



**GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS-TRAÇO EM SÓLIDOS EM SUSPENSÃO  
NO ALTO RIO MADEIRA, RONDÔNIA, BRASIL**

J.P.O. Gomes<sup>1,2\*</sup>; E.L. Nascimento<sup>1</sup>; W.R. Bastos<sup>1\*\*</sup>; J.V.E. Bernardi<sup>1</sup>; L.D. Lacerda<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Biogeoquímica Ambiental, Fundação Universidade Federal de Rondônia – UNIR, Rodovia BR 364, km 9,5, CEP: 78.900-510, Porto Velho, RO, Brasil

<sup>2</sup> Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, Av. Jorge Teixeira, 3559, Porto Velho, RO, Brasil

<sup>3</sup> Laboratório de Biogeoquímica Costeira, Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR, Universidade Federal do Ceará – UFC, Av. Abolição, 3207, CEP: 60.165-081, Meireles, Fortaleza, CE, Brasil

E-mail: \*joapaulo@unir.br; \*\*bastoswr@unir.br

Recebido em 04/07, aceito para publicação em 01/08

**ABSTRACT**

*The objective this work is to evaluate the suspended solids load and the trace elements concentrations in suspended solids (Cd, Cr, Cu, Zn, Pb, Fe, Co, Mn and Hg) through principal components analysis (PCA) in the Upper Madeira River and some of its tributaries. The Upper Madeira River presents a natural flow of trace elements except for the Hg, which clearly shows anthropogenic influence. The largest concentrations were of Fe and Mn, due to the dominant soils types of the basin, where oxisols prevail. The trace elements considered as industrial tracers (Cd, Cr and Pb) presented low concentrations due to their low natural concentrations and lack of industrial sources. The principal components analysis of the geochemical variables in suspended solids demonstrates the different influences in trace elements flow are related to marginal soils, agricultural activities, extension of flood-plains and the influence of tributaries. Suspended solids in the Madeira River originate from tertiary Andean rocky formations and receive marginal soils runoff along of the river extension. In the case of Hg, marginal soils and tributaries closer to the gold mining areas are the possible sources related to the increase in Hg concentrations in suspended solids.*

**RESUMO**

Este trabalho apresenta uma estimativa da carga de sólidos em suspensão e de sua concentração de metais traço (Cd, Cr, Cu, Zn, Pb, Fe, Co, Mn e Hg), através de uma análise de componentes principais, ao longo da secção superior do Rio Madeira e alguns de seus tributários. A secção superior do Rio Madeira apresenta um fluxo natural para os metais estudados com exceção do Hg, que apresenta claramente uma influência antrópica. As maiores concentrações dos metais analisados foram de Fe e Mn devido aos solos oxisols dominantes na bacia de drenagem. Os metais considerados

como traçadores de influências industriais (Cd, Cr e Pb) apresentaram baixas concentrações devido a ausência destas atividades na bacia. A análise de componentes principais das variáveis geoquímicas estudadas nos sólidos em suspensão demonstrou diferentes influências sobre suas concentrações e fluxos estando relacionadas às atividades agrícolas, extensão das áreas alagadas marginais e a influência dos tributários. Os sólidos em suspensão no Rio Madeira se originam nas formações terciárias dos Andes e recebem escoamento dos solos marginais ao longo de toda a extensão do rio pesquisada. No caso do Hg, os solos marginais e tributários localizados próximos a áreas de garimpo são as principais fontes relacionadas ao aumento nas concentrações deste metal.

## INTRODUÇÃO

A bacia de drenagem do Rio Madeira devido a sua importância quanto ao fluxo de sólidos em suspensão carregados ao Rio Amazonas tem sido avaliada por vários autores (Sioli, 1967; Martinelli *et al.*, 1989; Mortatti *et al.*, 1989; Guyot *et al.*, 1999; Filizola-Júnior, 1999). O Rio Madeira transporta uma grande carga de sólidos em suspensão na ordem de  $40 \times 10^6 \text{ t.ano}^{-1}$  (Guyot *et al.*, 1999), o que representa 35% da carga sólida total transportada pelo Rio Amazonas ao Oceano Atlântico (Filizola-Júnior, 1999). Portanto, o Rio Madeira torna-se, principalmente nos períodos de chuva, um importante veículo de transporte e dispersão de elementos-traço adsorvidos aos sólidos em suspensão para toda a Bacia Amazônica. Deste modo, a dinâmica dos sólidos em suspensão é um fator chave para se entender o funcionamento ecológico, ambiental e geoquímico deste rio com grande representação na Bacia Hidrográfica Amazônica (Sioli, 1967).

Na região do Alto Rio Madeira os estudos referentes a elementos-traço estão focados principalmente em pesquisas sobre a contaminação ambiental pelo mercúrio (Hg) decorrente da atividade garimpeira de ouro de aluvião, realizada desde a década de 70. Estima-se que na Bacia do Rio Madeira de 68 t a 90 t de Hg foram lançadas para o meio ambiente entre as décadas de 80 e 90, conforme estimativas baseadas na produção oficial de ouro e por estimativa da produção não registrada (Pfeiffer & Lacerda, 1988; Lacerda, 2003). Entre os estudos realizados nesta região podem-se citar os trabalhos de Lacerda *et al.* (1987); Martinelli *et al.* (1988); Pfeiffer & Lacerda (1988); Malm *et al.* (1991); Lechler *et al.* (2000); Maurice-Bourgoin *et al.* (2000); Bonotto & Silveira (2003); Bastos & Lacerda (2004); Gomes *et al.* (2006) e Bastos *et al.* (2005; 2006; 2007). Porém, os estudos sobre o contexto da mineração de ouro no Alto Rio Madeira não levaram em consideração o impacto de outros elementos-traço como Pb, Cr, Cu, Zn e Fe, presentes em soldas e chapas metálicas, tintas (usadas até hoje na pintura dos cascos das embarcações), entre outros produtos utilizados na fabricação de balsas, dragas e outras embarcações usadas no garimpo. Além do enriquecimento desses metais, realizado pelo processo gravimétrico utilizado pelos garimpeiros durante a pré-concentração dos elementos pesados na busca do ouro. Estudos referentes às concentrações desses elementos-traço, portanto, são escassos na região, principalmente em relação às concentrações adsorvidas aos sólidos em suspensão, que geralmente aparecem como coadjuvantes em publicações maiores sobre o contexto da contaminação mercurial.

O estudo do padrão de distribuição dos elementos-traço auxilia a compreensão dos processos geoquímicos que controlam a hidroquímica dos sistemas fluviais (Zhang

& Selinus, 1997). Em procedimentos de avaliação geoquímica com muitas amostras e variáveis, uma das formas de avaliar mutuamente o conjunto de dados gerados é a análise estatística multivariada. O propósito desta análise é produzir uma ordenação das variáveis, em um número pequeno que dê ênfase aos principais padrões de variação, indicando assim as variáveis de maior importância (Landim, 1998). Entre os métodos de estatística multivariada a análise das componentes principais (PCA) vem sendo utilizada com bastante relevância por vários pesquisadores da área ambiental (Berg *et al.*, 1995; Yamasoe *et al.*, 2000; Wenchuan *et al.*, 2001; Bernardi *et al.*, 2001) para ordenação e redução do número de variáveis, representando estatisticamente os principais padrões de variação do conjunto de dados.

Esta proposta de estudo se torna muito importante na região, uma vez que a Bacia do Rio Madeira vem sendo explorada desde a década de 70 pela atividade garimpeira de ouro e, mais recentemente, pela atividade agropecuária nas cabeceiras e ao longo do curso do rio. Este tipo de uso, sem um manejo adequado, tem acelerado o processo de erosão através do escoamento superficial da água das chuvas após lavagem e lixiviação dos solos da região, carreando elementos-traço para o talvegue dos rios. Para se avaliar as diferentes influências dos processos naturais e atividades antrópicas no material carregado pelo Rio Madeira, foi estudada a relação entre os sólidos em suspensão e as concentrações de elementos-traço em dois períodos sazonais – vazante e cheia - através da análise de componentes principais no trecho do Alto Rio Madeira no Estado de Rondônia.

## **ÁREA DE ESTUDO**

O Rio Madeira é o maior tributário da margem direita do Rio Amazonas, tendo 1.459 km de extensão, a partir da confluência dos seus rios formadores Mamoré e Beni, até a sua foz no Rio Amazonas, com vazão média de  $23.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , variando entre  $5.000$  a  $45.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , (SEDAM, 2002). Seus rios formadores são originários ou recebem grande influência dos Altiplanos Andinos, cuja região de relevo elevado, origina-se de rochas vulcano-sedimentares de idade Terciária, que são intensamente arrasadas pelas geleiras e suas partículas são transportadas pelo degelo até os rios da planície. Estes recebem grandes aportes de partículas sedimentares fazendo com que o Rio Madeira apresente características limnológicas de um rio de águas brancas, rico em material dissolvido e particulado e com transparência média entre 10 a 50 cm (Sioli, 1967).

A rede de drenagem do Rio Madeira apresenta trechos de embasamento meandrante e sedimentar, estando localizada na Plataforma ou Cráton Amazônico. No seu percurso atravessa vários tipos de solos, cujo grupo mais representativo são os latossolos, que são solos bastante intemperizados, apresentando como principais minerais derivados da argila a caolinita e a gipsita, minerais amorfos e sesquióxidos de ferro e alumínio.

A área de estudo situa-se no Alto Rio Madeira, compreendendo desde a sua formação pelos Rios Mamoré e Beni, seus tributários da margem direita (Rio Jaci-Paraná e Rio Mutum-Paraná) e seu mais importante tributário da margem esquerda (Rio Abunã), chegando até a Cachoeira de Santo Antônio – Porto Velho (Figura 1). Neste trecho de cerca de 360 km, o Rio Madeira apresenta 18 cachoeiras com desnível de cerca de 72 m e índice de declividade de  $20 \text{ cm} \cdot \text{km}^{-1}$ .

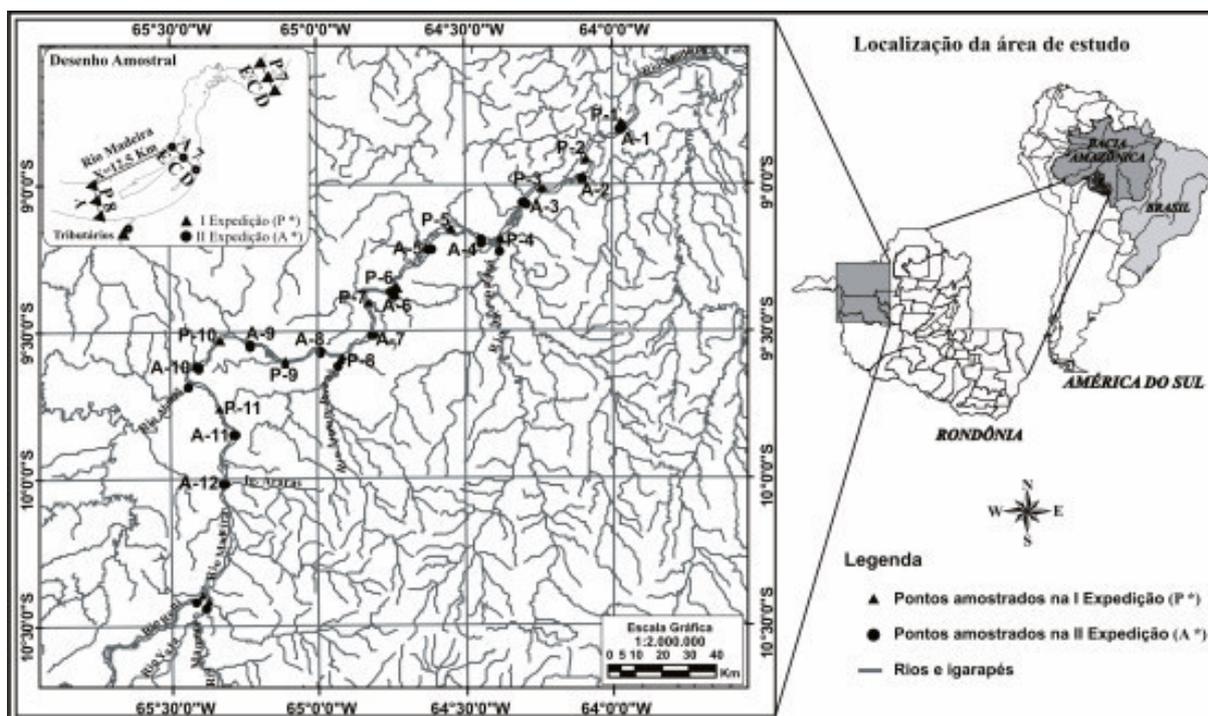


Figura 1: Localização dos pontos de amostragem ao longo do Alto Rio Madeira, RO.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A amostragem de sólidos em suspensão foi realizada em duas expedições usando-se os períodos de vazante (22 a 25 de novembro de 2003) e cheia (22 a 25 de fevereiro de 2004) como parâmetros sazonais. O desenho experimental foi baseado em uma amostragem sistemática em malha proposta por Bernardi *et al.* (2001), com a marcação de pontos de coleta em imagens de satélite LANDSAT-TM 7. A malha amostral aferida em campo através da coleta de coordenadas geográficas com receptores de GPS (GARMIN's® 48 Personal Navigator™). A malha experimental foi composta de 23 *transectos* de amostragem no Rio Madeira, sendo 3 pontos por *transecto* estabelecidos nas margens esquerda (P\*E e A\*E) e direita (P\*D e A\*D) e um ponto no canal central (P\*C e A\*C) do Rio, constituindo-se 69 pontos de amostragem no Alto Rio Madeira (Tabelas 1 e 2). Também foram amostrados pontualmente no canal principal do Rio, os principais tributários do Alto Rio Madeira: Rio Mutum-Paraná; Rio Abunã; Rio Jaci-Paraná; Rio Mamoré e Rio Beni (Figura 1), totalizando 79 amostras coletadas nos dois períodos.

A coleta das amostras foi realizada em garrações de polietileno previamente descontaminados durante 24 h em solução de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) a 5% e enxaguados com água ultra pura (MILLI-Q 18.2M $\Omega$ , Millipore, USA). As amostras foram coletadas à cerca de 25 cm abaixo da superfície da água, obtendo-se de forma geral uma maior composição de partículas <63  $\mu\text{m}$  ou 250 *mesh*, estas são matrizes chave no transporte de elementos-traço. Pois, segundo Richey *et al.* (1986), a maioria do material em suspensão do Rio Amazonas é classificado como sedimento fino (<63  $\mu\text{m}$ ). Sendo o mesmo padrão de transporte observado no Rio Madeira, onde a fração grosseira dos sólidos em suspensão apresenta-se na ordem de 20 a 30% da concentração do sedimento fino.

Em laboratório as amostras foram submetidas a um processo de filtragem a vácuo, passando-se uma alíquota da amostra por um filtro de celulose, previamente

seco (60°C, 24 h) e pré-pesado (PI), de 0,45 µm de diâmetro de poro (Millipore, USA). Após a filtração de um volume conhecido (~1L), os filtros foram colocados em estufa à ± 60°C por 24 horas. Sendo em seguida pesados novamente (PF), obtendo-se a quantidade de sólidos em suspensão em mg.L<sup>-1</sup> através da diferença de PI e PF e o volume filtrado (Meade *et al.*, 1985). Para garantir maior confiabilidade aos dados foram feitas quadruplicatas de cada ponto amostrado obtendo-se um baixo coeficiente de variação para todos os pontos amostrados ( $\bar{X}$ = 4,19%). Posteriormente, as amostras foram submetidas a extrações ácidas seguindo-se os procedimentos de Bastos *et al.* (1998) para Hg e da Apha (1971) e Sastre *et al.* (2002) para os demais metais. Baseando-se de forma geral em uma extração com ácido nítrico (HNO<sub>3</sub> 65%) e ácido clorídrico (HCl 37%), obtendo-se assim uma solução com os elementos-traço que estão fortemente adsorvidos às matrizes cristalinas. Esta técnica não extrai, entretanto, os elementos da matriz geológica.

Para o controle de qualidade analítico dos resultados as amostras foram analisadas em duplicatas e acompanhadas de brancos controles. Também foram utilizadas amostras de referência certificadas (IAEA-356, com 96% de recuperação e DC73307, com 97% de recuperação).

As análises quantitativas dos elementos-traço presentes nos sólidos em suspensão foram realizadas por espectrofotometria de absorção atômica de chama convencional (AAS) em um equipamento GBC-AVANTA, Modelo-3000. A determinação de Hg total foi realizada por AAS com sistema de injeção em fluxo (Perkin-Elmer, *Flow Injection Mercury System* - FIMS 400, Alemanha). Para os cálculos estatísticos utilizou-se o programa STATISTIC, versão 6.0 (StatSoft Inc., 2001).

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nas tabelas 1 e 2 estão apresentados os valores estatísticos univariados das variáveis geoquímicas do Rio Madeira nos dois períodos sazonais. Os valores estatísticos médios das variáveis geoquímicas dos pontos amostrados no Rio Madeira apresentaram variações de médias a altas, demonstrando que existem valores afastados da média regional, evidenciando desvios padrões e coeficientes de variação médios e altos para a maioria dos elementos, principalmente na época de vazante (ex. Hg, Zn, Mn e Fe). Em termos médios o período de vazante apresenta maiores concentrações de Co, Cu, Hg e Mn adsorvidos aos sólidos em suspensão. Já o período de cheia apresenta maiores concentrações de Cr, Pb, Zn e Fe.

Os resultados obtidos no transsecto do P1 (Tabela 1), região entre as cachoeiras de Teotônio e Santo Antônio, mostram-se abaixo dos valores encontrados por Bonotto & Silveira (2003) no mesmo trecho, para Fe (75.776 µg.g<sup>-1</sup>), Zn (723 µg.g<sup>-1</sup>), Pb (712 µg.g<sup>-1</sup>), Cu (593 µg.g<sup>-1</sup>) e Mn (1.217 µg.g<sup>-1</sup>). Esta divergência de valores esta relacionada ao método analítico empregado pelos autores para extração total dos elementos-traços presentes nas partículas em relação ao método de extração parcial realizado neste trabalho. Demonstrando que na componente cristalina das partículas sedimentares existem altas concentrações de elementos-traço, portanto, não biodisponíveis.

Neste estudo os valores médios de Hg adsorvidos aos sólidos em suspensão no Rio Madeira (Tabelas 1 e 2) estão acima dos valores encontrados por Maurice-Bourgoin *et al.* (2000) em seu estudo sobre o transporte de Hg proveniente das regiões

**Tabela 1:** Concentração de elementos-traço em sólidos em suspensão ao longo do Alto Rio Madeira no período de Vazante (novembro - 2003). Sólidos em suspensão (SS) em mg.L<sup>-1</sup>. Elementos-traço em µg.g<sup>-1</sup>. (n= 33). ME – margem esquerda; C – canal central; MD – margem direita.

| Código PCA              | Pontos de coleta | SS mg.L <sup>-1</sup> | Co µg.g <sup>-1</sup> | Cu µg.g <sup>-1</sup> | Cr µg.g <sup>-1</sup> | Pb µg.g <sup>-1</sup> | Hg µg.g <sup>-1</sup> | Zn µg.g <sup>-1</sup> | Mn µg.g <sup>-1</sup> | Fe µg.g <sup>-1</sup> |
|-------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1                       | P1 ME            | 296                   | 8,7                   | 20,0                  | 13,6                  | 9,4                   | 0,048                 | 0,6                   | 373                   | 33.397                |
| 2                       | P1 C             | 333                   | 8,6                   | 21,6                  | 22,5                  | 12,9                  | 0,037                 | 88,6                  | 413                   | 25.816                |
| 3                       | P1 MD            | 311                   | 10,1                  | 22,6                  | 16,8                  | 10,1                  | 0,046                 | 19,3                  | 480                   | 38.272                |
| 4                       | P2 ME            | 270                   | 8,3                   | 21,6                  | 16,9                  | 9,5                   | 0,045                 | 0,3                   | 355                   | 36.464                |
| 5                       | P2 C             | 305                   | 9,5                   | 19,4                  | 19,9                  | 13,8                  | 0,042                 | 9,3                   | 354                   | 32.659                |
| 6                       | P2 MD            | 467                   | 11,1                  | 21,2                  | 13,5                  | 9,3                   | 0,046                 | 32,7                  | 483                   | 35.490                |
| 7                       | P3 ME            | 274                   | 9,2                   | 23,3                  | 14,7                  | 10,9                  | 0,045                 | 1,7                   | 431                   | 39.344                |
| 8                       | P3 C             | 292                   | 9,4                   | 26,9                  | 21,6                  | 11,4                  | 0,061                 | 90,1                  | 480                   | 26.527                |
| 9                       | P3 MD            | 516                   | 10,7                  | 18,6                  | 13,4                  | 9,5                   | 0,043                 | 40,2                  | 526                   | 36.534                |
| 10                      | P4 ME            | 277                   | 9,2                   | 20,8                  | 23,7                  | 14,9                  | 0,045                 | 97,1                  | 450                   | 21.900                |
| 11                      | P4 C             | 314                   | 10,6                  | 23,7                  | 20,5                  | 10,9                  | 0,062                 | 117                   | 537                   | 39.491                |
| 12                      | P4 MD            | 243                   | 8,4                   | 22,2                  | 19,9                  | 12,0                  | 0,070                 | 87,2                  | 507                   | 18.491                |
| 13                      | P5 ME            | 307                   | 11,1                  | 22,8                  | 14,3                  | 9,3                   | 0,045                 | 14,9                  | 486                   | 35.336                |
| 14                      | P5 C             | 307                   | 8,7                   | 20,8                  | 20,4                  | 11,0                  | 0,051                 | 86,9                  | 378                   | 26.009                |
| 15                      | P5 MD            | 241                   | 8,5                   | 25,7                  | 18,3                  | 14,1                  | 0,039                 | 57,9                  | 466                   | 42.451                |
| 16                      | P6 ME            | 426                   | 9,4                   | 20,2                  | 13,9                  | 10,8                  | 0,066                 | 38,2                  | 827                   | 37.033                |
| 17                      | P6 C             | 347                   | 8,0                   | 19,3                  | 21,2                  | 12,2                  | 0,045                 | 89,1                  | 238                   | 31.837                |
| 18                      | P6 MD            | 319                   | 9,9                   | 22,4                  | 14,7                  | 11,3                  | 0,042                 | 16,1                  | 675                   | 38.402                |
| 19                      | P7 ME            | 332                   | 9,1                   | 20,9                  | 16,3                  | 12,5                  | 0,045                 | 16,9                  | 447                   | 36.663                |
| 20                      | P7 C             | 331                   | 9,1                   | 21,5                  | 14,6                  | 9,6                   | 0,039                 | 28,4                  | 467                   | 34.378                |
| 21                      | P7 MD            | 365                   | 9,9                   | 19,6                  | 15,9                  | 12,7                  | 0,042                 | 31,2                  | 472                   | 37.811                |
| 22                      | P8 ME            | 333                   | 9,3                   | 21,3                  | 16,6                  | 11,9                  | 0,040                 | 18,4                  | 430                   | 35.284                |
| 23                      | P8 C             | 351                   | 6,3                   | 20,1                  | 14,4                  | 11,0                  | 0,087                 | 10,6                  | 210                   | 37.539                |
| 24                      | P8 MD            | 346                   | 10,7                  | 21,9                  | 16,6                  | 12,5                  | 0,042                 | 36,4                  | 438                   | 35.300                |
| 25                      | P9 ME            | 424                   | 7,3                   | 21,7                  | 13,9                  | 11,0                  | 0,040                 | 64,8                  | 518                   | 35.838                |
| 26                      | P9 C             | 370                   | 7,1                   | 22,6                  | 14,9                  | 10,8                  | 0,052                 | 33,9                  | 651                   | 40.250                |
| 27                      | P9 MD            | 292                   | 8,6                   | 20,7                  | 14,6                  | 11,2                  | 0,046                 | 12,0                  | 400                   | 36.733                |
| 28                      | P10 ME           | 238                   | 8,7                   | 23,9                  | 15,7                  | 10,3                  | 0,041                 | 9,7                   | 425                   | 40.173                |
| 29                      | P10 C            | 336                   | 10,7                  | 22,9                  | 16,3                  | 10,8                  | 0,040                 | 19,7                  | 499                   | 41.775                |
| 30                      | P10 MD           | 293                   | 8,8                   | 22,8                  | 14,9                  | 10,2                  | 0,039                 | 17,3                  | 463                   | 37.462                |
| 31                      | P11 ME           | 403                   | 8,8                   | 20,2                  | 20,2                  | 10,6                  | 0,052                 | 91,8                  | 396                   | 66.656                |
| 32                      | P11 C            | 332                   | 8,1                   | 20,1                  | 21,8                  | 10,2                  | 0,061                 | 115                   | 345                   | 27.979                |
| 33                      | P11 MD           | 316                   | 7,9                   | 20,2                  | 20,4                  | 2,7                   | 0,066                 | 86,2                  | 366                   | 25.771                |
| <b>Média Aritmética</b> |                  | 331                   | 9,1                   | 21,6                  | 17,2                  | 10,9                  | 0,049                 | 47,4                  | 454,2                 | 35.304                |
| <b>Desvio Padrão</b>    |                  | 62                    | 1,1                   | 1,8                   | 3,1                   | 2,1                   | 0,011                 | 37,2                  | 114,7                 | 8.074                 |
| <b>Mínimo</b>           |                  | 238                   | 6,3                   | 18,6                  | 13,4                  | 2,7                   | 0,037                 | 0,3                   | 209,8                 | 18.490                |
| <b>Máximo</b>           |                  | 516                   | 11,1                  | 26,9                  | 23,7                  | 14,9                  | 0,087                 | 117,5                 | 827,2                 | 66.655                |
| <b>Coef. Var.</b>       |                  | 19%                   | 13%                   | 8%                    | 18%                   | 19%                   | 23%                   | 79%                   | 25%                   | 23%                   |

do Rio Beni (0,002 – 0,008 µg.g<sup>-1</sup>), e no Rio Madeira (0,010 µg.g<sup>-1</sup>). Em relação ao estudo de Ayres *et al.* (2004), sobre a distribuição de Hg no Baixo Rio Madeira observa-se que no Alto Rio Madeira (dados deste estudo) as concentrações de Hg são mais baixas do que as encontradas no Baixo Rio Madeira, onde foram relatados valores entre 0,068 e 0,251 µg.g<sup>-1</sup> (em 1997) e 0,096 a 0,122 µg.g<sup>-1</sup> (em 2002). Os valores mais

**Tabela 2:** Concentração de elementos-traço nos sólidos em suspensão dos pontos amostrados no Alto Rio Madeira no período de Cheia (fevereiro - 2004). Sólidos em suspensão (SS) em mg.L<sup>-1</sup>. Elementos-traço em µg.g<sup>-1</sup>. (n= 36). ME – margem esquerda; C – canal central; MD – margem direita.

| <b>Código PCA</b> | <b>Pontos de coleta</b> | <b>SS mg.L<sup>-1</sup></b> | <b>Co µg.g<sup>-1</sup></b> | <b>Cu µg.g<sup>-1</sup></b> | <b>Cr µg.g<sup>-1</sup></b> | <b>Pb µg.g<sup>-1</sup></b> | <b>Hg µg.g<sup>-1</sup></b> | <b>Zn µg.g<sup>-1</sup></b> | <b>Mn µg.g<sup>-1</sup></b> | <b>Fe µg.g<sup>-1</sup></b> |
|-------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1                 | A1ME                    | 514                         | 8,9                         | 18,9                        | 11,1                        | 14,6                        | 0,048                       | 86,3                        | 419                         | 32.921                      |
| 2                 | A1C                     | 403                         | 9,0                         | 21,5                        | 16,5                        | 16,7                        | 0,050                       | 87,5                        | 456                         | 38.837                      |
| 3                 | A1MD                    | 514                         | 9,4                         | 18,7                        | 15,2                        | 14,9                        | 0,052                       | 85,0                        | 421                         | 35.943                      |
| 4                 | A2ME                    | 496                         | 9,3                         | 19,0                        | 15,7                        | 15,9                        | 0,049                       | 90,2                        | 433                         | 35.904                      |
| 5                 | A2C                     | 403                         | 8,4                         | 19,8                        | 13,3                        | 15,6                        | 0,048                       | 106,9                       | 392                         | 40.829                      |
| 6                 | A2MD                    | 815                         | 11,0                        | 18,7                        | 15,4                        | 14,4                        | 0,047                       | 94,5                        | 676                         | 35.199                      |
| 7                 | A3ME                    | 539                         | 9,9                         | 22,0                        | 22,1                        | 15,8                        | 0,045                       | 94,6                        | 433                         | 41.933                      |
| 8                 | A3C                     | 527                         | 10,1                        | 20,8                        | 19,5                        | 15,2                        | 0,044                       | 95,1                        | 468                         | 36.570                      |
| 9                 | A3MD                    | 614                         | 9,6                         | 19,1                        | 15,3                        | 12,5                        | 0,048                       | 91,9                        | 418                         | 35.275                      |
| 10                | A4ME                    | 561                         | 9,9                         | 20,2                        | 18,6                        | 14,3                        | 0,045                       | 94,9                        | 459                         | 36.652                      |
| 11                | A4C                     | 559                         | 9,3                         | 19,1                        | 17,5                        | 12,5                        | 0,084                       | 94,0                        | 431                         | 34.552                      |
| 12                | A4MD                    | 431                         | 9,1                         | 21,9                        | 20,9                        | 15,4                        | 0,046                       | 121,1                       | 466                         | 39.190                      |
| 13                | A5ME                    | 568                         | 9,2                         | 18,5                        | 14,0                        | 12,8                        | 0,044                       | 82,3                        | 429                         | 34.123                      |
| 14                | A5C                     | 523                         | 8,6                         | 19,4                        | 17,1                        | 14,8                        | 0,034                       | 81,5                        | 434                         | 32.526                      |
| 15                | A5MD                    | 440                         | 8,4                         | 20,6                        | 16,2                        | 14,6                        | 0,043                       | 100,3                       | 424                         | 38.373                      |
| 16                | A6ME                    | 671                         | 9,6                         | 17,9                        | 11,5                        | 12,7                        | 0,046                       | 80,8                        | 411                         | 33.828                      |
| 17                | A6C                     | 491                         | 8,7                         | 20,9                        | 16,5                        | 15,9                        | 0,059                       | 81,7                        | 435                         | 35.807                      |
| 18                | A6MD                    | 580                         | 9,2                         | 19,1                        | 17,1                        | 14,5                        | 0,041                       | 89,2                        | 433                         | 36.299                      |
| 19                | A7ME                    | 545                         | 8,7                         | 18,7                        | 16,1                        | 14,8                        | 0,034                       | 90,0                        | 426                         | 36.985                      |
| 20                | A7C                     | 417                         | 7,4                         | 20,4                        | 18,3                        | 15,1                        | 0,036                       | 107,7                       | 377                         | 35.213                      |
| 21                | A7MD                    | 481                         | 8,2                         | 19,2                        | 17,9                        | 14,4                        | 0,047                       | 81,8                        | 395                         | 36.207                      |
| 22                | A8ME                    | 326                         | 6,6                         | 20,8                        | 26,3                        | 17,5                        | 0,050                       | 88,1                        | 401                         | 38.793                      |
| 23                | A8C                     | 381                         | 7,4                         | 21,3                        | 18,4                        | 17,0                        | 0,046                       | 89,6                        | 381                         | 36.857                      |
| 24                | A8MD                    | 622                         | 9,5                         | 19,1                        | 16,0                        | 15,8                        | 0,058                       | 92,4                        | 416                         | 37.938                      |
| 25                | A9ME                    | 477                         | 8,6                         | 19,3                        | 16,5                        | 15,1                        | 0,045                       | 78,1                        | 408                         | 38.038                      |
| 26                | A9C                     | 385                         | 7,8                         | 20,3                        | 23,3                        | 15,3                        | 0,048                       | 51,8                        | 400                         | 36.740                      |
| 27                | A9MD                    | 689                         | 9,8                         | 17,8                        | 17,8                        | 12,9                        | 0,048                       | 63,7                        | 367                         | 33.262                      |
| 28                | A10ME                   | 433                         | 8,9                         | 21,1                        | 15,7                        | 15,4                        | 0,044                       | 71,0                        | 388                         | 36.321                      |
| 29                | A10C                    | 499                         | 8,2                         | 19,7                        | 20,8                        | 13,6                        | 0,036                       | 66,0                        | 397                         | 35.029                      |
| 30                | A10MD                   | 996                         | 9,7                         | 16,6                        | 12,0                        | 12,4                        | 0,036                       | 87,6                        | 546                         | 32.775                      |
| 31                | A11ME                   | 536                         | 9,4                         | 20,5                        | 15,7                        | 14,2                        | 0,045                       | 90,5                        | 400                         | 36.626                      |
| 32                | A11C                    | 385                         | 6,4                         | 20,4                        | 17,2                        | 12,4                        | 0,031                       | 96,1                        | 368                         | 35.436                      |
| 33                | A11MD                   | 508                         | 7,2                         | 19,6                        | 16,5                        | 11,2                        | 0,037                       | 83,5                        | 383                         | 35.447                      |
| 34                | A12ME                   | 587                         | 7,9                         | 17,9                        | 17,5                        | 11,3                        | 0,037                       | 94,1                        | 405                         | 31.329                      |
| 35                | A12C                    | 379                         | 6,3                         | 19,0                        | 40,2                        | 14,4                        | 0,037                       | 106,1                       | 355                         | 31.174                      |
| 36                | A12MD                   | 552                         | 6,9                         | 16,2                        | 14,5                        | 12,4                        | 0,030                       | 77,4                        | 391                         | 28.957                      |
|                   | <b>Média Aritmética</b> | 523                         | 8,7                         | 19,6                        | 17,6                        | 14,4                        | 0,045                       | 88,1                        | 423                         | 35.775                      |
|                   | <b>Desvio Padrão</b>    | 129                         | 1,1                         | 1,4                         | 4,9                         | 1,6                         | 0,010                       | 12,9                        | 55,9                        | 2.661                       |
|                   | <b>Mínimo</b>           | 326                         | 6,3                         | 16,2                        | 11,1                        | 11,2                        | 0,030                       | 51,8                        | 355                         | 28.957                      |
|                   | <b>Máximo</b>           | 996                         | 11,0                        | 220                         | 40,2                        | 17,5                        | 0,084                       | 121                         | 676                         | 41.933                      |
|                   | <b>Coef. Var.</b>       | 25%                         | 13%                         | 7%                          | 28%                         | 11%                         | 21%                         | 15%                         | 13%                         | 7%                          |

elevados no Baixo Rio Madeira estão relacionados ao possível enriquecimento das concentrações de Hg nos sólidos em suspensão nesta região devido aos solos regionais e ao aumento da erosão provocada pela expansão da agricultura.

Os resultados referentes à carga de sólidos em suspensão no Alto Rio Madeira, (Tabelas 1 e 2) corroboram os estudos realizados por Sioli (1967), Martinelli *et al.* (1989), Mortatti *et al.* (1989), Filizola-Junior (1999), Guyot *et al.* (1999). Mostrando-se a origem da carga sólida transportada no Rio Madeira pela drenagem de Rios provenientes da região Andina, principalmente por influência do Rio Beni (416 mg.L<sup>-1</sup> na vazante e 552 mg.L<sup>-1</sup> na cheia) que possui uma carga sólida suspensa 11 vezes superior a do Rio Mamoré no período de vazante (31 mg.L<sup>-1</sup> na vazante e 368 mg.L<sup>-1</sup> na cheia). No período de cheia há um aumento na ordem de 10 vezes na carga sólida em suspensão do Rio Mamoré, que recebe uma grande influência do Rio Yata que drena regiões de formação terciária do cráton Andino. Já os tributários do Alto Rio Madeira tem uma pequena contribuição no fluxo sedimentar, devido a pouca quantidade de sólidos em suspensão na ordem de 10 até 100 vezes menores que no Rio Madeira. Atuando, em conjunto com os processos de erosão marginal no canal do Rio Madeira para o enriquecimento de elementos-traço no talvegue desse rio. Em relação aos formadores do Rio Madeira, o Rio Beni no período de vazante apresentou as maiores concentrações dos elementos-traço: Co, Cu, Pb e Hg. Já no período de cheia apresenta maiores concentrações para todos os elementos analisados, exceto o Mn. Logo, o Rio Mamoré se sobressai com os maiores valores de Cr, Fe, Zn (vazante) e Mn (nos dois períodos) (Tabela 3).

**Tabela 3:** Concentração de elementos-traço nos sólidos em suspensão dos pontos amostrados nos tributários do Alto Rio Madeira nos períodos de Vazante (novembro – 2003) e Cheia (fevereiro - 2004). Sólidos em suspensão (SS) em mg.L<sup>-1</sup>. Elementos-traço em µg.g<sup>-1</sup>.

| Vazante          |                          |                          |                          |                          |                          |                          |                          |                          |                          |
|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Tributários      | SS<br>mg.L <sup>-1</sup> | Co<br>µg.g <sup>-1</sup> | Cu<br>µg.g <sup>-1</sup> | Cr<br>µg.g <sup>-1</sup> | Pb<br>µg.g <sup>-1</sup> | Hg<br>µg.g <sup>-1</sup> | Zn<br>µg.g <sup>-1</sup> | Mn<br>µg.g <sup>-1</sup> | Fe<br>µg.g <sup>-1</sup> |
| Rio Jaci-Paraná  | 28                       | <0,123                   | <0,230                   | 43,8                     | <0,183                   | 0,084                    | 248                      | 949                      | 41.615                   |
| Rio Mutum-Paraná | 12                       | <0,123                   | <0,230                   | 87,0                     | <0,183                   | 0,247                    | 321                      | 584                      | 63.412                   |
| Rio Abunã        | 44                       | <0,123                   | 5,8                      | 55,3                     | <0,183                   | 0,040                    | 99,3                     | 1508                     | 49.419                   |
| Rio Mamoré       | 31                       | <0,123                   | 3,2                      | 37,5                     | <0,183                   | 0,006                    | 117                      | 742                      | 42.795                   |
| Rio Beni         | 415                      | 9,9                      | 25,2                     | 21,8                     | 7,7                      | 0,037                    | 104                      | 379                      | 36.207                   |
| Cheia            |                          |                          |                          |                          |                          |                          |                          |                          |                          |
| Tributários      | SS<br>mg.L <sup>-1</sup> | Co<br>µg.g <sup>-1</sup> | Cu<br>µg.g <sup>-1</sup> | Cr<br>µg.g <sup>-1</sup> | Pb<br>µg.g <sup>-1</sup> | Hg<br>µg.g <sup>-1</sup> | Zn<br>µg.g <sup>-1</sup> | Mn<br>µg.g <sup>-1</sup> | Fe<br>µg.g <sup>-1</sup> |
| Rio Jaci-Paraná  | 10                       | <0,123                   | <0,230                   | <0,188                   | <0,183                   | 0,007                    | 76,2                     | 432                      | 35.915                   |
| Rio Mutum-Paraná | 8                        | <0,123                   | <0,230                   | <0,188                   | <0,183                   | 0,350                    | 68,3                     | 821                      | 25.921                   |
| Rio Abunã        | 29                       | <0,123                   | <0,230                   | <0,188                   | <0,183                   | 0,052                    | 168                      | 766                      | 30.495                   |
| Rio Mamoré       | 368                      | 4,3                      | 14,1                     | 14,1                     | 11,4                     | 0,020                    | 54                       | 423                      | 18.682                   |
| Rio Beni         | 552                      | 7,8                      | 21,9                     | 16,6                     | 15,7                     | 0,032                    | 93,4                     | 391                      | 27.167                   |

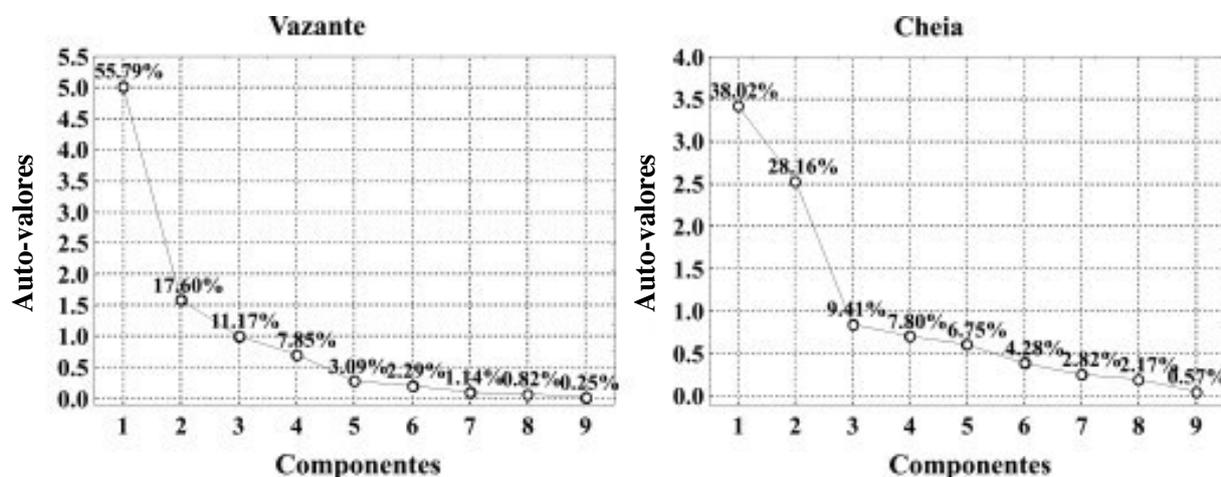
Os tributários amostrados apresentaram maiores concentrações quando comparados às concentrações médias do Rio Madeira para os seguintes elementos-traço: Cr, Hg, Mn e Fe no período de vazante e Hg e Mn no período de cheia. As concentrações de elementos-traço no Rio Mutum-Paraná se destacam como as mais altas dentre os tributários (Tabela 3). Este Rio apresentou as maiores concentrações de Cr, Fe, Zn e Hg na vazante e para Hg e Mn na cheia. Estas altas concentrações podem estar relacionadas com o histórico de uso deste rio para a manutenção de dragas e balsas utilizadas nas atividades do garimpo de ouro, conforme reportado por Pfeiffer *et al.* (1989). Os referidos autores encontraram valores de até 19.800 µg.kg<sup>-1</sup>

de Hg em sedimentos de fundo próximo a foz deste Rio. Esta foi a maior concentração de Hg registrada em sedimentos de fundo em estudos na Amazônia.

### **ANÁLISE DAS COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA)**

Previamente a análise de componentes principais (PCA), as variáveis de cada matriz de dados passaram pela função matemática “Log n” e, em seguida foram padronizadas adotando-se a média como zero (0) e desvio padrão igual a um (1). Este artifício matemático, que não interfere na relação entre os dados, foi necessário, pois as matrizes de dados apresentam variáveis com valores em escalas diferentes. No estudo das variáveis geoquímicas dos sólidos em suspensão, ordenou-se as matrizes de dados para os dois períodos sazonais utilizando-se as variáveis: sólidos em suspensão (SS), Co, Cu, Cr, Pb, Hg, Zn, Mn e Fe. Porém, os dados dos tributários não foram utilizados na PCA, pois não foi possível detectar pela técnica de EAA alguns elementos-traço nesses pontos, sendo padronizadas as PCA sem estes pontos.

Na figura 2 são apresentados os autovalores e a porcentagem de variância explicada obtidos para as 9 componentes principais, bem como os valores acumulados. Observa-se a mudança no declive da curva de autovalores entre a 3ª e 4ª componentes, justificando-se por isso a maior ênfase dada a estas 3 componentes principais. Desta forma, no período de vazante as 3 primeiras componentes são responsáveis por 84,56% de variância total explicada e no período de cheia por 75,59% de variância total explicada.



**Figura 2:** Gráficos dos autovalores referentes as 9 componentes nos dois períodos sazonais.

No período de vazante a primeira componente contribuiu com 55,79% da variância total explicada, com as cargas mais elevadas para os S.S., Cu, Co, Pb, Hg e Cr; a segunda componente contribuiu com 17,60%, com as cargas mais altas para Zn, Fe e Cr; e a terceira componente contribuiu com 11,17%, com as cargas mais altas para Mn e Zn. No período de cheia a variância explicada foi menor que na vazante, tendo a primeira componente contribuído com 38,02%, com as cargas mais altas para Cu, Co, Pb, Hg e Fe; a segunda componente contribuiu com 28,16%, com as cargas mais altas para os S.S., Mn e Cr; e a terceira componente contribuiu com 9,41%, com a carga mais alta para o Zn (Tabela 4).

**Tabela 4:** Contribuição de cada variável para as 3 principais componentes e a porcentagem de variância explicada de cada componente nos dois períodos amostrados.

|                              | <b>Contribuições das variáveis nas 3 componentes</b> |               |               |               |               |              |
|------------------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
|                              | <b>Vazante</b>                                       |               |               | <b>Cheia</b>  |               |              |
|                              | <b>1</b>   | <b>2</b>      | <b>3</b>      | <b>1</b>      | <b>2</b>      | <b>3</b>     |
| <b>SS</b>                    | <b>-0,925</b>  | -0,026        | -0,172        | -0,010        | <b>0,920</b>  | 0,053        |
| <b>Co</b>                    | <b>-0,973</b>  | -0,057        | -0,096        | <b>-0,705</b> | <b>0,640</b>  | -0,136       |
| <b>Cu</b>                    | <b>-0,952</b>  | -0,073        | -0,079        | <b>-0,810</b> | -0,399        | 0,046        |
| <b>Cr</b>                    | <b>0,688</b>   | <b>-0,607</b> | 0,082         | -0,220        | <b>-0,679</b> | 0,173        |
| <b>Pb</b>                    | <b>-0,936</b>  | -0,069        | -0,063        | <b>-0,697</b> | -0,373        | -0,082       |
| <b>Hg</b>                    | <b>-0,884</b>  | -0,214        | 0,037         | <b>-0,756</b> | 0,183         | -0,391       |
| <b>Zn</b>                    | 0,240  | <b>-0,713</b> | <b>-0,515</b> | -0,560        | 0,019         | <b>0,735</b> |
| <b>Mn</b>                    | 0,332  | 0,289         | <b>-0,817</b> | -0,208        | <b>0,696</b>  | 0,286        |
| <b>Fe</b>                    | 0,119  | <b>0,752</b>  | -0,124        | <b>-0,899</b> | -0,024        | -0,110       |
| <b>% Variância explicada</b> | <b>55,79</b>   | <b>17,60</b>  | <b>11,17</b>  | <b>38,02</b>  | <b>28,16</b>  | <b>9,41</b>  |

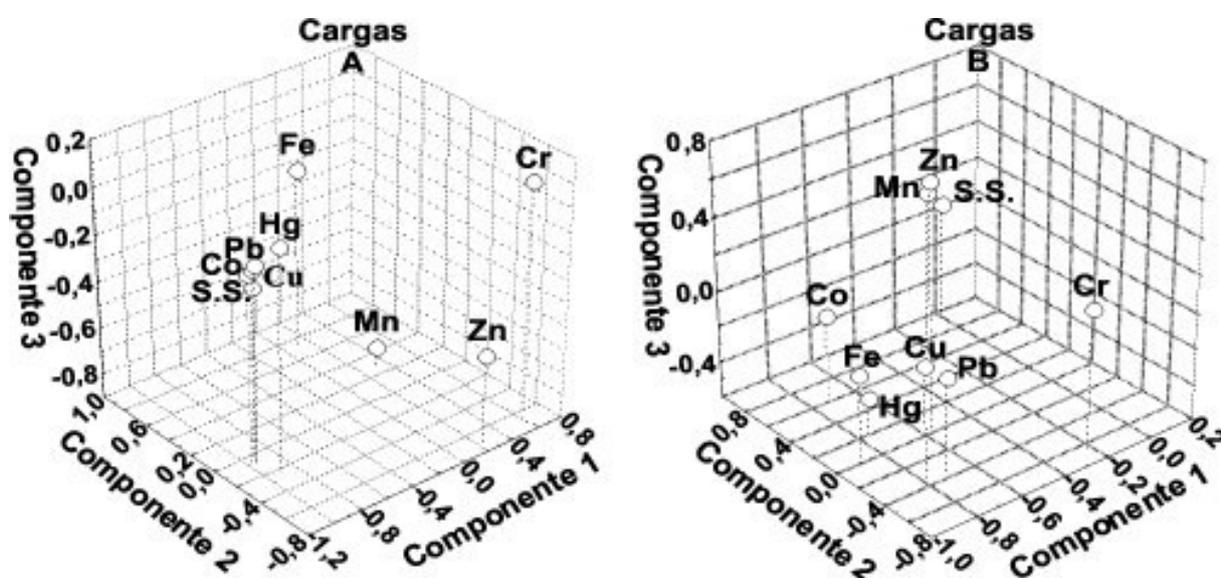
Na vazante a primeira componente é explicada pela maior relação entre as variáveis: SS, Cu, Co, Pb e Hg, e em menor relação com ordem inversa com o Cr. A maior carga atribuída a essas variáveis está relacionada com o fluxo natural de elementos-traço da bacia hidrográfica, sendo o transporte realizado através da adsorção desses elementos as partículas sedimentares em suspensão. Possivelmente, a maioria destas partículas é composta pelos elementos K, Al e Si conforme indica Bonotto & Silveira (2003). Pois, no período de vazante estes autores encontraram uma relação de estabilidade no campo das kaolinitas ( $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ ) para as fases minerais dos sedimentos em suspensão. Ainda, segundo Mortatti (1989) no período de vazante (novembro) o Rio Madeira apresenta maiores concentrações de Si quando comparadas com os outros elementos maiores. Possivelmente, os minerais presentes nas partículas deste período são silicatos, micas, feldspatos e kaolinitas, provenientes principalmente do Rio Beni. Os resultados nos indicam que o transporte dos elementos Cu, Co, Pb e Hg é influenciado por fatores hidrogeoquímicos diferentes dos fatores que controlam o transporte do elemento Cr. Devido a esses fatores a 1ª componente foi denominada “componente primária de transporte da vazante”.

A segunda componente é explicada pela maior relação com a variável Fe e em menor relação com ordem inversa com Zn e Cr. A maior carga atribuída a estas variáveis relaciona-se ao transporte natural dos óxidos e hidróxidos de Fe no canal principal e aos processos de erosão e lixiviação dos solos da margem dos rios, carreando íons metálicos e pequenas partículas para o talvegue do rio. Processo este que tem se intensificado recentemente pela atividade agropecuária às margens dos rios na área de estudo. Sendo que no estado de Rondônia predomina a classe dos latossolos, em torno de 58% do estado, correspondentes a classe dos ferralsols pelo sistema FAO e oxisols pelo sistema dos EUA. Desta forma as concentrações de Cr e Zn são inversamente proporcionais às concentrações de Fe. Demonstrando que o transporte desses elementos é realizado por outros tipos de partículas minerais e não adsorvidos aos óxidos e hidróxidos de Fe. Desta forma, esta componente foi determinada como sendo a “componente secundária de transporte da vazante”.

A terceira componente é explicada pela maior relação com a variável Mn e em menor relação com Zn. A carga destas variáveis relaciona-se ao transporte natural dos óxidos e hidróxidos de Mn e do Zn no canal principal e ao aumento das concentrações destes elementos inseridos na calha do Rio Madeira por influência dos rios e igarapés tributários que drenam regiões contendo maiores concentrações destes

elementos. Pois, os tributários do Rio Madeira percorrem o interior do estado de Rondônia drenando solos bastante erodidos e lixiviados pela ação das atividades agropecuárias às margens destes. Além da possível re-mobilização destes elementos do sedimento de fundo por advento do início da cheia. Outro fator é a erosão dos solos marginais no Rio Madeira que podem trazer partículas contendo altas ou baixas concentrações destes elementos. Desta forma, esta componente foi denominada “componente regional da vazante”.

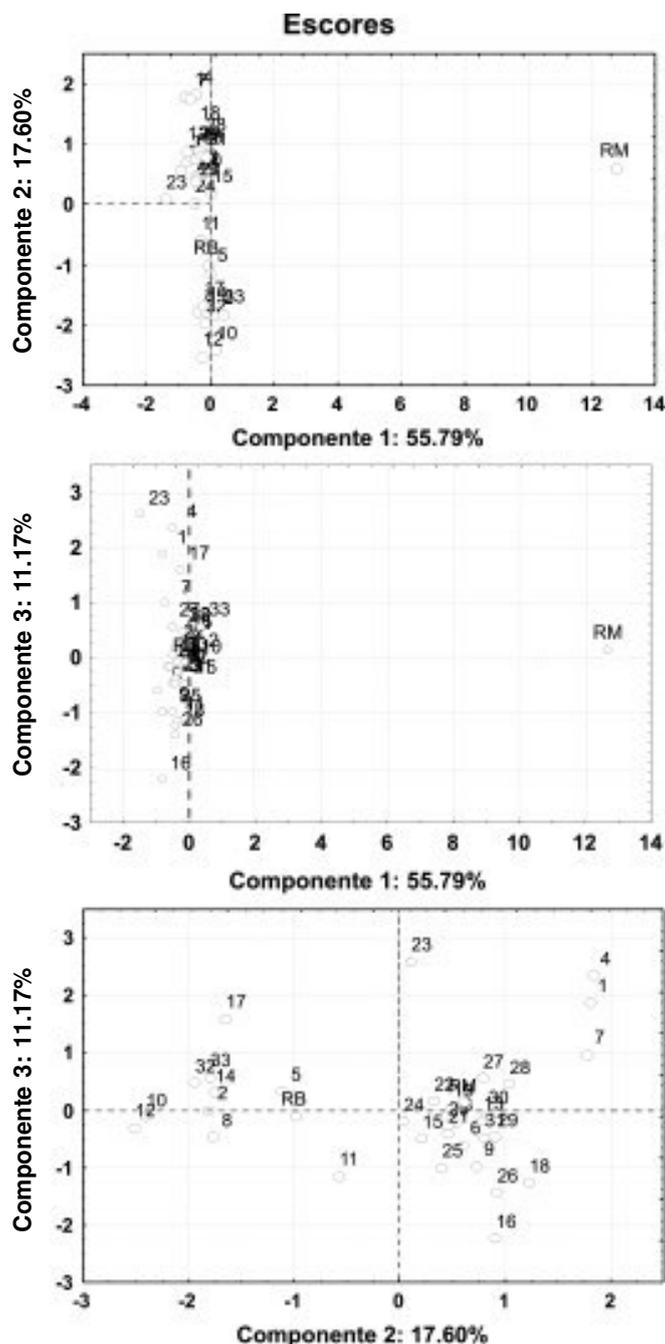
Observa-se na figura 3A que as variáveis geoquímicas se ordenam em 4 grupos distintos com a ordenação em 3D das cargas nas 3 componentes, onde o primeiro é formado pelas variáveis SS, Co, Cu, Pb e Hg; o segundo pelo Fe; o terceiro pelo Mn; e o quarto pela proximidade de Zn e Cr. Mostrando que estes elementos-traço sofrem diferentes processos geoquímicos na área de estudo e, conseqüentemente, transportes diferenciados.



**Figura 3:** Projeção espacial de ordenação das cargas das variáveis geoquímicas nas 3 componentes principais A - novembro de 2003 e B - fevereiro de 2004.

Através da análise gráfica dos escores (Figura 4) observa-se que os pontos do Rio Madeira exibem diferentes relações entre as componentes 2ª e 3ª, determinando uma maior variabilidade no comportamento dos processos geoquímicos de transporte dos elementos relacionados à estas componentes nos diferentes pontos analisados. Além de os pontos do Rio Madeira se ordenarem em conjunto com o Rio Beni, ou seja, existe uma grande relação quanto às concentrações dos elementos-traço nos sólidos em suspensão desses Rios. Enquanto, o Rio Mamoré possui concentrações diferenciadas, apresentando maiores concentrações de Fe, Mn, Zn e Cr e menores concentrações de SS, Co, Cu, Pb e Hg quando comparadas com as concentrações do Rio Madeira e Beni.

Assim, o Rio Mamoré se apresenta fora do ordenamento formado pelos Rios Beni e Madeira. Ocorre também o afastamento de alguns pontos do Rio Madeira formando três grupos que podem ter tido suas características geoquímicas modificadas por fatores como: I grupo - pontos 1, 4 e 7 se localizam em regiões aonde os solos apresentam concentrações baixas de Zn e Mn (Gomes *et al.*, 2004) além de serem usados para atividades agropastoris, resultando no carreamento de partículas pobres em Zn e Mn para o Rio Madeira; II grupo - pontos 2, 5, 8, 10, 11, 12, 14, 17, 32 e 33 se



**Figura 4:** Distribuição espacial dos escores nas 3 componentes principais (novembro de 2003).

localizam no canal central do Rio Madeira, próximos a tributários ou logo após a influência destes, o que faz com que estes pontos do Rio Madeira possuam uma maior concentração dos elementos Zn e Cr. Visto que no período de vazante é observado a re-mobilização de elementos-traço presentes no sedimento de fundo destes tributários (Gomes *et al.*, 2004). E o terceiro grupo é formado pelos demais pontos do Rio Madeira (ex. 9, 16, 18 e 26) que apresentam maiores concentrações de Mn e menores de Fe.

No período de cheia a primeira componente é explicada pela maior relação entre Cu, Co, Pb, Hg e Fe. A maior carga atribuída a essas variáveis também está relacionada ao fluxo natural de elementos-traço na bacia hidrográfica. Porém, neste período o transporte desses elementos-traço é realizado através da adsorção desses elementos há partículas sedimentares complexadas aos óxidos e hidróxidos de Fe. Pois, segundo Taillefert & Gaillard (2002), em áreas que recebem influência sazonal

os elementos Fe, Mn e Zn mobilizados durante a fase seca, fenômeno este facilitado pela maior oxigenação do material orgânico depositado no sedimento, são recolocados no meio hídrico com o início da cheia, muitas vezes em concentrações numa ordem de grandeza mais elevada do que durante a fase de cheia anterior. Esse fenômeno é descrito na Bacia de drenagem do Rio Beni por Maurice-Bourgoin *et al.* (2000), onde estes afirmam haver a jusante do Rio Beni uma área de armazenamento de Hg (das geleiras andinas e do garimpo) adsorvido a partículas sedimentares enriquecidas pelos solos regionais em óxidos e hidróxidos de Fe. Durante a estação chuvosa, ocorre o transporte destas partículas para a planície amazônica através do Rio Madeira, devido ao íngreme declive e pelo aumento na taxa de erosão dos solos marginais com as recentes práticas agrícolas. Devido aos fatores mencionados, a primeira componente foi denominada “componente primária de transporte da cheia”.

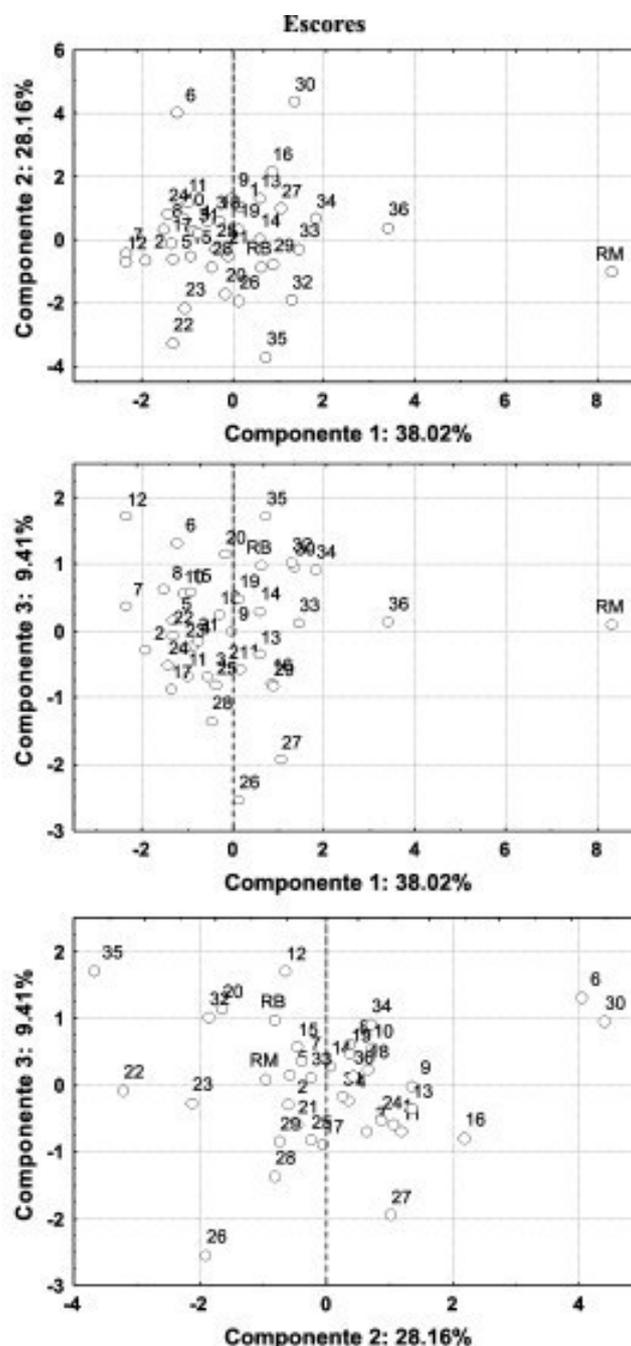
A segunda componente é explicada pela maior relação entre as variáveis SS, Co e Mn, e em menor relação com ordem inversa com o Cr. A maior carga atribuída a estas variáveis está relacionada ao transporte desses elementos-traços adsorvidos as partículas em suspensão. Possivelmente, neste período as partículas são compostas pelos elementos Ca, Mg, K, Al e Si. Pois, segundo Mortatti (1989) no período de cheia (fevereiro) o Rio Madeira apresenta maiores concentrações de Ca, Mg, Al e K quando comparadas com os outros elementos maiores. Observando-se uma ordem inversa quanto às concentrações de Co e Mn contra Cr. Indicando uma maior relação entre o transporte das variáveis Co e óxidos e hidróxidos de Mn através dos sólidos em suspensão de composição diferente das partículas que transportam o elemento Cr. Desta forma esta componente foi determinada como sendo a “componente secundária de transporte da cheia”.

A terceira componente se relaciona às concentrações de Zn, provenientes da inserção e decomposição de matéria orgânica advinda das áreas de inundação marginais que se desenvolvem durante esta época. Pois, nas várzeas do Rio Madeira e dos tributários ocorrem altas produções primárias, sendo este elemento mobilizado no sedimento de fundo durante a fase seca e recolocado no meio hídrico com o advento da cheia. Aumentando as concentrações deste elemento inserido na calha do Rio Madeira por influência dos Rios e igarapés tributários que drenam regiões contendo maiores concentrações destes elementos. Desta forma esta componente foi denominada “componente regional da cheia”.

Observa-se na figura 3B que as variáveis geoquímicas se ordenam em 3 grupos distintos com a ordenação em 3D das cargas nas 3 componentes, onde o primeiro é formado pela maior proximidade das variáveis Co, Cu, Pb, Hg, Zn e Fe; o segundo pelos SS e Mn; e o terceiro pelo Cr. Mostrando que o elemento Cr é transportado ou sofre diferentes processos geoquímicos nos dois períodos amostrados, estando pouco relacionado aos outros elementos.

Através da análise gráfica dos escores (Figura 5) observa-se que os pontos do Rio Madeira exibem diferentes relações entre as 3 componentes, sugerindo comportamentos geoquímicos diferentes nos pontos analisados, que podem estar relacionados as diferentes influências exercidas pelas várzeas. Novamente, os pontos do Rio Madeira se ordenam em conjunto com o Rio Beni, ou seja, existe uma grande relação quanto à composição dos sólidos em suspensão desses Rios. Enquanto, o Rio Mamoré apresenta concentrações de elementos-traço diferenciadas, ou seja, se apresenta fora do ordenamento formado pelos Rios Beni e Madeira por ter menores

concentrações de S.S., Co, Cu, Cr, Pb, Hg, Zn e Fe. Nota-se também o afastamento de alguns pontos do grupo formado pelo Rio Madeira, que podem ter tido suas características geoquímicas modificadas possivelmente por fatores como: pontos 6 e 30 se localizam em regiões onde os solos apresentam concentrações altas de Mn e Co (Gomes *et al.*, 2004). Além disso, são utilizados para atividades agropastoris resultando no aumento da taxa de erosão e o carreamento destas partículas ricas em Mn e Co para o Rio Madeira no período de cheia. O mesmo padrão é observado para o ponto 12, mas para o aumento de Zn; pontos 35 (centro) e 36 (margem direita) se localizam próximo ao Igarapé Araras (margem direita). Este igarapé influencia para a diminuição das concentrações de Cu, Cr, Zn e Fe no ponto 36. Enquanto o ponto 35 apresenta maiores concentrações de Cr e Zn; pontos 26 e 27 se diferenciam pelas menores concentrações de Zn dentre os pontos do Rio Madeira e pelo ponto 26 apresentar menores concentrações de S.S., Co, Hg, Zn, Mn e Fe, e maiores de Cu, Cr e Pb quando comparadas às concentrações do ponto 27.



**Figura 5:** Distribuição espacial dos escores nas 3 componentes principais (fevereiro de 2004).

## **CONCLUSÕES**

Compreender a relação elementos-traço – sólidos em suspensão parte do princípio de uma análise conceitual. Os sólidos em suspensão variam em origem, forma e tamanho, características condicionadas por fatores como: o regime pluviométrico que influencia diretamente no transporte e acréscimo de sedimentos; uso da terra, pois o desmatamento acelera o processo de erosão, além das atividades de mineração. Outro fator de grande relevância é a formação geológica da bacia em estudo, pois esta, junto com os demais fatores pode influenciar na dinâmica do rio e na concentração de elementos-traço nos sedimentos.

A utilização da análise das componentes principais das variáveis geoquímicas dos sólidos em suspensão neste estudo demonstrou as diferentes influências sazonais nos dois períodos amostrados. Foi observada a importância de alguns fatores como a influência de solos marginais, atividades agropastoris de uso do solo, áreas de várzea inundadas e dos tributários para a alteração pontual e não-pontual das características geoquímicas dos elementos-traço adsorvidos aos sólidos em suspensão no Alto Rio Madeira.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem o apoio financeiro de Furnas Centrais Elétricas do Brasil e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através dos projetos CNPq/CT-Amazônia (Proc. Nº. 553269/2004-1) e CNPq/PPG-7-Fase II (Proc. Nº. 556934/2005-9).

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AYRES, G.A.; LACERDA, L.D.; BASTOS, W.R.; ALMEIDA, M.D. (2004) Mercury distribution in waters of Madeira River, Amazon, Brazil. In: International Symposium Environmental Geochemistry Tropical Countries, 4, Armação dos Búzios, Departamento de Geoquímica, UFF, Book of Abstracts, **1**:411-412.
- BASTOS, W.R.; MALM, O.; PFEIFFER, W.C.; CLEARY, D. (1998) Establishment and analytical quality control of laboratories for Hg determination in biological and geological samples in the Amazon – Brazil. *Ciência & Cultura*, **50**: 255-260.
- BASTOS, W.R. & LACERDA, L.D. (2004) A contaminação por Mercúrio na Bacia do Rio Madeira: uma breve revisão. *Geochimica Brasiliensis*, **18**: 99-114.
- BASTOS, W.R.; GOMES, J.P.O.; OLIVEIRA, R.C.; ALMEIDA, R.; NASCIMENTO, E.L.; LACERDA, L.D.; SILVEIRA, E.G.; PFEIFFER, W.C. (2006) Mercury in the environment and riverside population in the Madeira River Basin, Amazon, Brazil. *The Science of the Total Environment*, **368**: 344-351.
- BASTOS, W. R.; ALMEIDA, R.; DOREA, J. G.; BARBOSA, A. C. (2007) Annual flooding and fish-mercury bioaccumulation in the environmentally impacted Rio Madeira (Amazon). *Ecotoxicology*, **16**: 341-346.
- BERG, T.; ROYSET, O.; STEINNES, E.; VADSET, M. (1995) Atmospheric trace element deposition: principal component analysis of ICP-MS data from moss samples. *Environmental Pollution*, **88**: 67-77.
- BERNARDI, J.V.; FOWLER, H.G.; LANDIM, P.M.B. (2001) Um estudo de impacto ambiental utilizando análises estatísticas espacial e multivariada. *Holos*

- Environmental, **1**: 162-172.
- BONOTTO, D.M. & SILVEIRA, E.G. (2003) Preference ratios for mercury and other chemical elements in the Madeira River, Brazil. *Journal of South American Earth Science*, **15**: 911-923.
- FILIZOLA-JÚNIOR, N.P. (1999) O fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Bacia Amazônica Brasileira. ANEEL, Brasília, DF, 63 p.
- GOMES, J.P.O.; SILVEIRA, E.G.; BASTOS, W.R. (2004) Hidrobiogeoquímica de elementos-traço na Bacia de drenagem do Rio Madeira. In: Anais do XIII Seminário de Iniciação Científica, Porto Velho-RO. CD-ROM, 4p.
- GOMES, J.P.O.; NASCIMENTO, E.L.; ALMEIDA, R.; BASTOS, W.R.; BERNARDI, J.V.E.; BRUM, P.H. (2006) Distribuição Espacial das Concentrações de mercúrio em sólidos em suspensão no Alto Rio Madeira, Rondônia. *Journal of the Brazilian Society of Ecotoxicology*, **1**: 131-137.
- GUYOT, J.L.; JOUANNEAU, J.M.; WASSON, J.G. (1999) Characterization of river bed and suspended sediments in the Madeira River drainage basin (Bolivian Amazonian). *Journal of South American Earth Sciences*, **12**: 401-410.
- LACERDA, L.D.; PFEIFFER, W.C.; SILVEIRA, E.G.; BASTOS, W.R.; SOUZA, C.M.M. (1987) Contaminação por mercúrio na Amazônia: análise preliminar do Rio Madeira, RO. In: Anais do I Congresso Brasileiro de Geoquímica, Porto Alegre, **2**: 295-299.
- LANDIM, P.M.B. (1998) Análise estatística de dados geológicos. Fundação Editora UNESP, São Paulo, 225 p.
- LECHLER, P.J.; MILLER, J.R.; LACERDA, L.D.; VINSON, D.J.C.; BONZONGO LYONS, W.B.; WARWICK, J.J. (2000) 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.
- MALM, O.; PFEIFFER, W.C.; SOUZA, C.M.M. (1991) Main pathways of mercury in the Madeira River área, Rondônia, Brazil. In: Proc. 8<sup>th</sup> International Conference Heavy Metals in the Environment, Edingburgh, UK, **1**: 515-518
- MARTINELLI, L.A.; FERREIRA, J.R.; FORSBERG, B.R.; VICTORIA, R.L. (1988) Mercury contamination in the Amazon: a gold rush consequence. *Ambio*, **17**: 252-254.
- MARTINELLI, L.A.; VICTORIA, R.L.; DEVOL, A.H.; RICHEY, J.E.; FORSBERG, B.R. (1989) Suspended sediment load in the Amazon Basin: an overview. *GeoJournal*, **19**:381-389.
- MAURICE-BOURGOIN, L.; QUIROGA, I.; CHINCHEROS, J.; COURAU, P. (2000) Mercury distribution in waters and fishes of the upper Madeira River and mercury exposure in riparian Amazonian populations. *The Science of the Total Environment*, **260**: 73-86.
- MORTATTI, J.; FERREIRA, J.R.; MARTINELLI, L.A.; VICTORIA, R.L.; TANCREDI, A.C.F. (1989) Biogeochemistry of the Madeira River Basin. *GeoJournal*, **19**: 391-397.
- PFEIFFER, W.C. & LACERDA, L.D. (1988) Mercury inputs to the Amazon region, Brazil. *Environment Technology*, **9**: 325-350.
- PFEIFFER, W.C.; LACERDA, L.D.; MALM, O.; SOUZA, C.M.M.; SILVEIRA, E.G.; BASTOS, W.R. (1989) Mercury concentrations in inland waters of goldmining areas in Rondônia, Brazil. *The Science of the Total Environment*, **87/88**: 233-240.
- SASTRE, J.; SAHUQUILLO, A.; VIDAL, M.; RAURET, G. (2002) Determination of Cd, Cu, Pb and Zn in environmental samples: microwave-assisted total digestion versus aqua regia and nitric acid extraction. *Analytica Chimica Acta*, **462**: 59-72.
- SEDAM (2002) Boletim Climatológico de Rondônia. Secretaria do Estado do Desenvolvimento Ambiental (SEDAM), Porto Velho, 22 p.
- SIOLI, H. (1967) Hydrochemistry and geology in the Brazilian Amazon region. *Amazoniana*, **1**: 267-277.

- STATISTICA - StatSoft, Inc. (2001) STATISTICA: Data Analysis Software System, Version 6.0. Disponível em <www.statsoft.com>.
- TAILLEFERT, M. & GAILLARD, J.F. (2002) Reactive transport modeling of trace elements in the water column of a stratified lake: iron cycling and metal scavenging. *Journal of Hydrology*, **256**: 16-34.
- ZHANG, C. & SELINUS, O., (1997) Spatial analyses for copper lead and zinc contents in sediments of the Yantze River Basin. *The Science of the Total Environment*, **204**: 251-262.
- YAMASOE, M.A.; ARTAXO, P.; MIGUEL, A.H.; ALLEN, A.G. (2000) Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of vegetation fires in the Amazon: water-soluble species and trace elements. *Atmospheric Environment*, **34**: 1641-1653.
- WENCHUAN, Q.; DICKMAN, M.; SUMIN, W. (2001) Multivariate analyses of heavy metal and nutrient concentrations in sediments of Taihu Lake, China. *Hydrobiologia*, **450**: 83-89.

