

**Evolução temporal da exposição humana ao mercúrio na Amazônia: uma abordagem cienciométrica**

**Clarisse Vasconcellos Serra**

Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, UnB, Brasil.  
clarissevs@hotmail.com

**Wllyane da Silva Figueiredo**

Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, UnB, Brasil.  
wllyanne@gmail.com

**José Vicente Elias Bernardi**

Professor Doutor, Laboratório de Geoestatística e Geodésia, UnB, Brasil.  
bernardi@unb.br

## RESUMO

Em decorrência da atual atenção global à exposição e toxicidade do mercúrio, bem como suas diversas consequências nos ecossistemas e na saúde humana, novas ferramentas de cienciometria auxiliam para um detalhamento do entendimento das questões envolvidas. Nesta pesquisa bibliográfica, foram contemplados os estudos do risco de exposição humana ao mercúrio nas populações do bioma amazônico brasileiro nas últimas três décadas usando técnicas cienciométricas, acoplagem bibliográfica, autores, citações e palavras chave. As análises no período de 1991 a 2019 possibilitaram a seleção de 130 artigos. Houve a identificação das principais instituições de pesquisa, classificação e interrelações dos principais eixos temáticos dos estudos no bioma amazônico e autores mais citados. Foram ordenados os artigos mais referenciados sobre esse tema e os principais bioindicadores. Os resultados demonstram que a maioria dos estudos foram realizados ao longo dos rios e com populações ribeirinhas. No universo amostral, existe a predominância das localidades do rio Tapajós e rio Madeira. A maior parte dos pesquisadores trabalham apenas com parcerias internas, sem interação com outros grupos científicos. A matriz cabelo é o principal bioindicador de exposição de Hg utilizado pelos autores. Para a perspectiva futura, este artigo tem o potencial de representar um entendimento temporal geral de exposição humana ao mercúrio na Amazônia e seus principais bioindicadores.

**PALAVRAS-CHAVE:** Amazônia, Biomarcadores, cienciometria e toxicidade ao mercúrio

## 1. INTRODUÇÃO

Os estudos sobre a dinâmica ambiental do Hg são de interesse global. De acordo com Okpala et al. (2017) e Basu et al. (2018), os impactos do uso da terra e das mudanças climáticas no ciclo do Hg estão ligados às mudanças no ecossistema e aos ciclos atmosféricos e oceânicos globais. A exposição a baixos níveis de Hg pode levar a graves problemas genotóxicos, despertando na última década questionamentos sobre a segurança dos limites atuais de exposição ao MeHg (Ha et al. 2016). Estudos de vários autores como Malm et al. 1997; Malm, 1998; Roulet et al. 2000; Dolbec et al. 2001; Lemire et al. 2009; Malm et al. 2010; Fonseca et al. 2014; Veja et al. 2018, afirmam que as inundações sazonais dos rios e suas planícies de inundação regulam a produção e a biodisponibilidade do metilmercúrio (MeHg) para as redes alimentares. A identificação de elevadas concentrações de Hg em peixes e populações humanas, entre aqueles que vivem longe das atividades de mineração de ouro, tem levado a propostas para outras fontes primárias de Hg (Bisinoti e Jardim, 2004; Passos e Mergler, 2008; Faial et al. 2014; Martín-Doimeadios et al. 2014; Bastos et al. 2015; Castilhos et al. 2015; Langeland et al. 2017; Weinhouse et al. 2017).

O biomonitoramento humano é utilizado como ferramenta de apoio à detecção precoce da exposição a agentes tóxicos, na tentativa de reduzir os efeitos nocivos à saúde humana. Para isso, é necessário determinar esses agentes, bem como definir níveis aceitáveis de exposição e também realizar a análise de prováveis agravos à saúde relacionados a essa exposição (Amorim, 2003; Arrifano et al. 2018; Cerbino et al. 2018; Freitas et al. 2018; Wyatt et al., 2019).

Atualmente há várias lacunas para o entendimento quantitativo de como os fatores intrínsecos e extrínsecos atuam nas esferas moleculares, individuais e globais podem interferir no risco de exposição ao Hg, toxicidade e impactos na saúde (Eagles-Smith et al. 2018). Os efeitos neurológicos em humanos ao longo do tempo requer mais estudos sobre o assunto (Ratcliffe et al. 2015). Atualmente, existe a necessidade de integração de um banco de dados com repositórios de publicações científicas voltadas para futuras avaliações de riscos.

Nessa perspectiva, os estudos na Amazônia são heterogêneos, dependentes de vários fatores, não há tendência de resultados e algumas áreas não foram estudadas. Grande parte da

população amazônica pode ser considerada exposta às diferentes formas químicas do Hg. Assim, esta investigação quantifica o progresso científico com o objetivo de identificar e integrar estudos relacionados à exposição ao Hg na região amazônica por meio do exame de diferentes matrizes humanas e do uso de ferramentas cienciométricas. Esta abordagem é uma ferramenta que identifica e indica soluções para a realidade social do pesquisador e da pesquisa e, sobretudo, contribui para verificar os temas e lacunas pouco estudadas.

## **2. METODOLOGIA**

O banco de dados utilizado neste estudo adotou a Coleção Núcleo da Web of Science (WoS) relativa às rotas de exposição ao Hg e seus possíveis impactos na população amazônica. A estratégia de busca adotou a seguinte nomenclatura: TI = (\* mercúrio \* OR Hg OR metilmercúrio AND exposição OU exposto) AND TS = (cabelo \* AND peixe AND Amazon) e as pesquisas foram conduzidas em inglês. A partir de um resultado inicial de 751 artigos pesquisados em outubro de 2019, foram selecionados 130, abrangendo o período de 1991 a 2019, e seguiram a ordenação numérica de 1 a 130, sendo o 1º artigo publicado em 1991 e o último em 2019.

Os critérios de seleção foram trabalhos que abordassem a exposição humana ao Hg e MeHg e pesquisas na região amazônica. O restante do resultado foi excluído porque não foi desenvolvido na Amazônia, inclusive os artigos de revisão, uma vez que o eixo do trabalho é catalogar estudos que visem avaliar a exposição e toxicidade da população da Amazônia brasileira, e também quais foram os diferentes tipos de amostras utilizadas nos artigos. É importante observar que somente a partir de 1991 as palavras-chave e resumos dos autores tornaram-se acessíveis gratuitamente na plataforma Web of Science. Os artigos analisados nesta revisão foram publicados em periódicos científicos internacionais e nacionais. Todos eles foram coletados em fontes eletrônicas. Depois, identificou os pesquisadores e grupos de pesquisa que trabalham com essa temática, organizados por suas respectivas instituições, e tabulou suas produções acadêmicas e locais de estudo.

O software HistCite™, versão 9.8.24 (Filadélfia, PA, EUA) foi usado para extrair informações relacionadas aos autores com maior número de publicações e/ou mais citados, ano de publicação, palavras mais frequentes e periódicos com maior número de publicações artigos.

Os mapas de conexão foram elaborados com o software VOSViewer™, versão 1.6.11 (Leiden, Holanda) para identificar graficamente as correlações das publicações científicas a partir das mesmas palavras-chave utilizadas na pesquisa inicial na Web of Science. Círculos e linhas aumentam de tamanho de acordo com a densidade forte ou fraca de pesquisadores em relação às suas redes colaborativas. Na análise de coautoria, foram excluídos os autores que possuíam apenas 1 artigo por não se qualificarem na rede de colaboração. Na rede de citações e autores, estabelecemos um mínimo de 5 artigos por cada um dos autores para representar clusters colaborativos.

O software JAMOVI - 1.0.1.0, foi utilizado para verificar as relações entre os artigos que pesquisaram de diferentes formas, para identificar o grau de exposição ao Hg, seja através de amostra de cabelo, sangue, urina ou ingestão de peixes, e se esses artigos se aplicaram testes neuropsicológicos, que identificam o comprometimento do desenvolvimento neuropsicomotor. Os dados dos 130 artigos foram inseridos em planilha excel, a fim de gerar um arquivo binário

relacionado ao tipo de rota de exposição ao Hg utilizada na pesquisa dos autores. A análise estatística multivariada foi utilizada para a análise de agrupamento utilizando o algoritmo com distâncias euclidianas, com "Linkage" completo. Os dados foram executados no XLSTAT 2019.

### **3. RESULTADOS**

A análise de cluster aplicada ao perfil geral dos 130 artigos selecionados apresentou 12 matrizes, e o coeficiente de correlação confenética foi de 0,914. A hierarquia mostra 3 grupos principais (1,2,3). O Grupo 1 apresentou o cabelo como destaque principal, complementando o grupo que temos a pesquisa alimentar e matrizes infantis. Essas três matrizes foram as mais encontradas nos artigos pesquisados e tiveram o menor aumento na variância intragrupo e todas as demais matrizes descritas no trabalho.

O Grupo 2 foi caracterizado pelos peixes utilizados para avaliar o ambiente aquático e a exposição das populações ribeirinhas. A distância média do centróide mostrou que os artigos que utilizaram os peixes são os mais semelhantes entre si. O grupo 3, a urina, foi o principal destaque, comumente utilizado para determinar o Hg total, principalmente em estudos com população exposta ao Hg em ambientes ocupacionais, como a mineração de ouro. Complementando este grupo, temos sangue, indicadores ambientais, indígenas, avaliação neuropsicológica, exposição ao Hg por meio de vacinas, leite materno e avaliação neurológica. Nesse grupo existe uma correlação robusta entre os artigos que utilizaram a vacina como via de exposição e o leite materno aplicado em testes neurológicos e neuropsicológicos.

No cluster, destaca-se a matriz de peixes, principal via de exposição humana. Observe que o grupo 2 foi usado junto com os grupos 1 e 3. O cabelo do grupo 1 é usado com a pesquisa alimentar e em crianças. No entanto, também se conecta com os grupos 2 e 3, e ambos o usam como bioindicador. O grupo 3 faz correlação direta com o grupo 2, com ênfase em conter outras matrizes que são utilizadas em artigos com finalidade específica e em população diferente.

A hierarquia dos 130 artigos analisados, dependendo das variáveis, resultou em 4 grupos (A, B, C, D), com coeficiente de correlação confenética de 0,65, de acordo com a ordenação numérica dos artigos (Figura 01). Grupo A, o centróide foram os artigos com a variável sangue, seguidos dos artigos do cabelo. A tendência desses 24 artigos foram estudos que investigaram o cabelo bioindicador de exposição ao Hg, sangue, urina e também a ingestão alimentar. Grupo B, os 41 artigos desenvolveram estudos para avaliar a concentração de Hg em peixes.

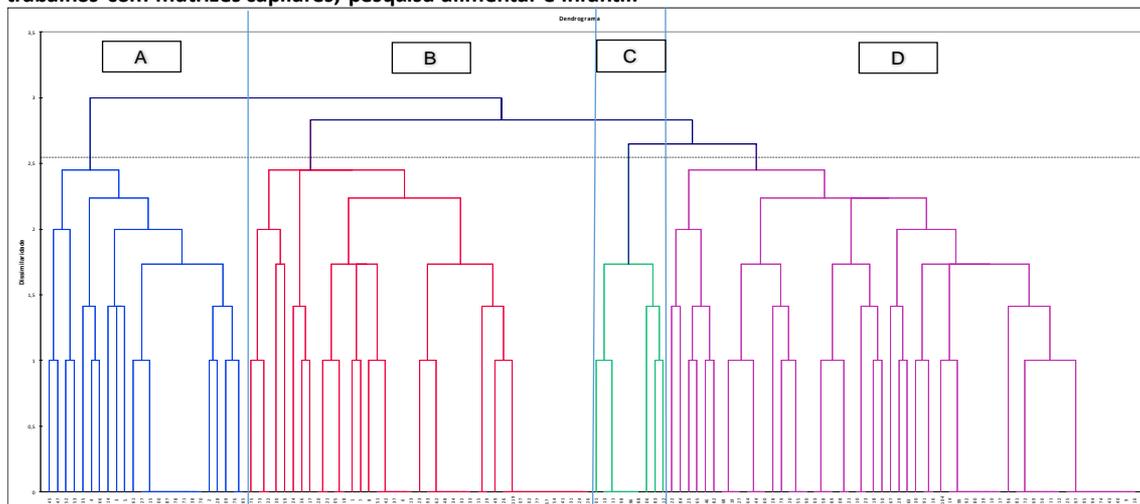
Neste grupo B, os artigos com as amostras de peixes foram o destaque no centróide do grupo, e a maior distância entre os centróides deste grupo B foi com o grupo C. Diante desta afirmação, entende-se que os artigos que utilizam a matriz de peixes (grupo B) foram pouco utilizados em artigos com crianças, avaliações neuropsicológicas e neurológicas (grupo C). Verificou-se também que nenhum estudo pesquisou a matriz de peixes, juntamente com a avaliação neuropsicológica para melhor compreender as consequências da bioacumulação de Hg para as comunidades amazônicas.

O grupo C com 9 artigos é composto pelas variáveis avaliação neuropsicológica, avaliação neurológica e crianças, com média no centróide de 0,647, indicando que os estudos são bastante semelhantes entre si e com a menor variância intragrupo. A menor distância entre o centróide do grupo C foi com o grupo D, e isso parece ser devido ao fato da matriz do cabelo, pertencente ao grupo D, ser amplamente utilizada por pesquisadores para avaliar a carga corporal de HgT no corpo humano. A maior distância entre os objetos centrais foi com o Grupo B, uma matriz de peixes.

O grupo D, com 56 artigos com matrizes capilares, inquérito alimentar e infantil, apresenta alta variância intragrupo e o principal centróide da classe foi a matriz capilar. A menor distância dos centróides deste grupo D foi com o grupo A, pois utilizaram matrizes iguais, tais como: levantamento capilar e alimentar e em oposição, a maior distância dos centróides foi com o grupo C.

O resultado total da decomposição da variação para a classificação ótima, o intragrupo é maior do que o intergrupo, uma vez que as matrizes apresentam diferenças significativas, validando a existência da tendência aparente nas distâncias entre as tentativas. Nessa perspectiva, encontraram que 89 artigos, grupos A, C e D, utilizaram a matriz capilar como bioindicadora de Hg, correspondendo a aproximadamente 68,5% do total de publicações. Fica evidente na hierarquia detalhada dos artigos que, no contexto da quantificação dos estudos, indica que a comunidade científica usa cabelo na maioria dos trabalhos e vê uma lacuna devido ao baixo uso de avaliação neuropsicológica.

**Figura 01. Hierarquização dos 130 artigos para agrupar sobre contaminação por mercúrio em populações humanas: A - 24 estudos com as matrizes de cabelo, sangue, urina e levantamento alimentar; B - 41 trabalhos com a matriz de peixes; C - 9 trabalhos com matrizes capilares, infantis, testes neurológicos e testes neuropsicológicos; D - São 56 trabalhos com matrizes capilares, pesquisa alimentar e infantil.**



O acoplamento bibliográfico apresentado através do software VOSviewer, significa que os artigos se referem a outro artigo comum em suas bibliografias. A análise dos principais acoplamentos bibliográficos em pesquisas de exposição ao Hg na Amazônia (Figura 02), mostrou 5 grupos (1A, 2A, 3A, 4A, 5A) unificando diferentes pesquisadores e suas principais ligações de artigos, com apenas um grupo não conectado com os outros quatro. Os maiores círculos dentro de cada grupo de clusters referem-se aos artigos dos autores mais citados.

Grupo 1A formado por Guimarães, J.R.D. do Laboratório de Plotter da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Fillion, M. do Centre de recherche interdisciplinaire sur la biologie, la société et l'environnement - Université du Québec à Montréal - Canadá, juntamente com Barbosa, F. de Montreal Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto - USP e Aline Philibert da Université du Québec à Montreal, formam um grupo de trabalho sobre exposição ao Hg, vinculado a mais dois grupos, 2A (Dórea, JG) e 3A (Malm, O. e Mergler, D.).

Grupo 2A formado por Barbosa, A.C, Dórea, J.G. e Bernardi, J.V. E., da Universidade de Brasília - UnB, em conjunto com Hacon, S.S. da Escola Nacional de Saúde Pública da Fundação Oswaldo Cruz, Marques, R.C. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Roulet, M. pela

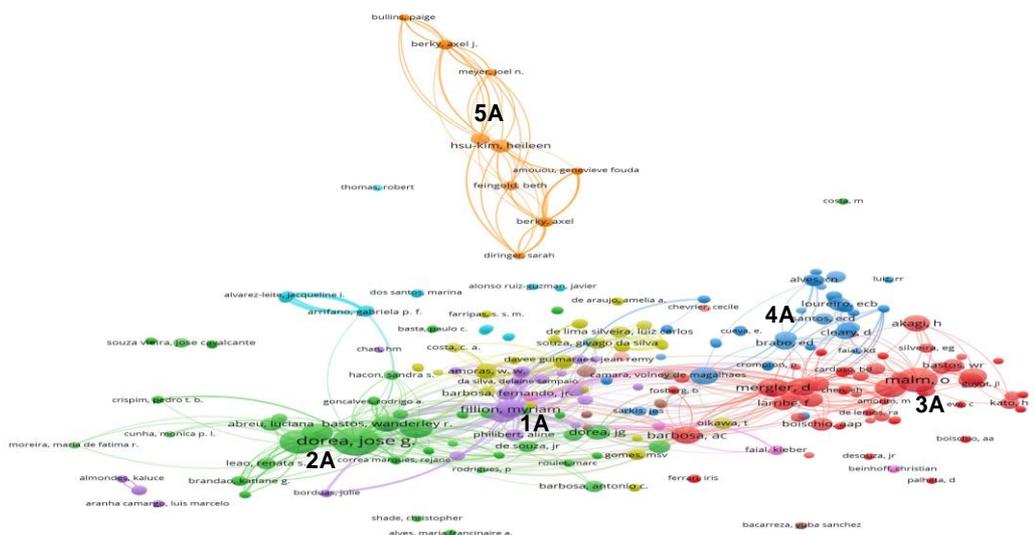
Université du Québec à Montréal - Canadá e Bastos, W. pela Universidade Federal de Rondônia - UNIR. Grupo 3A composto por Malm, O. do Laboratório de Radioisótopos - UFRJ e Penna-Franca, E. da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ; Mergler, D., Dolbec, J. e Lebel, J. de Centre d'étude des interações biológicas entre la santé et l'environnement - Université du Québec à Montreal, Lucotte, M. - Université du Québec à Montreal, Canadá; Bastos, W.R. da Universidade Federal de Rondônia - UNIR e Boischio, A.A.P. pela Universidade Estadual de Feira de Santana - UEMS, Bahia.

Grupo 4A, formado por Oliveira, E.C. e Santos, E.S.B do Laboratório de Ecologia Humana e Meio Ambiente, Instituto Evandro Chagas - Pará, em conjunto com Muller, R.C.S. e Alves, C.N., Departamento de Química, Universidade Federal do Pará - UFPA e Sarkis, J.E., Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Grupo de Caracterização Isotópica, Universidade de São Paulo - USP. Este grupo está ligado, tanto ao primeiro "cluster" (1A - Fillion, M. e Guimarães, J.R.D.), e ao segundo "cluster" (2A - Dórea, J.G.).

O Grupo 5A não se conecta a nenhum outro conjunto. Este grupo inclui Hsu-Kim, H. da Engenharia Civil e Ambiental, Carolina do Norte, Bullins, P. do Duke Global Health Institute, Duke University, Carolina do Norte, Meyer, J.N., Berky, A.J. e Pan, W.K. Nicholas School of the Environment, Duke University, Carolina do Norte.

Dentre todos os 130 artigos, 31 autores elegíveis se destacam por terem destacado círculos e linhas, indicando uma forte ligação com os outros 5 grupos colaborativos identificados na Figura 02 e também mostrados na Tabela 01.

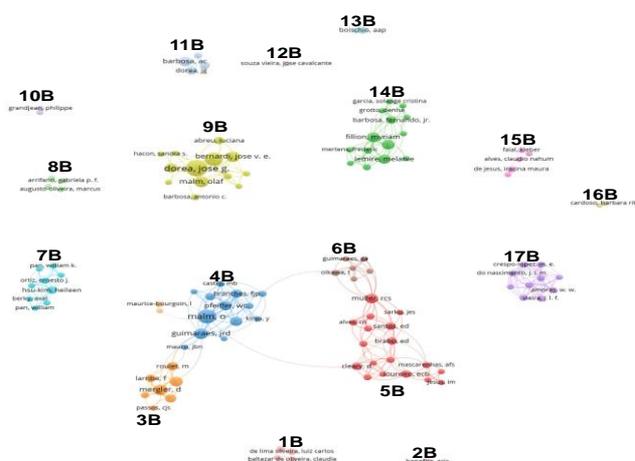
**Figura 02. Rede bibliográfica de acoplamento Pesquisa de exposição ao Hg em grupo sobre contaminação por mercúrio em populações humanas entre 1991 e 2019. Principais autores dos grupos: 1A - Amoras, WW, Barbosa, F., da Silva, DS, Fillion, M. Guimarães, J.R.D. e Philibert, A.; 2A - Barbosa, A.C., Bastos, W., Bernardi, J.V.E, Dórea, J.G., Hacon, S.S., Marques, R.C. e Roulet, M.; 3A - Bastos, W.R., Boischio, A.A.P., Dolbec, J., Lebel, J., Lucotte, M., Malm, O., Mergler, D. e Penna-Franca, E.; 4A - Alves, C.N., Oliveira, E.C., Santos, E.S.B., Muller, R.C.S. e Sarkis, J.E.; 5A - Berky, A.J., Bullins, P., Hsu-Kim, H., Meyer, J.N. e Pan, W.K.**



Na Figura 03, identifica 4 grupos conectados e 1 grupo respectivamente, possui os círculos destacados pela classificação dos principais coautores e também estão no ranking das citações, são eles: Mergler, D. (3B); Malm, O. (4B); Brabo, E.D. (5B) e Guimarães, J.R.D (6B) e Dórea, J.G (9B), todos habilitados na rede de colaboração. Na análise de coautoria (Figura 03),

foram excluídos os autores que possuíam apenas 1 artigo, originando uma rede com 17 clusters e 356 links

**Figura 03.** Rede de coautorias e respectivas equipes de pesquisa em pesquisas de exposição ao Hg na Amazônia entre 1991 e 2019. Autores principais: 1B - Baltazar de Oliveira, C. e de Lima Silveira, L.C. ; 2B - Benefício, E. ; 3B - Laribe, F., Mergler, D., Passos, C.J.S. e Roulet, M; 4B - Ramos, F.J.P., Guimarães, J.R.D., Malm, O., Pfeiffer, W.C. ; 5B - Alves, C.N., Brabo, E.D., Cleary, D., Loureiro, E.C.B., Mascarenhas, A.F.S., Muller, R.C.S., Santos, E.D. e Sarkis, J.E.S.; 6B - Guimarães, G.A. e Oikawa, T. ; 7B - Hsu-kim, Beillen, Ortiz, E.J., Pan, W.K., Berky, A. e Pan, W. ; 8B - Arrifano, G.P.F. e Augusto-Oliveira, M. ; 9B - Abreu, L., Barbosa, A.C., Bernardi, J.V.E., Dórea, J.G., Hacon, S.S. e Malm, O. ; 10B - Grandjean, P. ; 11B - Barbosa, A.C. e Dórea, J.G. ; 12B - Souza Vieira, J.C. ; 13B - Boischio, A.A.P.; 14B - Barbosa, F., Garcia, S.C., Grotto, D., Fillion, M., Lemire, M. e Mertens, F. ; 15B - Alves, C.N., de Jesus, I.M., e Faial, K. ; 16B - Cardoso, B.R. ; 17B - Amorás, W.W., Crespo-Lopez, M.E., do Nascimento, J.L.M. e Vieira, J.L.F.

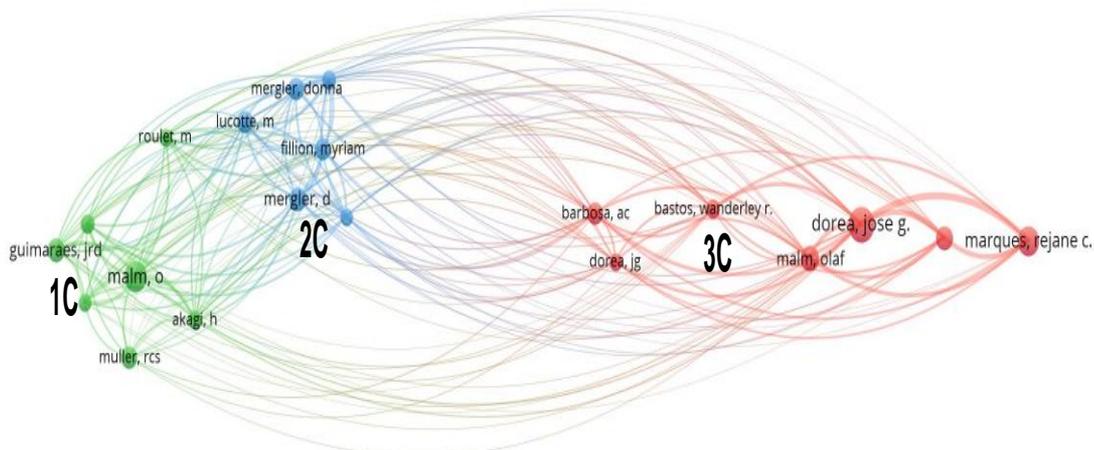


Mascarenhas, A.F.S., Loureiro, E.C.B., Alves, C.N. e Sarkis, JES, em sua maioria de instituições do Pará, e se relacionam aos grupos 4B (Malm, O., Guimarães, JRD, Pfeiffer, WC e Filiais, FJP) e 6B (Guimarães, GA e Oikawa, T.) O primeiro é composto por 13 pesquisadores, em sua maioria professores da UFRJ. O cluster 3B (Mergler, D., Roulet, M., Laribe, F., Passos, CJS) tem 7 pesquisadores do Canadá, UFRJ e UnB e está vinculado apenas a 4B (Malm. O., Guimarães, JRD, Pfeiffer, WC e Filiais, FJP). (Figura 04).

Identificamos grupos que são independentes e não se conectam a nenhum outro cluster: 7B (Hsu-kim, Beillen, Ortiz, EJ, Pan, WK, Berky, A. e Pan, W.), 9B (Dórea, JG), 14B (Fillion, M., Barbosa, F., Lemire, M., Mertens, F., Grotto, D. e Garcia, SC), e 17B (Crespo-Lopez, ME, Do Nascimento, JLM, Amorás, WW e Vieira, JSE). Os demais clusters são compostos por no máximo 5 autores (8B; 10B; 11B; 13B; 14B; 15B; e 16B).

Na rede de citações e autores, estabelecemos um mínimo de 5 artigos por cada um dos autores, resultando em 130 artigos. De acordo com a tabela de citações gerada pela Web of Science (WoS) Core Collection, o autor mais citado com 1137 citações em 14 artigos foi Malm, O., seguido por Dórea, J.G. com 397 citações em 19 artigos, Mergler, D. com 763 citações em 8 artigos, Lucotte, M. com 682 citações em 7 artigos e Guimarães, J.R.D. com 631 citações em 8 artigos.

**Figura 04. Redes de associação entre autores e citações de pesquisas sobre exposição ao Hg na Amazônia entre 1991 e 2019 (grupos de pesquisa de instituições amazônicas e canadenses). Autores principais: 1C - Akagi, H., Guimarães, J.R.D., Malm, O., Muller, R.C.S. e Roulet, M.; 2C - Fillion, M., Lucotte, M. e Mergler, D.; 3C - Barbosa, A.C., Bastos, W.R., Dórea, J.G., Malm, O. e Marques, R.C.**



Na Figura 04 existem 3 clusters, identificados pelas diferentes cores. O Cluster 1C é liderado por Malm, O., tem 7 pesquisadores e faz 18 ligações com os outros dois grupos. O cluster 2C tem o professor Mergler, D. como nó central e outros 6 autores com 19 conexões. O Grupo 3C possui Dórea, J.G. como pesquisador principal, juntamente com outros 7 autores, e faz 19 links. O número total de links foi 181.

Todos esses líderes de grupo têm relevância porque indicam que todos os eixos de estudos estão conectados em seu trabalho e dentro dos grupos. A produção científica da Tabela 01 mostra que a maioria dos autores das redes desta associação também está no ranking dos artigos mais citados.

Ao analisar co-ocorrências com todas as palavras-chave nos 130 artigos, o critério foi que a palavra aparecesse no título ou resumo de pelo menos 5 publicações. “Metilmercúrio” foi a palavra mais frequente, com 64 ocorrências, seguida de “mercúrio” (54), “peixe” (51), “Amazônia” (49) e “cabelo” (43).

Todas essas palavras estão ligadas a todas as outras. Esses 5 grupos principais estão relacionados à exposição humana ao metilmercúrio e ao mercúrio na região amazônica por meio do consumo de peixes e da concentração medida pelo cabelo. Há uma sequência nas ordens em que as palavras aparecem, seguindo a hierarquia dos artigos (Figura 01).

## 4. DISCUSSÃO

Em relação à pesquisa com peixes, o Instituto Evandro Chagas em conjunto com a Universidade Federal do Pará fez a maioria dos trabalhos, seguido pelos trabalhos desenvolvidos por Malm, O. e seus colaboradores (Universidade Federal do Rio de Janeiro). Além disso, o termo “peixe” apareceu como palavra-chave em 51 artigos, sendo a terceira palavra-chave mais destacada entre os 130 artigos.

De acordo com a tabela de citações gerada pela Web of Science (WoS) Core Collection, após outros estudos, o ano de 2000 se destacou pelo número de artigos científicos produzidos: 14 publicações. Em 2000, houve um pico de publicação sobre contaminação por mercúrio na Bacia Amazônica e uma ligeira diminuição nos últimos dois anos (Hacon et al., 2008). O ano de

2018 veio em segundo lugar, com um total de 10 artigos publicados e, em terceiro, o ano de 2014 com 8 artigos.

A maioria dos estudos usou o cabelo como matriz para avaliar a concentração de Hg. Quase todos os artigos incluíram grupos brasileiros e algumas colaborações internacionais. Dórea, J.G. (Universidade de Brasília) desenvolveu a maioria dos artigos que utilizaram o cabelo como matriz de concentração de Hg em 2014, em parceria com outros 25 pesquisadores, correspondendo a 19% do total, destacando-se como principal autor deste levantamento cienciométrico. O número de instituições internacionais cooperando com pesquisadores brasileiros é pequeno nos últimos anos (2 instituições) e os mesmos resultados que as instituições de pesquisa canadenses se tornaram os principais parceiros brasileiros (Hacon et al., 2008).

Nos últimos anos, percebeu-se uma troca entre grupos de pesquisa; hoje, os trabalhos estão sendo desenvolvidos por novos pesquisadores. A Universidade Federal do Rio de Janeiro e a Universidade de Brasília continuam suas atividades de pesquisa com Hg e suas fontes contaminantes.

Embora esses esforços de pesquisa tenham produzido grande quantidade de dados, eles se mostraram incapazes de fornecer um quadro conclusivo da contaminação humana por mercúrio na Amazônia e deixaram muitas questões sem solução. Apesar da prevalência de pesquisadores brasileiros nos estudos, esse panorama mostrou que ainda não existe a dose de referência de mercúrio para as populações amazônicas.

### **4.1. Acoplamento bibliográfico**

Os trabalhos dos autores do grupo 1A (Barbosa, F., Fillion, M. e Guimarães, JRD) foram desenvolvidos predominantemente no rio Tapajós, com foco na compreensão da exposição humana e possíveis influências dos hábitos alimentares, estilo de vida e indicadores ambientais (sedimento, solo, água e atmosfera) (Nyland et al. 2011).

Os estudos dos autores do grupo 2A (Dórea, JG) foram realizados em grande parte no rio Madeira (Rondônia), seguido do rio Negro (Amazonas) e do rio Tapajós (Pará), com o objetivo de avaliar o risco de exposição humana à Hg na região amazônica. Esses artigos relatam que as espécies pertencentes ao topo da cadeia alimentar aquática têm maiores concentrações de Hg (Hacon et al. 2014; Rodríguez Martín-Doimeadios et al. 2014; Bastos et al. 2015; Castilhos et al. 2015; Faial et al. . 2015; Olivero-Verbele et al. 2016; Langeland et al. 2017; Guida et al. 2018; Lino et al. 2018). Marques et al. (2014 e 2016) constataram que a escolaridade das mães influencia o resultado do neurodesenvolvimento da comunidade infantil, mas detectaram baixo nível de comprometimento, sem evidências do impacto dos níveis de EtHg e HHg.

O autor principal do grupo 3A, Malm, O., e seus colaboradores, trabalharam principalmente nos rios Madeira e Tapajós. Malm et al. (2010); Hacon et al. (2014); Guida et al. (2018) e Lino et al. (2018), demonstram que a concentração de Hg na população está relacionada ao consumo de peixes, com aumento, caso o consumo tenha sido de peixes carnívoros. Também comparam essas concentrações entre os rios Tapajós e Madeira, corroborando as afirmações do grupo 2A, com respostas semelhantes em ambos os grupos, como você pode ver a ligação entre os rios Fillion, M. (1A), Dórea, J.G. (2A) e Malm, O. (3A) grupos na Figura 03.

No cluster 4A, os autores se concentraram em estudos para avaliar os riscos de toxicidade do Hg, considerando o processo de bioacumulação de Hg em peixes e seu consumo pelas comunidades do rio Tapajós (Passos e Mergler 2008; Nyland et al. 2011; Olivero-Verbel J. et al. 2016). O conglomerado 5A, liderado pelo pesquisador Hsu-Kim, H., apresenta pesquisadores dos Estados Unidos que realizaram trabalhos com crianças no Peru na região do rio Madre de Dios. De acordo com Weinhouse et al. (2017), a exposição ao MeHg aumenta a probabilidade de anemia em ambientes de alto risco, especialmente aqueles em áreas de mineração. Além disso, Wyatt et al. (2019) relataram que mudanças nos níveis de anticorpos e proteção infantil foram associadas a indicadores de desnutrição, exposição ao Hg e sua interação.

O Grupo 1A (Barbosa, F., Fillion, M. e Guimarães, J.R.D) conecta-se ao grupo 3A (Mergler, D. e Malm, O.). Isso mostra que eles têm referências do trabalho um do outro. O Grupo 2A (Dórea, J.G.) cita os autores do grupo 1A (Barbosa, F., Fillion, M. e Guimarães, J.R.D.) e do grupo 3A (Mergler, D. e Malm, O.). O número de vínculos predomina no grupo 3A, com destaque para Malm, O. No grupo 4A, destacaram-se os pesquisadores Brabo, E. e Santos, E., por fazerem ligações com o grupo 2A (Dórea, J.G), e com o pesquisador Malm, O. (3A) como o núcleo. Finalmente, o grupo 5A (Hsu-Kim, H.) trabalha com a região amazônica peruana e não colabora com nenhum trabalho na região amazônica brasileira e seus autores. Embora exista um trabalho de referência conjunto, os novos pesquisadores já não se relacionam com os autores que tiveram maior notoriedade nos “clusters” no acoplamento bibliográfico.

## 4.2. Principais autores de pesquisa e análise de citações

As publicações mais citadas mostraram a rede dos principais autores e seus respectivos grupos de colaboradores: Cluster 1C (Akagi, H., Guimarães, J.R.D., Malm, O. Muller, R.C.S. e Roulet, M.); depois grupo 2C (Fillion, M., Lucotte, M. e Mergler, D.); finalmente, o cluster 3C (Barbosa, A.C., Bastos, W.R., Dórea, J.G., Malm, O. e Marques, R.C.). A Tabela 01 relaciona os 10 artigos mais citados na base de dados, com a participação dos referidos autores. Alguns autores são vistos em mais de 1 cluster, como é o caso de Malm, O. (1C e 3C). As médias de Hg estão acima de 10  $\mu\text{g g}^{-1}$  na maioria dos estudos e em 8 deles eles usaram a matriz do cabelo para avaliar a carga de mercúrio no corpo humano.

**Tabela 01. Trabalhos mais citados entre 1991 e 2019 com autores (ano), localização, bioindicador de exposição ao Hg e concentração média de Hg ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ).**

Classificação	Autores (ano)	Localidade	Bioindicador de exposição	Média Hg ( $\text{mg g}^{-1}$ )
1	Malm, O. (1998)	Brazilian Amazon	-	-
2	Lebel, J.; Mergler, D.; Branches, F.; Lucotte, M.; Amorim, M.; Larribe, F.; Dolbec, J. (1998)	Brasília Legal, Pará	Hair	>10
3	Grandjean, P.; White, R.F.; Nielsen, A.; Cleary, D.; Santos, E.C.O. (1999)	Tapajós river, Pará	Hair	>10
4	Malm, O.; Branches, F.J.P.; Akagi, H.; Castro, M.B.; Pfeiffer, W.C.; Harada, M.; Bastos, W.R.; Kato, H. (1995)	Tapajós river, Pará	Hair	15
5	Akagi, H.; Malm, O.; Branches, F.J.P.; Kinjo, Y.; Kashima, Y.; Guimarães, J.R.D.; Oliveira, R.B.; Haraguchi, K;	Alta Floresta, Mato Grosso e Jacareacanga, Pará	Hair	30

	Pfeiffer, W.C.; Takizawa, Y.; Kato, H. (1995)			
6	Dolbec, J.; Mergler, D.; Passos, C.J.S.; Sousa de Moraes, S.; Lebel, J. (2000)	Tapajós river, Pará	Hair	9
7	Akagi, H.; Malm, O.; Kinjo, Y.; Harada, M.; Branches, F.J.P.; Pfeiffer, W.C.; Kato, H. (1995)	Tapajós river, Pará	Hair	2
8	Lebel, J.; Roulet, M.; Mergler, D.; Lucotte, M.; Larribe, F. (1997)	Tapajós river, Pará	Hair	13.45
9	Guimarães, J.R.D.; Meili, M.; Hylander, L.D.; et al. (2000)	Tapajós river, Pará	-	-
10	Barbosa, A.C.; Jardim, W.; Dórea, J.G.; Fosberg, B.; Souza, J. (2001)	Negro river, Amazonas	Hair	>10

Fonte: Dados da pesquisa.

De acordo com a tabela de citações gerada pela Web of Science (WoS) Core Collection, os seguintes autores se destacaram como autores mais citados, com relevância e centralidade nos grupos "clusters": 1C (Guimarães, JRD e Malm, O.), 2C (Mergler, D.) e 3C (Dórea, JG). Em primeiro lugar ficou Dórea, J.G., o que se explica pela sua extensa e produtiva trajetória profissional, tendo trabalhado com quase todas as matrizes de exposição ao Hg com diversos co-autores. (Tabela 02).

**Tabela 02. Os 10 autores mais citados de 130 artigos analisados com registros**

Classificação	Autores citados	Registros
1	Dórea, J.G	90
2	Guimarães, J.R.D	53
3	Mergler, D.	53
4	Malm, O.	49
5	Bastos, W.R.	44
6	Lucotte, M.	43
7	Barbosa, F.	40
8	Crespo-Lopez, M.E.	28
9	Feng, X.B.	27
10	Marques, R.C.	27

Fonte: Dados da pesquisa.

### 4.3. Análise de tendência de palavras-chave

Na palavra-chave tendência, grande parte das populações estudadas estava exposta a diferentes fontes de Hg, com predomínio de MeHg (Dórea et al. 2012; Pinheiro et al. 2012; Hacon et al. 2014; Bastos et al. 2015; Marques et al. 2016; Arrifano et al. 2018). A palavra “exposição” ocupou a oitava posição no ranking de ocorrências, mas entre os 10 artigos mais citados, 7 deles continham a palavra “metilmercúrio” e / ou “mercúrio” (Tabela 03).

**Tabela 03. Classificação das 11 principais ocorrências de palavras-chave e força total do link**

Classificação	Palavras-Chave	Ocorrências	Total link de força
1	Methylmercury	64	413
2	Mercury	54	346
3	Amazon	48	333
4	Fish	51	327
5	Hair	43	296
6	Fish consumption	41	253

7	Basin	30	220
8	Exposure	31	195
9	Contamination	23	178
10	Brazilian Amazon	27	177
11	Methylmercury exposure	25	157

Fonte: VOSviewer™, versão 1.6.11 (Leiden, Holanda)

Outros autores (Valdelamar-Villegas, J. e Olivero-Verbel, J. 2019) afirmam que residentes de comunidades ribeirinhas são mais vulneráveis à exposição ao MeHg do que garimpeiros, devido ao consumo frequente de peixes. Lino et al. (2018) sugerem que a população estabeleça uma diminuição no consumo de peixes carnívoros e dê preferência ao consumo de espécies herbívoras e iliófagas, a fim de reduzir a exposição ao Hg. Na revisão de Basu et al. (2018), propõem que a população mundial está exposta a uma certa quantidade de mercúrio e que existe uma mobilidade de expoentes entre regiões e países.

### 5. CONCLUSÕES

A presente análise cienciométrica de 130 artigos mostrou que há conhecimento sobre a toxicidade do Hg na comunidade acadêmica. Os cientistas se comunicam, trabalham com objetivos comuns e existe uma rede de coautores. As discussões dos trabalhos permitiram perceber uma lacuna em relação ao quanto a exposição ao Hg e ao MeHg é considerada segura. Além disso, a fonte de exposição ao Hg para as populações amazônicas foi inconclusiva. Os artigos buscados para esta análise evidenciam que a exposição ao MeHg afeta o bem-estar e a saúde da população. Este estudo sugere que é necessário desenvolver programas padronizados de biomonitoramento para permitir comparações e tendências gerais. Além disso, esforços adicionais são necessários para integrar os bancos de dados para fins de avaliação de risco. Finalmente, permanece difícil concluir sobre as implicações para a saúde pública da exposição ao Hg na Amazônia. Os riscos à saúde humana estão associados a uma variedade de aspectos sociais e econômicos e precisam ser avaliados no contexto local da Amazônia.

### 6. REFERÊNCIAS

- Arrifano, G.P.F.; Martin-Doimeadios, R.C.R.; Jimenez-Moreno, M.; Ramirez-Mateos, V.; da Silva, N.F.S.; Souza-Monteiro, J.R. *et al.* 2018. **Large-scale projects in the amazon and human exposure to mercury: The case-study of the Tucuruí Dam.** *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 299-305.
- Arrifano, G.P.F.; Martin-Doimeadios, R.C.R.; Jimenez-Moreno, M.; Fernandez-Trujillo, S.; Augusto-Oliveira, M.; Souza-Monteiro, J.R. *et al.* 2018. **Genetic Susceptibility to Neurodegeneration in Amazon: Apolipoprotein E Genotyping in Vulnerable Populations Exposed to Mercury.** *Frontiers in Genetics*, 9(285).
- Bastos, W.R.; Dórea, J.G.; Bernardi, J.V.E.; Lauthartte, L.C.; Mussy, M.H.; Lacerda, L.D.; Malm, O. 2015. **Mercury in fish of the Madeira River (temporal and spatial assessment), Brazilian Amazon.** *Environmental Research*, 140, 191-197.
- Basu, N.; Horvat, M.; Evers, D.C.; Zastenskaya, I.; Weihe, P.; Tempowski, J. A. 2018 **A State-of-the-Science Review of Mercury Biomarkers in Human Populations Worldwide between 2000 and 2018.** *Environmental Health Perspectives*, 126(10), 106001.
- Castilhos, Z.; Rodrigues-Filho, S.; Cesar, R.; Rodrigues, A.P.; Villas-Bôas, R.; Jesus, I. *et al.* 2015. **Human exposure and risk assessment associated with Mercury contamination in artisanal gold mining areas in the Brazilian Amazon.** *Environmental Science and Pollution Research*, 22(15), 11255-11264.

Dórea, J.G.; Marques, R.C.; Isejima, C. 2012. **Neurodevelopment of Amazonian Infants: Antenatal and Postnatal Exposure to Methyl-and Ethylmercury.** Journal of Biomedicine and Biotechnology, 1-9.

Eagles-Smith, C.A.; Silbergeld, E.K.; Basu, N.; Bustamante, P.; Diaz-Barriga, F.; Hopkins, W.A.; Kidd, K.A.; Nyland, J.F. 2018. **Modulators of mercury risk to wildlife and humans in the context of rapid global change,** Ambio, 47.

Faial, K.; Deus, R.; Deus, S.; Neves, R.; Jesus, I.; Santos, E. Alves, C.N.; Brasil, D. 2015. **Mercury levels assessment in hair of riverside inhabitants of the Tapajos River, Para State, Amazon, Brazil: Fish consumption as a possible route of exposure.** Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 30, 66-76.

Fonseca, M.D.; Hacon, S.D.; Grandjean, P.; Choi, A.L.; Bastos, W.R. 2014. **Iron status as a covariate in methylmercury-associated neurotoxicity risk.** Chemosphere, 100, 89-96.

Freitas, J.D.; Lacerda, E.M.D.B.; Martins, I.C.V.D.; Rodrigues, D.; Bonci, D.M.O.; Cortes, M.I.T. *et al.* 2018. **Cross-sectional study to assess the association of color vision with mercury hair concentration in children from Brazilian Amazonian riverine communities.** Neurotoxicology, 65, 60-67.

Guida, Y. de S.; Lino, A.S.; Nepomuceno, R.C.G.; Meire, R.O.; Torres, J.P.M.; Malm, O. 2018. **Amazon Riparian People's Exposure to Legacy Organochlorine Pesticides and Methylmercury from Catfish (*Ageneiosus brevifilis*) Intake.** Orbital the Eletronic Journal of Chemistry, 10(4), 320-326.

Ha, E.; Basu, N.; Bose-O'Reilly, S.; Dórea, J.G.; McSorley, E.; Sakamoto, M.; Chan, H.M. 2016. **Current progress on understanding the impact of mercury on human health.** Environmental Research, 152, 419-433.

Langeland, A.L.; Hardin, R.D.; Neitzel, R.L. 2017. **Mercury Levels in Human Hair and Farmed Fish near Artisanal and Small-Scale Gold Mining Communities in the Madre de Dios River Basin, Peru.** International Journal of Environmental Research and Public Health, 14(3), 302.

Lino, A.S.; Kasper, D.; Guida, Y.S.; Thomaz, J.R.; Malm, O. 2018. **Mercury and selenium in fishes from the Tapajos River in the Brazilian Amazon: An evaluation of human exposure.** Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 48, 196-201.

Malm, O.; Dórea, J.G.; Barbosa, A.C.; Pinto, F.N.; Weihe, P. 2010. **Sequential hair mercury in mothers and children from a traditional riverine population of the Rio Tapajós, Amazonia: Seasonal changes.** Environmental Research, 110(7), 705-709.

Marques, R.C.; Bernardi, J.V.E.; Dórea, J.G.; Moreira, M.D.R.; Malm, O. 2014. **Perinatal multiple exposure to neurotoxic (lead, methylmercury, ethylmercury, and aluminum) substances and neurodevelopment at six and 24 months of age.** Environmental Pollution, 187, 130-135.

Marques, R.C.; Abreu, L.; Bernardi, J.V.E.; Dórea, J.G. 2016. **Traditional living in the Amazon: Extended breastfeeding, fish consumption, mercury exposure and neurodevelopment.** Annals of Human Biology, 43(4), 360-370.

Marques, R.C.; Abreu, L.; Bernardi, J.V.E.; Dórea, J.G. 2016. **Neurodevelopment of Amazonian children exposed to ethylmercury (from Thimerosal in vaccines) and methylmercury (from fish).** Environmental Research, 149, 259-265.

Marques, R.C.; Bernardi, J.V.E.; Cunha, M.P.L.; Dórea, J.G. 2016. **Impact of organic mercury exposure and home delivery on neurodevelopment of Amazonian children.** International Journal of Hygiene and Environmental Health, 219(6), 498-502.

Nyland, J.F.; Fillion, M.; Barbosa, F.; Shirley, D.L.; Chine, C.; Lemire, M. 2011. **Biomarkers of methylmercury exposure immunotoxicity among fish consumers in Amazonian Brazil.** Environmental Health Perspectives. 119(12), 1733-1738.

Olivero-Verbel, J.; Carranza-Lopez, L.; Caballero-Gallardo, K.; Ripoll-Arboleda, A.; Muñoz-Sosa, D. 2016. **Human exposure and risk assessment associated with mercury pollution in the Caqueta River, Colombian Amazon.** Environmental Science and Pollution Research, 23(20), 20761-20771.

Passos, C.J.S.; Mergler, D. 2008. **Human mercury exposure and adverse health effects in the Amazon: a review.** Cadernos de saúde pública, 24(supl 4), s503–s520.

Pinheiro, M.C.; Farripas, S.S.; Oikawa, T.; Costa, C.A.; Amoras, W.W.; Vieira, J.L.; Silveira, A.J.; Lima, A.C.; Souza, G.S.; Silveira, L.C. 2012. **Temporal Evolution of Exposure to Mercury in Riverside Communities in the Tapajós Basin, from 1994 to 2010.** Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 89 (1), 119-124.

Ratcliffe, H.E.; Swanson, G.M.; Fischer, L.J. 2015. **Human Exposure to Mercury: A Critical Assessment of the Evidence of Adverse Health Effects.** Journal of Toxicology and Environmental Health.

Rodríguez Martín-Doimeadios, R.C.; Berzas Nevado, J.J.; Guzmán Bernardo, F.J.; Jimenez Moreno, M.; Arrifano, G.P.; Herculano, A.M.; Do Nascimento, J.L.; Crespo-López, M.E. 2014. **Comparative study of mercury speciation in commercial fishes of the Brazilian Amazon.** Environmental Science and Pollution Research. 21(12), 7466-7479.

Valdelamar-Villegas, J. and Olivero-Verbel, J. 2019. **High Mercury Levels in the Indigenous Population of the Yaigojé Apaporis National Natural Park, Colombian Amazon.** Biological Trace Element Research.

Weinhouse, C.; Ortiz, E.J.; Berky, A.J.; Bullins, P.; Hare-Grogg, J. *et al.* 2017. **Hair Mercury Level is Associated with Anemia and Micronutrient Status in Children Living Near Artisanal and Small-Scale Gold Mining in the Peruvian Amazon.** American Journal of Tropical Medicine and Hygiene, 97(6), 1886-1897.

Wyatt, L.; Permar, S.R.; Ortiz, E.; Berky, A.; Woods, C.W.; Amouou, G.F.; Itell, H.; Hsu-Kim, H.; Pan, W. *et al.* 2019. **Mercury Exposure and Poor Nutritional Status Reduce Response to Six Expanded Program on Immunization Vaccines in Children: An Observational Cohort Study of Communities Affected by Gold Mining in the Peruvian Amazon.** International Journal of Environmental Research and Public Health, 16 (4), 638.