

L. D. Lacerda

Dept. Geoquímica - Universidade Federal Fluminense - 24020-007 - Niterói - RJ

Recebido em 28/5/96; aceito em 3/6/96

MERCURY CONTAMINATION IN BRAZIL: INDUSTRIAL SOURCES vs GOLD MINING. This paper reviews the history of Hg contamination in Brazil by characterizing and quantifying two major sources of Hg emissions to the environment: industrial sources and gold mining. Industry was responsible for nearly 100% of total Hg emissions from the late 1940's to the early 1970's, when efficient control policies were enforced, leading to a decrease in emissions. Gold mining, on the other hand was nearly insignificant as a Hg source up to the late 1970's, but presently is responsible for over 80% of total emissions. Presently, over 115 tons of Hg are released into the atmosphere in Brazil annually. Nearly 78 tons come from gold mining operations, 12 tons come from chlor-alkali industry and 25 tons come from all other industrial uses. Inputs to soils and waters however, are still unknown, due to lack of detailed data base. However, emissions from diffuse sources rather than well studied classical industrial sources are probably responsible for the major inputs of mercury to these compartments.

Keywords: mercury; atmospheric emissions; industrial sources; gold mining; Brazil.

INTRODUÇÃO

A origem e características das principais fontes antropogênicas de mercúrio no Brasil, mudaram drasticamente nas últimas três décadas. As fontes industriais eram responsáveis pela totalidade das emissões antropogênicas de mercúrio no país até 1970. A partir desta data, três aspectos principais modificaram radicalmente esta situação: 1. o controle eficiente das emissões industriais conhecidas e a substituição de tecnologias "sujas"; 2. a explosão do garimpo de ouro na Amazônia, 3. o crescimento acelerado dos grandes centros urbanos.

Atualmente, a principal carga de mercúrio para o meio ambiente é oriunda dos garimpos de ouro. As fontes industriais de mercúrio representam menos que 30% da emissão total, enquanto a emissão de fontes difusas, particularmente disposição de resíduos sólidos, vem crescendo em importância em diversas áreas urbanas, tornando-se a principal fonte de mercúrio nestas regiões. As alterações nas principais fontes de mercúrio para o país criam um problema ambiental de difícil monitoramento e de consequências imprevisíveis, para os quais as agências de controle ambiental não se encontram de modo geral, preparadas.

USOS E FONTES DE MERCÚRIO NO BRASIL

A contaminação por mercúrio no Brasil mostra duas diferentes fontes deslocadas temporalmente e geograficamente no país. A primeira, era originada na indústria de cloro-soda, responsável pela principal importação de mercúrio para o país e pelas principais emissões para o meio ambiente até a década de 80. Essa emissões localizavam-se particularmente na região sul-sudeste. A partir da década de 80, o garimpo de ouro, localizado principalmente na Amazônia, tornou-se o principal comprador de mercúrio no Brasil, sendo responsável pela maior emissão deste poluente para o meio ambiente¹.

O Brasil não produz mercúrio, importando a totalidade de seu consumo. As importações de mercúrio foram relativamente

constantes de 1972 a 1984 em torno de 160 toneladas anuais, quando ocorreu um aumento de cerca de 150%, atingindo 340 toneladas em 1989. Até 1984, o México era o principal fornecedor de mercúrio para o Brasil, suprimindo 85% das necessidades do país. O restante era comprado no Canadá, USA e alguns países europeus. A partir de 1985 entretanto, a maior parte do mercúrio tem sido comprado em países europeus, em particular UK, Holanda e Alemanha, países que paradoxalmente também não mineram mercúrio².

A tabela 1 mostra o consumo de mercúrio no Brasil em três períodos distintos. Inicialmente, até 1980 praticamente, a principal fonte de mercúrio para o país, era a produção de cloro e soda, responsável por mais da metade do consumo total. Neste período, o consumo industrial representava mais de 80% do total comprado pelo país.

A partir de 1980 o consumo industrial de mercúrio vem caindo substancialmente. Este fenômeno é resultado direto de uma legislação de controle mais eficiente, que resultou no banimento do uso de mercúrio em certos setores (e.g. como defensivo agrícola), na substituição de tecnologias (e.g. células de mercúrio na indústria de cloro-soda), e no controle mais eficiente de efluentes industriais. Por exemplo, os fatores de emissão de mercúrio da indústria de cloro-soda era de 125 gHg.t⁻¹Cl em 1972 decrescendo para menos que 10gHg.t⁻¹Cl em 1990. Por outro lado, enquanto em 1976, mais de 90% da produção brasileira de cloro usava células de mercúrio, em 1992 somente 36% da produção utilizava esta tecnologia³.

O desenvolvimento e diversificação do parque industrial brasileiro resultou numa maior diversificação de usos do mercúrio no país. Entre esses usos, destacam-se a indústria eletro-eletrônica, (lâmpadas fluorescentes, baterias), a indústria de tintas e outras indústrias químicas. O mercúrio nessas indústrias, ao contrário da indústria de cloro-soda, é liberado do processo industrial junto ao produto final, de forma que seu destino final será provavelmente aterros sanitários ou depósitos de resíduos sólidos. Estes usos respondem por 20 a 30% do total de mercúrio importado pelo país. Por outro lado, a importação de mercúrio para re-venda comercial ou para usos não especificados aumentou de 24 toneladas em 1979 para 78 toneladas em 1989, um crescimento de 3,3 vezes⁴.

O controle das fontes industriais clássicas de mercúrio,

* Conferência proferida na 19ª Reunião Anual da SBQ, maio 1996, Poços de Caldas, MG. E-mail: GEODRD@UFF.BR

Tabela 1. Evolução do consumo de mercúrio no Brasil entre 1979 e 1989 (fonte: Ferreira & Appel, 1991). Dados em % do total consumido por ano.

Ano (toneladas)	Cloro-soda	Tintas	Odonto-farmacêutica	elétrico-eletrônico	Revenda	Usos não especificados
1979 (158)	52,0	13,8	11,2	-	15,2	8,8
1985 (186)	10,1	24,5	11,1	1,8	29,6	22,9
1989 (337)	4,9	10,1	4,1	2,7	48,2	30,1

resultou em um decréscimo significativo da contaminação por esse metal em áreas industrializadas no sul-sudeste do país. Por exemplo, a concentração de mercúrio em peixes de rios e reservatórios da região metropolitana de São Paulo diminuíram drasticamente entre 1979 e 1990. Enquanto em 1979, 100% das amostras de peixes carnívoros do Rio Tietê apresentavam concentração maiores que $0,5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, apenas 36% apresentavam esses teores em 1986. Peixes carnívoros do Rio Pardo apresentavam até 49% das amostras com teores acima de $0,5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ em 1979. Em 1986, nenhuma amostra de peixe deste rio apresentou esse teor^{5,6,7,8}.

Perfis de sedimentos coletados no estuário do rio Paraíba do Sul, em cuja bacia de drenagem era utilizado largamente o mercúrio com defensivo agrícola até 1980, mostram uma diminuição de até 100% nas camadas mais recentes em relação às camadas mais antigas do perfil⁹.

Estes resultados demonstram que o controle das fontes pontuais, industriais de mercúrio no Brasil tem sido bastante eficiente. A implantação de legislação mais restritiva na década de 1990, e o desenvolvimento de tecnologias mais "limpas", deverão resultar em uma maior redução dos níveis de mercúrio originado nessas fontes.

Fontes difusas e geralmente não usuais de mercúrio entretanto, têm substituído em importância as fontes industriais clássicas. Por exemplo, na bacia da Baía de Sepetiba, Rio de Janeiro, a maior parte do mercúrio emitido para o meio ambiente, resulta de aterros sanitários, geração de energia e produção de aço utilizando sucata como matéria prima. Estas fontes resultam em taxas de deposição atmosférica de mercúrio na região variando entre 40 e $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$, cerca de 2 a 5 vezes maior que a deposição atmosférica esperada em áreas não contaminadas¹⁰. Demais fontes difusas, como despejo de esgoto sanitário, águas servidas urbanas, queima de combustíveis e biomassa, contribuem com cerca de 500 kg anuais de mercúrio para a Baía de Sepetiba. Este quadro repete-se provavelmente, nas principais regiões densamente urbanizadas do país.

Essas fontes, ao contrário das indústrias emissoras típicas de mercúrio, são de difícil monitoramento e controle. De um modo geral, tanto as legislações específicas quanto as autoridades ambientais no país não encontram-se preparadas para este fenômeno.

USO DE MERCÚRIO NOS GARIMPOS DE OURO NO BRASIL

O ouro foi descoberto pela primeira vez no Brasil em 1552, mas sua exploração comercial iniciou somente por volta de 1700, com a descoberta de ricos filões na região central do país. Por volta de 1800 o Brasil havia produzido cerca de 830 toneladas, correspondentes a cerca de 60% da produção global deste metal. Após a exaustão das reservas mineradas neste primeiro ciclo, o mercúrio foi introduzido na extração de ouro de minérios de baixo teor. Entretanto, a produção não era mais significativa, sendo tipicamente menor que $5 \text{ t}\cdot\text{ano}^{-1}$ até 1960, com menos da metade desta produção originada em garimpos^{11,12}. As emissões de mercúrio no Brasil nos últimos 200 anos portanto não devem ter atingido 500 toneladas. O aumento expressivo do preço internacional do ouro de cerca de

U.S.\$ 60/oz.tr em 1972 para U.S. \$450/oz.tr em 1987, entretanto, deflagou uma segunda corrida do ouro não só no Brasil, mas em outros países da América Latina, África e Ásia. No Brasil, a amalgamação com mercúrio era responsável pela produção de apenas 5.9 toneladas de ouro em 1973, enquanto que em 1988 a produção de ouro por amalgamação foi de mais de 100 toneladas.

O primeiro ciclo do ouro ocorreu principalmente na região central e sudeste do país, empregando principalmente mão de obra escrava. Atualmente, grande parte do ouro produzido no país provem de garimpos espalhados principalmente na região amazônica, operados por garimpeiros pouco organizados em cerca de 2.000 áreas de garimpo. Estima-se as reservas totais de ouro na região de pelo menos 25.000 toneladas, equivalente a cerca de U.S.\$ 300 bilhões^{12,13}.

A importância socio-econômica dos garimpos de ouro na Amazônia fica clara quando comparada com outras atividades da região. Por exemplo em 1988, foram produzidas 216 toneladas de ouro pelo garimpo, equivalentes a US \$ 3,000 milhões, representando 18% do produto interno bruto da região, ou três vezes o valor da produção anual de ferro de Carajás¹⁴. Por outro lado, das 337 toneladas de mercúrio importadas em 1989, 62% (210 t) não foram recuperadas, assume-se portanto que esta quantidade foi perdida para o meio ambiente. Desta perda, os garimpos de ouro contribuíram com cerca de 80% (168 t), enquanto que a indústria de cloro-soda contribuiu com apenas 8% (17 t), e as outras demais fontes industriais com menos de 5% (10 t)⁴. Estes números apontam a mineração de ouro como a principal fonte atual de mercúrio para o meio ambiente no Brasil.

EMISSÕES DE MERCÚRIO PARA O MEIO AMBIENTE NO BRASIL

A liberação de mercúrio pelos garimpos de ouro é muito significativa, uma vez que este processo de mineração é muito pouco eficiente^{15,16}.

O mercúrio é utilizado na separação de partículas finas de ouro através da amalgamação e posterior separação gravimétrica. O amalgama separado é queimado, geralmente a céu aberto, liberando grandes quantidades de mercúrio para a atmosfera. Durante o processo, quantidades variáveis de mercúrio são perdidas na forma metálica para rios e solos, e rejeitos contaminados são deixados a céu aberto na maioria dos sítios de garimpo. O ouro produzido desta forma ainda contém de 2 a 7% em peso de mercúrio como impureza, este é sublimado a altas temperaturas durante a purificação do ouro, resultando em séria contaminação dos ambientes de trabalho e da atmosfera urbana onde esta operação é feita¹⁷.

Os fatores de emissão do garimpo, *i.e.* a quantidade de mercúrio liberada para o meio ambiente para a produção de 1.0 kg de ouro, são variáveis e dependem das condições de operação e das concentrações de ouro no minério. Os primeiros fatores de emissão relatados para os garimpos de ouro na Amazônia, variavam de 2.0 a 4.0 kg Hg por 1.0 kg Au produzido¹⁸. Estudos mais recentes relataram valores inferiores, porém sempre variando entre 1 e 2, apresentando uma média de $1,3^{19,20}$. Todos os estudos realizados entretanto, concordam que

a emissão para a atmosfera é bem mais importante que a emissão para solos e rios, variando geralmente de 65% a 83% da emissão total. Estes fatores de emissão são os mais elevados entre os diferentes processos industriais que resultam na emissão de mercúrio para o meio ambiente²¹.

Embora uma estimativa precisa da quantidade de mercúrio lançada no meio ambiente pelo garimpo de ouro seja de difícil cálculo, a maior parte dos autores considera que a produção anual de ouro por garimpos variou de 80 a 200 toneladas anuais no final da última década, resultando numa emissão total de mercúrio da ordem de 100 a 260 toneladas de mercúrio para o meio ambiente^{2,4,12,14}.

Mesmo levando em consideração as incertezas dessas estimativas, a liberação total de mercúrio para o meio ambiente no Brasil deve ter sido de (c.a. 180 t anuais), pelo menos entre 1985 e 1991, quando esta atividade atingiu seu máximo. Esta estimativa é por exemplo, da mesma ordem de grandeza que a emissão industrial total para o Mar do Norte, e de quase a metade do valor aceito para a emissão total de mercúrio nos Estados Unidos²². Em relação somente a entrada atmosférica, de cerca de 140 toneladas anuais, é muito maior que a totalidade das emissões atmosféricas de mercúrio de origem industrial no Reino Unido por exemplo, e somente uma ordem de grandeza menor que a emissão atmosférica global de mercúrio para a atmosfera^{23,24,26}.

A tabela 2 compara as emissões de mercúrio para a atmosfera oriundas de fontes industriais e do garimpo de ouro. Não é possível no momento fazer-se uma estimativa da perda para solos e sistemas hídricos devido a pouca confiabilidade dos fatores de emissão para estes compartimentos e a pouca disponibilidade de dados sobre as fontes^{1,2,27}. A principal emissão atmosférica provém dos garimpos de ouro (c.a. 78 t.ano⁻¹), seguido das emissões da indústria de cloro-soda e da produção de ferro e aço (12 t.ano⁻¹ cada), das queimadas de florestas (7,5 t.ano⁻¹), e dos processos pirometalúrgicos (c.a. 4 t.ano⁻¹). As emissões atmosféricas de mercúrio dos garimpos de ouro na Amazônia resultam numa taxa de emissão por área da ordem de 27 gHg.km⁻², semelhante a taxa de emissão de todas as fontes industriais dos Estados Unidos, por exemplo.

Embora as estimativas mostradas na tabela 2 sejam restritas

à atmosfera, elas demonstram que mais de 80% da emissão total de mercúrio no Brasil provem dos garimpos de ouro. Esta emissão é cerca de 8 vezes maior que as emissões da indústria de cloro-soda, a segunda principal fonte de mercúrio para o meio ambiente no Brasil.

O efeito da liberação de grandes quantidades de mercúrio na região amazônica oriundos da atividade garimpeira é desconhecido. O comportamento e a toxidez deste mercúrio será dependente não só das quantidades emitidas mais principalmente das complexas reações biogeoquímicas que poderão aumentar ou diminuir a biodisponibilidade deste mercúrio. A grande utilização de recursos pesqueiros pela população local, poderá levar a impactos significativos sobre a saúde humana, ao contrário do verificado em regiões industriais onde a dependência desses recursos naturais é bem menor. Por outro lado nessas regiões o aumento relativos das fontes difusas tornam seu monitoramento muito difícil e impossível seu controle. Portanto, longe de ser um problema do passado de tecnologia "suja", contaminação de mercúrio no Brasil poderá vir a ser uma epidemia silenciosa do século 21.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo PADCT/FINEP (nº 66.440943.00), e bolsa de pesquisador IA ao autor do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Agradeço à Rozane V. Marins pela leitura crítica e sugestões ao manuscrito.

REFERÊNCIAS

1. Lacerda, L. D.; *Water, Air & Soil Pollution.*, **1996**, no prelo.
2. Lacerda, L. D.; Salomons, W.; *Mercury in the Amazon: a Chemical Time Bomb?* Duth Ministry of Housing, Physical Planning and the Environment, Haren, 1991.
3. Bezerra, J. F. M.; In: *Riscos e Consequências do Uso do Mercúrio*. Hacon, S.; Lacerda, L. D.; Carvalho, D.; Pfeiffer, W. C.; editores, FINEP/UFRJ, Rio de Janeiro, 1990.

Tabela 2. Comparação entre as emissões antropogênicas de mercúrio para a atmosfera no Brasil, baseado em Lacerda (1996)¹ levando em consideração a situação em 1990.

Setor	Parâmetros de produção/consumo	Parâmetros de emissão para a atmosfera	Emissão (t.ano ⁻¹)	% do total
Produção de cloro	25.7 tHg.yr ⁻¹	45%	11.65	10.1
Produção de soda	125 gHg.t ⁻¹ KOH	45%	0.37	0.3
Tintas & pigmentos	34.3 tHg.yr ⁻¹	1%	0.34	0.3
Eletro-eletrônico	9.1 tHg.yr ⁻¹	0.2%	0.02	<0.1
Combustão de carvão	27.2 x 10 ⁹ MJ.yr ⁻¹	0.13 µgHg.MJ ⁻¹	0.01	<0.1
Combustão de óleo	28.3 x 10 ⁹ MJ.yr ⁻¹	0.33 µgHg.MJ ⁻¹	0.01	<0.1
Combustão de biomassa	4.8 x 10 ⁶ MJ.yr ⁻¹	0.03 g.t ⁻¹	0.12	0.1
Pirometalurgia Pb	62.023 t.yr ⁻¹	2- 4 gHg.tPb ⁻¹	0.19	
Zn	163.000 t.yr ⁻¹	8-45 gHg.tZn ⁻¹	4.30	3.9
Cd	197 t.yr ⁻¹	8-45 gHg.tCd ⁻¹	0.05	
Produção de aço e ferro	15 x 10 ⁷ t.yr ⁻¹	0.08gHg.t ⁻¹	12	10.4
Queimadas	11.100 km ² .yr ⁻¹	7.8 gHg.ha ⁻¹	8.7	7.5
Garimpos de ouro	87 tAu.yr ⁻¹	0.92 tHg.tAu ⁻¹	77.9	67.3
Total	-	-	115.7	100

4. Ferreira, R. C. H.; Appel, L. E.; In: *Ann. I Inter. Symp. on Environmental Studies on Tropical Rain Forests*, Manaus, 1991.
5. CETESB; *Avaliação da Contaminação Atual dos Rios Moji-guaçú e Pardo e seus Reflexos sobre Comunidades Biológicas*. Comp. Est. Tecnol. San. Bas., São Paulo, 1980.
6. CETESB; *Avaliação do Quadro de Contaminação por Mercúrio nos Rios Pardo e Moji-guaçú (SP)*. Comp. Est. Tecnol. San. Bas., São Paulo, 1989.
7. Boldrini, C. V.; Padua, H. B.; Pereira, D. N.; Rezende, E. K.; Juras, A. A.; *Rev. DAE*. **1983**, 135, 106.
8. Eysink, G. G. J.; In: *Riscos e Consequências do Uso do Mercúrio*. Hacon, S.; Lacerda, L. D., Pfeiffer, W. C.; Carvalho, D. editores. FINEP/UFRJ, Rio De Janeiro, 1990.
9. Lacerda, L. D.; Carvalho, C. E. V.; Rezende, C. E.; Pfeiffer, W. C.; *Mar. Pollut. Bull.* **1993**, 26, 220.
10. Marins, R. V.; Silva Filho, E. V.; Lacerda, L. D.; *J. Bras. Chem. Soc.* **1996**, no prelo.
11. Simonsen, R. C.; *Historia Econômica do Brasil*. Companhia Editora Nacional, São Paulo, 1962.
12. Hannai, M.; In: *Impactos Ambientais da Mineração e Metalurgia*. CETEM/CNPq, Rio de Janeiro, 1993.
13. Clearly, D.; *Anatomy of the Amazon Gold Rush*. Mcmillan Press, London, 1990.
14. Fernandes, F. R. C.; Portella, I. C. M. H. M.; *Recursos Minerais da Amazônia: Alguns Dados sobre Situação e Perspectivas. Estudos e Documentos* n° 14. CETEM/CNPq, Rio de Janeiro., 1991.
15. Malm, O.; Pfeiffer, W. C.; Souza, C. M. M.; Reuther, R.; *Ambio*. **1990**, 19, 11.
16. Nriagu, J. O.; *Nature* **1993**, 363, 589.
17. Marins, R. V.; Tonietto, G.; In: *Anais V Congr. Bras. Geoquímica*, Niteroi 1995.
18. Mallas, J.; Benedicto, N.; Mercury and gold mining in the Brazillian Amazon. *Ambio*. **1986**, 15, 248.
19. Pfeiffer, W. C.; Lacerda, L. D.; *Environm. Technol. Lett.* **1988**, 9, 325.
20. Farid, L. H.; Machado, J. E. B.; Silva, A. O.; In: *Proc. Intern. Symp. Environm. Studies on Tropical Rain Forests*. Biosfera Ed., Rio de Janeiro, 1991.
21. Nriagu, J. O.; Pacyna, J. M.; *Nature* **1988**, 337, 134.
23. Pacyna, J. M.; In: *Toxic Metals in the Atmosphere*. Nriagu, J. O.; Davidson, C.I. editores. Wiley, New York, 1984.
24. Nriagu, J. O.; *Environment* **1990**, 32, 7.
25. Salomons, W.; Förstner, U.; *Metals in the Hydrocycle*, Springer-Verlag, Berlin, 1984.
26. SCOPE; *Rapporteur's Report: Mercury*, Sci. Comm. Problems Environm. Toronto, 1985.
27. Lacerda, L. D.; *Nature* **1995**, 374, 20.