



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE MEDICINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SAÚDE E  
DESENVOLVIMENTO NA REGIÃO CENTRO-OESTE



MARCELO SAMPAIO OCAMPOS

**AVALIAÇÃO DO RISCO PARA A SAÚDE DE BOMBEIROS EXPOSTOS AO  
FUMO DA QUEIMA DE LENHA E CARVÃO DURANTE INCÊNDIOS  
FLORESTAIS**

CAMPO GRANDE

2024

MARCELO SAMPAIO OCAMPOS

**AVALIAÇÃO DO RISCO PARA A SAÚDE DE BOMBEIROS EXPOSTOS AO  
FUMO DA QUEIMA DE LENHA E CARVÃO DURANTE INCÊNDIOS**

**FLORESTAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saúde e Desenvolvimento na Região Centro-Oeste, Faculdade de Medicina da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Saúde e Desenvolvimento na Região Centro-Oeste. Linha de pesquisa: Tecnologia em saúde.

Orientador: Prof. Dr. Valter Aragão do Nascimento

CAMPO GRANDE

2024

## RESUMO

Nos últimos anos os incêndios florestais têm se tornado uma preocupação inerente as administrações públicas brasileiras, uma vez que a fumaça gerada tem um importante impacto sobre a saúde das populações expostas. Os bombeiros estão constantemente expostos ao material particulado e a várias substâncias químicas liberadas durante os incêndios florestais ou urbanos, incluindo o aumento dos níveis de metais pesados após a ocorrência do incêndio. Embora os riscos dessa exposição sejam conhecidos e verificáveis em profissionais expostos a médio e longo prazo, é necessário um melhor entendimento dos níveis de exposição aos vários tipos de metais pesados e metalóides. Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi realizar uma estimativa das concentrações de metais tóxicos a que estão expostos os bombeiros no combate aos incêndios florestais e estruturais. Para este estudo foram consideradas as rotas de exposição cutânea, inalação e ingestão das fumaças de madeira de eucalipto (*Eucalypto citriodora*), madeira de mutamba (*Guazuma ulmifolia*), madeira de angico (*Anadenanthera falcata*), madeira de *Eucalypto* tratada quimicamente com Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), carvão de (*Eucalypto citriodora*) e carvão de (*Guazuma ulmifolia*) quantificadas em tecido de coxão mole bovino e lombo suíno assados em condições controladas. As concentrações de metais (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, V e Zn) e metalóides (As) foram determinadas por espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente (ICP OES) após digestão por micro-ondas. Além disso, avaliamos o risco associado à exposição elementar através da fumaça, utilizando o quociente de perigo (HQ), índice de perigo (HI), índice de perigo total (HI<sub>t</sub>) e risco carcinogênico (CR); Todas as amostras apresentaram resultados para HQ, HI e HI < 1, não indicando risco potencial à saúde. No entanto, os riscos carcinogênicos apresentados por As e Cr pelas três vias de exposição (exceto para exposição por inalação para crianças e adultos, e por ingestão e inalação de Cr para crianças e adultos) excederam o limite padrão. Em conclusão, a exposição contínua de bombeiros ou crianças à fumaça de incêndios contendo altas concentrações de metais pesados como As e Cr pode ser prejudicial à saúde. O estudo utilizou tecidos animais, portanto, novos métodos devem ser desenvolvidos para quantificar a concentração de metais pesados depositados no tecido humano quando os seres humanos são expostos à fumaça de incêndios.

Palavras-chave: metais pesados; metalóides; Riscos de saúde; exposição profissional; bombeiros

## ABSTRACT

In recent years, forest fires have become an inherent concern for Brazilian public administrations, since the smoke generated has an important impact on the health of exposed populations. Firefighters are constantly exposed to particulate matter and various chemicals released during wildfires or urban fires, including increased levels of heavy metals after the fire occurs. Although the risks of this exposure are known and verifiable in professionals exposed in the medium and long term, a better understanding of the levels of exposure to the various types of heavy metals and metalloids is needed. Given the above, the objective of this study was to estimate the concentrations of toxic metals to which firefighters are exposed in the fight against forest and structural fires. For this study, the routes of skin exposure, inhalation and ingestion of eucalyptus wood (*Eucalyptus citriodora*), mutamba wood (*Guazuma ulmifolia*), angico wood (*Anadenanthera falcata*), firewood of *Eucalyptus* chemically treated with Chromated Copper Arsenate (CCA), charcoal of (*Eucalyptus citriodora*) and charcoal of (*Guazuma ulmifolia*) quantified in the raw muscle of bovine beef topside and pork loin roasted under controlled conditions. The concentrations of metals (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, V and Zn) and metalloids (As) were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP OES) after microwave digestion. In addition, we assessed the risk associated with elemental exposure through smoke using the hazard quotient (HQ), hazard index (HI), total hazard index (HI<sub>t</sub>) and carcinogenic risk (CR); All samples had results for HQ, HI and HI < 1, indicating a non-potential health risk. However, the carcinogenic risks posed by As and Cr via the three exposure pathways (except for inhalation exposure to children and adults, and by Cr via ingestion and inhalation for children and adults) exceeded the standard threshold. In conclusion, continuous exposure of firefighters or children to smoke from fires containing high concentrations of heavy metals such as As and Cr can be harmful to health. The study used animal tissues, thus, new methods must be developed to quantify the concentration of heavy metals deposited in human tissue when humans are exposed to smoke from fires.

Keywords: heavy metals; metalloids; health risks; occupational exposure; firefighters

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Grupos e especificações das amostras.....	33
<b>Tabela 2.</b> Condições de funcionamento para o sistema de digestão por micro-ondas...	35
<b>Tabela 3.</b> Parâmetros operacionais da determinação de elementos pelo ICP OES.....	35
<b>Tabela 4.</b> Teste de adição e recuperação (Spike) dos analitos.....	36
<b>Table 5.</b> Parâmetros analíticos para a técnica de ICP OES; equação de calibração ( $y=ax+b$ )*, coeficiente de determinação ( $R^2$ ), limite de detecção (LOD) e limite de quantificação (LOQ).....	37
<b>Tabela 6.</b> Concentração de elementos químicos obtida pela diferença entre carnes assadas menos carnes cruas.....	45
<b>Tabela 7.</b> Valores do quociente de risco (HQ) para (Al, As, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, V e Zn) em crianças expostas a fumaça de incêndio por Ingestão, Dérmica e Inalação.....	59
<b>Tabela 8.</b> Valores do quociente de risco (HQ) para (Al, As, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, V e Zn) em adultos expostos a fumaça de incêndio por Ingestão, Dérmica e Inalação.....	63
<b>Tabela 9.</b> Valores de HI para riscos não carcinogênico e HI <sub>t</sub> (integrados por via de exposição e total agregado).....	67
<b>Tabela 10.</b> Riscos cancerígenos de cada elemento para crianças e adultos por ingestão, exposição, dérmica e inalação.....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Fator de absorção dérmica
AF	Fator de aderência da pele
ANOVA	Análise de variância
Anvisa	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
AT	Tempo médio
ATP	Trifosfato de Adenosina
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry (Agência de Registro de Substâncias Tóxicas e Doenças)
CCA	Chromated Copper Arsenate (Arseniato de Cobre Cromatado)
CDIing	Calculo de ingestão diária de produtos químicos
CR	Calculo de risco carcinogênico
DADderm	Calculo de dose dérmica absorvida de oligoelementos em partículas aderidas à pele exposta
Dinh	Calculo de inalação de partículas ressuspensas pela boca e nariz
DNA	Ácido Desoxirribonucléico
ED	Duração da exposição
EF	Frequência de exposição
EFSA	European Food Safety Authority (Autoridade Europeia para a Segurança dos Alimentos)
ELA	Esclerose Lateral Amiotrófica
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura)
FAOSTAT	Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database (Banco de dados estatísticos corporativos da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura)
FAMED	Faculdade de Medicina
GIABS	Fator de absorção gastrointestinal
GEE	Gases de efeito estufa

HBGVs	Health-Based Guidance Values (Guia de Valores de Orientação Baseados na Saúde)
HI	Hazard Index (Índice de perigo)
HI <sub>t</sub>	Total Hazard Index (Índice de Risco Total)
HPAs	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos)
HQ	Hazard Quotient (Quociente de risco)
IARC	International Agency for Research on Cancer (Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer)
ICP OES	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (Espectrômetria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado)
IngR	Taxa de ingestão
InhR	Taxa de inalação
IOM	Institute of Medicine (Instituto de Medicina norte-americano)
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry (União Internacional de Química Pura e Aplicada)
LOD	Limite de Detecção
LOQ	Limite de Quantificação
NHANES	National Health and Nutrition Examination Survey (Pesquisa Nacional de Saúde e Nutrição)
OMS	Organização Mundial de Saúde (World Health Organization)
PEF	Fator de emissão de partículas
RfCi	Concentração de referência para inalação
RfDo	Reference Dose for Oral Exposure (Dose de Referência para Exposição Oral)
RSLs	Regional Screening Levels (Níveis Regionais de Triagem)
SF	Fator de inclinação
UE	União Europeia (European Union)
USEPA	United States Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)
WHO	World Health Organization (Organização Mundial de Saúde)

## LISTA DE SIMBOLOS

Ag	Prata
Al	Alumínio
As	Arsênio
Au	Ouro
B	Boro
bar	Bar
Be	Berílio
C	Concentração média de metal em amostras de carne
Ca	Cálcio
Cd	Cádmio
CF	Fator de escala
CH <sub>4</sub>	Metano
Cl	Cloro
cm	Centímetro
cm <sup>2</sup>	Centímetro quadrado
Co	Cobalto
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
Cr	Cromo
Cu	Cobre
dL	Decilitro
Fe	Ferro
g	Gramma
°C	Grau centígrado
H	Hidrogênio
Hg	Mercúrio
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peróxido de hidrogênio
HPAs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogênio



K	Potássio
kg	Quilograma
L	Litro
Mg	Magnésio
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
µg	Micrograma
mg	Miligrama
mL	Mililitro
mm	Milímetro
Mn	Manganês
min	Minuto
Mo	Molibdênio
Na	Sódio
ng	Nanograma
NH <sub>3</sub>	Amônia
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
Ni	Níquel
nm	Nanômetro
O	Oxigênio
P	Fósforo
Pb	Chumbo
PC	Peso corporal
pH	Potencial hidrogeniônico
%	Porcentagem
PM	Material particulado
Rb	Rubídio
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação
λ	Comprimento de onda
rpm	Rotação por minuto
s	Segundo
SA	Área da superfície da pele
Se	Selênio

V	Vanádio
W	Watt
Zn	Zinco

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Poluição do ar .....	17
2.2 Incêndios.....	18
2.3 Os combustíveis sólidos e os riscos da queima de biomassa .....	19
2.4 Elementos metálicos na fumaça .....	21
2.5 Doenças causadas pela inalação, absorção e ingestão de poeira e fumos .....	24
2.6 Cálculos para a avaliação de risco à saúde humana .....	27
3. OBJETIVOS.....	30
3.1 Objetivo geral .....	30
3.2 Objetivos específicos .....	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	31
4.1 Aquisição amostras e delineamento do estudo.....	31
4.2 Preparo das amostras cruas e assadas .....	32
4.3 Justificativa para a escolha de amostras de tecidos biológicos para a captação das fumaças.....	33
4.4 Processo de digestão ácida: abertura .....	34

4.5	Análise elementar de macro e microminerais.....	35
4.6	Análise da avaliação de risco humano.....	38
4.7	Análise estatística .....	41
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
5.1	Concentração de macro e micro elementos em fumaças de incêndio florestal e estrutural .....	42
5.2	Avaliação de Risco à Saúde Humana .....	56
6.	CONCLUSÃO .....	71
7.	REFERÊNCIAS .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

Na última década a incidência de incêndios florestais no Brasil aumentou vertiginosamente, e desde 2019, com magnitude sem precedentes na Amazônia e no Pantanal (CORREA et al., 2022). Além das consequências dos incêndios florestais envolvendo áreas queimadas e animais mortos, há a poluição decorrente da fumaça que tem impacto direto na saúde da população e principalmente dos bombeiros que trabalham diariamente no combate aos incêndios. De fato, a exposição a fumaça causa aumento da mortalidade, internações hospitalares e atendimentos de emergência devido a doenças respiratórias e cardiovasculares, bem como redução da função pulmonar (SOUZA et al., 2021).

Exposição a monóxido de carbono (CO), amônia (NH<sub>3</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), bem como material particulado inalável (PM), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPAs), benzeno e acroleína pode causar dificuldades respiratórias, exaustão, tonturas e outros sintomas semelhantes aos da gripe. Além disso, existe o risco de exposição a certos metais pesados e metaloides, como cádmio, chumbo, cobalto, cromo, molibdênio, níquel, arsênio, entre outros elementos (BARROS; OLIVEIRA; MORAIS, 2021a; FABIAN et al., 2014).

O risco ocupacional a que os bombeiros estão expostos diariamente é conhecido há muito tempo - estresse, fadiga, lesões emocionais e físicas -, porém, devido às emissões de fumaça, essa categoria de profissionais também apresenta inúmeros casos de doenças crônicas, câncer, aumento de morbidade cardiopulmonar e mortalidade (ADETONA et al., 2017; CHOI et al., 2014; JALILIAN et al., 2019).

Isso se deve ao fato de que tanto incêndios florestais, estruturais, de veículos, quanto outros incêndios produzem fumaça a partir da combustão incompleta de diferentes itens, e concorda-se que essa fumaça contém uma variedade de compostos inseguros para os seres humanos (BARROS; OLIVEIRA; MORAIS, 2021b; IARC, 2022b). De acordo com o programa de Monografias da Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer

(IARC), essa mistura de substâncias pode incluir muitos agentes já classificados como carcinógenos conhecidos (Grupo 1), prováveis (Grupo 2A) ou possíveis (Grupo 2B), incluindo metais pesados (DEMERS et al., 2022; IARC, 2022a).

O mais recente relatório da IARC de 1 de julho de 2022 alterou a classificação de combate a incêndios de possível (Grupo 2B) para cancerígeno para humanos (Grupo 1) (IARC, 2022a), corroborando com vários estudos que observaram uma maior incidência de câncer e/ou risco de mortalidade entre bombeiros (DEMERS et al., 2022; JALILIAN et al., 2019; SOTERIADES et al., 2019). Porém, apesar dos riscos, o uso de equipamentos de proteção individual no combate a incêndios muitas vezes é inviabilizado ou ignorado, principalmente em casos de incêndios florestais (BARROS; OLIVEIRA; MORAIS, 2021b). Este é um agravante de extrema importância, pois os bombeiros estão expostos a metais e outros produtos perigosos não apenas por inalação, mas também predominantemente por contato dérmico, além da ingestão e contato com superfícies contaminadas (BARROS; OLIVEIRA; MORAIS, 2021b; IARC, 2022a), o que se agrava na falta de equipamentos de proteção.

De acordo com estudo de Ma e colaboradores (2006) sobre a incidência de câncer entre as mulheres bombeiras da Flórida mostrou um risco significativamente elevado de vários tipos de cânceres, bem como a doença do linfoma de Hodgkin, câncer de tireóide e cervical, em comparação com a população em geral. De fato, os bombeiros são suscetíveis a constituintes perigosos pela inalação de vários níveis de partículas contendo metais. Quase 70% das partículas de fumaça liberadas durante um incêndio florestal são consideradas partículas ultrafinas, pequenas o suficiente para serem inaladas para os pulmões e translocadas para praticamente todos os órgãos (GAGAS, 2015). Essas partículas ultrafinas são a causa mais provável da febre dos fumos metálicos, uma doença da inflamação pulmonar, embora a exposição seja comumente atribuída à soldagem, estudos também mostraram que a combustão de biomassa emite partículas menores que têm maior risco de inalação (SCHRAUFNAGEL, 2020), exigindo mais estudos para

ajudar na compreensão da magnitude do problema.

Extrato de fumaça de madeira e componentes derivados como material particulado, quando analisados em experimentos *in vitro* usando linhagens de células humanas demonstraram a capacidade de induzir estresse oxidativo (ADETONA et al., 2016) e danos ao DNA (ABREU et al., 2017; CORSINI et al., 2013), entretanto não existem modelos experimentais envolvendo a quantificação das concentrações de metais pesados absorvidos por contato dérmico, inalação e trato digestivo após exposição à fumaça de lenha e carvão, bem como há carência de estudos que tenham avaliado os riscos considerando os tipos de madeira ou materiais aos quais os bombeiros estão expostos durante a queima desses materiais.

Finalmente, durante a ocorrência de um incêndio, a atividade física aumenta a ventilação, o que leva a um aumento proporcional na quantidade de poluentes inalados (REISEN; HANSEN; MEYER, 2011). De fato, segundo Barros et al. (2021) (BARROS; OLIVEIRA; MORAIS, 2021b), os bombeiros estão expostos a metais pesados por várias vias, como inalatória, dérmica e oral, o que pode colocar os bombeiros em risco de inalar poluentes atmosféricos (IARC, 2022a). No entanto, pouco se sabe sobre a relação entre a exposição a metais pesados e a ocorrência de doenças relacionadas ao trabalho dos bombeiros.

Até o momento, não existem modelos experimentais que tenham estudado o valor da concentração de metais pesados que podem ser depositados no tecido humano quando expostos à fumaça da combustão de madeira e carvão. Além disso, não há cálculos de risco para a saúde humana devido a exposição a metais pesados provenientes da fumaça de incêndios florestais. No entanto, para verificar a concentração de metais pesados que podem aderir aos tecidos biológicos quando expostos à fumaça, tecidos animais podem ser usados para simular tecidos humanos devido à sua similaridade. De fato, o equivalente de tecido animal pode ser visto como fisiologicamente comparável ao humano natural (ASIMAKI et al., 2022; FLISIKOWSKA; KIND; SCHNIEKE, 2016; KÄSER, 2021;

SCALIA et al., 2015) e, portanto, é uma alternativa adequada para testes de risco.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo i) quantificar metais pesados em carnes bovinas e suínas expostas à fumaça de algumas madeiras do cerrado brasileiro e também madeiras tratadas com arseniato de cromo e cobre, ii) obter o valor da concentração de metais provenientes de fumaça adquirida da subtração de carne in natura (crua) e carne assada na presença de fumaça, iii) investigar o risco potencial à saúde causado pela ingestão, contato dérmico e inalação de metais pesados provenientes da combustão de madeira considerando população os profissionais do Corpo de Bombeiros e crianças expostas à fumaça de incêndio. Conforme descrito acima, os bombeiros são os mais expostos diariamente a fumaças de diversos materiais.



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Poluição do ar**

Nos últimos anos, além da poluição os desastres naturais também aumentaram em número de ocorrências, muitas vezes mostrando a força extrema que poderiam ter. Terremotos, inundações, incêndios florestais, furacões, tornados, avalanches, deslizamentos de terra e vulcões são apenas alguns dos mais conhecidos. No entanto, ainda que a maior incidência dessas ocorrências cause enormes prejuízos, por outro lado são capazes de chamar a atenção das pessoas para temas importantes. Os danos econômicos derivados como consequência não são mais considerados como o único efeito. A sensibilidade ecológica, crescendo por toda parte, levou a considerar o conjunto mais amplo de condições envolvidas. É agora evidente a possibilidade de prevenir alguns desses desastres e reduzir as suas consequências a partir dos comportamentos quotidianos. Dessa forma, protocolos internacionais tem sido criados com o intuito de diminuir a poluição atmosférica e evitar danos à saúde humana. Basta lembrar que essas emissões de gases de efeito estufa (GEE), como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e outros gases, são consideradas a principal fonte de problemas com o aquecimento global, e a partir da ratificação do protocolo de Kyoto, 39 países aprovaram o cumprimento dos compromissos conjuntos para reduzir essa emissão (IWATA; OKADA, 2014).

A importância desse tipo de ação conjunta se deve ao fato que segundo dados da OMS, 99% da população global respira ar altamente poluído, que excede os limites propostos nas diretrizes de qualidade do ar, o que acaba ocasionando aumento das mortes por doenças pulmonares, infecções respiratórias agudas, doenças cardíacas, derrame e câncer de pulmão, levando a morte cerca de 7 milhões de pessoas a cada ano (WHO, 2022).

Por esse motivo a poluição do ar foi reconhecida pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como uma das dez principais ameaças à saúde. Entre os desafios para o

controle dessa poluição atmosférica, e suas consequências, estão algumas das fontes mais comuns de poluição do ar como: o crescente desenvolvimento industrial, aumento no uso de veículos motorizados, a queima de combustíveis fósseis para usos domésticos e a ocorrência cada vez maior de incêndios florestais a nível global. Poluentes de grande preocupação para a saúde pública incluem material particulado, monóxido de carbono, ozônio, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre, que causam doenças respiratórias e sistêmicas, além de serem fontes importantes de morbidade e mortalidade (IARC, 2013).

## **2.2 Incêndios**

De acordo com a Encyclopædia Britannica (2005), o fogo: queima rápida de material combustível com evolução de calor e geralmente acompanhada de chama. Em conjunto com o ar, a terra e a água eram considerados um dos quatro elementos que, na cosmologia antiga e medieval, constituíam o universo físico (apud GABBAN; SAN-MIGUEL-AYANZ; VIEGAS, 2008, p.28). Inicialmente originado por um raio, rapidamente se tornou uma ferramenta essencial para a raça humana. Indispensável para manter aquecido e cozinhar os alimentos, foi adotado também na caça de animais e na derrubada de matagais. Porém, o fogo é um fator ecológico de poder extraordinário, ou seja, é capaz de transformar o ambiente e influenciar a estrutura, a composição e a riqueza da vegetação. Entretanto, o fogo pode assumir vigor e frequência desiguais (GABBAN; SAN-MIGUEL-AYANZ; VIEGAS, 2008).

Em várias regiões do Brasil, o fogo é uma prática comum dos agricultores de áreas tropicais, sendo utilizado principalmente na limpeza de novas áreas agrícolas para o plantio de culturas temporárias, assim como manejo de pastagens naturais ou implantadas (FEARNSIDE, 2022). Entretanto, basta lembrar que a produtos das queimadas geram cinzas que contribuem com a fertilidade num primeiro momento, mas o fogo recorrente empobrece o solo. Ou seja, após algumas colheitas, essa área é deixada para descanso com a recuperação da vegetação. Para a queimada não se transformar num incêndio é

preciso aplicar algumas técnicas de segurança, entre elas a construção de aceiros, ou seja, consiste em uma faixa sem vegetação, que impeça o avanço das chamas (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR, 2015).

Contudo, acidentes durante as técnicas de manejo e as limitações envolvendo a fiscalização ambiental no Brasil fazem com que os incêndios florestais sejam uma ameaça antiga aos recursos naturais e unidades de conservação do país (SANTOS; LIMA, 2022; URRUTIA-PEREIRA et al., 2021). Desde a última década, a incidência de incêndios florestais em todo o território nacional aumentou vertiginosamente, e biomas como o Amazônico e o Cerrado (Pantanal) foram os mais afetados pelo número de queimadas, que desde 2019 vêm crescendo em magnitude com uma velocidade sem precedentes (CORREA et al., 2022; FEARNSSIDE, 2022; JESUS et al., 2020).

Além da devastação ambiental em áreas queimadas com plantas e animais mortos, existem outras consequências dos incêndios florestais, como a poluição e a intoxicação causados pela fumaça, que afeta diretamente a saúde da população, em particular dos bombeiros que trabalham diariamente no combate aos incêndios (US EPA, 2022a). Uma proporção substancial de mortes, internações hospitalares e atendimentos de emergência está ligada à exposição à fumaça, principalmente devido a doenças respiratórias e cardiovasculares, bem como à redução da função pulmonar (WHO, 2022).

### **2.3 Os combustíveis sólidos e os riscos da queima de biomassa**

Muitos são os combustíveis usados para a geração de energia, aquecimento e cocção de alimentos na vida diária de cerca de 3 bilhões de pessoas, podendo estes advir da biomassa ou ter origem fóssil. Devido a facilidade de acesso e aos custos mais baixos, a biomassa ainda é o combustível sólido mais utilizado mundialmente, principalmente em países subdesenvolvidos, onde o uso da lenha e do carvão ainda é muito expressivo (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2014).

Apesar de tanto as plantas quanto os humanos precisarem dos elementos químicos

para o desenvolvimento e manutenção da saúde, devido a contaminação do solo por uso indiscriminado de agrotóxicos, descarte incorreto de lixo urbano, resíduos industriais e fertilizantes, ambos estão sujeitos à contaminação e acúmulo de elementos potencialmente tóxicos (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010). Essa composição dos contaminantes do carvão depende ainda da região e época na qual ele é extraído (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009). Segundo Vassilev e colaboradores, a composição elementar da biomassa pode conter Ca, Cl, H, K, Mg, Mn, Na, O, P e alguns oligoelementos como Ag, Au, B, Be, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Rb, Se, Zn entre outros, havendo entre eles diversos metais pesados, uma vez que alguns desses micronutrientes são importantes para as plantas (VASSILEV et al., 2010, 2012).

Durante o processo de combustão, as diferentes estruturas e a concentração dos elementos presentes em cada biomassa fazem com que a madeira e o carvão expressem comportamentos de queima, gases e resíduos de combustão diferentes (FOURNEL et al., 2015). Também, fatores ambientais e meteorológicos como a umidade, condições de vento e temperatura influenciam diretamente no transporte dispersão e emissão de poluentes provenientes da queima da biomassa (PAUSAS; KEELEY, 2019).

Apesar de todas essas variáveis citadas anteriormente, independente da singularidade de cada incêndio, as etapas do processo são bastante fixas, e elas se dividem em *flaming* e *smoldering*, sendo a fase *flaming* caracterizada por altas temperaturas, maiores que 300°C, com formação de compostos voláteis e compostos primários, emitidos diretamente por uma fonte. Enquanto que o *smoldering*, ocorre em temperaturas menores, abaixo de 300°C, ou seja, no início ou no final do incêndio, contribuindo para a formação de compostos secundários na atmosfera (TOMASI et al., 2017).

Estudos que avaliaram elementos provenientes da queima do carvão demonstraram que mesmo o carvão de venda regularizada, disponível nos comércios, pode emitir metais e metalóides perigosos incluindo Alumínio (Al), Arsênio (As), Cádmi (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercúrio (Hg), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Chumbo

(Pb), Selênio (Se), e Zinco (Zn) (SUSAYA et al., 2010; TANER; PEKEY; PEKEY, 2013). Da mesma forma, uma vez que nos estudos citados foi constatada a presença das emissões de elementos traço à atmosfera, é factível afirmar que tais elementos quando presentes em um meio podem levar a riscos para a saúde quando associados à exposição em níveis que excedem as concentrações de referência para As, Al, Cu, Ni, Co, Cd, Pb, Mn, V, Zn e Se (SHARP; TURNER, 2013; SUSAYA et al., 2010; TANER; PEKEY; PEKEY, 2013; VICENTE et al., 2018).

Quando avaliados os níveis de partículas poluentes emitidas por diferentes combustíveis, as maiores concentrações destes provem de combustíveis sólidos de lenha seguida do carvão, com os quais os bombeiros estão em contato direto através da fumaça destes combustíveis nos incêndios florestais (GIODA, 2018).

Diante de toda a problemática apresentadas devido a poluição do ar, as organizações como a União Europeia (UE) e Organização Mundial da Saúde (OMS) propõem diretrizes para o controle da qualidade do ar e monitoramento da concentração dos elementos traço com potencial carcinogênico como As, Cd, Ni e Hg (EUROPEAN COMMISSION; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2000; PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2004).

Entre os elementos não essenciais encontrados no carvão e que apresentam toxicidade quando ingeridos ou inalados estão o níquel e cádmio, associados à carcinogênese, e chumbo, mercúrio, alumínio e arsênio com efeito imunossupressor, que indiretamente se associa ao desenvolvimento de tumores (AZEVEDO; CHASIN, 2003; GOYER; CLARKSON, 2001).

#### **2.4 Elementos metálicos na fumaça**

Com o aumento da compreensão da gravidade das doenças respiratórias e em como o ambiente de trabalho contaminado exerce impacto direto para o desenvolvimento desses agravos à saúde, os bombeiros se enquadram entre as profissões mais expostas a

contaminantes (CHOI, 2014).

Estudos demonstram que durante a fabricação do carvão proveniente da combustão das madeiras como o Eucalipto, ou madeiras do cerrado, vários elementos químicos podem evaporar. E assim como a produção de carvão é associada a riscos ocupacionais, incêndios de grandes proporções, através da fumaça e do material particulado fino também expõem populações e profissionais a metais pesados e a risco (KABIR; KIM; YOON, 2011; SHARP; TURNER, 2013; SUSAYA et al., 2010; TANER; PEKEY; PEKEY, 2013). Por este motivo, a exposição frequente a fumaça de incêndios envolve riscos devido a liberação de compostos resultantes do processo de combustão incompleta da madeira e do carvão, e entre as substâncias estão algumas conhecidamente cancerígenas como é o caso dos metais pesados, entre outros poluentes (JOSHI et al., 2015; TANER; PEKEY; PEKEY, 2013).

Quando tratamos da exposição ocupacional de bombeiros à fumaça temos alguns agravantes, uma vez que esse grupo permanece em contato com múltiplas partículas perigosas, entre as quais estão não só a acroleína, benzeno, cloreto de metileno, hidrocarbonetos poliaromáticos, percloroetileno, tolueno, tricloroetileno, triclorofenol, xileno, formaldeídos, minerais como amianto, sílica, silicatos, e gases tóxicos de efeito agudo, mas também alguns metais como chumbo, antimônio, cádmio, urânio, entre outros (LEMASTERS et al., 2006).

Segundo um estudo realizado pelo Underwriters Laboratory intitulado “Exposição de bombeiros a partículas de fumaça” que coletou partículas de fumaça, observou que as amostras analisadas continham vários metais pesados, incluindo arsênico, cobalto, cromo, mercúrio, chumbo e fósforo (COWELL, 2017).

Além disso, de acordo com o trabalho de Gagas (2015) intitulado “Caracterização de contaminantes no equipamento de proteção do bombeiro: exposição potencial de um bombeiro a metais pesados durante um incêndio em estruturas” em sua Dissertação de Mestrado pela Universidade de Eastern Kentucky, os metais pesados também foram

encontrados na fuligem deposta nos trajes de proteção individual de bombeiros. Corroborando com outros estudos que também mostraram que quantidades microscópicas de cádmio, cromo, cobre e chumbo aderem a equipamentos de proteção individual e jaquetas de combate a chamas (COWELL, 2017). No entanto ainda é importante ressaltar que todos os incêndios são únicos devido ao perfil de ventilação e as características do tipo de materiais queimados, mas é consenso que todos os incêndios produzem muitos químicos perigosos, incluindo disruptores endócrinos, e uma mistura complexa de gases e partículas, entre os quais estão substâncias carcinogênicas para humanos, além de outras que podem não estar associadas diretamente ao câncer mas que a exposição implica em diversos agravos a saúde (DE VOS et al., 2009; EASTER; LANDER; HUSTON, 2016; E. EVANS; W. FENT, 2015; ENGELSMAN et al., 2019, 2020).

Segundo estudo de Lemasters e colaboradores (2006) bombeiros relatam que durante atendimento à ocorrências a pele frequentemente é coberta por fuligem negra proveniente dos incêndios, até em regiões íntimas como a virilha. Esse relato corrobora com as evidências epidemiológicas sugestivas para associação entre câncer de próstata e à exposição a poeiras metálicas.

Em resposta aos estudos demonstrando os riscos dessa exposição à metais e produtos químicos durante incêndios, algumas comissões passaram a incluir protocolos de higiene e segurança, além de produtos específicos para a correta descontaminação após o turno (CDC; NIOSH, 2017; DHHS; CDC; NIOSH, 2007).

Os óxidos de metais pesados advindos do incêndio juntamente a práticas incorretas de descontaminação e higiene contribuem fortemente para taxas estatisticamente aumentadas de câncer entre bombeiros, podendo inclusive ser carregados para o ambiente doméstico expondo também as famílias a risco. As práticas de higiene com produtos inespecíficos para a descontaminação de metais acabam sendo incapazes de romper a forte ligação eletrostática desses elementos, fazendo com que quantidades microscópicas de metais pesados como chumbo, cromo hexavalente, arsênico, cádmio,

zinco, níquel e outros metais permaneçam aderidos a pele. Sabonetes comuns com base aniônica são incapazes de limpar completamente os metais pesados, o que deixa o bombeiro exposto a efeitos perigosos à saúde, como o câncer (CDC; NIOSH, 2017).

Contudo, demais profissionais também expostos à poeira, gás e fumaça de maneira frequente, são fortes candidatos para apresentar ao longo dos anos redução da função pulmonar e o desenvolvimento de sintomas respiratórios crônicos (SUNYER et al., 2005). Nesse contexto, uma ferramenta para avaliar a exposição de indivíduos a produtos químicos é através da dosagem no sangue, urina, sêmen e leite materno, possibilitando verificar a contaminação de populações a produtos químicos ambientais (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2015).

## **2.5 Doenças causadas pela inalação, contato dérmico e ingestão de poeira, fumos e fibras:**

Os efeitos da poluição do ar na saúde humana têm sido extensivamente estudados por instituições de pesquisa em todo o mundo. A exposição de populações ao fogo e aos incêndios florestais causa doenças respiratórias, cardiovasculares e neurológicas, principalmente nos grupos mais vulneráveis, como crianças e idosos (US EPA, 2022b; WHO, 2018).

Os sinais e sintomas referentes à inalação da fumaça variam, mas os mais relatados de forma aguda incluem: cefaleia; olhos lacrimejantes; irritação e sensação de queimação nos olhos, nariz e garganta; tosse seca; dificuldade ao respirar, dor de garganta; náuseas; sonolência; tonturas; espirros e rinite. Entretanto, através da exposição crônica existe o risco de ocorrência de doenças mais graves, como congestão alveolar, pneumonia intersticial, bronquiolite e alterações enfisematosas no trato respiratório (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2020).

Através do trato respiratório como principal via de exposição, contaminantes atmosféricos como monóxido de carbono (CO), material particulado (PM), fuligem,



fumaça e poeira, ao serem absorvidos pelos pulmões, levam a um quadro inflamatório e pró oxidativo, que ocasiona a imunossupressão e mutagenicidade, atingindo quase todos os órgãos do corpo, uma vez que devido ao tamanho extremamente pequeno das partículas, alguns desses poluentes atmosféricos são capazes de ultrapassar a barreira respiratória e adentrar a corrente sanguínea, levando a doenças (URRUTIA-PEREIRA et al., 2021).

Corroborando com os dados acima, um estudo Indiano demonstrou que indivíduos expostos a poeira de estrada, através das diferentes vias, obtiveram maior contato com Pb, Co e Cd através da via de ingestão, enquanto Co, Cr e Mn tiveram uma inalação consideravelmente maior para adultos e crianças, e Fe e Mn foram os principais para a via de exposição por contato dérmico para crianças (JOSE; SRIMURUGANANDAM, 2020).

O estudo brasileiro conduzido em São Paulo, demonstrou o aumento do risco de tumores de estômago, das vias aéreas e digestiva superior, além de câncer em geral, para trabalhadores de pequenas empresas da indústria de borracha, devido à exposição ocupacional ao material particulado disperso no ar durante o processo de produção (NEVES et al., 2006). O que vai de acordo com os achados epidemiológicos que atribuem a essa ocupação maior ocorrência de leucemias, linfomas, cânceres de bexiga, pulmão, laringe, estômago, cólon, próstata, pâncreas, fígado e de pele (HIDAJAT et al., 2019).

As exposições ocupacionais a químicos através da derme podem ocorrer por contato direto com produtos químicos agressores ou respingos, mas também por deposição de aerossóis, que podem passar despercebidas durante o turno de trabalho. Entre as reações desse contato estão inclusos sintomas cutâneos diretos, efeitos cutâneos mediados pelo sistema imunológico e efeitos sistêmicos (ANDERSON; MEADE, 2014). Tanto a pele quanto a inalação estão entre as vias mais comuns pelas quais indivíduos de todos os setores ocupacionais estão expostos, e semelhante à inalação, o contato dérmico com partículas, mediado pelo ar, ocorre constantemente e por esse motivo deve ser

monitorado (LAO et al., 2018, 2020).

Entre as doenças causadas pela inalação de poeira, fumos e fibras temos ainda o estudo Coreano que observou redução da função pulmonar em indivíduos expostos a poeira mineral, sílica, fumos metálicos, óxido de ferro e demais subprodutos da combustão (KIM et al., 2011), e ao avaliar exposição a partículas metálicas, como vidro de sílica, chumbo, manganês e níquel em trabalhadores de estaleiros, o estudo de Park e colaboradores (2011) também constatou comprometimento da função pulmonar, igualmente ao observado de forma progressiva em funcionários de fábrica de refino (JOHNSEN et al., 2010).

A ingestão ocorre como uma consequência da inalação destes compostos, e segundo estudos de Li e colaboradores (2015), a ingestão foi a principal via de exposição para humanos ao chumbo, cromo e cobre provenientes da poeira de estrada, e entre os sintomas da exposição estão reações alérgicas, insuficiência cardíaca e renal, câncer, parada respiratória e sangramento intestinal (KRAVCHENKO et al., 2014).

Ainda considerando o efeito da fumaça a saúde humana, vale a pena destacar que ao longo dos anos vários estudos tem chamado a atenção de fumantes para o fato que o tabagismo é o fator de risco número um para o câncer de pulmão. Nos Estados Unidos, o tabagismo está associado a cerca de 80% a 90% das mortes por câncer de pulmão. O uso de outros produtos de tabaco, como charutos ou cachimbos, também aumenta o risco de câncer de pulmão. A fumaça do tabaco é uma mistura tóxica de mais de 7.000 produtos químicos. Muitos são venenos. Pelo menos 70 são conhecidos por causar câncer em pessoas ou animais. Pessoas que fumam cigarros têm 15 a 30 vezes mais chances de contrair câncer de pulmão ou morrer de câncer de pulmão do que pessoas que não fumam. Mesmo fumar alguns cigarros por dia ou fumar ocasionalmente aumenta o risco de câncer de pulmão. Quanto mais anos uma pessoa fuma e quanto mais cigarros fuma por dia, mais o risco aumenta. Indivíduos que param de fumar têm um risco menor de câncer de pulmão do que se tivessem continuado a fumar, mas seu risco é maior do que o risco de pessoas

que nunca fumaram. Parar de fumar em qualquer idade pode diminuir o risco de câncer de pulmão (CDC, 2022).

Estudos que determinaram o perfil de metais tóxicos presentes na fumaça do cigarro, demonstram sinais típicos de toxicidade, como a persistência e bioacumulação, ambas responsáveis por causar efeitos graves em fumantes (LI et al., 2020; NTP, 2021). Entre os metais tóxicos do tabaco, arsênico (As), cádmio (Cd), níquel (Ni), e o chumbo (Pb) constituem a maior preocupação de saúde pública devido a elevada taxa de transferência para a fumaça e por terem sido encontrados em níveis muito mais elevados no tecido pulmonar de fumantes em comparação aos não fumantes (PINTO et al., 2017). E a exposição frequente por inalação da fumaça do cigarro pode ocasionar em efeitos cancerígenos e não cancerígenos significativos para a saúde associados à essa exposição (BENSON et al., 2017).

Os cigarros, assim como a fumaça de queimadas, possuem altas concentrações de metais pesados (LI et al., 2020), portanto, ambos podem causar danos à saúde da população e principalmente de trabalhadores como bombeiros e até mesmo aqueles que trabalham em churrascarias por um longo período de tempo (ARI et al., 2020). Segundo Lemasters e colaboradores (2006) o combate à incêndios foi associado a 10 tipos de câncer, e como provável causador de outros quatro tipos de cânceres.

## **2.6 Cálculos para a avaliação de risco à saúde humana**

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS) o câncer é a primeira ou a segunda causa de morte para indivíduos com menos de 70 anos na maioria dos países (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2020). O que deve-se ao aumento da longevidade e maior exposição aos fatores de risco (WORLD HEALTH ORGANIZATION, [s.d.]). Estima-se cerca de 11 milhões de novos casos até 2030, chegando a uma projeção de mais de 13 milhões de mortes em todo o mundo (WORLD HEALTH ORGANIZATION, [s.d.]).

Com o intuito de compreender melhor a gênese do câncer e as influências comportamentais e ambientais no aparecimento e evolução da doença, agências internacionais como a Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC) avaliaram mais de 900 substâncias nos últimos anos e dessas classificou mais de 400 como definitivamente carcinogênicas ou suspeitas de potencial cancerígeno. Ao longo dos anos de estudo a IARC ainda compilou 12 situações de exposição em ambientes ocupacionais, sendo elas determinadas funções e ofícios grandemente expostos, ou processos industriais de risco. Portanto, muitos estudos epidemiológicos sobre as propriedades cancerígenas de vários agentes são realizados no local de trabalho, onde as exposições costumam ser maiores do que no ambiente geral (GUIMARÃES et al., 2019).

Junto a isso, ferramentas teóricas como os cálculos de risco sugeriram para avaliar as chances que um determinado agente estressor (físico, químico ou biológico) poderia induzir efeitos adversos em humanos e ecossistemas inteiros, no momento presente ou no futuro (MOHAMMADI et al., 2019). Como é sabido que a longa exposição aos metais faz com eles acumulem em tecidos, a avaliação de risco à saúde humana é uma ferramenta útil para estimar a quais elementos um determinado grupo está exposto, em que quantidades, por quanto tempo, e por quais vias de exposição (IARC, 2012; KAMUNDA; MATHUTHU; MADHUKU, 2016). A partir de uma suposição teórica de quais grupos podem ser cancerígenos e não cancerígenos em cada condição, é portanto determinada a exposição total (IARC, 2012).

Compreende-se, portanto, como avaliação de risco a análise da exposição a contaminantes e com o objetivo de determinar os riscos e as implicações à saúde humana, considerando passado, presente e futuro. Durante essa análise são consideradas características dos contaminantes de interesse, características de transporte ambiental do composto e por fim as rotas de exposição para as populações avaliadas, que são os caminhos pelos quais o contaminante pode estabelecer contato com o organismo, tais como: ingestão, inalação e absorção ou contato dérmico (BRASIL et al., 2010).

Através dos cálculos é possível compreender a dose de exposição que vai descrever a quantidade da substância que está em contato com os organismos humanos, seja através da inalação, da ingestão ou da absorção pela pele em um período determinado (BRASIL et al., 2010).

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

Investigar a concentração, transferência e acúmulo de macro e microelementos da fumaça para os tecidos biológicos e avaliar o os riscos à saúde humana associado a exposição contínua à fumaça.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Quantificar a concentração de elementos Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, V e Zn em carnes cruas de bovino e suíno utilizando a técnica de espectrometria de emissão óptica indutivamente acoplado com plasma de argônio (ICP-OES).
- Quantificar as concentrações de Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, V e Zn nas amostras de carnes assadas de bovino e suíno, feito com diferentes tipos de carvão e madeira utilizando ICP-OES.
- Calcular as concentrações de metais e metaloides da fumaça através da subtração da quantificação de metais pesados de carnes cruas e carnes assadas com diferentes tipos de madeira e carvão;
- Calcular o risco não-carcinogênico de exposição através do calculo de ingestão diária de produtos químicos (CDI<sub>ing</sub>); dose dérmica absorvida de oligoelementos em partículas aderidas à pele exposta (DAD<sub>derm</sub>); inalação de partículas ressuspensas pela boca e nariz (D<sub>inh</sub>) e os respectivos quocientes de risco (HQ).
- Calcular o risco carcinogênico de exposição através do calculo de risco carcinogênico (CR).
- Avaliar o risco à saúde humana para a exposição ao material particulado proveniente da fumaça da combustão de madeiras e carvão associados à ingestão, inalação e absorção dérmica.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Aquisição e delineamento das amostras

Três amostras de coxão mole bovino e lombo suíno foram adquiridas em diferentes açougues de Campo Grande, MS, na região Centro-Oeste do Brasil. Já as seguintes madeiras foram adquiridas por meio de compra direta em estabelecimentos comerciais de Campo Grande, Brasil: madeira de *Eucalyptus citriodora*, madeira de *Guazuma ulmifolia*, madeira de *Anadenanthera falcata* e eucalipto tratado (madeira de eucalipto tratada com CCA). Além disso, foram adquiridos dois carvões: o carvão *Eucalyptus citriodora* e o carvão *Guazuma ulmifolia*.

As carnes frescas e assadas foram divididas nos seguintes grupos; o primeiro sendo carnes cruas (coxão mole bovino e lombo suíno); segundo grupo: coxão mole bovino e lombo suíno assados com madeira de *Eucalyptus citriodora*; terceiro grupo: coxão mole bovino e lombo suíno assados com madeira de *Guazuma ulmifolia*; quarto grupo: coxão mole bovino e lombo suíno assados com madeira de *Anadenanthera falcata*; quinto grupo: coxão mole bovino e lombo suíno assado com eucalipto tratado (madeira de eucalipto tratada com CCA); sexto grupo: coxão mole bovino e lombo suíno assados na brasa de *Eucalyptus citriodora*; sétimo grupo: coxão mole bovino e lombo suíno assados com carvão *Guazuma ulmifolia*.

**Tabela 1.** Grupos e especificações das amostras.

Grupo	Tipo de carne	Preparo	Tipo de combustível	Espécie
G1	Bovina Suína	Cru	-	-
G2	Bovina Suína	Assado	Lenha	<i>Eucalyptus citriodora</i>
G3	Bovina Suína	Assado	Lenha	<i>Guazuma ulmifolia</i>

G4	Bovina Suína	Assado	Lenha	<i>Anadenanthera falcata</i>
G5	Bovina Suína	Assado	Lenha	Eucalipto tratado com CCA
G6	Bovina Suína	Assado	Carvão	<i>Eucalyptus citriodora</i>
G7	Bovina Suína	Assado	Carvão	<i>Guazuma ulmifolia</i>

#### 4.2 Preparo das amostras cruas e assadas

Para o preparo das amostras, coleta das alíquotas, condições de preparo e dimensionamento da churrasqueira de alvenaria, todos os procedimentos foram realizados de acordo com a metodologia proposta por Leite et al. (2020). Inicialmente foram coletados em triplicata 50 g de cada tipo de carne crua.

No preparo das amostras que seriam assadas foram feitas fatias de aproximadamente 90g em triplicata de três diferentes amostras de carne crua com 17 mm de espessura cada, utilizando bisturis de aço inoxidável. Cada ciclo contou com uma amostra de cada tipo de carne, que foi posicionada em grelha de aço inoxidável e então amostras das quatro carnes a serem analisadas foram assadas em churrasqueira de alvenaria, repetiu-se o processo para cada amostra de madeira ou carvão, até que os seis combustíveis propostos fossem utilizados.

O experimento foi feito em uma churrasqueira de alvenaria com 60 cm de comprimento, 37 cm de largura e 31 cm de profundidade, e tanto a lenha quanto o carvão foram distribuídos uniformemente dentro da churrasqueira antes de cada preparo. As carnes foram assadas a uma altura de 40 cm da madeira ou carvão, durante 30 min até que ficassem ao ponto.

Após o procedimento, as carnes cruas e assadas foram cortadas com auxílio de bisturi e lâminas descartáveis de aço inoxidável a fim de evitar contaminação. Em



seguida, as amostras foram pesadas, moídas em processador doméstico que possui lâminas de aço inoxidável (Thermomix TM5 equipment—Vorwerk L.L.C., Wuppertal, Germany) e então homogeneizadas para garantir lotes fiéis a cada tipo de carne. Na sequência, as amostras foram acondicionadas individualmente em coletor universal de plástico esterilizado, previamente identificado, sendo resfriadas e encaminhadas ao Laboratório de Metabolismo Mineral da FAMED onde as mesmas foram pesadas e armazenadas em freezer a temperatura de -20°C, para posterior tratamento e análise.

#### **4.3 Justificativa para a escolha de amostras de tecidos biológicos para a captação das fumaças**

Existem poucas informações na literatura sobre estudos *in vitro*, modelos experimentais, animais e humanos que considerem a ingestão, inalação e absorção dérmica de metais através da fumaça de madeira ou carvão. Diante do exposto, segundo Scalia et al. (2015), tecidos suínos e bovinos têm semelhanças moleculares com humanos. Portanto, para tal, foram selecionados cortes de coxão mole bovino e lombo suíno para que se pudesse avaliar a diferença de concentração por deposição de metais e metaloides presentes no material particulado fino das fumaças, simulando um cenário de exposição a um incêndio (ASIMAKI et al., 2022; FLISIKOWSKA; KIND; SCHNIEKE, 2016; KÄSER, 2021; SCALIA et al., 2015).

Como hipótese, foi considerado que a inalação, a absorção por contato dérmico e a ingestão de metais e metaloides pelos bombeiros decorrem da fumaça proveniente da diferença de concentração de metais entre o que foi quantificado para metais em carnes assadas e, portanto, expostas à fumaça de queima de biomassa e as concentrações obtidas em carnes cruas que não passaram por nenhum processamento térmico. Sendo assim, foi realizado:

- 1- Quantificação de metais em coxão mole bovino e lombo suíno crus.
- 2- Quantificação de metais em coxão mole bovino e lombo suíno, ambos assados

com madeira de *Eucalyptus citriodora*, *Guazuma ulmifolia*, *Anadenanthera falcata* e *Eucalyptus* tratado com CCA e carvão *Eucalyptus citriodora* e *Guazuma ulmifolia*;

3- Subtração da quantificação de metais pesados de carnes cruas e carnes assadas com diferentes tipos de madeira e carvão;

Dessa forma, para este estudo a concentração de metais pesados e metaloides na fumaça foi obtida pela diferença na quantificação de metais em carnes cruas e carnes assadas.

#### **4.4 Processo de digestão ácida: abertura**

Uma alíquota de 300 mg de cada amostra, processada e homogeneizada, foi pesada e inserida em tubo digestor DAP 60, em seguida foi adicionado junto à alíquota 2 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$  - 65%, Merck, Darmstadt, Alemanha), 1,5 mL de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$  - 30%, Merck, Darmstadt, Alemanha) e 2 mL de água deionizada ultrapura (18 M $\Omega$ cm, Milli-Q Millipore, Bedford, MA, EUA) para cada tubo. As amostras foram então digeridas em micro-ondas (Speedwave four ®, Berghof, Alemanha) com as condições de temperatura, tempo, pressão descritas na Tabela 2 abaixo. Após a digestão as amostras foram então transferidas para tubo falcon e diluídas com água ultrapura para um volume final de 10 mL. Todas as digestões foram realizadas em triplicata para amostras de carne fresca e assada, e um branco analítico.

**Tabela 2.** Condições de funcionamento para o sistema de digestão por micro-ondas.

Parâmetros	Estágio		
	1	2	3
Temperatura (°C)	100	150	50
Tempo de aquecimento (min)	1	1	1
Tempo de espera (min)	5	10	1
Potência (W)	1160	1160	0
Pressão (bar)	30	30	25

#### 4.5 Análise elementar de macro e microminerais

A determinação do teor de macrominerais e microminerais nas amostras das carnes cruas e assadas foi realizada por meio de espectrômetro de emissão óptica de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) com visão axial (iCAP 6300 Series, Thermo Scientific, Waltham, MA, EUA). Os parâmetros instrumentais e operacionais para ICP-OES são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Parâmetros operacionais da determinação de elementos pelo ICP OES

Parâmetros	Condições
Tempo de lavagem da amostra (s)	30
Tempo de estabilização da bomba (s)	5,0
Fluxo do Gás do Nebulizador (L/min)	0,7
Fluxo do Gás Auxiliar (L/min)	0,5
Taxa de bomba de descarga (rpm)	50
Potência RF (W)	1150
Taxa de bomba de análise (rpm)	50
Fluxo de Gás Refrigerante (L/min)	12

Analitos/ $\lambda$ (nm)	Al 167.079; As 189.042; Cd 228.802; Co
	228.616; Cr 283.563; Cu 324.754; Fe 259.940; Mg 279.553; Mn 257.610; Mo 202.030; Ni 221.647; Pb 220.353; V 309.311; Zn 213.856.

---

Para avaliar a precisão do método foi realizado ensaio de adição e recuperação por teste de Spike, que consiste na recuperação do analito após a análise de amostra de carne adicionadas com quantidades conhecidas do mesmo (0,5 e 1,0 mg/L de cada analito). A faixa de recuperação mostra um intervalo de 90 - 111% para a adição de 0,5 mg/L e 93 - 112% para a adição de 1,0 mg/L, podendo ser observada na Tabela 4. O intervalo de confiança para os ensaios de adição e recuperação foi de 80 a 120%, descartando a possibilidade de perdas ou interferências (AOAC, 2002; THOMPSON; ELLISON; WOOD, 2002). Portanto o teste de recuperação mostrou que não houve erros sistemáticos ou perdas de elementos durante o processo de digestão.

**Tabela 4.** Teste de adição e recuperação (Spike) dos analitos.

Analito	Recuperação Spike (%)	
	0,5 mg/L	1,0 mg/L
Al	108	108
As	102	103
Cd	91	93
Co	99	99
Cr	107	108
Cu	104	104
Fe	106	105

Mg	101	99
Mn	100	101
Mo	111	112
Ni	101	101
Pb	90	93
V	110	110
Zn	102	99

A determinação das concentrações dos elementos analisados foi possível a partir das curvas de calibração padrão para cada elemento, que foram construídas com nove diferentes concentrações variando de 0,005 mg/L a 2 mg/L usando uma solução multielementar padrão contendo 100 mg/L de Al, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Co, V e Zn (SpecSol-Quinlab, São Paulo, Brasil) e uma solução monoelementar contendo 100 mg/L de As, Cd, Cr e Pb (SpecSol-Quinlab, São Paulo, Brasil).

O cálculo dos limites de detecção (LOD) e limites de quantificação (LOQ) foi realizado de acordo com os padrões analíticos estabelecidos pelo IUPAC (LONG; WINEFORDNER, 1983). A Tabela 5 mostra os parâmetros da curva de calibração, bem como os valores LOD e LOQ e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtidos por calibração externa. Os valores de LOD variaram na faixa de 0,0002 – 0,0045 (mg/L) e o LOQ variou de 0,007 – 0,0151 (mg/L).

**Table 5.** Parâmetros analíticos para a técnica de ICP OES; equação de calibração ( $y=ax+b$ )\*, coeficiente de determinação ( $R^2$ ), limite de detecção (LOD) e limite de quantificação (LOQ)

Elemento	Equação da reta	LOD (mg/L)	LOQ (mg/L)	$R^2$
Al	$y = 136,61x - 1,1213$	0,0045	0,0151	0,9994
As	$y = 469,39x + 8,7286$	0,0029	0,0097	0,9995

Cd	$y = 13845x + 102,27$	0,0002	0,0007	0,9998
Co	$y = 5806,4x + 56,482$	0,0005	0,0016	0,9998
Cr	$y = 18084x + 87,356$	0,0011	0,0035	0,9998
Cu	$y = 16191x + 192,33$	0,0013	0,0042	0,9998
Fe	$y = 10923x + 122,77$	0,0011	0,0036	0,9998
Mg	$y = 397282x + 884,4$	0,0007	0,0024	0,9995
Mn	$y = 57509x + 609,65$	0,0002	0,0005	0,9998
Mo	$y = 3703,8x + 33,342$	0,0005	0,0015	0,9997
Ni	$y = 5338,5x + 64,394$	0,0005	0,0016	0,9998
Pb	$y = 1008,1x + 29,193$	0,0040	0,0132	0,9998
V	$y = 34980x + 359,82$	0,0004	0,0014	0,9998
Zn	$y = 10414x + 130,04$	0,0004	0,0014	0,9998

\*  $y$  = intensidade;  $a$  = inclinação da curva analítica;  $x$  = concentração (mg/L);  $b$  = interseção.

#### 4.6 Análise da avaliação de risco humano

A análise de risco à saúde foi realizada para os macro e microelementos, essenciais e tóxicos. A metodologia utilizada nesta subseção objetivou avaliar o risco de dano crônico carcinogênico e não carcinogênico, obtido pelo método descrito por Dahmardeh Behrooz e colaboradores (2021) juntamente com o método de Zheng e colaboradores (2010).

Para essas análises, portanto, foram considerados à inalação, ingestão devido à deposição de partículas e absorção dérmica de metais pesados da fumaça resultante da queima de diferentes tipos de lenha e carvão foi realizada para crianças (até 15 anos) e adultos (US EPA, 1989, 2004, 2009). Assim, a avaliação do risco à saúde foi estimada por meio das seguintes equações: Eq.1 - ingestão diária de produtos químicos (CDI<sub>ing</sub>), Eq. 2 - dose absorvida dérmica de oligoelementos em partículas aderidas à pele exposta (DAD<sub>derm</sub>) e Eq. 3 - inalação de partículas ressuspensas pela boca e nariz (D<sub>inh</sub>) (DAHMARDEH BEHROOZ et al., 2021; ZHENG et al., 2010). A dose recebida por cada

um dos três caminhos foi calculada usando as Eqs. (1)–(3) abaixo:

$$CDI_{ing} = \frac{C \times IngR \times EF \times ED}{PC \times AT} \times CF \quad (1)$$

$$DAD_{derm} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{PC \times AT} \times CF \quad (2)$$

$$Dinh = C \times \frac{InhR \times EF \times ED}{PEF \times PC \times AT} \quad (3)$$

Onde, C é a concentração média de metal em amostras de carne crua ou assada com diferentes tipos de madeira e carvão (mg/kg) quantificada por ICP OES. PC é o peso corporal (15 kg para crianças e 70 kg para adultos), AT é o tempo médio (para riscos não cancerígenos,  $AT = ED \times 365$  dias; e para riscos cancerígenos,  $AT = 70 \times 365 = 25.550$  dias), e CF é um fator de escala ( $10^{-6} \text{ kg mg}^{-1}$ ). Para caracterizar o tempo e a duração das doses de exposição, estabeleceu-se neste estudo EF como a frequência de exposição (120 dias ano<sup>-1</sup>) e ED como a duração da exposição (6 anos para crianças e 24 anos para adultos). Aqui, os 120 dias foram considerados por corresponderem ao período de dias que resta da estação seca em que ocorre o maior número de queimadas no Brasil, ou seja, entre os meses de julho a outubro (DAHMARDEH BEHROOZ et al., 2021; MARQUES FILHO et al., 2008; SALIS et al., 2012). Portanto, os resultados podem ser considerados como “estimativas conservadoras” devido à EF menor que a anual (SAH et al., 2019). Na Eq. (1), IngR é a taxa de ingestão, que foi fixada em 200 mg dia<sup>-1</sup> para crianças e 100 mg dia<sup>-1</sup> para adultos (US EPA, 2009). Na Eq. (2), SA corresponde à área da superfície da pele em contato com poeira (5700 cm<sup>2</sup> para adultos e 2800 cm<sup>2</sup> para crianças) (DAHMARDEH BEHROOZ et al., 2021), AF ao fator de aderência da pele (0,2 mg cm<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) e ABS ao o fator de absorção dérmica [0,03 para As, 0,001 para Cd e 0,01 para os demais elementos] (DAHMARDEH BEHROOZ et al., 2021). Na Eq. de cálculo Dinh. (3), a EF de 180 dias ano<sup>-1</sup> foi adaptada do método descrito por Zheng e colaboradores

(2010). Além disso, nesta equação, PEF: fator de emissão de partículas, foi de  $1,36 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  (US EPA, 2002), e InhR: taxa de inalação de  $7,6 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$  para crianças e  $20 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$  para adultos) (US EPA, 2009).

O nível de quociente de risco (HQ) devido a cada uma das rotas de contaminação foi calculado usando as equações (4) para danos não cancerígenos em humanos.

$$\text{HQing} = \text{CDIing}/\text{RfDo}$$

$$\text{HQderm} = \text{DADderm}/(\text{RfDo} \times \text{GIABS}) \quad (4)$$

$$\text{HQinh} = \text{Dinh}/\text{RfCi}$$

Onde, RfCi é a concentração de referência para inalação em ( $\text{mg m}^{-3}$ ), RfDo é a dose oral de referência em ( $\text{mg kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) e GIABS é o fator de absorção gastrointestinal, todos eles foram estabelecidos pelo United States Environmental Protection Agency (USEPA), na versão atualizada “Regional Screening Levels (RSLs)—Summary Table” em maio de 2022 (US EPA, 2022c).

Para avaliar o potencial geral de riscos não cancerígenos apresentados por um indivíduo simultaneamente exposto a dois ou mais elementos, o Índice de Perigo (HI) foi a soma dos HQs para exposição a múltiplos elementos. No entanto, para obter um Índice de Risco Total (HI<sub>t</sub>), capaz de estimar vias de exposição agregadas, o HI<sub>t</sub> foi estimado como a soma dos HQs (ingestão, dérmico e inalação), também assumindo efeitos aditivos (US EPA, 1989, 2011). Se o valor do HI ou HQ for maior que 1, indica dano potencial não carcinogênico à saúde humana, enquanto  $\text{HQ} < 1$  não indica risco (KABIR et al., 2022; US EPA, 2011).

Uma vez que a Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) lista arsênico inorgânico, cádmio, cromo (VI), níquel e chumbo como carcinógenos humanos (IARC, 2022b), é possível estimar o risco carcinogênico (CR), que é a probabilidade de um indivíduo desenvolver câncer durante sua vida devido à exposição a um produto químico conhecido por ser cancerígeno. O CR foi calculado considerando inalação,



ingestão e absorção dérmica por exposição diária ao longo dos anos de vida para crianças e adultos usando a seguinte equação (5):

$$CR_{ing} = CD_{ling} \times SFo$$

$$CR_{derm} = DAD_{derm} \times (SFo/GIABS) \quad (5)$$

$$CR_{inh} = Din_{inh} \times SF$$

onde o fator de inclinação (SF) (mg/kg/dia), foi usado para arsênico e os outros três metais pesados considerados elementos cancerígenos ou provavelmente cancerígenos para humanos, e seus valores de SF disponíveis são os seguintes: As = 1,5 mg/kg/dia; Cd = 6,1 mg/kg/dia; Cr = 0,5 mg/kg/dia; Pb = 0,0085 mg/kg/dia (US EPA, 2022c; USDOE, [s.d.]).

De acordo com a USEPA (FOWLE; DEARFIELD, 2000), o valor CR entre  $10^{-6}$  a  $10^{-4}$  indica que o risco de câncer está dentro de uma faixa tolerável. No entanto, quando os valores estimados de CR são maiores que  $1 \times 10^{-4}$ , para múltiplos elementos, e o máximo permitido de  $1 \times 10^{-6}$ , para um único elemento, demonstra que a tolerância humana foi excedida (RAIS, 2017).

#### 4.7 Análise estatística

Os dados foram analisados por ANOVA de uma via usando o software GraphPad Prism 8 versão 8.0.1 (GraphPad Software, San Diego, CA, EUA), com pós-teste de Tukey para o confronto das médias por comparação múltipla. Uma diferença significativa foi determinada quando o valor de p foi inferior a 0,05.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Concentração de macro e micro elementos em fumaças de incêndio florestal e estrutural**

A Tabela 6 mostra as concentrações de metais (Al, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, V e Zn) e metaloides (As) quantificadas em amostras de coxão mole bovino e lombo suíno frescos expostos à fumaça da lenha do Cerrado, lenha para uso doméstico, madeira tratada para uso estrutural e carvão. As concentrações de cádmio, cobalto, níquel e níveis de chumbo em todas as amostras estavam abaixo do limite de detecção.



<b>Co</b>							
Bovino	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	
Suíno	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	
<b>Cr</b>							
Bovino	<LOD <sup>a</sup>	<LOD <sup>a</sup>	<LOD <sup>a</sup>	1,092 ± 0,026 <sup>c</sup>	0,033 ± 0,006 <sup>a</sup>	0,767 ± 0,038 <sup>b</sup>	<0.0001 <sup>1</sup>
Suíno	0,084 ± 0,004 <sup>a</sup>	0,248 ± 0,004 <sup>b</sup>	0,255 ± 0,005 <sup>b</sup>	1,042 ± 0,087 <sup>c</sup>	0,262 ± 0,014 <sup>b</sup>	0,386 ± 0,011 <sup>b</sup>	<0.0001 <sup>1</sup>
<b>Cu</b>							
Bovino	2,291 ± 0,020 <sup>e</sup>	1,587 ± 0,024 <sup>c</sup>	1,430 ± 0,017 <sup>b</sup>	1,860 ± 0,053 <sup>d</sup>	1,035 ± 0,025 <sup>a</sup>	1,062 ± 0,036 <sup>a</sup>	<0.0001 <sup>1</sup>
Suíno	0,199 ± 0,009 <sup>a</sup>	0,228 ± 0,022 <sup>a</sup>	0,167 ± 0,012 <sup>a</sup>	0,943 ± 0,013 <sup>c</sup>	0,245 ± 0,029 <sup>a</sup>	0,508 ± 0,088 <sup>b</sup>	<0.0001 <sup>1</sup>
<b>Fe</b>							
Bovino	5,688 ± 0,588 <sup>c</sup>	0,905 ± 0,159 <sup>a</sup>	3,376 ± 0,352 <sup>b</sup>	36,846 ± 0,677 <sup>d</sup>	49,397 ± 0,535 <sup>e</sup>	53,111 ± 0,254 <sup>f</sup>	<0.0001 <sup>1</sup>
Suíno	2,841 ± 0,191 <sup>a</sup>	6,698 ± 0,274 <sup>c</sup>	6,990 ± 0,310 <sup>c</sup>	4,848 ± 0,147 <sup>b</sup>	4,292 ± 0,359 <sup>b</sup>	9,801 ± 0,382 <sup>d</sup>	<0.0001 <sup>1</sup>
<b>Mg</b>							
Bovino	163,701 ± 3,350 <sup>d</sup>	89,620 ± 4,365 <sup>a</sup>	101,292 ± 4,619 <sup>a</sup>	130,909 ± 4,492 <sup>b</sup>	146,796 ± 4,537 <sup>c</sup>	184,385 ± 6,549 <sup>e</sup>	<0.0001 <sup>1</sup>

Suíno	$91,005 \pm 9,025^a$	$154,479 \pm 13,662^{b,c}$	$100,856 \pm 14,277^a$	$132,764 \pm 5,060^b$	$142,845 \pm 8,152^b$	$172,659 \pm 10,835^c$	$<0,0001^1$
<b>Mn</b>							
Bovino	$1,275 \pm 0,004^e$	$0,244 \pm 0,007^a$	$0,487 \pm 0,007^c$	$0,351 \pm 0,001^b$	$1,050 \pm 0,011^d$	$0,513 \pm 0,014^c$	$<0,0001^1$
Suíno	$0,803 \pm 0,005^d$	$0,283 \pm 0,007^b$	$<LOD^a$	$<LOD^a$	$1,051 \pm 0,008^e$	$0,389 \pm 0,010^c$	$<0,0001^1$
<b>Mo</b>							
Bovino	$1,206 \pm 0,006^d$	$0,934 \pm 0,009^c$	$0,904 \pm 0,018^b$	$<LOD^a$	$<LOD^a$	$<LOD^a$	$<0,0001^1$
Suíno	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	
<b>Ni</b>							
Bovino	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	
Suíno	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	
<b>Pb</b>							
Bovino	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	
Suíno	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	$<LOD$	
<b>V</b>							

Bovino	0,774 ± 0,015 <sup>c</sup>	0,433 ± 0,010 <sup>a</sup>	0,490 ± 0,037 <sup>a</sup>	0,676 ± 0,010 <sup>b</sup>	0,691 ± 0,006 <sup>b</sup>	1,023 ± 0,038 <sup>d</sup>	<0.0001 <sup>1</sup>
Suíno	0,466 ± 0,012 <sup>a</sup>	0,790 ± 0,015 <sup>c</sup>	0,498 ± 0,013 <sup>a</sup>	0,679 ± 0,015 <sup>b</sup>	0,673 ± 0,018 <sup>b</sup>	1,421 ± 0,022 <sup>d</sup>	<0.0001 <sup>1</sup>
<b>Zn</b>							
Bovino	18,962 ± 0,484 <sup>c</sup>	7,750 ± 0,616 <sup>a</sup>	13,598 ± 0,235 <sup>b</sup>	55,275 ± 0,387 <sup>d</sup>	54,243 ± 0,416 <sup>d</sup>	81,272 ± 0,086 <sup>e</sup>	<0.0001 <sup>1</sup>
Suíno	6,056 ± 0,348 <sup>b</sup>	9,786 ± 0,459 <sup>d</sup>	4,731 ± 0,378 <sup>a</sup>	7,023 ± 0,218 <sup>b,c</sup>	7,410 ± 0,308 <sup>c</sup>	9,699 ± 0,357 <sup>d</sup>	<0.0001 <sup>1</sup>

<LOD: concentração do analito abaixo do limite de detecção. CCA = Arseniato de Cromo de Cobre.

<sup>1</sup> Letras diferentes na mesma linha representam diferença estatística entre os grupos ( $p < 0,05$ ) por ANOVA de uma via seguida pelo teste post hoc de Tukey.

Nota: A comparação pode ser feita apenas entre os diferentes combustíveis para a concentração de um elemento e não entre diferentes concentrações de elementos

Na tabela 6, os teores de metais na fumaça de madeira de *Eucalyptus Citriodora* das amostras de carne bovina foram encontrados na seguinte ordem decrescente: Mg > Zn > Fe > Al > Cu > Mn > Mo > As > V, diferente do quantificado em amostras de lombo de porco com Mg > Zn > Fe > Al > Mn > V > As > Cu > Cr. A fumaça da madeira de *Guazuma ulmifolia* em amostras de carne bovina apresentou concentrações elementares da seguinte forma: Mg > Zn > Al > Cu > Mo > Fe > V > Mn > As, enquanto os elementos na fumaça de lombo de porco decrescem na ordem: Mg > Zn > Al > Fe > V > As > Mn > Cr > Cu. O teor de metais decresceu na ordem de Mg > Al > Zn > Fe > Cu > Mo > Mn = V > Assim como para a fumaça de madeira de *Anadenanthera falcata* em carne bovina, mas na fumaça de amostra de lombo de porco os elementos foram quantificados da seguinte forma: Mg > Al > Fe > Zn > V > As > Cr > Cu. Em relação à fumaça de eucalipto tratada com CCA, a seguinte ordem decrescente de elementos foi obtida para o coxão mole bovino: Mg > Zn > Fe > As > Al > Cu > Cr > V > Mn, enquanto para o lombo de porco a ordem foi Mg > As > Al > Zn > Fe > Cr > Cu > V.

Considerando o grupo do carvão vegetal, temos a concentração de metal na fumaça do *Eucalyptus Citriodora* detectada em coxão mole bovino e lombo suíno, ambos decrescentes da seguinte forma: Mg > Zn > Fe > Al > As > Mn > Cu > V > Cr, e Mg > Al > Zn > Fe > As > Mn > V > Cr > Cu. Além disso, os metais quantificados na fumaça das amostras de carvão vegetal do Cerrado *Guazuma ulmifolia* diminuíram na seguinte ordem para o coxão mole bovino: Mg > Zn > Fe > Al > Cu > V > Cr > Mn > As; e para lombo de porco Mg > Al > Fe > Zn > As > V > Cu > Mn > Cr.

O teor de alumínio na fumaça depositada no coxão mole bovino variou de  $2,629 \pm 0,053$  a  $32,670 \pm 0,611$  mg/kg, e para o lombo suíno de  $2,435 \pm 0,132$  a  $47,440 \pm 0,716$  mg/kg. ANOVA de uma via mostrou que o tipo de biomassa desempenhou um papel no teor de alumínio. O combustível responsável pela maior variação nas amostras de coxão mole bovino e lombo suíno, respectivamente, foi a fumaça do carvão vegetal do Cerrado conhecida como *Guazuma ulmifolia* ( $32,670 \pm 0,611$  mg/kg -  $47,440 \pm 0,716$  mg/kg,  $p < 0,0001$ ), seguida pela fumaça de *Anadenanthera falcata*, outra madeira típica do cerrado brasileiro ( $16,637 \pm 0,226$  mg/kg em coxão mole bovino e  $14,682 \pm 0,162$  mg/kg em lombo suíno,  $p < 0,0001$ ).

Entre os anos de 1950 e 1960 garimpeiros de minas subterrâneas eram encorajados a inalar pó de alumínio diariamente como uma medida para evitar doenças pulmonares decorrentes da inalação contínua de sílica cristalina a que estavam expostos. Este coorte

demonstrou que o alumínio não só era uma medida profilática ineficaz, como também possibilitou avaliar os efeitos a longo prazo dessa exposição por inalação e assim foi encontrada associação entre a exposição ao pó de alumínio e a possibilidade de aumento do risco de doenças cardiovasculares e demência por Alzheimer (PETERS et al., 2013).

Conforme mostrado na tabela 6, a diferença na concentração de As da fumaça em amostras de carne bovina aumentou significativamente com eucalipto tratado com CCA ( $21,163 \pm 0,252$  mg/kg) e carvão de *Eucalyptus citriodora* ( $1,359 \pm 0,033$  mg/kg) ( $p < 0,0001$ ). Enquanto a diferença de concentração medida em amostras de lombo de porco também mostrou maiores concentrações de As com fumaça de Eucalyptus tratado com CCA ( $16,524 \pm 0,155$  mg/kg), seguido pela fumaça de carvão de *Eucalyptus citriodora* e *Guazuma ulmifolia* ( $1,512 \pm 0,067$  -  $1,629 \pm 0,048$  mg/kg), respectivamente ( $p < 0,0001$ ).

O arsênio é de grande interesse para a saúde humana por estarmos expostos a ele diariamente, por todas as vias (inalatória, dérmica e ingestão), ainda que em pequenas quantidades ele é capaz de bioacumular, causando toxicidade potencial cancerígeno. Outra particularidade desse elemento é a alta volatilidade, que faz com que seu transporte e exposição sejam mais comuns (WANG et al., 2018). A exposição ao arsênio através do cigarro e da queima de biomassa é bastante conhecida, e afim de avaliar o risco à saúde humana decorrentes dessa exposição em uma região de usina termoeletrica à carvão, aonde são liberadas partículas atmosférica de As a uma distância de quase 10 km da usina a carvão (MÜLLER et al., 2022). Os estudos de Bradham e colaboradores (2018) e Müller e colaboradores (2022) revelam que há um risco de intoxicação cancerígeno e não cancerígeno para a exposição ao As não dependendo da direção do vento, podendo atingir olhos, rins, pele, fígado, sistemas cardiovascular e nervoso.

A concentração de cromo na fumaça em amostras de carne bovina variou de  $0,033 \pm 0,006$  a  $1,092 \pm 0,026$  mg/kg, enquanto a fumaça de amostras de lenha não apresentou quantidade detectável desse elemento, exceto para madeira de eucalipto tratada. Para amostras de lombo de porco, o teor de cromo na fumaça variou de forma semelhante, entre  $0,084 \pm 0,004$  a  $1,042 \pm 0,087$  mg/kg. Estatisticamente, o teor de cromo quantificado na fumaça difere apenas para *Eucalyptus tratado* ( $p < 0,0001$ ) em ambos os tipos de carne.

Apesar de ser essencial para a saúde, o cromo pode ser bastante tóxico a depender do seu grau de oxidação, conhecidamente cancerígeno e mutagênico, gerando dano ao DNA e morte celular, peroxidação lipídica e aumento de estresse oxidativo quando em concentrações elevadas, principalmente associadas à exposição ocupacional e aos



poluentes ambientais (ASLI et al., 2020). Quando inalado, o cromo pode causar fibrose pulmonar, câncer de pulmão, bronquite crônica, além de dermatite alérgica, úlceras, asma, perfuração do septo nasal, e quando ingerido ele pode causar irritação gastrointestinal, choque cardiocirculatório, entre outros (AZEVEDO; CHASIN, 2003; COZZOLINO; COMINETTI, 2013). Segundo CDC e NIOSH (2017) a exposição ao cromo hexavalente e outros óxidos de metais pesados, associados com práticas incorretas de higiene, podem ser os principais fatores que contribuem para taxas estatisticamente aumentadas de câncer entre bombeiros e outros profissionais de emergência .

Os resultados para os teores de cobre detectados na fumaça de amostras de carne bovina foram maiores em madeira de *Eucalyptus citriodora*  $2,291 \pm 0,020$  mg/kg, seguido por eucalipto tratado  $1,860 \pm 0,053$  mg/kg, enquanto a fumaça de amostras suínas tem maiores quantidades de Cu influenciadas por eucalipto tratado com CCA  $0,943 \pm 0,013$  mg/kg e carvão *Guazuma ulmifolia*  $0,508 \pm 0,088$  mg/kg.

O cobre participa como cofator de diversas reações e quadros de deficiência dessa mineral podem ocasionar distúrbios (GONOODI et al., 2018), contudo, a exposição em doses altas leva a toxicidade hepática (TAYLOR et al., 2020), sintomas neurológicos, coma e morte (HORDYJEWSKA; POPIOŁEK; KOCOT, 2014). Segundo estudo polonês, que avaliou a influencia do cigarro nos níveis corpóreos de cobre, o tabagismo influencia significativamente os níveis de cobre na urina o que pode indicar acúmulo e consequente toxicidade aos órgãos e sistemas (KULIKOWSKA-KARPIŃSKA; ZDANOWICZ; GAŁAŻYN-SIDORCZUK, 2017).

O teor mínimo de ferro nas amostras de carne foi de  $0,905 \pm 0,159$  mg/kg para a fumaça da madeira de *Guazuma ulmifolia* em coxão mole bovino e  $2,841 \pm 0,191$  mg/kg para a fumaça da madeira de *Eucalyptus citriodora* depositada no lombo de porco, enquanto o teor máximo na fumaça foi para o carvão de *Guazuma ulmifolia* com  $53,111 \pm 0,254$  mg/kg e  $9,801 \pm 0,382$  mg/kg em coxão mole bovino e lombo suíno, respectivamente (Tabela 6).

A fumaça de incêndios, assim como a fumaça do cigarro, está associada a diversas manifestações clínicas pulmonares que vão de quadros mais leves até lesões mais graves e irreversíveis, e o ferro é um elemento intimamente ligado a esse processo. Segundo Ghio e colaboradores (2022) a exposição à partículas da fumaça ocasiona uma deficiência de ferro e posterior morte celular.

O teor de magnésio foi alto na fumaça de todas as amostras, no entanto, a biomassa

que mais influenciou nos valores de magnésio foi o carvão *Guazuma ulmifolia* ( $184,385 \pm 6,549$  mg/kg) e a madeira de *Eucalyptus citriodora* ( $163,701 \pm 3,350$  mg/kg),  $p < 0,0001$  ambos depositado em coxão mole bovino, seguido por fumaça de carvão *Guazuma ulmifolia* em lombo suíno ( $172,659 \pm 10,835$  mg/kg)  $p < 0,0001$ .

O magnésio é um cofator essencial para diversas enzimas envolvidas nas atividades celulares, contudo, a exposição ao pó de magnésio pode trazer malefícios agudos imediatamente ou logo após a exposição ao magnésio inalado, com um quadro de “febre da fumaça do metal”, irritação de nariz, garganta pulmão e dificuldade de respirar, e por contato dérmico com irritação na pele e nos olhos (NEW JERSEY DEPARTMENT OF HEALTH, 2008). Exposições repetidas ao pó de magnésio podem causar doenças e efeitos crônicos decorrentes do acúmulo desse elemento, entre eles estão dor de estômago, risco de câncer e riscos reprodutivos (NEW JERSEY DEPARTMENT OF HEALTH, 2008).

Os teores de manganês encontrados na fumaça são mostrados na tabela 6, a maior concentração de Mn para as amostras de carne bovina e lombo suíno ocorreu na fumaça de todas as amostras de *Eucalyptus citriodora*. O Mn para a defumação da madeira de *Eucalyptus citriodora* em coxão mole bovino foi de  $1,275 \pm 0,004$  e lombo suíno  $0,803 \pm 0,005$  mg/kg, enquanto o carvão vegetal de *Eucalyptus citriodora* foi de  $1,050 \pm 0,011$  mg/kg em coxão mole bovino e  $1,051 \pm 0,008$  mg/kg em lombo suíno.

O excesso de manganês, comumente causado pela exposição ocupacional contínua através da respiração de vapores ou poeiras está associada a danos nos pulmões, fígado e rins; distúrbios neurológicos, Parkinson, Alzheimer (NIOSH; CDC, 2020), Huntington (KUMAR et al., 2015), Esclerose Lateral Amiotrófica (BÜYÜKÖZ et al., 2021); disfunção mitocondrial e neurotoxicidade, além desse excesso interferir na homeostase de cálcio e magnésio (ALLSHIRE; BERNARDI; SARIS, 1985).

Os valores de molibdênio foram detectados apenas na fumaça das amostras de carne bovina. A concentração de Mo foi mais influenciada pelo grupo de madeiras, apresentando valores máximos de  $1,206 \pm 0,006$ ,  $0,934 \pm 0,009$  e  $0,904 \pm 0,018$  mg/kg para *Eucalyptus citriodora*, *Guazuma ulmifolia* e *Anadenanthera falcata*, respectivamente.

O molibdênio de alimentos e bebidas não causa nenhum dano, inclusive, parece haver relação entre maiores taxas de câncer de esôfago em regiões com solo deficiente em molibdênio. No entanto, as pessoas expostas a altos níveis de molibdênio no ar e no

solo, como mineiros e metalúrgicos, às vezes desenvolvem dores nas articulações, sintomas semelhantes aos da gota e níveis elevados de ácido úrico no sangue (JOMOVA et al., 2022).

Estudo com fumantes demonstra que enquanto alguns metais, como cádmio, bário, chumbo e antimônio estão aumentados nesses indivíduos, existem outros elementos que acabam sendo mais baixos em indivíduos fumantes, como por exemplo, o molibdênio, mas também mercúrio, berílio, cério, cobalto, platina e tálio (RICHTER et al., 2009).

O Vanádio presente na fumaça veio principalmente do carvão de *Guazuma ulmifolia*, para carne bovina  $1,023 \pm 0,38$  mg/kg e lombo suíno  $1,421 \pm 0,022$  mg/kg,  $p < 0,0001$ . Da mesma forma, na metade inferior da tabela 6 para Zinco, a fumaça na carne bovina mostrou maiores concentrações de zinco para *Guazuma ulmifolia* carvão  $81,272 \pm 0,086$  mg/kg, CCA-Eucalyptus Tratado  $55,275 \pm 0,387$  mg/kg e *Eucalyptus citriodora* carvão  $54,243 \pm 0,416$  mg/kg. Para o lombo suíno, as maiores concentrações de zinco foram para *Guazuma ulmifolia*, carvão  $9,699 \pm 0,357$  mg/kg e madeira  $9,786 \pm 0,459$  mg/kg.

Segundo a IARC o pentóxido de vanádio é classificado como possível cancerígeno para humanos, em crianças o efeito parece ser semelhante ao observado em adultos (IARC, 2006). Quando inalado em altos níveis pode causar danos aos pulmões, enquanto a ingestão em altas doses pode causar náuseas e vômitos. Esse tipo de exposição é mais comum em áreas próximas de indústrias que queimam óleo ou carvão; na fumaça do cigarro, portanto, também pode ser observado em incêndios residenciais e florestais (AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY, 2012). A exposição de trabalhadores ao pentóxido de vanádio na poeira demonstrou que mesmo com o uso de máscaras e luvas de proteção eles estão sujeitos à instabilidade do DNA, biomarcadores para doença cardiovascular e risco aumentado de câncer. devido a exposição ao vanádio transportado pelo ar (EHRlich et al., 2008).

Zinco é um metal essencial para diversos organismos vivos, capaz de atuar como cofator de mais de 300 proteínas e sendo importante para imunidade, reprodução, cognição, porém, quantidades extracelulares elevadas desse metal ativam proteínas responsáveis por garantir a homeostase e evitar a toxicidade por metais (TRUONG-TRAN et al., 2001). Além dos riscos da inalação da fumaça, já conhecidos, sabe-se que os aerossóis de cloreto de zinco são um perigo adicional, por serem extremamente capaz

de absorver a umidade do ar para o trato respiratório e assim se fixarem nesse tecido, causando edema pulmonar, alveolite e até fibrose em fases mais avançadas (HSU et al., 2005). Bombas de fumaça branca são usadas em exercícios militares e treinamento de combate a incêndio, elas contêm entre tantas outras substâncias, partículas finas de cloreto de zinco, para avaliar as reações de indivíduos a esse elemento Xie e Xie (2018) analisou níveis séricos de zinco e constatou que estes estão mais elevados em indivíduos com lesões hepáticas mais graves associadas à inalação da fumaça.

Os resultados acima mostram diferenças na concentração de elementos encontrados na fumaça entre os dois tipos de músculos (carne bovina e lombo suíno) devido à lixiviação de minerais no caldo, mas também à influência das diferentes composições químicas do espécies como a porcentagem de gordura perdida durante o aquecimento (DIACONESCU et al., 2013), junto com a influência dependendo do método de processamento térmico como variações uniformes no tempo, temperatura, oxigenação, umidade, direção da fumaça durante o experimento e a combustão fases para cada combustível (SUSAYA et al., 2010). Por esta razão, os valores de cada elemento não podem ser comparados entre diferentes espécies animais, mas apenas entre tipos de biomassa para cada amostra.

Entre os carcinógenos mais importantes para os programas regulatórios de toxicidade do ar estão metais como (arsênico, cádmio, cromo, berílio e níquel) (IARC, 2016, 2013). Além disso, a exposição cutânea, inalação e ingestão dessas partículas aéreas são vias comuns de exposição ocupacional (ABRAHAM; DOWLING; FLORENTINE, 2017b; BARROS; OLIVEIRA; MORAIS, 2021b; IARC, 2022a).

Em estudo recente avaliando a exposição a poluentes residuais da fumaça de cigarro através do fumo passivo foi possível observar que indivíduos saudáveis quando expostos a roupas impregnadas com fumaça passiva por três horas com 15 minutos de exercício, apresentaram exposição aguda ao fumo passivo semelhante ao fumante não passivo, resultando em aumento dos biomarcadores urinários de dano oxidativo ao DNA, lipídios e proteínas, que mesmo após o término da exposição permaneceram elevados (SAKAMAKI-CHING et al., 2022). Quando analisamos a exposição a fumaça seja ela proveniente de cigarro, carvoarias ou incêndios, o grupo das crianças é o que exige mais atenção para todas as vias de exposição, por terem o hábito de praticar atividades ao ar livre que aumentam a frequência respiratória, por levarem a mão e objetos à boca frequentemente, além da alta ingestão em relação ao peso corpóreo, e a imaturidade dos

sistemas físicos, com órgãos ainda em desenvolvimento e imaturidade imunológica (JACOB et al., 2017; MAHABEE-GITTENS et al., 2021). Matt e colaboradores (2022) observaram para todas as crianças menores de 12 anos alta prevalência de exposição aos químicos do cigarro em mãos e pés, decorrentes de fumo passivo, porém, na ausência deste, demonstrando que é preocupante o acúmulo de resíduos nas superfícies e poeira dos ambientes, principalmente porque não há nível seguro de exposição aos tóxicos da fumaça.

Em geral, os metais absorvidos no pulmão, costumam persistir no corpo com uma meia-vida de anos a décadas, e a excreção ocorre pelos rins e através do trato gastrointestinal (HU, 2000). Portanto, exposições à quantidades maiores de metais são possíveis de serem detectáveis na urina (RICHTER et al., 2009). Por esta razão, alguns estudos entre bombeiros encontraram níveis aumentados de metais após a ocorrência de incêndios. Um estudo realizado no Novo México avaliou a associação de concentrações urinárias de metais com a exposição à fumaça. Para fins de comparação, os resultados obtidos foram classificados em relação às concentrações de referência da Terceira Pesquisa Nacional de Saúde e Nutrição (NHANES III). Concentrações acima do esperado foram observadas para níquel, cério, cromo e urânio em bombeiros e não bombeiros na área queimada. Enquanto os níveis de arsênico e cádmio foram significativamente relacionados à exposição à fumaça para os membros da Guarda Nacional, assim como o cério e o arsênico foram relacionados à exposição à fumaça do fogo para os bombeiros (WOLFE et al., 2004). Ainda segundo Wolfe e colaboradores (2004), as concentrações de metais pesados na urina em ordem decrescente de elementos (Mo > As > Ni > Hg > Cs > Ba > Cd > Cr > Co > Pb > U > W > Be > Sb > Tl > Pt) para a população geral e (Mo > As > Hg > Ni > Cs > Ba > U > Pb > Cr > Cd > Co > W > Be > Sb > Tl > Pt) para bombeiros, o que difere do encontrado neste estudo.

Embora Wolfe e colaboradores (2004) enfatizam que não houve danos agudos aos indivíduos, pois não necessitaram de acompanhamento médico imediato, acreditamos ser perigoso considerar que os metais presentes na urina dos bombeiros têm pouco efeito clínico. e/ou importância para a saúde pública, uma vez que os danos à saúde sofridos pelos bombeiros durante seus anos de serviço são conhecidos e mensuráveis, conforme mencionado por Dobraca e colaboradores (2015), em um estudo de exposições ocupacionais de bombeiros, maiores concentrações sanguíneas de cádmio, chumbo e mercúrio foram observadas em bombeiros com 50 anos ou mais, o que indica efeitos

cumulativos, contrariando a pouca importância clínica e/ou de saúde pública que foi afirmado por Wolfe e colaboradores (2004). Outro achado significativo foi para o cádmio, que apresentou valores sanguíneos mais elevados em bombeiros que lavaram as mãos com menor frequência durante uma ocorrência (DOBRACA et al., 2015), reafirmando a conclusão de estudos anteriores sobre os riscos associados não só à exposição ao material particulado por inalação, mas também por contato dérmico (FABIAN et al., 2010).

De acordo com Burton e cols. (2016) (BURTON et al., 2016), incêndios florestais de grande escala parecem liberar níveis elevados de metais tóxicos - que podem ser inalados - como no Camp Fire, onde pesquisadores encontraram no ar os metais pesados manganês e cálcio mesmo após o incêndio. Os valores de chumbo foram 50 vezes acima da média normal na área próxima, e o zinco aumentou a 150 milhas de distância (CARB, 2021). Outra grande preocupação envolvendo a exposição ocupacional diz respeito à atividade física exigida durante um incêndio, que aumenta a ventilação, levando ao aumento proporcional da quantidade de poluentes inalados (REISEN; HANSEN; MEYER, 2011). Da mesma forma, as crianças expostas a essas áreas são preocupantes e, embora nosso estudo não tenha conseguido comprovar o risco de exposição desse grupo, os estudos são unânimes em afirmar que as crianças são mais susceptíveis ao risco de poluição do ar (LUONG et al., 2020; WHO, 2018), inclusive inalando fumaça de incêndios florestais, pois estão mais expostas a ambientes externos, e que ao mesmo tempo em que realizam atividades mais vigorosas inalam mais fumaça e seus constituintes, sendo um agravante a quantidade de poluentes inalados por quilograma do peso corporal e o fato de que todas essas substâncias podem afetar os pulmões em desenvolvimento (WHO, 2018).

A intoxicação por contato dérmico foi evidenciada no estudo de Fabian et al. (2010) (FABIAN et al., 2010), que avaliaram a deposição de fuligem nos equipamentos de proteção utilizados pelos bombeiros, bem como nas mãos e luvas, sendo possível perceber que além da deposição de fuligem nas superfícies das roupas, ainda houve contaminação por contato com a pele ao retirar esses equipamentos de proteção. Além disso, considerando essa via de exposição, de acordo com o trabalho sul-africano que mostrou a influência da exposição dérmica a metais de mineração no risco carcinogênico e não carcinogênico, a influência dérmica foi maior que a inalação para ambos os riscos, tanto para crianças quanto para adultos (KAMUNDA; MATHUTHU; MADHUKU, 2016). Isso destaca a necessidade de um estudo mais aprofundado dessas vias de

exposição, bem como monitoramento constante e comparação com os limites máximos permitidos recomendados para metais, poeira e cinzas transportados pelo ar. Principalmente durante e após grandes incêndios, a fim de proteger bombeiros e moradores das áreas afetadas, especialmente crianças e profissionais de plantão, da poluição por metais pesados no meio ambiente.

A ingestão é uma via de exposição menos quantificável durante um incêndio, no entanto, quando as partículas finas do fogo foram inaladas, elas podem ser transportadas através do muco e da saliva para o sistema digestivo e isso forma absorvida pelo organismo (ELDER; NORDBERG; KLEINMAN, 2022). Também no pós-fogo, a combustão da biomassa volatiliza os nutrientes liberando alguns metais na atmosfera (ABRAHAM; DOWLING; FLORENTINE, 2017a). Fazendo com que esses metais se tornem mais móveis em áreas recentemente queimadas, que podem ser, em parte, ingeridas. Além disso, associado à dispersão de cinzas e ao aumento da contaminação terrestre, existe o risco de bioacumulação na cadeia alimentar, possivelmente causando problemas de qualidade da água e pode contribuir para preocupações com a saúde humana e ambiental (PAUL et al., 2022). Uma vez que alguns desses produtos químicos causam efeitos deletérios, a exposição humana crônica, mesmo em baixas doses, pode estar associada a doenças crônicas e câncer (ABRAHAM; DOWLING; FLORENTINE, 2017a, 2017b). Na vida cotidiana, os seres humanos são expostos a metais pesados e suas misturas no ar, solo, água e alimentos, e o consumo de produtos/coisas contaminadas pode resultar em problemas de saúde como diabetes, doenças cardiovasculares, neuronais, e distúrbios renais, além do risco de câncer (REHMAN et al., 2018).

Da mesma forma nosso estudo demonstra o risco de exposição associado aos metais presentes no material particulado de incêndios florestais e incêndios estruturais considerando tanto a exposição aguda como a crônica, de acordo também com o revisado em vários trabalhos anteriores (BARROS; OLIVEIRA; MORAIS, 2021a; BURTON et al., 2016; FABIAN et al., 2010, 2014; GAGAS, 2015; REISEN; HANSEN; MEYER, 2011; WOLFE et al., 2004), portanto, é possível perceber que a exposição ocupacional dos bombeiros é capaz de aumentar concentrações de metais na urina e no sangue, tendo efeitos cumulativos.

A maioria dos metais pesados como Pb, Cr (VI), Cd, são considerados altamente tóxicos por inúmeras vias de exposição, incluindo ingestão, inalação e absorção pela pele, sendo que os efeitos mais severos são apresentados na saúde infantil devido ao alto

potencial de toxicidade e a elevada prevalência. Os efeitos nocivos dos elementos na saúde das crianças incluem retardo mental, distúrbios neurocognitivos, distúrbios comportamentais, problemas respiratórios, câncer e doenças cardiovasculares (AL OSMAN; YANG; MASSEY, 2019).

Portanto, gostaríamos de ressaltar que haveria a necessidade de mais pesquisas que testem os metais durante e após o incêndio para uma melhor avaliação da toxicidade em cada condição. Finalmente, as limitações do estudo incluem principalmente a falta de dados capazes de dimensionar todas as partículas emitidas durante o processo de queima do combustível, o que pode ter levado a uma subestimação da concentração elementar e também do risco associado. Por esse motivo, estudos epidemiológicos foram revisados para ajudar a entender a incidência de problemas de saúde associados aos bombeiros. Em segundo lugar, os achados e suas implicações devem ser discutidos no contexto mais amplo possível a partir da perspectiva de estudos anteriores e das hipóteses de trabalho. Para continuar esclarecendo o tema, pesquisas futuras também podem ser necessárias.

## **5.2 Avaliação de Risco à Saúde Humana**

O resultado da avaliação de risco foi descrito para crianças e adultos no quociente de risco (HQ), índice de perigo (HI) e índice de perigo total (Hit), valores considerando a exposição à fumaça por ingestão, dérmica e inalação para grupos de crianças e adultos. Esses resultados, conforme descritos nas tabelas 7 a 9. Valores para HQ, HI e Hit, ao somar os quocientes de risco para exposição simultânea a multimetals e diferentes vias de exposição à fumaça, não levantam preocupações para risco não carcinogênico, no entanto esses dados vem contraindicando o risco cancerígeno exposto a seguir.



**Tabela 7.** Valores do quociente de risco (HQ) para (Al, As, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, V e Zn) em crianças expostas a fumaça de incêndio por Ingestão, Dérmica e Inalação.

HQ crianças	Tipo de carne	Amostras de fumaça	Elementos								
			Al	As	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	V	Zn
<b>Ingestão</b>	Bovina	Madeira <i>Eucalyptus citriodora</i>	1,15E-05	1,24E-02	-	2,51E-04	3,56E-05	3,99E-05	1,06E-03	6,78E-04	2,77E-04
		Madeira <i>Guazuma ulmifolia</i>	2,94E-05	1,29E-03	-	1,74E-04	5,67E-06	7,63E-06	8,19E-04	3,80E-04	1,13E-04
		Madeira <i>Anadenanthera falcata</i>	7,29E-05	2,97E-03	-	1,57E-04	2,11E-05	1,52E-05	7,93E-04	4,30E-04	1,99E-04
		Madeira <i>Eucalyptus tratado</i>	4,86E-05	3,09E-01	1,59E-03	2,04E-04	2,31E-04	1,10E-05	-	5,93E-04	8,08E-04
		Carvão <i>Eucalyptus citriodora</i>	3,01E-05	1,99E-02	4,85E-05	1,13E-04	3,09E-04	3,29E-05	-	6,06E-04	7,93E-04
		Carvão <i>Guazuma ulmifolia</i>	1,43E-04	7,08E-03	1,12E-03	1,16E-04	3,33E-04	1,61E-05	-	8,97E-04	1,19E-03
<b>Dérmica</b>	Bovina	Madeira <i>Eucalyptus citriodora</i>	3,23E-06	1,04E-03	-	7,03E-05	9,97E-06	2,79E-04	2,96E-04	7,31E-03	7,76E-05
		Madeira <i>Guazuma ulmifolia</i>	8,24E-06	1,08E-04	-	4,87E-05	1,59E-06	5,34E-05	2,29E-04	4,09E-03	3,17E-05

		Madeira <i>Anadenanthera falcata</i>	2,04E-05	2,50E-04	-	4,39E-05	5,92E-06	1,07E-04	2,22E-04	4,63E-03	5,56E-05
		Madeira <i>Eucalyptus</i> tratado	1,36E-05	2,60E-02	1,79E-02	5,71E-05	6,46E-05	7,70E-05	-	6,39E-03	2,26E-04
		Carvão <i>Eucalyptus</i> <i>citriodora</i>	8,44E-06	1,67E-03	5,43E-04	3,18E-05	8,66E-05	2,30E-04	-	6,53E-03	2,22E-04
		Carvão <i>Guazuma</i> <i>ulmifolia</i>	4,01E-05	5,95E-04	1,25E-02	3,26E-05	9,31E-05	1,13E-04	-	9,66E-03	3,33E-04
		Madeira <i>Eucalyptus</i> <i>citriodora</i>	9,66E-08	1,04E-05	-	-	-	4,69E-06	1,11E-07	1,42E-06	-
		Madeira <i>Guazuma</i> <i>ulmifolia</i>	2,47E-07	1,08E-06	-	-	-	8,95E-07	8,58E-08	7,95E-07	-
<b>Inalação</b>	Bovina	Madeira <i>Anadenanthera falcata</i>	6,11E-07	2,49E-06	-	-	-	1,79E-06	8,31E-08	9,01E-07	-
		Madeira <i>Eucalyptus</i> tratado	4,07E-07	2,59E-04	2,01E-06	-	-	1,29E-06	-	1,24E-06	-
		Carvão <i>Eucalyptus</i> <i>citriodora</i>	2,53E-07	1,66E-05	6,10E-08	-	-	3,86E-06	-	1,27E-06	-
		Carvão <i>Guazuma</i> <i>ulmifolia</i>	1,20E-06	5,93E-06	1,41E-06	-	-	1,89E-06	-	1,88E-06	-
				Madeira <i>Eucalyptus</i> <i>citriodora</i>	1,07E-05	6,26E-03	-	2,19E-05	1,78E-05	2,52E-05	-

		Madeira <i>Guazuma ulmifolia</i>	3,67E-05	8,50E-03	3,63E-04	2,50E-05	4,19E-05	8,85E-06	-	6,93E-04	1,43E-04
		Madeira <i>Anadenanthera falcata</i>	6,44E-05	4,47E-03	3,72E-04	1,83E-05	4,38E-05	-	-	4,36E-04	6,91E-05
		Madeira <i>Eucalyptus tratado</i>	5,24E-05	2,41E-01	1,52E-03	1,03E-04	3,04E-05	-	-	5,95E-04	1,03E-04
		Carvão <i>Eucalyptus citriodora</i>	3,64E-05	2,21E-02	3,82E-04	2,68E-05	2,69E-05	3,29E-05	-	5,90E-04	1,08E-04
		Carvão <i>Guazuma ulmifolia</i>	2,08E-04	2,38E-02	5,65E-04	5,56E-05	6,14E-05	1,22E-05	-	1,25E-03	1,42E-04
		Madeira <i>Eucalyptus citriodora</i>	2,99E-06	5,26E-04	-	6,12E-06	4,98E-06	1,76E-04	-	4,40E-03	2,48E-05
		Madeira <i>Guazuma ulmifolia</i>	1,03E-05	7,14E-04	4,07E-03	7,01E-06	1,17E-05	6,19E-05	-	7,46E-03	4,00E-05
		Madeira <i>Anadenanthera falcata</i>	1,80E-05	3,75E-04	4,17E-03	5,13E-06	1,23E-05	-	-	4,70E-03	1,94E-05
<b>Dermica</b>	Suína	Madeira <i>Eucalyptus tratado</i>	1,47E-05	2,03E-02	1,71E-02	2,89E-05	8,50E-06	-	-	6,41E-03	2,87E-05
		Carvão <i>Eucalyptus citriodora</i>	1,02E-05	1,86E-03	4,28E-03	7,52E-06	7,53E-06	2,30E-04	-	6,36E-03	3,03E-05
		Carvão <i>Guazuma ulmifolia</i>	5,82E-05	2,00E-03	6,32E-03	1,56E-05	1,72E-05	8,52E-05	-	1,34E-02	3,97E-05

<b>Inalação</b>	Suína	Madeira <i>Eucalyptus citriodora</i>	8,95E-08	5,24E-06	-	-	-	2,95E-06	-	8,57E-07	-
		Madeira <i>Guazuma ulmifolia</i>	3,07E-07	7,13E-06	4,56E-07	-	-	1,04E-06	-	1,45E-06	-
		Madeira <i>Anadenanthera falcata</i>	5,39E-07	3,74E-06	4,68E-07	-	-	-	-	9,14E-07	-
		Madeira <i>Eucalyptus tratado</i>	4,39E-07	2,02E-04	1,92E-06	-	-	-	-	1,25E-06	-
		Carvão <i>Eucalyptus citriodora</i>	3,05E-07	1,85E-05	4,81E-07	-	-	3,86E-06	-	1,24E-06	-
		Carvão <i>Guazuma ulmifolia</i>	1,74E-06	1,99E-05	7,10E-07	-	-	1,43E-06	-	2,61E-06	-

**Tabela 8.** Valores do quociente de risco (HQ) para (Al, As, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, V e Zn) em adultos expostos a fumaça de incêndio por Ingestão, Dérmica e Inalação.

HQ crianças	Tipo de carne	Amostras de fumaça	Elementos								
			Al	As	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	V	Zn
<b>Ingestão</b>	Bovina	Madeira <i>Eucalyptus citriodora</i>	1,23E-06	1,32E-03	-	2,69E-05	3,82E-06	4,28E-06	1,13E-04	7,27E-05	2,97E-05
		Madeira <i>Guazuma ulmifolia</i>	3,15E-06	1,38E-04	-	1,86E-05	6,07E-07	8,17E-07	8,77E-05	4,07E-05	1,21E-05
		Madeira <i>Anadenanthera falcata</i>	7,81E-06	3,18E-04	-	1,68E-05	2,27E-06	1,63E-06	8,49E-05	4,61E-05	2,13E-05
		Madeira <i>Eucalyptus tratado</i>	5,21E-06	3,31E-02	1,71E-04	2,18E-05	2,47E-05	1,18E-06	-	6,35E-05	8,65E-05
		Carvão <i>Eucalyptus citriodora</i>	3,23E-06	2,13E-03	5,19E-06	1,22E-05	3,31E-05	3,52E-06	-	6,49E-05	8,49E-05
		Carvão <i>Guazuma ulmifolia</i>	1,53E-05	7,59E-04	1,20E-04	1,25E-05	3,56E-05	1,72E-06	-	9,61E-05	1,27E-04
<b>Dérmica</b>	Bovina	Madeira <i>Eucalyptus citriodora</i>	1,41E-06	4,53E-04	-	3,07E-05	4,35E-06	1,22E-04	1,29E-04	3,19E-03	3,38E-05
		Madeira <i>Guazuma ulmifolia</i>	3,59E-06	4,72E-05	-	2,12E-05	6,92E-07	2,33E-05	1,00E-04	1,78E-03	1,38E-05

		Madeira <i>Anadenanthera falcata</i>	8,91E-06	1,09E-04	-	1,91E-05	2,58E-06	4,65E-05	9,68E-05	2,02E-03	2,43E-05
		Madeira <i>Eucalyptus</i> tratado	5,93E-06	1,13E-02	7,79E-03	2,49E-05	2,82E-05	3,36E-05	-	2,79E-03	9,87E-05
		Carvão <i>Eucalyptus</i> <i>citriodora</i>	3,68E-06	7,28E-04	2,37E-04	1,39E-05	3,78E-05	1,00E-04	-	2,85E-03	9,68E-05
		Carvão <i>Guazuma</i> <i>ulmifolia</i>	1,75E-05	2,59E-04	5,47E-03	1,42E-05	4,06E-05	4,91E-05	-	4,21E-03	1,45E-04
		Madeira <i>Eucalyptus</i> <i>citriodora</i>	5,45E-08	5,84E-06	-	-	-	2,64E-06	6,25E-08	8,02E-07	-
		Madeira <i>Guazuma</i> <i>ulmifolia</i>	1,39E-07	6,08E-07	-	-	-	5,05E-07	4,84E-08	4,49E-07	-
		Madeira <i>Anadenanthera falcata</i>	3,45E-07	1,41E-06	-	-	-	1,01E-06	4,68E-08	5,08E-07	-
<b>Inalação</b>	Bovina	Madeira <i>Eucalyptus</i> tratado	2,30E-07	1,46E-04	1,13E-06	-	-	7,28E-07	-	7,01E-07	-
		Carvão <i>Eucalyptus</i> <i>citriodora</i>	1,42E-07	9,39E-06	3,44E-08	-	-	2,18E-06	-	7,16E-07	-
		Carvão <i>Guazuma</i> <i>ulmifolia</i>	6,77E-07	3,35E-06	7,94E-07	-	-	1,06E-06	-	1,06E-06	-
<b>Ingestão</b>	Suína	Madeira <i>Eucalyptus</i> <i>citriodora</i>	1,14E-06	6,70E-04	1,14E-06	6,70E-04	1,14E-06	2,70E-06	-	4,38E-05	9,48E-06

		Madeira <i>Guazuma ulmifolia</i>	3,93E-06	9,11E-04	3,93E-06	9,11E-04	3,93E-06	9,48E-07	-	7,42E-05	1,53E-05
		Madeira <i>Anadenanthera falcata</i>	6,90E-06	4,78E-04	6,90E-06	4,78E-04	6,90E-06	-	-	4,67E-05	7,41E-06
		Madeira <i>Eucalyptus tratado</i>	5,61E-06	2,59E-02	5,61E-06	2,59E-02	5,61E-06	-	-	6,38E-05	1,10E-05
		Carvão <i>Eucalyptus citriodora</i>	3,90E-06	2,37E-03	3,90E-06	2,37E-03	3,90E-06	3,53E-06	-	6,33E-05	1,16E-05
		Carvão <i>Guazuma ulmifolia</i>	2,23E-05	2,55E-03	2,23E-05	2,55E-03	2,23E-05	1,30E-06	-	1,33E-04	1,52E-05
		Madeira <i>Eucalyptus citriodora</i>	1,30E-06	2,29E-04	1,30E-06	2,29E-04	1,30E-06	7,68E-05	-	1,92E-03	1,08E-05
		Madeira <i>Guazuma ulmifolia</i>	4,48E-06	3,12E-04	4,48E-06	3,12E-04	4,48E-06	2,70E-05	-	3,26E-03	1,75E-05
		Madeira <i>Anadenanthera falcata</i>	7,86E-06	1,64E-04	7,86E-06	1,64E-04	7,86E-06	-	-	2,05E-03	8,44E-06
<b>Dermica</b>	Suína	Madeira <i>Eucalyptus tratado</i>	6,39E-06	8,85E-03	6,39E-06	8,85E-03	6,39E-06	-	-	2,80E-03	1,25E-05
		Carvão <i>Eucalyptus citriodora</i>	4,44E-06	8,09E-04	4,44E-06	8,09E-04	4,44E-06	1,00E-04	-	2,77E-03	1,32E-05
		Carvão <i>Guazuma ulmifolia</i>	2,54E-05	8,72E-04	2,54E-05	8,72E-04	2,54E-05	3,72E-05	-	5,85E-03	1,73E-05

<b>Inalação</b>	Suína	Madeira <i>Eucalyptus citriodora</i>	5,05E-08	2,96E-06	-	-	-	1,66E-06	-	4,83E-07	-
		Madeira <i>Guazuma ulmifolia</i>	1,73E-07	4,02E-06	2,57E-07	-	-	5,86E-07	-	8,19E-07	-
		Madeira <i>Anadenanthera falcata</i>	3,04E-07	2,11E-06	2,64E-07	-	-	-	-	5,15E-07	-
		Madeira <i>Eucalyptus tratado</i>	2,47E-07	1,14E-04	1,08E-06	-	-	-	-	7,03E-07	-
		Carvão <i>Eucalyptus citriodora</i>	1,72E-07	1,04E-05	2,71E-07	-	-	2,18E-06	-	6,98E-07	-
		Carvão <i>Guazuma ulmifolia</i>	9,83E-07	1,12E-05	4,00E-07	-	-	8,05E-07	-	1,47E-06	-



**Tabela 9.** Valores de HI para riscos não carcinogênico e HI<sub>t</sub> (integrados por via de exposição e total agregado).

Amostras de carne	Grupo populacional	Vias de exposição	Madeira			Carvão		
			<i>Eucalyptus citriodora</i>	<i>Guazuma ulmifolia</i>	<i>Anadenanthera falcata</i>	<i>Eucalyptus tratado</i>	<i>Eucalyptus citriodora</i>	<i>Guazuma ulmifolia</i>
<i>Bovino</i>	Crianças	<b>HI Inh</b>	1.67E-05	3.10E-06	5.87E-06	2.64E-04	2.21E-05	1.23E-05
		<b>HI Ing</b>	1.47E-02	2.81E-03	4.66E-03	3.13E-01	2.18E-02	1.09E-02
		<b>HI Der</b>	9.08E-03	4.57E-03	5.33E-03	5.07E-02	9.32E-03	2.34E-02
		<b>HI<sub>t</sub></b>	<b>0.024</b>	<b>0.007</b>	<b>0.010</b>	<b>0.364</b>	<b>0.031</b>	<b>0.034</b>
	Adultos	<b>HI Inh</b>	9.40E-06	1.75E-06	3.31E-06	1.49E-04	1.25E-05	6.94E-06
		<b>HI Ing</b>	1.58E-03	3.02E-04	4.99E-04	3.35E-02	2.33E-03	1.17E-03
		<b>HI Der</b>	3.96E-03	1.99E-03	2.33E-03	2.21E-02	4.06E-03	1.02E-02
		<b>HI<sub>t</sub></b>	<b>0.006</b>	<b>0.002</b>	<b>0.003</b>	<b>0.056</b>	<b>0.006</b>	<b>0.011</b>
<i>Suíno</i>	Crianças	<b>HI Inh</b>	9.14E-06	1.04E-05	5.66E-06	2.06E-04	2.44E-05	2.64E-05
		<b>HI Ing</b>	6.83E-03	9.82E-03	5.47E-03	2.44E-01	2.33E-02	2.60E-02

	<b>HI Der</b>	5.14E-03	1.24E-02	9.29E-03	4.38E-02	1.28E-02	2.12E-02
	<b>HIIt</b>	<b>0.012</b>	<b>0.022</b>	<b>0.015</b>	<b>0.288</b>	<b>0.036</b>	<b>0.048</b>
Adultos	<b>HI Inh</b>	5.16E-06	5.86E-06	3.19E-06	1.16E-04	1.38E-05	1.49E-05
	<b>HI Ing</b>	7.32E-04	1.05E-03	5.86E-04	2.61E-02	2.50E-03	2.80E-03
	<b>HI Der</b>	2.24E-03	5.40E-03	4.05E-03	1.91E-02	5.58E-03	9.58E-03
	<b>HIIt</b>	<b>0.003</b>	<b>0.006</b>	<b>0.005</b>	<b>0.045</b>	<b>0.008</b>	<b>0.012</b>

Os dados apresentados na tabela 10 demonstram os resultados de risco carcinogênico (CR) para As e Cr pela exposição à fumaça de cinco combustíveis de biomassa brasileiros para crianças e adultos.

**Tabela 10.** Riscos cancerígenos de cada elemento para crianças e adultos por ingestão, exposição, dérmica e inalação.

Risco carcinogênico (CR)	Madeira			Carvão		
		<i>Eucalyptus citriodora</i>	<i>Guazuma ulmifolia</i>	<i>Anadenanther a falcata</i>	<i>Eucalyptus tratado</i>	<i>Eucalyptus citriodora</i>

<b>Bovina</b>	<b>Ingestão</b>	As	Crianças	4.76E-07	4.96E-08	1.15E-07	1.19E-05	7.66E-07	2.73E-07
			Adultos	3.95E-05	2.16E-05	2.45E-05	3.16E-05	3.55E-05	4.45E-05
		Cr	Crianças	-	-	-	2.05E-07	6.23E-09	1.44E-07
			Adultos	-	-	-	8.79E-08	2.67E-09	6.17E-08
	<b>Dermico</b>	As	Crianças	4.00E-08	4.17E-09	9.63E-09	1.00E-06	6.43E-08	2.29E-08
			Adultos	1.35E-05	7.40E-06	8.37E-06	1.08E-05	1.21E-03	1.52E-05
		Cr	Crianças	-	-	-	2.30E-06	6.98E-08	1.61E-06
			Adultos	-	-	-	4.01E-06	1.22E-07	2.82E-06
	<b>Inalação</b>	As	Crianças	2.00E-11	2.08E-12	4.81E-12	5.00E-10	3.21E-11	1.14E-11
			Adultos	4.50E-11	4.69E-12	1.08E-11	1.13E-09	7.24E-11	2.58E-11
Cr		Crianças	-	-	-	8.59E-12	2.61E-13	6.04E-12	
		Adultos	-	-	-	1.94E-11	5.89E-13	1.36E-11	
<b>Suíno</b>	<b>Ingestão</b>	As	Crianças	2.41E-07	3.28E-07	1.72E-07	9.31E-06	8.52E-07	9.18E-07

	Adultos	2.20E-05	3.73E-05	2.44E-05	3.21E-05	3.45E-05	4.17E-05
Cr	Crianças	-	4.67E-08	4.78E-08	1.96E-07	4.92E-08	7.26E-08
	Adultos	-	2.00E-08	2.05E-08	8.39E-08	2.11E-08	3.11E-08
As	Crianças	2.03E-08	2.76E-08	1.45E-08	7.82E-07	7.16E-08	7.71E-08
	Adultos	7.52E-06	1.28E-05	8.33E-06	1.10E-05	1.18E-05	1.43E-05
Cr	Crianças	-	5.23E-07	5.36E-07	2.19E-06	5.51E-07	8.13E-07
	Adultos	-	9.12E-07	9.35E-07	3.83E-06	9.61E-07	1.42E-06
As	Crianças	1.01E-11	1.37E-11	7.22E-12	3.90E-10	3.57E-11	3.85E-11
	Adultos	2.28E-11	3.10E-11	1.63E-11	8.80E-10	8.05E-11	8.68E-11
Cr	Crianças	-	1.96E-12	2.01E-12	8.21E-12	2.06E-12	3.04E-12
	Adultos	-	4.41E-12	4.52E-12	1.85E-11	4.65E-12	6.86E-12

Todas as amostras tiveram HQ, HI e HIIt abaixo de 1 para crianças e adultos em todas as vias de exposição, portanto, mesmo que um indivíduo seja exposto simultaneamente à fumaça de incêndios contendo multielementos por duas ou mais vias, isso não indica dano potencial não cancerígeno para saúde dos humanos. No entanto, quando avaliamos o risco carcinogênico na tabela 10 de considerando o metal na fumaça das madeiras e dos carvões, capaz de se depositar no modelo de carne bovina, é possível perceber que a ingestão de fumaça contendo As por adultos está além dos valores toleráveis estabelecidos para um único elemento  $1 \times 10^{-6}$  (RAIS, 2017), enquanto os valores CR para cromo estão abaixo desses valores para adultos e crianças. O mesmo foi observado para a deposição de fumaça na carne suína por ingestão. Os riscos de exposição dérmica ao As para adultos estão além dos valores toleráveis estabelecidos para humanos estabelecidos pela RAIS, tanto para madeira quanto para o carvão em ambos os modelos de deposição de metais - bovinos e suínos (RAIS, 2017). No entanto, o maior valor de risco carcinogênico para adultos considerando o contato dérmico foi (Carvão, *Eucalyptus citriodora*, CR =  $1,21 \times 10^{-3}$ , em carne bovina) que excedeu os valores toleráveis estabelecidos pela USEPA e pela RAIS (FOWLE; DEARFIELD, 2000; RAIS, 2017). Dando continuidade à avaliação de risco de exposição dérmica para adultos e crianças ao cromo em amostras de bovinos e suínos assados com madeira tratada, e bovinos assados com carvão de *Guazuma ulmifolia*, todos preocupam por serem considerados acima do limite máximo permitido de  $10^{-6}$  para um único elemento (RAIS, 2017). Quanto ao risco carcinogênico por inalação de As e Cr na fumaça, todos os valores são inferiores a  $10^{-6}$ , sem risco à saúde.

De acordo com a classificação de Rapant et al. (2011), é possível observar que CR apresentou distribuição diferente entre amostras de fumaça, onde o destaque do maior risco vai para a exposição dérmica de adultos ao fumaça do carvão vegetal de *Eucalyptus citriodora* através da amostra bovina, risco muito alto ( $> 10^{-3}$ ) para 1 amostra, risco médio ( $10^{-5}$  a  $10^{-4}$ ) para 20 amostras e risco baixo ( $10^{-6}$  a  $10^{-5}$ ) para 12 amostras, sendo o restante

considerado de risco muito baixo ( $< 10^{-6}$ ). Os nossos resultados estão de acordo com os estudos por nós revistos, assim como a recente alteração na classificação de risco da IARC para bombeiros suporta a hipótese de que os incêndios florestais podem ser mais perigosos do que imaginávamos (DEMERS et al., 2022; IARC, 2022a).

Embora os riscos de exposição à fumaça estejam estabelecidos (DEMERS et al., 2022; DONG et al., 2017; REID et al., 2016), o aumento do número de incêndios florestais de grandes proporções apresenta novas faces do problema (consequências) que até então desconhecíamos. O último relatório do Conselho de Recursos Aéreos da Califórnia, que analisou substâncias do incêndio florestal de 2018, encontrou níveis perigosos de metais pesados, principalmente chumbo, no ar (CARB, 2021). Outro estudo recente observou que há uma diferença entre a fumaça de incêndios florestais em comparação com a fumaça de outras fontes e que o dano da exposição ao material particulado de incêndios florestais é maior para esse tipo de fumaça (AGUILERA et al., 2021; KIM et al., 2018).

Além disso, nossos resultados estão de acordo com nossa revisão da literatura, onde a concentração de metais em incêndios pode variar por vários motivos e é um sinal de alerta que requer atenção. Assim, as evidências apresentadas até agora suportam o fato de que os bombeiros estão em perigo ocupacional. Embora nossos resultados sejam limitados a incêndios florestais no Cerrado, Região Centro-Oeste do Brasil, e queimas estruturais/edifícios contendo madeira tratada quimicamente e madeira tradicional do Cerrado, conseguimos detectar a presença de Al, As, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, V e Zn na fumaça dos incêndios. Apesar de suas limitações, o estudo certamente contribui para nossa compreensão da exposição à fumaça de metal, suas características e variáveis.

## 6. CONCLUSÃO

O estudo mostrou que na fumaça produzida por diferentes tipos de madeira e carvão existem elementos como Al, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, V e Zn que podem se depositar na derme, ou serem ingeridos e inalado por adultos e crianças. O uso de equipamentos de segurança individual deve ser eficaz na segurança de profissionais como bombeiros, que são os mais expostos à fumaça dos incêndios.

A avaliação de risco à saúde para todas as amostras (bovina e suína) com três vias indicou que não há um único metal pesado perigoso, mas seu risco cancerígeno indicado pelos cálculos é preocupante. De fato, não há limites seguros para a ingestão, inalação e mesmo contato dérmico de metais pesados quando a exposição é contínua e por longos períodos.

Da mesma forma, mais esforços devem ser direcionados para medir a exposição máxima à fumaça em todos os tipos de incêndio – acreditamos que nossas medições não identificaram a faixa superior de metais pesados com os quais os bombeiros entram em contato por meio de exposições à fumaça. Nossos dados mostraram concentrações acima do limite de risco, considerando apenas o material depositado nas carnes, portanto, futuros trabalhos de caracterização da exposição à fumaça devem considerar formas de medir essa exposição de forma mais completa, a fim de identificar e quantificar esses produtos químicos para melhor avaliação de seu impacto sobre saúde humana. Esse esforço torna-se mais urgente quando pensamos na lacuna existente nas metodologias de avaliação da exposição voltadas para crianças, e na particularidade dos riscos de exposição à população infantil, que é severamente atingida.

## 7. REFERÊNCIAS

ABRAHAM, J.; DOWLING, K.; FLORENTINE, S. The Unquantified Risk of Post-Fire Metal Concentration in Soil: a Review. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 228, n. 5, p. 175, 11 abr. 2017a.

ABRAHAM, J.; DOWLING, K.; FLORENTINE, S. Risk of post-fire metal mobilization into surface water resources: A review. **Science of The Total Environment**, v. 599–600, p. 1740–1755, dez. 2017b.

ABREU, A. et al. Wood smoke exposure of Portuguese wildland firefighters: DNA and oxidative damage evaluation. **Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A**, v. 80, n. 13–15, p. 596–604, 3 ago. 2017.

ADETONA, O. et al. Review of the health effects of wildland fire smoke on wildland firefighters and the public. **Inhalation Toxicology**, v. 28, n. 3, p. 95–139, 2016.

ADETONA, O. et al. Hydroxylated polycyclic aromatic hydrocarbons as biomarkers of exposure to wood smoke in wildland firefighters. **Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology**, v. 27, n. 1, p. 78–83, jan. 2017.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. Toxicological Profile for Vanadium. p. 255, 2012.

AGUILERA, R. et al. Wildfire smoke impacts respiratory health more than fine particles from other sources: observational evidence from Southern California. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 1493, 5 mar. 2021.

AL OSMAN, M.; YANG, F.; MASSEY, I. Y. Exposure routes and health effects of heavy metals on children. **Biometals: An International Journal on the Role of Metal Ions in Biology, Biochemistry, and Medicine**, v. 32, n. 4, p. 563–573, ago. 2019.

ALLSHIRE, A.; BERNARDI, P.; SARIS, N. E. Manganese stimulates calcium flux through the mitochondrial uniporter. **Biochimica Et Biophysica Acta**, v. 807, n. 2, p. 202–209, 3 maio 1985.

ANDERSON, S. E.; MEADE, B. J. Potential Health Effects Associated with Dermal Exposure to Occupational Chemicals. **Environmental Health Insights**, v. 8, n. Suppl 1, p. 51–62, 17 dez. 2014.

AOAC. **AOAC Guidelines for Single Laboratory Validation of Chemical Methods for Dietary Supplements and Botanicals**. Arlington: Association of Official Analytical Chemists, 2002. Disponível em: <<http://www.eoma.aoc.org/appendices.asp>>.



ARI, A. et al. Source characterization and risk assessment of occupational exposure to volatile organic compounds (VOCs) in a barbecue restaurant. **Building and Environment**, v. 174, p. 106791, maio 2020.

ASIMAKI, K. et al. Bovine In Vitro Oocyte Maturation and Embryo Production Used as a Model for Testing Endocrine Disrupting Chemicals Eliciting Female Reproductive Toxicity With Diethylstilbestrol as a Showcase Compound. **Frontiers in Toxicology**, v. 4, 2022.

ASLI, M. et al. Copper, iron, manganese, zinc, cobalt, arsenic, cadmium, chrome, and lead concentrations in liver and muscle in iranian camel (*Camelus dromedarius*). **Biological trace element research**, v. 194, n. 2, p. 390–400, 2020.

AZEVEDO, F. A. D.; CHASIN, A. A. D. M. **Metais: gerenciamento da toxicidade**. São Paulo: Editora Atheneu, 2003.

BARROS, B.; OLIVEIRA, M.; MORAIS, S. Urinary biohazard markers in firefighters. Em: **Advances in Clinical Chemistry**. [s.l.] Elsevier, 2021a. v. 105p. 243–319.

BARROS, B.; OLIVEIRA, M.; MORAIS, S. Firefighters' occupational exposure: Contribution from biomarkers of effect to assess health risks. **Environment International**, v. 156, p. 106704, 1 nov. 2021b.

BENSON, N. U. et al. Toxic metals in cigarettes and human health risk assessment associated with inhalation exposure. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 12, p. 619, 8 nov. 2017.

BRADHAM, K. D. et al. In vivo and in vitro methods for evaluating soil arsenic bioavailability: relevant to human health risk assessment. **Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B**, v. 21, n. 2, p. 83–114, 17 fev. 2018.

BRASIL et al. **Diretrizes para elaboração de estudo de avaliação de risco à saúde humana por exposição a contaminantes químicos**. Ministério da Saúde, , 2010. Disponível em: <<http://www.saude.ba.gov.br/wp-content/uploads/2021/05/Diretrizes-para-elaboracao-de-estudo-de-avaliacao-de-risco-a-saude-humana-por-exposicao-a-contaminantes-quimicos.pdf>>

BURTON, C. A. et al. Trace Elements in Stormflow, Ash, and Burned Soil following the 2009 Station Fire in Southern California. **PLOS ONE**, v. 11, n. 5, p. e0153372, 4 maio 2016.

BÜYÜKÖZ, M. et al. Investigation of some variations of superoxide dismutase gene family in Turkish sporadic amyotrophic lateral sclerosis patients. **Brain Disorders**, v. 3, p. 100013, 1 set. 2021.

CARB. **Camp Fire Air Quality Data Analysis**. [s.l.] California Air Resources Board (CARB), 2021. Disponível em: <[https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2021-07/Camp\\_Fire\\_report\\_July2021.pdf?utm\\_medium=email&utm\\_source=govdelivery](https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2021-07/Camp_Fire_report_July2021.pdf?utm_medium=email&utm_source=govdelivery)>. Acesso em: 31 ago. 2022.

CDC, C. F. D. C. A. P. **What Are the Risk Factors for Lung Cancer?** Disponível em: <[https://www.cdc.gov/cancer/lung/basic\\_info/risk\\_factors.htm](https://www.cdc.gov/cancer/lung/basic_info/risk_factors.htm)>. Acesso em: 17 jan. 2023.

CDC, C. F. D. C. A. P.; NIOSH, N. I. F. O. S. A. H. **Hygenall Corporation Announces New Firefighter Safety Protocols - CDC/NIOSH Licensed Science Used to Protect Firefighters**. , 2017. Disponível em: <<https://hygenall.com/wp-content/uploads/2017/05/New-Firefighter-Hygiene-Practices-Press-Release.pdf>>

CHOI, J.-H. et al. Pulmonary function decline in firefighters and non-firefighters in South Korea. **Annals of Occupational and Environmental Medicine**, v. 26, n. 1, p. 9, 25 abr. 2014.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR. **Manual Técnico Bombeiro Militar Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais (CBMMS10-MTBM06.001), no âmbito do Corpo de Bombeiros Militar de Mato Grosso do Sul. PORTARIA N.º 004/BM-3/EMG, DE 14 DE DEZEMBRO DE 2015**. , 2015. Disponível em: <<https://legislacao.bombeiros.ms.gov.br/?p=865>>. Acesso em: 13 jan. 2023

CORREA, D. B. et al. Increased burned area in the Pantanal over the past two decades. **Science of The Total Environment**, v. 835, p. 155386, 20 ago. 2022.

CORSINI, E. et al. Comparison of wood smoke PM<sub>2.5</sub> obtained from the combustion of FIR and beech pellets on inflammation and DNA damage in A549 and THP-1 human cell lines. **Archives of Toxicology**, v. 87, n. 12, p. 2187–2199, dez. 2013.

COWELL, K. **Heavy Metal Exposure & Cancer: highlights the risks firefighters face being exposed to heavy metals and offers ideas for better-protecting firefighters on scene**. Disponível em: <<https://www.firehouse.com/safety-health/cancer-prevention/article/12382365/firefighter-heavy-metal-exposure-and-cancer>>. Acesso em: 17 jan. 2023.

COZZOLINO, S. M. F.; COMINETTI, C. **Bases bioquímicas e fisiológicas da nutrição: nas diferentes fases da vida, na saúde e na doença**. Barueri: Manole, 2013.

DAHMARDEH BEHROOZ, R. et al. Human health risk assessment for toxic elements in the extreme ambient dust conditions observed in Sistan, Iran. **Chemosphere**, v. 262, p. 127835, 1 jan. 2021.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de Alimentos de Fennema**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2010.

DE VOS, A. et al. Respiratory irritants in Australian bushfire smoke : air toxics sampling in a smoke chamber and during prescribed burns. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 56, n. 3, p. 380–388, 2009.

DEMERS, P. A. et al. Carcinogenicity of occupational exposure as a firefighter. **The Lancet Oncology**, v. 23, n. 8, p. 985–986, 1 ago. 2022.

DHHS, D. O. H. A. H. S.; CDC, C. F. D. C. A. P.; NIOSH, N. I. F. O. S. A. H. **NIOSH Pocket guide to chemical hazards**. NIOSH Publications, , 2007. Disponível em: <<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-149/pdfs/2005-149.pdf>>

DIACONESCU, C. et al. Influence of cooking methods over the heavy metal and lipid content of fish meat. **Romanian Biotechnological Letters**, v. 18, p. 8279–8283, 2013.

DOBRACA, D. et al. Biomonitoring in California Firefighters. **Journal of Occupational and Environmental Medicine**, v. 57, n. 1, p. 88–97, jan. 2015.

DONG, T. T. T. et al. In vitro assessment of the toxicity of bushfire emissions: A review. **Science of The Total Environment**, v. 603–604, p. 268–278, dez. 2017.

EASTER, E.; LANDER, D.; HUSTON, T. Risk assessment of soils identified on firefighter turnout gear. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, v. 13, n. 9, p. 647–657, set. 2016.

E. EVANS, D.; W. FENT, K. Ultrafine and respirable particle exposure during vehicle fire suppression. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 17, n. 10, p. 1749–1759, 2015.

EHRlich, V. A. et al. Inhalative Exposure to Vanadium Pentoxide Causes DNA Damage in Workers: Results of a Multiple End Point Study. **Environmental Health Perspectives**, v. 116, n. 12, p. 1689–1693, dez. 2008.

ELDER, A.; NORDBERG, Gunnar F.; KLEINMAN, M. Chapter 3 - Exposure, dose, and toxicokinetics of metals\*\*This chapter is partly based on the chapter “Routes of Exposure, Dose, and Toxicokinetics of Metals” by Alison Elder, Gunnar F. Nordberg, and Michael Kleinman in the fourth edition of this handbook. Em: NORDBERG, G. F.;

COSTA, M. (Eds.). **Handbook on the Toxicology of Metals (Fifth Edition)**. [s.l.] Academic Press, 2022. p. 55–86.

ENGELSMAN, M. et al. Exposure to metals and semivolatile organic compounds in Australian fire stations. **Environmental Research**, v. 179, n. Pt A, p. 108745, dez. 2019.

ENGELSMAN, M. et al. Biomonitoring in firefighters for volatile organic compounds, semivolatile organic compounds, persistent organic pollutants, and metals: A systematic review. **Environmental Research**, v. 188, p. 109562, set. 2020.

EUROPEAN COMMISSION; WORLD HEALTH ORGANIZATION (EDS.). **Guidelines for concentration and exposure-response measurement of fine and ultra fine particulate matter for use in epidemiological studies**. Publications Office of the European Union, , 2000. Disponível em: <<http://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1753977c-5f1e-49d0-8679-3b225801eb57>>. Acesso em: 19 nov. 2020

FABIAN, T. et al. **Firefighter Exposure to Smoke Particulates (EMW-2007-FP-02093)**. [s.l: s.n.].

FABIAN, T. Z. et al. Characterization of Firefighter Smoke Exposure. **Fire Technology**, v. 50, n. 4, p. 993–1019, 1 jul. 2014.

FEARNSIDE, P. M. **Destruição e Conservação da Floresta Amazonica-Prova**. 1<sup>a</sup> ed. Manaus: INPA, 2022.

FLISIKOWSKA, T.; KIND, A.; SCHNIEKE, A. Pigs as models of human cancers. **Theriogenology**, v. 86, n. 1, p. 433–437, jul. 2016.

FOURNEL, S. et al. Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops. **Applied Energy**, v. 141, p. 247–259, 1 mar. 2015.

FOWLE, J. R.; DEARFIELD, K. L. **Science policy council handbook: Risk characterization**. Washington, DC American Psychological Association, , 2000. Disponível em: <<http://doi.apa.org/get-pe-doi.cfm?doi=10.1037/e519222012-001>>. Acesso em: 27 jun. 2022

GABBAN, A.; SAN-MIGUEL-AYANZ, J.; VIEGAS, D. X. **Assessment of Forest Fire Risk in European Mediterranean Region: Comparison of Satellite-Derived and Meteorological Indices**. Luxemburgo (Luxemburgo): OPOCE, 2008. Disponível em: <<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC49371>>. Acesso em: 6 jan. 2023.

GAGAS, D. F. **Characterization of Contaminants on Firefighter's Protective Equipment A Firefighter's Potential Exposure to Heavy Metals During a Structure Fire**. Online Theses and Dissertations—[s.l.] Eastern Kentucky University, 2015.

GHIO, A. J. et al. Cigarette Smoke Particle-Induced Lung Injury and Iron Homeostasis. **International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease**, v. 17, p. 117–140, 12 jan. 2022.

GIODA, A. Comparação dos níveis de poluentes emitidos pelos diferentes combustíveis utilizados para cocção e sua influência no aquecimento global. **Química Nova**, v. 41, n. 8, p. 839–848, 2018.

GONOODI, K. et al. Serum and dietary zinc and copper in Iranian girls. **Clinical Biochemistry**, v. 54, p. 25–31, 1 abr. 2018.

GOYER, R. A.; CLARKSON, T. W. Toxic effects of metals. Em: **Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons**. 6. ed. New York: Mc-Graw-Hil, 2001. p. 811–867.

GUIMARÃES, R. M. et al. Estabelecimento de agentes e atividades ocupacionais carcinogênicas prioritárias para a vigilância em saúde no Brasil. **Revista Brasileira de Medicina do Trabalho**, v. 17, n. 2, p. 254–259, 2019.

HIDAJAT, M. et al. Lifetime exposure to rubber dusts, fumes and N-nitrosamines and cancer mortality in a cohort of British rubber workers with 49 years follow-up. **Occupational and Environmental Medicine**, v. 76, n. 4, p. 250–258, abr. 2019.

HORDYJEWSKA, A.; POPIOŁEK, Ł.; KOCOT, J. The many “faces” of copper in medicine and treatment. **Biometals: An International Journal on the Role of Metal Ions in Biology, Biochemistry, and Medicine**, v. 27, n. 4, p. 611–621, ago. 2014.

HSU, H.-H. et al. Zinc chloride (smoke bomb) inhalation lung injury: clinical presentations, high-resolution CT findings, and pulmonary function test results. **Chest**, v. 127, n. 6, p. 2064–2071, jun. 2005.

HU, H. Exposure to metals. **Primary Care**, v. 27, n. 4, p. 983–996, dez. 2000.

IARC. **Outdoor Air Pollution**. Lyon, France: [s.n.]. v. 109

IARC. **IARC Monographs evaluate the carcinogenicity of occupational exposure as a firefighter**. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer (IARC), the cancer agency of the World Health Organization (WHO), 2022a. Disponível em: <[https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2022/07/pr317\\_E.pdf](https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2022/07/pr317_E.pdf)>.

IARC. **IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans – List of Classifications**. Disponível em: <<https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>>. Acesso em: 27 jun. 2022b.

IARC, I. A. FOR R. ON C. **IARC Monographs - Vanadium oxide**. [s.l.] Various, 2006. Disponível em: <<https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/06/mono86-10.pdf>>.

IARC, I. A. FOR R. ON C. **A review of human carcinogens. Part F: Chemical agents and related occupations**. [s.l.] IARC, 2012.

IARC, I. A. FOR R. ON C. (ED.). **Air Pollution and Cancer**. 161. ed. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer, 2013.

IWATA, H.; OKADA, K. Greenhouse gas emissions and the role of the Kyoto Protocol. **Environmental Economics and Policy Studies**, v. 16, n. 4, p. 325–342, 2014.

JACOB, P. et al. Thirdhand Smoke: New Evidence, Challenges, and Future Directions. **Chemical Research in Toxicology**, v. 30, n. 1, p. 270–294, 17 jan. 2017.

JALILIAN, H. et al. Cancer incidence and mortality among firefighters. **International Journal of Cancer**, v. 145, n. 10, p. 2639–2646, 2019.

JESUS, J. B. DE et al. Análise da incidência temporal, espacial e de tendência de fogo nos biomas e unidades de conservação do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 176–191, mar. 2020.

JOHNSEN, H. L. et al. Dust exposure assessed by a job exposure matrix is associated with increased annual decline in FEV1: a 5-year prospective study of employees in Norwegian smelters. **American journal of respiratory and critical care medicine**, v. 181, n. 11, p. 1234–1240, 2010.

JOMOVA, K. et al. Essential metals in health and disease. **Chemico-Biological Interactions**, v. 367, p. 110173, 1 nov. 2022.

JOSE, J.; SRIMURUGANANDAM, B. Investigation of road dust characteristics and its associated health risks from an urban environment. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 42, n. 9, p. 2819–2840, set. 2020.

JOSHI, A. D. et al. Meat intake, cooking methods, dietary carcinogens, and colorectal cancer risk: findings from the Colorectal Cancer Family Registry. **Cancer Medicine**, v. 4, n. 6, p. 936–952, 2015.

KABIR, E.; KIM, K.-H.; YOON, H. O. Trace metal contents in barbeque (BBQ) charcoal products. **Journal of Hazardous Materials**, v. 185, n. 2, p. 1418–1424, 2011.

KABIR, M. H. et al. Assessment of Bioaccessibility and Health Risks of Toxic Metals in Roadside Dust of Dhaka City, Bangladesh. **Atmosphere**, v. 13, n. 3, p. 488, 2022.

KAMUNDA, C.; MATHUTHU, M.; MADHUKU, M. Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from Witwatersrand Gold Mining Basin, South Africa. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 13, n. 7, p. 663, jul. 2016.

KÄSER, T. Swine as biomedical animal model for T-cell research—Success and potential for transmittable and non-transmittable human diseases. **Molecular Immunology**, v. 135, p. 95–115, 1 jul. 2021.

KIM, S.-Y. et al. Lung Function in Workers at Small Foundries. **Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine**, v. 23, n. 3, p. 317–323, 30 set. 2011.

KIM, Y. H. et al. Mutagenicity and Lung Toxicity of Smoldering vs. Flaming Emissions from Various Biomass Fuels: Implications for Health Effects from Wildland Fires. **Environmental Health Perspectives**, v. 126, n. 1, p. 017011, 2018.

KRAVCHENKO, J. et al. A review of the health impacts of barium from natural and anthropogenic exposure. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 36, n. 4, p. 797–814, 1 ago. 2014.

KULIKOWSKA-KARPIŃSKA, E.; ZDANOWICZ, M.; GAŁAŻYN-SIDORCZUK, M. Estimation of copper in the urine of cigarette smokers. **Wiadomosci Lekarskie (Warsaw, Poland: 1960)**, v. 70, n. 4, p. 697–702, 2017.

KUMAR, K. K. et al. Untargeted metabolic profiling identifies interactions between Huntington's disease and neuronal manganese status. **Metallomics: Integrated Biometal Science**, v. 7, n. 2, p. 363–370, fev. 2015.

LAO, J.-Y. et al. Importance of Dermal Absorption of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Derived from Barbecue Fumes. **Environmental Science & Technology**, v. 52, n. 15, p. 8330–8338, 7 ago. 2018.

LAO, J.-Y. et al. Dermal exposure to particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from barbecue fume as impacted by physicochemical conditions. **Environmental Pollution**, v. 260, p. 114080, 1 maio 2020.

LEITE, L. C. S. et al. Human Health Risk Assessment through Roasted Meats Consumption. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 18, p. 6737, 2020.

- LEMASTERS, G. K. et al. Cancer Risk Among Firefighters: A Review and Meta-analysis of 32 Studies: **Journal of Occupational and Environmental Medicine**, v. 48, n. 11, p. 1189–1202, nov. 2006.
- LI, F. et al. Toxic metals in top selling cigarettes sold in China: Pulmonary bioaccessibility using simulated lung fluids and fuzzy health risk assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 124131, dez. 2020.
- LI, P. et al. Association between particulate matter and its chemical constituents of urban air pollution and daily mortality or morbidity in Beijing City. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 1, p. 358–368, 1 jan. 2015.
- LONG, G. L.; WINEFORDNER, J. D. Limit of detection. A closer look at the IUPAC definition. **Analytical chemistry**, v. 55, n. 7, p. 712A-724A, 1983.
- LUONG, L. T. M. et al. Particulate air pollution in Ho Chi Minh city and risk of hospital admission for acute lower respiratory infection (ALRI) among young children. **Environmental Pollution**, v. 257, p. 113424, 1 fev. 2020.
- MA, F. et al. Cancer incidence in Florida professional firefighters, 1981 to 1999. **Journal of Occupational and Environmental Medicine**, v. 48, n. 9, p. 883–888, set. 2006.
- MAHABEE-GITTENS, E. M. et al. Differential associations of hand nicotine and urinary cotinine with children's exposure to tobacco smoke and clinical outcomes. **Environmental Research**, v. 202, p. 111722, nov. 2021.
- MARQUES FILHO, E. P. et al. Atmospheric surface layer characteristics of turbulence above the Pantanal wetland regarding the similarity theory. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 6–7, p. 883–892, jun. 2008.
- MATT, G. E. et al. Prevalence and Income-Related Disparities in Thirdhand Smoke Exposure to Children. **JAMA Network Open**, v. 5, n. 2, p. e2147184, 7 fev. 2022.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Queimadas e incêndios florestais: alerta de risco sanitário e recomendações para a população**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2020.
- MOHAMMADI, A. A. et al. Carcinogenic and non-carcinogenic health risk assessment of heavy metals in drinking water of Khorramabad, Iran. **MethodsX**, v. 6, p. 1642–1651, 19 jul. 2019.
- MÜLLER, L. et al. Human health risk assessment of arsenic in a region influenced by a large coal-fired power plant. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. 1, p. 281–288, jan. 2022.



NEVES, H. et al. Mortalidade por câncer em trabalhadores da indústria da borracha de São Paulo. **Revista de Saúde Pública**, v. 40, n. 2, p. 271–279, abr. 2006.

NEW JERSEY DEPARTMENT OF HEALTH. **Hazardous Substance Fact Sheet: Magnesium**. , 2008. Disponível em: <<https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1136.pdf>>

NIOSH, N. I. F. O. S. A. H.; CDC, C. F. D. C. A. P. **Workplace Safety and Health Topics: Manganese**. Disponível em: <<https://www.cdc.gov/niosh/topics/manganese/default.html>>. Acesso em: 24 jan. 2023.

NTP, N. T. P. **Health Effects Assessments: Assessments to identify cancer and noncancer hazards for the Report on Carcinogens (RoC)**. Disponível em: <<https://ntp.niehs.nih.gov/whatwestudy/assessments/index.html>>. Acesso em: 17 jan. 2023.

PARK, M.-H. et al. Pulmonary Functions and Related Factors in Shipyard Workers. **Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine**, v. 23, n. 3, p. 324–332, 30 set. 2011.

PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. **DIRECTIVA 2004/107/CE. Directiva relativa ao arsénio, ao cádmio, ao mercúrio, ao níquel e aos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos no ar ambiente**. , 15 dez. 2004. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:023:0003:0016:PT:PDF>>

PAUL, M. J. et al. Wildfire Induces Changes in Receiving Waters: A Review With Considerations for Water Quality Management. **Water Resources Research**, v. 58, n. 9, p. e2021WR030699, 2022.

PAUSAS, J. G.; KEELEY, J. E. Wildfires as an ecosystem service. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 17, n. 5, p. 289–295, jun. 2019.

PETERS, S. et al. Long-term effects of aluminium dust inhalation. **Occupational and Environmental Medicine**, v. 70, n. 12, p. 864–868, dez. 2013.

PINTO, E. et al. Metals transfer from tobacco to cigarette smoke: Evidences in smokers' lung tissue. **Journal of Hazardous Materials**, v. 325, p. 31–35, 5 mar. 2017.

RAIS. **The Risk Assessment Information System in the Risk Exposure Models for Chemicals User's Guide**. Disponível em: <[https://rais.ornl.gov/tools/rais\\_chemical\\_risk\\_guide.html](https://rais.ornl.gov/tools/rais_chemical_risk_guide.html)>. Acesso em: 25 jan. 2023.

RAPANT, S. et al. Application of health risk assessment method for geological environment at national and regional scales. **Environmental Earth Sciences**, v. 64, n. 2, p. 513–521, 1 set. 2011.

REHMAN, K. et al. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. **Journal of Cellular Biochemistry**, v. 119, n. 1, p. 157–184, jan. 2018.

REID, C. E. et al. Critical Review of Health Impacts of Wildfire Smoke Exposure. **Environmental Health Perspectives**, v. 124, n. 9, p. 1334–1343, set. 2016.

REISEN, F.; HANSEN, D.; MEYER, C. P. (MICK). Exposure to bushfire smoke during prescribed burns and wildfires: Firefighters' exposure risks and options. **Environment International**, v. 37, n. 2, p. 314–321, fev. 2011.

RICHTER, P. A. et al. Tobacco Smoke Exposure and Levels of Urinary Metals in the U.S. Youth and Adult Population: The National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 1999–2004. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 6, n. 7, p. 1930–1946, 2009.

ROCHA, J. C.; ROSA, A. H.; CARDOSO, A. A. **Introdução à Química Ambiental**. [s.l.] Artmed Editora, 2009.

SAH, D. et al. Chemical fractionation, bioavailability, and health risks of heavy metals in fine particulate matter at a site in the Indo-Gangetic Plain, India. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 26, n. 19, p. 19749–19762, jul. 2019.

SAKAMAKI-CHING, S. et al. Dermal thirdhand smoke exposure induces oxidative damage, initiates skin inflammatory markers, and adversely alters the human plasma proteome. **eBioMedicine**, v. 84, 1 out. 2022.

SALIS, S. M. et al. Changes in the structure due to strong winds in forest areas in the Pantanal, Brazil. **CERNE**, v. 18, p. 387–395, set. 2012.

SANTOS, A. B. DOS; LIMA, T. L. DE. A ineficácia da legislação Brasileira no combate às queimadas ilegais e incêndios na floresta Amazônica. **NATIVA - Revista de Ciências, Tecnologia e Inovação**, v. 2, n. 1, p. 223–237, 11 jul. 2022.

SCALIA, C. R. et al. Epitope Recognition in the Human–Pig Comparison Model on Fixed and Embedded Material. **Journal of Histochemistry and Cytochemistry**, v. 63, n. 10, p. 805–822, out. 2015.

SCHRAUFNAGEL, D. E. The health effects of ultrafine particles. **Experimental & Molecular Medicine**, v. 52, n. 3, p. 311–317, mar. 2020.

SHARP, A.; TURNER, A. Concentrations and bioaccessibilities of trace elements in barbecue charcoals. **Journal of Hazardous Materials**, v. 262, p. 620–626, 2013.

SOTERIADES, E. S. et al. Cancer Incidence and Mortality in Firefighters: A State-of-the-Art Review and Meta-Analysis. **Asian Pacific Journal of Cancer Prevention**, v. 20, n. 11, p. 3221–3231, 1 nov. 2019.

SOUZA, A. et al. The effects of forest fires on hospital admissions for respiratory diseases. p. 23, 2021.

SUNYER, J. et al. Lung function decline, chronic bronchitis, and occupational exposures in young adults. **American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine**, v. 172, n. 9, p. 1139–1145, 1 nov. 2005.

SUSAYA, J. et al. BBQ charcoal combustion as an important source of trace metal exposure to humans. **Journal of Hazardous Materials**, v. 176, n. 1, p. 932–937, 2010.

TANER, S.; PEKEY, B.; PEKEY, H. Fine particulate matter in the indoor air of barbeque restaurants: Elemental compositions, sources and health risks. **Science of The Total Environment**, v. 454–455, p. 79–87, 2013.

TAYLOR, A. A. et al. Critical review of exposure and effects: Implications for setting regulatory health criteria for ingested copper. **Environmental management**, v. 65, n. 1, p. 131–159, 2020.

THOMPSON, M.; ELLISON, S. L. R.; WOOD, R. Harmonized guidelines for single-laboratory validation of methods of analysis (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 74, n. 5, p. 835–855, 31 maio 2002.

TOMASI, C. et al. Aerosol and Climate Change: Direct and Indirect Aerosol Effects on Climate. **Atmospheric Aerosols: Life Cycles and Effects on Air Quality and Climate**, v. 1, p. 437–551, 2017.

TRUONG-TRAN, A. Q. et al. The role of zinc in caspase activation and apoptotic cell death. **Biometals**, v. 14, n. 3, p. 315–330, 1 set. 2001.

URRUTIA-PEREIRA, M. et al. Impact of exposure to smoke from biomass burning in the Amazon rain forest on human health. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, p. e20210219, 31 out. 2021.

US EPA. **Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part A)**. Part A ed. Washington, DC: [s.n.]. v. 1

US EPA. **Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites**. Washington, DC: [s.n.].

US EPA. **Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment)**. Washington, DC: [s.n.]. v. 1

US EPA. **Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part F, Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment)**. Washington, DC: [s.n.]. v. 1

US EPA. **Exposure Factors Handbook: 2011 Edition**. 2. ed. Washington, DC: [s.n.].

US EPA, O. **Wildland Fire Research Framework 2019-2022**. [s.l.] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OFFICE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT, 2022a. Disponível em: <[https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-04/documents/wildland\\_fire\\_research\\_framework\\_final-tagged.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-04/documents/wildland_fire_research_framework_final-tagged.pdf)>. Acesso em: 13 dez. 2022.

US EPA, O. **How Smoke from Fires Can Affect Your Health: Particulate Matter (PM) Pollution**. Reports and Assessments. Disponível em: <<https://www.epa.gov/pm-pollution/how-smoke-fires-can-affect-your-health>>. Acesso em: 13 jan. 2023b.

US EPA, O. **Regional screening level (RSL) summary table**. Data and Tools. Disponível em: <<https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>>. Acesso em: 24 jun. 2022c.

USDOE. **The Risk Assessment Information System (RAIS). RAIS Toxicity Values and Physical Parameters Search**. Disponível em: <[https://rais.ornl.gov/cgi-bin/tools/TOX\\_search](https://rais.ornl.gov/cgi-bin/tools/TOX_search)>. Acesso em: 10 mar. 2022.

VASSILEV, S. V. et al. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913–933, 1 maio 2010.

VASSILEV, S. V. et al. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. **Fuel**, v. 94, p. 1–33, 1 abr. 2012.

VICENTE, E. D. et al. Particulate and gaseous emissions from charcoal combustion in barbecue grills. **Fuel Processing Technology**, v. 176, p. 296–306, 2018.

WANG, C. et al. Review of arsenic behavior during coal combustion: Volatilization, transformation, emission and removal technologies. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 68, p. 1–28, 1 set. 2018.

WHO. **Air pollution and child health: prescribing clean air: summary**. Switzerland: World Health Organization, 2018. Disponível em: <<https://www.who.int/publications-detail-redirect/WHO-CED-PHE-18-01>>. Acesso em: 30 set. 2022.

WHO, W. H. O. **Ambient (outdoor) air pollution**. Disponível em: <[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)>. Acesso em: 10 jan. 2023.

WOLFE, M. I. et al. Assessment of urinary metals following exposure to a large vegetative fire, New Mexico, 2000. **Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology**, v. 14, n. 2, p. 120–128, mar. 2004.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (ED.). **WHO guidelines for indoor air quality: household fuel combustion**. World Health Organization, , 2014. Disponível em: <<https://www.who.int/airpollution/publications/household-fuel-combustion/en/>>

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Human biomonitoring: facts and figures**. WHO/EURO:2015-3209-42967-60040 ed. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2015.

WORLD HEALTH ORGANIZATION, (WHO). **Global Health Estimates 2020: Deaths by Cause, Age, Sex, by Country and by Region, 2000-2019**. Disponível em: <<https://www.who.int/data/maternal-newborn-child-adolescent-ageing/advisory-groups/gama/activities-of-gama>>. Acesso em: 15 abr. 2021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION, (WHO). **Cancer: Key statistics**. Disponível em: <<https://www.who.int/cancer/resources/keyfacts/en/>>. Acesso em: 17 abr. 2021.

XIE, F.; XIE, L. Serum zinc level is associated with liver dysfunction caused by white smoke inhalation. **Gastroenterology Report**, v. 6, n. 4, p. 304–307, nov. 2018.

ZHENG, N. et al. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China. **Science of The Total Environment**, v. 408, n. 4, p. 726–733, 15 jan. 2010.