



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ANALÍTICA E FÍSICO-QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM QUÍMICA INDUSTRIAL**

MARIA APARECIDA DA CUNHA MONTEIRO

**AVALIAÇÃO DOS TEORES DE MERCÚRIO EM CABELOS DE ADULTOS
RESIDENTES DA COMUNIDADE QUILOMBOLA DE COCALINHO –
MARANHÃO**

FORTALEZA

2025

MARIA APARECIDA DA CUNHA MONTEIRO

**AVALIAÇÃO DOS TEORES DE MERCÚRIO EM CABELOS DE ADULTOS
RESIDENTES DA COMUNIDADE QUILOMBOLA DE COCALINHO – MARANHÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Química Bacharelado do Departamento de Química Analítica e Físico-Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Química com Habilitação Industrial.

Orientadora: Profa. Dra. Carla Bastos Vidal.
Coorientador: Dr. Ari Clecius Alves de Lima.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M778a Monteiro, Maria Aparecida da Cunha.

Avaliação dos teores de mercúrio em cabelos de adultos residentes da comunidade quilombola de Cocalinho – Maranhão / Maria Aparecida da Cunha Monteiro. – 2025.
47 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Química, Fortaleza, 2025.

Orientação: Profa. Dra. Carla Bastos Vidal..
Coorientação: Prof. Dr. Ari Clesius Alves de Lima.

1. Mercúrio. 2. Quilombolas. 3. Espectrometria de absorção atômica;. 4. Contaminação. I. Título.
CDD 540

MARIA APARECIDA DA CUNHA MONTEIRO

AVALIAÇÃO DOS TEORES DE MERCÚRIO EM CABELOS DE ADULTOS
RESIDENTES DA COMUNIDADE QUILOMBOLA DE COCALINHO – MARANHÃO

Monografia apresentada ao Curso de Química Bacharelado do Departamento de Química Analítica e Físico-Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Química com Habilitação Industrial.

Aprovada em 01/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Carla Bastos Vidal (Orientadora Pedagógica)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Ari Clecius Alves de Lima (Orientador Profissional)
Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

M.^a Jane Kelly Sousa de Brito
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

À Profa Dra. Carla Bastos Vidal por aceitar me orientar ao longo desse trabalho. Sou grata pelo apoio e disposição de ajudar em uma das áreas mais desafiadoras para mim durante a graduação, a Química Analítica.

Ao Dr. Ari Clecius Alves de Lima pela orientação no meu trabalho. Grata pelo apoio e confiança durante o estágio.

À M^a. Jane Kelly Sousa de Brito por aceitar fazer parte da minha banca examinadora e contribuir significativamente para o desenvolvimento do meu trabalho.

Ao Prof Dr. James Ferreira Moura Jr., da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), por fornecer as amostras de cabelos utilizadas no presente trabalho.

Aos funcionários e colegas do Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC) pela oportunidade de estágio e desenvolvimento do meu trabalho de conclusão de curso.

Ao Laboratório de Resíduos Sólidos e Efluentes (LARSE) que contribuiu com a infraestrutura e equipamentos para realização das análises.

Ao Laboratório de Estudos em Química Aplicada (LEQA) pela contribuição para o armazenamento e preparo das amostras utilizadas nesse estudo.

Ao Laboratório de Análise de Água (LANAGUA) pela disponibilidade em contribuir com a sua infraestrutura para a realização dos experimentos.

Ao Laboratório de Produtos e Tecnologia em Processos (LPT) por ter dado a minha primeira oportunidade de iniciação científica na graduação e durante anos ter me acolhido.

Ao Dr. Prof. Diego Lomonaco pela orientação durante a iniciação científica.

À minha mãe, Ceicá Cunha e minha irmã, Inês Monteiro, aos meus queridos amigos Helena e Carlos e, ao meu lourinho que me acompanha desde a infância. Obrigada por tudo, nada disso teria acontecido se não fosse vocês.

À todos os meus amigos que estiveram comigo nessa caminhada, em especial ao Leonardo Mapurunga que compartilhou vários momentos comigo desde o ensino médio até a graduação e, ao Vitor Leite que sempre me acolheu com suas palavras e, Patrícia Queiroz pela parceria no fim da graduação.

A todos que de alguma forma fizeram esse momento acontecer.

A Deus, por tudo.

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana”.

Carl Jung

RESUMO

A Comunidade Quilombola de Cocalinho, localizada no município de Parnarama, no Maranhão, sofre há alguns anos com a chegada de empresas do segmento do agronegócio no entorno da comunidade. Marcada pela expansão do monocultivo do eucalipto e da soja na região, Cocalinho enfrenta as consequências do uso intensivo de agrotóxicos utilizados nessas culturas, que têm provocado contaminação ambiental, perda da biodiversidade local e problemas na saúde da população local, como ocorrência de doenças dérmicas, respiratórias e dores crônicas. Esse contexto alerta sobre a possível exposição a contaminantes químicos como o mercúrio. O mercúrio metálico, é um elemento potencialmente tóxico e com elevado grau de periculosidade para os seres humanos, sendo regulamentado no território nacional quanto ao seu uso. No Brasil, além das regulamentações em nível nacional, existem leis estaduais e municipais que proíbem a comercialização e a utilização de agrotóxicos organomercuriais, isto é, na sua forma orgânica e facilmente absorvida pelos tecidos humanos. O mercúrio é bioacumulativo no organismo e pode ser analisado a partir o cabelo, tendo em vista que essa espécie pode se ligar a essa matriz através do sangue ou por contaminações exógenas. Uma das técnicas utilizadas para determinar a concentração de mercúrio é a Espectrometria de Absorção Atômica (AAS) que relaciona a absorbância com a concentração do analito. Para determinar a quantidade de mercúrio nas amostras, utilizou-se a Geração Termoquímica de Valor (TVG) com uma fonte de radiação infravermelho acoplada a Espectrometria de Absorção Atômica com Vapor Frio (CVAAS). As análises quantificaram baixas concentrações de mercúrio nas amostras de cabelo, entre $5,77 \text{ e } 27,02 \mu\text{g kg}^{-1}$, que são valores toleráveis segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), sendo aconselhado níveis que não ultrapassem 6 microgramas (μg) de Hg por grama (g) de cabelo. Para complementar o estudo, analisaram-se Cu, Ni, Pb, As e Cd através da Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), a fim de quantificar os traços desses metais nas amostras de cabelo. Quantificaram-se elevados níveis de Cu, entre $7,26 \pm 0,62$ e $97,53 \pm 5,6 \text{ mg kg}^{-1}$ que podem estar associados a pesticidas à base de Cu utilizados em monocultivos de soja que, ao entrarem em contato com o organismo humano, causam sintomas semelhantes aos relatados pelas famílias de Cocalinho. As concentrações de Pb variaram entre $0,0269 \pm 0,003$ e $1,08 \pm 0,06 \text{ mg kg}^{-1}$. Apenas em uma amostra observou-se níveis de Ni, no valor $1,78 \pm 0,07 \text{ mg kg}^{-1}$. Não se obtiveram sinais para As e Cd na matriz capilar. Diante disso torna-se necessário ampliar as possibilidades de análise com outras técnicas e outros tipos de matrizes que possam ser comparadas com um padrão de referência e, também, buscar demais fontes de contaminação química que possam estar

relacionadas às complicações na saúde da população de Cocalinho.

Palavras-chave: mercúrio; espectrometria de absorção atômica; contaminação; quilombolas.

ABSTRACT

The Quilombola Community of Cocalinho, located in the municipality of Parnarama, Maranhão, has been suffering for some years due to the arrival of agribusiness companies in the surrounding area. Marked by the expansion of eucalyptus and soybean monocultures in the region, Cocalinho faces the consequences of the intensive use of pesticides in these crops, which have caused environmental contamination, loss of local biodiversity, and health problems among the local population, such as the occurrence of skin diseases, respiratory issues, and chronic pain. This context raises concerns about possible exposure to chemical contaminants such as mercury. Metallic mercury is a highly toxic heavy metal with a high degree of danger to humans and is regulated in the national territory regarding its use. In Brazil, in addition to national regulations, there are state and municipal laws that prohibit the commercialization and use of organomericurial pesticides — that is, in their organic form, which is easily absorbed by human tissues. Mercury is bioaccumulative in the body and can be analyzed through hair, considering that this species can bind to this matrix via the bloodstream or through exogenous contamination. One of the techniques used to determine the concentration of mercury is Atomic Absorption Spectrometry (AAS), which relates absorbance to the analyte concentration. To determine the amount of mercury in the samples, Thermochemical Vapor Generation (TVG) was used, with an infrared radiation source coupled to Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry (CVAAS). The analyses quantified low concentrations of mercury in the hair samples, ranging from 5.77 to $27.02 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$, which are considered tolerable values according to the World Health Organization (WHO), with recommended levels not exceeding 6 micrograms (μg) of Hg per gram (g) of hair. To complement the study, Cu, Ni, Pb, As, and Cd were analyzed using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) in order to quantify the trace levels of these metals in the hair samples. High levels of Cu were quantified, ranging from 7.26 ± 0.62 to $97.53 \pm 5.6 \text{ mg kg}^{-1}$, which may be associated with copper-based pesticides used in soybean monocultures that, upon entering the human body, cause symptoms similar to those reported by the families of Cocalinho. Pb concentrations ranged from 0.0269 ± 0.003 to $1.08 \pm 0.06 \text{ mg kg}^{-1}$. Only one sample showed Ni levels, with a value of $1.78 \pm 0.07 \text{ mg kg}^{-1}$. No signals were detected for As and Cd in the hair matrix. In light of this, it is necessary to expand the analytical possibilities using other techniques and other types of matrices that can be compared with a reference standard, as well as to investigate other possible sources of chemical contamination that may be related to the health complications affecting the population of Cocalinho.

Keywords: mercury; atomic absorption spectrometry; contamination; quilombola communities.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Amostras de cabelos investigadas no presente estudo	26
Figura 2 – Digestor utilizado no preparo das amostras de cabelo	27
Figura 3 – Reator Termoquímico	28
Figura 4 – Desenho Esquemático do Separador Gás-Líquido	29
Figura 5 – Sistema instrumental TVG-CVAAS com lâmpada de infravermelho	31
Figura 6 – Modelo do sistema TVG-CVAAS com lâmpada de infravermelho.....	32
Figura 7 – Equipamento utilizado para a determinação de Cu, Ni, Pb, As e Cd por ICP-OES	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de calibração do Hg no TVG-AAS..... 35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Referência dos teores de mercúrio na matriz capilar	22
Tabela 2	- Parâmetros instrumentais do AAS para determinação de Hg	30
Tabela 3	- Massas das amostras para digestão.....	33
Tabela 4	- Resultados obtidos da curva de calibração	35
Tabela 5	- Resultados referentes as absorbâncias e concentrações de Hg por TVG-CVAAS	36
Tabela 6	- Resultados das concentrações de Hg corrigidas	37
Tabela 7	- Resultados das concentrações reais de Hg presente nas amostras de cabelo.....	37
Tabela 8	- Resultados estatísticos da determinação de Hg	38
Tabela 9	- Hg determinado no Sistema TVG-AAS	39
Tabela 10	- Concentrações de Cu, Ni e Pb analisadas nas amostras de cabelo por ICP-OES	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ICP-OES	Espectroscopia de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (do inglês “Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry”)
Hg	Mercúrio
HgT	Mercúrio Total
LARSE	Laboratório de Resíduos Sólidos e Efluentes
LANAGUA	Laboratório de Análise de Água
LEQA	Laboratório de Estudos em Química Aplicada
LOD	Limite de Detecção
MeHg	Metilmercúrio
NUTEC	Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará
OMS	Organização Mundial da Saúde
PFA	Perfluoroalcóxi
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
GLS	Separador Gás-Líquido
TVG-CVAAS	Geração termoquímica de vapor acoplada a espectrometria de absorção atômica com vapor frio (do inglês “thermochemical vapor generation cold vapor atomic absorption spectrometry”)
UFC	Universidade Federal do Ceará
UNILAB	Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.1	Objetivos Específicos	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	Comunidade Quilombola de Cocalinho	17
3.1.1	<i>O surgimento de Cocalinho</i>	17
3.1.2	<i>A Exposição da população à agrotóxicos</i>	18
3.2	O mercúrio	18
3.3	O Uso de Agrotóxicos Organomercuriais no Brasil	20
3.3.1	<i>O consumo de agrotóxicos no Brasil</i>	20
3.3.2	<i>O Regulamento do uso de agrotóxicos organomercuriais</i>	21
3.4	O Cabelo com Biomarcador de Mercúrio	21
3.5	Análise de Mercúrio	23
3.6	Espectrometria de Absorção Atômica	23
4	MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1	Determinação de Mercúrio	25
4.1.1	<i>Materiais e Reagentes</i>	25
4.1.1.1	<i>Coleta de Amostra</i>	25
4.1.1.3	<i>Preparo da amostra para análise por TVG-CVAAS com lâmpada de infravermelho.....</i>	26
4.1.2	<i>Instrumentação</i>	27
4.1.2.1	<i>Reator Termoquímico</i>	27
4.1.2.2	<i>Separador Gás-Líquido (GLS)</i>	28
4.1.2.3	<i>Sistema Instrumental da Geração Termoquímica de Vapor (TVG)</i>	29
4.1.3	<i>Curva de Calibração</i>	32
4.1.5	<i>Procedimento</i>	32
4.2	Determinação da Concentração de Metais por ICP-OES	33

4.2.1	<i>Procedimento para Determinação da Concentração de Metais por ICP-OES</i>	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1	Curva de Calibração	34
5.2	Determinação de Mercúrio	35
5.3	Determinação da Concentração de Metais por ICP-OES	41
6	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

A comunidade quilombola de Cocalinho, situada em Parnarama (MA), abriga cerca de 170 famílias descendentes de grupos que chegaram à região entre os séculos XVIII e XIX. Com base na agricultura de subsistência, essas famílias enfrentam, desde 2009, os impactos do avanço do agronegócio. A expansão dos monocultivos de eucalipto, plantações de soja e o uso intensivo de agrotóxicos têm provocado contaminação ambiental, perda de biodiversidade e problemas de saúde na população local. Entre os efeitos relatados estão doenças dérmicas, respiratórias e dores crônicas. Esse contexto acende alertas sobre a possível exposição a contaminantes químicos, como o mercúrio (Lopes et al., 2023).

O mercúrio é um elemento tóxico que se acumula no organismo e, por menor que seja o contato com essa substância, já é suficiente para causar sérios problemas de saúde a curto ou longo prazo, como a Doença de Minamata (Harada, 1995). Quanto a ocorrência desse metal, destacam-se: a forma elementar (metálico), inorgânica (sais inorgânicos) e orgânica (organometálicos) (EPA, 2024a).

No Brasil, a contaminação por mercúrio provém principalmente do garimpo e do uso de agrotóxicos organomercuriais, que poluem mananciais, o solo e outras fontes de abastecimento utilizadas por comunidades quilombolas e ribeirinhas, povos indígenas e por trabalhadores rurais, sendo estes os mais afetados. Essas populações estão expostas principalmente ao mercúrio orgânico (metilmercúrio), considerado o composto mais tóxico devido à sua alta capacidade de bioacumulação e capacidade de afetar o sistema nervoso central (EPA, 2024b).

Compostos organomercuriais foram amplamente utilizados como fungicidas na agricultura brasileira, no processo de produção de lavoura de cana-de-açúcar, até a década de 1980, quando foram proibidos em virtude de seus efeitos cumulativos no organismo humano, expondo trabalhadores rurais aos riscos de intoxicação mercurial (Câmara et al., 1986). Entretanto, mesmo após a proibição dos defensivos agrícolas organomercuriais no território brasileiro e a suspensão do seu uso por trabalhadores rurais, ainda se nota a presença residual no solo.

De acordo com o conhecimento científico atual, após um período médio de 72 dias, o mercúrio absorvido pelo organismo deixa de circular na corrente sanguínea, sendo a fração não eliminada acumulada em tecidos e órgãos. Estudos indicam que o cabelo pode ser utilizado como indicador de exposição ao mercúrio apenas enquanto o metal ainda está presente na corrente sanguínea, uma vez que a incorporação ao fio ocorre durante sua formação. Dessa

forma, a porção do cabelo correspondente ao período de exposição concentra níveis elevados de mercúrio, que se deslocam da raiz com o crescimento capilar. Em casos de exposição intensa a compostos organomercuriais, a análise longitudinal do cabelo pode fornecer um histórico da contaminação ambiental. Evidências sugerem que, até um ano após uma exposição significativa, os níveis de mercúrio no cabelo tendem a retornar aos valores considerados normais (Câmara et al., 1986).

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo analisar os níveis de mercúrio total em amostras de cabelo de moradores da comunidade quilombola de Cocalinho, no município de Parnarama (MA), visando avaliar a possível exposição a esse metal tóxico. A escolha do cabelo como biomarcador se justifica por sua capacidade de refletir exposições crônicas ao mercúrio, especialmente na forma de metilmercúrio, associada ao uso de agrotóxicos e à contaminação ambiental. Os dados obtidos contribuirão para a compreensão do impacto da contaminação por mercúrio na saúde da população local, além de subsidiar ações de vigilância ambiental e fortalecimento de políticas públicas voltadas à proteção de comunidades tradicionais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Determinar e avaliar os teores de mercúrio em amostras de cabelo de adultos de uma comunidade quilombola de Cocalinho – Maranhão.

2.2 Objetivos Específicos

- Fragmentar e digerir as amostras de cabelos;
- Aplicar o método de determinação de mercúrio por Geração Termoquímica de Vapor acoplada a Espectrometria de Absorção Atômica por Vapor Frio (TVG-CVAAS) com Radiação Infravermelho para determinar o teor de Hg nas amostras de cabelos;
- Determinar as concentrações de Cu, Ni, Pb, As e Cd nas amostras de cabelos por meio da Espectroscopia de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Comunidade Quilombola de Cocalinho

3.1.1 O surgimento de Cocalinho

A Comunidade Quilombola de Cocalinho, localizada no leste maranhense e na divisa com o Piauí, está situada a 500 km da capital São Luís e a 44 km da sede do município de Parnarama (MA). Abrigando 170 famílias, Cocalinho tem seus habitantes reconhecidos e autodeclarados quilombolas desde 2014 pela Fundação Cultural Palmares. Nesse mesmo território, há também o compartilhamento das terras com 80 famílias do Quilombo Guerreiro. O processo de formação territorial dos quilombos, segundo relatos das famílias que lá habitam, tiveram seu começo a partir chegada de pessoas que enfrentavam um período de secas intensas nos estados do Ceará e Piauí entre o final do século XVIII e início do século XIX. Assim que chegaram naquela região do Maranhão, as famílias se instalaram na Serra do Tarantido e, devido a necessidade de um local para sobrevivência, eram exploradas pelo coronel/fazendeiro daquele entorno que cobrava renda pelas terras. Por conta disso, essas famílias migraram e passando por volta de 2 anos em Dimissiano e posteriormente, devido à falta de água, se instalaram nas terras que, atualmente, são as Comunidades Quilombolas de Cocalinho e Guerreiro. Naquela época essas comunidades eram interligadas as comunidades, também quilombolas, de Tanque da Rodagem e São João, situadas no município vizinho de Matões, visto que faziam parte de um território coletivo (Campanha Nacional em Defesa do Cerrado, 2023).

Desde a década de 1980, essas terras foram tomadas por processos de grilagem provenientes da chegada de fazendeiros, isso, por sua vez, foi alterando aos poucos a conformação territorial na região e delimitou o território dessas comunidades por meio da destruição de espaços como lagoas (prejudicando a pesca e subsistência do consumo de água), áreas de extrativismo e plantio que se uniam ligando o território. Com o desaparecimento desses espaços, além da perda de área total também se reduziu as condições de permanência. Por conta da apropriação de cunho privado, bem como a compra e venda de terras, a área territorial das quatro comunidades foram delimitadas com cercados, fora a formação de fazendas no próprio território (Campanha Nacional em Defesa do Cerrado, 2023).

Com o surgimento das propriedades privadas, somado a delimitação do território, redução do acesso e comunicação, foi gerando uma descontinuidade territorial entre as comunidades de Cocalinho, Guerreiro e Tanque da Rodagem e São João, que compreende não

só os espaços de moradia, mas também às áreas de uso comum entre as famílias no que diz respeito às áreas de extrativismo, pesca agricultura. Com mais de 3.000 hectares de território, até o presente momento essa região não teve sua área delimitada pelo INCRA. As comunidades buscam conservar a agrobiodiversidade, as águas e as matas que servem de subsistência para essas famílias, tendo em vista o aumento da fronteira (Campanha Nacional em Defesa do Cerrado, 2023).

3.1.2 A exposição da população à agrotóxicos

A expansão dos monocultivos de eucalipto, plantações de soja e o uso intensivo de agrotóxicos têm provocado contaminação ambiental, perda de biodiversidade e problemas de saúde na população local. Entre os efeitos relatados estão doenças dérmicas, respiratórias e dores crônicas (Campanha Nacional em Defesa do Cerrado, 2023).

Segundo o fascículo da Campanha Nacional do Cerrado, 2023, com a chegada de uma empresa da indústria de papel e celulose em 2009, que teve como objetivo dar início ao monocultivo de eucalipto, ocasionou em impactos devido a expansão de suas plantações que trouxeram consigo o uso intensivo de agrotóxicos. Finalizado a colheita do cultivo do eucalipto, as terras foram vendidas e deram espaço a plantações de soja no território do entorno da comunidade de Cocalinho ainda utilizando agrotóxicos. Famílias quilombolas relatam que o contato com os agrotóxicos utilizados nas plantações se dá principalmente através das pulverizações aéreas, com cerca de 70% dos agrotóxicos espalhados em áreas que não são de cultivo, isto é, atingem a comunidade quilombola. A população de Cocalinho alega que o contato com os agrotóxicos acarreta mortes recorrentes de aves e contaminação de mananciais. Entre os efeitos das contaminações, destaca-se a ocorrência de doenças dérmicas e alergias após o contato com as águas, bem como os problemas respiratórios e dores crônicas. A ocorrência dessas doenças alerta sobre a potencial exposição a contaminantes químicos, como o mercúrio (Lopes et al., 2023).

3.2 O mercúrio

O mercúrio metálico, representado pela simbologia “Hg” e número atômico 80, é um potencialmente tóxico e com elevado grau de periculosidade aos seres humanos (WHO,

2020; EPA, 2024a). À temperatura ambiente, o mercúrio possui o estado de agregação líquido na natureza, não possui odor e tem uma coloração prateada característica (EPA, 2024a).

Quanto a sua ocorrência, o mercúrio pode ser encontrado na forma elementar (metálico), inorgânica (sais inorgânicos) e orgânica (organometálicos) (EPA, 2024a). O mercúrio pode ser combinado com outros elementos, conferindo a forma inorgânica que diminui sua volatilidade e facilita a penetração dessa espécie no organismo humano, seja pela pele ou ingestão (Palathoti et al., 2022).

Existe também o mercúrio que, ligado ao carbono, origina sua forma orgânica e facilmente se deposita em corpos hídricos, contaminando animais aquáticos e, posteriormente, a população que os consome. A forma orgânica do mercúrio mais encontrada é o metilmercúrio, que se caracteriza pela alta toxicidade e por afetar o sistema nervoso central (EPA, 2024b).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS) esse elemento está entre uma das substâncias que mais preocupam a saúde pública por implicar em efeitos nos sistemas nervoso, imunológico e digestivo, pele, olhos, rins e pulmões (Organização Pan-Americana da Saúde, 2025).

O mercúrio pode ser inserido no ambiente naturalmente através do processo de intemperismo das rochas ou pelo movimento da crosta terrestre, bem como pode ser distribuído no ambiente por meio de fontes antrópicas através de processos industriais que dispersam o mercúrio no ar (Sundseth et al., 2017). Segundo Lacerda (1997, p. 196), atualmente, a principal carga de mercúrio para o meio ambiente é oriunda dos garimpos de ouro.

No território brasileiro, a ocorrência de contaminação por mercúrio provém de duas diferentes fontes. De acordo com Lacerda (1997, p. 196): “A primeira era originada na indústria de cloro-soda, responsável pela principal importação de mercúrio para o país e pelas principais emissões para o meio ambiente até a década de 80”.

Lacerda (1997, p. 196) ainda destaca que: “A partir da década de 80, o garimpo de ouro, localizado principalmente na Amazônia, tornou-se o principal comprador de mercúrio no Brasil, sendo responsável pela maior emissão deste poluente para o meio ambiente”.

O caso mais recente no Brasil envolvendo contaminação por metais ocorreu em 2019, na cidade de Brumadinho (Minas Gerais, Brasil), em que a barragem do Córrego do Feijão foi rompida carreando até o rio Paraopeba toneladas de rejeitos contendo elementos tóxicos, entre eles o mercúrio que estava com o nível de concentração 21 vezes além do limite permitido. Os efeitos dessa contaminação podem mostrar resultados negativos a curto ou longo prazo (Barcellos et al., 2019; Thompson et al., 2019).

O Brasil está entre os 152 países que assinaram o tratado internacional da Convenção de Minamata (Ibama, 2025). O tratado leva o nome Minamata em referência a cidade japonesa que foi cenário para a contaminação de milhares de pessoas na década de 1950 ao consumirem frutos do mar contaminados com mercúrio proveniente do despejo indevido de indústrias da região (Ibama, 2025). O uso de mercúrio na fabricação e comercialização em termômetros e demais equipamentos médicos têm sido proibidos desde o ano de 2019 (Ibama, 2025). A Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 922 de 19 de setembro de 2024 estabelece a proibição no território nacional quanto à fabricação, importação e comercialização, bem como o uso em termômetros e esfigmomanômetros com coluna de mercúrio (Anvisa, 2024).

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (Ibama) intensificou o controle quanto a importação, exportação, comércio, transferência, reciclagem, recuperação e transporte do metal no território brasileiro, através da Instrução Normativa (IN) nº 26, publicada em 10 de dezembro de 2024. O Brasil, a partir do dia 31 de dezembro de 2025, visa definitivamente reduzir dos seus processos industriais a utilização do mercúrio metálico, com foco, principalmente na fabricação de cloro e soda (Ibama, 2025).

3.3 O Uso de Agrotóxicos Organomercuriais no Brasil

3.3.1 O consumo de agrotóxicos no Brasil

A prática da agricultura existe a mais de dez mil anos, no entanto o uso de agrotóxicos com a finalidade de controlar pragas e doenças de lavoura existe por volta de meio século. O início do uso de agrotóxicos foi marcado após as duas grandes guerras mundiais, em que a indústria fabricante dos venenos que eram usados como armas químicas encontrou um novo seguimento de mercado, dessa vez na agricultura (Londres, 2011).

Anualmente, no mundo, o consumo de agrotóxicos chega na marca de 2,5 milhões de toneladas (Embrapa, [s.d]). No Brasil, entre os anos de 2001 e 2008, a venda de agrotóxicos passou de US\$ 2 bilhões para mais US\$ 7 bilhões. Em 2009, o Brasil se destacou como maior consumidor de agrotóxico do mundo, atingindo o uso de 1 milhão de toneladas da substância (Londres, 2011).

Vale salientar os perigos provenientes da contaminação por agrotóxicos, destacando a intoxicação crônica, isto é, aquela que afeta o organismo através de um processo lento, desenvolvendo doenças neurológicas, hepáticas, cânceres e demais doenças, ou também

ocasionando malformações genéticas durante a gestação. O uso de agrotóxico em grande escala proveniente da expansão do agronegócio se destaca na contaminação de alimentos, água e o ar (Londres, 2011).

A maioria dos estados brasileiros também possui legislação estadual própria para regulamentar o comércio, o armazenamento, o transporte e o uso de agrotóxicos, bem como o descarte de embalagens vazias (Londres, 2011).

3.3.2 O Regulamento do uso de agrotóxicos organomercuriais

Agrotóxicos organomercuriais são aqueles que têm como base o Hg. Seu uso está geralmente empregado em fungicidas, com destaque no fenilmercúrio, sendo amplamente utilizado nas culturas de morango e batata. Apesar da sua proibição no Brasil, os agrotóxicos organomercuriais podem ser encontrados ilegalmente através do contrabando (Secretaria de Estado da Saúde do Paraná, 2018).

No Brasil, além das regulamentações a nível nacional, existem leis estaduais e municipais que proíbem a comercialização e a utilização de agrotóxicos organomercuriais e organoclorados (Londres, 2011).

O estado do Rio de Janeiro, com a Lei 5.622/2009, proibiu utilização, produção, distribuição e comercialização do agrotóxico endossulfam. Este organoclorado, em 2008, passou por uma reavaliação toxicológica. A Anvisa publicou a RDC nº 28 em 9 de agosto de 2010 determinando sua proibição gradativa. No ano de 2013, o endossulfan passa a ter proibição total (Londres, 2011).

A respeito da lei estadual do Ceará nº 12.228 de 9 de dezembro de 1993:

“dispõe sobre o uso, a produção, o consumo, o comércio e o armazenamento dos agrotóxicos, seus componentes e afins bem como sobre a fiscalização do uso de consumo do comércio, do armazenamento e do transporte interno desses produtos.” (Ceará, 1993, art. 1º).

A lei ainda veda a comercialização e utilização de agrotóxicos organomercuriais em todo o território do Estado (Ceará, 1993, art. 27º).

No estado do Acre, a lei 1.116 de 13 de janeiro de 1994, veda no Art. nº 25 a comercialização e a utilização de agrotóxicos organomercuriais e organoclorados.

“exceto organoclorados, quando sua utilização em campanhas de saúde pública for absoluta e comprovadamente imprescindível para evitar surtos epidêmicos iminentes,

após aprovação do programa emergencial de uso pelo órgão de meio ambiente do estado.” (Londres, 2011, p. 121).

3.4 O Cabelo como Biomarcador de Mercúrio

O uso de amostras de cabelo é normalmente empregado para avaliar o grau de exposição ao mercúrio para uma dada população de estudo (Nuttall, 2006). A contaminação se dá por meio de fontes primárias que são: o sangue e contaminações exógenas. No sangue, a concentração de mercúrio está relacionada com a incorporação do mercúrio nas células que crescem na base do folículo piloso (Nuttall, 2006). O cabelo é preferencialmente escolhido como biomarcador da forma orgânica do mercúrio, o metilmercúrio (MeHg), uma vez que o cabelo possui na sua estrutura grupos proteicos -SH com alta afinidade pelos cátions de MeHg (Clarkson et al., 1988). No momento da formação do fio de cabelo, o MeHg se liga aos fios proporcionalmente à mesma concentração de MeHg no sangue, com cerca de 2 ordens de magnitude maior, seguido do etilmercúrio maior com 1 ordem de magnitude e do mercúrio metálico que não é incorporado nos cabelos (Nuttall, 2006). Vale destacar que não necessariamente todo o mercúrio encontrado no cabelo será proveniente do sangue, mas pode ter sua ocorrência de contaminações exógenas que incorporam na superfície do cabelo (Nuttall, 2006).

É possível determinar a concentração de mercúrio de uma taxa de tempo recente ou distante de exposição, levando em consideração uma média de crescimento constante de cabelo sendo 1 cm ao longo de um mês, logo, a amostragem do comprimento do cabelo fornece informações sobre o período da exposição ao mercúrio (Clarkson et al., 1988). Para a análise de mercúrio, é utilizado o cabelo a partir do couro cabeludo (Clarkson et al., 1988).

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente do Japão, a escolha do cabelo como biomarcador fornece a informação da concentração de MeHg no sangue no momento inicial do crescimento do cabelo, isto é, quando foi formado (Japão, 2004). A escolha do cabelo como amostra também é uma alternativa por se tratar de uma amostragem simples e não invasiva, sendo mais adequada para os participantes, além de ser facilmente armazenadas e preservada (Silva., 2012 e Japão, 2004). Estudos visam avaliar os níveis de exposição ao mercúrio por via alimentar utilizam principalmente o cabelo como marcador biológico (Silva, 2012).

Teores de mercurio total acima de $1\mu\text{g g}^{-1}$ em populações de estudo mais vulneráveis como gestantes, crianças e populações ribeirinhas servem de alerta para o desenvolvimento e adoção de políticas públicas a fim de minimizar os efeitos de contaminações ainda no estágio inicial (OMS; UNEP, 2008).

Além das referências que visam prevenir as contaminações por mercúrio, a Organização Mundial da Saúde (OMS) ainda declara que, no que diz respeito a populações que já estejam expostas ao mercúrio sem que antes tenha sido possível evitar longas exposições a essa espécie, têm-se uma tolerância de 6 microgramas de mercúrio por grama de cabelo ($\mu\text{g g}^{-1}$) e, valores que excedem essa referência já apresentam riscos à saúde, sendo este o limite máximo tolerável (FAO; WHO; JECFA, 2003). A Tabela 1 relaciona as referências estabelecidas pela OMS.

Tabela 1 - Referência dos teores de mercúrio na matriz capilar

Valor de Referência	Valor ($\mu\text{g g}^{-1}$)	População em Estudo	Fonte
$1 \mu\text{g g}^{-1}$	Nível de segurança para ação preventiva	Gestantes, crianças, ribeirinhos	OMS/UNEP (2008)
$6 \mu\text{g g}^{-1}$	Limite máximo tolerável	Adultos em geral	FAO/WHO – JECFA (2003)

Fonte: OMS;UNEP, 2008; FAO;WHO; JECFA, 2003 (adaptado)

3.5 Análise de Mercúrio

O Mercúrio, devido a sua bioacumulação, seja nos seres vivos ou meio ambiente, traz prejuízos que demandam de análises cada vez mais sensíveis para a detecção desse elemento (Ribeiro; Germano, 2015).

No decorrer dos anos, diversas técnicas têm sido implementadas para a determinação de Mercúrio, entre elas destacam-se as seguintes técnicas analíticas de Espectrometria de Absorção Atômica, Espectroscopia de Fluorescência Atômica, sensores eletroquímicos e a colorimetria. Apesar desses métodos serem amplamente utilizados, não são muito vantajosos no que diz respeito a análises de traços, uma vez que essas técnicas envolvem etapas complexas de pré-tratamento ocasionando eventuais perdas do analito ou contaminação na amostra, gerando um aumento nas fontes de erro (Saleh et al., 2020).

Para isso, aplicou-se a técnica de Geração termoquímica de vapor acoplada a espectrometria de absorção atômica com vapor frio (do inglês “thermochemical vapor generation cold vapor atomic absorption spectrometry”) usando lâmpada de infravermelho

(Campos, 2024). Essa é uma alternativa para trabalhar com o mercúrio na concentração de ppb (parte por bilhão), reduzindo a perda do analíto ao pular a etapa de pré-tratamento quando comparado com os espectrômetros de absorção atômica com chama (Brito, 2021).

3.6 Espectrometria de Absorção Atômica

De acordo com Skoog, 2006, a técnica de Espectrofotometria de Absorção Atômica baseia-se na absorção da radiação de átomos no estado fundamental gasoso. A princípio, a fonte de radiação sofre excitação através do aquecimento ou descarga elétrica. Ao retornar para o estado fundamental, a fonte de radiação emite radiação em diferentes comprimentos de onda (Skoog, 2006).

A concentração dos átomos no estado gasoso é proporcional à radiação absorvida. Por meio de uma relação logarítmica, a absorção está associada a transmitância (Harris, 2012). O registro da absorbância, de acordo com Harris, 2012, é fornecido a partir da radiação transmitida que, em seguida, é direcionada a um monocromador que refina e seleciona um comprimento de onda específico, encaminhando ao detector. O sinal é obtido a partir da conversão da energia radiante.

Para encontrar a concentração do analito, se utiliza uma equação que relaciona a concentração com a absorbância seguindo os princípios da Lei de Beer. Em que A é a absorbância, ε é absorvidade molar, b é o comprimento óptico e c é a concentração conforme a Equação (1) (Harris, 2012).

$$A = \varepsilon b c \quad (1)$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Resíduos Sólidos e Efluentes (LARSE) do Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC) em parceria com o Laboratório de Estudos em Química Aplicada (LEQA) e do Laboratório de Análise de Água (LANAGUA), ambos da Universidade Federal do Ceará (UFC) e com a Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB).

4.1 Determinação de mercúrio

4.1.1 Materiais e Reagentes

4.1.1.1 Coleta da Amostra

Para a amostragem, lavagem, armazenagem e análise de cabelo, foi adotado o protocolo recomendado pela *International Atomic Energy Agency* (Farias et al., 2008). A coleta das amostras foi realizada em campo, por um professor da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), no âmbito de um projeto social desenvolvido junto à comunidade local. Para a coleta das amostras de cabelo, utilizou-se uma tesoura de aço inox, limpa com etanol (P.A.) da Merck (Merck, Elmsford, Estados Unidos) antes de cada coleta de amostra. Cerca de 50 mg de cabelo foram retirados da área occipital, bem próximo ao escalpo, utilizando luvas para acondicionar os cabelos em envelopes de papel devidamente identificados. As amostras foram armazenadas a temperatura ambiente até análise conforme a Figura 1.

Figura 1 – Amostras de cabelos investigadas no presente estudo



Fonte: A autora (2025)

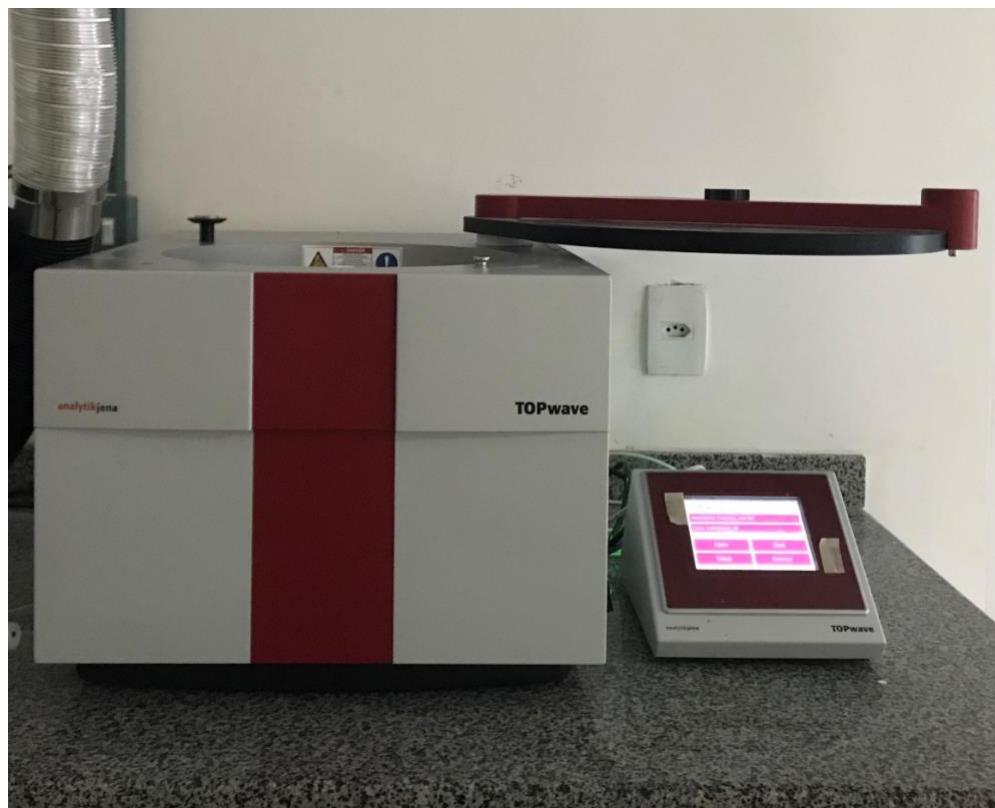
4.1.1.2 Preparo da amostra para análise por TVG-CVAAS com lâmpada de infravermelho

As amostras foram, inicialmente, fragmentadas e armazenadas em frascos âmbar previamente descontaminados em banho ácido (HNO_3 10%).

Posteriormente, pesou-se em uma balança analítica aproximadamente 0,1 g de cada amostra com o auxílio de uma barquinha de papel e transferiu-se para um tubo de PTFE do digestor. Foram adicionados às amostras tubo de PTFE do digestor e, em seguida, as amostras foram encaminhadas ao digestor TOPwave (Analytik Jena, Alemanha) demonstrado na Figura 2.

Após a digestão das amostras, mediu-se a massa de 375 μL de uma solução de Hg 2 mg L^{-1} , 5 mL de amostra, 5 mL de ácido fórmico 50 % e água Milli-Q até atingir a massa de 25 g. Esse procedimento foi repetido para todas as amostras que posteriormente foram armazenadas em novos tubos Falcon devidamente identificados.

Figura 2 – Digestor utilizado no preparo das amostras de cabelo



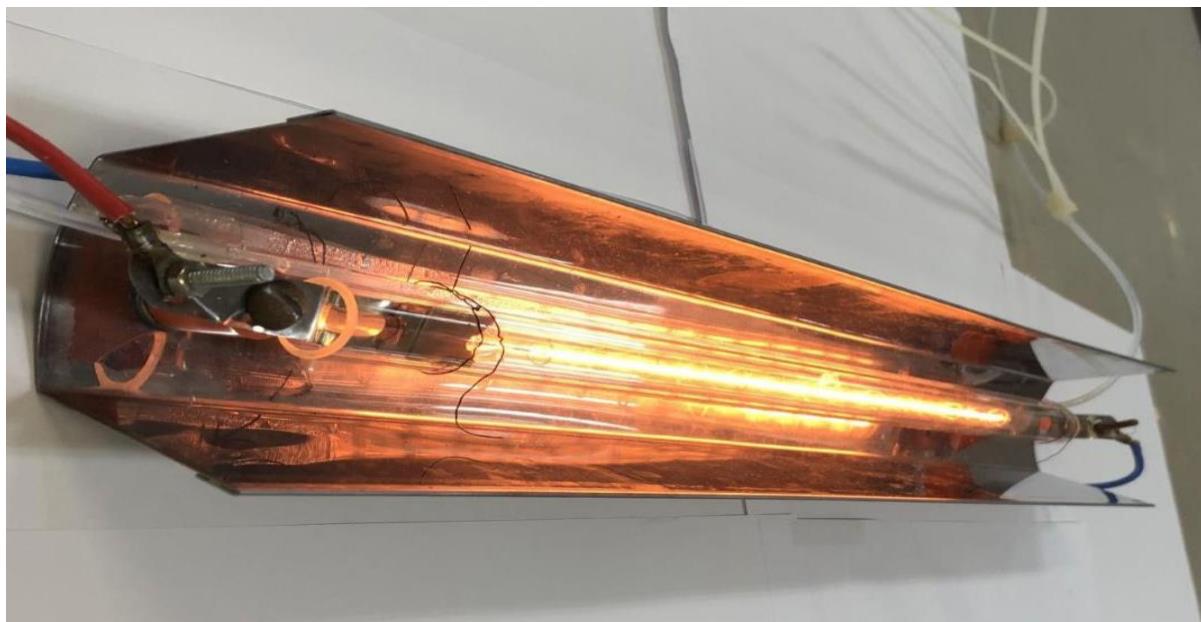
Fonte: a autora, (2025)

4.1.2 Instrumentação

4.1.2.1 Reator Termoquímico

Utilizou-se um reator (Figura 3) contendo uma lâmpada de IR de modelo 13195X e comprimento de 45 cm (Philips, China) para gerar espécies voláteis de Hg por TVG-IR acoplado ao CVAAS. O percurso da amostra foi por meio de um capilar de quartzo com dimensões de 41 cm de comprimento, 2,2 mm e 1,65 mL de diâmetro interno e volume interno, respectivamente. O capilar de quartzo (caminho da amostra) foi disposto sob a lâmpada para que a amostra possa ser irradiada. O reator teve sua temperatura variada por meio de um variador de potência (Autcontrol, VRP-W 220V) e foi monitorada através de um Termômetro Digital termopar (TES Electrical Eletronic Corp.). Realizou-se cada ensaio com um tempo de 10 min entre um e outro até que atingisse a estabilização da lâmpada de infravermelho (Campos, 2024).

Figura 3 – Reator Termoquímico

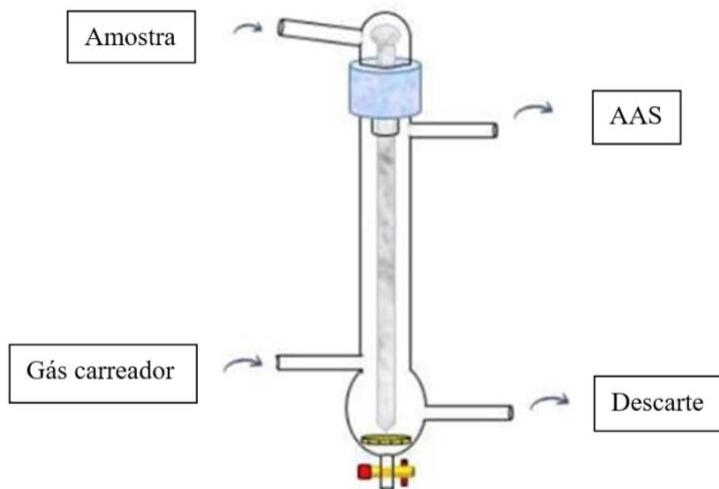


Fonte: Campos, (2024).

4.1.2.2 Separador Gás-Líquido (GLS)

Ao reator Termoquímico é acoplado um GLS para garantir a eficiência da separação das espécies voláteis de Hg da fase líquida. Composto por uma haste cilíndrica central fabricada de material inerte e por uma frita porosa de vidro sinterizado disposta na parte inferior do instrumento, o GLS utilizado no sistema possui um comprimento de possuir 37,5 cm. Para chegar ao GLS, a amostra é distribuída pela haste cilíndrica produzindo uma fina película de líquido, e concomitantemente a isso, em sentido oposto, as espécies voláteis de mercúrio são carreadas por uma corrente de gás (N_2) para a cela de absorção, de acordo com a Figura 4. O GLS foi desenhado, confeccionado e cedido pelo prof. Dr. Ralph do E. Sturgeon da National Research Council Canada (NRC-CNRC, Ottawa, Canadá) (Brito, 2021).

Figura 4 – Desenho Esquemático do Separador Gás-Líquido



Fonte: Campos, (2024)

4.1.2.3 Sistema instrumental da Geração Termoquímica de Vapor (TVG)

O sistema instrumental da Geração Termoquímica de Vapor é constituído por um reator termoquímico, no qual há a irradiação da amostra com posteriores reações de termólise do precursor orgânico e, a redução do Hg^{2+} a Hg^0 .

A geração termoquímica de vapor ocorre por meio da termólise do ácido fórmico que gera radicais intermediários (WU et al., 2012). Os radicais do ácido fórmico reduzem o mercúrio à sua forma volátil Hg^0 de acordo com a Equação (2) (Sturgeon e Luong, 2013).



Estudos realizados citam que a decomposição termoquímica do ácido fórmico se trata de uma reação reversível e pode ser feita em meio aquoso sob aquecimento, através da desidratação ou descarboxilação, conforme as Equações (3) e (4), respectivamente (Hsu et al., 1992; Yasaka et al., 2010).



Essa etapa inicia com as amostras sendo direcionadas ao sistema por meio de uma bomba peristáltica de 4 canais programáveis (Minipuls® 3, Gilson) em modo de fluxo contínuo em direção ao reator termoquímico (Brito, 2021).

Após o aquecimento, as amostras aquecidas são conduzidas por um capilar de PFA com diâmetro interno de 0,8 mm e 500 µL de volume imerso em um banho de gelo para resfriamento (Campos, 2024).

Em seguida, após serem submetidas ao resfriamento, as amostras são direcionadas ao separador gás-líquido (GLS), para a separação da parte líquida e volátil. A parte líquida é direcionada a um sistema de descarte através da mesma bomba peristáltica, enquanto a parte contendo as espécies voláteis da amostra são carreadas por meio de um fluxo de gás carreador (N_2), do GLS para uma cela de absorção (Brito, 2021).

As medidas da cela de absorção, formada por um tudo de quartzo, são de 18 cm de comprimento por 1,8 cm de diâmetro interno. Sob temperatura ambiente, a cela de absorção é posicionada sobre o queimador e alinhada ao caminho ótico do espectrômetro de absorção atômica (Varian AS 240FS, Mulgrave, Austrália). O espectrômetro é equipado com uma lâmpada de catodo oco (HCL) de Hg (Agilent Technologies) que atua como fonte de radiação e com uma lâmpada de deutério utilizada para correção de fundo. O sinal é obtido de forma integrada (Brito, 2021). As configurações operacionais estão exibidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros instrumentais do AAS para determinação de Hg

Parâmetros Instrumentais do AAS	
Comprimento de onda (nm)	253,7
Abertura da fenda (nm)	0,5
Corrente da lâmpada (mA)	4
Número de leituras	5
Tempo por leitura (s)	20
Tempo de <i>delay</i> (s)	240

Fonte: A autora (2025)

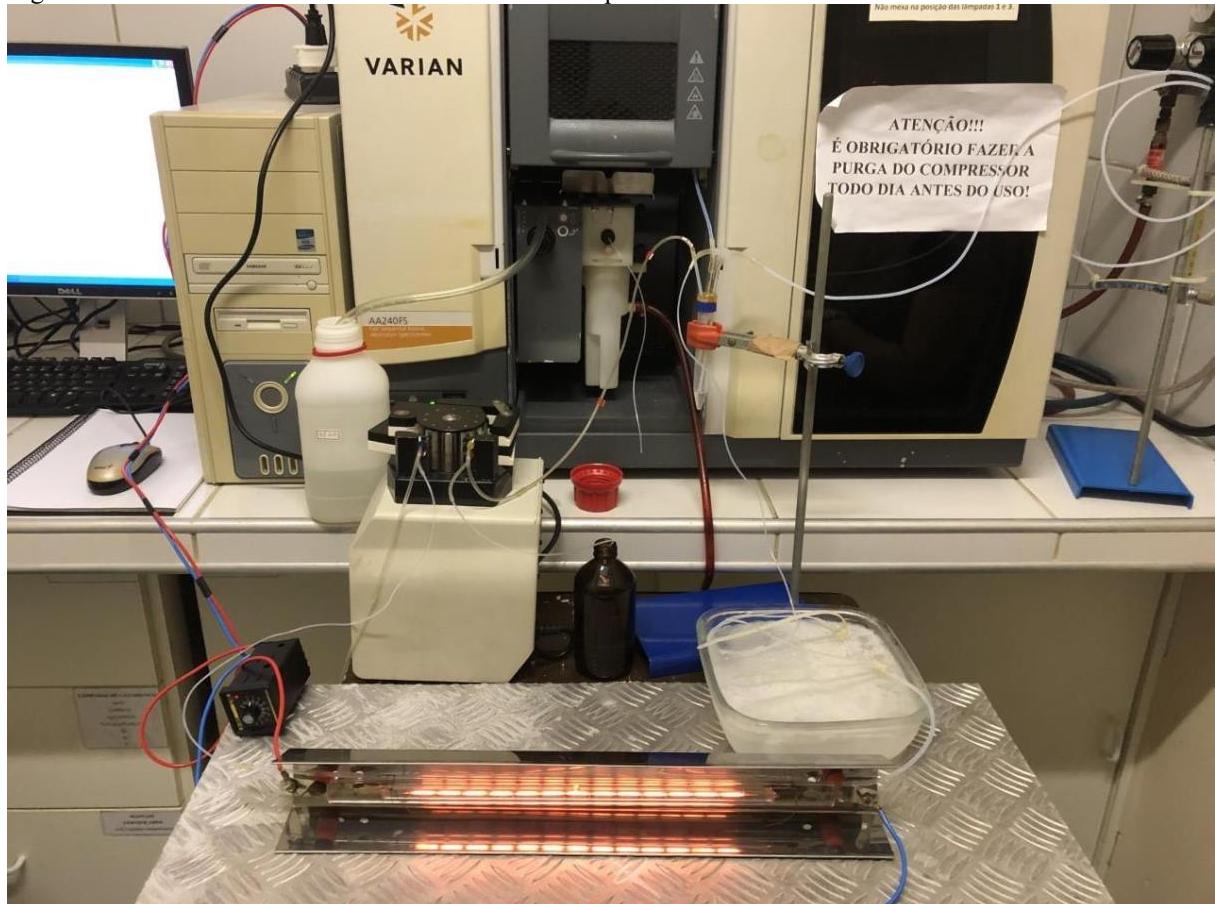
Além disso, para garantir a propulsão dos fluidos da bomba peristáltica e a remoção dos resíduos do GLS, o sistema é composto por tubos de transmissão de Tygon® de polietileno de vários diâmetros. A tubulação por onde a amostra é transferida tem sua composição de PFA (Brito, 2021).

Utiliza-se, para a linha de transferência entre o GLS e o tubo de quartzo, uma tubulação de 20 cm de comprimento de uma tubulação composta de PTFE e, para conduzir o

gás carreador do fluxímetro (SIMOKIT, 6 – 60 mL min⁻¹) ao GLS, uma tubulação de PTFE com medida de 40 cm de comprimento é empregada (Brito, 2021).

A Figura 5 ilustra o sistema e o modelo de geração Termoquímica de Vapor acoplado ao Espectrômetro de Absorção Atômica utilizando a lâmpada de infravermelho.

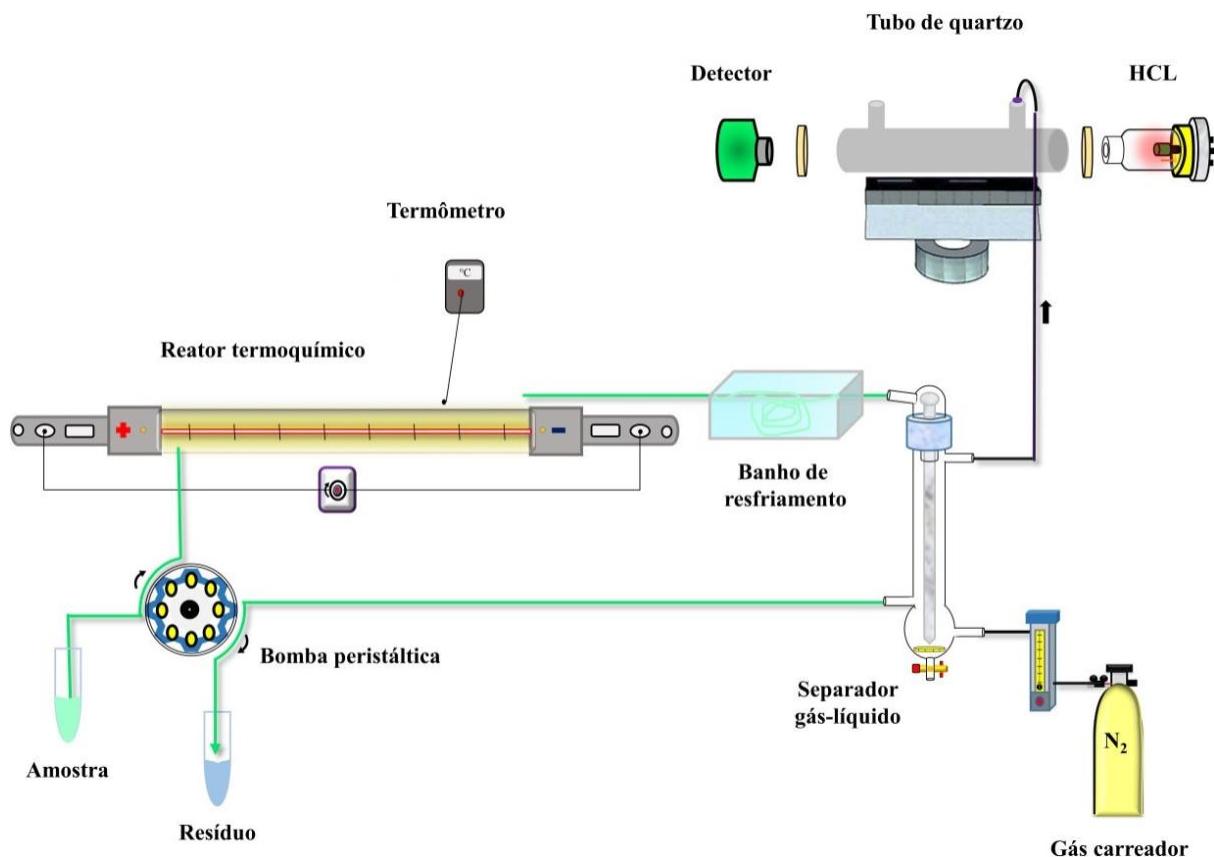
Figura 5 – Sistema instrumental TVG-CVAAS com lâmpada de infravermelho



Fonte: Campos, (2024)

A Figura 6 apresenta o modelo esquemático do sistema detalhadamente, indicando a entrada da amostra, passando pelo processo de geração termoquímica de vapor do mercúrio, resfriamento, separação da fração volátil e sistema de gás carreador, leitura no espectrômetro de absorção atômica e descarte dos resíduos gerados.

Figura 6 – Modelo do sistema TVG-CVAAS com lâmpada de infravermelho



Fonte: Campos, (2024)

4.1.4 Curva de Calibração

Para a obtenção de uma curva de calibração, preparou-se 50 mL de uma solução mãe de Hg 2 mg L⁻¹ em meio de ácido fórmico 20%. Os pontos escolhidos para a curva foram a partir de diluições de 5, 10, 15, 20, 30 e 40 ppb partindo da solução mãe de mercúrio. Os resultados, medidos em termos de absorbância, foram usados para elaborar a curva de calibração a fim de avaliar o valor de R² para que este estivesse o mais próximo de 1 e, assim, seguir a Lei de Beer.

4.1.5 Procedimento

Iniciou-se o procedimento experimental com o preparo das amostras de cabelo. Cada amostra de cabelo foi devidamente fragmentada com o auxílio de uma tesoura de aço inox a fim de aumentar a superfície de contato do material. Logo em seguida, armazenou-se cada amostra de cabelo fragmentado em respectivos frascos âmbar.

Posteriormente, pesou-se em uma balança analítica cada amostra de cabelo em duplicada, usando como referência aproximadamente 0,1 g de amostra e, logo em seguida, foram digeridas. As amostras e respectivas massas estão dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 – Massas das amostras para digestão

Amostra	Replicata	Massa / g	Amostra	Replicata	Massa / g
AM1	01	0,2047	AM5	16	0,1004
	02	0,2035		17	0,1010
AM2	04	0,0818	AM6	19	0,1019
	05	0,0787		20	0,1009
AM3	07	0,1097	AM7	22	0,1006
	08	0,1033		23	0,1010
AM4	13	0,1065	AM8	25	0,1033
	14	0,1014		26	0,1059

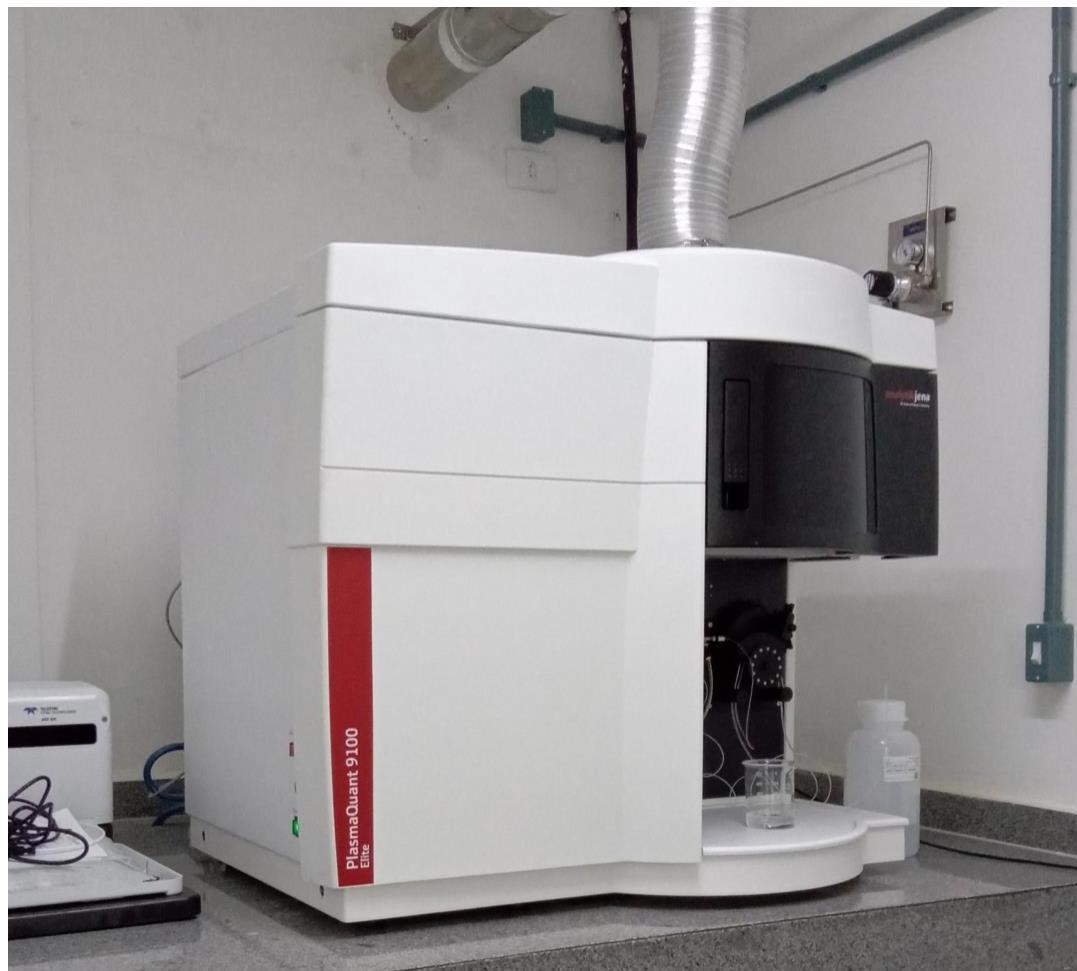
Fonte: a autora (2025)

As amostras e padrões de referência para calibração foram então submetidas a análises, inicialmente sendo direcionadas ao reator termoquímico através de uma bomba peristáltica em fluxo contínuo. No reator termoquímico as amostras passaram por uma tubulação de PFA formando uma espiral ao redor de uma lâmpada de infravermelho. Logo em seguida, após passar pelo sistema da reação termoquímica, a solução foi submetida a um banho de resfriamento e, posteriormente, foram encaminhadas ao GLS para separar a parte volátil da parte líquida resultante da condensação. A fração volátil foi carreada por gás nitrogênio até a cela de absorção para detecção por AAS.

4.2 Determinação da Concentração de Metais por ICP-OES

Para a determinação das concentrações de Cu, Ni, Pb, As e Cd, mediu-se 200 mg de cada amostra de cabelo para uma digestão ácida com 3 mL de ácido nítrico (HNO_3 65% m/m, Sigma-Aldrich) e 1 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2 30%, Sigma-Aldrich). A digestão foi realizada em sistema fechado assistido por forno de micro-ondas (TOPwave, Analytik Jena, Alemanha). Após o resfriamento, as soluções digeridas foram quantitativamente transferidas para tubos Falcon e, logo após, foram diluídas para 10 mL com água ultrapura (resistividade 18,2 $\text{M}\Omega \text{ cm}$). Para determinação dos elementos, empregou-se a Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), utilizando-se o equipamento PlasmaQuant 9100 ® (Analytik Jena, Alemanha) (Figura 7).

Figura 7 – Equipamento utilizado para a determinação da concentração de Cu, Ni, Pb, As e Cd por ICP-OES



Fonte: a autora, (2025).

4.2.1 Procedimento para Determinação da Concentração de Metais por ICP-OES

A amostra é introduzida no equipamento por meio de um sistema de nebulização que converte a amostra em aerossol. Utilizando gás argônio, o aerossol é carreado em direção ao Plasma. As espécies, em contato com o Plasma, são excitadas e, ao retornarem ao estado fundamental emitem radiações específicas para cada uma das espécies analisadas que são identificadas por um detector.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Curva de Calibração

Dado os valores calculados para o preparo e posterior análise das soluções de mercúrio, obtiveram-se, em triplicata, para cada concentração do Hg, as absorbâncias dispostas na Tabela 4.

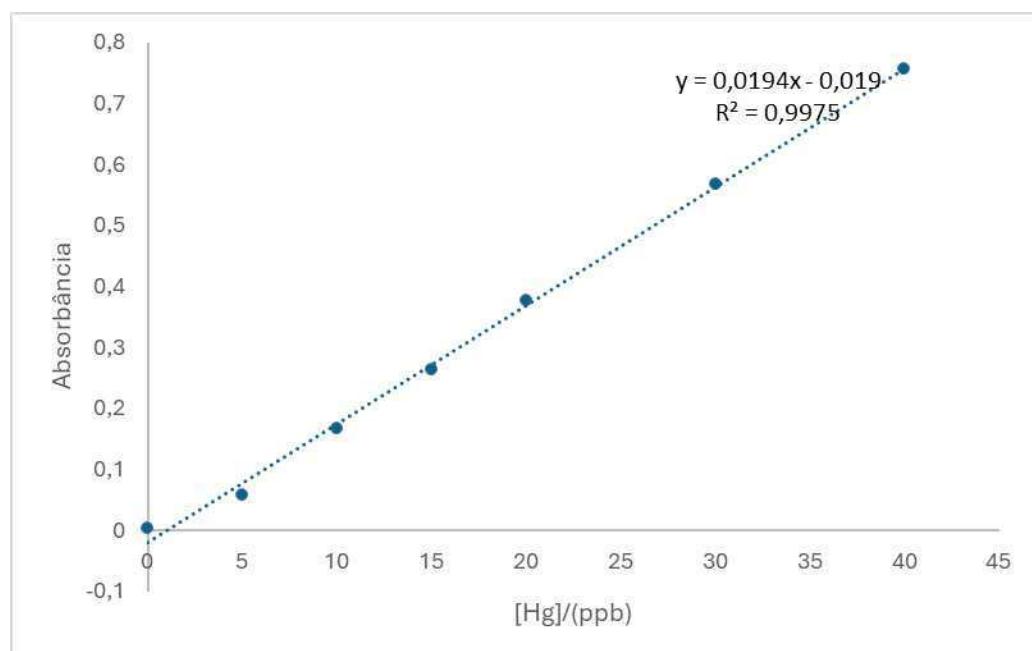
Tabela 4 – Resultados obtidos da curva de calibração

[Hg]/ ppb	Absorbância 1	Absorbância 2	Absorbância 3	Média Absorbância
0	0,0035	0,0038	0,0041	0,0038
5	0,0587	0,0586	0,0582	0,0585
10	0,1653	0,1670	0,1680	0,1667
15	0,2622	0,2647	0,2663	0,2644
20	0,3738	0,3769	0,3800	0,3769
30	0,5602	0,5687	0,5747	0,5674
40	0,7514	0,7593	0,7598	0,7568

Fonte: a autora (2025)

Através da regressão linear a curva de calibração foi calculada, resultando em uma equação $y = 0,0194x - 0,019$ e, um valor de $R^2 = 0,9975$. O Gráfico 1 indica que a curva obtida segue a Lei de Beer.

Gráfico 1 – Curva de calibração do Hg no TVG-AAS



Fonte: a autora (2025)

5.2 Determinação de Mercúrio

Mediante a análise por Geração Termoquímica de Vapor acoplado ao Espetrômetro de Absorção Atômica com Vapor Frio, valores de absorbância foram determinados e, com isso, foi possível calcular o valor da concentração de Hg em $\mu\text{g L}^{-1}$ por meio da equação da reta da curva de calibração (Tabela 5).

Tabela 5 – Resultados referentes as absorbâncias e concentrações de Hg por TVG-CVAAS

Amostra	Replicata	Absorbância	[Hg] / $\mu\text{g L}^{-1}$
Branco	10	0,5663	30,1701
	11	0,5667	30,1907
AM1	01	0,5673	30,2216
	02	0,5671	30,2113
AM2	04	0,5502	29,3402
	05	0,5501	29,3350
AM3	07	0,5669	30,2010
	08	0,5668	30,1958
AM4	13	0,5675	30,2319
	14	0,5674	30,2268
AM5	16	0,5680	30,2577
	17	0,5679	30,2525
AM6	19	0,5451	29,0773
	20	0,5449	29,0670
AM7	22	0,5668	30,1958
	23	0,5667	30,1907
AM8	25	0,5398	28,8041
	26	0,5394	28,7835

Fonte: a autora (2025)

De acordo com a Equação (5), obtém-se a concentração de mercúrio corrigida por meio da diferença entre a concentração em ppm de Hg determinada pela absorbância de cada amostra e a concentração de 30 ppb de Hg adicionada as amostras para que estas estivessem dentro da curva analítica durante as análises.

$$[\text{Hg}]_{\text{Corrigida}} = [\text{Hg}] - 30 \text{ ppb} \quad (5)$$

A partir da Equação (6) é determinado o valor referente a concentração de Hg de cada amostra analisada descontando a média das replicatas do Branco, em $\mu\text{g L}^{-1}$.

$$[Hg]_{Amostra} = [Hg]_{Corrigida} - Média [Branco] \quad (6)$$

Os valores das concentrações de Hg corrigidas estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 6 – Resultados das concentrações de Hg corrigidas

Amostra	Replicatas	[Hg] Corrigida / $\mu\text{g L}^{-1}$	[Hg] Amostra / $\mu\text{g L}^{-1}$
Branco	10	0,1701	-
	11	0,1907	-
AM1	01	0,2216	0,0412
	02	0,2113	0,0309
AM2	04	-0,6598	-0,8402
	05	-0,6649	-0,8454
AM3	07	0,2010	0,0206
	08	0,1959	0,0155
AM4	13	0,2320	0,0515
	14	0,2268	0,0464
AM5	16	0,2577	0,0773
	17	0,2526	0,0722
AM6	19	-0,9227	-1,1031
	20	-0,9330	-1,1134
AM7	22	0,1959	0,0155
	23	0,1907	0,0103
AM8	25	-1,1959	-1,3763
	26	-1,2165	-1,3969

Fonte: a autora (2025)

Levando em consideração a Equação (7), é possível encontrar o valor das diluições das amostras partindo das concentrações de mercúrio, das massas pesadas para 25 mL de solução (mT solução) e das massas pesadas das soluções de Hg (m Hg) que foram medidos durante o preparo das amostras para as análises por TVG-AAS.

$$Diluição = \frac{[Hg]_{amostra} * mT_{solução}}{mHg} \quad (7)$$

A concentração de Hg calculados pela Equação (7) estão distribuídos na Tabela 6.

Tabela 7 – Resultados das concentrações reais de Hg presente nas amostras de cabelo

Amostra	Replicatas	Diluição / $\mu\text{g L}^{-1}$	[Hg] real na amostra / $\mu\text{g kg}^{-1}$
Branco	10	-	-
	11	-	-

AM1	01	0,1842	8,9972
	02	0,1368	6,7237
AM2	04	<LOD	<LOD
	05	<LOD	<LOD
AM3	07	0,0912	8,3102
	08	0,0692	6,6948
AM4	13	0,1925	18,0741
	14	0,1681	16,5765
AM5	16	0,2797	27,8593
	17	0,2644	26,1753
AM6	19	<LOD	<LOD
	20	<LOD	<LOD
AM7	22	0,0648	6,4441
	23	0,0515	5,1036
AM8	25	<LOD	<LOD
	26	<LOD	<LOD

Fonte: a autora (2025)

Cálculos de média das concentrações foram feitos para as duplicatas de todas as amostras conforme informado na Tabela 8. Calculou-se também o desvio padrão (SD) para medir a proximidade do conjunto dos dados entorno da média. Os valores dos conjuntos de dados próximos da média são indicados por valores baixos de desvios padrão. Na Tabela 7, amostra AM7, depois do branco, corresponde ao menor valor de SD, logo, as duplicatas dessa amostra apresentaram valores próximos da média. Para estimar a precisão das medidas em termos percentuais calculou-se o desvio padrão relativo que relaciona o desvio padrão pela média.

Tabela 8 – Resultados estatísticos da determinação de Hg

Amostra	Média / $\mu\text{g kg}^{-1}$	SD	RSD (%)
Branco	0,1804	0,0146	8,0812
AM1	7,8604	1,6076	20,4520
AM2	<LOD	23,4477	<LOD
AM3	7,5025	1,1423	15,2252
AM4	17,3253	1,0589	6,1120
AM5	27,0173	1,1907	4,4073
AM6	<LOD	7,0296	<LOD
AM7	5,7738	0,9479	16,4165

AM8	<LOD	4,6813	<LOD
------------	------	--------	------

Fonte: a autora (2025)

A Tabela 9 mostra os valores das concentrações de mercúrio total nas amostras de cabelo dos adultos residentes da Comunidade Quilombola de Cocalinhos, no Maranhão, analisadas pelo Sistema de Geração de Vapor. As concentrações de Hg foram baixas e, em algumas amostras, o valor obtido foi abaixo do limite de detecção (LOD) do instrumento, como nas amostras AM2, AM6 e AM8. Os valores abaixo do LOD podem estar relacionados com a baixa ineficiência da digestão da amostra, uma vez que o Hg pode ter ficado retido na matriz capilar, ou até mesmo adsorvido nas tubulações de PFA do sistema levando em consideração a sua volatilidade. As amostras AM5 e AM4, respectivamente, apresentaram as maiores concentrações de mercúrio, de 27,0173 e 17,3253 $\mu\text{g kg}^{-1}$, contudo estão dentro do recomendado pela Organização Mundial da Saúde, que alerta sobre riscos à saúde em níveis acima de 6 microgramas de mercúrio por grama de cabelo ($\mu\text{g g}^{-1}$). Costa Júnior e Silva (2018), em um estudo desenvolvido com amostras de cabelos de uma comunidade ribeirinha da região de Tapajós, reportaram que a concentração média de HgT encontrada nos anos de 2013 e 2014 foram de 7,83 e 11,19 $\mu\text{g g}^{-1}$, respectivamente, sendo valores acima do recomendado pela OMS. Ao comparar os resultados das concentrações de HgT desse estudo da região de Tapajós com os teores de Hg encontrados nas amostras de cabelo da comunidade quilombola de Cocalinho, nota-se o quanto o mercúrio esteve em baixas concentrações nas amostras.

Vale salientar que as concentrações trabalhadas são em níveis de traços e estão sujeitas a quaisquer interferências por contaminantes durante o preparo das amostras, principalmente cloretos (Cl^-) na água de preparo ou residuais dessa espécie nas tubulações ou vidrarias utilizadas nos ensaios que se ligam facilmente ao mercúrio (Macsen Labs, 2023). As oscilações do fluxo do gás de arraste ou leves variações na temperatura do reator termoquímico também podem influenciar.

Tabela 9 – Hg determinado no Sistema TVG-CVAAS

Amostra	[Hg] / $\mu\text{g kg}^{-1}$
AM1	$7,86 \pm 1,6$
AM2	<LOD
AM3	$7,50 \pm 1,14$
AM4	$17,32 \pm 1,1$
AM5	$27,02 \pm 1,2$
AM6	<LOD
AM7	$5,77 \pm 0,94$

AM8**<LOD**

Fonte: a autora (2025)

Valores das médias das concentrações ($\mu\text{g kg}^{-1}$) \pm desvio padrão.

As amostras de cabelos analisadas no presente estudo apresentam baixas concentrações de mercúrio dentro dos limites recomendados pela OMS. Sendo assim, há poucas chances de riscos à saúde associadas ao mercúrio no que se refere às pessoas da Comunidade Quilombola de Cocalinho que cederam as amostras de cabelo para as análises.

Tendo em vista que o uso de agrotóxicos organomercuriais estão regulamentados e seu uso está suspenso em território nacional, os baixos valores de concentração de mercúrio nas amostras se mostram coerentes com a redução desses agrotóxicos após a sua proibição, uma vez que a população de Cocalinho destacou o contato com os agrotóxicos por meio das pulverizações, ou seja, o contato do Hg com a superfície dos cabelos seria principalmente por contaminação exógena. Outra possibilidade de contato com o Hg seria através da ingestão de alimentos ou água contaminados, no entanto os teores de mercúrio ainda foram muito baixos considerando o tempo de exposição aos agrotóxicos. Demais formas de contaminação não estão descartadas, seja para Hg ou outras espécies químicas.

Apesar de a OMS orientar que níveis acima de $6 \mu\text{g g}^{-1}$ já tragam riscos à saúde humana, não existe uma legislação de fato que estabeleça a quantidade de mercúrio mínima e máxima nos cabelos. Para isso, torna-se necessário uma investigação mais detalhada quanto as técnicas de análises a serem usadas, bem como a fonte de amostragem a ser determinado o mercúrio, a fim de permitir uma comparação mais adequada com a legislações que estabelecem limites de Hg em outros tipos de matrizes que não sejam o cabelo propriamente dito.

5.3 Determinação da Concentração de Metais por ICP-OES

O presente trabalho ainda propôs a quantificação de espécies metálicas nas amostras de cabelo por meio da Espectrometria de Emissão Optica por Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). Os metais analisados através da técnica foram Cu, Ni, Pb, As e Cd. A Tabela 10 traz as concentrações dos metais encontradas pela análise do ICP-OES, em mg kg⁻¹.

Tabela 10 – Concentrações de Cu, Ni e Pb analisadas nas amostras de cabelo por ICP

Amostra	[Cu] / mg kg⁻¹	[Ni] / mg kg⁻¹	[Pb] / mg kg⁻¹
AM1	9,32 ± 0,17	<LOD	0,0269 ± 0,003
AM2	23,65 ± 0,50	<LOD	<LOD
AM3	7,26 ± 0,62	<LOD	<LOD
AM4	10,38 ± 0,51	<LOD	0,79 ± 0,07
AM5	97,53 ± 5,6	1,78 ± 0,07	1,08 ± 0,06
AM6	27,13 ± 3,1	<LOD	0,1282 ± 0,03
AM7	11,11 ± 4,4	<LOD	<LOD
AM8	8,07 ± 0,47	<LOD	<LOD

Fonte: a autora (2025)

Nota-se que o Ni se mostrou presente apenas na amostra AM5 e, nas demais amostras esteve abaixo do limite de detecção do ICP-OES. A presença desse metal não é descartada, entretanto faz-se necessário o uso de instrumentos mais sensíveis, abrangendo teores mais baixos de Ni.

O Pb foi encontrado em baixas concentrações e, assim como o Ni, tiveram teores menores que o LOD. Observa-se na Tabela 10 que o maior teor de Pb foi de 1,08 mg kg⁻¹ na amostra AM5. Os elementos As e Cd não apresentaram sinal nos ensaios por Espectrometria de Emissão Optica possivelmente pela população não ter tido exposição a esses elementos ou não ser possível quantificá-las dentro do LOD do equipamento.

Destaca-se uma elevada concentração de Cu nas amostras, em destaque AM5 com 97,53 mg kg⁻¹, seguida das amostras AM6 e AM2. A literatura reporta que há a presença de cobre em pesticidas, entre eles oxicloreto de cobre ($Cu_2Cl(OH)_3$), óxido cuproso (Cu_2O), hidróxido de cobre ($Cu(OH)_2$) e o sulfato de cobre ($CuSO_4$), este último está com seu uso em fase de registro (Oliveira, 2020).

O sulfato de cobre, por exemplo, quando absorvido pelo organismo humano, seja ingerido ou pelo contato com as vias respiratórias, entra rapidamente na corrente sanguínea se espalhando pelo corpo. Após o excesso de cobre ser excretado, a quantidade remanescente se

acumula no corpo e fica retida nos cabelos, fígado, coração, intestino, músculos e demais partes do corpo (National Pesticide Information Center – NPIC, [s.d.]).

As análises por ICP-OES permitiram aprofundar o estudo que tem como ideia principal a quantificação de mercúrio em cabelos de Quilombolas proveniente da contaminação por agrotóxicos. Os resultados obtidos contribuem instigando a pesquisa acerca da contaminação por agrotóxicos que tenham sua composição com alguma das espécies quantificadas (Cu, Ni e Pb), além de outras fontes de contaminação que podem acumular no cabelo ou até mesmo avaliar se os teores determinados das espécies estão em conformidade com as legislações.

De modo geral, a importância desse estudo enfatiza sobre a contribuição do trabalho científico na investigação da contaminação por mercúrio e/ou outras espécies, gerando dados que auxiliem na adoção de políticas voltadas para a proteção e garantia da saúde de comunidades tradicionais.

6 CONCLUSÃO

A utilização da Geração Termoquímica de Vapor com lâmpada de infravermelho acoplada a Espectrometria de Absorção Atômica com Vapor Frio se mostrou eficiente para quantificar os teores de mercúrio nas amostras de cabelo dos adultos da Comunidade Quilombola de Cocalinho.

As concentrações de mercúrio encontradas nas amostras de cabelo da população do estudo foram baixas, entre $5,77$ e $27,02 \mu\text{g kg}^{-1}$, estando esses valores dentro dos limites tolerados pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Algumas amostras estiveram abaixo do limite de detecção (LOD), indicando a população não teve contato com o mercúrio, seja por contaminação no sangue ou contaminação exógena das pulverizações dos agrotóxicos nas proximidades no território quilombola.

O uso da Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) amplia a possibilidade do estudo de outras formas de contaminação que a população de Cocalinho possa estar exposta. As análises determinaram concentrações de Cu, Ni, Pb, As e Cd e obtiveram, no geral, elevados teores de Cu em todas as amostras de cabelo. Ni e Pb resultaram em baixos teores, alguns inferiores ao limite de detecção do equipamento, enquanto As e Cd não apresentaram sinal.

O uso das técnicas de TVG-CVAAS com fonte de infravermelho e ICP-OES para avaliação dos teores de mercúrio e teores de espécies metálicas, respectivamente, contribuíram de forma significativa para o desenvolvimento desse estudo, de modo a instigar o questionamento de outra possíveis fontes de contaminação que possam estar associadas as doenças que acometem a Comunidade Quilombola de Cocalinho.

REFERÊNCIAS

AMARAL, Gustavo. **Yanomamis de nove aldeias assediadas pelo garimpo estão contaminados por mercúrio.** Agência Fiocruz, 5 abr. 2024. Disponível em: <https://fiocruz.br/noticia/2024/04/yanomamis-de-nove-aldeias-assediadas-pelo-garimpo-estao-contaminados-por-mercurio>. Acesso em: 6 jul. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. *Resolução RDC nº 922, de 20 de março de 2024.* Dispõe sobre as Boas Práticas de Fabricação complementares para dispositivos médicos personalizados. Disponível em: https://anvisalegis.datalegis.net/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&tipo=RDC&numeroAto=00000922&seqAto=000&valorAno=2024&orgao=RDC/DC/ANVISA/MS&codTipo=&desItem=&desItemFim=&cod_menu=9434&cod_modulo=310&pesquisa=true. Acesso em: 15 jun. 2025.

BRITO, Jane Kelly Sousa de. **Geração termoquímica de vapor induzida por aquecimento com radiação infravermelha para a determinação de mercúrio por CVAAS.** 2021. 70 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

CAMPANHA NACIONAL EM DEFESA DO CERRADO. Série Eco-Genocídio no Cerrado: Comunidades Quilombolas de Cocalinho e Guerreiro. Fascículo 14. [S.l.]: Campanha Nacional em Defesa do Cerrado, 2023. Disponível em: <https://www.campanhacerrado.org.br/>. Acesso em: 8 jul. 2025.

CAMPOS, Victor Marques. **Desenvolvimento de método de geração termoquímica de vapor assistida por radiação infravermelha para determinação de mercúrio por espectrometria de absorção atômica.** 2024. 82 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

CEARÁ (Estado). Lei nº 12.228, de 9 de dezembro de 1993. **Dispõe sobre o uso, a produção, o consumo, o comércio e o armazenamento dos agrotóxicos, seus componentes e afins, bem como sobre a fiscalização do uso, do consumo, do comércio, do armazenamento e do transporte interno desses produtos.** Diário Oficial do Estado, Fortaleza, CE, 14 dez. 1993. Disponível em: <https://belt.al.ce.gov.br/index.php/legislacao-do-ceara/organizacao-tematica/meio-ambiente-e-desenvolvimento-do-semiarido/item/1688-lei-n-12-228-de-09-12-93-d-o-de-14-12-93>. Acesso em: 23 jun. 2025.

COSTA JÚNIOR, José Maria Farah et al. **Teores de mercúrio em cabelo e consumo de pescado de comunidades ribeirinhas na Amazônia brasileira, região do Tapajós.** Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, p. 805–812, mar. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1413-81232018233.09492016>>. Acesso em: 21 jul. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Agrotóxicos no Brasil.** Agência de Informação Tecnológica – Agricultura e Meio Ambiente – Qualidade – Dinâmica, [s.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agricultura-e-meio-ambiente/qualidade/dinamica/agrotoxicos-no-brasil>. Acesso em: 19 jun. 2025.

FIOTEC – Fundação Oswaldo Cruz. **Yanomamis de nove aldeias assediadas pelo garimpo estão contaminados por mercúrio.** Fiotec, Rio de Janeiro, 18 jul. 2024. Disponível em:

<https://www.fiotec.fiocruz.br/noticias/outros/8478-yanomamis-de-nove-aldeias-assediadas-pelo-garimpo-estao-contaminados-por-mercurio>. Acesso em: 21 jul. 2025.

HARADA, M. Minamata disease: **methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution**. *Critical Reviews in Toxicology*, [S.l.], v. 25, n. 1, p. 1–24, 1995. DOI: 10.3109/10408449509089885. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7734058/>. Acesso em: 24 jun. 2025.

LACERDA, L. D. Contaminação por mercúrio no Brasil: fontes industriais vs garimpo de ouro. *Química Nova*, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 196-199, 1997. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/hjbCmKwN3TnKJnsYzvPNswD/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 23 jun. 2025.

LONDRES, F. **Agrotóxicos no Brasil: um guia para ação em defesa da vida**. 1. ed. Rio de Janeiro: Rede Brasileira de Justiça Ambiental; Articulação Nacional de Agroecologia, 2011. Disponível em: <https://br.boell.org/sites/default/files/agrotoxicos-no-brasil-mobile.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2025.

MACSEN LABS. **Mercury salts and their applications**. Macsen Labs, 2023. Disponível em: <https://www.macsenlab.com/blog/mercury-salts-their-applications/>. Acesso em: 26 jul. 2025.

NATIONAL PESTICIDE INFORMATION CENTER – NPIC. **Copper sulfate general fact sheet**. Corvallis, OR: Oregon State University; [s.d.]. Disponível em: https://npic.orst.edu/factsheets/cuso4gen.html?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 22 jul. 2025.

NUTTALL, K. L. **Interpreting hair mercury levels in individual patients**. Annals of Clinical & Laboratory Science, Baltimore, v. 36, n. 3, p. 248–261, 2006. Disponível em: <<https://www.annclinlabsci.org/content/36/3/248.full.pdf+html>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

O’CONNOR, D.; HOU, D.; OK, Y. S.; MULDER, J.; DUAN, L.; WU, Q.; WANG, S.; TACK, F. M. G.; RINKLEBE, J. **Mercury speciation, transformation, and transportation in soils, atmospheric flux, and implications for risk management: a critical review**. Environment International, [s.l.], v. 126, p. 747-761, maio 2019.

O ESTADO DE SÃO PAULO. **Brasil é destino de agrotóxicos banidos no exterior**. O Estado de S. Paulo, São Paulo, 30 maio 2010. Disponível em: <http://www.estadao.com.br/noticias/geral,brasil-e-destino-de-agrotoxicos-banidos-no-exterior,558953,0.htm>. Acesso em: 19 jun. 2025.

OLIVEIRA, Gerson. **Nem todo produto com cobre é fungicida**. Mais Soja, 04 maio 2020. Disponível em: <https://maissoja.com.br/nem-todo-produto-com-cobre-e-fungicida2/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Mercury**. Washington, D.C.: OPAS, 2025. Disponível em: <<https://www.paho.org/en/topics/mercury>>. Acesso em: 8 jul. 2025.

SECRETARIA DE ESTADO DA SAÚDE DO PARANÁ. **Intoxicações agudas por agrotóxicos: atendimento inicial do paciente intoxicado**. Curitiba: SESAPR, 2018. Disponível em: https://www.saude.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2020-04/intoxicacoesagudasagrotoxicos2018.pdf. Acesso em: 19 jun. 2025.

THOMPSON, F.; OLIVEIRA, B. C.; CORDEIRO, M. C.; MASI, B. P.; RANGEL, T. P.; PAZ, P.; FREITAS, T.; LOPES, G.; SILVA, B. S.; CABRAL, A. S. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 705, p. 135914, fev. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135914>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719359091>. Acesso em: 15 jun. 2025.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Basic information about mercury**. 2024a. Disponível em: <https://www.epa.gov/mercury/basic-information-about-mercury>. Acesso em: 5 jun. 2025.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **How people are exposed to mercury**. 2024b. Disponível em: <https://www.epa.gov/mercury/how-people-are-exposed-mercury#methylmercury>. Acesso em: 1 mai. 2025.

WHO; UNEP – WORLD HEALTH ORGANIZATION; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure**. Geneva: WHO, 2008. Disponível em: <https://www.who.int/publications/m/item/guidance-for-identifying-populations-at-risk-from-mercury-exposure>. Acesso em: 21 jul. 2025.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Safety evaluation of certain food additives and contaminants. Prepared by the Sixty-seventh meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA)**. Geneva: WHO, 2007. (WHO Food Additives Series, n. 58).

BOELL, Fundação Heinrich. **Agrotóxicos no Brasil: um debate necessário**. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://br.boell.org/sites/default/files/agrotoxicos-no-brasil-mobile.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2025.