

O Ciclo do Mercúrio no Ambiente Amazônico

Julio Cesar Wasserman¹, Sandra S. Hacon², Maria Angélica Wasserman³

¹Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental/Departamento de Geoquímica - UFF, Outeiro de São João Batista s/nº, Centro, Niterói, RJ, 24020-007, Brasil. e-mail: geowass@vm.uff.br; ² Escola Nacional de Saúde Pública - Departamento de Endemias - Fundação Instituto Oswaldo Cruz; ³ Instituto de Radioproteção e Dosimetria - CNEN

Resumo - Embora a contaminação do ambiente amazônico por mercúrio tenha sido por muito tempo atribuída ao garimpo de ouro, atualmente existem indícios de que a presença de mercúrio na Amazônia seja um fenômeno natural. Neste artigo são apresentados argumentos favoráveis e contrários à origem antrópica do mercúrio no ambiente amazônico, e como o estudo da ciclagem do mercúrio pode eventualmente esclarecer este dilema. É abordada ainda a questão da metilação do mercúrio e como esta forma mais tóxica do metal líquido pode atingir o homem e causar danos irreparáveis

Palavras-chaves - mercúrio, Amazônia, floresta tropical, ciclagem, contaminação, mineração de Ouro

Mercury Cycling in the Amazonian Environment

Abstract - Although mercury contamination in the Amazonian environment has been attributed to gold mining, presently there is a number of evidences that suggest that these concentrations are of natural origin. In the present article we discuss whether mercury is of natural or antropic origin in the Amazonian environment and we show how the design of the geochemical paths may help to understand this question. The important problem of environmental methylation of mercury is also discussed under the perspective of what has been recently done in the Amazonian environment and how methyl-mercury can reach the Amazonian populations.

Key-words - mercury, Amazonian, tropical forest, cycling, contamination, gold mining

Le Cycle du Mercure dans l'Environnement Amazonien

Résumé - Le mercure a depuis toujours été considéré comme un polluant d'origine antropique dans le milieu amazonien, toutefois, de récents travaux indiquent que son origine pourrait également être naturelle. Cet article présente une discussion des points favorables et contraires à l'origine naturelle du mercure dans l'environnement amazonien et de quelle manière la construction d'un modèle qui détermine le parcours du mercure, peut aider à la compréhension de ses origines. L'important problème de la méthylation du mercure dans l'environnement amazonien est également discuté sous l'optique de très récentes recherches menées en milieu amazonien.

Mots-clés - mercure, Amazonie, forêt tropicale, cyclage, contamination, orpaillage

1. INTRODUÇÃO

Desde o final dos anos 80, a questão do comportamento do mercúrio no ambiente amazônico e de sua toxicidade vêm sendo discutidos por pesquisadores brasileiros e estrangeiros na tentativa de se determinar o verdadeiro risco que este elemento apresenta para o meio ambiente. Embora muitos avanços tenham sido obtidos neste intenso esforço de uma década, a ausência de um grande programa de mapeamento e monitoramento da contaminação por mercúrio em todo território amazônico dificulta a precisa determinação dos caminhos que este metal percorre antes de constituir um perigo ao homem. No

presente estudo revisamos os conhecimentos geoquímicos e ambientais do mercúrio afim de estabelecer um desenho do seu ciclo no ambiente amazônico.

2. O MERCÚRIO E A SAÚDE DO HOMEM

Os grandes acidentes de contaminação por mercúrio ocorridos nas décadas de 50 e 60 em Minamata (Japão; Fujiki, 1972; Ross, 1996) e no Iraque (Bakir *et al.*, 1973), onde milhares de pessoas morreram de um mal que ficou posteriormente conhecido como doença de Minamata, gerou grande interesse dos cientistas que tentavam entender como o

mercúrio atingiu o homem de maneira tão severa. Era um metal que aparecia em altíssimas concentrações em algumas localidades como Almadén na Espanha, de onde vinha sendo retirado das rochas nos últimos 2000 anos, sem que tivesse ocorrido casos de doença ou mortalidade (Hildebrand *et al.*, 1980).

Os estudos que sucederam indicaram que o grande responsável pelas mortes não era o mercúrio em suas formas inorgânicas (Hg(0), Hg(I) ou Hg(II)), mas um composto orgânico, o metil-mercúrio aparentemente resultante de transformação causada por bactérias presentes no ambiente (Jensen e Jernelov, 1969). O princípio ecológico do processo é relativamente simples: a presença de mercúrio livre no ambiente é prejudicial às bactérias, que tentam eliminá-lo transformando-o em metil-mercúrio que por ser lipossolúvel é mais facilmente eliminado. O metil-mercúrio é tóxico para o homem em concentrações da ordem de $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (limite máximo para consumo em peixes; WHO, 1990).

Os estudos avançaram e ficou estabelecido que no processo de contaminação das populações humanas a presença de mercúrio inorgânico no meio ambiente é um aspecto secundário, sendo necessário ocorrer a metilação. Em Almadén (Espanha) onde as concentrações podem atingir 1.000 mg.kg^{-1} (Rodríguez-Martín-Doimeadios *et al.*, 2000), valor 2.000 vezes superior às concentrações consideradas tóxicas para o homem, as características ambientais não são favoráveis à transformação do mercúrio inorgânico em metil-mercúrio e o elemento não atinge o homem. Por outro lado, a contaminação por mercúrio tem sido estudada nos últimos dez anos nas Ilhas Seychelles (Oceano Índico), onde observa-se que apesar da ausência de qualquer tipo de contaminação ambiental, a população apresenta elevadas concentrações de mercúrio no sangue, cabelo e urina (Marsh *et al.*, 1995; Murata *et al.*, 1999; Grandjean *et al.*, 2000). Ficou estabelecido que as elevadas concentrações de mercúrio na população estavam associadas à sua alimentação, baseada exclusivamente em grandes peixes carnívoros marinhos (do topo da cadeia trófica marinha), como o atum. Embora ainda não tenham sido detectados sintomas de contaminação por metil-mercúrio naquela população, os cientistas têm acompanhado de perto o desenvolvimento intelectual e neurológico de recém nascidos para tentar identificar sintomas precoces da doença (Crump *et al.*, 2000).

Na Amazônia a preocupação com o mercúrio surgiu em meados dos anos 80, à medida que o garimpo, iniciado em 1979, promoveu o lançamento de importantes quantidades do metal no ambiente (Cleary, 1994). A utilização de mercúrio para exploração do ouro é conhecida como processo de

pátio, onde as partículas mais pesadas do sedimento (normalmente aluviões de pequenos rios) são separadas com a batéia (espécie de bacia cônica) e é então acrescido o mercúrio, que se fixa às partículas de ouro formando um aglomerado (amálgama) que é facilmente separado. O amálgama é então queimado com maçaricos em painéis ou frigideiras e o mercúrio se volatiliza, ficando apenas as partículas de ouro (Nriagu *et al.*, 1992). As populações mais afetadas seriam os próprios garimpeiros e os trabalhadores em lojas de compra de ouro (Hacon, 1995), que estariam severamente expostos durante o processo de queima do amálgama ouro-mercúrio através da aspiração de vapores de mercúrio (mercurialismo). Indiretamente, as populações que vivem exclusivamente da pesca parecem estar sendo afetadas através de sua alimentação, constituída de elevadas doses de metil-mercúrio (Hacon *et al.*, 1997). Embora até a presente data não tenham sido identificados e comprovados casos da doença de Minamata na Amazônia, alguns sintomas da doença vêm sendo observados (Lebel *et al.*, 1998). A grande dificuldade na identificação dos sintomas da contaminação por metil-mercúrio reside na presença de outras moléstias comuns nas populações expostas ao composto organo-metálico como a malária ou o alcoolismo, que apresentam sintomas similares.

3. EMISSÕES DE MERCÚRIO NO AMBIENTE AMAZÔNICO

A queda no preço do ouro e o esgotamento das jazidas têm causado uma diminuição considerável da atividade garimpeira na Amazônia, que passou de 100 toneladas por ano nos anos 80 para pouco menos de 30 toneladas por ano já no final dos anos 90 (veja Tabela 1). Apesar da queda na produção de ouro também representar uma queda nas taxas de emissão atmosférica e ambiental de mercúrio, o passivo ambiental deixado pelos mais de 10 anos de atividade garimpeira é enorme. Estima-se que nesta última corrida do ouro (anos 80 e início dos 90) a quantidade de mercúrio lançada no ambiente tenha ultrapassado as duas mil toneladas (Mallas e Benedito, 1986; Cleary, 1994; Lacerda, 1995). Some-se a este mercúrio as quase 200 mil toneladas lançadas pelos espanhóis e portugueses durante o período colonial e pós colonial na América do Sul e Central (Nriagu, 1993) e chegamos a um passivo ambiental considerável. Embora este último valor seja impressionante, não pode-se dizer qual parcela deste mercúrio foi lançada no ambiente amazônico, e mais importante ainda, qual parcela permanece ainda hoje neste ecossistema. Além do passivo ambiental que constitui o mercúrio no ambiente, a atividade garimpeira deixou marcas de

Tabela 1: Produção de ouro no Brasil 1996-2000 (Nery *et al.*, 2000).

	1996 ^a		1997		1998		1999 ^b	
	Ton.	Ton. (% total)	Ton.	(% total)	Ton.	(% total)	Ton.	(% total)
Companhias de mineração		41.062 (70.2)		37.787 (76.2)		38.387 (78.9)		
Garimpos formais		11.273 (19.2)		8.244 (16.6)		1.789 (3.7)		
Garimpos informais ^c		6.153 (10.5)		3.563 (7.2))		8.478 (17.4)		
Produção brasileira	60.725	58.488		49.567		48.654		

(a) (DNPM, 1997) ; (b) Dados preliminares ; (c) Valores estimados

destruição significativa, como destruição da cobertura vegetal e a desestruturação do solo com conseqüente eliminação da camada orgânica (Ver **foto da capa no final** representando a destruição ambiental em área de Garimpo na Guiana Francesa). Em alguns locais foram deixadas enormes crateras onde a recuperação para replantio de floresta ou para a agricultura é virtualmente impossível.

Estudos recentes indicam que o homem não é o único responsável pelas emissões de mercúrio na Amazônia. Em avaliações das características climáticas há 30.000 anos atrás foi possível associar o clima mais seco predominante na Amazônia neste período a emissões mais importantes de mercúrio (Lacerda *et al.*, 1999). A explicação dada por Lacerda e colegas indica que a presença mais intensa de incêndios florestais (Sifeddine *et al.*, 1999) lançariam o mercúrio presente nos solos e na biomassa vegetal na atmosfera, aumentando assim as concentrações do mercúrio em ambientes menos sujeitos à queima (igarapés, por exemplo). Pode-se fazer um paralelo com o atual processo de queima de florestas pelo homem intensificando assim o mecanismo de concentração de mercúrio nas áreas inundáveis.

4. O MERCÚRIO NOS PEIXES

Tem-se observado concentrações bastante elevadas de mercúrio em peixes amazônicos, particularmente aqueles carnívoros (de topo de cadeia trófica) e que têm maior longevidade (e.g.: Akagi *et al.*, 1995; Bidone, 1997; Barbosa *et al.*, 2000). O fenômeno é explicado pela elevada bioacumulação do mercúrio ao longo da cadeia trófica (Aula *et al.*, 1994). Assim, as algas e plantas aquáticas apresentam concentrações poucas vezes maiores do que as das águas. Os peixes que consomem exclusivamente estas algas e plantas têm concentração algumas vezes maiores que às das algas e plantas e assim por diante até atingirmos peixes como o pintado ou a piranha, que apresentam concentrações até um milhão de vezes superiores às da água. O enriquecimento dos peixes de maior longevidade está relacionado ao fato de o

mercúrio ser muito dificilmente eliminado pelo organismo (Trudel, 1997). Assim, à medida que o organismo envelhece, suas concentrações em mercúrio aumentam constantemente e os organismos que vivem mais tempo vão ter maiores concentrações de mercúrio.

Outro aspecto que aumenta ainda mais o potencial de contaminação dos peixes é que à medida que subimos na cadeia trófica, não apenas a concentração de mercúrio aumenta, mas também vai ocorrendo transformação em metil-mercúrio. Em um peixe carnívoro adulto podemos encontrar mais de 90% do mercúrio na forma metilada (Malm *et al.*, 1995). Este valor nas águas não ultrapassa os 2% (de Diego *et al.*, 1999).

Até há pouco tempo, o mercúrio presente nos peixes era exclusivamente atribuído à atividade garimpeira, o que parecia lógico, na medida em que na Amazônia nunca foram observadas rochas que apresentassem elevadas concentrações de mercúrio, sendo por conseqüência um ambiente com baixas concentrações naturais deste elemento (Rodrigues-Filho e Maddock, 1998). Contudo, estudos feitos em peixes da usina hidroelétrica de Tucuruí demonstraram que apesar do ambiente estar muito distante de qualquer possível fonte de mercúrio, as concentrações de mercúrio nos organismos eram elevadas (Aula *et al.*, 1994). Várias hipóteses foram levantadas para explicar tal comportamento e a que talvez seja a mais convincente é de que o mercúrio, como elemento volátil, teria na atmosfera sua principal via de transporte. Isto ficou comprovado em estudos sobre as taxas de emissão de mercúrio dos rios, onde sua forma volátil apresenta concentrações até 20 vezes maiores que sua saturação, indicando considerável perda para a atmosfera (Amouroux *et al.*, 1999).

5. O MERCÚRIO NOS SOLOS AMAZÔNICOS

Uma discussão foi lançada recentemente por pesquisadores canadenses e brasileiros que encontraram concentrações bastante elevadas de mercúrio em solos amazônicos (Roulet e Lucotte, 1995; Roulet

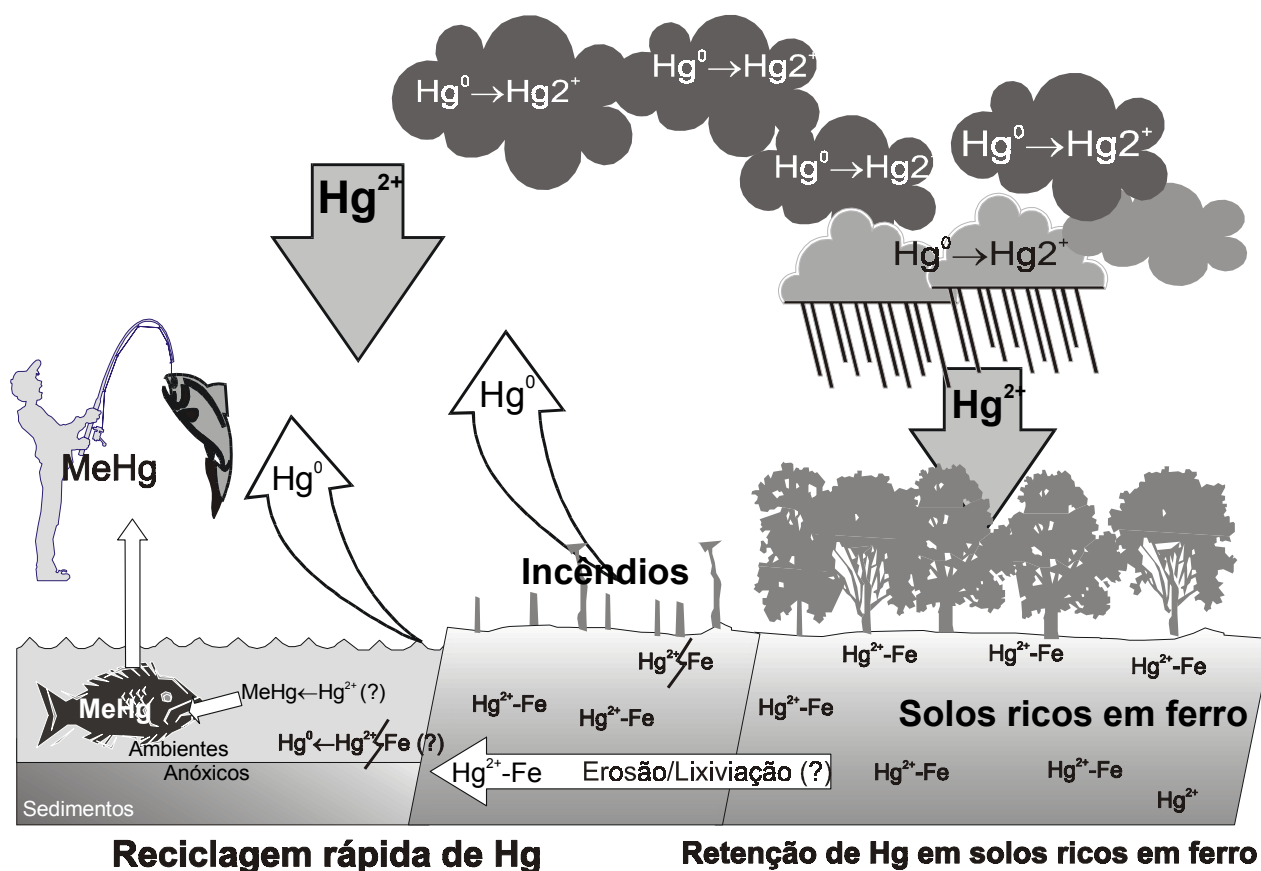


Figura 1: O ciclo do mercúrio no ambiente amazônico.

et al., 1996). Segundo estes pesquisadores o mercúrio formaria algum tipo de complexo com o ferro. A natureza destes complexos é ainda uma incógnita, já que a relação entre este dois metais foi detectada a partir de coeficientes de correlação feitos em perfis de solo. Segundo estes autores esta associação seria amplamente verificável em toda a Amazônia e assim o mercúrio teria uma origem natural e não antropogênica como imaginava-se. Nestes mesmos estudos, foram realizados balanços das emissões oriundas da retirada do ouro na Amazônia e os autores chegaram à conclusão de que seria necessário dez vezes mais garimpo para justificar as quantidades observadas, concluindo assim, que 90% do mercúrio presente nos solos seria natural (Roulet *et al.*, 1996). O mercúrio presente nos solos atingiria posteriormente os rios onde encontraria condições ideais para a metilação e contaminariam os peixes (Roulet *et al.*, 1998; Roulet *et al.*, 2000).

Embora estes estudos sejam bastante esclarecedores, esbarram em aspectos importantes que não foram considerados. O primeiro ponto é a falta de representatividade das amostras coletadas, já que os estudos foram realizados de maneira muito pontual

(região do rio Tapajós). Um outro ponto importante que foi de certa forma negligenciado foi a identificação do tipo de solo. Embora a Amazônia tenha solos morfológicamente muito homogêneos, as características químicas são muito variadas e os mecanismos de fixação de mercúrio em determinado tipo de solo podem não ocorrer em outros tipos. Nos cálculos citados acima, todos os solos da Amazônia apresentariam concentrações elevadas de mercúrio. Talvez não seja este o caso.

6. A CICLAGEM

Os conhecimentos levantados até hoje permitem desenhar o esquema apresentado na Figura 1. Neste quadro observa-se que as concentrações de mercúrio nas águas devem ser baixas, em razão da baixa solubilidade do elemento (Sanemasa, 1975). Por outro lado a parte atmosférica do ciclo do mercúrio deve ter importância significativa dada a baixa pressão de vapor do elemento (Amouroux *et al.*, 1999). A figura indica que ele deve ser volatilizado para a atmosfera como mercúrio metálico (Hg^0), sofre oxidação, e deve retornar junto com a água de chuva

na forma iônica (Hg^{+2}) (Lacerda e Salomons, 1998). Os solos representam um reservatório de mercúrio onde a sua permanência é mais longa do que nos outros compartimentos, justificando assim sua maior concentração. Nos sedimentos do fundo dos rios as concentrações de mercúrio observadas são relativamente baixas demonstrando que o meio aquático não é uma via de transporte importante para este elemento (Pfeiffer *et al.*, 1993; Lechler, 1997; Lechler *et al.*, 2000). É interessante notar que quando comparamos o ciclo do mercúrio no ambiente amazônico com o ciclo de outros elementos existem diferenças consideráveis. O transporte atmosférico, que aparentemente é muito importante para o mercúrio, vai ser quase que insignificante para os outros elementos. Ao mesmo tempo outros elementos como o zinco ou o cobre têm no meio aquático sua principal via de transporte, majoritariamente associado ao material particulado (Förstner, 1989), enquanto o mercúrio, dada sua baixa solubilidade aparece fracamente associado ao material dissolvido ou particulado.

O último ponto a ser discutido e talvez o mais importante é a metilação do mercúrio. Como visto no início deste texto, o mercúrio inorgânico apresenta uma toxicidade relativamente baixa, mas a ação das bactérias organificam este elemento formando o metil-mercúrio que foi o grande "vilão" dos principais acidentes de contaminação. Até recentemente muito pouco se conhecia sobre os processos de metilação no ambiente amazônico. Sabia-se que os peixes tinham altas concentrações de metil-mercúrio, que contaminavam o homem, mas não se sabia exatamente porque os peixes apresentavam tão altas concentrações de metil-mercúrio. Só recentemente foram feitas análises de metil-mercúrio em amostras de água e sedimento da região amazônica (Rio Tapajós) onde observou-se que o processo de organificação do mercúrio ocorre de maneira muito branda na maior parte dos ambientes aquáticos com exceção dos bancos de plantas aquáticas que seriam responsáveis por toda a metilação de mercúrio no ambiente amazônico (Guimarães *et al.*, 1993; Guimarães *et al.*, 1995; Guimarães *et al.*, 2000a; Guimarães *et al.*, 2000b; Roulet *et al.*, 2000). Este conceito ainda é muito recente e não se têm ainda certeza de que se aplica a todo o ambiente amazônico. Muitos estudos precisam ainda ser feitos e de preferência por pesquisadores oriundos da região amazônica, únicos capazes de realizar um esforço continuado de pesquisa na região.

7. CONCLUSÕES

Neste ponto é necessário levantar algumas questões importantes relativas ao ciclo do mercúrio:

- O mercúrio que se acumularia nos solos da Amazônia tem sua origem nas emissões relativas à atividade garimpeira ou nos incêndios florestais?
- Considerando que não são reconhecidas fontes geológicas de mercúrio no ambiente amazônico, seriam os mecanismos geoquímicos responsáveis pela retenção (acumulação) de mercúrio nos solos?
- Os poucos trabalhos realizados no ambiente amazônico seriam suficientes para explicar o comportamento do mercúrio em toda a região, ou seriam necessários estudos mais representativos? Esta questão é particularmente importante na medida em que, embora o ambiente amazônico pareça homogêneo, ele não o é.

Em Alta Floresta (Mato Grosso), uma antiga região de garimpo, minas abandonadas estão sendo convertidas em áreas de piscicultura como uma maneira de reutilizar uma terra que foi completamente depreciada pela extração de ouro. Trata-se de atividade, que se implantada com tecnologia e infraestrutura pode ser muito rentável e tem todas as condições de melhorar a qualidade de vida da população da região sem maiores danos ambientais. O sucesso da implantação da piscicultura em Alta Floresta pode levar a atividade a ser implantada em toda a região amazônica onde garimpos tenham deixado um passivo ambiental importante. Contudo, alguns aspectos devem ser estudados com cuidado, já que criar peixes em áreas onde existam resíduos da atividade garimpeira e particularmente com mercúrio, pode gerar um fator de risco importante.

O conhecimento dos processos de transformação do mercúrio no ambiente amazônico deve ainda ser compreendido de maneira muito mais detalhada e para isto é preciso iniciar grandes levantamentos que considerem as variações espaciais e temporais. Para que isto ocorra é absolutamente necessário capacitar pesquisadores que trabalham na própria região, únicos capazes de gerenciar grande programas de levantamento de informações. Estes programas gerarão conhecimentos que permitirão o desenvolvimento de técnicas capazes de reduzir a metilação no ambiente. Um processo que ainda é pouco conhecido é a calagem, que segundo alguns estudos seria capaz de imobilizar o mercúrio, evitando a metilação (Melamed e Villas-Boas, 2000).

A tarefa de entender o ciclo do mercúrio e os caminhos pelos quais ele atinge o homem é difícil e só a determinação dos pesquisadores locais e uma boa ajuda, através de financiamentos à pesquisa com recursos governamentais poderá permitir que em um curto espaço de tempo possamos afirmar se a piscicultura é ou não viável em todo o ambiente amazônico.

8. REFERÊNCIAS

- AKAGI H, MALM O, KINJO Y, HARADA M, BRANCHES FGP, PFEIFFER WC, e KATO H. Methylmercury pollution in the Amazon, Brazil. *The Science of the Total Environment* **175**: 85-95 (1995).
- AMOUROUX D, WASSERMAN JC, TESSIER E e DONARD OFX. Elemental mercury in the atmosphere of a tropical Amazonian forest (French Guyana). *Environmental Science & Technology* **33**: 3044-3048 (1999).
- AULA I, BRAUNSCHWEILER H, LEINO T, MALIN I, PORVARI P, HATANAKA T, LODENIUS M e JURAS A. Levels of mercury in the Tucuruí Reservoir and its surrounding area in Pará, Brazil. In CJ Watras, Huckabee, JW (eds.) *Mercury Pollution: Integration and Synthesis* Vol. . Lewis Publishers (1994).
- BAKIR F, DAMLUJI SF, AMIN-ZAKI L, MURTADHA M, KHALIDI A, AL-RAWI NY, TIKRITI S, DHAHIL HI, CLARKSON TW, SMITH JC e DOHERTY RA. Methylmercury poisoning in Iraq. *Science* **181**: 230-241 (1973).
- BARBOSA AC, SOUZA J, FERRARI I, DÓREA JG e BARRETO F. Mercury concentrations in fish of the Negro River basin, Amazon, Brazil. *International Conference on Heavy Metals in the Environment*, pp: contr. # 1290 (2000).
- BIDONE ED, CASTILHOS ZC, CID DE SOUZA, TM e LACERDA LD. Fish contamination and human exposure to mercury in the Tapajos river basin, Para state, Amazon, Brazil: A screening approach. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **59**: 194-201 (1997).
- CLEARY D, THORNTON I, BROWN N, KARANTZIS G, T. DELVES T, WORTHINGTON S. Mercury in Brazil. *Nature* **369**: 613-614 (1994).
- CRUMP K, LANDINGHAM C, SHAMLAYE C, COX C, DAVIDSON P, MYERS G e CLARKSON T. Benchmark concentrations for methylmercury obtained from the Seychelles child development study. *Environmental Health Perspectives* **108**: 257-263 (2000).
- DE DIEGO A, TSENG CM, DIMOV N, AMOUROUX D e DONARD OFX. Distribution of methylmercury and inorganic mercury between the aqueous phase and suspended particulate matter under simulated estuarine conditions. (1999).
- DNPM. (1997) Anuário Mineiro Brasileiro. DNPM.
- FÖRSTNER U. *Contaminated Sediments*. Springer-Verlag, 1989.
- FUJIKI M. The transitional condition of Minamata Bay and the neighbouring sea polluted by factory waste matter containing mercury. **6th International Conference on Water Pollution Research**, pp: paper 12 (1972).
- GRANDJEAN P, WEIHE P e WHITE RF. Delayed neurotoxicity due to developmental exposure to methylmercury. *International Conference on Heavy Metals in the Environment*, pp: contr. # 1162 (2000).
- GUIMARÃES JRD, MEILI M, HYLANDER LD, SILVA EC, ROULET M, MAURO JBN e LEMOS RA. Mercury net methylation in five tropical flood plain regions of Brazil: high in the root zone of floating macrophyte mats but low in the surface sediments and flooded soils. *The Science of the Total Environment* **261**: 99-107 (2000a).
- GUIMARÃES JRD, MALM O, e PFEIFFER WC. Radiochemical determination of net mercury methylation rates in sediment, water and soil samples from the Amazon region. *International Symposium on Perspectives for Environmental Geochemistry in the Tropical Countries*, pp: 413-416 (1993).
- GUIMARÃES JRD, MALM O e PFEIFFER WC. A simplified radiochemical technique for measurement of net mercury methylation in aquatic systems near gold-mining areas, Amazon, Brazil. *Science of the Total Environment* **175**: 151-162 (1995).
- GUIMARÃES JRD, ROULET M, LUCOTTE M e MERGLER D. Mercury methylation along a lake-forest transect in the Tapajós river floodplain, Brazilian Amazon: seasonal and vertical variations. *The Science of the Total Environment* **261**: 91-98 (2000b).
- HACON SS. *Avaliação do risco potencial para a saúde humana da exposição ao mercúrio na área urbana de Alta Floresta, MT - Bacia Amazônica, Brasil*. Doutorado, Universidade Federal Fluminense, 1995.
- HACON SS, ROCHEDO ERR, CAMPOS RC e LACERDA LD. Mercury exposure through fish consumption in the urban area of Alta Floresta in the Amazon Basin. *Journal of Geochemical Exploration* **58**: 209-216 (1997).
- HILDEBRAND SG, HUCKABEE JW, SANZ DIAZ F, JANZEN SA, A. SJ e KUMAR KD. Distribution of mercury in the environment at

- Almadén, Spain. Oak Ridge National Laboratory (1980).
- JENSEN S e JERNELOV A. Biological methylation of mercury in aquatic organisms. *Nature* **223**: 753-754 (1969).
- LACERDA LD. Amazon mercury emissions. *Nature* **374**: 20-21 (1995).
- LACERDA LD, RIBEIRO MG, CORDEIRO RC, SIFEDDINE A e TURCQ B. Atmospheric mercury deposition over Brazil during the past 30,000 years. *Ciência e Cultura. Journal of the Brazilian Association for the Advancement of Science* **51**: 363-371 (1999).
- LACERDA LD e SALOMONS W. *Mercury from Gold and Silver Mining: A Chemical Time Bomb*. Springer-Verlag, 1998.
- LEBEL J, MERGLER D, BRANCHES F, LUCOTTE M, AMORIM M, LARRIBEF e DOLBEC J. Neurotoxic effects of low-level methylmercury contamination in the Amazonian Basin. *Environmental Research section A* **79**: 20-32 (1998).
- LECHLER P, WARWICK J e LYONS B. Mercury concentrations in channel bed sediments, floodplain sediment and lateritic soils of the Madeira River Basin, Brazil: Implications for anthropogenic versus natural sources. *Fall Meeting*, pp: F199 (1997).
- LECHLER PJ, MILLER JR, LACERDA LD, VINSON D, BOZONGO J-C, LYONS WB e WARWICK JJ. Elevated mercury concentrations in soils, sediments, water, and fish of the Madeira River basin, Brazilian Amazon: a function of natural enrichments? *The Science of the Total Environment* **260**: 87-96 (2000).
- MALLAS J e BENEDITO N. Mercury and gold mining in the Brazilian Amazon. *Ambio* **15**: 248-249 (1986).
- MALM O, CASTRO MB, BASTOS WR, BRANCHES FJP, ZUFFO CE e PFEIFFER WC. An assessment of mercury pollution in different gold-mining areas, Amazon Brazil. *The Science of the Total Environment* **175**: 127-140 (1995).
- MARSH D, CLARKSON T, MYERS G, DAVIDSON P, COX C, CERNICHIARI E, TANNER M, LEDNAR W, SHAMLAYEC, CHOISY O, HORAREAU C e BERLIN M. The Seychelles study of fetal methylmercury exposure and child development: Introduction. *Neurotoxicology* **16**: 583-596 (1995).
- MELAMED R e VILLAS-BOAS RC. Application of physico-chemical amendments for counteraction of mercury pollution. *The Science of the Total Environment* **261**: 203-209 (2000).
- MURATA K, WEIHE P, RENZONI A, DEBES F, VASCONCELOS R, ZINO F, ARAKI S, JORGENSEN PJ, WHITE RF e GRANDJEAN P. Delayed evoked potential in children exposed to methylmercury from seafood. *Neurotoxicology and Teratology* **21**: 343-348 (1999).
- NERY MAC, SILVA EA e MARON MAC. (2000) Sumario Mineral 2000 - Ouro, Vol. 2000. DNPM.
- NRIAGU JO. Mercury pollution from silver mining in colonial South America. In JJ Abrão, JC Wasserman, and EV Silva-Filho (eds.) *Proceedings of the International Symposium on Environmental Geochemistry in the Tropical Countries* Vol. . Dept. de Geoquímica - UFF (1993).
- NRIAGU JO, PFEIFFER WC, MALM O, SOUZA CMM e MIERLE G. Mercury Pollution in Brazil. *Nature* **356**: 389 (1992).
- PFEIFFER WC, LACERDA LD, SALOMONS W e MALM O. Environmental fate of mercury from gold mining in the Brazilian Amazon. *Environmental Reviews* **1**: 26-37 (1993).
- RODRIGUES-FILHO S e MADDOCK JEL. Assessment of the heavy metal pollution in a gold "garimpo". In JC Wasserman, EV Silva-Filho, and R Villas-Boas (eds.) *Environmental Geochemistry in the Tropics* Vol. 72. Springer-Verlag (1998).
- RODRÍGUEZ-MARTÍN-DOIMEADIOS RC, WASSERMAN JC, BERZAS-NEVADO JJ, GARCÍA-BERMEJO LF, AMOUROUX D e DONARD OFX. Chemical availability of mercury in stream sediments from the Almadén area, Spain. *Journal of Environmental Monitoring* **2**: 360-366 (2000).
- ROSS MA. Methylmercury. *Health Effects Review* **1**: 1-2 (1996).
- ROULET M e LUCOTTE M. Geochemistry of mercury in pristine and flooded ferralitic soils of a tropical rain forest in French Guiana, South America. *Water, Air and Soil Pollution* **80**: 1079-1088 (1995).
- ROULET M, LUCOTTE M, CANUEL R, RHEAULT I, TRAN S, DE FREITOS GOG YG, FARELLA N, SOUZA DO VALE R, SOUSA PASSOS CJ, DE JESUS DA SILVA E, MERGLER D e AMORIM M. Distribution and partition of total mercury in waters of the Tapajós River Basin, Brazilian Amazon. *The*

- Science of the Total Environment* **213**: 203-211 (1998).
- ROULET M, LUCOTTE M, GUIMARÃES JRD e RHEAULT I. Methylmercury in water, seston and epiphyton of an Amazonian river and its floodplain, Tapajós River, Brazil. *The Science of the Total Environment* **261**: 43-59 (2000).
- ROULET M, LUCOTTE M, RHEAULT I, TRAN S, FARELLA N, CANUEL R, MERGLER D e AMORIM M. Mercury in Amazonian soils: accumulation and release. **IV International Conference on the Geochemistry of the Earth's Surface**, pp: 453-457 (1996).
- SANEMASA I. The solubility of elemental mercury vapor in water. *Bulletin of the Chemical Society of Japan* **48**: 1795-1798 (1975).
- SIFEDDINE A, MARTIN L, VOLKMER-RIBEIRO C, SOUBIES F, CORDEIRO RC e SUGUIO K. Variations of the Amazonian rain forest environment, a sedimentological record covering 30,000 years. *Palaeogeography, Palaeoecology and Palaeoclimate* (1999).
- TRUDEL M, RASMUSSEN, JB Modelling the elimination of mercury by fish. *Environmental Science & Technology* **31**: 1716-1722 (1997).
- WHO *Methylmercury*. World Health Organisation, 1990.



A foto retrata a destruição da floresta pela atividade garimpeira na Floresta Amazônica (às margens do Rio Petit Inini, Guiana Francesa). Fotografado por J.C. Wasserman, 1998.