



Faculdade de Ciências

Departamento de Química

Licenciatura em Química Ambiental

Trabalho de Licenciatura

Tema:

**Avaliação dos níveis de poluição por mercúrio na água e no ar nas
áreas de mineração artesanal do ouro no distrito de Chifunde
província de Tete**



Autora:

Salfina António Mahiele

Maputo, Setembro de 2025



Faculdade de Ciências

Departamento de Química

Licenciatura em Química Ambiental

Trabalho de Licenciatura

Tema:

**Avaliação dos níveis de poluição por mercúrio na água e no ar nas
áreas de mineração artesanal de ouro no distrito de Chifunde
província de Tete**

Autora: Salfina António Mahiele

Supervisora: Mestre Noor Gulamussen

Co-Supervisor: Mestre Sérgio Chibute

Maputo, Setembro de 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus queridos avós Salfina Chilaúle e José Mahiele, pelo apoio incondicional, encorajamento, por procurarem sempre providenciar o melhor para os meus estudos, por me incentivarem a perseverar neles e lutar pelos meus sonhos. À minha mãe Alberina Chivindze e ao meu tio Orlando Mahiele pelos ensinamentos e cuidados transmitidos ao longo deste percurso, e ao meu marido Dário Macuácuá por fazer parte desta licenciatura e pela motivação que me tem dado ao longo da mesma.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, por me conceder a graça de viver, pelo sustento, abrigo e refúgio nos tempos difíceis e por me permitir chegar aqui.

À minha supervisora Mestre Noor Gulamussen, pela oportunidade, ensinamentos, paciência, apoio e acolhimento, por se ter disponibilizado sempre que tive dúvidas, pela compreensão e ajuda.

Ao Mestre Sérgio Chibute, por me ter concedido espaço para realizar as minhas análises no Departamento de Bioquímica, pelo acompanhamento e disposição. À Mestre Adelaide Cumbane e ao Sr. Pedro pela ajuda, pela disposição, conselhos e amizade incondicional durante a realização do trabalho no laboratório da Faculdade de Medicina.

Ao Departamento de Química: Aos meus docentes em especial ao Mestre Esneider Suarez, Mestre César Dimande, Prof. Doutor François, Prof. Doutora Tatiana, Prof. Doutor Muteto e Mestre Miguel Mussa pelos ensinamentos proporcionados ao longo do curso, orientação, disciplina e inspiração. Ao Eng.º Macuácu pela ajuda ao longo do curso.

À minha família, meus pais, meu irmão, tios e avós pelo incentivo, compreensão, pelo carinho e motivação.

Às minhas colegas e amigas, Anatércia Saia, Flocas Lucas, Rumana Hatia, Licenciada Hamina Amade, Licenciada Caren Florindo, Nádia Ussene, Verónica Pondecá, Stela Maheho, Rosária Marcelino, Miséria Flora, em geral a todos os colegas pela ajuda e risos que me proporcionaram mesmo em todos os momentos da jornada estudantil. Aos funcionários do Departamento de Química da Universidade Eduardo Mondlane, Nelson Massango e ao Sr Ramiro pelos sábios conselhos, paciência e apoio ao longo de todo o curso.

A todos que de certa forma, não foram aqui citados endereço a minha profunda gratidão!

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Salfina António Mahiele, declaro que o presente trabalho é da minha autoria e foi submetido para obtenção do título de licenciada em Química Ambiental, e foi elaborado com base nos recursos mencionados ao longo do mesmo.

Maputo, Setembro de 2025

A autora

(Salfina António Mahiele)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

µg: Micrograma

CV AAS: *Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry* Espectrometria de absorção atômica

CVAFS: *Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry* Espectrometria de fluorescência atômica

EPA: *Environmental Protection Agency* Agência de Protecção Ambiental

Hg: Mercúrio

ICP-MS: *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* Espectrometria de Massa com plasma acoplado

kg: Quilograma

L: Litros

MAPEO: mineração artesanal de pequena escala de ouro

m³: Metros cúbicos

ng: Nanograma

OMS: Organização Mundial da Saúde

PAD: Perfil ambiental Distrital

TCL: Bacia de Luia

TCF: Bacia de Chifunde

ZAAS: *Zeeman Atomic Absorption Spectrometry* Espectrometria de absorção atômica Zeeman.

RESUMO

O mercúrio é um elemento tóxico aos seres vivos, o qual possui elevada capacidade de biomagnificação na cadeia trófica. Além disso, os efeitos adversos ao meio ambiente, causados pela poluição por este elemento, podem perdurar muitas décadas após o evento de contaminação. O mercúrio metálico é utilizado no processo de amalgamação do ouro, sendo perdido para a água, solo e ar. Para o ar, a principal via de emissão é através da decomposição térmica do amálgama.

Este trabalho teve como objectivo avaliar os níveis de poluição por mercúrio na água e no ar na área de mineração artesanal de ouro no distrito de Chifunde província de Tete. Para isso foram colectadas 30 amostras nas bacias de lavagem de minério na área de mineração artesanal de ouro, e a determinação de mercúrio (Hg) no ar foi realizada em 67 pontos pré-determinados ao longo de rios e em áreas onde ocorre amalgamação de Hg para separação de ouro.

A determinação de Hg na água foi realizada utilizando o analisador de Hg RA-915M acoplado ao acessório RP-95 e a quantificação de mercúrio no ar foi feita de forma directa através do analisador de Hg RA 915M (ZAAS). Foi possível validar as condições para a determinação do Hg em água e os resultados experimentais mostraram que o teor de Hg recuperado foi de 99,98 a 104,05%. As concentrações de Hg na água das bacias TCF apresentam uma variação de $30,60 \pm 6,91$ a $31617,67 \pm 5,09$ ng/L e nas bacias TCL variam $105,70 \pm 13,99$ ng/L a $450,30 \pm 5,22$ ng/L. Os teores de Hg no ar variaram de em 0 a $41,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, apresentando valores abaixo e acima do valor recomendado pela OMS que é de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Os resultados obtidos experimentalmente demonstram que, embora algumas áreas do distrito de Chifunde apresentem poluição por Hg, outras não apresentaram níveis detectáveis. As áreas poluídas representam um risco à saúde e ao meio ambiente. A mitigação das áreas poluídas por Hg pode ser feita através da eliminação das práticas inadequadas de emissões e riscos de exposição ao Hg pelo sector de MAPEO, do tratamento *in situ* da água e da adesão de práticas de extracção sustentáveis.

Palavras-chave: distrito de Chifunde, mercúrio (Hg), mineração artesanal de ouro.

ÍNDICE GERAL

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
DECLARAÇÃO DE HONRA	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	iv
RESUMO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	i
ÍNDICE DE TABELAS	ii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objectivos	3
1.1.1. Objectivo geral:.....	3
1.1.2. Objectivos específicos:	3
1.2. Justificativa do tema em estudo.....	4
1.3. Metodologia	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Descrição do local do estudo	6
2.2. Mercúrio.....	6
2.2.1. Formas do mercúrio	7
2.2.2. Mercúrio no ar e na água.....	8
2.2.3. Toxicidade do Hg.....	9
2.2.4. Fontes de emissão	9
2.2.5. Ciclo biogeoquímico do mercúrio	10
2.2.6. Biocumulação e biomagnificação	13
2.2.7. Uso do mercúrio na mineração	14
2.2.8. Efeitos na saúde humana.....	15
2.3. Mineração artesanal de ouro em Tete	17
2.4. Consequências sociais, económicos e ambientais da mineração artesanal	18
2.4.1. Consequências sociais.....	18
2.4.2. Consequências económicas.....	19
2.4.3. Consequências ambientais	19
3. MÉTODOS DE ANÁLISE.....	21
3.1. Analisador de Hg RA-915M.....	22

3.1.1.	Princípio de funcionamento	23
3.1.2.	Acessório RP-92 (análises líquidas)	24
3.2.	Colheita de amostras	25
3.2.1.	Descrição da amostragem de água	26
4.	PARTE EXPERIMENTAL.....	27
4.1.	Materiais e reagentes.....	27
4.1.1.	Materiais.....	27
4.1.2.	Reagentes	28
4.1.3.	Materiais de referência.....	28
4.1.4.	Equipamentos:.....	28
4.2.	Procedimento de análises laboratoriais	29
4.2.2.	Determinação de Hg nas amostras de água.....	29
4.2.3.	Análises do ar.....	31
5.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	32
5.1.	Análise do material de referência.....	32
5.2.	Análises das amostras de água	33
5.3.	Análise de teores de mercúrio no ar.....	35
5.4.	Discussão geral	36
6.	Medidas de mitigação das áreas poluídas pelo Hg.....	40
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	42
7.1.	Conclusões:	42
7.2.	Recomendações:.....	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
	ANEXOS.....	A
	Anexo A- Formas de armazenamento das amostras	A
	Anexo B- Tabelas de apresentação dos resultados	B
	Anexo C- Coordenadas geográficas e condições barométricas do local de amostragem do ar. ..	E
	Anexo D- Preparação de Soluções.....	L
	Anexo E- Formulário	N

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distrito de Chifunde (PAD, de Chifunde 2015).....	6
Figura 2: Representação esquemática do Ciclo biogeoquímico do Mercúrio (Beckers e Rinklebe, 2017).	11
Figura 3: Bacia de lavagem de minério utilizadas na mineração artesanal de ouro em Tete, Moçambique, onde o mercúrio é adicionado para amalgamar o ouro e separado do material rochoso através da lavagem com água. Fonte (autora).	20
Figura 4: Analizador de mercúrio RA-915M.....	22
Figura 5: Princípio de funcionamento do analisador de mercúrio RA-915M (Lumex, 2013).	24
Figura 6: Analisador de mercúrio RA-915M acoplado ao acessório RP-92 (analisador de amostras líquidas).....	25
Figura 7: Enquadramento geográfico da determinação de Hg em Chifunde. Fonte: autora (adaptado).....	26
Figura 8: Determinação do Hg no ar em uma planta de processamento. Fonte:autora	31
Figura 9: Gráfico de comparação do teor de Hg em amostras da água na bacia TCF, com o limite estabelecido pela legislação.	33
Figura 10: Gráfico de comparação da concentração de Hg em amostras da água na bacia TCL com os limites estabelecidos pela legislação.	34
Figura 11: Gráfico de comparação do teor de Hg em Chifunde, com o limite pela OMS.	35
Figura 12: Gráfico de comparação do teor de Hg em de Luia- Kassaquale, com o limite pela OMS.	36

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Técnicas usadas para a determinação do Hg e os respectivos limites de detecção Micaroni e colaboradores (2000).	21
Tabela 2: Concentração teórica do material de referência.	29
Tabela 3: Reagentes utilizados para digestão das amostras de água.	30
Tabela 4: Concentração de Hg de diferentes soluções preparadas a partir do SRM de Hg.	32
Tabela 5: Resultados das análises obtidas nas amostras de água da bacia TCF.	B
Tabela 6: Resultados obtidos nas análises de amostras de água da bacia TCL.	C
Tabela 7: Pontos de amostragem e resultados obtidos na determinação de teores de Hg no ar no distrito de Chifunde.	C
Tabela 8: Resultados obtidos na análise de teores de Hg no ar na localidade de Luia- Kassaquale.	D
Table 9: Coordenadas geográficas do local de amostragem na análise de teores de Hg no ar no distrito de Chifunde.	E
Tabela 10: Coordenadas geográficas do local de amostragem e resultados obtidos na análise de teores de Hg no ar na localidade de Luia- Kassaquale.	F
Tabela 11: Condições meteorológicas e parâmetros atmosféricos em Chifunde durante a avaliação de mercúrio no ar.	G
Tabela 12: Condições meteorológicas e parâmetros atmosféricos em Luia durante a avaliação de mercúrio no ar.	K

1. INTRODUÇÃO

A poluição das águas geralmente é resultado do descarte inadequado de resíduos gerados pelas actividades antropogénicas e os poluentes são transportados para os rios, poluindo esses ambientes e afectando os organismos aquáticos. Dentre as actividades potencialmente poluidoras dos recursos hídricos destacam-se a agropecuária e a mineração (Oliveira et al., 2015).

As actividades de mineração, sejam industriais ou artesanais, são de suma importância para o desenvolvimento económico do país, visto que os minérios extraídos da natureza, na sua forma natural ou beneficiados, são utilizados como matéria-prima em diversos sectores industriais, gerando bens de consumo para a sociedade (Villas-Bôas, 2011). É sem dúvida, uma actividade geradora de recursos financeiros para região explorada, por meio de geração de emprego, renda e da arrecadação de impostos referentes à exploração mineral (Oliveira et al., 2015).

O impacto causado pela mineração artesanal (garimpos), seja de ouro ou de outros minerais, é o desmonte de encostas e degradação do solo (Lima, 2013). Nos garimpos de ouro, a situação torna-se um pouco mais agravada devido ao uso indiscriminado do mercúrio para a captura das partículas de ouro fino formando a amálgama, e após a sua queima possibilita a separação do ouro e provoca a libertação do mercúrio na forma de gases e líquido, resultando em uma contaminação significativa do ambiente, além dos casos de intoxicação humana (Oliveira et al., 2015). O mercúrio é um elemento tóxico aos seres vivos, o qual possui elevada capacidade de biomagnificação na cadeia trófica. Além disso, os efeitos adversos ao meio ambiental, causados pela poluição por este elemento, podem perdurar muitas décadas após o evento de contaminação.

Segundo WHO (2008), os mineiros artesanais podem ser considerados como o grupo populacional mais exposto ao mercúrio e devido à exposição prolongada, estão em risco significativo de desenvolver problemas de saúde graves como danos neurológicos e renais tendo como principal via de exposição a inalação do vapor de mercúrio metálico.

Vários métodos têm sido desenvolvidos para a remoção de mercúrio de efluentes industriais e de rejeitos do processo de amalgamação. Em geral, os tratamentos envolvem técnicas físico-químicas, como separação por decantação, precipitação química, coagulação, absorção, troca iónica, extracção por solvente, electro-oxidação e flotação. Também estão sendo avaliados métodos biológicos para o tratamento hidrometalúrgico, a biolixiviação do concentrado mineral, e para o

monitoramento, a remoção e a recuperação por bioabsorção de metais contidos em efluentes líquidos (Himenes e Tutunji, 2005).

O presente trabalho é composto pelas seguintes partes:

i) Introdução: contextualização, **ii) Revisão Bibliográfica:** apresentação de conceitos, descrição do local de amostragem, contaminação por Hg, toxicidade do Hg, seu comportamento na matriz ambiental; **iii) Parte Experimental:** apresentação dos materiais, reagentes e equipamentos usados, procedimentos de análise, descrição da amostragem, métodos e tratamento das amostras; **iv) Apresentação dos resultados, análise e tratamento de dados e interpretação dos resultados:** A análise e interpretação dos resultados consistiu na compilação dos resultados, sua apresentação na forma de tabelas e gráficos; **v) Conclusões:** Conclusão alinhada aos objectivos traçados no trabalho, e por fim apresentação dos anexos.

1.1. Objectivos

1.1.1. Objectivo geral:

- Avaliar os níveis de poluição por mercúrio na água e no ar na área de mineração artesanal de ouro no distrito de Chifunde, província de Tete.

1.1.2. Objectivos específicos:

- Validar a técnica de absorção atómica com o analisador de mercúrio Lumex RA-915M para determinação do Hg na água;
- Determinar o teor de Hg na água e no ar;
- Comparar os resultados obtidos com os vigentes na legislação (decreto lei 67/2010 e Organização Mundial da Saúde) ;
- Discutir o risco à saúde humana face à exposição ambiental ao mercúrio para os garimpeiros e as comunidades;
- Propor medidas de mitigação nas áreas poluídas pelo mercúrio.

1.2. Justificativa do tema em estudo

A mineração artesanal de ouro em Chifunde, distrito de Tete, é uma actividade comum e de grande importância económica para as comunidades locais. Apesar do seu contributo para a subsistência e geração de rendimentos, esta prática está frequentemente associada a impactos negativos sobre o ambiente e a saúde humana, devido ao uso de técnicas rudimentares e à utilização de substâncias químicas perigosas, como o mercúrio (Hg), na extração do ouro. A libertação do Hg para o ambiente contamina a água, o ar e o solo, podendo afectar a saúde das populações e comprometer a integridade do ecossistema local.

Vertente social: a escolha deste tema é justificada pela relevância social da problemática. O mercúrio é altamente tóxico, podendo provocar efeitos adversos sobre a saúde humana, incluindo problemas neurológicos, renais e respiratórios. As comunidades envolvidas na mineração artesanal de ouro, estão directamente expostas a estes riscos, muitas vezes de forma contínua. Avaliar os níveis de poluição por Hg permite compreender melhor a extensão da exposição das populações, promovendo medidas de prevenção e educação ambiental que podem reduzir os riscos à saúde.

Vertente ambiental: a vertente ambiental da pesquisa prende-se com a necessidade de identificar e quantificar a poluição por Hg nos compartimentos aquático e atmosférico. A poluição ambiental por mercúrio compromete a qualidade da água, afecta a fauna e flora aquática, e altera os processos ecológicos locais. Este estudo visa gerar dados que possam ser utilizados na gestão ambiental da região, contribuindo para a implementação de estratégias de mitigação, prevenção e recuperação ambiental em áreas afectadas pela mineração artesanal.

Vertente científica: do ponto de vista científico, a investigação é justificada pela escassez de estudos detalhados sobre os níveis de mercúrio em Chifunde, particularmente em áreas de mineração artesanal. A pesquisa permitirá preencher lacunas no conhecimento sobre a distribuição e concentração de Hg na água e no ar, além de fornecer informações fundamentais para estudos futuros sobre toxicologia ambiental, bioacumulação e impactos sobre a saúde humana. Os resultados poderão servir como base para políticas públicas, regulamentações ambientais e programas de monitorização ambiental na província de Tete e em outras regiões com características semelhantes.

Assim, a escolha deste tema é relevante, não apenas para a comunidade científica, mas também para a sociedade local e para a protecção ambiental, permitindo propor medidas concretas de

mitigação e políticas de gestão do risco associadas à exposição ao mercúrio na mineração artesanal de ouro.

1.3. Metodologia

A metodologia geral usada para a realização deste trabalho foi constituída pelas etapas a seguir:

- Elaboração do protocolo com base na revisão da literatura sobre o tema em artigos científicos, livros, dissertações, monografias, paginas de internet;
- Preparação do material e reagentes para a amostragem;
- Análises laboratoriais das amostras de água;
- Compilação dos dados, interpretação e discussão dos resultados;
- E por fim a elaboração do relatório final.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Descrição do local do estudo

O distrito de Chifunde localiza-se na região do Baixo Zambeze, província de Tete, tendo como limites geográficos a norte com a República da Zâmbia, a sul o distrito de Chiúta, a este com o distrito de Macanga e a oeste com o distrito de Maravia, sendo que todos os distritos citados estão localizados na província de Tete. Este distrito possui uma superfície de aproximadamente 9 398 km² e a sua população está estimada em 100,243 habitantes e uma densidade demográfica de 10,67 hab/km (PAD, de Chifunde 2015).

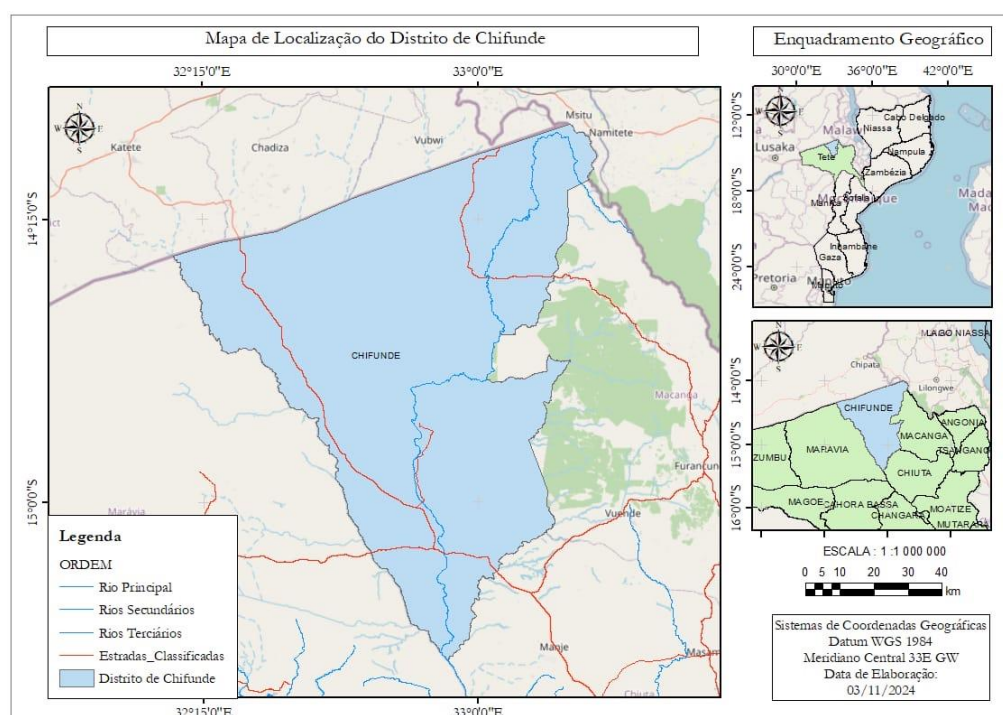


Figura 1: Distrito de Chifunde (PAD, de Chifunde 2015).

2.2. Mercúrio

O Hg é o metal pesado mais tóxico e ele é encontrado abundantemente na crosta terrestre na forma elementar, orgânica e inorgânica, nos estados sólidos, líquido e gasoso (Singh, 2020). Tem sete isótopos naturais, podendo encontrar-se em três estados de oxidação (0, +1, +2) (Watt, 2004; Cunha, 2008). É o único metal líquido à temperatura ambiente, apresenta como propriedades a baixa resistividade eléctrica, elevada tensão superficial, elevada condutividade térmica, uma

uniforme expansão de volume ao longo da gama líquida e facilidade em formar ligas com outros metais (Álvarez-Caicoya et al., 2011; Nunes, 2009; Watt, 2004). É utilizado de várias formas, entre as quais como matéria-prima na produção de barómetros, manómetros, baterias, lâmpadas fluorescentes, interruptores, conversores de electricidade, revestimento de submarinos e termómetros, produtos farmacêuticos (por apresentar propriedades antissépticas). Entretanto, o mercúrio é ainda largamente utilizado na mineração do ouro (Au) e neste processo, o Hg é utilizado na forma metálica e grande quantidade pode ser libertada no ambiente, afectando o solo, sedimentos, água e a vida em geral (Álvarez-Caicoya et al., 2011; Bank, 2012; Cunha, 2008).

2.2.1. Formas do mercúrio

O mercúrio metálico existe na sua forma elementar e encontra-se em numerosos compostos químicos. Os seus sais orgânicos são conhecidos desde a antiguidade, mas os compostos de Hg orgânicos com ligações covalentes entre o ião Hg e o radical orgânico apenas foram descritos no século XIX (Aucot et al., 2003; Grandjean, Satoh, Murata & Eto, 2010). De uma forma geral existem três formas de apresentação de mercúrio, com solubilidade, reactividade e toxicidade características, sendo que as suas espécies químicas mais significativas podem ser classificadas da seguinte forma (Alloway, 1995; Bank, 2012; Cunha, 2008; Grigoletto et al., 2008):

➤ Compostos voláteis: Hg^0 , $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$

O dimetilmercúrio $((\text{CH}_3)_2\text{Hg})$ é significativamente mais tóxico que o mercúrio elementar no que respeita à ingestão e encontra-se na atmosfera em concentrações negligenciáveis. Contudo, pensa-se ser ubíquo nas profundezas oceânicas (Alloway, 1995; Bank, 2012; Cunha, 2008).

➤ Compostos reactivos inorgânicos: HgX_2 , HgX^{3-} , HgX^{4-} com $\text{X}=\text{OH}^-$, Cl^- e Br^- ; HgO e partículas de aerossol, Hg^{2+} complexado com ácidos orgânicos

Estes compostos formam-se a partir da reacção dos iões Hg^+ e Hg^{2+} com compostos inorgânicos, apresentando-se normalmente como pó branco ou cristais. São instáveis e quando expostos à luz e ao calor rapidamente se convertem-se em mercúrio elementar (Nunes, 2009).

➤ **Espécies não reactivas: Metilmercúrio $[\text{CH}_3\text{Hg}]^+$ e outros compostos organomercuriados; $\text{Hg}(\text{CN})_2$, HgS , Hg^{2+} ligados a átomos de S em húmus**

Os compostos de mercúrio orgânicos formam-se através de ligações covalentes com carbono e enxofre. Esta ligação é quimicamente estável, não sendo quebrada por água, ácidos ou bases fracas. Podem ainda possuir ligações com um ou dois carbonos (radicais orgânicos arilo ou alquilo) e qualquer anião. Se o anião for um nitrilo ou um sulfato, a ligação terá um carácter iónico polar e são, por isso, mais solúveis em água. Se, por outro lado, o anião for um cloreto, este composto terá um carácter covalente e será pouco polar, sendo mais solúvel em compostos orgânicos do que em água (Baêta, 2004; Nunes, 2009). O metilmercúrio (CH_3Hg^+) é bastante tóxico após ingestão e acumula-se rapidamente na cadeia alimentar. Este composto não é detectável nos oceanos com excepção do oceano Pacífico equatorial (Alloway, 1995; Bank, 2012). A conversão derivada do mercúrio inorgânico é efectuada por biometilação em microrganismos (bactérias metanogénicas) encontrados em sedimentos (Cunha, 2008). O etilmercúrio ($\text{C}_2\text{H}_5\text{Hg}^+$) tem algumas semelhanças químicas com o metilmercúrio, mas é metabolizado mais rapidamente em mercúrio inorgânico no organismo (Cunha, 2008).

2.2.2. Mercúrio no ar e na água

De acordo com o Horvat & Gibicar (2005), a maior parte do Hg presente na atmosfera está na forma de mercúrio elementar, com um pequeno percentual na forma das espécies Hg^{2+} e CH_3Hg^+ . No ar o Hg elementar é volatilizado rapidamente, podendo ser transportado por longas distâncias como Hg^0 ou convertido em outras espécies voláteis pelo ar ou para outro sistema, como solo ou água.

O Hg sofre conversão entre diferentes espécies principalmente em sistemas aquáticos e sedimentares, podendo formar espécies voláteis e não voláteis, que podem permanecer nos sedimentos, solos, água ou serem volatilizados para a atmosfera. Na água, o Hg^0 normalmente pode ser convertido a sua espécie inorgânica, sendo a mais comum a formação de Hg^{2+} , a qual é bastante solúvel. Nas águas superficiais, grande parte do Hg inorgânico é convertida em espécies orgânicas, sendo mais comum o CH_3Hg^+ , por meio de reacções mediadas por microrganismos (bactérias, plânctons e fungos) ou por ligar-se covalentemente com a matéria orgânica dissolvida (Bastos e Lacerda, 2004).

2.2.3. Toxicidade do Hg

A toxicidade do mercúrio é causada, principalmente, pelo facto deste metal ao entrar no organismo ele reage com diferentes enzimas, inibindo a catálise de reacções metabólicas básicas, não tendo por isso, nenhuma função fisiológica benéfica (Branco, Canário, Lu, Holmgren & Carvalho, 2012; OMS, 2011; Pavlogeorgatos & Vasilis, 2003). Devido a isso, o Hg é classificado como o terceiro elemento químico de maior toxicidade. A exposição ao mercúrio pode ocorrer através da inalação do ar ambiente, em que a absorção é efectuada principalmente por via pulmonar, ingestão de alimentos contaminados, água ou solos, ou contacto dérmico com objectos que contenham este metal (Meadows-Oliver, 2012; Pavlogeorgatos & Vasilis, 2003; Rocha, 2009).

A via inalatória é a mais importante, tanto o mercúrio elementar como o inorgânico e seus compostos podem alcançar o sangue, por esta via com uma eficiência de 80%. No caso da via dérmica, não está demonstrado que haja uma influência importante do ponto de vista da saúde ocupacional (Ramírez, 2008). Actualmente, as principais fontes de contaminação dos seres humanos por Hg são: a ingestão de peixes contaminados, uso de amálgamas dentárias e outras rotas de exposição menos significativas (National Research Council, 2000).

2.2.4. Fontes de emissão

O mercúrio é disponibilizado para o meio ambiente por três fontes principais: naturais (ou geogénicas), antropogénicas e por re-emissão. A emissão através de processos naturais ocorre principalmente por actividade vulcânica, intemperismo de rochas que contem mercúrio e também por actividade geotérmica, quando o mercúrio subterrâneo é emitido para oceanos. (UNEP, 2013 citado por Araujo, 2017). Quanto às emissões antropogénicas, pode-se dizer que tiveram início a partir de 1800, associada à revolução industrial, baseada principalmente, na queima de carvão, na fundição de minério de metais básicos e na exploração de ouro. Com o passar das décadas, além dessas actividades, incluíram-se os processos industriais, que envolvem o uso de mercúrio, como a produção de cloro e álcalis; combustíveis fósseis, principalmente carvão; produção de cimento; incineradores de resíduos médicos e municipais, e caldeiras industriais ou comerciais. Actividades em que o mercúrio é emitido por estar presente na composição da matéria prima como uma impureza são designadas emissões “subproduto” ou “não intencionais”. E aquelas, nas quais o mercúrio é usado intencionalmente, como na mineração de ouro artesanal e de pequena escala (MAPEO), em resíduos de produtos de consumo (incluindo a reciclagem de metais), na indústria

de cloro-álcali e na produção de monômero de cloreto de vinila são designadas emissões “intencionais” (UNEP, 2013 citado por Araujo,2017).

A re-emissão é um processo que converte as formas orgânica e inorgânica de mercúrio, presentes nos solos, águas superficiais e vegetação por deposições atmosféricas pretéritas, a Hg elementar. A deposição superficial de mercúrio em plantas também pode sofrer re-emissão durante incêndios florestais ou queima de biomassa. Não há como se prever se o mercúrio proveniente da re-emissão é de fonte natural ou antropogênica, de forma que não se pode atribuir uma origem específica (Araujo,2017).

Uma vez libertado para o ambiente, o mercúrio dá início a um ciclo de extrema complexidade, que é o resultado das inter-relações entre os sistemas atmosférico, aquático e terrestre. Cada um destes compartimentos possui características peculiares, e neles, a forma e velocidade com que o mercúrio irá se transportar e se distribuir dependerá de diversos factores, principalmente das reacções de conversão entre as espécies químicas e factores ambientais (Araujo,2017).

2.2.5. Ciclo biogeoquímico do mercúrio

O ciclo biogeoquímico é definido como a circulação e a interacção dos elementos entre os diferentes compartimentos ambientais (bióticos e abióticos) que resultam em processos de transferência ou transformação (química, física e biológica) de matéria e energia (Válega, 2009). O ciclo do mercúrio (figura 2) envolve os quatro compartimentos ambientais, todos ligados entre si, sendo eles o compartimento atmosférico, aquático, terrestre e biótico. Devido às suas características químicas, o mercúrio move-se através dos vários compartimentos ambientais mudando de forma e espécie ao longo do processo (Nunes, 2009). Segundo Morel e colaboradores, (1998) o ciclo bio-geoquímico do mercúrio é muito complexo e envolve a inter-relação na matriz ambiental e é caracterizado pela sua evaporação a partir do solo e águas superficiais, seguido pelo transporte atmosférico, deposição do mercúrio de volta ao solo e águas superficiais, e a adsorção do composto no solo ou sedimentos. O Hg depositado na terra e na água é em parte revolatizado de volta para atmosfera. Devido a essa complexibilidade do ciclo, torna-se difícil analisar o movimento do Hg a partir da sua fonte de emissão (WHO,1990). A representação esquemática do mercúrio é descrita na **figura 2**, onde as setas tracejadas indicam o seu transporte e as setas não tracejadas indicam a transformação do Hg no meio em que se encontra e como esse processo de transformação é conduzido (Beckers e Rinklebe, 2017).

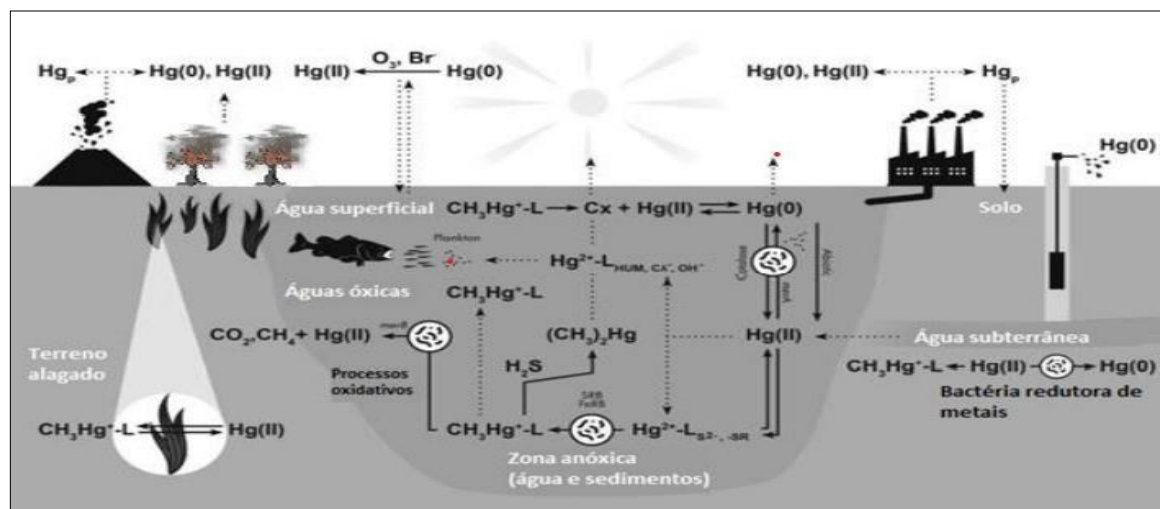


Figura 2: Representação esquemática do Ciclo biogeoquímico do Mercúrio (Beckers e Rinklebe, 2017).

➤ Compartimento Atmosférico

O mercúrio é libertado para a atmosfera, a partir das várias fontes, na forma de Hg^0 sofre oxidação na interface sólido-líquido (neblina, gotículas de chuva) e através de reacções mediadas pelo ozono, raios ultra-violetas ou outros oxidantes atmosféricos transformam-se em Hg^{2+} . Este retorna ao ambiente aquático e terrestre através da água da chuva, aerossóis ou absorvido em pequenas partículas, enquanto que o Hg^0 pode ser transportado a grandes distâncias, devido ao tempo que o mercúrio permanece na atmosfera (Almeida, 2011; Baêta, 2004; Marques, 2010; Nunes, 2009). Cerca de 95% do mercúrio atmosférico total corresponde ao estado elementar gasoso, o qual consegue permanecer durante cerca de um ano na atmosfera (Almeida, 2011).

O mercúrio quando ligado ao material particulado pode ser convertido a sulfeto de mercúrio insolúvel e ser precipitado ou bioconvertido em formas mais voláteis ou solúveis que voltam para a atmosfera ou são bioacumuladas as cadeias alimentares aquáticas e terrestre (EPA, 1984 citado por ATSDR, 1999).

➤ Compartimento aquático

No ambiente aquático, o Hg^{2+} é adsorvido preferencialmente na superfície dos sedimentos, ácidos húmicos, material particulado e argilas por processos de coprecipitação e correacção (HgS , $Hg(OH)_2$, $HgCl_2$) (Baêta, 2004; Marques, 2010; Válega, 2009). O mercúrio elementar, o

metilmercúrio ou o dimetilmercúrio formam complexos orgânicos, formando compostos com ligações covalentes C-Hg e complexos não lábeis de Hg com matéria orgânica e podem ainda, ser encontrados precipitados contendo mercúrio (HgS) (Marques, 2010).

Contudo, a forma química do mercúrio é fortemente influenciada pelo pH e pelo potencial de oxidação-redução, bem como pelas concentrações de compostos inorgânicos e orgânicos. Neste ciclo, as águas naturais encontram-se frequentemente saturadas com Hg^0 relativamente ao ar, o que resulta num fluxo deste metal elementar da água para a atmosfera, por volatilização (Almeida, 2011).

➤ **Compartimento terrestre**

As principais espécies de mercúrio encontradas neste compartimento são compostos Hg-óxidos de ferro, Hg-matéria orgânica, Hg-óxidos de manganês, sendo estas as espécies predominantes devido à oxidação de sulfureto a sulfato, redução do ferro e/ou manganês, presentes nos óxidos hidratados, Hg^0 , $HgCl_2$, $Hg(OH)_2$, $HgCl_4^{2-}$, $HgCl_3^-$, HgS_2H^- , HgS_2^{2-} , complexos com diversos ligandos orgânicos, HgS ou Hg adsorvido à superfície de sulfuretos minerais (Marques, 2010).

➤ **Compartimento biótico**

Bactérias, incluindo as redutoras de sulfato, transformam o Hg^{2+} por metilação em metilmercúrio (CH_3Hg^+) e dimetilmercúrio ($(CH_3)_2Hg$) na interface água-sedimento e também, no perifiton das macrófitas aquáticas (Baêta, 2004; Marques, 2010; Válega, 2009). Por outro lado, a hidrólise do metilmercúrio é termodinamicamente favorável, mas cineticamente impedida, permanecendo este composto estável nas soluções aquosas (Almeida, 2011). O CH_3Hg^+ é rapidamente absorvido pelos organismos marinhos e, desta forma, será bioacumulado ao longo da cadeia trófica. Em menor extensão, o CH_3Hg^+ é também desmetilado, por microrganismos ou por processos fotoquímicos, a Hg^{2+} e posteriormente reduzido a Hg^0 retornando à atmosfera e diminuindo a toxicidade nestes ambientes (Almeida, 2011; Baêta, 2004, Marques, 2010; Válega, 2009). O mercúrio é convertido em formas químicas e estado de oxidação diferente dentro dos organismos. Através de processos enzimáticos, o mercúrio elementar pode ser oxidado a outras formas inorgânicas, bem como compostos de mercúrio orgânico podem ser convertidos em mercúrio inorgânico. Os efeitos adversos dependerão da forma química do mercúrio incorporado, da via de exposição (inalação, ingestão e contacto dérmico) e da intensidade da exposição, uma vez que o metilmercúrio é

acumulado por peixes e mamíferos marinhos, podendo a sua concentração ser bastante superior em espécies predadoras do topo da cadeia alimentar, relativamente aos valores encontrados na água e no fitoplâncton (Baêta, 2004; Oliveira, 2011).

2.2.6. Biocumulação e biomagnificação

Uma vez produzido pelos microorganismos, o metilmercúrio entra na cadeia alimentar sendo incorporado a quase todas as espécies aquáticas, incluindo o plâncton, peixes herbívoros e carnívoros (MMA, 2013), nessas espécies atingem sua maior concentração nos tecidos de peixes no topo da cadeia alimentar aquática. As espécies mercuriais, Hg^0 , $Hg(II)$ e $(CH_3)_2Hg$ não são bioacumuladas, e isso ocorre porque não são reactivas, e portanto não são retidas em bactérias planctônicas e microalgas, ao contrário do metilmercúrio (MOREL, 1998). A acumulação de metilmercúrio em organismos superiores resulta principalmente da ingestão de alimentos contendo esta espécie, em vez de absorção directa da mesma a partir da água, uma vez que sua concentração em águas é baixa. A estrutura da rede alimentar determina a eficiência da transferência de algas para os predadores (biomagnificação), sendo mais eficiente quanto mais longa for a cadeia (Morel, 1998). O factor de bioconcentração (proporção da concentração de metilmercúrio no tecido do peixe em relação à água) está normalmente entre 10.000 e 100.000 (WHO, 1990). A proporção média de metilmercúrio sobre o mercúrio total aumenta cerca de 10 % na coluna d'água para 15 % no fitoplancton, 30 % no zooplancton e 95 % nos peixes (Morel, 1998). Nos peixes, o metilmercúrio encontra-se em maior concentração nos tecidos musculares, devido à sua afinidade por grupamentos sulfidril, e desta forma, as concentrações mais elevadas de mercúrio são encontradas em tecidos musculares de peixes de topo de cadeia (carnívoros), e conseqüentemente, em populações animais e humana que consomem peixes regularmente (Mason et al., 1994; Lacerda e Salomons, 1998). A permanência do $MeHg$ nos peixes é relativamente alta, devido à lenta mobilização, expressa no longo tempo de meia-vida observado em distintas espécies, que varia geralmente de um a três anos (Nascimento, 2001). De acordo com Ikingura e Akagi (1999) os organismos aquáticos também absorvem compostos de mercúrio inorgânico, todavia, os mecanismos pelos quais os peixes acumulam o metilmercúrio difere do observado para o mercúrio inorgânico.

Assim sendo, a ingestão de peixes e frutos do mar significa a maior via de entrada do mercúrio no organismo humano através de sua forma química mais tóxica, o metilmercúrio. Todavia, directa

ou indirectamente, o ser humano pode entrar em contato com outras formas químicas, que se apresentarão tão ou mais perniciosas ao organismo do que a forma orgânica, a depender da dose e do tempo de exposição. As fontes potenciais de exposição da população em geral ao mercúrio incluem a inalação de vapores de mercúrio no ar ambiente, ingestão de água potável e alimentos contaminados e, exposição ao mercúrio através de tratamentos dentários e médicos. A ingestão dietética é a fonte mais importante de exposição ao metilmercúrio, sendo os peixes e outros frutos do mar a principal fonte, como dito anteriormente. A concentração de MeHg em peixes não deve ultrapassar 0,5 mg/kg de mercúrio total (WHO, 1990) para consumo diário de 60 g de peixe, sendo que, em média, 75 a 95 % do mercúrio total se encontra na forma de MeHg (Huckabee et al., 1979). A exposição ao mercúrio elementar a partir de amálgamas dentárias é outra importante fonte de contribuição para a carga total de mercúrio em seres humanos na população em geral (WHO 1990).

2.2.7. Uso do mercúrio na mineração

Segundo Strode e colaboradores (2009) a amalgamação com Hg para separação do ouro tem sido o método mais difundido de mineração artesanal a nível mundial. A utilização de mercúrio para exploração do ouro é conhecida como processo de pátio.

Neste processo, as partículas mais pesadas do sedimento são separadas com uso de uma bacia de decantação, onde é acrescido o mercúrio inorgânico no estado líquido, com a finalidade de unir as partículas de ouro (amalgamação), o que facilita separação do minério (Santos, 2018). O processo de lavagem, mesmo quando é feito em bacia de decantação, locais específicos, afecta o lençol freático através do processo de infiltração, reduzindo ainda mais a disponibilidade de água para o consumo. Para separar o mercúrio do ouro, o amálgama é queimado, volatilizando o Hg e restando apenas as partículas de ouro (Santos, 2018).

Estima-se que 1.32 quilos de Hg podem ser libertados para o ambiente em relação a cada quilograma de ouro produzido, sendo a maior parte (55-65 %) disponibilizada para a atmosfera (Oliveira, 2014).

Wasserman e colaboradores (2001) descrevem que os rejeitos da mineração de ouro, particularmente da actividade realizada em seco, resultam em acumulação de materiais enriquecidos em Hg. Na maioria dos corpos de rejeitos (tailings), o Hg aparece distribuído de

forma aleatória no corpo do rejeito. Desta forma, estes rejeitos de garimpo devem ser considerados como um “resíduo sólido contendo Hg” e necessitam de gerenciamento adequado.

2.2.8. Efeitos na saúde humana

Os efeitos para a saúde resultantes da exposição a mercúrio variam de acordo com a magnitude, dose e duração da exposição. As crianças são mais sensíveis que os adultos, o que resulta numa maior dose deste metal por unidade de peso corporal. Além disso, as crianças desenvolvem variadas actividades no solo onde os valores de vapor de mercúrio são mais elevados (Besser, 2009). A intoxicação por mercúrio não é necessariamente causada por exposição a quantidades elevadas de mercúrio no ambiente laboral, mas também pode ocorrer com níveis baixos de exposição (Ramírez, 2008). No geral, os efeitos da exposição de mercúrio para a saúde estão relacionados a síndromes, dentre eles: neurológicos, renais, oftalmológicos e dermatológicos (Ramírez, 2008).

É importante fazer uma subdivisão entre exposição crónica e aguda, uma vez que, ambas têm consequências diferentes. Na aguda, a exposição dá-se num curto período de tempo e em elevadas concentrações de substância, já na crónica, as exposições repetem-se durante um período prolongado de tempo (meses, anos ou ao longo da vida) a baixas concentrações, ocorrendo acumulação da substância tóxica no organismo (OPAS/OMS, 2011).

➤ Mercúrio elementar

A inalação é a principal fonte de absorção do mercúrio elementar, sendo rapidamente absorvido pelas membranas alveolares até entrar na circulação sanguínea e difundir-se através da barreira hematoencefálica (OPAS/OMS, 2011).

Os distúrbios neurológicos e comportamentais têm sido relatados como os primeiros sinais da intoxicação que incluem: diminuição da memória ou no desempenho de testes de função cognitiva, labilidade emocional, irritabilidade, excitação, timidez excessiva, diminuição da autoconfiança, nervosismo, insónia; alterações neuromusculares (fraqueza, atrofia muscular ou espasmos musculares), tremores, inicialmente afectando as mãos; polineuropatia (parestesia, perda sensorial de extremidades, hiperreflexia, diminuição da velocidade de condução nervosa sensorial e motora) (OPAS/OMS, 2011). Estudos actuais apoiam que a exposição a vapores de mercúrio induz a um

quadro subclínico de danos na visão das cores, inclusive nos locais de trabalho com indicadores de exposição menores que o limite actual (Ramírez, 2008).

Por outro lado, existe uma associação entre o risco de doenças cardiovasculares, onde há uma relação entre concentrações de mercúrio metálico e enfarte do miocárdio (Cunha, 2008). A exposição a esta forma de mercúrio não produz cancro nem teratogenicidade (Ramírez, 2008). Contudo, alguns estudos sugerem que o Hg^0 pode causar toxicidade reprodutiva, mas a maioria deles indica que a exposição humana em longo prazo não afecta a capacidade reprodutiva (OMS, 2011).

➤ **Mercúrio inorgânico**

Especificamente o cloreto de mercúrio contido em alguns antissépticos aumenta o colesterol, pelo que a exposição a este composto pode aumentar o risco ateromatoso em patologia preexistente da aorta (Ramírez, 2008). A exposição a sais de mercúrio pode originar acrodinia, reacções de hipersensibilidade caracterizadas por descamação, cor rosa nas bochechas e planta dos pés e palma das mãos, fotofobia, sudorese, irritabilidade e insónias, sabor metálico, gastroenterite e estomatite (Cunha, 2008; Ramírez, 2008).

Segundo Cunha (2008) o mercúrio inorgânico tem uma menor capacidade de atravessar a barreira placentária sendo encontrado em maior quantidade no líquido amniótico. É igualmente transportado pelo leite materno (Cunha, 2008).

A exposição a esta forma de mercúrio não produz cancro nem teratogenicidade e não está associada às afecções do sistema nervoso central devido à incapacidade de atravessar a barreira hematoencefálica (Järup, 2003; Ramírez, 2008). O mercúrio metálico pode causar lesões no fígado que são reversíveis após a cessação da exposição (Järup, 2003).

O Hg inorgânico pode não atravessar a barreira hematoencefálica, mas ainda pode ser relevante em outros contextos biológicos, como presença em líquido amniótico e leite materno, enquanto Cunha (2008) discute os riscos específicos para o desenvolvimento fetal e infantil, Jarup (2003) e Ramírez (2008) focam na neurotoxicidade do Hg.

➤ **Mercúrio orgânico**

A exposição a esta forma de mercúrio produz cancro e teratogenicidade (aneuploidia, alterações cromossómicas variadas, más formações congénitas, aborto), como aumento da incidência de leucemia; aumento da incidência de cancro do fígado (Pavlogeorgatos & Vasilis, 2003; Ramírez, 2008).

A exposição pré-natal a compostos de mercúrio orgânico leva a defeitos no desenvolvimento cerebral mais intenso à medida que a exposição é mais elevada, onde existem registos de paralisia cerebral severa e microcefalia nos descendentes. Estão descritos diversos efeitos neurotóxicos relacionados com a exposição a metilmercúrio, nomeadamente ao nível da destreza e coordenação manual e fadiga muscular. A intoxicação por metilmercúrio é caracterizada por ataxia (perda de coordenação dos movimentos voluntários), disartria (problemas na articulação das palavras), parestesia (perda da sensibilidade nas extremidades e em torno da boca), visão em túnel (constricção do campo visual) e perda da audição (Cunha, 2008).

Uma exposição severa pode causar cegueira, coma e morte, o mercúrio pode influenciar o estado hormonal (o eixo hipotálamo-hipofisário), podendo ser responsável por ciclos menstruais irregulares e menor número de ovulações. Estudos epidemiológicos relacionam os efeitos do mercúrio com problemas reprodutivos (Cunha, 2008).

2.3. Mineração artesanal de ouro em Tete

A mineração artesanal de pequena escala de ouro (MAPEO) é uma actividade socioeconómica significativa na província de Tete, praticada por milhares de famílias em zonas rurais. Apesar do contributo para a subsistência local, a MAPEO caracteriza-se por informalidade e práticas tecnológicas rudimentares, das quais se destaca o uso de mercúrio na amalgamação do ouro. Este uso tem levado à poluição do ar, águas superficiais e solos nas áreas mineiras, com evidência de riscos para a saúde humana e para os ecossistemas aquáticos (Hilson, Hilson e McQuilken, 2021). O Governo de Moçambique tem desenvolvido instrumentos políticos para reduzir a utilização de mercúrio (nomeadamente o Plano Nacional de Ação ligado à Convenção de Minamata), mas a sua implementação e a formalização do sector enfrentam limitações, contribuindo para persistência da prática e para conflitos locais (por exemplo, ordens de suspensão e deslocações em Chifunde) (Governo de Moçambique, 2021).

2.4. Consequências sociais, económicos e ambientais da mineração artesanal

A actividade de extracção de minérios gera diversas consequências, com destaque para as de carácter ambiental, social e económico. Segundo a Lei do Ambiente (Lei n.º 20/97, de 1 de outubro), considera-se impacto ambiental qualquer alteração no ambiente seja positiva ou negativa, que afecte elementos como o ar, o solo, a água e a saúde humana, resultante de actividades desenvolvidas pelo ser humano.

No plano social, as mudanças podem envolver alterações nas relações comunitárias, participação de crianças nas actividades produtivas ou transformações nas principais fontes de ocupação das populações, constituindo indicadores de efeitos sociais. Já no âmbito económico, quaisquer alterações nas fontes de rendimento, na forma como este é obtido ou no padrão de vida das famílias envolvidas na mineração artesanal podem ser consideradas consequências económicas da actividade (Consul et al., 2012).

2.4.1. Consequências sociais

Na componente social destaca-se a deterioração das condições de trabalho uma vez que os operadores mineiros actuam em situações precárias sem a observância de normas elementares de segurança e higiene no trabalho. Os grupos adotam uma vida nómada com precárias condições de higiene e segurança numa dependência extrema tanto em produtos alimentares como alternativas de geração de rendimento, possibilidade de criatividade, de aprendizagem, de escolha da qualidade de trabalho, lazer, segurança, usufruto dos valores culturais e de saúde mental. (Seminário Nacional de MAPE, 2012 citado por Consul et al., 2012).

A maioria das comunidades onde se faz o garimpo dedicavam-se a agricultura mas, com o efeito das mudanças climáticas esta actividade passou a ser considerada de pouco rendimento e de regime sazonal vendo-se a exploração aurífera como de resultado imediato e mensurável. É neste contexto que determinadas famílias fragmentam-se até mesmo abdicarem-se das suas zonas de origem para viverem em acampamentos enquanto exploram o ouro (Consul et al., 2012).

Alguns nativos por vezes abandonam a agricultura pelo facto de se tornarem donos de minas, por terem sido eles a descobrir a ocorrência do metal ou pelo facto de se explorar na “sua propriedade” o que obriga-os a controlarem a mão-de-obra ou o produto extraído. Apesar de não ser consensual, reconhecem-se alguns benefícios como aumento dos níveis de acesso à saúde, educação dos filhos

dos operadores mineiros através da aquisição de material escolar e uniforme, ou ainda, criação de condições para a continuidade dos estudos a níveis inexistentes na zona, pois os rendimentos obtidos no garimpo contribuem para cobrir parte das despesas. Outras vantagens que resultam desta actividade é a melhoria das suas habitações, aquisição de meios circulantes, bem como a criação de diversos serviços locais como mercados paralelos, bancas fixas, entre outros ganhos. (Nhaca, 2012) Contudo este benefício não pode ser visto como de todos envolvidos pois alguns são simples trabalhadores auferindo valores bastante ínfimos.

2.4.2. Consequências económicas

Em termos económicos, a actividade mineira promove igualmente a mineração e comercialização ilegal que funcionam nos dois sentidos ou seja, no processo de fornecimento de produtos como o mercúrio e comercialização do ouro obtido. Este facto concorre para o desconhecimento da contribuição económica ao nível nacional da Mineração Artesanal de Pequena Escala. (Nhaca, 2012 citado por Consul et al., 2012). Com efeito, os esforços que o Governo realiza através do Fundo do Fomento Mineiro em prol dos garimpeiros fornecendo instrumentos para as operações de mineração e comprando o produto extraído, são considerados incentivo para a proliferação da população de operadores mineiros na província porque tem ajudado a encontrar mercado garantido que também permite que o governo absorva esse recurso que, pelo contrário iria cair no contrabando através de compradores estrangeiros (Consul et al., 2012).

2.4.3. Consequências ambientais

Em termos ambientais, durante a MAPEO ocorre a remoção da vegetação para facilitar a escavação, que é posteriormente aproveitada para lenha. Ocorre ainda a exposição do solo que provoca a erosão pela acção do vento e da chuva, conduzindo à perda superficial de fertilidade (Governo, 2004). Ocorre ainda a abertura de imensas crateras que arrastam os sedimentos para as linhas de água durante as chuvas provocando a obstrução da rede hidrográfica por sedimentação. Após a exploração dos minérios quase todas as áreas são abandonadas sem a devida reposição de solos tornando estas áreas impróprias para agricultura e outros usos e sem a capacidade de regeneração da vegetação (Governo, 2004).

No acto da escavação o garimpeiro alcança o solo e a rocha que contém o minério e é lavado para separar as pedras que contem o ouro, depois são trituradas para reduzir o seu tamanho usando para o efeito, pilões, moinhos construídos na base de vasilhames de gás da cozinha. De seguida num

processo chamado bateamento o material fino resultante do processo anterior é lavado em bacias, ou tanques de água ou nos cursos de água como habitualmente é feito. As partículas mais densas ficam na bacia ou no rio onde é feita a lavagem, poluindo a água. (Dondeyne, 2007).



Figura 3: Bacia de lavagem de minério utilizadas na mineração artesanal de ouro em Tete, Moçambique, onde o mercúrio é adicionado para amalgamar o ouro e separado do material rochoso através da lavagem com água. Fonte (autora).

Os impactos directos da actividade de mineração artesanal compreendem ainda o desflorestamento, o assoreamento dos rios, a contaminação da atmosfera pelo mercúrio, usado pelo processo de amalgamação do ouro que depois é aquecida, libertando cerca de 60% do mercúrio para a atmosfera. A exploração artesanal de ouro provoca ainda distúrbios dos ecossistemas, extinção de espécies de água doce e vegetação ribeirinha, solos e água (quer devido a turvação da água ou através do mercúrio) (Consul et al., 2012).

3. MÉTODOS DE ANÁLISE

O mercúrio, sendo comum no ambiente, possui o efeito tóxico em um organismo humano até em baixas concentrações. Existem vários métodos usados para a determinação do mercúrio, ao escolher um método, é importante considerar a disponibilidade do equipamento, a complexidade do processamento das amostras, a reprodutibilidade dos resultados, a sensibilidade do aparelho e o limite de detecção do método. A **tabela 1** apresenta algumas técnicas usadas para a determinação do Hg e os respectivos limites de detecção.

Tabela 1: Técnicas usadas para a determinação do Hg e os respectivos limites de detecção Micaroni e colaboradores (2000).

Método	Limite de detecção
Análise por activação de neutrões	
Instrumental (INAA)	1-10ng/g
Radioquímica	0,01 – 1ng/g
Colorimetria	0,01 – 0,1 µg/g
Cromatografia líquida de alta eficiência	
Detector de ultravioleta	1ng/mL
CVAAS	0,5 ng/ mL
CVAFS	0,08 ng/ mL
Electroquímico	0,1 – 1ng/mL
Cromatografia gasosa	
Detector de captura electrónica	0,01 – 0,05ng/g
Detector de emissão atómica	0,05ng/g
Espectrometria de massa	0,1ng/g
CVAAS /CVAFS	0,01 – 0,05ng/g
Espectrometria de absorção atómica	
Forno de grafite (GFAAS)	1 ng/g
Vapor a frio (CVAAS)	0,01 – 1ng/g
Espectrometria de fluorescência atómica	
Vapor a frio (CVAFS)	0,001 – 0,01ng/g
Plasma indutivamente acoplado	

Espectrometria de massa (ICP MS)	0,01ng/mL
Espectrometria de emissão atômica (ICP AES)	2 ng/mL
Espectrometria de foto-acústica	0,05ng/g
Fluorescência de raios-X	0,005 – 1µg/g
Métodos electroquímicos	0,1 – 1µg/g

3.1. Analisador de Hg RA-915M

O analisador de mercúrio RA-915M é um espectrómetro de absorção atômica multifuncional portátil com correcção de fundo Zeeman, que elimina o efeito de interferência de impurezas. É o único instrumento de alta sensibilidade e selectividade que não requer pré-concentração de amálgamas de ouro e etapas subsequentes de regeneração. Essa característica permite o usuário realizar monitoramento em tempo real e detecção de vapor de mercúrio (Lumex, 2018a).

O analisador de mercúrio RA-915M é um instrumento analítico que possui alta sensibilidade para a determinação de teor de mercúrio no ar, água, gases naturais e de chaminé, óleo e condensado, sólidos sedimentos, testes médicos e odontológicos e alimentar. O analisador tem dois acessórios: RP-92 de vapor frio para análise de amostras líquidas e Pyro-915+ para análise de amostras sólidas (Lumex, 2018a).



Figura 4: Analisador de mercúrio RA-915M.

Este equipamento possui varias vantagens nomeadamente: determinação directa de mercúrio (não são necessários procedimentos de pré-tratamento) em amostras líquidas e sólidas (incluindo amostras orgânicas complexas de matriz); ampla faixa de medição dinâmica em 5 ordens de grandeza; a célula analítica aquecida exclui interferências mesmo para uma amostra com alto teor de substâncias orgânicas e cloretos; visualização da saída de mercúrio da amostra, interface de computador fácil de usar; monitorar a absorção de fundo durante a medição permite a selecção efetiva do peso permissível das amostras de qualquer composição, evitando assim erros de análise; o coeficiente de calibração é definido usando uma amostra padrão contendo mercúrio de qualquer composição, alta estabilidade de calibração e controle automático da taxa de fluxo de ar, nenhum gás de portador é necessário. Entretanto, as suas desvantagens incluem: controlo de contaminação, necessidade de controlar o material usado e manter o local livre de contaminação por Hg; necessidade de digestão de amostras no caso de análises líquidas para o método específico (Lumex, 2018a).

3.1.1. Princípio de funcionamento

O uso de um analisador de mercúrio RA-915M com correcção de fundo Zeeman fornece determinação contínua em tempo real de mercúrio no ar a partir de $0,5 \text{ ng/m}^3$ dentro da faixa total possível de concentração de ar ambiente. O método de medição de mercúrio no ar baseia-se na determinação de mercúrio atómico por espectrometria de absorção atómica usando modulação de alta frequência de polarização de luz em cada um dos analisadores (ZAAS-HFM) (Lumex, 2018a).

O analisador portátil é colocado em um ponto de amostragem e o ar flui continuamente para a sua célula analítica. Os resultados da medição são exibidos na tela da unidade de exibição e controle do analisador ou na tela de um computador conectado, o sinal em branco é verificado regularmente passando o ar através de um filtro de absorção. A verificação da capacidade de manutenção é executada usando uma célula de teste interna e um modo especial de “Monitoring” (Monitoramento) fornece medições de longo prazo automaticamente (Lumex, 2018a).

Para a leitura do Hg em amostras líquidas é utilizado o analisador de Hg RA-915M acoplado ao acessório RP-92 (Lumex Instruments, 2016), seguindo o princípio de funcionamento a seguir.

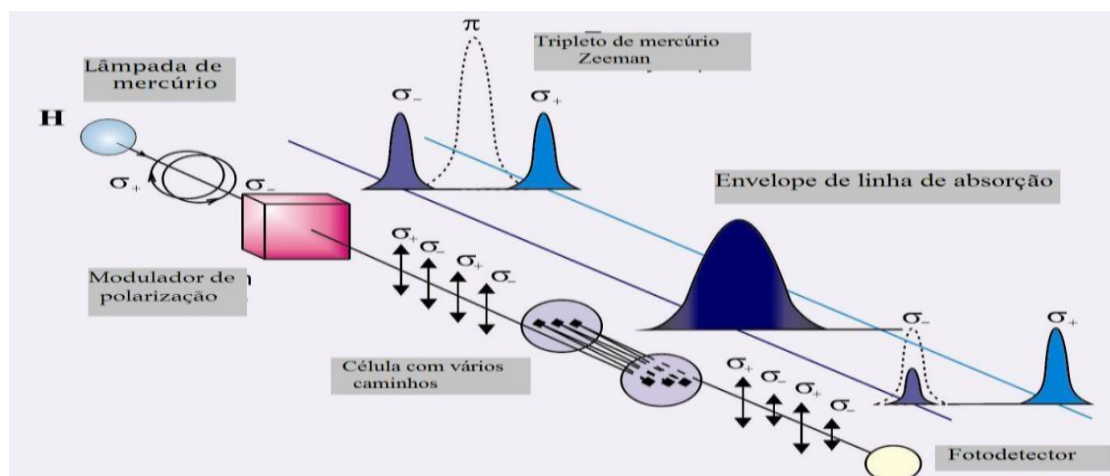


Figura 5: Princípio de funcionamento do analisador de mercúrio RA-915M (Lumex, 2013).

A quantificação do Hg no equipamento ocorre em fases iniciando com a fonte de radiação (uma lâmpada de mercúrio) que é colocada no campo magnético permanente H como ilustra a figura 4. A linha de ressonância de mercúrio $\lambda = 254 \text{ nm}$ é dividida em três componentes Zeeman polarizados (π , σ_+ e σ_- , respectivamente). Quando a radiação se propaga ao longo da direcção do campo magnético, a linha central π não é deslocada em frequência e permanece na mesma posição e na mesma linha original e as componentes σ_+ e σ_- são deslocadas com frequências opostas uma para direita e a outra para esquerda respectivamente em direcção da linha central. Essa divisão facilita a medição precisa dos níveis de mercúrio, eliminando interferências de fundo através da correcção Zeeman (Lumex, 2018a). Quando átomos de mercúrio aparecem na célula, a diferença entre as intensidades dos componentes σ_- aumenta à medida que a concentração de vapor de mercúrio aumenta. Os componentes σ_- são separados pelo modulador de polarização, o deslocamento espectral dos componentes σ_- é significativamente menor do que as larguras das bandas de absorção molecular e espectros de espalhamento, portanto, a absorção do fundo por componentes interferentes não afecta as leituras do analisador (Lumex, 2018a).

3.1.2. Acessório RP-92 (análises líquidas)

O analisador de mercúrio (RA-915M) equipado com o acessório RP-92 (figura 5) é usado para determinar o teor de mercúrio em amostras líquidas. O princípio de funcionamento do acessório RP-92 é baseado na redução do Hg (II) ao estado atómico usando uma solução redutora com o transporte dos átomos de mercúrio para uma célula analítica por um fluxo de ar (o “vapor frio”) (Lumex Instruments, 2016).

O processo da análise de Hg utilizando o acessório RP-92 envolve a redução selectiva de Hg presente na amostra, a solução redutora utilizada é o cloreto de estanho (II) ($\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Nesse método a amostra que está sendo analisada e a solução redutora são colocadas no mesmo borbulhador, o bombeamento contínuo do ar emitido pelos borbulhadores gera o mercúrio elementar, onde os seus átomos são detectados através da célula analítica do analisador RA-915+ (Sholupov e colaboradores, 2004).

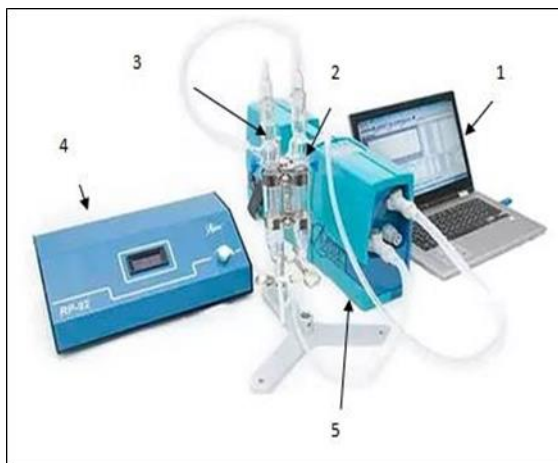


Figura 6: Analisador de mercúrio RA-915M acoplado ao acessório RP-92 (analisador de amostras líquidas).

Legenda

1. Computador;
2. Borbulhador de solução de NaOH;
3. Borbulhador da solução de $\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$;
4. Acessório RP-92;
5. Analisador de mercúrio RA 915M.

3.2. Colheita de amostras

A amostragem de água nos pontos de colecta ocorreu nas bacias de lavagem de minérios na área de mineração, e as amostragens do ar foram realizadas nos locais e nas proximidades onde há concentração e queima de mercúrio, onde é feita a amálgama Hg-Au.

3.2.1. Descrição da amostragem de água

As amostras de água foram colectadas na superfície das bacias numa profundidade de 30cm, de forma manual em garrafa de polietileno de 500 mL devidamente etiquetados, fechadas e preservadas em meio ácido com solução de HCl concentrado para uma concentração de 2% e mantidas sob refrigeração (gelo) em caixas térmicas, para posterior envio ao laboratório de Bioquímica na Faculdade de Medicina da Universidade Eduardo Mondlane (UEM), para análises das concentrações do Hg. A adição do ácido na água é fundamental para manter as suas propriedades químicas e biológicas. Foram colhidas cerca de 30 amostras de água nas bacias de lavagem de minérios, onde 26 amostras são provenientes da região de Chifunde (TCF) e 4 de Luia (TCL).

3.2.2. Medição do mercúrio no ar

A quantificação de mercúrio no ar foi realizada através do Espectrómetro de absorção atómica (Lumex), em áreas onde ocorre amalgamação com Hg para separação do ouro, onde foi determinado o Hg directamente no ar em 67 pontos pre-determinados. Nesta campanha, utilizou-se o equipamento previamente calibrado, Lumex. Esta amostragem teve como finalidade verificar concentrações de Hg^0 emitido no ar. A **figura 6** apresenta o mapa de amostragem de Hg em Chifunde.



Figura 7: Enquadramento geográfico da determinação de Hg em Chifunde. Fonte: autora (adaptado).

4. PARTE EXPERIMENTAL

4.1. Materiais e reagentes

Todos os materiais foram lavados primeiro com água da torneira e detergente, depois passados em água destilada para retirar o excesso de detergente e depois imersos em solução de HNO_3 a 20% por no mínimo um dia e depois foram lavados exaustivamente com água destilada e finalmente foram secos. As pipetas que foram regularmente usadas para medir o volume das amostras para as análises, foram depois secas na estufa a uma temperatura máxima de 200°C , de forma a garantir a eliminação de contaminação do Hg no material.

4.1.1. Materiais

- Papel de filtro, SCRO de 10 a 20 μm ;
- Luvas de borracha;
- Máscara;
- Óculos de protecção;
- Funil de vidro;
- Microfiltros de $0,45\mu\text{m}$;
- Pipetas graduadas (5 mL), West-germany, 1/10;
- Tubos de centrifugação, 50 mL;
- Seringas de 50mL;
- Espátula;
- Conta-gotas;
- Balões volumétricos Normax (25 mL, 50 mL, 100 mL, 500 mL, 1000 mL);
- Proveta Normax de 100 mL com precisão de ± 1 mL;
- Copos de Becker, 50 mL, Normax-Portugal;

4.1.2. Reagentes

- Ácido nítrico (HNO_3) 65%-70%, Glassworld;
- Ácido sulfúrico (H_2SO_4) 97-99%, Sigma-Aldrich;
- Permanganato de potássio (KMnO_4) 99%, Rochelle Chemicals;
- Dicloreto de estanho dihidratado ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 98%, Sigma-Aldrich;
- Hidróxido de sódio (NaOH) 97%, Dasitgroup;
- Peroxodissulfato de potássio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) 99%, Sigma-Aldrich;
- Ácido nítrico (HNO_3) 65%, Glassword;
- Cloridrato de hidroxilamina ($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$) 97%, Associated Chemical Interprece.

4.1.3. Materiais de referência

- Material de Referência (SRM from NIST HNO_3 0,5 mol/L, HCl 0,5 mol/L, $0,1016 \pm 0,0017$ mg/kg Hg.

4.1.4. Equipamentos:

- Analisador de mercúrio (Zeeman RA-915M, LUMEX, RA – 915+M);
- Computador (HP);
- Balança, Mettler PM1200, Max 1200, $d=0,001\text{g}$).

4.2. Procedimento de análises laboratoriais

4.2.1. Análise do material referência

A leitura dos padrões da água foi feita de modo a monitorar a resposta do equipamento reactivamente ao conteúdo de mercúrio, garantir a confiabilidade e a precisão das análises de mercúrio. O certificado do material de referência indicava que se devia fazer a diluição do material de referência numa solução de diluição preparada com dicromato de potássio $K_2Cr_2O_7$ que ao reagir com o Hg forma um complexo estável, facilitando a sua detecção e quantificação do Hg na amostra, garantindo a precisão das medições, como descrito nos procedimentos experimentais as suas concentrações estão descritas na **tabela 2**. A leitura do branco da solução de diluição foi feita para avaliar a contribuição desta na concentração de Hg na mistura tomou-se 3 réplicas do branco e obteve-se a concentração média de 47.10 ± 2.13 ng/L de Hg.

Tabela 2: Concentração teórica do material de referência.

Padrão de Hg	Concentração teórica (ng/L)	Volume final (mL)
1	10	100
2	100	100
3	200	100
4	500	100
5	1000	100

4.2.2. Determinação de Hg nas amostras de água

Antes de serem analisadas, as amostras foram filtradas através do papel de filtro com a faixa de 10 a 20 μm de porosidade, e posteriormente filtradas pelo microfiltro de seringa que possui uma porosidade de 0,45 μm .

Para a realização das análises, seguiu-se o procedimento recomendado pela EPA (1974) que procede com preparação, digestão e por fim análise das amostras e pelo método descrito no guião de análises do instrumento Lumex (2016). Primeiramente foram testados os tubos de centrifugação usados para digerir as amostras e a sua concentração foi inferior a 1.9 ng/L, os todos demonstraram-se livres de Hg permitindo assim que fossem usados para digestão de amostras de água durante o processo de análise de Hg.

Para a determinação da concentração de Hg na água oriunda de diversas fontes recomenda-se o uso do método da digestão, este método possibilita a libertação do Hg, remoção de interferentes e a homogenização da amostra, melhorando assim a precisão e a confiabilidade dos resultados. Primeiramente as amostras de água foram digeridas com permanganato de potássio que oxida o Hg metálico a iões Hg^{2+} , tornando-o mais solúvel e disponível para detecção. O tratamento por digestão com ácidos permite com que o Hg seja encontrado na sua forma estável para ser oxidado a Hg^{2+} , e subsequente redução pela solução redutora e posterior análise (Lumex 2016).

A digestão foi feita na base da adição dos reagentes descritos na **tabela 3** e deixaram-se as amostras em repouso por um período de 24 horas a fim de completar a reacção. Após esse período adicionou-se uma solução de cloridrato de hidroxilamina ($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$), gota a gota, agitando-se a até que a amostra se tornou incolor, e por fim procedeu-se com a análise.

Tabela 3: Reagentes utilizados para digestão das amostras de água.

Reagente	Volume (mL)
Amostra de água	35
Ácido sulfúrico	3,5
Ácido nítrico	1,0
Permanganato de potássio	2,5
Peroxidissulfato de potássio	1,5
Volume total	50

A leitura das amostras foi feita em triplicadas no analisador de mercúrio acoplado com o acessório RP-92 que gera vapores de Hg, a concentração de Hg desses vapores foi medida pelo analisador de mercúrio Zeeman RA-915M.

4.2.3. Análises do ar

Para as leituras da concentração de Hg no ar utilizou-se espectrofotómetro de absorção atómica, com correcção por efeito Zeeman, o analisador portátil para mercúrio modelo RA-915M da marca Lumex, quantifica instantaneamente os níveis de Hg no ar. As leituras foram realizadas em cada um dos pontos de amostragem de acordo com o tempo disponibilizado pelos responsáveis dos garimpos, estabelecendo o mínimo de 10 minutos de medição ininterrupta em cada ponto.

O equipamento foi programado para realizar uma leitura média a cada 10 segundos, o que equivale a seis medidas por minuto



Figura 8:Determinação do Hg no ar em uma planta de processamento. Fonte:autora

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente capítulo, são apresentados os resultados experimentais obtidos nas análises feitas para a determinação das concentrações de mercúrio na água e no ar no distrito de Chifunde e na localidade de Luia (Kassequele), expressos em ng/L e $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Nos resultados referentes à determinação do Hg na água, foram tomadas 3 réplicas para cada amostra. A média dos resultados foi apresentada com 95% de nível de confiança. E também foi determinada a recuperação analítica para avaliar a exactidão do método.

Os resultados de Hg obtidos na água são comparados com o valor máximo admissível pela norma moçambicana Decreto-lei nº 67/2010: Regulamento sobre Padrões de Qualidade Ambiental e Emissão de Efluentes cujo valor limite é de 2000 ng/L. E para as concentrações de Hg no ar os resultados obtidos são comparados com o valor máximo permitido pela Organização Mundial da Saúde (OMS) cujo valor é de $1\mu\text{g}/\text{m}^3$.

5.1. Análise do material de referência

A recuperação analítica para o material de referência variou de 99,98 a 104,05% **tabela 4**. Segundo EPA (1974) os valores admitidos na recuperação para a determinação de concentrações Hg na água devem estar no intervalo de 85-115%, portanto a recuperação encontrada na análise do material de referência é considerada como admissível.

Tabela 4: Concentração de Hg de diferentes soluções preparadas a partir do SRM de Hg.

Padrão	Média (ng/L)±IC	Valor verdadeiro (ng/L)	Desvio padrão	Recuperação (%)
1	10,45±1,47	10	0,59	104,5
2	200,68±1,32	200	0,53	100,34
3	500,48±0,47	500	0,19	100,10
4	999,80±2,71	1000	1,09	99,98

5.2. Análises das amostras de água

Na tabela 5 (vide anexo A) e figura 9, são apresentados os resultados obtidos na análise de Hg nas amostras de água TCF (distrito de Chifunde) com o limite estabelecido pela legislação através do Decreto-lei nº 67/2010 (Regulamento sobre Padrões de Qualidade Ambiental e Emissão de Efluentes).

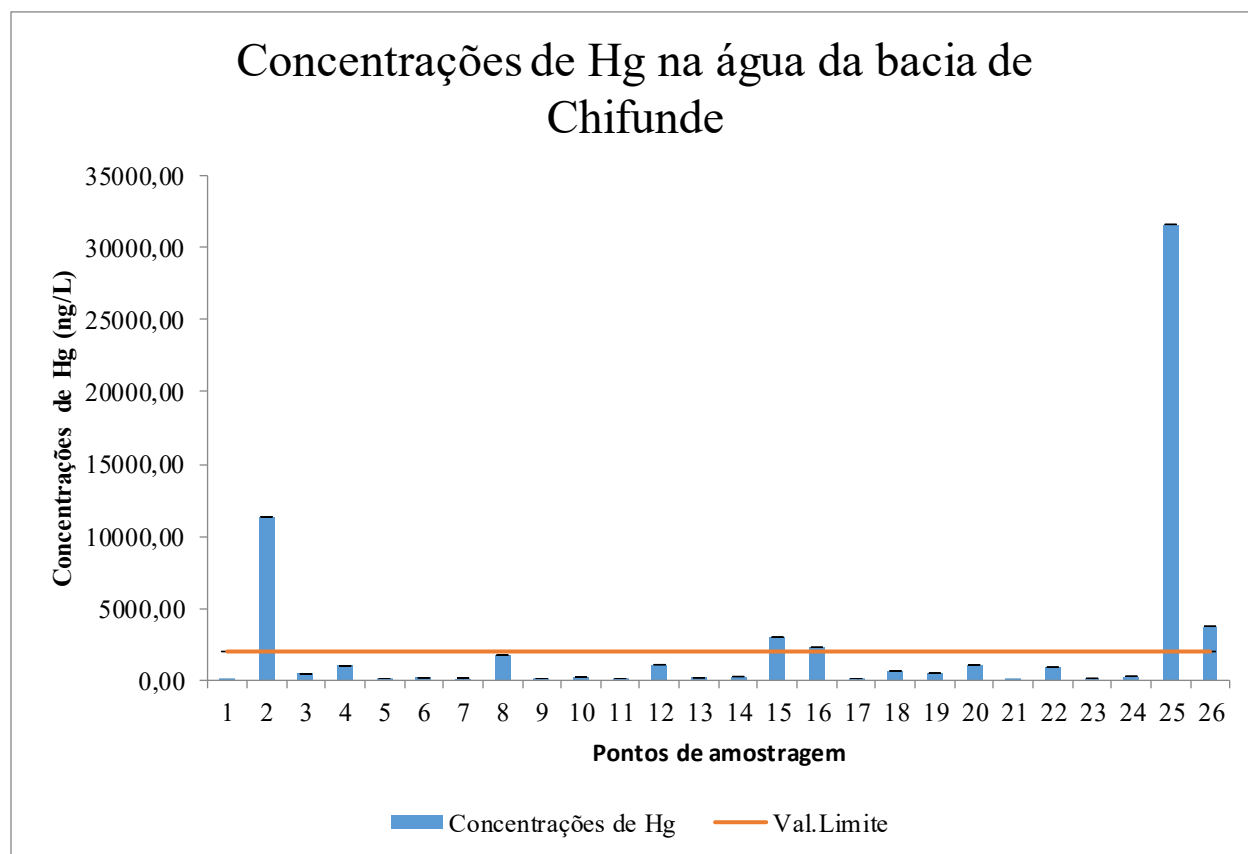


Figura 9:Gráfico de comparação do teor de Hg em amostras da água na bacia TCF, com o limite estabelecido pela legislação.

De acordo com a tabela 5 (vide anexo B) e a figura 9, as amostras de água de Chifunde apresentaram concentrações de Hg com intervalos de $30,60 \pm 6,91$ a $31617,67 \pm 5,09$ ng/L. Considerando que o valor limite para emissão de efluentes que contêm Hg é de 2000 ng/L segundo o Decreto-Lei nº 67/2010, pode-se verificar que os 21 pontos (1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24) dos 26 analisados apresentaram valores abaixo do limite estabelecido pela legislação e os 5 pontos (2, 15, 16, 25, 26) remanescentes encontram-se com

níveis de concentração de Hg acima do valor admissível pela legislação (Regulamento sobre Padrões de Qualidade Ambiental e Emissão de Efluentes).

Na figura 10 e tabela 6 (vide anexo B), apresentam-se os dados obtidos na análise das amostras da TCL (Luia na localidade de Kassaquale) com o limite estabelecido pela legislação o Decreto-lei nº 67/2010 (Regulamento sobre Padrões de Qualidade Ambiental e Emissão de Efluentes).

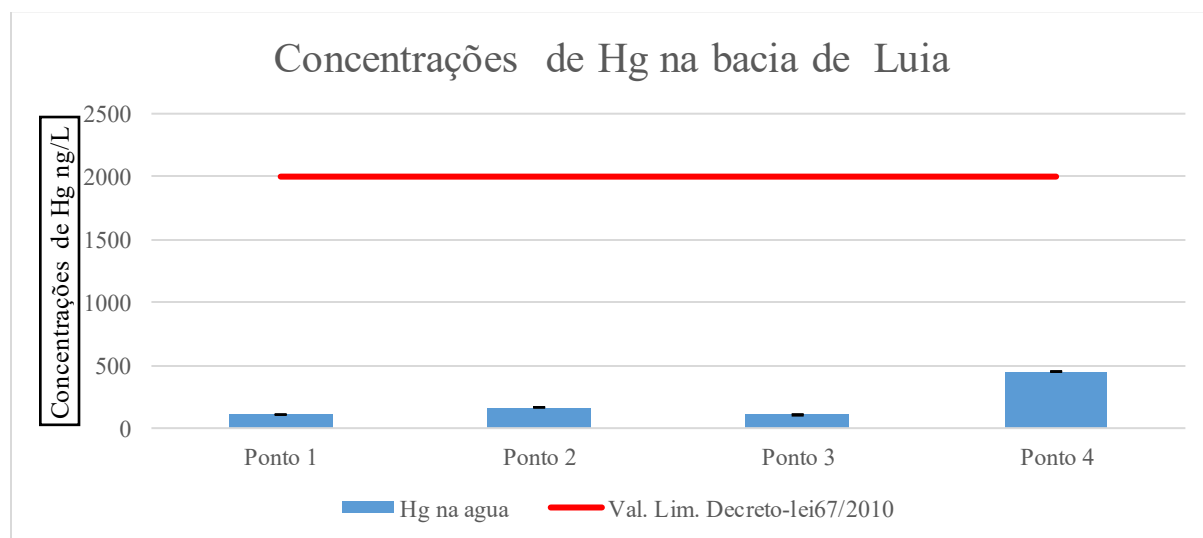


Figura 10: Gráfico de comparação da concentração de Hg em amostras da água na bacia TCL com os limites estabelecidos pela legislação.

Nos resultados obtidos nas amostras de Luia pode-se observar que as concentrações de Hg variam $105,70 \pm 13,99 \text{ ng/L}$ a $450,30 \pm 5,22 \text{ ng/L}$, estas concentrações encontram-se abaixo do valor limite estabelecido pela norma moçambicana.

5.3. Análise de teores de mercúrio no ar

Para a leitura dos níveis de teores de Hg no ar foram feitas 67 medições compreendidas entre o rio Nthirakuiiri até a localidade de Luia- Kassaquale. A OMS, define de exposição ocupacional segura ao mercúrio é de $1 \mu\text{g}$ de Hg por m^3 . Portanto, este foi o valor limite utilizado como referência para comparação com os teores de Hg obtidos na amostragem. Os resultados obtidos na determinação dos teores de Hg no ar no distrito de Chifunde e na localidade de Luia- Kassaquale encontram-se apresentados nas tabelas 7 e 8 (vide anexo B) e graficamente apresentados nas figuras 11 e 12 respectivamente.

Na figura 11, encontram-se apresentados os resultados obtidos na determinação do Hg no ar no distrito de Chifunde comparados com o valor limite estabelecido pela OMS.

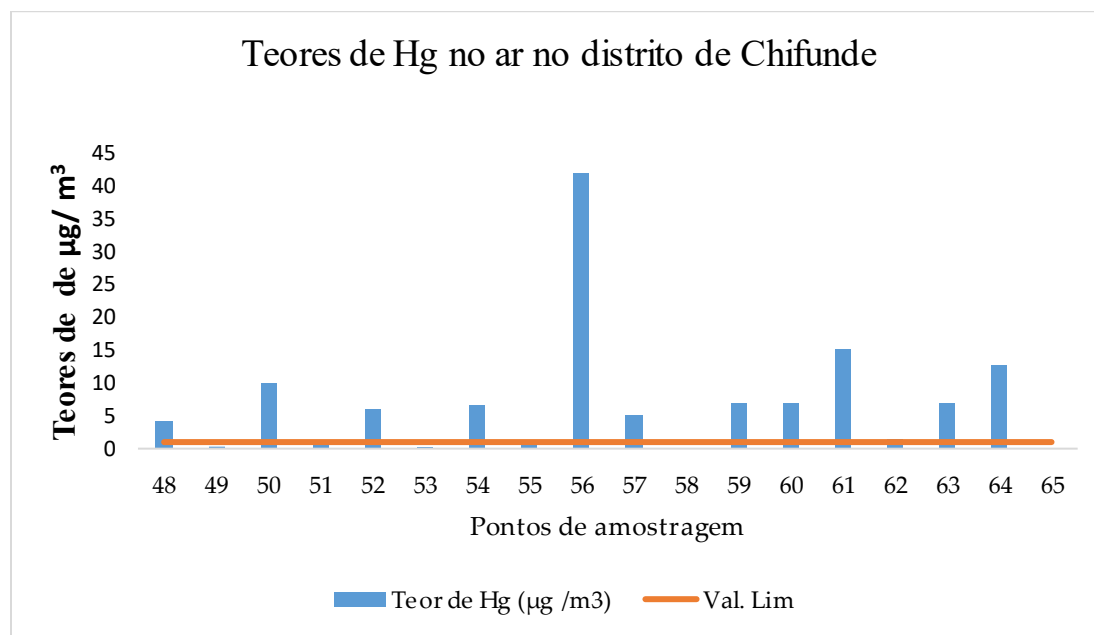


Figura 11: Gráfico de comparação do teor de Hg em Chifunde, com o limite pela OMS.

De acordo com a tabela 7 (vide anexo B) e a figura 11 é possível confirmar que cerca de 49 pontos de amostragem apresentaram valores abaixo do limite de detecção, e os 16 pontos restantes apresentaram valores acima do limite definido pela OMS de níveis de Hg no ar com destaque para os pontos 56, 61, 64 e 50 que apresentaram teores altos de Hg no ar. Assim, o monitoramento de Hg no ar em Chifunde mostrou que os teores atingem valores altos de emissão de Hg acima do valor estabelecido pela OMS.

Na figura 12 e na tabela 8 encontram-se apresentados graficamente os teores de Hg determinados no ar na localidade de Luia- Kassaquale.

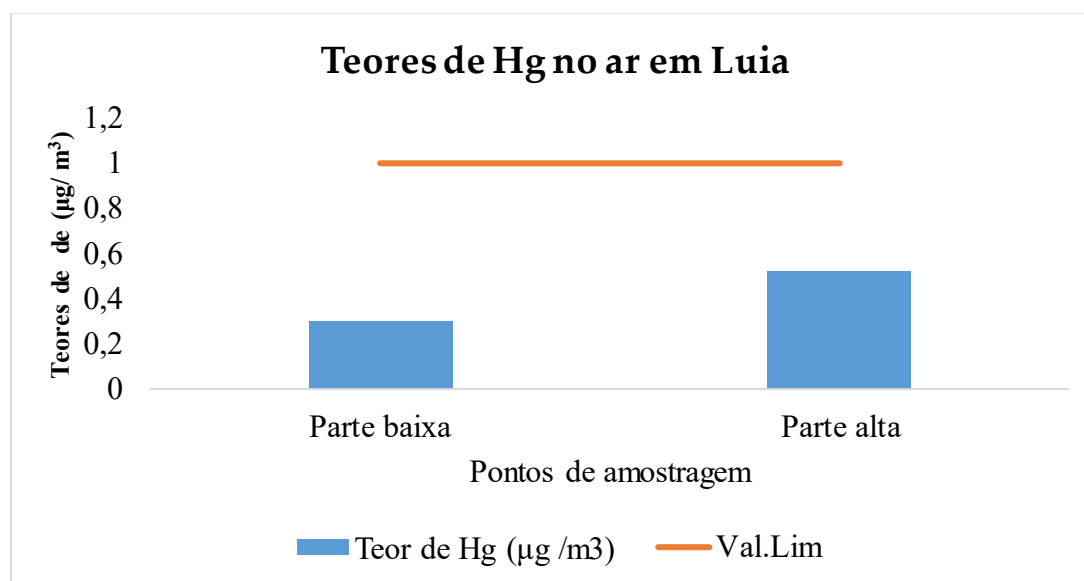


Figura 12: Gráfico de comparação do teor de Hg em Luia- Kassaquale, com o limite pela OMS.

No gráfico representado na figura 12 os teores variam de 0,3-0,53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, e estiveram abaixo de 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ do valor limite descrito pela OMS, as análises na localidade de Luia-Kassequele foram feitas em dois pontos na parte baixa e alta.

5.4. Discussão geral

➤ Água

Comparando os resultados obtidos na análise de Hg na água das bacias de lavagem de minérios em Chifunde (neste trabalho) com os resultados apresentados por Francisco (2024) que analisou Hg na água do rio e poço na mesma região podemos constatar que as concentrações de Hg variaram de 0-23534,70 $\pm$ 308,53 ng/L e 23,10 $\pm$ 10,47 ng/L- 362,20 $\pm$ 14,71ng/L respectivamente.

Nas análises da água do rio, os resultados obtidos apresetaram concentrações de Hg dentro dos intervalos obtidos nesta pesquisa. De acordo com Francisco (2004) a introdução do Hg no rio é resultante da ligação com algumas bacias em que os operadores fazem a lavagem dos minérios. Como resultado, o Hg na água poderá ser convertido por microrganismos em metilmercúrio, que se acumula ao longo da cadeia alimentar, causando impactos prejudiciais para a vida aquática e humana.

No que concerne á qualidade química das 26 amostras de água da bacia de Chifunde analisadas, os resultados mostram que 21 pontos possuem concentrações que estão em conformidade com a norma moçambicana, e as bacias de Luia onde foram analisadas 4 amostras todas as concentrações apresentaram valores abaixo de 2000 ng/L. Portanto pode-se considerar que em termos de contaminação por Hg esses pontos ainda não apresentam um risco imediato á saúde humana conforme o Decreto-lei nº 67/2010 (Regulamento sobre Padrões de Qualidade Ambiental e Emissão de Efluentes) é essencial a observação contínua dos níveis de Hg e outros poluentes para garantir a sustentabilidade e a segurança dos locais a longo prazo.

No entanto, Lacerda e Malm (2008) defendem que as amostras de água podem apresentar baixas concentrações de Hg, pelo facto deste metal ter tendência a sedimentar-se quando associado ao material particulado em suspensão, o Hg dissolvido apresenta maior biodisponibilidade, podendo ser mais facilmente incorporado pela biota aquática. Dessa forma, a sedimentação do material particulado pode explicar os níveis reduzidos de Hg encontrados em alguns pontos analisados no presente trabalho e dos outros autores. O Hg tem grande possibilidade de ser adsorvido em partículas sólidas, e estas permanecem em suspensão ou sedimentam lentamente, em zonas de baixas vazões (Lima, 2013).

As bacias de Chifunde apresentam 5 pontos com concentrações acima do limite estabelecido pela norma, nomeadamente: ponto 2 ($11282,67 \pm 6,19$), ponto 15 ($2992,00 \pm 7,30$), ponto 16 ($2292,33 \pm 6,19$), ponto 25 ($31617,67 \pm 5,09$) e ponto 26 ($3747,33 \pm 4,22$). De todos os pontos analisados o ponto 25 foi o ponto que apresentou uma concentração de Hg muito alta, tendo-se obtido o valor de ($31617,67 \pm 5,09$) estando 15 vezes acima do valor estabelecido pela norma pode se observar que a água neste ponto está extremamente contaminada pelo Hg.

As concentrações mais elevadas de mercúrio verificadas em algumas bacias analisadas encontram-se diretamente associadas à actividade de lavagem do amálgama Hg-Au, realizada no momento da amostragem. Estas bacias correspondem a pequenas escavações utilizadas na mineração artesanal, nas quais o mercúrio é adicionado para amalgamar o ouro, sendo posteriormente lavado com água. Este processo resulta na libertação imediata de mercúrio na água, provocando picos significativos de poluição. Por outro lado, as bacias com menores concentrações apresentavam águas rasas e não se encontravam em utilização activa, o que sugere que o mercúrio presente pode ter-se depositado nos sedimentos, reduzindo a sua concentração na coluna de água. Estes resultados evidenciam a

forte influência das práticas de mineração sobre a distribuição espacial do mercúrio e destacam a importância de considerar tanto o estado de actividade das bacias como a profundidade da água na avaliação. Desta forma os resultados confirmam a existência de níveis consideráveis de Hg nos pontos citados acima, isso por tratar-se de águas que são directamente afectadas pelas operações da mineração artesanal, e salientar que a elevada toxicidade deste metal pesado na água deve-se ao facto dele transformar-se em metilmercúrio que se bioacumula nos organismos aquáticos.

Além dos riscos directos aos trabalhadores das mineradoras, tendo em que a pesca é uma das principais formas de subsistência das comunidades locais e estas dependem da água dos rios para as actividades domésticas e consumo, e acabam por ingerir metilmercúrio pelo consumo dos peixes contaminados. Estes resultados também alertam que as comunidades ao redor da área de mineração correm risco de saúde devido aos altos níveis de exposição ao Hg (Akagi et al., 1995; Grandjean et al.1999).

➤ Ar

Nos 65 pontos amostrados em Chifunde, onde se determinaram os teores de Hg no ar, confirmou-se que 75% (49 pontos) apresentaram valores inferiores a $0,5 \text{ ng/m}^3$, correspondente ao limite de detecção do método utilizado. Estes pontos localizavam-se em áreas sem actividades intensas de mineração, como a jusante do rio Jhotuso e na zona de confluência entre os rios Nthirakui e Mussenguerezi, área de desaguento do rio Nthirakui.

Nos 25% restantes, correspondentes a 16 pontos, apenas dois apresentaram os seguintes valores: $0,4$ e $0,37 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, ambos inferiores ao limite estabelecido pela OMS. Os 14 pontos remanescentes apresentaram valores muito superiores a $1 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, valor estabelecido pela OMS. Os resultados confirmaram que os níveis de Hg obtidos, em determinadas áreas, se situaram acima do limite legal, variando entre $1,2$ a $41,9 \text{ } \mu\text{g/m}^3$.

Estas medições foram realizadas em zonas onde ocorre a decomposição da amálgama, ou seja, em estaleiros e moageiras dos mineiros. O analisador indicou que existe uma emissão significativa de Hg para a atmosfera, conforme evidenciado na Tabela 7 e no Gráfico 11.

Por outro lado, a localidade de Luia-Kassaquale demonstrou estar dentro dos padrões aceitáveis não estando ainda contaminada por Hg, de acordo com as análises de quantificação no ar apresentadas na Tabela 8 e no Gráfico 12.

O uso de retorta ou capela para decomposição térmica não parece ser uma prática comum em Chifunde, pois alguns mineiros sugeriam pouco uso, podendo-se estimar que o amálgama seja queimado na própria bateia, com o auxílio de maçaricos.

As concentrações elevadas de Hg no ar representam um risco para os trabalhadores das minas e para a comunidade local, pelo facto da via principal de entrada de Hg nos seres humanos ser por inalação de vapores de Hg que, quando absorvido pelos pulmões e transportado pelo sangue acumula-se principalmente nos rins, mas pode atravessar a barreira hemato-encefálica causando danos ao sistema nervoso central (Lacerda e Salomons, 1998).

Por fim, vale tecer que a presença do Hg mesmo em concentrações baixas em águas naturais e no ar, é preocupante, por ser considerado um metal altamente tóxico, ainda que em concentrações reduzidas, e por apresentar maior risco de bioacumulação na biota e nos seres humanos (Miranda et al., 2009).

6. Medidas de mitigação das áreas poluídas pelo Hg

As medidas de mitigação que podem ser adoptadas para reduzir a poluição da água e do ar, evitando que a água poluída das bacias alcance os rios e que os vapores de Hg se dispersem na atmosfera são:

Eliminação das práticas inadequadas de emissões e riscos de exposição ao mercúrio pelo sector da MAPEO descritas no ponto (b) do anexo C da Convenção de Minamata citados a baixo:

- i) Amalgamação do minério bruto;
- ii) Queima a céu aberto de amálgama ou amálgama processado;
- iii) Queima de amálgama em áreas residenciais; e
- iv) Lixiviação de cianeto em sedimento, minério bruto ou rejeitos onde o mercúrio tenha sido adicionado sem primeiro remover o mercúrio.

Tratamento *in situ* da água das bacias através de:

- i. Barreiras de adsorção: instalação de filtros com carvão activado ou zeólitas nas saídas das bacias para reter o Hg antes do despejo no rio;
- ii. Sistemas de decantação: criar tanques de sedimentação onde partículas com Hg possam depositar-se antes da água ser descartada.

Adesão a práticas de extracção sustentáveis:

- i. Promoção do uso de métodos sem Hg, como concentração gravimétrica (mesas vibratórias) ou fusão directa e produção de equipamentos de queima do amálgama em circuito fechado usando material local;
- ii. Treinamento dos mineradores de MAPEO em técnicas e tecnologias de contenção de emissões do mercúrio e uso de equipamentos de protecção individual;
- iii. Impermeabilização do solo sob as bacias com geomembranas para evitar infiltração do Hg no lençol freático;
- iv. Desenvolvimento e produção de materiais de comunicação para conscientização sobre os riscos à saúde e ao ambiente causados pelo processo de amalgamação por mercúrio e seus impactos, e apelo a práticas seguras na mineração.
- v. Implementação de um sistema de monitoramento contínuo da qualidade da água e do ar nas áreas de mineração no distrito de Chifunde, envolvendo as comunidades locais para que tenham um papel activo na protecção do meio ambiente.

- vi. Criação de planos rigorosos para o controlo do uso de mercúrio na mineração artesanal, garantir a conformidade com convenções internacionais, como a Convenção de Minamata e a reabilitação para áreas afectadas pela mineração, incluindo a revegetação e a restauração de corpos de água contaminados.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1. Conclusões:

Como resposta aos objectivos traçados no presente trabalho, os resultados obtidos permitem concluir que:

Foi possível avaliar os níveis de poluição por Hg na água e no ar na área de mineração artesanal de ouro em Chifunde. Para esta avaliação foi usada a técnica de espectrofotometria de absorção atómica através do equipamento Lumex RA-915M com correcção Zeeman para análises do ar e acoplado ao acessório RP-92 para as análises da água. Os resultados experimentais mostraram que a concentração de Hg recuperada foi de 99,98 a 104,05%.

As concentrações de Hg nas amostras de água de TCF nos pontos 2, 15, 16, 25 e 26 apresentaram concentrações de Hg acima do valor limite estabelecido no Decreto-lei nº67/2010, diferentemente das concentrações de Hg das amostras da bacia TCL que não apresentaram valores significativos, uma vez que as concentrações de Hg encontraram-se abaixo do valor máximo estabelecido pela legislação, indicando baixos índices de concentração de Hg nos pontos amostrados.

Dos resultados da determinação das concentrações de Hg no ar pode-se constatar que dos 65 pontos analisados, 49 pontos estiveram abaixo do limite de detecção, 2 pontos estiveram abaixo do limite estabelecido pela OMS e os 14 pontos (estaleiros e moageiras dos mineiros) apresentaram valores muito acima do valor máximo permitido pelos padrões da OMS para a exposição do Hg os 2 pontos na localidade de Luia-Kassaquale apresentaram valores abaixo do limite estabelecido pela OMS. Na perspectiva da exposição ocupacional, deve-se levar em consideração que tais teores podem ser intermitentes, ou seja, que pode haver picos e vales de teores de mercúrio na atmosfera. Por isto, sugere-se que o monitoramento seja realizado com maior frequência contínuo, adoção de retortas e treinamento para mineradores, visando reduzir emissões de vapores de Hg durante a queima da amálgama nos pontos críticos identificados.

Em suma, de acordo com a legislação moçambicana, os resultados obtidos experimentalmente demonstram que, nas bacias no distrito de Chifunde, na localidade de Kassequele em Luia e no ar, embora algumas áreas apresentem poluição por Hg proveniente da mineração artesanal do ouro, outras não apresentaram níveis detectáveis embora a exposição a Hg não represente danos imediatos à saúde, no entanto por não ser biodegradável o Hg é incorporado e acumulado no organismo e ao longo da cadeia alimentar, causando assim impactos ao meio ambiente e risco à saúde humana.

7.2. Recomendações:

A partir dos resultados das análises recomenda-se a:

- Determinação de concentrações de outros metais pesados na água e nos sedimentos na área de estudo;
- Determinação da concentração de mercúrio (em peixes, plantas aquáticas e sedimentos) na áreas de estudo;
- Pesquisas adicionais na exploração de tecnologias de tratamento de efluentes poluídos por mercúrio mais eficazes que possam ser implementadas na mineração de ouro para reduzir a poluição ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Akagi, H., Malm, O., Kinjo, Y., Harada, M., Branches, F. J., Pfeifer, W. C. e Kato, H. (1995). Methylmercury pollution in Amazon, Brazil. *Science of the Total Environment*, 175, 85–95. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04941-6](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04941-6)
2. Alloway, B. J. (1995). *Heavy metals in soils*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1344-1>
3. Almeida, E. M. M. (2011). *Efeito do mercúrio em comunidades bacterianas associadas a plantas* [Dissertação de mestrado, Instituto Universitário de Lisboa]. Repositório ISCTE.
4. Álvarez-Caicoya, J., Cosme-Torres, A. J. e Ortiz-Rivera, E. I. (2011). Compact fluorescent lamps: An anticipatory mind to mercury. *IEEE Potentials*, 30(5), 40–44. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2011.942010>
5. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (1999). *Toxicological profile for mercury*. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp46.pdf>
6. Araujo, P. C. (2017). *Avaliação dos Teores de Mercúrio na Atmosfera em Áreas de Mineração Artesanal ou de Pequena Escala de Ouro no Brasil e Riscos à Saúde Humana* [Dissertação de mestrado, Instituto de Florestas Programa de Pós Graduação em Práticas em Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro]. Seropédica - RJ
7. Aucott, M., McLinden, M., & Winka, M. (2003). Release of mercury from broken fluorescent lamps. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53(2), 143–151. <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466134>
8. Baêta, A. P. (2004). *Mercúrio total e metilmercúrio em diferentes espécies de peixes da Baía de Guanabara* [Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro]. PUC-Rio.
9. Bank, M. S. (2012). *Mercury in the environment: Pattern and process*. University of California Press. <https://doi.org/10.1525/california/9780520271632.001.0001>
10. Bastos, W. R. e Lacerda, L. D. (2004). A contaminação por mercúrio na bacia do Rio Madeira: Uma breve revisão. *Química Nova*, 27(6), 925–930. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000600023>

11. Beckers, F. e Rinklebe, J. (2017). Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(9), 693–794. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1326277>
12. Besser, R. E. (2009). *Children's exposure to elemental mercury: A national review of exposure events*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). <https://www.atsdr.cdc.gov/>
13. Branco, V., Canário, J., Lu, J., Holmgren, A. e Carvalho, C. (2012). Mercury and selenium interaction in vivo: Effects on thioredoxin reductase and glutathione peroxidase. *Free Radical Biology & Medicine*, 52, 781–793. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2011.11.038>
14. Castilhos, Z. C. (2018). *Inventário nacional de emissões e liberações de mercúrio no âmbito da mineração artesanal e de pequena escala no Brasil* [Relatório técnico]. Ministério de Minas e Energia, Brasil
15. Consul, A., Mandevane, D. e Tankar, I. (2012). *Impacto da mineração artesanal na vida das crianças e no meio ambiente*. Maputo: Centro Terra Viva
16. Cunha, M. E. da S. (2008). *Interação entre mercúrio e sistemas biológicos* [Tese de doutoramento, Universidade do Porto, Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar]. Repositório UPorto.
17. Dondeyne, S., Ndunguru, E., Cesario, F., Jantar, P., Nhaca, F., Rafael, P. e Zurmühl, U. (2007). *Em busca do ouro: garimpo e desenvolvimento sustentável, uma difícil conciliação?* Chimoio, Moçambique: Centro de Desenvolvimento Sustentável (CDS-RN), Ministério para a Coordenação da Acção Ambiental; NIRAS Scanagri Finland Oy
18. Governo de Moçambique. (2004). *Decreto-lei n.º 180/2004 de 15 de setembro: Regulamento sobre a qualidade da água para consumo humano*. Imprensa Nacional de Moçambique.
19. Governo da República de Moçambique, et al, 2004, Relatório de Monografia – Desenvolvimento da Estratégia conjunta para a gestão integrada dos recursos hídricos na Bacia de Pungue
20. Governo de Moçambique. (2010). *Decreto-lei n.º 67/2010: Regulamento sobre padrões de qualidade ambiental e emissão de efluentes*. Imprensa Nacional de Moçambique.
21. United States Environmental Protection Agency (EPA). (1974). *Method 245.2: Mercury (Automated Cold Vapor Technique)*. https://www.cromlab.es/Articulos/Metodos/EPA/200/245_2.pdf

22. Francisco, E. M. F. (2024). *Avaliação do grau de contaminação por mercúrio no ar e na água para o consumo humano em distritos da província de Tete devido à mineração de ouro* [Tese de licenciatura, Universidade Eduardo Mondlane, Departamento de Química]. Repositório UEM
23. Governo de Moçambique. (2021). *Plano Nacional de Ação para Redução e/ou Eliminação do Mercúrio*. Maputo: Governo de Moçambique. Disponível em <https://www.mercuryconvention.org>
24. Grandjean, P., Satoh, H., Murata, K. e Eto, K. (2010). Adverse effects of methylmercury: Environmental health research implications. *Environmental Health Perspectives*, 118(8), 1137–1145. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901757>
25. Grandjean, P., White, R. F., Nielsen, A., Cleary, D. e De Oliveira Santos, E. C. (1999). Methylmercury neurotoxicity in Amazonian children downstream from gold mining. *Environmental Health Perspectives*, 107(7), 587–591. <https://doi.org/10.1289/ehp.99107587>
26. Grigoletto, J. C., Oliveira, A. S., Muñoz, S. I. S., Alberguini, L. B. A. e Takayanagui, A. M. M. (2008). Exposição ocupacional por uso de mercúrio em odontologia: Uma revisão bibliográfica. *Ciência & Saúde Coletiva*, 13(4), 1201–1210. <https://doi.org/10.1590/S1413-81232008000400010>
27. Hilson, G., Hilson, A., & McQuilken, J. (2021). *Formalising artisanal and small-scale mining in Mozambique*. International Growth Centre. Disponível em <https://www.theigc.org>
28. Himenes, G. F. e Tutunji, V. L. (2005). *Escherichia coli e Pseudomonas aeruginosa resistentes ao mercúrio: Bioindicadores de contaminação mercurial em ambientes aquáticos* [Monografia de graduação, Centro Universitário de Brasília]. Repositório UniCEUB.
29. Hovart, M., & Gibicar, D. (2005). Speciation of mercury: Food, clinical, and occupational health. In R. Cornelis et al. (Eds.), *Handbook of elemental speciation II: Species in the environment, food, medicine and occupational health*. John Wiley & Sons, Ltd
30. Huckabee, J. W., Elwood, J. W., & Hildchrand, S. G. (1979). Accumulation of mercury in freshwater biota. In J. O. Nriagu (Ed.), *The biogeochemistry of mercury in the environment* (pp. 277–302). Elsevier/North-Holland Biomedical Press
31. Idowu, O. S., Muruf, A. K., Osaguona, P. e Ajayi, J. (2013). Mercury contamination in artisanal gold mining area of Manyera River, Niger State, Nigeria. *E3 Journal of Environmental Research and Management*, 4(9), 326–333. <http://www.e3journals.org>

32. Ikingura, J. R., & Akagi, H. (1999). Methylmercury production in aquatic systems. *Science of the Total Environment*, 234(1–3), 109–118. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00210-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00210-3)
33. Järup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, 68, 167–182. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032>
34. Lacerda, L. D. e Malm, O. (2008). Contaminação por mercúrio em ecossistemas aquáticos: Uma análise das áreas críticas. *Estudos Avançados*, 22(63), 173–190. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000100012>
35. Lacerda, L. D. e Salomons, W. (1998). *Mercury from gold and silver mining: A chemical time bomb*. Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03607-1>
36. Lima, D. (2013). *Avaliação da contaminação por metais pesados na água e nos peixes da Bacia do Rio Cassiporé* [Dissertação de mestrado, Fundação Universidade Federal do Amapá]. Repositório UNIFAP.
37. Lumex. (2013). *PYRO-915+ attachment for Mercury Analyzer RA-915M: Operational manual*. Twinsburg, OH: Lumex, Ohio.
38. Lumex Instruments. (2016). RA-915M Mercury Analyzer: Operation Manual (Versão 3.2). Lumex Instruments. Disponível em: https://www.equipcosservices.com/pdf/manuals/lumex_ra-915m.pdf
39. Lumex. (2018a). *RA-915M Mercury Analyzer: Operational manual*. Pittsburgh, PA: Lumex Instruments.
40. Marques, B. A. M. (2010). *Dinâmica do mercúrio bioacumulado na parte subterrânea de plantas de sapal* [Dissertação de mestrado, Universidade de Aveiro]. Repositório UA.
41. Mason, R. P., Fitzgerald, W. F. e Morel, F. M. M. (1994). The biogeochemical cycling of elemental mercury: Anthropogenic influences. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(15), 3191–3198. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90046-9)
42. Meadows-Oliver, M. (2012). Environmental toxicants: Lead and mercury. *Journal of Pediatric Health Care*, 26(3), 213–215. <https://doi.org/10.1016/j.pedhc.2011.03.008>
43. Micaroni, R. C., Bueno, M. I. e Jardim, W. F. (2000). Compostos de mercúrio: Revisão de métodos de determinação, tratamento e descarte. *Química Nova*, 23(3), 399–405. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422000000300016>
44. Ministério do Meio Ambiente. (2013). *Diagnóstico preliminar sobre mercúrio no Brasil*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente

45. Miranda, R. G., Pereira, S. F. P., Alves, D. T. V. e Oliveira, G. R. F. (2009). Qualidade dos recursos hídricos da Amazónia – Rio Tapajós: avaliação de caso em relação aos elementos químicos e parâmetros físico-químicos. *Ambiente & Água*, 4(2), 75–92. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.88>
46. Morel, F. M. M., Kraepiel, A. M. L. e Amyot, M. (1998). The chemical cycle and bioaccumulation of mercury. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29, 543–566. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.543>
47. Morel, F. M. M., Hering, J. G. e Mason, R. P. (1998). The chemical cycle and bioaccumulation of mercury in the environment. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 157, 1–43. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0625-5_1
48. Nascimento, E. S., & Chasin, A. A. M. (2001). *Ecotoxicologia do mercúrio e seus compostos*. Salvador: Centro de Recursos Ambientais
49. National Research Council. (2000). *Toxicological Effects of Methylmercury*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9899>
50. Nhaca, F. (2012). *Estágio actual da mineração artesanal de pequena escala na Província de Manica [Relatório técnico não publicado]*. Centro de Desenvolvimento Sustentável – Recursos Naturais (CDS-RN)
51. Nunes, B. L. O. (2009). *Quantificação de emissões de mercúrio provenientes de fontes naturais* [Dissertação de mestrado, Universidade de Aveiro]. Repositório UA.
52. Oliveira, H. S., França, S. C. e Rocha, E. J. (2015). Actividade de mineração e avaliação de metais em água superficial, sedimento de fundo e peixes no Rio Tapajós. *Revista Brasileira de Geociências*, 45(3), 123–135. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.201545123135>
53. Oliveira, G. A. (2014). *Avaliação dos níveis atuais de mercúrio total em área contaminada no município de Descoberto – MG* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Humanas, Programa de Pós-graduação em Geografia]. Repositório UFJF
54. Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS/OMS). (2011). *Cooperação técnica entre Brasil, Bolívia e Colômbia: Teoria e prática para o fortalecimento da vigilância em saúde de populações expostas a mercúrio*. Brasília: OPAS/OMS.

55. PAD – Perfil Ambiental Distrital de Chifunde. (2015). *Avaliação ambiental estratégica, plano multissetorial, plano especial de ordenamento territorial do Vale do Zambeze e modelo digital de suporte a decisões*. Ministério da Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural, Moçambique.
56. Pavlogeorgatos, G. e Vasilis, K. (2003). The importance of mercury determination and speciation to the health of the general population. *Global NEST: The International Journal*, 4(2), 107–125. <https://doi.org/10.30955/gnj.000241>
57. Ramírez, A. V. (2008). Intoxicação ocupacional por mercúrio. *Anais da Faculdade de Medicina*, 69(1), 46–51.
58. Resolução nº 38/2013 de 21 de setembro. (2013). Ratifica a Convenção de Minamata sobre o mercúrio, adotada e assinada em 10 de outubro de 2013, Kumamoto, Japão. Diário da República.
59. Rocha, A. F. (2009). *Cádmio, chumbo, mercúrio – A problemática destes metais pesados na saúde pública* [Monografia de licenciatura, Faculdade de Ciências da Nutrição e Alimentação, Universidade do Porto]. Repositório U. Porto.
60. Santos, M. F. (2018). *Emissões atmosféricas de mercúrio – Estudo de caso: Descoberto/MG* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro]. Repositório UFRRJ.
61. Scarpelli, W. (2003). *Introdução à geologia médica*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
62. Sholupov, S., Pogarev, S., Ryzhov, V., Mashyanov, N. e Stroganov, A. (2004). Zeeman atomic absorption spectrometer RA-915+ for direct determination of mercury in air and complex matrix samples. *Fuel Processing Technology*, 85(6–7), 473–485. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.11.003>
63. Singh, S. (2020). Insights into biogeochemical cycle of mercury, contamination sources and its detoxification techniques: A sustainable approach towards biological remediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 2–13. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07322-4>
64. Strode, S., Jaelé, L. e Selin, N. E. (2009). Impact of mercury emissions from historic gold and silver mining: Global modeling. *Atmospheric Environment*, 43(11), 2012–2017. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.12.017>
65. Válega, M. S. G. A. (2009). *Mobilidade, acumulação e transformação do mercúrio em sapais* [Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro]. Repositório UA.

66. Villas Bôas, H. C. (2011). *A indústria extrativa mineral e a transição para o desenvolvimento sustentável*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT/CNPq.
67. Wasserman, J. C., Hacon, S. S. e Wasserman, M. A. (2001). O ciclo do mercúrio no ambiente amazônico. *Mundo e Vida*, 2, 46–53.
68. Watt, S. (2004). *Mercury*. New York, NY: Marshall Cavendish.
69. World Health Organization (WHO). (2008). *Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure*. http://www.cetem.gov.br/publicacao/extracao_de_ouro/capitulo_11.pdf
70. World Health Organization (WHO). (1990). *Environmental health criteria 101: Methylmercury*. Geneva, Switzerland: WHO.

ANEXOS

Anexo A- Formas de armazenamento das amostras

As figuras a seguir mostram o processo de conservação das amostras de água.

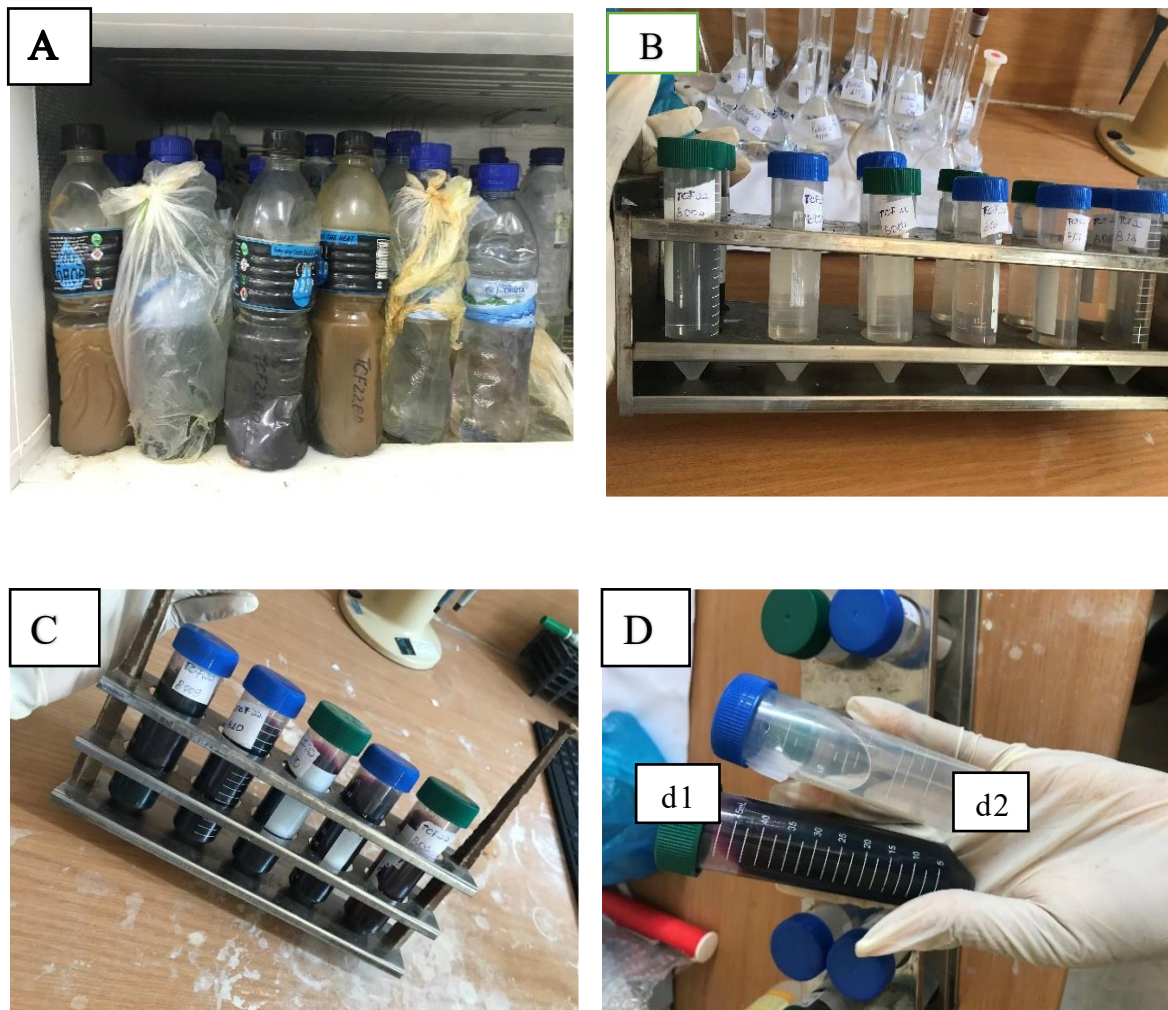


Figura A 1: A- conservação inicial; B- amostras filtradas; C-amostras no processo da digestão; D- d1: amostra no fim da digestão, d2: amostra pronta para análise.

Anexo B- Tabelas de apresentação dos resultados

A tabela 5 a seguir apresenta os resultados experimentais obtidos nas análises da bacia TCF.

Tabela 5: Resultados das análises obtidas nas amostras de água da bacia TCF.

Pontos de amostragem	Concentração de Hg (ng/L)				Desvio padrão
	1ª Leitura	2ª Leitura	3ª Leitura	Média±IC	
1	30,40	27,30	34,10	30,60±6,91	2,78
2	11 334,00	11 340,00	11 336,00	11 336,67±6,19	2,49
3	440,60	444,90	442,90	442,80±4,37	1,76
4	1 010,20	1 006,40	1 004,00	1 006,87±6,33	2,55
5	82,00	83,40	80,90	82,10±1,74	1,02
6	177,10	178,60	176,70	177,47±2,04	0,82
7	159,40	160,10	158,50	159,33±1,61	0,65
8	1 746,90	1 750,00	1751,10	1 749,33±4,42	1,78
9	110,30	111,20	113,10	111,53±2,91	1,17
10	233,50	230,90	232,50	232,30±2,66	1,07
11	83,60	84,50	86,70	84,93±3,23	1,30
12	1 094,00	1 088,00	1 090,00	1 090,67±6,19	2,49
13	182,50	179,10	178,20	179,93±4,60	1,85
14	263,90	264,80	265,90	264,87±2,04	0,82
15	2 991,00	2 989,00	2 996,00	2 992,00±7,30	2,94
16	2 293,00	2 289,00	2 295,00	2 292,33±6,19	2,49
17	102,80	105,80	106,20	104,93±3,78	1,52
18	652,30	653,50	651,60	652,47±1,94	0,78
19	497,90	495,50	499,60	497,67±4,17	1,68
20	1 079,00	1 071,00	1 075,00	1 075,00±8,12	3,27
21	28,20	30,30	31,50	30,00±3,38	1,36
22	906,70	912,10	915,70	911,50±9,19	3,70
23	137,20	135,40	134,90	135,83±2,46	0,99
24	281,40	280,30	279,60	280,43±1,84	0,74
25	31 618,00	31 620,00	31 615,00	31 617,67±5,09	2,05
26	3 748,00	3 749,00	3 745,00	3 747,33±4,22	1,70

A tabela 6 apresenta os resultados experimentais obtidos nas análises da bacia TCL.

Tabela 6: Resultados obtidos nas análises de amostras de água da bacia TCL.

Pontos de amostragem	Concentração de Hg (ng/L)	Desvio padrão
1	108,10±5,54	2,23
2	165,20±3,87	1,56
3	105,70±13,99	5,63
4	450,30±5,22	2,10

A tabela 7 apresenta os resultados experimentais obtidos na determinação do Hg no ar em Chifunde.

Tabela 7: Pontos de amostragem e resultados obtidos na determinação de teores de Hg no ar no distrito de Chifunde.

Ponto de amostragem	Teor de Hg (µg/m³)	Ponto de amostragem	Teor de Hg (µg/m³)	Ponto de amostragem	Teor de Hg (µg/m³)
1	0	23	0	44	0
2	0	24	0	45	0
3	0	25	0	46	0
4	0	26	0	47	0
5	0	27	0	48	4,1
6	0	28	0	49	0,04
7	0	29	0	50	10,07
8	0	30	0	51	1,20
9	0	31	0	52	6,10
10	0	32	0	53	0,38
11	0	33	0	54	6,62
12	0	34	0	55	1,20
13	0	35	0	56	41,9
14	0	36	0	57	4,95
15	0	37	0	58	0
16	0	38	0	59	7,10
17	0	39	0	60	7,13

18	0	40	0	61	15,22
19	0	41	0	62	15,02
20	0	42	0	63	7,11
21	0	43	0	64	12,64
22	0	-	-	65	0

Na tabela 8 encontram-se apresentados os resultados obtidos na determinação de Hg no ar em 2 pontos na localidade de Luia- Kassaquale.

Tabela 8: Resultados obtidos na análise de teores de Hg no ar na localidade de Luia- Kassaquale.

Localidade de Luia – Kassequele	
Ponto de amostragem	Concentrações de Hg (µg/m³)
Parte alta	0,53
Parte baixa	0,30

Anexo C- Coordenadas geográficas e condições barométricas do local de amostragem do ar.

Table 9: Coordenadas geográficas do local de amostragem na análise de teores de Hg no ar no distrito de Chifunde.

Ponto de amostragem	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Ponto de amostragem	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Ponto de amostragem	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	14°09'48.0"	33°13'04.6"	1033	23	14°09'05.6"	33°13'08.8"	1017	44	14°09'02.8"	33°13'53.2"	1008
2	14°09'46.6"	33°13'05.9"	1040	24	14°09'05.4"	33°13'06.6"	1014	45	14°09'04.0"	33°13'54.3"	1008
3	14°09'44.7"	33°13'06.5"	1034	25	14°09'05.5"	33°13'05.00"	1017	46	14°09'05.5"	33°13'54.2"	1007
4	14°09'43.8"	33°13'07.9"	1032	26	14°09'05.4"	33°13'02.1"	1018	47	14°09'07.3"	33°13'55.0"	1006
5	14°09'42.1"	33°13'08.7"	1030	27	14°09'06.7"	33°13'00.00"	1017	48	14°09'09.9"	33°12'55.8"	1006
6	14°09'40.2"	33°13'08.6"	1029	28	14°09'07.7"	33°13'58.3"	1016	49	14°09'10.0"	33°12'55.8"	1012
7	14°09'37.3"	33°13'08.0"	1028	29	14°09'07.9"	33°13'56.2"	1015	50	14°09'10.2"	33°12'56.6"	1014
8	14°09'24.8"	33°12'55.8"	1013	30	14°09'03.0"	33°13'31.4"	1000	51	14°09'11.2"	33°12'55.8"	1026
9	14°09'23.8"	33°12'54.3"	1021	31	14°09'02.8"	33°13'33.3"	999	52	14°09'11.8"	33°12'54.5"	1016
10	14°09'22.0"	33°12'54.0"	1015	32	14°09'03.5"	33°13'35.1"	1001	53	14°09'10.4"	33°12'53.0"	1016
11	14°09'20.1"	33°12'54.4"	1015	33	14°09'02.7"	33°13'37.0"	1000	54	14°09'05.8"	33°12'52.7"	1010
12	14°09'18.1"	33°12'54.8"	1013	34	14°09'02.0"	33°13'38.7"	1000	55	14°09'09.1"	33°12'54.8"	1010

Avaliação dos níveis de poluição por mercúrio na água e no ar nas áreas de mineração artesanal de ouro no distrito de Chifunde província de Tete

13	14°09'16.3"	33°12'54.6"	1014	35	14°09'01.7"	33°13'40.8"	1002	56	14°09'14.6"	33°12'51.4"	1015
14	14°09'14.4"	33°12'54.5"	1006	36	14°09'02.2"	33°13'42.5"	1002	57	14°09'10.4"	33°13'01.1"	1014
15	14°09'12.5"	33°12'53.6"	1012	37	14°09'03.4"	33°13'43.9"	1003	58	14°09'02.9"	33°13'18.5"	1018
16	14°09'10.7"	33°12'54.4"	1012	38	14°09'04.1"	33°13'45.5"	1005	59	14°09'13"	33°12'54.8"	1003
17	14°09'08.5"	33°12'55.5"	1020	39	14°09'05.1"	33°13'47.0"	1003	60	14°09'14.0"	33°12'54.8"	1030
18	14°09'09.4"	33°13'18.4"	1024	40	14°09'06.4"	33°13'48.2"	1006	61	14°09'08.3"	33°12'53.9"	1012
19	14°09'06.2"	33°13'17.0"	1017	41	14°09'06.8"	33°13'49.8"	1005	62	14°09'08.0"	33°12'58.4"	1007
20	14°09'03.7"	33°13'15.9"	1019	42	14°09'05.1"	33°13'50.9"	1005	63	14°09'08.4"	33°12'58.9"	1016
21	14°09'04"	33°13'12.4"	1021	43	14°09'03.6"	33°13'51.5"	1004	64	14°09'48.0"	33°13'04.6"	1033
22	14°09'04.5"	33°13'10.8"	1020	-	-	-	-	65	14°13'02.2"	33°13'01.5"	1018

Tabela 10: Coordenadas geográficas do local de amostragem e resultados obtidos na análise de teores de Hg no ar na localidade de Luia- Kassequele.

Localidade de Luia – Kassequele				
Cooperativa Eduardo Mondlane				
Ponto de amostragem	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Hg (µg/m³)
Parte alta	151410,8	325108,1	415	0,53
Parte baixa	151220	325258,8	366	0,30

Tabela 11: Condições meteorológicas e parâmetros atmosféricos em Chifunde durante a avaliação de mercúrio no ar.

Ponto de amostragem	Pressão (mmHg)	Temperatura (°C)	Humidade (%)	Condições Meteorológicas	Velocidade do Vento (km/h)	Direção do Vento
1	738	25	50	Céu limpo	19.4	Noroeste
2	738	25	50	Parcialmente nublado	19.4	Noroeste
3	738	25	50	Céu limpo	19.4	Noroeste
4	738	25	50	Parcialmente nublado	19.4	Noroeste
5	738	25	50	Céu limpo	19.4	Noroeste
6	738	25	50	Parcialmente nublado	19.4	Noroeste
7	738	25	50	Céu limpo	19.4	Noroeste
8	738	25	50	Parcialmente nublado	19.4	Noroeste
9	738	25	50	Céu limpo	19.4	Noroeste
10	738	25	50	Parcialmente nublado	19.4	Noroeste
11	738	25	50	Céu limpo	19.4	Noroeste
12	739	26	49	Parcialmente nublado	18.0	Noroeste
13	739	26	49	Céu limpo	18.0	Noroeste

Avaliação dos níveis de poluição por mercúrio na água e no ar nas áreas de mineração artesanal de ouro no distrito de Chifunde província de Tete

14	739	26	49	Parcialmente nublado	18.0	Noroeste
15	739	26	49	Céu limpo	18.0	Noroeste
16	739	26	49	Parcialmente nublado	18.0	Noroeste
17	739	26	49	Céu limpo	18.0	Noroeste
18	739	26	49	Parcialmente nublado	18.0	Noroeste
19	739	26	49	Céu limpo	18.0	Noroeste
20	739	26	49	Parcialmente nublado	18.0	Noroeste
21	739	26	49	Céu limpo	18.0	Noroeste
22	739	26	49	Parcialmente nublado	18.0	Noroeste
23	740	27	48	Céu limpo	16.6	Noroeste
24	740	27	48	Parcialmente nublado	16.6	Noroeste
25	740	27	48	Céu limpo	16.6	Noroeste
26	740	27	48	Parcialmente nublado	16.6	Noroeste
27	740	27	48	Céu limpo	16.6	Noroeste

Avaliação dos níveis de poluição por mercúrio na água e no ar nas áreas de mineração artesanal de ouro no distrito de Chifunde província de Tete

28	740	27	48	Parcialmente nublado	16.6	Noroeste
29	740	27	48	Céu limpo	16.6	Noroeste
30	740	27	48	Parcialmente nublado	16.6	Noroeste
31	740	27	48	Céu limpo	16.6	Noroeste
32	740	27	48	Parcialmente nublado	16.6	Noroeste
33	740	27	48	Céu limpo	16.6	Noroeste
34	741	28	47	Parcialmente nublado	15.2	Noroeste
35	741	28	47	Céu limpo	15.2	Noroeste
36	741	28	47	Parcialmente nublado	15.2	Noroeste
37	741	28	47	Céu limpo	15.2	Noroeste
38	741	28	47	Parcialmente nublado	15.2	Noroeste
39	741	28	47	Céu limpo	15.2	Noroeste
40	741	28	47	Parcialmente nublado	15.2	Noroeste
41	741	28	47	Céu limpo	15.2	Noroeste

Avaliação dos níveis de poluição por mercúrio na água e no ar nas áreas de mineração artesanal de ouro no distrito de Chifunde província de Tete

42	741	28	47	Parcialmente nublado	15.2	Noroeste
43	741	28	47	Céu limpo	15.2	Noroeste
44	741	28	47	Parcialmente nublado	15.2	Noroeste
45	742	29	46	Céu limpo	13.8	Noroeste
46	742	29	46	Parcialmente nublado	13.8	Noroeste
47	742	29	46	Céu limpo	13.8	Noroeste
48	742	29	46	Parcialmente nublado	13.8	Noroeste
49	742	29	46	Céu limpo	13.8	Noroeste
50	742	29	46	Parcialmente nublado	13.8	Noroeste
51	742	29	46	Céu limpo	13.8	Noroeste
52	742	29	46	Parcialmente nublado	13.8	Noroeste
53	742	29	46	Céu limpo	13.8	Noroeste
54	742	29	46	Parcialmente nublado	13.8	Noroeste
55	742	29	46	Céu limpo	13.8	Noroeste

Avaliação dos níveis de poluição por mercúrio na água e no ar nas áreas de mineração artesanal de ouro no distrito de Chifunde província de Tete

56	743	30	45	Parcialmente nublado	12.4	Noroeste
57	743	30	45	Céu limpo	12.4	Noroeste
58	743	30	45	Parcialmente nublado	12.4	Noroeste
59	743	30	45	Céu limpo	12.4	Noroeste
60	743	30	45	Parcialmente nublado	12.4	Noroeste
61	743	30	45	Céu limpo	12.4	Noroeste
62	743	30	45	Parcialmente nublado	12.4	Noroeste
63	743	30	45	Céu limpo	12.4	Noroeste
64	743	30	45	Parcialmente nublado	12.4	Noroeste
65	743	30	45	Céu limpo	12.4	Noroeste

Tabela 12: Condições meteorológicas e parâmetros atmosféricos em Luia durante a avaliação de mercúrio no ar.

Ponto de Amostragem	Pressão (mmHg)	Temperatura (°C)	Humidade (%)	Condições Meteorológicas	Velocidade do Vento (km/h)	Direção do Vento
Parte alta	748	36	35	Céu limpo	10.0	Noroeste
Parte baixa	750	37	33	Céu limpo	8.7	Noroeste

Anexo D- Preparação de Soluções

I. Procedimentos de preparação dos padrões

a) Solução stock de mercúrio 10 µg/L

Adicionou-se cerca de 30 mL água destilada para um balão de 50 mL, e de seguida 5 mL da solução da solução stock de mercúrio C(Hg) 100 µg/L. Por fim completou-se o volume do balão com a água destilada.

b) Solução stock de mercúrio 1000 ng/L

Adicionou-se cerca de 30 mL água destilada para um balão de 100 mL, e de seguida 1 mL da solução da solução stock de mercúrio C(Hg) 100 µg/L. Por fim completou-se o volume do balão com água destilada.

c) Solução stock de mercúrio 500 ng/L

Adicionou-se cerca de 30 mL de água destilada para um balão de 100 mL, e de seguida 5 mL da solução da solução stock de mercúrio C(Hg) 10 µg/L. Por fim completou-se o volume do balão com água destilada.

d) Solução stock de mercúrio 100 ng/L

Adicionou-se cerca de 30 mL de água destilada para um balão de 100 mL, e de seguida 1 mL da solução da solução stock de mercúrio C(Hg) 10 µg/L. Por fim completou-se o volume do balão com a água destilada.

e) Solução stock de mercúrio 10 ng/L

Adicionou-se cerca de 30 mL de água destilada para um balão de 100 mL, e de seguida 1 mL da solução da solução stock de mercúrio C(Hg) 1000 ng/L. Por fim completou-se o volume do balão com a água destilada.

II. Preparação da solução de cloridrato de hidroxilamina (NH₂OH.HCl)

Pesou-se cerca de 2.5 g de NH₂OH. HCl e colocou-se em um balão de 25 mL, dissolveu-se em 10 – 15 mL de água destilada de seguida levou-se a solução até à marca, isto é, perfazer com água destilada. Esta solução deve ser usada somente quando é recém-preparada.

III. Solução de hidróxido de sódio (NaOH, 30 %)

Colocou-se 70 mL de água destilada em um béquer de vidro resistente ao calor e cuidadosamente com agitação, colocou-se cerca de 30 g de hidróxido de sódio. Após a dissolução e resfriamento transferiu-se a solução para um balão de polietileno de 100 mL e perfez-se com água até o menisco do balão.

IV. Preparação da solução de dicloreto de estanho dihidratado ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 100 g/L)

Colocou-se 50 mL de água destilada em um erlenmeyer de 250 mL, e cuidadosamente adicionou-se 15 mL de ácido sulfúrico, por fim adicionou-se 10 g de cloreto de estanho (II) agitou-se até a dissolução completa do cloreto de estanho onde ocorreu uma reacção exotérmica. Após a dissolução e resfriamento transferiu-se a solução para um balão de polietileno de 100 mL e perfez-se com água até o menisco do balão.

V. Solução de permanganato de potássio (KMnO_4 , 50 g/L)

Colocou-se cerca de 5 g de permanganato de potássio num balão volumétrico de 100 mL e dissolveu-se em 20 – 30 mL de água destilada. De seguida perfez-se até ao menisco do balão.

VI. Solução de peroxodissulfato de potássio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$, 50 g/L)

Colocou-se cerca de 1.25 g de peroxodissulfato de potássio em um balão de 25 mL e dissolveu-se em 10 – 15 mL de água destilada, em seguida perfez-se com água destilada. Usa-se apenas a solução recém-preparada.

Anexo E- Formulário

Aqui são apresentadas as fórmulas usadas para o cálculo das médias experimentais das análises brutas e da concentração de Hg na amostra, desvio padrão, desvio padrão relativo e intervalo de confiança.

Fórmula F1: Cálculo da média experimental das análises ($\bar{X}$)

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Fórmula F2: Cálculo do desvio padrão (s)

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n}}$$

Fórmula F3: Cálculo do desvio padrão relativo (%RSD)

$$\%RSD = 100 \frac{s}{\bar{X}}$$

Fórmula F4: Cálculo de intervalo de confiança (IC)

$$IC = \bar{X} \pm \frac{t \times s}{\sqrt{N}}$$

Onde:

Vf- volume final;

Vi- volume inicial;

xi- elementos do conjunto;

n- número total de amostras;

tcrit - student tabelado (4,30);

N - número de réplicas (3);

X – concentração de Hg na amostra.