Estudo preliminar da exposição ocupacional ao benzeno em postos de combustíveis de Vitória (ES) utilizando modelagem computacional

Karina Tonoli Cevolani
Engenheira ambiental e Eng. segurança do trabalho. Experiência com inventário de emissões atmosféricas, execução de modelos de simulação da qualidade do ar, projetos de rede de monitoramento da qualidade do ar e meteorologia.
✉ karinatonolic@gmail.com

Thaiany Souza Canal Bressiani
Professora de ensino técnico e superior, na área de segurança do trabalho, com foco em meio ambiente e agentes químicos. Mestre em química, Engenheira química, Eng. segurança do trabalho e licenciada em química.
✉ thaiany27@gmail.com

Recebido em 25 de setembro de 2022 **Aceito em 7 de fevereiro de 2023**

Resumo:
A intensificação do consumo de combustíveis fósseis provocou aumento das operações de revenda em postos, o que pode aumentar a vulnerabilidade dos frentistas à exposição ao benzeno. Nesse sentido, o artigo tem como objetivo investigar, em caráter preliminar, a exposição ocupacional ao benzeno por frentistas de Vitória (ES) por via respiratória através de modelagem computacional, utilizando o software AERMOD View™. A massa de benzeno foi quantificada para atividades de reabastecimento de veículos e do tanque subterrâneo via fator da Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana. Obteve-se o cálculo do coeficiente de perigo (HQ) para efeito crônico de diminuição da contagem de linfócitos e do risco de leucemia. Observou-se que os postos P0023 e P0027 apresentaram a menor e a maior massa emitida, respectivamente, 0,0054 t/ano e 0,1190 t/ano. As máximas concentrações no ar nos arredores do P0023 e do P0027, sugerem uma probabilidade 1/100.000 e 1/10.000, respectivamente, para desenvolvimento de câncer. Os HQs das séries de mínimas, médias e máximas concentrações de benzeno indicaram riscos negligenciáveis. O estudo sinalizou uma possibilidade de leucemia, especialmente, para os receptores próximos ao posto P0027. Embora a probabilidade seja baixa e remeta a uma exposição contínua no decorrer da vida laboral, esta pode ser minimizada com modificações comportamentais e infraestruturais. Medições *in situ* são recomendadas para aprimorar a avaliação do nível de exposição.
Palavras-chave: Benzeno, Frentistas, Modelagem Computacional, Perigo, Câncer.

Preliminary Study of Occupational Exposure to Benzene in Gas Stations in Vitória (ES) using Computational Modeling

Abstract:
The increased consumption of fossil fuels has led to an increase in resale operations at service stations, which may increase the vulnerability of gas station attendants to exposure to benzene. The article aims to investigate, preliminary, the occupational exposure to benzene by gas stations attendants' inhalation in Vitória (ES) through computational modeling, by using AERMOD View™. The benzene mass was quantified for vehicle refueling and filling of underground storage tanks by emission factor from United States Environmental Protection Agency. From this agency was obtained

the equation for hazard quotient (HQ) for chronic effect of decreasing the number of lymphocytes and of risk of leukemia. It was observed that the gas stations P0023 and P0027 exhibited lower and higher mass emitted, respectively, 0,0054 t/year and 0,1190t/year. The maximum air concentrations were in the surroundings of P0023 and P0027, suggested a probability of 1/100.000 and 1/10.000, respectively, for cancer development. The HQs for series of minimum, average and maximum benzene concentrations pointed out negligible risks. The study indicated a possibility of leukemia, specially, for the receptors close to the gas station P0027. Although the probability is low and depends on the continuous exposure throughout working life, this may be minimized with changes in behavior and infrastructure. In-situ monitoring is recommend to improve the assessment of the level of exposure.
Keywords: Benzene, Gas Station Attendants, Computational Modeling, Hazard, Cancer.

Estudio preliminar de la exposición ocupacional al benceno en estaciones de servicio en Vitória (ES) utilizando modelación computacional

Resumen:
La intensificación del consumo de combustibles fósiles ha provocado un aumento de las operaciones de reventa en las gasolineras, lo que puede aumentar la vulnerabilidad de los empleados de las gasolineras a la exposición al benceno. En este sentido, el artículo tiene como objetivo investigar, con carácter preliminar, la exposición ocupacional al benceno por parte de los empleados de gasolineras en Vitória (ES) por vía respiratoria a través de la modelación computacional, utilizando el software AERMOD View™. La masa de benceno se cuantificó para las actividades de reabastecimiento de combustible de vehículos y tanques subterráneos a través del factor de la Agencia de Protección Ambiental norteamericana. Se calculó el coeficiente de riesgo (HQ) para el efecto crónico de la disminución del recuento de linfocitos y el riesgo de leucemia. Se observó que las estaciones P0023 y P0027 tuvieron la menor y mayor masa emitida, respectivamente, 0.0054 t/año y 0.1190 t/año. Las concentraciones máximas en el aire de los alrededores de P0023 y P0027 sugieren una probabilidad de 1/100.000 y 1/10.000, respectivamente, para el desarrollo de cáncer. Los HQ de la serie de concentraciones mínima, media y máxima de benceno indicaron riesgos despreciables. El estudio señaló una posibilidad de leucemia, especialmente para los receptores cercanos al puesto P0027. Aunque la probabilidad es baja y se refiere a una exposición continua a lo largo de la vida laboral, esto se puede minimizar con cambios de comportamiento e infraestructura. Se recomiendan mediciones in situ para mejorar la evaluación del nivel de exposición.
Palabras clave: Benceno, Empleados de gasolinera, Modelación computacional, Peligro, Cáncer.

INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional, o consumo de gasolina tem aumentado ao longo dos anos, o que intensifica a preocupação no âmbito de saúde ocupacional dos indivíduos, como os frentistas, expostos aos componentes volatilizados da gasolina. Diferentemente de vários países desenvolvidos, no Brasil, o reabastecimento de veículos não é feito de forma autônoma pelos condutores do veículo. Sendo assim, essa classe trabalhadora é potencialmente submetida ao contato, principalmente pela via inalatória, com hidrocarbonetos aromáticos como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (CRUZ *et al.*, 2017).

Dentre estes, o benzeno se destaca como o detentor do maior risco toxicológico devido a suas propriedades carcinogênicas em humanos, segundo classificação da Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC) (CRUZ *et al.*, 2017; AMARAL *et al.*, 2019; CAMPOS *et al.*, 2017; CORREA *et al.,* 2017). Ao benzeno é relacionado o termo "benzenismo", um conjunto de sinais, sintomas e complicações decorrentes da exposição aguda ou crônica ao benzeno, podendo ocorrer complicações a médio ou a longo prazo, principalmente no sistema hematopoiético (formador de sangue) (FUNDACENTRO, 2012). O aumento da incidência de leucemia (câncer nos tecidos que formam as células brancas do sangue) tem sido observado em humanos expostos ao benzeno em atividades ocupacionais. Ainda, o benzeno pode provocar efeitos prejudiciais ao sistema imunológico e reprodutor e alterar tanto a estrutura quanto o número de cromossomos em humanos (FUNDACENTRO, 2012; EDOKPOLO *et al*., 2014). Dentre os efeitos agudos são citados dor de cabeça, tontura, dificuldade de concentração e perda de consciência (US EPA, 2012, SEKAR *et al*., 2019).

A possibilidade de correlação entre os sintomas de dor de cabeça, enxaqueca, fadiga e sonolência relatados por os frentistas, em entrevistas, e os efeitos neuro tóxicos agudos bem como danos genéticos decorrentes da exposição ao benzeno também é sinalizada na literatura (CRUZ *et al.*, 2017; CAMPOS, 2017). Especialmente durante as atividades de reabastecimento de veículos, enchimento de tanque subterrâneo, realização de testes de qualidade e a limpeza dos postos representam os instantes em que esta classe trabalhadora está exposta a altas concentrações de benzeno, o que provavelmente aumenta o risco de efeitos nocivos à saúde, dependendo do tempo de exposição e da susceptibilidade individual (CRUZ *et al.*, 2017; AMARAL *et al.*, 2019).

O Anexo II da norma regulamentadora Nº 09, revisado em 2017 (BRASIL, 2017), estabelece os requisitos mínimos de segurança e saúde no trabalho para as atividades com exposição ocupacional ao benzeno em Postos Revendedores de Combustíveis (PRC) (BRASIL, 2016). Apesar desta norma especificar o direito do trabalhador de ser informado sobre os riscos potenciais de exposição ao benzeno à sua saúde e segurança, muitos frentistas ainda não possuem este conhecimento (SKAMVETSAKIS, 2017). Além disso, a precariedade das condições de trabalho em conjunto com procedimentos inadequados como o enchimento do tanque acima do limite e a aproximação do rosto do trabalhador da bomba do tanque de

gasolina para escutar a trava automática, contribuem para aumentar a vulnerabilidade dessa classe trabalhadora (CAMPOS, 2017; D'ALASCIO *et al.*, 2014).

Um estudo realizado com frentistas da cidade de Recife – PE evidenciou que mais da metade dos frentistas utilizam flanela ou estopa para limpeza das mãos, permitindo o contato com o combustível e intensificando a exposição ao benzeno, e que 70% deles informaram que enchem o tanque além da trava automática (CAMPOS, 2017). Similarmente, um estudo desenvolvido no estado de Santa Catarina com frentistas e seus supervisores encontrou resultados semelhantes (D'ALASCIO *et al.*, 2014). Dos 84 trabalhadores entrevistados, 94% utilizam tecido ("pano") para abastecer veículos e 35,7% possuem o hábito de cheirar a tampa antes de iniciar o abastecimento para identificar previamente o combustível.

Além disso, há estudos que avaliaram a concentração de benzeno no ar nas proximidades das bombas de combustível. Em postos da zona oeste do Rio de Janeiro, utilizando a técnica de cromatografia gasosa e detector de ionização de chama, foi medido um valor médio de 14,85 µg/m^3 (± 9,85) e percentil 75 (P75) de 21,46 µg/m^3, que indica que 75% dos dados medidos foram menores ou iguais a 21,46 µg/m^3 (AMARAL *et al.*, 2019). Na cidade do Rio de Janeiro, as amostras apontaram para concentração média de benzeno no ar de 29,7µg/m^3 (±19,7). Quanto às medições a 250 metros (m) de um dos postos, os resultados indicaram uma concentração média de benzeno de 16,9 µg/m^3 (±2,96) (CORREA *et al.*, 2017).

Em postos situados em Salvador e Feira de Santana na Bahia (BA), os resultados obtidos com amostradores passivos indicaram que as concentrações de benzeno no ar tinham magnitude na faixa de 46,72 a 435,43 µg/m^3. A concentração média foi de 211,87 µg/m^3 (CRUZ *et al.*, 2017). Valores semelhantes foram obtidos por meio de medições em oito postos de combustíveis na localidade de Shahreza no Irã (ESMAELNEJAD, 2017). Os monitoramentos foram realizados a altura de 1,7m e a 2m da bomba de combustível. No período de inverno, as concentrações médias de benzeno foram de 268,5 µg/m^3 (±171,2). Já no verão, a média alcança 310,6 µg/m^3 (±213,5) (ESMAELNEJAD, 2017).

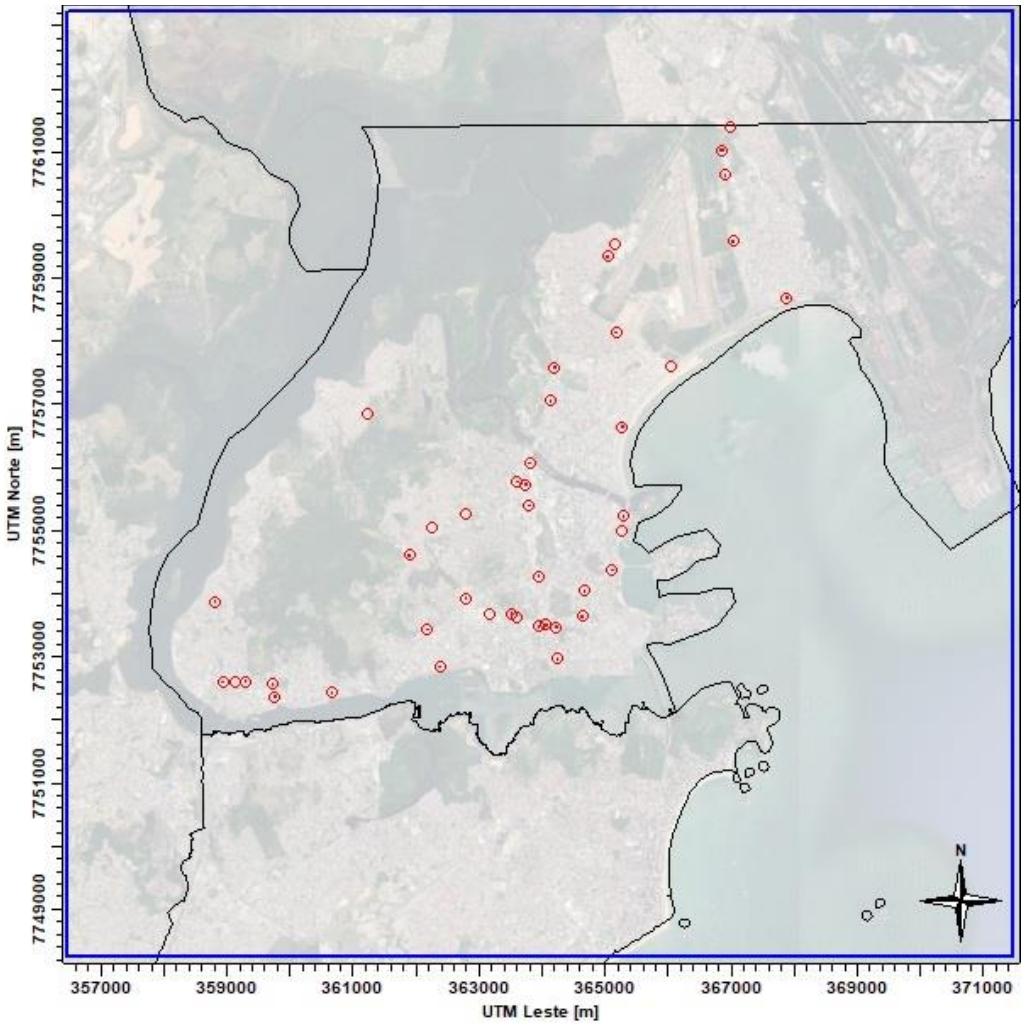
Frente ao exposto, este estudo apresenta uma avaliação quantitativa do risco de exposição ao benzeno emitido em postos do município de Vitória no Estado do Espírito Santo sobre a saúde de frentistas durante as operações de reabastecimento de veículo e estocagem

de gasolina com auxílio de modelagem computacional. O software utilizado para análise, AERMOD View™, que compreende um modelo amplamente empregado para verificar as concentrações e deposições de poluentes atmosféricos emitidos por uma larga variedade de fontes emissoras (LAKES, 2021). A utilização do modelo AERMOD associado à quantificação do risco frente à exposição ocupacional de substâncias tóxicas como benzeno tem se demonstrado uma alternativa para o levantamento quantitativo dos efeitos negativos à saúde desencadeados por tais substâncias (CHEN; CARTER, 2017).

MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, foram mapeados cerca de 40 postos revendedores operantes em Vitória-ES da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), os quais estão ilustrados espacialmente na Figura 1 (ANP, 2021).

Figura 1. Disposição Espacial dos Postos de Combustíveis Operantes em Vitória-ES.



Fonte: AERMOD View™.

Da mesma Agência, foi obtido o volume de gasolina vendido no município em 2018 (102.183.141,00 l) (ANP, 2021). A partir do volume (V), subdividido nos postos individualmente em função do número de bicos, e dos fatores de emissão disponibilizados pela Agência de

Proteção Ambiental Norte-Americana (US EPA), foi quantificada a Taxa de Emissão de Benzeno (TE) para todos os postos individualmente, conforme Eq.1. Também foram determinadas as massas emitidas das atividades de reabastecimento de veículos (TErv) e do tanque subterrâneo (TEts), considerando carregamentos sem controle com perdas e do tipo *splash*, respectivamente.

$$TE = TE_{rv} + TE_{ts} = FE_{rv} * V + FE_{ts} * V \quad (1)$$

Em que FErv é o fator de emissão para reabastecimento de veículo (11,9 mg/L) e FEts é o fator de emissão para carregamento do tanque subterrâneo (12,4 mg/L) (US EPA, 2018). Na sequência foram obtidas as concentrações médias de 8 horas de benzeno com auxílio do AERMOD View™, versão comercial v. 9.8.3 (LAKES, 2021).

Descrição do Modelo AERMOD View™

O modelo AERMOD consiste em modelo estacionário de pluma gaussiana o qual incorpora a dispersão atmosférica baseado na turbulência da camada limite planetária e conceitos de escalonamento, incluindo tratamento de fontes planas e elevadas, como pontuais, áreas e volumes, e terrenos simples e complexos (US EPA, 2020). A versão comercial do modelo, denominada AERMOD View™, foi desenvolvido pela *Lakes Environmental Consultants Inc* (LAKES, 2021). Ele representa um pacote completo de modelagem de dispersão atmosférica incorporando os modelos aprovados pela US EPA, como AERMOD, ISCST3 e ISC-PRIME, em uma única interface (LAKES, 2021). Portanto, se apresenta como uma excelente ferramenta de simular a distribuição de poluentes no ar.

No modelo foram definidas três grades sendo uma grade cartesiana (15x15 km, resolução de 250x250m) e duas polares não-uniformes (resolução de 10º), totalizando 3.721 receptores cartesianos e 324 polares por grade. As grades polares foram localizadas no entorno dos postos com maior e menor taxa de emissão de benzeno com raios de 2m, 5m, 10m, 20m, 50m, 80m, 120m, 150m, 180m. Todos receptores foram de altura 1,65m conforme média das alturas medianas de homens (média de 1,71m) e mulheres (média de 1,59m)

brasileiros na faixa de 20-64 anos (IBGE, 2008). Para cada receptor contemplado pela modelagem, foram obtidas as concentrações médias de 8 horas ao longo dos anos simulados.

Os postos de combustíveis foram inseridos como fontes volumétricas. Além disso, dados meteorológicos que envolvem as variáveis associadas à origem e à magnitude do vento, à temperatura e à cobertura de nuvens foram obtidos da estação localizada no Aeroporto de Vitória (Coordenadas: -20,258;-40,286), pertencente a área de estudo, para o triênio 2016-2018 (NNDC, 2021; NOAA/ESRL, 2021). De posse destes dados, foi executado o pré-processador AERMET para preparo dos arquivos nos formatos requisitados pelo modelo de dispersão. O pré-processador AERMAP, responsável pelo processamento do terreno na região de interesse, também foi executado. A fim de se obter as elevações, utilizou-se o relevo disponível no projeto *Shuttle Radar Topography Mission*, com resolução de 90 m, para todos os receptores e fontes considerados no projeto de modelagem.

Avaliação do Coeficiente de Perigo e Risco

De posse das concentrações simuladas, os Coeficientes de Perigo (HQ) e Riscos (Risk) puderam ser determinados para os receptores polares dispostos no limite dos postos com maior e menor taxa de emissão para os raios previamente citados, conforme Eq. 3 e Eq. 4, respectivamente. Para tal, é calculada a concentração de exposição (EC), conforme Eq. 2.

$$EC = \frac{(CA\ x\ ET\ x\ EF\ x\ ED)}{AT} \qquad (2)$$

Em que:

CA é a concentração do contaminante no ar [μg/m³]; ET é o tempo de exposição [horas/dia], 8 horas/dia; EF é a frequência de exposição [dias/ano], 240 dias/ano (5 dias úteis e 4 semanas/mês); ED é a duração da exposição [anos], 25 anos e AT é tempo médio [horas] (BRASIL, 1999). Para a avaliação do risco de câncer, AT é quantificado como [expectativa de vida em anos x 365 dias/ano x 24 horas/dia], sendo a expectativa de 76,3 anos (IBGE, 2019). Por sua vez, para o cálculo do coeficiente de perigo, AT é [ED em anos x 365 dias/ano x 24 horas/dia].

$$HQ = \frac{EC}{RfC\ x\ 1000\ \mu g/mg} \qquad (3)$$

Na qual, RfC é a concentração referência de inalação [mg/m³]. O RfC é uma concentração de exposição por inalação para a qual valores iguais ou abaixo indicam que os efeitos nocivos à saúde não são propensos a ocorrer (US EPA, 2012). Para o efeito crônico de diminuição da contagem de linfócitos provocados pela exposição ao benzeno, o RfC é de $3x10^{-2}$ mg/m³ (US EPA, 2021).

$$Risk = IUR\ x\ EC \qquad (4)$$

Sendo, o Risco de Inalação Unitário (IUR) [µg/m³]$^{-1}$]. No caso do benzeno, o IUR para desenvolvimento de leucemia é $7{,}8x10^{-6}$ [µg/m³]$^{-1}$ (US EPA, 2021). A referida metodologia empregada para quantificar o coeficiente de perigo e o risco é utilizada em estudo da literatura (CHEN; CARTER, 2017). Para o HQ, há risco deletério a saúde quando supera o valor de 1. Já para o risco de câncer, exposições na faixa de 10^{-6} a 10^{-4} sugerem risco de câncer. Caso a exposição seja inferior a 10^{-6}, a chance de desenvolvimento de câncer é de 1 em 1.000.000 o que representa um risco muito baixo. Valores que superem 10^{-4} indicam riscos inaceitáveis (CHEN ;CARTER, 2017).

É importante frisar que o estudo aqui apresentado apresenta um caráter preliminar. Assim, a adoção das concentrações simuladas e dos coeficientes previamente pontuados permitem sugerir uma potencial exposição, não eximindo a necessidade de amostragem para avaliação da real exposição dos frentistas.

RESULTADOS: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO

Concentrações de Benzeno no Ar

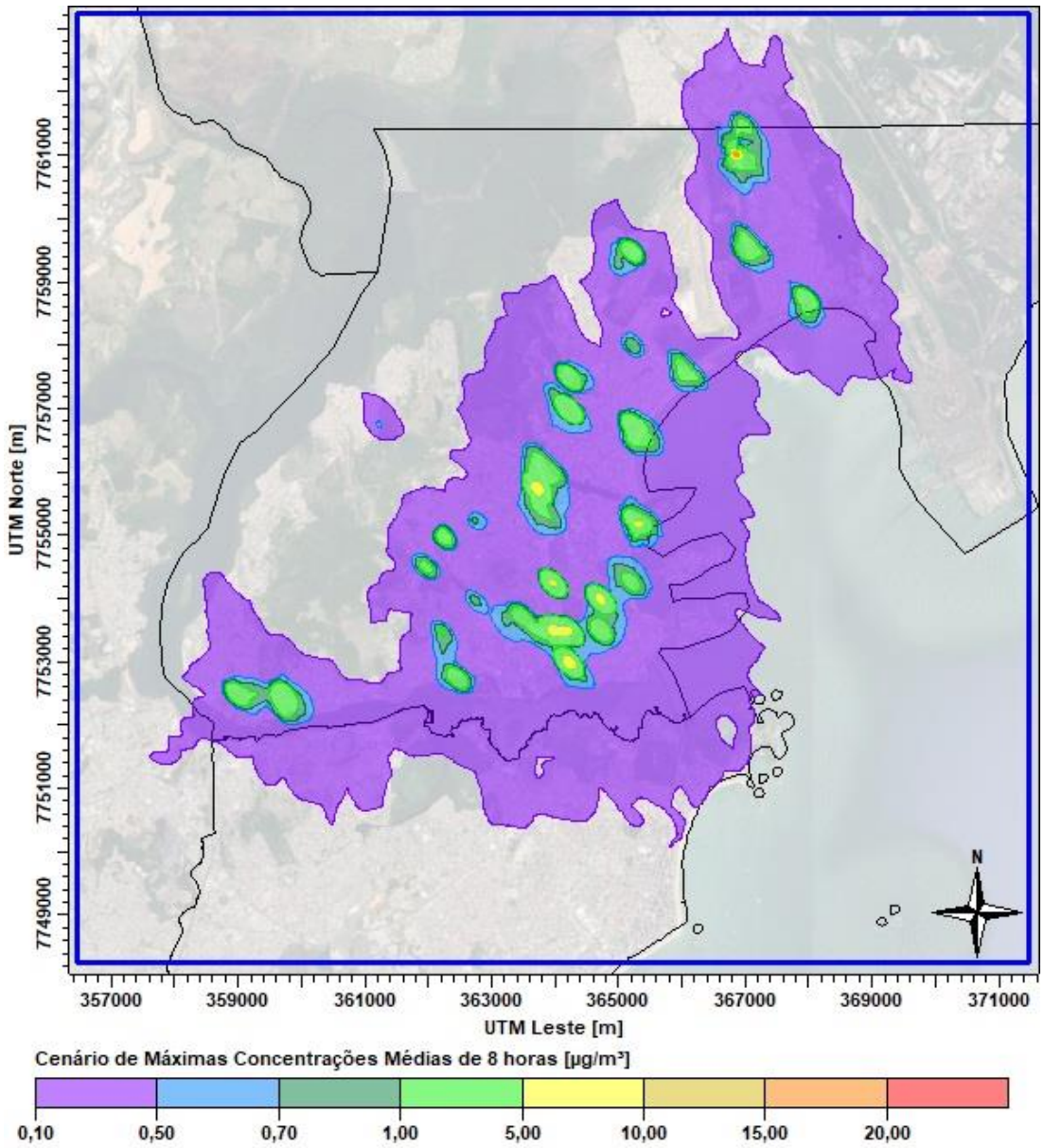
Com base na metodologia apresentada, foi estimada a taxa de emissão de benzeno para os mais de 40 postos operantes em Vitória-ES. As emissões de benzeno somente das movimentações de gasolina totalizaram 2,4831 tonelada(t)/ano. Dentre os postos avaliados,

P0023 e P0027, localizados em bairros populosos com movimentação considerável de veículos, apresentaram a menor e a maior massa emitida, respectivamente, 0,0054 t/ano e 0,1190 t/ano.

Através da simulação, as concentrações máximas médias de 8 horas ao longo da área de estudo tenderam a magnitude de 0,10 a 0,50 µg/m³, conforme Figura 2. Os 10 maiores valores encontrados na grade cartesiana variaram de 7,22 a 5,79 µg/m³, todos sobre o receptor (X: 363.720m, Y: 7.755.738m), o qual está próximo do P0027.

Já para a série de médias, 1,30 µg/m³ representa a maior concentração encontrada. Tanto na série de médias quanto de máximas, valores acima de 1 µg/m³ ocorrem em pequenas porções da área considerada na análise. Em ambas as séries, 50% dos valores simulados encontram-se abaixo de 0,1 µg/m³. Além disso, tanto na série de máximas quanto de médias, os valores simulados não apresentam magnitude similar as concentrações médias ponderadas no tempo (Jornada de 8h por dia ou 40 horas por semana) (TWA), por ao menos um dos órgãos de referência como Administração de Segurança e Saúde Ocupacional (OSHA), Conferência Americana Governamental dos Higienistas Industriais (ACGIH) ou Instituto Nacional para Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH) (Tabela 1).

Figura 2. Cenário de Máximas Concentrações Médias de 8 horas de Benzeno [µg/m³] para a área de estudo (linha azul).



Fonte: AERMOD View™.

Tabela 1 – Limites de exposição ocupacional ao benzeno.

Órgão	TWA [ppm]	TWA [$\mu g/m^3$]
OSHA	1,0	3.194,68
ACGIH	0,5	1.597,34
NIOSH	0,1	319,47

Fonte: Adaptado de FUNDACENTRO (2016).

Por sua vez, as concentrações simuladas no entorno do P0023 decrescem significativamente do raio de 2m para 50m. Na série de máximas, os maiores valores simulados decaem de 4,24 para 0,53 µg/m³. Ainda, os percentis 99 da série citada nos raios de 2m, 5m e 10 m, 3,28 µg/m³, 2,50 µg/m³ e 1,65 µg/m³, respectivamente, indicam que um indivíduo exposto ao longo de sua vida a estas concentrações tem uma chance em 100.000 de desenvolver câncer como um resultado direto desta exposição contínua via inalação (US EPA, 2012).

Semelhantemente, os resultados simulados para o entorno do P0027 também decrescem em magnitude à proporção que se aumenta a distância em relação ao mesmo. No que tange as séries das médias das concentrações de 8 horas, os resultados simulados mantem-se acima de 1,00 µg/m³ até o raio de 50 m. Quanto às mínimas, o Percentil 99º (P99) atinge valores superiores a 1,50 µg/m³ até a distância de 20 m. No que diz respeito à série de máximas, a maior concentração de benzeno para o triênio modelado foi de 23,24 µg/m³ e de 21,33 µg/m³ para os raios de 2 m e 5 m, respectivamente. Ainda, a série de máximas para os raios de 2 a 20m chegam a atingir valores que ultrapassam 14,00 µg/m³. Com relação às médias, os maiores valores superam 3,00 µg/m³. Já entre as séries de mínimas, as maiores concentrações ultrapassam 2,00 µg/m³. No que diz respeito aos raios de 50 m a 180 m, as séries de mínimas e médias, independentemente da distância, não chegam a atingir concentrações na ordem de 1,50 µg/m³. Por sua vez, a série de máximas apresentam valores entre 0,3 µg/m³, para o percentil 50 (P50), e 7,87 µg/m³, para o maior valor.

Os valores encontrados para os raios de 2 a 20m, especialmente, para a série de máximas corroboram com estudos realizados em postos de combustíveis no Brasil que empregaram o monitoramento de benzeno no ar dos arredores das bombas de combustíveis.

Estes encontraram valores médios de magnitude de 14,85 µg/m^3 (± 9,85) e de 29,7 µg/m^3 (±19,7) (AMARAL *et al.*, 2019, CORREA *et al.*, 2017).

Todavia, há trabalhos na literatura que apresentam concentrações medidas que superaram os resultados encontrados neste estudo (CRUZ *et al.*, 2017; EDOKPOLO *et al.*, 2014; ESMAELNEJAD, 2017). A diferença pode ocorrer devido à sinergia das fontes emissoras de benzeno existentes na região de monitoramento, as quais englobam não somente as movimentações de gasolina que compõem o escopo deste trabalho.

Por fim, as máximas concentrações de benzeno encontradas nesta pesquisa para os raios de 2 a 20m no entorno do P0027 que variaram de 14,45 a 23,24 µg/m^3 expressam um potencial para o desenvolvimento de câncer visto que, segundo critério da US EPA, a exposição contínua ao benzeno em concentrações na faixa de 13 a 45 µg/m^3, aumentará as chances de desenvolver câncer para 1 em 10.000 (US EPA, 2012).

Ainda, destaca-se que o modelo AERMOD não considera o efeito de *building downwash* para fontes volumétricas, as quais foram as consideradas para representar os postos de combustíveis. Logo, esse efeito na microescala foi negligenciado nesta modelagem.

Coeficientes de Perigo e Risco de Câncer

Conforme a Tabela 2, os resultados dos HQs para as séries de mínimas, médias e máximas indicaram valores abaixo de 1, o qual indica risco negligenciável (efeitos nocivos à saúde não são propensos a ocorrer) dado que o coeficiente se encontra abaixo do valor de referência (RfC). Todavia, o cálculo desenvolvido para este estudo é associado exclusivamente ao efeito crônico de diminuição da contagem de linfócitos. Portanto, não é descartada a possibilidade de efeitos agudos. Além disso, o Rfc não é um indicador direto do risco, sendo considerado como um ponto de referência para avaliar os potenciais efeitos (US EPA, 2012). Adiciona-se ainda que o presente estudo contemplou exclusivamente as emissões de benzeno por meio das atividades operacionais com a gasolina. No entanto, outras fontes emissoras podem presentes nos postos ou em seus arredores imediatos, como escapamento de veículos, que tem o potencial de emitir benzeno, aumentando a concentração passível de inalação pelo frentista.

No que tange o desenvolvimento de câncer, os riscos simulados para o posto P0023 somente para a série de máximas apontam a possibilidade de manifestação de câncer para os receptores localizados em até 10m do limite do posto.

Com relação ao posto P0027, os riscos associados às concentrações das séries de mínimas e médias sugerem a possibilidade de ocorrência de câncer para os raios de 2 a 20m. Já, para a série de máximas, as concentrações de exposição indicaram que há a probabilidade dos receptores desenvolveram leucemia mesmo para a distância de 180 m. No entanto, para as distâncias de 150 e 180m, a indicação do risco, para a faixa de 10^{-6} a 10^{-4}, é exclusivamente associada à máxima concentração encontrada na série. Esta possui frequência de ocorrência muito baixa que é confirmada pela inexistência de risco significativo relacionado à concentração de exposição do percentil 99, para as distâncias mencionadas.

Os valores obtidos para o risco devem ser analisados com cautela, pois erros em decorrência das hipóteses simplificadoras utilizadas no algoritmo do modelo são passíveis de ocorrer, visto que as concentrações são obtidas através de simulação. Ainda, os riscos estimados para ambos os postos, em sua maioria, possuem magnitude próxima do limite mínimo (10^{-6}) o qual indica baixa probabilidade de ocorrência (1 em 1.000.000).

Por fim, é importante salientar que a probabilidade do efeito carcinogênico é associada à inalação contínua de benzeno a uma dada concentração. Portanto, os colaboradores que praticam suas atividades na região onde as maiores concentrações tendem a ocorrer e por um longo período de tempo da sua vida laboral, apresentam possibilidade de desenvolver câncer, particularmente leucemia, que pode ser minimizada caso medidas sejam adotadas, como o distanciamento do veículo durante o abastecimento e a instalação de sistema de recuperação de vapores, este último já previsto no Anexo 2 da Norma Regulamentadora (NR) Nº 9.

Tabela 2 – Coeficientes de perigo e riscos de câncer para os distintos raios no entorno do P0023 e P0027 para as séries de concentrações mínimas, médias e máximas.

Raio [m]	Parâmetros Estatísticos associados às Concentrações	HQ para P0023			HQ para P0027			Risco para P0023			Risco para P0027		
		Min	Med	Máx	Min	Med	Máx	Min	Med	Máx	Min	Med	Máx
2	P50	1,0E-03	2,3E-03	6,7E-03	5,0E-03	1,3E-02	3,8E-02	8,0E-08	1,8E-07	5,1E-07	3,8E-07	9,7E-07	**2,9E-06**
	P99	6,0E-03	8,5E-03	2,4E-02	2,9E-02	4,2E-02	1,3E-01	4,6E-07	6,5E-07	**1,8E-06**	**2,2E-06**	**3,3E-06**	**1,0E-05**
	Máxima	7,8E-03	9,7E-03	3,1E-02	3,7E-02	5,0E-02	1,7E-01	6,0E-07	7,4E-07	**2,4E-06**	**2,9E-06**	**3,8E-06**	**1,3E-05**
5	P50	6,8E-04	1,6E-03	5,0E-03	4,1E-03	1,1E-02	3,3E-02	5,2E-08	1,2E-07	3,8E-07	3,2E-07	8,2E-07	**2,6E-06**
	P99	4,0E-03	5,8E-03	1,8E-02	2,4E-02	3,6E-02	1,2E-01	3,0E-07	4,4E-07	**1,4E-06**	**1,9E-06**	**2,8E-06**	**9,0E-06**
	Máxima	5,2E-03	6,5E-03	2,5E-02	3,2E-02	4,2E-02	1,6E-01	4,0E-07	5,0E-07	**1,9E-06**	**2,4E-06**	**3,2E-06**	**1,2E-05**
10	P50	4,0E-04	9,8E-04	3,4E-03	3,1E-03	8,4E-03	2,8E-02	3,0E-08	7,5E-08	2,6E-07	2,4E-07	6,4E-07	**2,1E-06**
	P99	2,4E-03	3,5E-03	1,2E-02	1,9E-02	2,8E-02	1,0E-01	1,8E-07	2,7E-07	9,3E-07	**1,5E-06**	**2,2E-06**	**7,6E-06**
	Máxima	3,1E-03	4,0E-03	1,7E-02	2,5E-02	3,3E-02	1,4E-01	2,4E-07	3,0E-07	**1,3E-06**	**1,9E-06**	**2,5E-06**	**1,0E-05**
20	P50	1,1E-04	5,0E-04	1,9E-03	2,0E-03	5,7E-03	2,0E-02	8,2E-09	3,8E-08	1,5E-07	1,5E-07	4,4E-07	**1,5E-06**
	P99	6,8E-04	1,7E-03	7,1E-03	1,3E-02	1,9E-02	7,4E-02	5,2E-08	1,3E-07	5,4E-07	9,8E-07	**1,4E-06**	**5,7E-06**
	Máxima	1,2E-03	1,9E-03	9,9E-03	1,7E-02	2,2E-02	1,1E-01	8,9E-08	1,5E-07	7,6E-07	**1,3E-06**	**1,7E-06**	**8,1E-06**
50	P50	2,0E-05	1,5E-04	6,6E-04	7,8E-04	2,5E-03	9,9E-03	1,5E-09	1,2E-08	5,1E-08	6,0E-08	1,9E-07	7,6E-07
	P99	1,3E-04	4,8E-04	2,6E-03	5,5E-03	8,1E-03	3,9E-02	9,7E-09	3,7E-08	2,0E-07	4,2E-07	6,2E-07	**3,0E-06**
	Máxima	2,2E-04	5,8E-04	3,9E-03	7,2E-03	9,5E-03	5,7E-02	1,7E-08	4,4E-08	3,0E-07	5,5E-07	7,2E-07	**4,4E-06**
80	P50	7,8E-06	7,5E-05	3,4E-04	4,2E-04	1,5E-03	6,0E-03	6,0E-10	5,8E-09	2,6E-08	3,2E-08	1,1E-07	4,6E-07
	P99	5,1E-05	2,4E-04	1,5E-03	3,1E-03	4,6E-03	2,5E-02	3,9E-09	1,8E-08	1,1E-07	2,4E-07	3,5E-07	**1,9E-06**
	Máxima	9,2E-05	2,9E-04	2,2E-03	4,1E-03	1,6E-01	3,7E-02	7,1E-09	2,2E-08	1,7E-07	3,1E-07	4,1E-07	**2,8E-06**
120	P50	4,7E-06	4,1E-05	2,0E-04	1,9E-04	8,4E-04	3,7E-03	3,6E-10	3,1E-09	1,5E-08	1,4E-08	6,5E-08	2,8E-07
	P99	3,2E-05	1,3E-04	8,5E-04	1,4E-03	2,7E-03	1,6E-02	2,5E-09	1,0E-08	6,5E-08	1,1E-07	2,0E-07	**1,2E-06**
	Máxima	5,9E-05	1,6E-04	1,3E-03	2,3E-03	3,1E-03	2,3E-02	4,5E-09	1,2E-08	9,6E-08	1,8E-07	2,4E-07	**1,8E-06**
150	P50	3,4E-06	3,0E-05	1,5E-04	1,3E-04	6,1E-04	2,8E-03	2,6E-10	2,3E-09	1,1E-08	1,0E-08	4,7E-08	2,1E-07
	P99	2,6E-05	9,4E-05	6,3E-04	1,0E-03	1,9E-03	1,2E-02	2,0E-09	7,2E-09	4,8E-08	7,6E-08	1,5E-07	9,0E-07
	Máxima	4,6E-05	1,1E-04	9,1E-04	1,7E-03	2,2E-03	1,7E-02	3,6E-09	8,7E-09	7,0E-08	1,3E-07	1,7E-07	**1,3E-06**
180	P50	2,4E-06	2,3E-05	1,1E-04	8,5E-05	4,6E-04	2,2E-03	1,8E-10	1,8E-09	8,7E-09	6,5E-09	3,6E-08	1,7E-07
	P99	2,2E-05	7,2E-05	4,8E-04	6,7E-04	1,5E-03	9,8E-03	1,7E-09	5,5E-09	3,7E-08	5,1E-08	1,1E-07	7,5E-07
	Máxima	3,4E-05	8,5E-05	7,0E-04	9,3E-04	1,8E-03	1,4E-02	2,6E-09	6,5E-09	5,4E-08	7,1E-08	1,4E-07	**1,0E-06**

Fonte: Elaborado pelo autor.

CONCLUSÃO

O presente estudo investigou, em caráter preliminar, os riscos ocupacionais potencialmente associados à inalação de benzeno por frentistas nos postos de Vitória-ES durante as operações de reabastecimento de veículos e do tanque subterrâneo. Dentre cerca de 40 postos avaliados, P0023 e P0027 apresentaram a menor e a maior taxa de emissão de benzeno, respectivamente, 0,0054 t/ano e 0,1190 t/ano, as quais foram determinadas através de fator de emissão. Por meio de modelagem computacional com o AERMOD View™ foram verificadas as concentrações de benzeno no ar, especialmente, nos arredores dos postos previamente citados. Foram detectados valores, especialmente para a série de máximas que podem sugerir preliminarmente a probabilidade de câncer. Com a verificação do HQ, foi determinado risco negligenciável, levando-se em consideração o efeito crônico de diminuição da contagem de linfócitos. Entretanto, não é descartada a probabilidade de efeitos agudos tendo em vista que outras fontes emissoras de benzeno podem estar presentes nos postos ou em seus arredores, mas não foram contempladas neste estudo.

Na investigação para analisar o risco de desenvolvimento de câncer, os resultados inferiram que pode haver uma probabilidade dos frentistas apresentarem leucemia, particularmente, no entorno do posto P0027. Todavia, os riscos estimados, em sua maioria, mantiveram-se próximo a 10^{-6} o qual representa o limite mínimo, abaixo do qual a probabilidade de desenvolvimento de câncer é de 1 em 1.000.000, classificada como baixa e subordinada a uma exposição contínua e por um longo período da vida laboral do colaborador.

Vale reiterar que o trabalho aqui apresentado é preliminar uma vez que o modelo de dispersão apresenta limitações as quais podem influenciar os resultados exibidos neste documento. Sendo assim, sugere-se monitoramentos na região de Vitória/ES com métodos descritos em normas nacionais ou internacionais a fim de determinar com maior precisão o grau de exposição ocupacional dos frentistas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADMINISTRAÇÃO OCEÂNICA E ATMOSFÉRICA NACIONAL. NNDC Climate Data Online. Disponível em: <https://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdopoemain.cmd?datasetabbv=DS3505&countryabbv=&georegionabbv=&resolution=40>. Acesso em: 22 mar. 2021.

ADMINISTRAÇÃO OCEÂNICA E ATMOSFÉRICA NACIONAL. NOAA/ESRL Radiosonde Database. Disponível em: <https://ruc.noaa.gov/raobs/>. Acesso em: 22 mar. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Consulta Posto Web. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/distribuicao-e-revenda/revendedor/combustiveis-automotivos-1/consulta-posto-web>. Acesso em: 14 mar. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Dados Estatísticos. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>. Acesso em: 14 mar. 2021.

AMARAL, I. C.; CARVALHO, L. V. B.; SANTOS, M. V.; VALENTE, D.; PEREIRA, A. C.; FIGUEIREDO, V. O.; SOUZA, J. M.; CASTRO, V. S.; TRANCOSO, M. F.; FONSECA, S. A.; MILAGRES, V. G.; MENDES, M. P. R.; PAIVA, M. J.; ANDRÉ, L. C.; BORGES, R. M.; MENEZES, A. C.; ALVES, S. R.; GONÇALVES, E. S.; ARY, S.; PERINI, J. A. Environmental Assessment and Evaluation of Oxidative Stress and Genotoxicity Biomarkers Related to Chronic Occupational Exposure to Benzene. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. Disponível em: < https://doi.org/10.3390/ijerph16122240>. Acesso em 13 ago. 2022.

BRASIL. Decreto Nº 3.048 de 6 de maio de 1999. Aprova o Regulamento da Previdência Social, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1999.

BRASIL. Portaria Nº 871 de 06 de julho de 2017. Altera a redação do subitem 12.1.1 do Anexo 2 – Exposição Ocupacional ao Benzeno em Postos Revendedores de Combustíveis - PRC - da Norma Regulamentadora n.º 9 -

Programa de Prevenção de Riscos Ambientais - PPRA.Brasília, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/norma-regulamentadora-no-9-nr-9>. Acesso em: 08 jan. 2023.

BRASIL. Portaria Nº 1.109 de 21 de setembro de 2016. Aprova o Anexo 2 - Exposição Ocupacional ao Benzeno em Postos Revendedores de Combustíveis - PRC - da Norma Regulamentadora n.º 9 - Programa de Prevenção de Riscos Ambientais - PPRA. Brasília, 2016. Disponível em: <https://www.trt2.jus.br/geral/tribunal2/ORGAOS/MTE/Portaria/P1109_16.html> . Acesso em: 24 maio 2021.

CAMPOS, Adriana Guerra. Análise da Atividade do Frentista diante do Perigo da Exposição ao Benzeno. 2017. 94f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Saúde Pública) – Instituto Aggeu Magalhães, Fundação Oswaldo Cruz, Recife, 2017.

CAMPOS, M.A.A.; FERNANDES, A.P.S.M.; ANDRÉ, L.C. Avaliação da Exposição Ocupacional ao Benzeno em Trabalhadores Frentistas e Analistas de Combustíveis utilizando o Teste Cometa como Biomarcador de Genotoxicidade. Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, v. 42. 2017. Disponível em: < https://doi.org/10.1590/2317-6369000118415>. Acesso em 12 ago. 2022.

CHEN, H.; CARTER, K. E. Modeling Potential Occupational Inhalation Exposures and Associated Risks of Toxic Organics from Chemical Storage Tanks used in Hydraulic Fracturing using AERMOD. Environmental Pollution, p. 1-10. 2017. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.02.008>. Acesso em: 15 mar 2022.

CORREA, M. J. M.; PINHEIRO, R. C.; CARVALHO, L. V. B.; MENEZES, M. A. C.; NUSSBAUMER, L.; JACOBINA, A. J. R.; NOBRE, L. C. C.; Roteiro de Inspeção Sanitária de Ambientes e Processos de Trabalho em Postos de Revenda de Combustíveis: Análise de Usos e Aplicações no Estado de Santa Catarina. Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, v. 42. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2317-6369000127315>. Acesso em 16 ago. 2022.

CRUZ, L. P. S.; ALVES, L. P.; SANTOS, A. V. S.; ESTEVES, M. B.; GOMES, I. V. S.; NUNES, L. S. S. Assessment of BTEX Concentrations in Air Ambient of Gas Stations Using Passive Sampling and the Health Risks for Workers. Journal of Environmental Protection, v. 8, p. 12-25. 2017. Disponível em: < https://www.scirp.org/pdf/JEP_2017011015383011.pdf>. Acesso em 16 jul. 2022.

D'ALASCIO, R. G.; MENEGALI, M.; BORNELLI, A. S.; MAGAJEWSKI, F. Sintomas Relacionados à Exposição Ocupacional ao Benzeno e Hábitos Ocupacionais em Trabalhadores de Postos de Revena de Combustíveis a Varejo na Região Sul de Santa Catarina. Revista Brasileira de Medicina no Trabalho, v. 12, p. 21-29. 2014. Disponível em: < https://cdn.publisher.gn1.link/rbmt.org.br/pdf/v12n1a04.pdf >. Acesso em: 10 jan. 2022.

EDOKPOLO, B.; YU, Q. J.; CONNELL, D. Health Risk Assessment of Ambient Air Concentrations of Benzene, Toluene and Xylene (BTX) in Service Station Environments. International Journal of Environmental Research and Public Health, v.11, p. 6354-6374. 2014. Disponível em: < https://doi.org/10.3390/ijerph110606354> . Acesso em: 15 jun. 2022.

ESMAELNEJAD, F.; HAJIZADEH, Y.; POURZAMANI, H.; AMIN, M. M. Monitoring of Benzene, Toluene, Ethyl Benzene, and Xylene Isomers Emission from Shahreza Gas Stations in 2013. International Journal of Environmental Health Engineering,v.4. 2017. Disponível em: < https://www.ijehe.org/text.asp?2015/4/1/17/157716>. Acesso em: 14 fev. 2022.
expectativa-de-vida-dos-brasileiros-aumenta-para-76-3-anos-em-2018>. Acesso em: 04 abr. 2021.

FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO. Benzeno: Experiências Nacionais e Internacionais. São Paulo, 2016. Disponível em: < http://arquivosbiblioteca.fundacentro.gov.br/exlibris/aleph/a23_1/apache_media/B7QRKFX3DF3NELGQJCLLETV9S25F79.pdf >. Acesso em 08 jan. 2023.

FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO. Efeitos da Exposição ao Benzeno para a Saúde. São Paulo, 2012. Disponível em: <

https://renastonline.ensp.fiocruz.br/sites/default/files/arquivos/recursos/Efeitos_do_Benzeno.pdf>. Acessado em 22 ago. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Agência IBGE Notícias. 2019. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/26103-

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sistema IBGE de Recuperação Automática: Pesquisa de Orçamentos Familiares. 2008. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/2645#resultado>. Acesso em: 04 abr. 2021.

LAKES ENVIORONMENTAL CONSULTANTS INC. AERMOD View™. Disponível em: <https://www.weblakes.com/products/aermod/index.html>. Acesso em 22 jun. 2021.

SEKAR, A.; VARGHESE, G. K; VARMA, M. K. R. Analysis of Benzene Air Quality Standards, Monitoring Methods and Concentrations in Indoor and Outdoor Environment. Heliyon, v. 5. 2019. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02918>. Acessado em 20 jun. 2022.

SKAMVETSAKIS, A. Exposição ao Benzeno em Postos de Combustíveis: Estratégia de Ações Integradas de Vigilância em Saúde do Trabalhador na Região dos Vales/RS. Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, v. 42. 2017. Disponível em: < https://doi.org/10.1590/2317-6369000126015>. Acesso em: 05 abr. 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - US EPA. Air Quality Dispersion Modeling – Preferred and Recommended Models. 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models> Acesso em: 17 maio 2021.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - US EPA. Benzene. 2012. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/documents/benzene.pdf>. Acesso em: 20 mai 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - US EPA. Integrated Risk Information System (IRIS). 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/iris>. Acesso em: 02 maio 2021.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - US EPA. Locating and Estimating Air Emissions for Benzene. 2018. Disponível em:<https://www3.epa.gov/ttn/chief/le/benzene_pt2.pdf> . Acesso em: 14 mar. 2021.

Este trabalho está licenciado com uma Licença Creative Commons - Atribuição 4.0 Internacional.