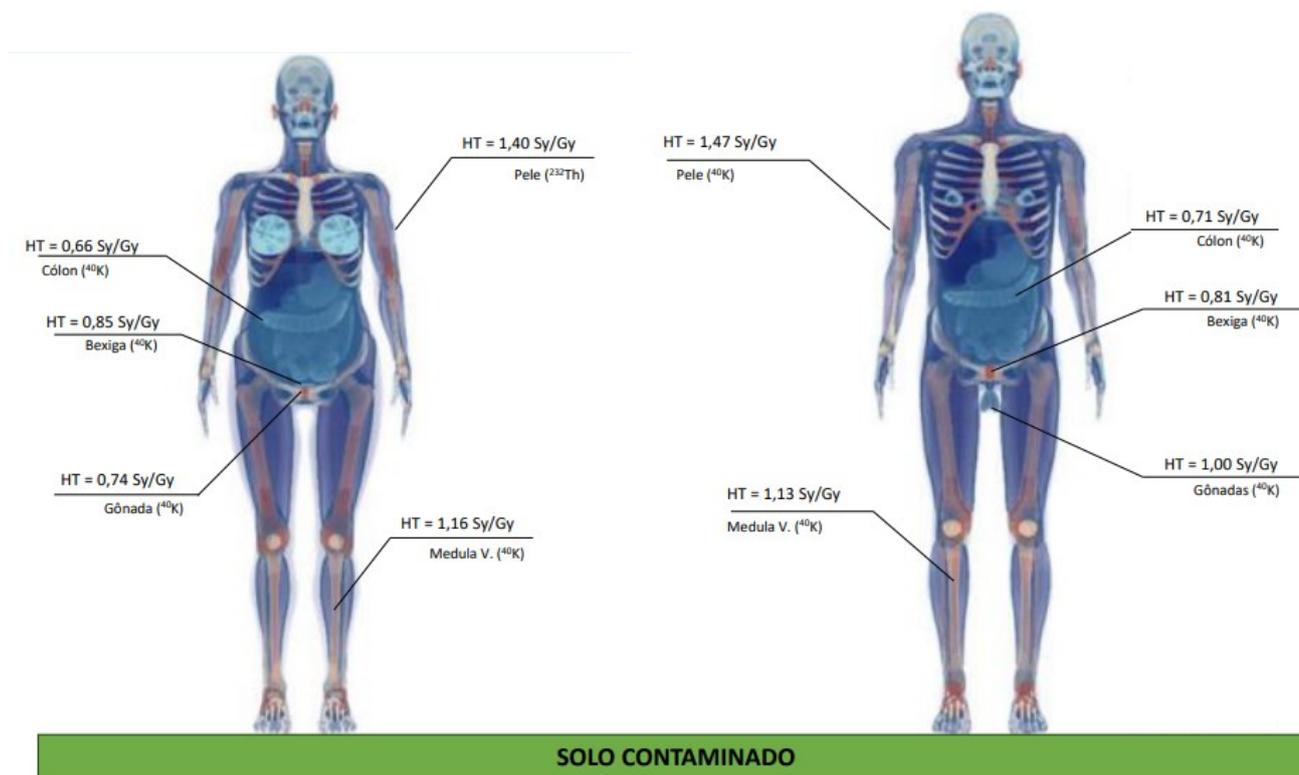
| | Solo | | | <i>Scale</i> | | | Lodo | | |
|-------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| | ^{40}K | ^{232}Th | ^{238}U | ^{40}K | ^{232}Th | ^{238}U | ^{40}K | ^{232}Th | ^{238}U |
| Média | 0,57 | 0,53 | 0,52 | 0,69 | 7,2 | 0,85 | 1,4 | 0,76 | 0,66 |
| Erro | (0,7) | (0,9) | (0,8) | (0,7) | (1,1) | (1,1) | (0,7) | (1,1) | (1,1) |

Fonte: O autor, 2023.

5.1 Cenário com solo contaminado

A irradiação das trabalhadoras e trabalhadores pelo solo contaminado, simulada neste estudo, mostrou ser mais crítica para a medula óssea vermelha e pele tanto masculina quanto feminina. De modo geral, a pele (figura 12), neste cenário, foi o tecido que obteve maior valor de dose absorvida e, não houve diferença significativa entre os simuladores antropomórficos masculino e feminino. Dentre os tecidos mais afetados, destacam-se o cólon, as gônadas e a bexiga (figura 12).

Figura 12 – Coeficiente de conversão da dose por órgão em cada simulador antropomórfico no cenário com solo contaminado. Figura fora de escala.

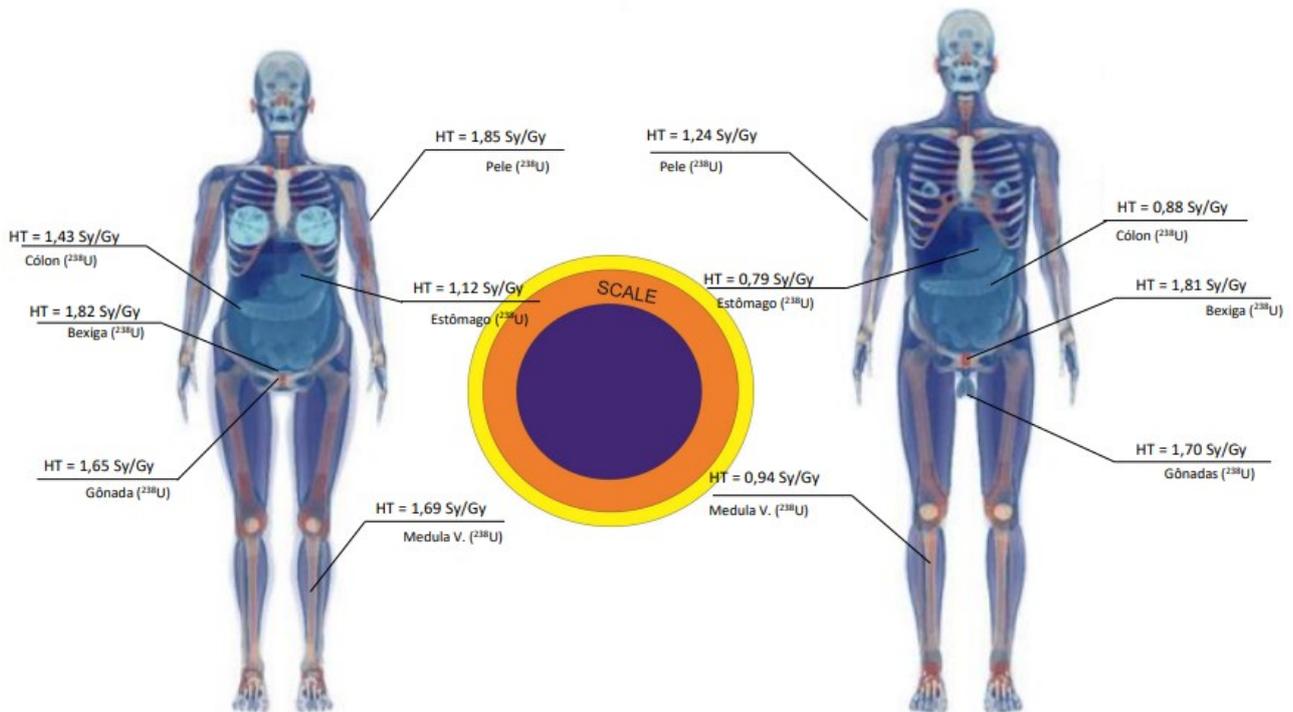


Fonte: O autor, 2023.

5.2 Cenário com *scale*

No cenário envolvendo o *scale*, os resultados obtidos são semelhantes entre os simuladores antropomórficos masculino e feminino. No entanto, a dose equivalente para a medula óssea vermelha, colón, estômago, bexiga e pele do simulador feminino foram, respectivamente, superiores em 80, 60, 45, 67, e 50% comparados com os resultados do simulador antropomórfico masculino (figura 13). Também foi possível observar que a série de decaimento de ²³⁸U apresentou maiores valores dosimétricos, seguido pela série do ²³²Th. As gônadas do simulador antropomórfico masculino foram as mais irradiadas que o do simulador feminino. A dose equivalente na gônada do simulador masculino foi cerca de 3% maior que no simulador feminino. Os tecidos mais irradiados neste cenário, considerando os dois gêneros foram, em ordem decrescente: pele, bexiga, medula óssea vermelha, gônadas e bexiga (figura 13).

Figura 13 – Coeficiente de conversão da dose por órgão em cada simulador antropomórfico no cenário com *scale*. Figura fora de escala.



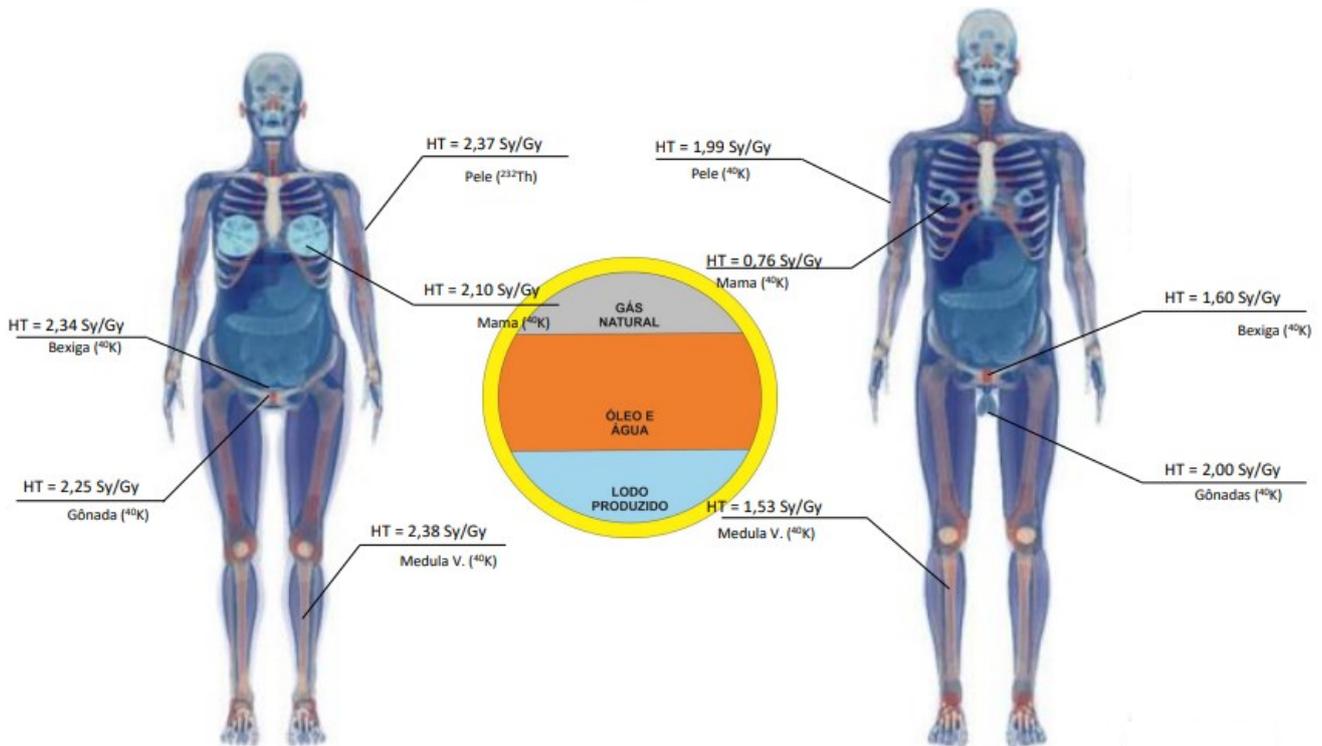
Fonte: O autor, 2023.

5.3 Cenário com lodo produzido

Dentre os cenários modelados, o cenário envolvendo irradiação a partir do lodo produzido foi o mais crítico. Neste cenário, a medula óssea vermelha foi o tecido mais afetado de ambos os gêneros, seguido pela bexiga e gônadas. Foi, ainda, observado que os valores de dose equivalente em todos os tecidos femininos foram superiores aos valores no simulador masculino. Os valores de dose equivalente para os tecidos medula óssea vermelha, bexiga e mama feminina foram, respectivamente, 51, 54 e 220% superior quando comparados com os tecidos no simulador masculino. Para todos os órgãos e tecidos dos simuladores feminino e masculino e radionuclídeo ^{40}K apresentou os maiores valores de dose equivalente.

A dose equivalente calculada do simulador antropomórfico masculino no cenário envolvendo lodo produzido, apresentou valor maior referente para o potássio, aproximadamente 2,00 Sv/Gy (gônadas) e o menor valor para a série do urânio 0,13 Sv/Gy (glândulas salivares). A dose equivalente calculada do simulador feminino atingiu valor máximo de 2,38 Sv/Gy (medula óssea vermelha) na série de decaimento do ^{40}K , e valor mínimo de 0,18 Sv/Gy (glândulas salivares) associada a série do ^{238}U (figura 14).

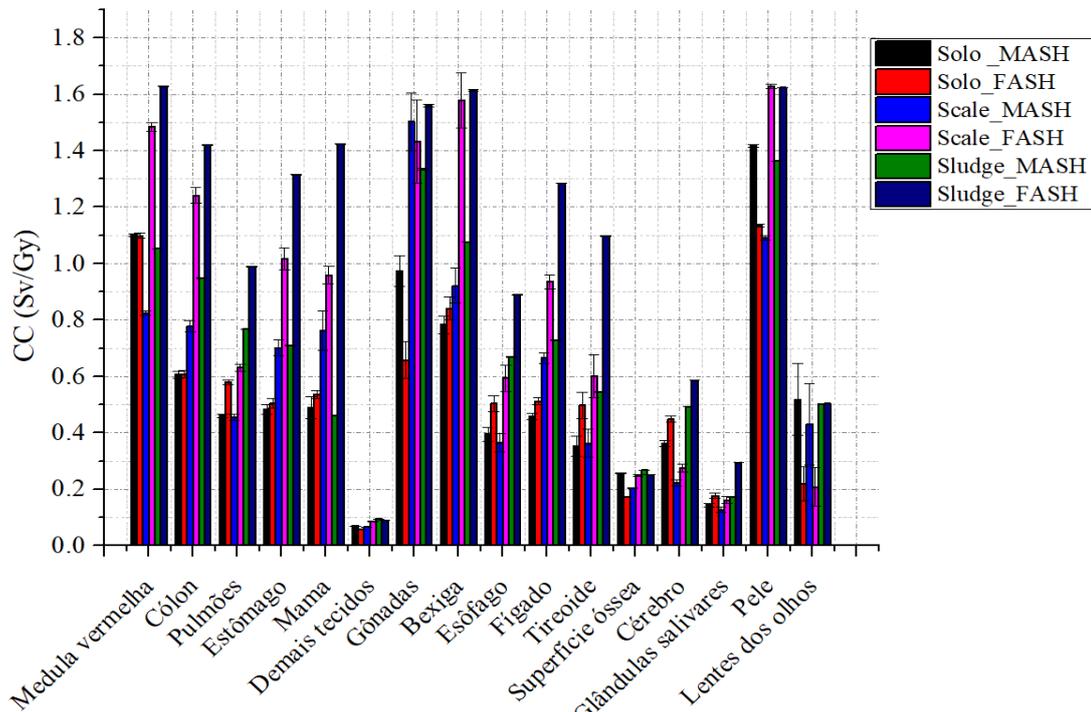
Figura 14 – Coeficiente de conversão da dose por órgão em cada simulador antropomórfico no cenário com *scale*.



Fonte: O autor, 2023.

No conjunto global dos resultados, o simulador antropomórfico feminino (FASH) obteve os maiores resultados, como pode ser visto na Figura 15. Além das diferenças do tamanho dos órgãos, as características da intensidade da radiação mudam com a altura acima do solo, especialmente para fontes no solo e, portanto, a altura do corpo e – por extensão – as diferentes localizações dos órgãos radiosensíveis internos podem afetar a magnitude da dose equivalente no órgão avaliado. Por exemplo, após o acidente em Fukushima, nos estágios iniciais, foi relatado que a taxa de dose no ar diminuiu com o aumento da altura em relação ao solo, o que causou muitas preocupações em relação à avaliação confiável de exposições a crianças (UNSCEAR, 2013). Cabe destacar que não existem diferenças quanto a radiosensibilidade entre os órgãos masculinos e femininos, apenas houve diferença no quantitativo da dose nas configurações de cada cenário simulado.

Figura 15. Coeficiente de conversão para dose equivalente total para os simuladores antropomórficos computacionais masculino MASH e feminino FASH calculados para o ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K .



Fonte: O autor, 2023.

Os diferentes cenários modelados demonstraram que existe diferenças importantes quanto as doses equivalentes dos órgãos e tecidos. Os órgãos que receberam maiores doses equivalentes foram no cenário envolvendo o *scale*, seguido do cenário do lodo produzido, onde o a medula óssea vermelha foi a mais irradiada. Estas diferenças entre os cenários reflete a geometria da cena.

Nos cenários estudados foi possível constatar uma diferença do quantitativo da dose entre os simuladores masculino e feminino, sendo este último com valores maiores nos cenários simulados. Em praticamente todos os tecidos do simulador feminino foi observado diferenças superiores nos dados de dose equivalente em relação aos resultados para o simulador masculino. No entanto, para os mesmos cenários, ficou claro que não houve diferenças significativas entre os gêneros, de modo que, os tecidos mais afetados no simulador feminino foram os mesmos mais afetados no simulador masculino, ainda que os valores de dose se distinguem. A diferença entre os gêneros tem muita relação com a posição dos órgãos em relação à fonte. Como o modelo computacional feminino utilizado neste estudo apresenta uma altura menor que o simulador masculino, a disposição dos órgãos mais próximo do solo e do oleoduto no

cenário muda e, conseqüentemente, leva a um aumento nos resultados órgãos do simulador feminino. Há também diferenças quanto ao tamanho de certos órgãos, que afetam os valores de dose, como é o caso da mama, sendo um tecido notadamente maior quando comparado ao tecido masculino.

O cenário mais crítico para os trabalhadores foi o lodo produzido. Nesta configuração, o ^{40}K apresentou fator de conversão (FC) médio de dose efetiva de 1,4 Sv/Gy. Em contrapartida, o cenário menos crítico foi para o solo contaminado, com FC para dose efetiva de 0,52 Sv/Gy para série do ^{238}U .

Deve-se notar que os coeficientes de conversão foram calculados para geometrias de fonte idealizadas e hipotéticas, como distribuições semi-infinitas e uniformes, para os simuladores antropomórficos sem roupas e para posturas eretas idealizadas. Como resultado, eles não refletem totalmente as exposições reais para qualquer situação particular ou indivíduo exposto.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi calculado um conjunto de Fatores de conversão para dose equivalente em órgãos e dose efetiva utilizando o código de transporte de radiação MCNPX2.7.0 e dois simuladores antropomórficos computacionais adultos baseados em voxel, um masculino e outro feminino, construídos com base em características antropométricas do homem e da mulher de referência da ICRP 89. Os coeficientes de conversão foram derivados dos radionuclídeos ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K e calculados para três tipos de cenários de exposição envolvendo trabalhadores em atividades de exploração de petróleo: (1) distribuição dos radionuclídeos na superfície do solo; (2) *scale* e (3) lodo produzido no separador. Estes FCs poderão ser usados para a avaliação da dose externa da exposição ambiental destes indivíduos para as condições ambientais ideais selecionadas. Os resultados mostraram que o cenário mais crítico foi o do lodo produzido. Neste cenário, os órgãos que obtiveram os maiores resultados foram a medula vermelha, gônadas, pele e, bexiga, respectivamente. Além disso, é importante destacar que a trabalhadora feminina foi a mais exposta, apresentando resultado de dose equivalente que chegou a ser 220% maior do que o homem.

7 REFERÊNCIAS

- ABDUL, RH; ALI, Master A. Measurement of radon exhalation rate from core of some oil wells in Basra Governorate in the southern Iraq. **Advances in Applied Science Research**, v. 3: 563-71, 2012.
- AGBALAGBA, E.O; Avwiri, G.O; Ononugbo, C.P Evaluation of Naturally Occurring Radioactivity Materials (NORM) of soil and sediments in oil and gas wells in western Niger Delta region of Nigeria. **Environmental Earth Sciences**. v70:2613-2622, Março 2013.
- AHMED Shawki Habib, **Measurement of NORM in Non-uniform Scale Samples from Libyan Oil Industry Using Gamma Spectroscopy and Monte Carlo Technique**. Ph.D. Thesis. University of Surry, Líbia, 2012.
- AL-FARSI, A. Nadhim. **Radiological aspects of petroleum exploration and production in the sultanate of Oman**. 2008. Tese de Doutorado. Queensland University of Technology. Disponível em: http://eprints.qut.edu.au/29817/1/Afkar_Al-Farsi_Thesis.pdf
- AL-KINANI, A.T.; HUSHARI, M.; ALSADIG, I.A.; AL-SULAITI, H. NORM in soil and lodo produzidosamples in Dukhan oil field, Qatar state. **Donnish Journal of Research in Environmental Studies**. v2(4):37-43, 2015.
- AL-MASRI, M. S.; SUMAN, H. NORM waste management in the oil and gas industry: The Syrian experience. **Journal of radioanalytical and nuclear chemistry**, v256: 159-162. Abril, 2003.
- AL-MASRI, M.S.; ABA, A. Distribution of scales containing NORM in different oilfields equipment. **Applied Radiation and Isotopes**. v63(4):457-463. Outubro, 2005.
- BJØRLYKKE, Knut. **Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics**. Oslo, Noruega: Springer, 2010.
- BOTEZATU, Elena; GRECEA, C. Radiological impact assessment on behalf of oil/gas industry. **Journal of Preventive Medicine**, v12(1-2): 16-21, 2004.
- CASSOLA, V.F., de LIMA, V.J., KRAMER, R e KHOURY, H.J. FASH and MASH: Female and male Adult human phantoms based on polygon meSH surfaces. Part II. Dosimetric calculations. *Phys. Med. Biol.*, 55, p. 163-189, 2010.
- CLOUVAS, A.; Xanthos, S.; ANTONOPOULOS-DOMIS, M.; SILVA, J. Monte Carlo calculation of dose rate conversion factors for external exposure to photon emitters in soil. **Health Physics**. 78(3):295-302, 2000.
- COELHO, Marina Meira; MOTTA, Daril Domingos. As meninas radioativas da empresa Undark: um estudo de caso sobre a violência emocional e socioambiental sobre o uso indiscriminado da radioatividade. In: **SEMINÁRIO DO ICHS–Humanidades em Contexto: desafios contemporâneos**. 2017.
- FORBES. U.S. **Winning the war against Saudi Arabia**. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2015/07/22/u-s-winning-oil-war-against-saudi-arabia/?sh=4d46968d1678>>. Acesso em junho, 2023.

GAZINEU, M. H. P.; ARAÚJO, Andressa A. de; BRANDÃO, YANA B.; HAZIN, Clovis A. Radium-226 and Radium-228 in scale and lodo produzidogenerated in the petroleum industry, *in: 11th International Congress of the International Radiation Protection Association*, 2004.

GONDIM, Bianca Azulay Martins. **Interação da radiação ionizante com a matéria e seus efeitos no corpo humano**. Monografia de Bacharelado em Física. Fortaleza, 2016.

HAMLAT, M.S.; DJEFFAL, S.; KADI, H. Assessment of radiation exposures from naturally occurring radioactive materials in the oil and gas industry. **Applied Radiation and Isotopes**. 55: 141-146, 2001.

HENEINE, Ibrahim Felipe. **Biofísica Básica**. Rio de Janeiro:Atheneu, 2008

HOBSON, George Douglas; TIRATSOO, Eric Neshan. **Introduction to petroleum geology**. 2ed. Estados Unidos, 1985.

International Atomic Energy Agency (IAEA). International Basic Safety Standards for Protection against ionizing Radiation and for the safety of radiation sources, **Safety Series N° 115**, IAEA, Vienna, 1996.

International Atomic Energy Agency (IAEA). Radiation protection and the management of radioactive waste in the oil and gas industry., **Safety Reports. N° 34**, 2003.

International Atomic Energy Agency (IAEA). Radiation Safety in Well Logging. **Specific Safety Guide N° 57**. Vienna, 2020.

ICRP 110. International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 110, Adult Reference Computational Phantoms. *Annals of the ICRP*, vol. 39(2), 2009.

ICRP 103. International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 103, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP*, vol. 37(2-4), 2007.

ICRP 60. Recommendations of the international commission on radiological protection. Elsevier Health Sciences, 1991.

JAMAL A. Zaidan. Natural Occurring Radioactive Materials (NORM) in the oil and gas industry, **Journal of Petroleum Researches & Studies**, No.1, 2010.

KOLB, W. A.; WOJCIK, M. Enhanced radioactivity due to natural oil and gas production and related radiological problems. **Science of the Total Environment**, v.45: 77-84, 1985.

KRIEGER, Kenneth. NORM contamination: Now you see it, now you don't. **Health physics**, v.89(2). 20-21, 2005.

LARCHER, Pierre Henri. **Heródoto: Histórias**. Paris, França: 2torres, 1850.

MOEBIUS, Siegurd; MOEBIUS, R.; Bartenbach M, Ramamonjisoa. Liquid scintillation for NORM in the oil and gas industry. **Proceedings IRPA 12**. Buenos Aires, Argentina, 2008.

MICHALIK B. Juhasz L.; UGRON A. Surveying programme of the NORM situation of the Hungarian waterworks, EU- NORM. *in: 1st International Symposium*. Estonia, 2012.

PARMAKSIZ, A.; AGUS, Y.; BULGURLU, F. BULUR, E.; YILDIZ, C. Oncu, Activity concentrations of ²²⁴Ra, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra and ⁴⁰K radionuclides in refinery products and the additional radiation dose originated from oil residues in Turkey. **Radiation Protection Dosimetry**. Turquia 156(4):481-488. 2013.

PATAKI, George E.; CAHILL, John P. An investigation of naturally occurring radioactive materials (NORM) in oil and gas wells in New York State. **Department of Environmental Conservation**. Nova York, 10-14, 1999.

PELOWITZ, D. B. MCNPX User's Manual, version 2.7.0. Report LA-CP-11-00438. Los Alamos National Laboratory, 2011.

POSTHUMA, J. **The composition of petroleum**. Rapports et procès-verbaux des réunions. França, v. 171: 7-16, 1977.

REJAH, Basim Khalaf. **Natural Occurring Radioactive Materials (NORM) and Technologically Enhanced NORM (TENORM) Measurements on Oil Field in North Region of Iraq**. Tese de Doutorado. Baghdad University, Iraque, 2015.

ROWAN, Elisabeth L.; KRAEMER, T. F. Radon-222 Content of natural gas samples from Upper and Middle Devonian sandstone and shale reservoirs in Pennsylvania: Preliminary data. **US Department of the Interior, US Geological Survey**. Estados Unidos, 2012.

SANTOS, William S. et al. Computational dose evaluation on children exposed to natural radioactivity from granitic rocks used as architectural materials. **Journal of Radiological Protection**, v.42(1): 011511. Janeiro, 2022.

SELLEY, Richard C.; SONNENBERG, Stephen A. **Elements of Petroleum Geology**. 3^a Ed. Academic Press (ELSEVIER), 1985.

SPEERS, G. C.; WHITEHEAD, E. V. Crude petroleum. **Organic geochemistry: methods and results**. 638-675, 1969.

SWANN, Charles; MATTHEWS, John; ERICKSEN, Rick; KUSZMAUL, Joel. Evaluations of Radionuclides of Uranium, Thorium, and Radium Associated with Produced Fluids, Precipitates, and Sludges from Oil, Gas, and Oilfield Brine Injection Wells in Mississippi. **University of Mississippi**. Estados Unidos. Março, 2004.

TAUHATA, Luiz; SALATI, Ivan P.A.; DI PRINZIO, Renato; DI PRINZIO, Antonieta; **Radioproteção e dosimetria, fundamentos**. 5^a Edição. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2003.

TEKIN, H. O.; Erguzel, T. T.; Sayyed, M. I.; Singh, V. P.; Manici, T.; Altunsoy, E. E.; Agar, O. An Investigation on shielding properties of different granite samples using MCNPX code. **Dig J Nanomater Biostructures**, v.13: 381-389, 2018.

UNSCEAR. Sources Effects and Risks of Ionizing Radiation. With Annex A - Levels and Effects of Radiation Exposure Due to the Nuclear Accident After the 2011 Great

East Japan Earthquake and Tsunami. **United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation**, New York, 2013.

United Nations Environment Programme (UNEP). Report of the Governing Council on the Work. **Governing Council 16th sess.** p:118. New York, 1991.

WANG, Siqiu. **Modeling of NORM Dosimetry in Onshore Oilfields using Monte Carlo Methods.** p.60. Tese de doutorado (Master of Science in engineering). University of Texas at Austin, Austin, 2016.

WEISSMULLER, Gilberto; PINTO, Nice M. A.; BISCH, Paulo M. **Biofísica.** V. 1, fundação CECIERJ/consórcio CEDERJ, Rio de Janeiro, 2009.

YOSHIMURA, Elisabeth Mateus. Física das Radiações: interação da radiação com a matéria. **Revista Brasileira de Física Médica**, v.3(1): 57-67, 2009.

8 ANEXOS

8.1 Anexo A

Tabela 4. Coeficientes de conversão para dose equivalente normalizados pela dose absorvida no ar (em Sv/Gy) para o NORM presente no solo. Entre parênteses estão os erros relativos percentuais.

| Órgãos | ⁴⁰ K | | Série ²³² Th | | Série ²³⁸ U | |
|---------------------|----------------------|---------------|-------------------------|---------------|------------------------|---------------|
| | MASH | FASH | MASH | FASH | MASH | FASH |
| Medula vermelha | 1,1E+00 (0,4) | 1,2E+00 (0,7) | 1,1E+00 (0,6) | 1,1E+00 (0,9) | 1,1E+00 (0,5) | 1,1E+00 (0,9) |
| Cólon | 6,5E-01 (1,7) | 6,6E-01 (1,8) | 6,0E-01 (2,2) | 5,9E-01 (2,3) | 5,8E-01 (2,1) | 5,8E-01 (2,2) |
| Pulmões | 4,8E-01 (1,3) | 6,0E-01 (1,3) | 4,6E-01 (1,7) | 5,8E-01 (1,6) | 4,4E-01 (1,6) | 5,6E-01 (1,5) |
| Estômago | 5,0E-01 (3,1) | 5,4E-01 (3,0) | 4,8E-01 (4,1) | 4,9E-01 (3,8) | 4,7E-01 (3,7) | 4,9E-01 (3,6) |
| Mama | 5,3E-01 (6,8) | 5,6E-01 (2,5) | 4,7E-01 (8,6) | 5,3E-01 (3,1) | 4,7E-01 (8,0) | 5,3E-01 (2,9) |
| Demais tecidos | 7,4E-02 (0,4) | 6,0E-02 (0,4) | 6,9E-02 (0,5) | 5,7E-02 (0,5) | 6,8E-02 (0,4) | 5,6E-02 (0,5) |
| Gônadas | 1,0E+00 (4,9) | 7,4E-01 (8,2) | 9,8E-01 (6,1) | 6,2E-01 (11) | 9,4E-01 (5,8) | 6,2E-01 (10) |
| Bexiga | 8,1E-01 (3,3) | 8,5E-01 (4,3) | 7,8E-01 (4,2) | 8,2E-01 (5,3) | 7,6E-01 (4,0) | 8,5E-01 (4,9) |
| Esôfago | 4,2E-01 (5,2) | 5,4E-01 (4,9) | 3,9E-01 (6,8) | 4,9E-01 (6,1) | 3,8E-01 (6,6) | 4,8E-01 (5,7) |
| Fígado | 4,8E-01 (1,9) | 5,5E-01 (1,9) | 4,6E-01 (2,4) | 5,0E-01 (2,5) | 4,3E-01 (2,3) | 4,9E-01 (2,3) |
| Tireoide | 3,5E-01 (8,6) | 5,4E-01 (8,0) | 3,6E-01 (11) | 4,8E-01 (10) | 3,5E-01 (10) | 4,7E-01 (9,3) |
| Superfície óssea | 2,6E-01 (0,4) | 1,8E-01 (0,6) | 2,6E-01 (0,5) | 1,7E-01 (0,7) | 2,5E-01 (0,5) | 1,7E-01 (0,7) |
| Cérebro | 3,9E-01 (2,4) | 4,7E-01 (2,2) | 3,5E-01 (3,1) | 4,4E-01 (2,9) | 3,5E-01 (2,9) | 4,3E-01 (2,7) |
| Glândulas salivares | 1,5E-01 (4,2) | 1,9E-01 (4,1) | 1,4E-01 (5,4) | 1,7E-01 (5,3) | 1,4E-01 (5,1) | 1,7E-01 (5,0) |
| Pele | 1,5E+00 (0,3) | 1,2E+00 (0,4) | 1,4E+00 (0,4) | 1,1E+00 (0,5) | 1,4E+00 (0,4) | 1,1E+00 (0,5) |
| Lentes dos olhos | 5,7E-01 (20) | 2,0E-01 (28) | 4,5E-01 (29) | 2,2E-01 (29) | 5,5E-01 (24) | 2,4E-01 (25) |
| Dose efetiva | 5,7E-01 (0,7) | | 5,3E-01 (0,9) | | 5,2E-01 (0,8) | |

Fonte: O autor, 2023.

8.2 Anexo B

Tabela 5. Coeficientes de conversão para dose equivalente normalizados pela dose absorvida no ar (em Sv/Gy) para o NORM presente no *scale*. Entre parênteses estão os erros relativos percentuais.

| Órgãos | ⁴⁰ K | | Série ²³² Th | | Série ²³⁸ U | |
|---------------------|----------------------|---------------|-------------------------|---------------|------------------------|---------------|
| | MASH | FASH | MASH | FASH | MASH | FASH |
| Medula vermelha | 7,5E-01 (0,7) | 1,3E+00 (0,8) | 7,9E-01 (1,0) | 1,4E+00 (1,2) | 9,4E-01 (0,9) | 1,7E+00 (1,2) |
| Cólon | 7,1E-01 (2,1) | 1,1E+00 (1,8) | 7,4E-01 (3,1) | 1,2E+00 (2,7) | 8,8E-01 (3,0) | 1,4E+00 (2,4) |
| Pulmões | 4,0E-01 (1,8) | 5,7E-01 (1,6) | 4,6E-01 (2,7) | 6,2E-01 (2,5) | 5,1E-01 (2,6) | 7,1E-01 (2,4) |
| Estômago | 6,5E-01 (3,2) | 9,5E-01 (3,0) | 6,7E-01 (4,8) | 9,8E-01 (4,4) | 7,9E-01 (4,5) | 1,1E+00 (4,3) |
| Mama | 6,9E-01 (6,9) | 8,7E-01 (2,4) | 7,6E-01 (10) | 9,2E-01 (3,6) | 8,4E-01 (9,7) | 1,1E+00 (3,4) |
| Demais tecidos | 6,2E-02 (0,5) | 7,8E-02 (0,5) | 6,4E-02 (0,7) | 8,2E-02 (0,7) | 7,5E-02 (0,7) | 9,7E-02 (0,7) |
| Gônadas | 1,4E+00 (5,2) | 1,4E+00 (7,6) | 1,4E+00 (7,9) | 1,3E+00 (12) | 1,7E+00 (7,4) | 1,7E+00 (11) |
| Bexiga | 8,2E-01 (5,1) | 1,4E+00 (4,8) | 8,6E-01 (7,6) | 1,6E+00 (7,1) | 1,1E+00 (7,2) | 1,8E+00 (6,6) |
| Esôfago | 2,9E-01 (6,5) | 5,2E-01 (6,0) | 4,1E-01 (10) | 5,8E-01 (8,8) | 3,9E-01 (11) | 6,9E-01 (8,2) |
| Fígado | 6,0E-01 (2,2) | 8,4E-01 (2,0) | 6,6E-01 (3,1) | 9,2E-01 (3,0) | 7,4E-01 (3,1) | 1,0E+00 (2,9) |
| Tireoide | 3,6E-01 (11) | 5,1E-01 (10) | 3,4E-01 (14) | 6,2E-01 (15) | 3,9E-01 (16) | 6,8E-01 (13) |
| Superfície óssea | 1,8E-01 (0,6) | 2,2E-01 (0,6) | 2,0E-01 (0,9) | 2,4E-01 (0,9) | 2,3E-01 (0,9) | 2,9E-01 (0,9) |
| Cérebro | 1,8E-01 (4,0) | 2,5E-01 (3,7) | 2,4E-01 (5,6) | 2,6E-01 (5,6) | 2,4E-01 (5,5) | 3,2E-01 (5,0) |
| Glândulas salivares | 1,2E-01 (6,1) | 1,4E-01 (6,2) | 1,3E-01 (9,1) | 1,5E-01 (9,7) | 1,4E-01 (9,0) | 2,0E-01 (8,3) |
| Pele | 1,0E+00 (0,5) | 1,5E+00 (0,4) | 1,0E+00 (0,7) | 1,5E+00 (0,6) | 1,2E+00 (0,6) | 1,9E+00 (0,6) |
| Lentes dos olhos | 3,2E-01 (27) | 1,9E-01 (23) | 3,6E-01 (39) | 2,8E-01 (34) | 6,1E-01 (35) | 1,5E-01 (41) |
| Dose efetiva | 6,9E-01 (0,7) | | 7,2E-01 (1,1) | | 8,5E-01 (1,1) | |

Fonte: O autor, 2023.

8.3 Anexo C

Tabela 6. Coeficientes de conversão para dose equivalente normalizados pela dose absorvida no ar (em Sv/Gy) para o NORM presente no sludge. Entre parênteses estão os erros relativos percentuais.

| Órgãos | ⁴⁰ K | | Série ²³² Th | | Série ²³⁸ U | |
|---------------------|------------------|---------------|-------------------------|---------------|------------------------|---------------|
| | MASH | FASH | MASH | FASH | MASH | FASH |
| Medula vermelha | 1,5E+00 (0,4) | 2,4E+00 (0,5) | 8,6E-01 (0,6) | 1,3E+00 (0,8) | 7,7E-01 (0,5) | 1,2E+00 (0,7) |
| Cólon | 1,4E+00 (1,3) | 2,1E+00 (1,1) | 7,8E-01 (1,9) | 1,2E+00 (1,5) | 6,8E-01 (1,9) | 1,0E+00 (1,4) |
| Pulmões | 1,1E+00 (0,9) | 1,4E+00 (0,9) | 6,3E-01 (1,4) | 8,1E-01 (1,3) | 5,4E-01 (1,3) | 7,1E-01 (1,3) |
| Estômago | 1,0E+00 (2,2) | 1,9E+00 (1,8) | 6,0E-01 (3,2) | 1,1E+00 (2,5) | 4,9E-01 (3,1) | 9,5E-01 (2,3) |
| Mama | 7,6E-01 (5,5) | 2,1E+00 (1,4) | 3,5E-01 (8,8) | 1,1E+00 (2,0) | 2,8E-01 (8,6) | 1,0E+00 (1,9) |
| Demais tecidos | 1,4E-01 (0,3) | 1,3E-01 (0,3) | 7,7E-02 (0,4) | 7,4E-02 (0,4) | 6,9E-02 (0,4) | 6,6E-02 (0,4) |
| Gônadas | 2,0E+00 (3,7) | 2,2E+00 (5,0) | 1,0E+00 (5,6) | 1,3E+00 (6,7) | 9,8E-01 (5,2) | 1,1E+00 (6,7) |
| Bexiga | 1,6E+00 (3,1) | 2,3E+00 (3,3) | 8,9E-01 (4,3) | 1,3E+00 (4,7) | 7,5E-01 (4,2) | 1,2E+00 (4,4) |
| Esôfago | 9,7E-01 (3,4) | 1,3E+00 (3,2) | 5,6E-01 (5,1) | 7,0E-01 (4,7) | 4,7E-01 (4,8) | 6,2E-01 (4,5) |
| Fígado | 1,1E+00 (1,4) | 1,9E+00 (1,2) | 6,0E-01 (2,1) | 1,0E+00 (1,7) | 5,2E-01 (2,0) | 9,3E-01 (1,6) |
| Tireoide | 8,3E-01 (6,9) | 1,6E+00 (5,0) | 4,2E-01 (11) | 9,5E-01 (6,8) | 3,8E-01 (10) | 7,9E-01 (6,7) |
| Superfície óssea | 3,9E-01 (0,4) | 3,6E-01 (0,4) | 2,2E-01 (0,5) | 2,1E-01 (0,6) | 2,0E-01 (0,5) | 1,8E-01 (0,6) |
| Cérebro | 7,2E-01 (2,1) | 8,6E-01 (1,9) | 4,1E-01 (3,2) | 4,9E-01 (2,8) | 3,5E-01 (3,1) | 4,1E-01 (2,7) |
| Glândulas salivares | 2,5E-01 (4,1) | 4,3E-01 (3,4) | 1,4E-01 (5,8) | 2,5E-01 (4,7) | 1,3E-01 (5,9) | 2,1E-01 (4,6) |
| Pele | 2,0E+00 (0,3) | 2,4E+00 (0,3) | 1,1E+00 (0,4) | 1,3E+00 (0,4) | 9,9E-01 (0,4) | 1,2E+00 (0,4) |
| Lentes dos olhos | 7,8E-01 (20) | 7,3E-01 (15) | 4,0E-01 (35) | 4,5E-01 (22) | 3,2E-01 (31) | 3,3E-01 (21) |
| Dose efetiva | 1,4 (0,5) | | 7,6E-01 (0,7) | | 6,6E-01 (0,7) | |

Fonte: O autor, 2023

