

Determinação de arsênio, cádmio, cobre, níquel e selênio em carnes processadas por ICP-MS

Determination of arsenic, cadmium, copper, nickel and selenium in processed meat products by ICP-MS

S. O. Souza^{1,2}; D. V. L. Ávila^{1,3}; S. S. L. Costa³; T. S. Almeida⁴;
T. A. Maranhão⁵; J. B. Pereira Jr⁶; C. A. B. Garcia^{3*}; R. G. O. Araujo^{1,7}

¹Instituto de Química, Departamento de Química Analítica, Universidade Federal da Bahia, 40170-115, Salvador-BA, Brasil

²Departamento de Farmácia, Universidade Federal de Sergipe, 49400-000, Lagarto-SE, Brasil

³Núcleo de Petróleo e Gás, Laboratório de Tecnologia e Monitoramento Ambiental (LTMA), Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-SE, Brasil

⁴Instituto de Química, Departamento de Química Analítica, Universidade de Brasília, 70910-900, Brasília-DF, Brasil

⁵Departamento de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, 88040-900, Florianópolis-SC, Brasil

⁶Departamento de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Feira de Santana, 44036-900, Feira de Santana-BA, Brasil

⁷Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia, INCT, de Energia e Ambiente, Universidade Federal da Bahia, 40170-290, Salvador-BA, Brasil

*carlosabgarcia@gmail.com

(Recebido em 05 de fevereiro de 2025; aceito em 12 de junho de 2025)

Este trabalho propõe a determinação dos elementos químicos As, Cd, Cu, Ni e Se em carnes processadas utilizando espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS). As amostras foram preparadas por digestão ácida com ácido nítrico (HNO₃) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) em um bloco digestor com sistema fechado. Os valores obtidos de limites de quantificação (LQ) foram de 0,04 (As), 0,03 (Cd), 0,07 (Cu), 0,05 (Ni) e 0,21 mg kg⁻¹ (Se). A precisão, expressa como desvio padrão relativo (RSD), foi melhor do que 4,8% (n = 3). A exatidão do método proposto foi avaliada utilizando material de referência certificado (DORM-3, proteína de peixe), com concordância variando entre 90 ± 10% (Cd e Cu) e 102 ± 10% (Ni). A análise das amostras de carnes processadas coletadas em supermercados da cidade de Salvador, Bahia, revelou concentrações médias de 0,45 (As), 2,57 (Cu) e 0,58 (Ni) mg kg⁻¹. Já as concentrações de Cd (0,03 mg kg⁻¹) e Se (0,21 mg kg⁻¹) estavam abaixo dos LQs do método analítico proposto. Os resultados demonstraram que os níveis encontrados de Cd, Cu, Ni e Se nas amostras de carnes processadas atenderam aos limites máximos estabelecidos pela legislação brasileira. No entanto, os níveis de As excederam os limites permitidos em duas das amostras. Porém, são necessários estudos de especiação química para avaliar se a forma de arsênio presente nas matrizes pode ser tóxica para humanos. Palavras-chave: segurança de alimentos, embutidos, ICP-MS.

This work proposes the determination of chemical elements As, Cd, Cu, Ni, and Se in processed meat using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The samples were prepared through acid digestion with nitric acid (HNO₃) and hydrogen peroxide (H₂O₂) in a closed-system digester block. The limits of quantification (LQ) were 0.04 (As), 0.03 (Cd), 0.07 (Cu), 0.05 (Ni), and 0.21 mg kg⁻¹ (Se). The precision, expressed as relative standard deviation (RSD), was better than 4.8% (n = 3). The accuracy of the proposed method was evaluated using certified reference material (DORM-3, fish protein), with agreement ranging from 90 ± 10% (Cd and Cu) to 102 ± 10% (Ni). The analysis of processed meat samples collected from supermarkets in Salvador city, Bahia, revealed mean concentrations of 0.45 (As), 2.57 (Cu), and 0.58 (Ni) mg kg⁻¹. Instead, Cd (0.03 mg kg⁻¹) and Se (0.21 mg kg⁻¹) concentrations were below the LQs of the analytical proposed method. The results showed that the estimated levels of Cd, Cu, Ni, and Se in processed meat samples complied with the maximum limits set by Brazilian legislation. However, As levels exceeded the allowed limits in two samples. However, chemical speciation studies are required to assess whether the forms of arsenic present in the matrices can be toxic to humans.

Keywords: food safety, processed meat, ICP-MS.

1. INTRODUÇÃO

A carne é uma fonte primária de proteínas, gorduras, aminoácidos essenciais, elementos essenciais, além disso, contém níveis significativos de vitaminas B6, B12 e D, entre outras [1, 2]. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2023 foram abatidos 34,06 milhões de bovinos, 6,28 bilhões de frangos e 57,17 milhões de suínos, sendo que grande parte foi utilizada para o preparo de carnes processadas [3]. O termo 'carne processada' refere-se à carne que passou por processos de salga, cura, fermentação, defumação ou outros métodos para melhorar o sabor e a conservação, e pode conter carne de boi, porco e frango, além de órgãos e sangue em algumas misturas [4]. Em muitos países, o consumo excessivo de carne processada tem sido criticado, pois está associado à incidência de doenças crônicas [2].

Um grupo de 22 especialistas de 10 países concordou com a Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC – *International Agency for Research on Cancer*), em 26 de outubro de 2015, na cidade de Lyon, França, que, com base em evidências suficientes, o consumo de carne processada causava câncer retal e classificou a carne processada como carcinogênica para humanos (grupo 1). No entanto, estudos recentes demonstraram que a relação entre o consumo de carne vermelha e processada, e a mortalidade por câncer, é baixa [5, 6]. A carne processada pode conter em sua composição compostos carcinogênicos, como os compostos N-nitroso (NOCs), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e aminas heterocíclicas aromáticas (AHAs), além de substâncias potencialmente carcinogênicas, como dibenzo-p-dioxinas policloradas e benzofuranos (PCDD/Fs), bifenilas policloradas similares à dioxina (PCBs) e alguns elementos químicos que podem apresentar características tóxicas potenciais [7].

A Agência para Registro de Substâncias Tóxicas e Doenças (ATSDR – *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*) estabelece uma classificação para os elementos químicos com base em seu potencial de toxicidade para exposição humana. O ranking de substâncias prioritárias da ATSDR de 2022 lista arsênio, cádmio, níquel, cobre e selênio nas posições 1, 7, 57, 120 e 151, respectivamente. Adicionalmente, a ATSDR classifica o arsênio e o cádmio como carcinogênicos para humanos (grupo 1), o níquel como possivelmente carcinogênico para humanos (grupo 2B) e o selênio não é classificado como carcinogênico para humanos (grupo 3), enquanto o cobre não possui classificação em relação à carcinogenicidade [8, 9].

No Brasil, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) estabelece normas regulamentadoras para o controle de produtos alimentícios de origem animal, abrangendo a fiscalização e monitoramento de medicamentos veterinários, pesticidas, micotoxinas, dioxinas e contaminantes inorgânicos [10]. A regulamentação é imprescindível, pois os alimentos que contêm contaminantes de origem microbiológica ou química constitui um dos principais desafios para a segurança dos consumidores. Nesse contexto, os elementos potencialmente tóxicos representam uma preocupação significativa em virtude de sua toxicidade, capacidade de bioacumulação e biomagnificação ao longo da cadeia alimentar [11, 12].

Para estabelecer limites máximos permitidos para contaminantes inorgânicos em alimentos existem o Decreto nº 55.871, de 26 de março de 1965, do MAPA, e a Resolução nº 42, de 29 de agosto de 2013, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), que estabelecem limites máximos permitidos para As ($0,50 \text{ mg kg}^{-1}$), Cd ($0,05 \text{ mg kg}^{-1}$), Cu (30 mg kg^{-1}), Ni ($5,0 \text{ mg kg}^{-1}$) e Se ($0,30 \text{ mg kg}^{-1}$) em alimentos, incluindo carne processada [13, 14]. Na Europa, por meio dos Regulamentos (EC) nº 1881/2006 e (EU) nº 488/2014, são estabelecidos níveis máximos para certos contaminantes em alimentos: nitrato, micotoxinas, metais (Pb, Cd, Hg e S), dioxinas e PCBs, dentre outros [15, 16].

Na literatura, vários estudos relatam a determinação de As, Cd, Cu, Ni e Se em alimentos utilizando diferentes técnicas, nos quais verificaram sua adequação em relação à legislação pertinente de cada país. Dentre os trabalhos, as concentrações de Cu, Ni e Se foram determinadas por espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) em carne e órgãos de bovinos da França, não observando anormalidade [17]. Škrbić et al. (2013) [18] promoveram a quantificação de As e Cd em carne de boi e ovos da cidade de Novi Sad, Província de Vojvodina, Sérvia, por espectrometria de absorção atômica com atomização eletrotérmica em forno de grafite (GF AAS), os valores estavam concordantes com a legislação do país. Sigrist et al. (2016) [19] avaliaram as concentrações de As em amostras de carne de boi, frango, leite bovino, queijo e ovos

da Província de Santa Fe, Argentina, por espectrometria de absorção atômica com geração de hidretos (HG-AAS) acoplada à análise por injeção de fluxo (FIA), estando de acordo com a legislação. Hu et al. (2018) [20] determinaram as concentrações de As, Cd, Cu, Ni e Se em peito, coxa, moela, coração, rim e fígado de frangos do sudeste da China por ICP-MS, avaliando que As estava em teores acima da legislação. Higuera et al. (2020) [21] quantificaram Cd, Ni e Se em amostras de frango, lombo de cordeiro, carcaça de cordeiro e carne bovina utilizando ICP-MS, estando em conformidade. Além disso, salsichas das cidades de Lisboa, Portugal, e Novi Sad, Sérvia, também foram analisadas para determinação de As e Cd por GF AAS, obedecendo a legislação portuguesa [12].

Por essa razão, estudos científicos contínuos são necessários para avaliar possíveis contaminações em diferentes alimentos, como forma de contribuir para a segurança do consumidor. Portanto, o objetivo deste trabalho foi promover a determinação de As, Cd, Cu, Ni e Se em carnes processadas utilizando a técnica de ICP-MS, e avaliar a presença desses elementos químicos em amostras de carnes processadas comercializadas em Salvador, Bahia, Brasil, conforme a legislação vigente.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Instrumentação

As amostras foram secas em um liofilizador (LIOTOP modelo L 101, São Paulo, Brasil). Para a digestão das amostras e material de referência certificado foi utilizado um bloco digestor com sistema fechado contendo 15 bombas de politetrafluoroetileno (PTFE) (TECNAL modelo TE-007MP, São Paulo, Brasil).

Para as análises químicas das amostras e material de referência certificado foi utilizado um espectrômetro de massas com plasma acoplado indutivamente (modelo NexION 350, PerkinElmer, Estados Unidos América). Os isótopos estáveis de ^{75}As , ^{114}Cd , ^{63}Cu , ^{60}Ni e ^{82}Se foram selecionados e determinados. O isótopo ^{103}Rh foi utilizado como padrão interno. As condições operacionais com o modo padrão do espectrômetro foram otimizadas utilizando uma solução padrão de $10\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$ de Ba, Ce, Co, In, Li e U, permitindo obter a máxima intensidade da razão massa/carga do isótopo (^7Li , ^{59}Co , ^{113}In , ^{137}Ba e ^{238}U), e observar a formação de óxido de cério ($^{140}\text{Ce}^{16}\text{O}^+ / ^{140}\text{Ce}$) abaixo de 1,5%, e a dupla carga ($^{140}\text{Ce}^{2+} / ^{140}\text{Ce}^+$) abaixo de 3,0%. Uma câmara de nebulização ciclônica, com um nebulizador concêntrico, foi usada para a introdução da amostra. O gás argônio utilizado para a geração do plasma tinha uma pureza mínima de 99,998% (White Martins, São Paulo, Brasil). Foram utilizadas a radiofrequência de 40 MHz com 1,2 kW de potência de radiofrequência, e uma vazão de fluxo de gás de nebulização de $1,0\text{ L min}^{-1}$.

2.2 Reagentes e solução padrão

Todos os reagentes utilizados nos experimentos foram de grau analítico. O ácido nítrico 65% (m m^{-1}) e o peróxido de hidrogênio 30% (m m^{-1}) empregados na digestão das amostras foram da Merck, Darmstadt, Alemanha. O ácido nítrico usado para o preparo das soluções da curva de calibração externa e digestão das amostras foi purificado utilizando um aparelho de destilação *sub-boiling* com tubo de quartzo (Kürner Analysentechnik, Rosenheim, Alemanha). A água ultrapura utilizada no preparo das soluções foi obtida através de um sistema de purificação Milli-Q (Millipore, Bedford, MA, EUA) com uma resistividade de $18.2\text{ M}\Omega\text{ cm}^{-1}$. As vidrarias utilizadas nos experimentos foram previamente descontaminadas com uma solução de ácido nítrico 10% (v v^{-1}) por 24h, em seguida, lavadas com água ultrapura e seca a temperatura ambiente [22].

Para as análises por ICP-MS, a partir de uma solução estoque multielementar (Specsol®) contendo As, Cd, Cu, Ni e Se foi preparada uma solução intermediária com $500\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$ de concentração. A curva de calibração com padronização interna foi preparada na faixa de concentração de 10 a $50\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$. Sendo que o elemento químico Rh foi adicionado a uma

concentração de $20 \mu\text{g L}^{-1}$ como padrão interno nas soluções dos brancos, nos padrões da curva de calibração, materiais de referência e amostras.

2.3 Preparo das amostras via úmida

As amostras de carne processada: mortadela, presunto, apresuntado, hambúrguer, salsicha, pepperoni e fiambre foram adquiridas em supermercados da cidade de Salvador, Bahia, Brasil. Elas foram secas em liofilizador por 72 h e moídas manualmente em almofariz e pistilo até a redução do tamanho de partícula menor $\leq 150 \mu\text{m}$, e armazenadas em dessecador até a realização dos experimentos.

Para a digestão das amostras e material de referência certificado foi medida uma massa de aproximadamente $0,2500 (\pm 0,0001)$ g diretamente em bombas de PTFE. Em seguida, nas amostras foram adicionados 2 mL de HNO_3 65% (m m^{-1}), 2 mL de H_2O_2 30% (m m^{-1}) e mantidas em pré-digestão por 30 min. Posteriormente, foram adicionados mais 6 mL de água ultrapura, obtendo um volume total de 10 mL. As bombas de PTFE foram fechadas e submetidas a uma temperatura de 170°C e mantidas durante 2h [18, 21]. Após esse procedimento, os digeridos foram transferidos para tubos de centrífuga de 50 mL, avolumadas com água ultrapura até 15 mL, e mantidas em refrigeração até as análises químicas por ICP-MS. Para estas análises químicas, todas as amostras foram diluídas utilizando um fator de 1:10. Todo o procedimento foi realizado em triplicata, incluindo as soluções dos brancos analíticos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Parâmetros de desempenho do método analítico

Os valores de limites de detecção (LD) e quantificação (LQ) foram calculados com 3 e 10 vezes o desvio padrão de dez medidas das soluções dos brancos analíticos, respectivamente, dividido pela inclinação da curva de calibração de cada elemento químico [22]. Os valores obtidos para o LD variaram entre $0,008$ (Cd) e $0,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (Se), e o LQ variou de $0,03$ (Cd) a $2,0 \text{ mg kg}^{-1}$ (Se), conforme Tabela 1.

Tabela 1: Resultados obtidos para a análise do material de referência certificado (DORM-3, Proteína de peixe), exatidão, precisão e limites de detecção e quantificação.

Parâmetro	As	Cd	Cu	Ni	Se
Limite de detecção (mg kg^{-1})*	0,01	0,008	0,02	0,02	0,06
Limite de quantificação (mg kg^{-1})*	0,04	0,03	0,07	0,05	0,21
Valor certificado (mg kg^{-1})	$6,88 \pm 0,30$	$0,290 \pm 0,020$	$15,5 \pm 0,63$	$1,28 \pm 0,17$	$3,3^a$
Valor encontrado (mg kg^{-1})	$6,45 \pm 0,47$	$0,261 \pm 0,029$	$13,9 \pm 1,67$	$1,31 \pm 0,13$	$3,11 \pm 0,30$
Concordância (%)	94 ± 7	90 ± 10	90 ± 10	102 ± 10	94 ± 9
RSD (%)	2,9	4,5	4,8	3,9	3,9
$t_{\text{calculado}}$	3,89	4,20	4,19	1,00	2,74

Todos os resultados foram expressos como média \pm intervalo de confiança a 95% ($n = 3$); $t_{\text{tabelado}} = 4,303$ ($n = 3$);

*Valores calculados considerando um volume de 15 mL e uma massa de amostra de 250 mg; ^aValor informado no certificado do material de referência.

Os limites de detecção foram comparados com os valores reportados na literatura para a análise dos analitos estudados em amostras de alimentos (Tabela 2), estando de acordo com a mesma.

Tabela 2: Comparação dos limites de detecção (em mg kg⁻¹) obtidos neste estudo com os valores reportados na literatura para análise de alimentos.

Matriz	As	Cd	Cu	Ni	Se	Técnica	Referência
Carnes bovina e de frango, e miúdos	---	---	0,013	0,053	0,08	ICP-MS	Noël et al. (2012) [17]
Carnes bovina e de porco, e salame	0,03	3,0 x 10 ⁻⁴	---	---	---	GF AAS	Škrbić et al. (2013) [18]
Carnes bovina e de frango	6,0 x 10 ⁻³	---	---	---	---	HG AAS	Sigrist et al. (2016) [19]
Carnes bovina e de frango, lobo e carcaça de carneiro	---	6,3 x 10 ⁻⁶	---	1,0 x 10 ⁻⁵	3,0 x 10 ⁻⁷	ICP-MS	Higura et al. (2020) [21]
Carnes bovina e de frango, e miúdos	0,02	0,018	---	---	---	ICP-MS	Millour et al. (2011) [23]
Carne processada	0,025	0,019	6,29	---	---	ICP-MS/HG AAS	Marín et al. (2018) [24]
Carne processada	0,012	8,0 x 10 ⁻³	0,02	0,02	0,06	ICP-MS	Este estudo

GF AAS: espectrometria de absorção atômica com atomização em forno de grafite; HG AAS: espectrometria de absorção atômica com geração de hidretos; ICP-MS: espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente.

3.2 Aplicação analítica

O método analítico foi aplicado em 10 amostras de carne processada, adquiridas em supermercados da cidade Salvador, Bahia, Brasil, foram elas: mortadela suína, mortadela de frango, presunto cozido, apresuntado, hambúrguer misto (carne bovina e frango), hambúrguer de frango, salsicha de frango, pepperoni, salsicha mista (suína e frango), e fiambre. As concentrações de As, Cd, Cu, Ni e Se foram determinadas por ICP-MS, conforme apresentadas na Tabela 3. Em todas as amostras de carne processada, as concentrações de Cd (< 0,008 mg kg⁻¹) e Se (< 0,21 mg kg⁻¹) estavam abaixo dos LQs do método analítico aplicado.

Tabela 3: Resultados obtidos para as concentrações (em mg kg⁻¹) de As, Cu e Ni encontradas em amostras de carne processada utilizando a técnica de ICP-MS.

Matriz	As	Cu	Ni
Mortadela suína	0,41±0,04	2,48±0,45	0,21±0,01
Mortadela de frango	0,54±0,08	2,94±0,51	1,93±0,37
Presunto	0,60±0,05	3,64±0,39	0,28±0,05
Apresuntado	0,40±0,04	2,06±0,11	0,41±0,07
Hambúrguer misto (bovino e frango)	<0,04	3,10±0,22	<0,05
Hambúrguer de frango	<0,04	3,07±0,13	0,22±0,05
Salsicha de frango	0,32±0,07	1,99±0,24	0,21±0,04
Pepperoni	0,42±0,07	1,06±0,08	0,15±0,02
Salsicha mista (suína e frango)	0,44±0,09	3,52±0,27	1,64±0,39
Fiambre	<0,04	1,83±0,07	0,20±0,01
Média	0,45	2,57	0,58
Desvio padrão	0,09	0,83	0,69
n	7	10	9
Mínimo	<0,04	1,06	<0,05
Máximo	0,60	3,64	1,93

Resultados expressos como média ± intervalo de confiança a 95% (n = 3).

3.2.1 Arsênio

As concentrações de As variaram de $<0,04$ (hambúrguer misto de bovino e frango, hambúrguer de frango e fiambre) a $0,60 \text{ mg kg}^{-1}$ (presunto) com concentração média de $0,45 \text{ mg kg}^{-1}$. Comparando as concentrações encontradas, com a legislação brasileira, foi possível observar que as amostras de mortadela de frango e presunto apresentaram concentrações acima dos limites permitidos ($0,50 \text{ mg kg}^{-1}$), conforme a Figura 1.

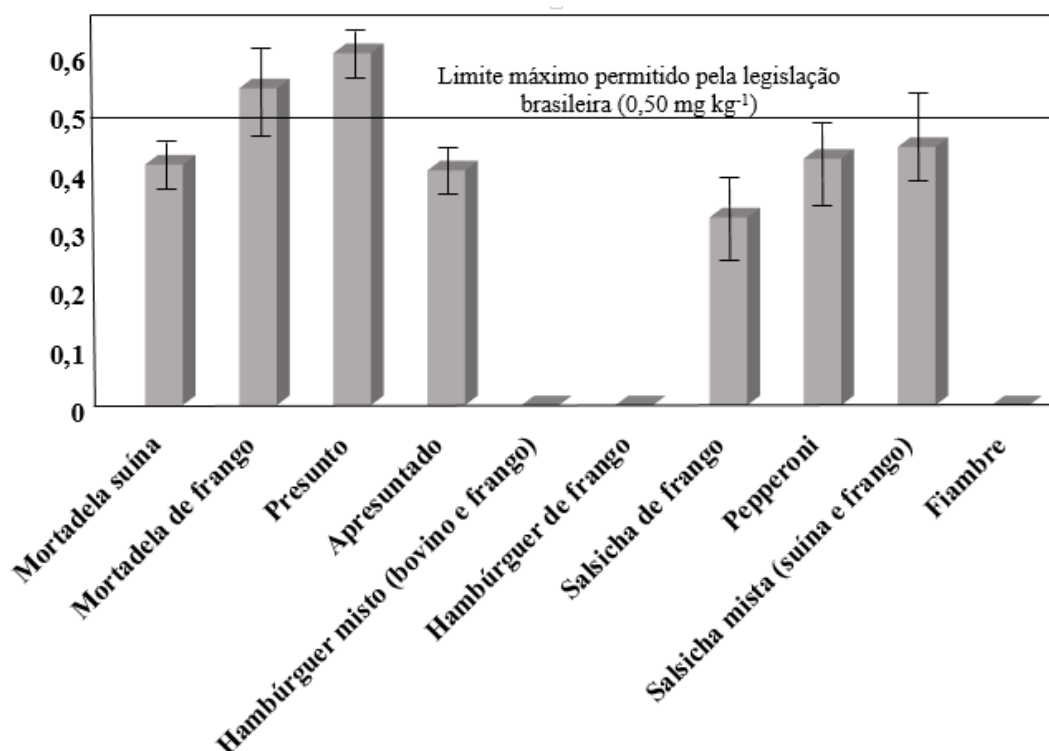


Figura 1: Comparação das concentrações de As em amostras de carne processada com o limite máximo permitido pela legislação brasileira ($0,50 \text{ mg kg}^{-1}$).

Os valores acima do limite máximo estabelecido pela legislação nas duas amostras citadas, pode ser explicado pelo fato de que são do mesmo fabricante e provavelmente têm um processo de produção similar, além da mesma origem animal. O arsênio pode ter sido introduzido como contaminante presente no estabilizador tripolifosfato de sódio, que é regulado pela ANVISA através da RDC n° 179 de 17 de outubro de 2001, a qual aprova a extensão do uso do aditivo INS E451 como estabilizador em produtos de carne fresca, processados ou não, no nível máximo de 0,5% para o sal anidro e 23,2% para o sal hexahidratado [25, 26]. O Código Alimentar Químico (*Food Chemical Codex*) estabelece parâmetros para tripolifosfato de sódio, dentre os quais, uma concentração máxima de As (3 mg kg^{-1}) [26].

Como essas duas amostras são baseadas em carnes de aves e suínos, o As, que é um elemento tóxico bioacumulativo, pode ser originado de compostos fenilarsênicos, como roxarsona e ácido p-arsanílico, amplamente utilizados como aditivos em rações para aves e suínos [20, 27]. Analisando As em ração animal, Dionísio et al. (2011) encontraram concentrações variando de $<0,069$ a $2,43 \pm 0,06 \text{ mg kg}^{-1}$ em ração de aves [28]; e Saucedo-Velez et al. (2017) [29] obtiveram concentrações entre $1,97 \pm 0,01$ e $19,83 \pm 1,10 \text{ mg kg}^{-1}$ em ração de aves, e variando de $0,83 \pm 0,03$ a $4,29 \pm 0,10 \text{ mg kg}^{-1}$ em ração de suínos. Evidenciando a presença de altas concentrações de As em alimentos para animais utilizados como matéria-prima para a produção de carnes processadas.

A literatura reporta a determinação de As em amostras de alimentos de origem animal, sendo possível verificar que as concentrações reportadas nos estudos estão concordantes com os valores

encontrados neste trabalho. Millour et al. (2011) [23] avaliaram As em amostras de carne bovina, miúdos e carne de frango, obtendo concentrações de 0,02; 0,02 e 0,019 mg kg⁻¹, respectivamente. Škrbić et al. (2013) [18] verificaram As em bacon, carnes bovina e de frango, estando abaixo do LQ (< 0,03 mg kg⁻¹); e em salame, no qual a concentração encontrada foi de 0,04 mg kg⁻¹. Marín et al. (2018) [24] encontraram As em amostras de carne de frango (8,6 x 10⁻³ mg kg⁻¹), carne suína (0,0148 mg kg⁻¹), carne bovina (0,0185 mg kg⁻¹), hambúrguer (0,0186 mg kg⁻¹), salsicha (0,0261 mg kg⁻¹), presunto curado (0,053 mg kg⁻¹), salsicha curada (0,0435 mg kg⁻¹), presunto cozido (0,0331 mg kg⁻¹) e miúdos (7,3 x 10⁻³ mg kg⁻¹). Parinet et al. (2018) [30] avaliaram As em tecidos suínos de três tipos de produção: orgânica, sistema francês (*label rouge*) e convencional, obtendo concentração semelhante para os sistemas de produção, cerca de 0,02 mg kg⁻¹. Zhao et al. (2020) [27] determinaram As em carne de frango, obtendo concentrações variando de 4,63 x 10⁻³ a 8,88 x 10⁻³ mg kg⁻¹.

3.2.2 Cobre

A menor concentração de Cu foi obtida na amostra de pepperoni (1,06 ± 0,08 mg kg⁻¹) e a maior, na amostra de presunto (3,64 ± 0,39 mg kg⁻¹), sendo que todas as amostras apresentaram concentrações abaixo dos limites estabelecidos pela legislação brasileira (30 mg kg⁻¹), com uma concentração média de 2,57 mg kg⁻¹; e concordantes com valores reportados na literatura em análises de carne fresca e processada. Noël et al. (2012) [17] encontraram a presença de Cu em carne bovina, miúdos e carne de frango, obtendo concentrações de 0,804; 1,13 e 0,862 mg kg⁻¹, respectivamente. Marín et al. (2018) [24] verificaram concentrações de Cu em carne de frango (0,359 mg kg⁻¹), carne bovina (0,504 mg kg⁻¹), hambúrguer (0,717 mg kg⁻¹), salsicha (0,920 mg kg⁻¹), presunto cozido (1,13 mg kg⁻¹), salsicha curada (0,60 mg kg⁻¹) e miúdos (50,4 mg kg⁻¹). Parinet et al. (2018) [30] obtiveram concentrações de Cu em tecidos suínos de três tipos de produção: orgânica (12,2 mg kg⁻¹), sistema francês (*label rouge*) (9,5 mg kg⁻¹) e convencional (11,1 mg kg⁻¹).

Verificando a literatura, foi possível perceber que a ração animal possui altas concentrações deste elemento. Li et al. (2013) [31] analisaram rações bovina e de aves, encontrando concentrações de 750 e 800 mg kg⁻¹, respectivamente, requerendo atenção com relação à nutrição animal, já que esses níveis elevados podem causar impactos nos produtos finais, chegando ao consumo humano.

3.2.3 Níquel

Para as concentrações de Ni, a amostra de hambúrguer misto (carne bovina e frango) estava com valores abaixo do LQ (< 0,05 mg kg⁻¹) e a amostra de mortadela de frango apresentou o maior valor (1,93 ± 0,37 mg kg⁻¹), sendo que a concentração média das amostras analisadas foi de 0,58 mg kg⁻¹. Considerando a legislação brasileira, todas as amostras estavam abaixo do limite estabelecido (5,0 mg kg⁻¹). Os valores encontrados foram superiores aos relatados na literatura para matrizes que podem ser utilizadas como matéria-prima na fabricação de carnes processadas, no qual Noël et al. (2012) [17] encontraram Ni em carne bovina (0,063 mg kg⁻¹), carne de frango (0,077 mg kg⁻¹) e miúdos (0,054 mg kg⁻¹). Higuera et al. (2020) [21] verificaram Ni em carne de frango (0,045 mg kg⁻¹), lombo de cordeiro (0,039 mg kg⁻¹), carcaça de cordeiro (0,048 mg kg⁻¹) e carne bovina (0,033 mg kg⁻¹).

Altas concentrações de Ni podem ser encontradas em animais criados com alimentação oriunda de áreas que fazem uso de irrigação e fertilizantes, especialmente os fosfatados. Khan et al. (2024) [32] avaliaram uma área urbana poluída e relataram Ni em amostras de solo (4,49 a 25 mg kg⁻¹), forragem (3,78 a 9,53 mg kg⁻¹) e (0,65 a 2,42 mg kg⁻¹) em amostras de fluidos bovino, bubalino e ovino.

3.2.4 Cádmio

As concentrações de Cd em todas as amostras estavam abaixo do LQ ($< 0,03 \text{ mg kg}^{-1}$), consequentemente, abaixo da legislação brasileira ($0,05 \text{ mg kg}^{-1}$). Na literatura, Millour et al. (2011) [23] avaliaram Cd em carne bovina ($1,0 \times 10^{-3} \text{ mg kg}^{-1}$), miúdos ($5,3 \times 10^{-3} \text{ mg kg}^{-1}$) e carne de frango ($1,0 \times 10^{-3} \text{ mg kg}^{-1}$). Škrbić et al. (2013) [18] encontraram concentrações de Cd abaixo de $3,0 \times 10^{-4} \text{ mg kg}^{-1}$ para carnes de bovinos, aves e suínos, bacon ($3,0 \times 10^{-3} \text{ mg kg}^{-1}$) e salame ($0,03 \text{ mg kg}^{-1}$). Marín et al. (2018) [24] verificaram que carnes suína, frango e bovina, presunto curado e presunto cozido estavam com concentrações abaixo do LQ; e nas amostras de salsicha ($8,5 \times 10^{-3} \text{ mg kg}^{-1}$), salsicha curada ($8,2 \times 10^{-3} \text{ mg kg}^{-1}$), hambúrguer ($4,4 \times 10^{-3} \text{ mg kg}^{-1}$) e miúdos ($0,055 \text{ mg kg}^{-1}$). Parinet et al. (2018) [30] avaliaram Cd em tecidos suínos de três tipos de produção: orgânica ($0,03 \text{ mg kg}^{-1}$), sistema francês (*label rouge*) ($0,039 \text{ mg kg}^{-1}$) e convencional ($0,048 \text{ mg kg}^{-1}$). Higuera et al. (2020) [21] verificaram Cd em carne de frango ($0,024 \text{ mg kg}^{-1}$), lombo de cordeiro ($0,03 \text{ mg kg}^{-1}$), carcaça de cordeiro ($0,027 \text{ mg kg}^{-1}$) e carne bovina ($0,027 \text{ mg kg}^{-1}$).

Na indústria de carnes, um dos principais fatores de contaminação por Cd está relacionado à dieta dos animais, especificamente à suplementação com fosfato. Isso ocorre porque a produção desses suplementos utiliza rochas fosfatadas, conhecidas por serem as maiores fontes de contaminação por Cd na natureza [33].

3.2.5 Selênio

As concentrações de Se em todas as amostras estavam abaixo do LQ ($< 0,21 \text{ mg kg}^{-1}$), consequentemente, abaixo da legislação brasileira ($0,30 \text{ mg kg}^{-1}$). Sua determinação foi reportada por Noël et al. (2012) [17] em carne bovina ($0,042 \text{ mg kg}^{-1}$), carne de frango ($0,33 \text{ mg kg}^{-1}$) e miúdos ($0,055 \text{ mg kg}^{-1}$). Higuera et al. (2020) [21], encontraram $0,023 \text{ mg kg}^{-1}$ (carne de frango) e $0,031 \text{ mg kg}^{-1}$ (lombo de cordeiro), sendo que em carcaça de cordeiro e carne bovina, as concentrações estavam abaixo do LQ ($< 1,0 \times 10^{-6} \text{ mg kg}^{-1}$).

Uma das prováveis fontes de contaminação de Se no processo de produção de carnes enlatadas é a ração animal, uma vez que a literatura relata a sua determinação na forma de selenoaminoácidos, selenometionina e selenocisteína, obtendo concentrações variando de $0,640$ a $1,49 \text{ mg kg}^{-1}$ [34].

4. CONCLUSÃO

Os resultados indicaram que as concentrações encontradas de Cd, Cu, Ni e Se em carne processada estavam em conformidade, quando comparadas com os limites máximos estabelecidos pela legislação brasileira. Entretanto, no caso do As, um elemento tóxico bioacumulativo, duas amostras analisadas (mortadela de frango e presunto) excederam os limites estabelecidos pela legislação. Porém, estudos de análise de especiação química são necessários para avaliar se as formas nas quais este elemento está presente nas matrizes são realmente tóxicas para humanos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de Financiamento 001) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pela concessão de bolsas de estudos e de produtividade em pesquisa, além do financiamento de recursos financeiros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ferguson LR. Meat and cancer. Meat Sci. 2010 Feb;84(2):308-13. doi: 10.1016/j.meatsci.2009.06.032

2. Domingo JL. Concentrations of environmental organic contaminants in meat and meat products and human dietary exposure: A review. *Food Chem Toxicol.* 2017 Sep;107(Pt A):20-6. doi: 10.1016/j.fct.2017.06.032
3. Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Em 2023, abate de bovinos cresce e o de suínos e frangos atinge recordes [Internet]. Brasília (DF): IBGE; 2024 [citado em 02 nov 2024]. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/39452-em-2023-abate-de-bovinos-cresce-e-o-de-suynos-e-frangos-atingem-recordes>
4. Bouvard V, Loomis D, Guyton KZ, Grosse Y, Ghissassi FE, Benbrahim-Tallaa L, et al. International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group. Carcinogenicity of consumption of red and processed meat. *Lancet Oncol.* 2015 Dec;16(16):1599-600. doi: 10.1016/S1470-2045(15)00444-1
5. Domingo JL. Intake of red and processed meat on the incidence of cancer: Are the risks really relevant? *Food Chem Toxicol.* 2019 Dec;134:110884. doi: 10.1016/j.fct.2019.110884
6. International Agency for Research on Cancer (IARC). IARC Monographs evaluate consumption of red meat and processed meat. IARC [Internet]; 26 out 2015 [citado em 02 nov 2024]. Disponível em: https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr240_E.pdf
7. Domingo JL, Nadal M. Carcinogenicity of consumption of red meat and processed meat: A review of scientific news since the IARC decision. *Food Chem Toxicol.* 2017 Jul;105:256-61. doi: 10.1016/j.fct.2017.04.028
8. International Agency for Research on Cancer (IARC). Agents classified by the IARC Monographs, Volumes 1-123. IARC [Internet]; 02 nov 2018 [citado em 02 nov 2024]. Disponível em: <https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/09/ClassificationsAlphaOrder.pdf>
9. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). The ATSDR 2022 substance priority list. ATSDR [Internet]; 18 out 2023 [citado em 02 nov 2024]. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/index.html>
10. Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Anuário dos Programas de Controle de Alimentos de Origem Animal do DIPOA. Volume 3. Brasília (DF): MAPA; 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-animal/anuario-dos-programas-de-controle-de-alimentos-de-origem-animal-do-dipoa/anuario-dos-programas-de-controle-de-alimentos-de-origem-animal-volume-3.pdf/view>
11. Nerín C, Aznar M, Carrizo D. Food contamination during food process. *Trends Food Sci Tech.* 2016;48:63-8. doi: 10.1016/j.tifs.2015.12.004
12. Alves SP, Alfaia CM, Škrbić BD, Živančev JR, Fernandes MJ, Bessa RJB, et al. Screening chemical hazards of dry fermented sausages from distinct origins: Biogenic amines, polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals. *J Food Comps Anal.* 2017;59:124-31. doi:10.1016/j.jfca.2017.02.020
13. Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Decreto nº 55.871, de 26 de março de 1965. Brasília (DF): Diário Oficial da União; 1965. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1950-1969/d55871.htm#:~:text=Decreto%3A,as%20bebidas%20entre%20os%20alimentos
14. Brasil. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Decreto Resolução RDC nº 42, de 29 de agosto de 2013. Dispõe sobre o regulamento técnico MERCOSUL sobre limites de contaminantes inorgânicos em alimentos. Brasília (DF): Diário Oficial da União; 2013. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2013/rdc0042_29_08_2013.html
15. European Union Law: Commission Regulation (EC) nº 1881/2006 [Internet]; 12 dez 2006. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:364:0005:0024:EN:PDF>
16. European Union Law: Commission Regulation (EC) nº 488/2014 [Internet]; 12 mai 2014. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/488/oj>
17. Noël L, Chekri R, Millour S, Vastel C, Kadar A, Sirot V, et al. Li, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Se and Mo levels in foodstuffs from the Second French TDS. *Food Chem.* 2012 Jun;132(3):1502-13. doi: 10.1016/j.foodchem.2011.12.009
18. Škrbić B, Živančev J, Mrmoš N. Concentrations of arsenic, cadmium and lead in selected foodstuffs from Serbian market basket: estimated intake by the population from the Serbia. *Food Chem Toxicol.* 2013 Aug;58:440-8. doi: 10.1016/j.fct.2013.05.026
19. Sigrist M, Hilbe N, Brusa L, Campagnoli D, Beldoménico H. Total arsenic in selected food samples from Argentina: Estimation of their contribution to inorganic arsenic dietary intake. *Food Chem.* 2016 Nov;210:96-101. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.04.072
20. Hu Y, Zhang W, Chen G, Cheng H, Tao S. Public health risk of trace metals in fresh chicken meat products on the food markets of a major production region in southern China. *Environ Pollut.* 2018 Mar;234:667-76. doi: 10.1016/j.envpol.2017.12.006

21. Higuera JM, da Silva ABS, de Olivera AF, Nogueira ARA. Multi-elemental determination in meat samples using multi-isotope calibration strategy by ICP-MS. *Food Chem.* 2020 Jan;15(303):125395. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125395
22. International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). Nomenclature, symbols, units and their usage in spectrochemical analysis-III. Analytical flame and associated non-flame procedures. *Spectrochim Acta B* 1978;33(6):247-69. doi: 10.1016/0584-8547(78)80045-7
23. Millour S, Noël L, Kadar A, Chekri R, Vastel C, Sirot V, et al. Pb, Hg, Cd, As, Sb and Al levels in foodstuffs from the 2nd French total diet study. *Food Chem.* 2011 Jun;126(4):1787-99. doi: 10.1016/j.foodchem.2010.12.086
24. Marín S, Pardo O, Sánchez A, Sanchis Y, Vélez D, Devesa V, et al. Assessment of metal levels in foodstuffs from the Region of Valencia (Spain). *Toxicol Rep.* 2018 May;21:5:654-70. doi: 10.1016/j.toxrep.2018.05.005
25. Brasil. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução RDC nº 179, de 17 de outubro de 2001. Brasília (DF): Diário Oficial da União; 2001. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2001/rdc0179_17_10_2001.html
26. Food Chemical Codex (FCC). SI nº 35 of 1980. Health (Emulsifiers, stabilisers, thickening and gelling agents in food) Regulations, IV Edition, 1980 [Internet]; 1980. Disponível em: <https://www.irishstatutebook.ie/eli/1980/si/35/made/en/print>
27. Zhao D, Wang J, Yin D, Li M, Chen X, Juhasz AL, et al. Arsanilic acid contributes more to total arsenic than roxarsone in chicken meat from Chinese markets. *J Hazard Mater.* 2020 Feb 5;383:121178. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121178
28. Dionísio AGG, Conzalez MH, Nóbrega JA. Determinação de arsênio em amostras da cadeia produtiva de frangos de corte por espectrometria de absorção atômica com forno de grafite. *Quím Nova* 2011;34(1):49-52. doi: 10.1590/S0100-40422011000100010
29. Saucedo-Velez AA, Hinojosa-Reyes L, Villanueva-Rodríguez M, Caballero-Quintero A, Hernández-Ramírez A, Guzmán-Mar JL. Speciation analysis of organoarsenic compounds in livestock feed by microwave-assisted extraction and high performance liquid chromatography coupled to atomic fluorescence spectrometry. *Food Chem.* 2017 Oct 1;232:493-500. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.04.012
30. Parinet J, Royer E, Saint-Hilaire M, Chafey C, Noël L, Minvielle B, et al. Classification of trace elements in tissues from organic and conventional French pig production. *Meat Sci.* 2018;141:28-35. doi: 10.1016/j.meatsci.2018.02.008
31. Li W, Simmons P, Shrader D, Herrman TJ, Dai SY. Microwave plasma-atomic emission spectroscopy as a tool for the determination of copper, iron, manganese and zinc in animal feed and fertilizer. *Talanta* 2013 Aug 15;112:43-8. doi: 10.1016/j.talanta.2013.03.029
32. Khan ZI, Muhammad G, Ahmad K, Alwahibi MS, Yang H-H, Ishfaq M, et al. Nickel toxicology testing in alternative specimen from farm ruminants in a urban polluted environment. *J King Saud Univ Sci.* 2024;S1018-3647(24)00432-4. doi: 10.1016/j.jksus.2024.103520
33. Costa KM, Ghererdi SRM, de Almeida JC. Ocorrência de cádmio em amostra de rim suíno em um frigorífico de Minas Gerais: relato de caso. *Med Vet, Recife* 2023;17(3):197-202. doi: 10.26605/medvet-v17n3-5502
34. Bakirdere S, Volkan M, Ataman OU. Selenium speciation in chicken breast samples from inorganic and organic selenium fed chickens using high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *J Food Compos Anal.* 2018;71:28-35. doi: 10.1016/j.jfca.2018.05.005