



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS

Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Química

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE INDICADORES AMBIENTAIS NOS SISTEMAS
FLUVIAIS MADEIRA/AMAZONAS E SOLIMÕES/AMAZONAS

LORENA MOTA DE CASTRO

MANAUS - AM

SETEMBRO - 2015

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE INDICADORES AMBIENTAIS NOS SISTEMAS
FLUVIAIS MADEIRA/AMAZONAS E SOLIMÕES/AMAZONAS

LORENA MOTA DE CASTRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Química, área de concentração Química Analítica

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Tereza Cristina Souza de Oliveira

MANAUS – AM

SETEMBRO – 2015

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

C355e Castro, Lorena Mota de
Estudo do comportamento de indicadores ambientais nos sistemas fluviais Madeira/Amazonas e Solimões/Amazonas / Lorena Mota de Castro. 2015
107 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Tereza Cristina Souza de Oliveira
Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Bacia Amazônica . 2. Hidroquímica . 3. Caracterização sedimentar. 4. Correlação . I. Oliveira, Tereza Cristina Souza de II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

“O temor do Senhor ensina a sabedoria, e a humildade antecede a honra. Ao homem pertencem os planos do coração, mas do Senhor vem a resposta da língua”

(Provérbios de Salomão)

Agradecimentos

A Deus, pelo Seu amor incondicional, favor e paciência.

A orientadora Dra. Tereza Cristina S. de Oliveira, pelas oportunidades e paciência.

A minha Família, pelo amor e total apoio nos momentos mais difíceis.

Ao Programa de Pós-Graduação de Química da UFAM pela oportunidade concedida.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação de Química, pelo conhecimento transmitido.

A toda a equipe do Laboratório de Análises Mineraias (LAMIN - CPRM) pelo suporte nas análises mineralógicas.

À Dídima, Siomara Dias, pelo companheirismo, paciência e ensinamentos de lições para o trabalho e para a vida.

Ao Dr. Ézio Sargentini Júnior e toda a equipe do Laboratório de Química Analítica Ambiental/INPA (Marcos e Henrique) pelas análises de metais, pelos ensinamentos, amizade e auxílio.

A equipe do Laboratório de Saneamento – FT/UFAM pela concessão das instalações para tratamento das amostras.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

A bacia Amazônica, considerada a maior bacia hidrográfica do mundo, é responsável por aproximadamente 16% da água despejada no oceano e sua ampla extensão resulta na maior sensibilidade dos seus rios às mudanças climáticas globais. A dinâmica e disponibilidade de elementos químicos em um sistema tão complexo dependem de processos naturais como a lixiviação de substâncias químicas contidas nas rochas como também de atividades de fonte antrópica. O objetivo deste estudo foi avaliar a variação espacial de parâmetros físico-químicos (temperatura, turbidez, condutividade, sólidos totais suspensos, pH) e concentração de ânions (F^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- e SO_4^{2-}) em trechos que abrangem os principais formadores do rio Amazonas: Rio Solimões e Rio Madeira, além de caracterizar o sedimento de fundo destes sistemas no que se refere à sua granulometria, composição mineralógica (DRX) e concentração dos metais Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Ni e Pb (ICP-OES). Com exceção da turbidez, tanto os parâmetros quanto a concentração de íons apresentaram seus valores abaixo do máximo recomendado pela resolução do CONAMA 357/2005 para águas de classe 2. Ambos os trechos avaliados apresentaram teores de areia fina e média como composição predominante nos sedimentos de fundo, com exceção de um ponto em Guayaramerín-BO (RMGua), refletindo na maior concentração de metais nesta amostra. Nos sedimentos de fundo verificou-se a predominância de quartzo, albita, clinocloro, ilita, muscovita e microclina na fração total. A presença de minerais pesados como a andaluzita, augita e rutilo foram visualizadas no trecho Solimões/Amazonas onde esta ocorrência pode ser associada às formações Içá e Solimões. A análise de correlação permitiu avaliar que metais como Fe, Pb e Ni possuem alta correlação com a composição mineralógica do trecho Solimões/Amazonas. A alta correlação entre o Zn e Fe com o teor de SO_4^{2-} indica a relação destes com os depósitos de pirita, entretanto não se descarta a influência das atividades mineradoras muito difundidas na região. Na análise de PCA foi possível observar que a dispersão entre os dados, tanto no trecho Solimões/Amazonas quanto no Madeira/Amazonas, são causados por fatores de origem natural, apesar da alta incidência de atividades antrópicas, principalmente na bacia do Rio Madeira.

Palavras-chave: Bacia Amazônica, hidroquímica, caracterização sedimentar, correlação

ABSTRACT

The Amazon basin, the largest watershed in the world, accounts for approximately 16% of the water discharged into the ocean and its broad scope results in greater sensitivity of its rivers to global climate change. The dynamic and availability of chemical elements in a system as complex rely on natural processes such as leaching of chemicals contained in the rocks as well as a source of anthropogenic activity. The objective of this study was to evaluate the spatial variation of physical and chemical parameters (temperature, turbidity, conductivity, total suspended solids, pH) and anion concentration (F^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- and SO_4^{2-}) in sections covering the main forming the Amazon: Solimões and Madeira river, in addition to characterize the bottom sediment of these systems in regard to its particle size, mineralogical composition (XRD) and concentration of the metals Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Ni and Pb (ICP-OES). With the exception of turbidity, both the parameters and the ions concentration presented their values below the maximum recommended by the CONAMA resolution 357/2005 for waters class 2. Both evaluated stretches showed medium and fine sand contents as the predominant composition in the bottom sediments, except for RMGua point Guayaramerín-BO, reflecting the higher concentration of metals in this sample. In bottom sediments there was a predominance of quartz, albite, clinocllore, illite, muscovite and microcline in the total fraction of these. The presence of heavy minerals such as andalusite, augite and rutile were viewed in the Solimões / Amazonas stretch where this occurrence may be associated with Içá and Solimões formations. The correlation analysis allowed to evaluate that metals such as Fe, Pb and Ni have high correlation with the mineralogical composition of the Solimões / Amazonas stretch. The high correlation between Zn and Fe with SO_4^{2-} content indicates their relationship with pyrite deposits, though not rule out the influence of mining activities widespread in the region. In PCA analysis it was observed that the dispersion of data, both in the Solimões / Amazonas stretch and in Madeira / Amazonas, are caused by naturally occurring factors, despite the high incidence of human activities, mainly in the basin of Madeira.

Keywords: Amazon basin, hydrochemical, sediment characterization, correlation

SUMÁRIO

1.	Introdução	10
2.	Objetivos	13
2.1.	Objetivo Geral	13
2.2.	Objetivos Específicos	13
3.	Revisão da Literatura	14
3.1.	A bacia Amazônica	14
3.2.	Rio Solimões	17
3.3.	Rio Madeira	24
3.4.	Indicadores ambientais como ferramenta auxiliar no diagnóstico de recursos hídricos	27
3.4.1.	Metais	31
3.5.	Legislação ambiental: Levantamento e perspectivas	32
4.	Material e Métodos	35
4.1.	Área de estudo	35
4.2.	Amostragem de água e sedimento	39
4.3.	Metodologia analítica	41
4.3.1.	Determinação de íons por cromatografia iônica	41
4.3.2.	Análise mineralógica dos sedimentos	41
4.3.3.	Análise granulométrica dos sedimentos	43
4.3.4.	Metodologia para quantificação dos metais	44
4.3.4.1.	Tratamento das amostras e análise	45
4.4.	Análise estatística dos dados e obtenção de dados secundários auxiliares	48
5.	Resultados e discussão	48
5.1.	Solimões/Amazonas: Análise dos parâmetros físico-químicos e concentração de ânions	49
5.2.	Madeira/Amazonas: Análise dos parâmetros físico-químicos e concentração de ânions	53
5.3.	Análise dos dados granulométricos dos sedimentos de fundo	60
5.4.	Avaliação dos dados mineralógicos	66
5.5.	Avaliação dos teores de metais dos sedimentos de fundo	75
5.6.	Análise estatística: Correlação entre os dados	81

5.7.	Análise multivariada: Análise de componentes principais	88
6.	Considerações finais	94
7.	Referências bibliográficas	96
	ANEXOS	107

1. INTRODUÇÃO

A bacia Amazônica possui uma parcela significativa de participação no ciclo hidrológico e na dinâmica climática do planeta, contribuindo com aproximadamente 16 % do estoque de água superficial doce, influenciando consideravelmente no processo de evapotranspiração que ocorre na América do Sul e do mundo (BESER DE DEUS et al., 2011).

O regime pluvial amazônico sofre influência predominante de sua floresta latifoliada que devolve à atmosfera parte significativa da água oriunda da precipitação, minimizando as diferenças entre os períodos chuvosos e estiagem. Este processo de retroalimentação, não somente mantém a floresta amazônica como também, influi no clima da região que é característico pela ocorrência de densas chuvas com periodicidade heterogênea (SIOLI, 1985). Entretanto, a constatação de variações no clima e hidrologia na região Amazônica, ocasionadas por mudanças regionais e globais, têm resultado em esforços voltados para a identificação dos impactos destas variações na disponibilidade hídrica e no ciclo hidrológico da bacia Amazônica, bem como as consequências destes impactos em âmbito global (ANA, 2005).

Em contraste com essa informação, verifica-se a realidade de algumas sub-bacias hidrográficas amazônicas que têm sido alvo de políticas públicas nacionais desde a década de 1970, que estimulam o uso e ocupação do solo, além da exploração dos recursos naturais, realidade esta que perdura até os dias atuais. O incentivo de atividades como pecuária extensiva, agricultura de exportação, exploração de recursos minerais, além da ocupação desordenada do solo, resultante do crescimento demográfico sem precedentes, tem resultado na exploração demasiada dos recursos naturais, como também comprometendo irreversivelmente a integridade de alguns destes. Destaca-se a necessidade de se atenuar os impactos relacionados à obtenção e distribuição de energia, tema que vem sendo discutido em

âmbito global, de forma a se buscar alternativas de incentivo a sustentabilidade o que demanda planejamento e inserção de fontes alternativas de energia (GORAYEB et al., 2010; JUNK e MELLO, 1990).

A problemática envolvida no processo de avaliação de fontes potenciais de contaminação em nível de bacia se delimita ao levantamento das diversas atividades desenvolvidas ao longo do trecho estudado que podem influenciar direta ou indiretamente na qualidade do corpo hídrico, entre elas cita-se: produção de energia (hidrelétricas), uso industrial para resfriamento de sistemas de aquecimento, práticas agrícolas e pecuárias, utilização do corpo hídrico como receptor de efluentes domésticos e industriais não tratados, além dos atributos climatológicos e geomorfológicos. Segundo Setti (2000), estes fatores de origem antropogênica se relacionam com os processos naturais, contribuindo conjuntamente no impacto das bacias, resultando na necessidade de aprimoramento nos processos de gestão destas, devido à deficiência de atividades como: a operação ineficiente ou inexistente de estações de tratamento, cobertura de rede de esgoto precária e destinação inadequada de resíduos sólidos, gerando a necessidade de implementação da política de recursos hídricos que mobiliza diversos órgãos e instituições.

A manutenção das características naturais do ambiente resulta na relação direta entre a hidroquímica do recurso hídrico com o meio drenado por essas águas. A composição química dos rios da Amazônia, apesar da diversidade de estudos que vem sendo desenvolvidos, ainda é pouco conhecida devido à heterogeneidade destes ambientes. Estudos dos tributários dos grandes rios permitem relacionar a constituição química destes com as características geoquímicas locais (QUEIROZ et al., 2009). Outro fator importante que permite uma melhor visualização dos fatores que influenciam na hidroquímica de um corpo hídrico é a análise conjunta dos diferentes compartimentos (água, sedimento em suspensão e de fundo) pelo fato da forma heterogênea que as substâncias se distribuem nestas matrizes. Esta avaliação em

conjunto com o levantamento de variáveis hidrológicas e meteorológicas auxiliam no processo investigativo da possível influência de impactos de origem antropogênica nos recursos hídricos.

Diversos estudos (QUEIROZ et al., 2009; MARTINELLI et al., 1993; GALVÃO et al., 2009a; QUEIROZ et al., 2011) dos rios Solimões, Madeira e seus tributários com relação a análise de elementos traço e de maior teor foram realizados para cada rio individualmente. No entanto, verifica-se a carência de estudos que caracterizam a composição química e mineralógica dos sedimentos de fundo com as demais características físico-químicas e litológicas destes sistemas hídricos relacionando-os as características litológicas de cada sistema e possíveis influências antropogênicas. Com base nessa afirmação, este estudo visa a caracterização dos rios Madeira, Solimões e Amazonas, através da relação dos parâmetros com as características geoquímicas da região e possíveis influências antrópicas considerando a avaliação dos seguintes ânions: F⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₂⁻, NO₃⁻ e; metais no sedimento de fundo: Cádmio (Cd), crômio (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), chumbo (Pb), manganês (Mn), níquel (Ni) e zinco (Zn); e demais parâmetros: pH, turbidez, condutividade, temperatura e oxigênio dissolvido.

Este trabalho está inserido no contexto do “Projeto de Gerenciamento Integrado e Sustentável dos Recursos Hídricos Transfronteiriços na Bacia do rio Amazonas considerando a Variabilidade e Mudanças Climáticas” – Projeto GEF-Amazonas, e o escopo deste, contido no sub-projeto intitulado “Caracterização da Carga de Sedimentos dos Rios Madeira e Solimões - Amazonas” que visa o diagnóstico da qualidade destes ambientes aquáticos amazônicos por meio da análise de água e sedimentos, como também, por meio da determinação de indicadores ambientais e suas correlações com fontes potenciais de contaminação existentes na região.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Estudar a caracterização de sedimentos de fundo coletados nos rios Solimões, Madeira e Amazonas assimilando-a com indicadores de qualidade dessas águas no intuito de se avaliar as alterações espaciais sofridas por estes parâmetros ao longo destes trechos.

2.2. Objetivos Específicos

- Coletar amostras de água e sedimento de fundo em pontos distribuídos ao longo dos sistemas Madeira/Amazonas e Solimões/Amazonas;
- Quantificar os metais: Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Mn, Ni e Zn em amostras de sedimento;
- Analisar a composição mineralógica da fração total dos sedimentos de fundo coletados ao longo dos sistemas fluviais;
- Determinar a concentração dos ânions: F⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₂⁻ e NO₃⁻ em água;
- Avaliar as alterações ocorridas nos teores de cátions e ânions com base nas mudanças ocorridas no cenário ao longo da bacia hidrográfica;
- Avaliar qualitativamente as águas dos rios estudados baseando-se na comparação com as resoluções ambientais vigentes;
- Verificar a contribuição de possíveis fontes potenciais de contaminação de diversos parâmetros analisados ao longo dos sistemas fluviais.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. A bacia Amazônica

Maior bacia hidrográfica do mundo, a Bacia Amazônica (Figura 1) abrange uma área de $6,1 \times 10^6 \times \text{km}^2$ sendo rodeada pela Cordilheira dos Andes a oeste com picos aproximadamente de 7000 m. Os rios Solimões e Madeira, que possuem suas nascentes na Cordilheira dos Andes, exibem perfis longitudinais marcados pela mudança brusca de um domínio andino, caracterizado por gradientes de altitudes bem pronunciadas e marcantes, para a planície Amazônica, com um relevo planar. O encontro do rio Solimões com o Rio Negro, próximo ao município de Manaus, resulta na formação do Rio Amazonas, sendo este também aportado pelo rio Madeira que drena a parte oriental da Cordilheira, à jusante da capital (FILIZOLA et al., 2002).

Sioli (1985) aprimorou a abordagem no que se refere à rotulação das águas superficiais da Amazônia, classificando-as de acordo com características físico-químicas elementares dessas águas, sendo estas nomeadas: águas brancas, claras e pretas. Os rios de águas brancas possuem sua origem principalmente nos Andes, possuindo coloração em vários matizes de ocre, com aspecto turvo e ricos em material particulado. Como exemplo de rios de águas brancas podem ser citados os rios Madeira e Solimões, objetos alvo desse estudo. Os rios de águas claras possuem suas nascentes nos escudos das Guianas e do Brasil Central de morfologia plana e relevo regular, característica que resulta na coloração esverdeada de suas águas variando para cristalina em alguns trechos. Podem ser citados como exemplo de rios de águas claras os rios Xingu, Trombetas e Tapajós. Os rios de águas pretas, como o Rio Negro e o Rio Uatumã, por exemplo, possuem sua origem na própria bacia Amazônica que é rodeada pela floresta. No entanto, o contínuo aporte do material oriundo da própria floresta, enriquece

chuvas, como também de fatores como a cobertura vegetal, morfologia do corpo hídrico e da interação entre este com as áreas inundadas. De forma similar, os sedimentos em suspensão dependem da topografia e litologia das bacias de drenagem, do tamanho e da natureza das partículas carregadas e da hidrodinâmica dos rios.

STALLARD e EDMOND (1983) constataram que o regime de erosão e o substrato litológico das bacias de drenagem controlam a composição química das águas superficiais para a bacia Amazônica.

O regime pluviométrico da bacia do rio Amazonas é marcado por uma intensidade anual de chuva média de 2460 mm, sendo que boa parte dessas chuvas são provenientes do Oceano Atlântico, com um alto índice de reciclagem. No entanto a região é marcada por uma distribuição heterogênea sazonal das precipitações regionais, afirmação confirmada pelas observações dos máximos pluviométricos ao Norte (Bacia do Rio Negro) e Sul (Bacia do Madeira) sendo estes de maio a julho e de dezembro a março, nos respectivos hemisférios. A topografia dos Andes exerce influência marcante no regime pluviométrico da bacia, resultando em valores que variam de 300 a 6000mm.ano⁻¹ (RATISBONA, 1976; ROCHE et al., 1992; JOHNSON et al., 1976). Nos Andes, a precipitação é mais intensa nas encostas mais baixas e intermediárias por causa do controle orográfico das massas de ar oriundas do leste, com a máxima registrada nas cabeceiras do rio Madre de Dios (MCCLAIN e NAIMAN, 2008). No período de verão, boa parte dos afluentes e subafluentes da bacia é reduzida a pequenos córregos nas regiões próximas às cabeceiras, como os rios: Negro, Madeira, Juruá e Purus. No mês de novembro e esporadicamente no mês de fevereiro, ocorre no trecho do rio Solimões e Amazonas e em seus afluentes uma elevação acentuada e decréscimo das águas, fenômeno conhecido como repiquete, ocorrendo após alta pluviosidade no início do período chuvoso (SANTOS e RIBEIRO, 1988).

3.2. Rio Solimões

O Rio Solimões possui sua nascente na Cordilheira dos Andes peruanos, a montante do rio Apurimac, sendo denominado como Vilcanota. Ao longo de seu curso, este forma o Rio Ucayali que ao receber o aporte dos rios Marañon e Napo, oriundos da Cordilheira do Peru e dos Andes Equatorianos, pela sua margem esquerda passa a se chamar Amazonas. Ao adentrar a fronteira do Brasil, este passa a ser chamado de Solimões e recebe o aporte por sua margem esquerda dos rios Putumayo – Içá e Caquetá-Japurá, ambos tributários andinos vindos da Colômbia. Pela margem direita, este recebe contribuições dos rios Purus, Juruá, Javari e Jutuí. Ao encontrar-se com o rio Negro, na proximidade do município de Manaus, este recebe o nome de Rio Amazonas (FILIZOLA et al., 2002; ANA, 2006).

Grandes cordilheiras de montanhas continentais, como os Andes (Figura 2), tiveram sua origem a partir da colisão entre uma placa oceânica e uma continental, onde esta sofrera subducção resultando na formação de um arco magmático na borda do continente. Este ambiente é caracterizado pela presença de rochas vulcânicas e plutônicas, além da ocorrência de metamorfismo das rochas originadas e das pré-existentes. As litologias recentes e a diferença no gradiente do terreno (íngreme) fazem da cordilheira dos Andes a fonte da maioria da carga de sedimento e de compostos solúveis para o rio Amazonas. Durante a cheia, após descargas muito abruptas resultantes de alta pluviosidade aumentam o transporte material rio abaixo, onde estes se acumulam nas margens dos rios e adentram na planície de inundação. As várzeas são fortemente influenciadas pelo regime hidrológico, onde os sedimentos recentes (holocênicos) se acumulam anualmente na planície resultando em solos de alta fertilidade ricos em nutrientes (TEIXEIRA et al., 2000; TUNDISI e TUNDISI, 2008; MCCLAIN e NAIMAN, 2008; FERREIRA et al., 1999).

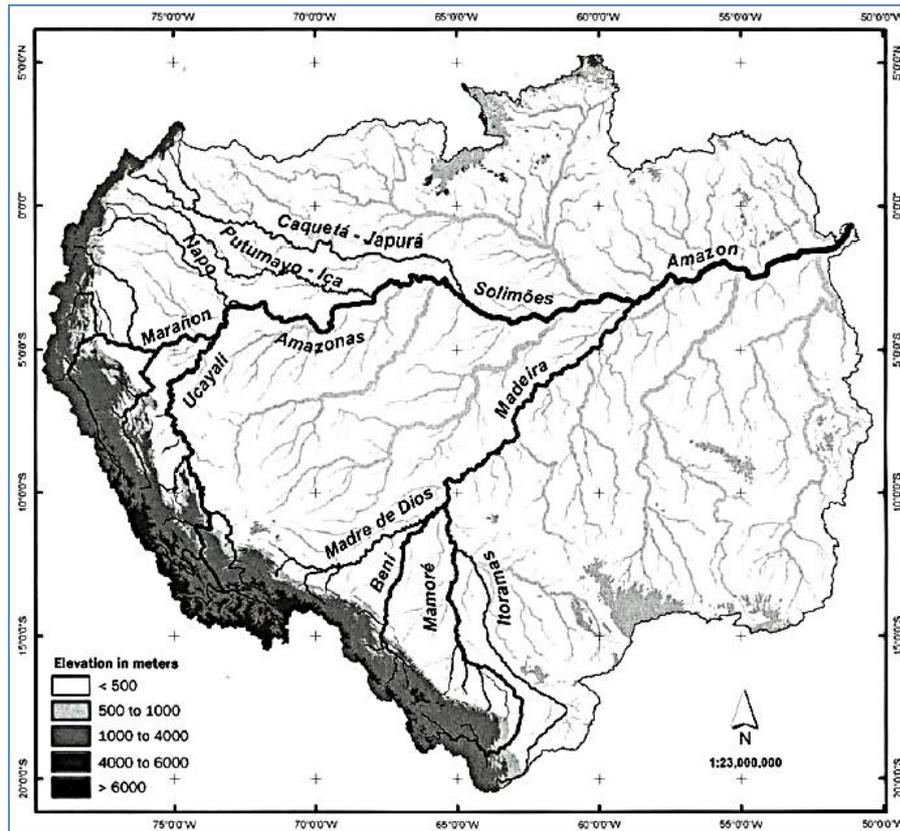


Figura 2 – Cordilheira dos Andes e seus gradientes de altitude (FONTE: MCCLAIN e NAIMAN, 2008).

Ao adentrar na planície, os sedimentos podem sofrer alterações na sua composição orgânica e inorgânica, sendo posteriormente reintroduzidos no rio podendo se depositar no fundo ou serem transportados pelo rio após sofrerem ressuspensão (MARTINELLI et al., 1993).

O Rio Solimões até a sua confluência no Rio Amazonas drena terrenos onde a vegetação abundante é do tipo floresta ombrófila densa aluvial (Figura 3) e terras baixas. Esse tipo de vegetação favorece o consumo de oxigênio do solo pela respiração das raízes, decomposição da matéria orgânica e ação contínua dos microorganismos, reduzindo o teor de O_2 nesse tipo de ambiente. Em consequência disso, verifica-se que nessa região, um dos solos predominantes é do tipo gleissolo háplico (Figura 4) característico de regiões sob excesso de

principalmente de caulinita. Arenitos muito argilosos e siltitos, segundo Feitosa e colaboradores (2008) , formam aquitardos, ou seja, possuem baixa capacidade de percolar a água proveniente da precipitação atmosférica. Em condições onde a drenagem é pouco eficiente, os K-feldspatos depositados ao longo da planície de inundação sofrem perda total ou parcial do potássio, resultando na formação de aluminossilicatos hidratados, processo este denominado hidrólise (TEIXEIRA et al. 2000). A eliminação de todo o potássio leva à formação da caulinita, conforme a reação:



A eliminação parcial do potássio resulta na formação da esmectita, conforme a reação:



A somatória desses processos resulta na predominância de latossolos sobre a formação Alter do Chão que são compostos predominantemente de argila silicatada como a caulinita (ROCHA et al. 2009).

Em estudo realizado por Guimarães (2013) e colaboradores, em perfis de gleissolos nas várzeas dos municípios de Manacapuru e Iranduba, verificou-se que nos horizontes superficiais, com relação às classes texturais, a predominante é do tipo argilosa em P₁ e P₂ (camadas superficiais do solo), e siltosa em P₃, P₄ e P₅ (camadas mais profundas). Essa natureza sedimentar evidencia o baixo grau de desenvolvimento destes perfis. Além disso, a análise mineralógica da fração argila apresentou a predominância de vermiculita, esmectita, ilita e caulinita.

Gibbs (1967), com base na coleta de amostras em pontos no curso principal do rio Amazonas e em 16 principais tributários para análise do material particulado em suspensão de componentes dissolvidos, chegou à conclusão que 82 % dos sólidos suspensos transportados pelo rio Amazonas são provenientes dos Andes. Neste mesmo estudo, Gibbs relatou que

ocorre um significativo decréscimo (aproximadamente 60 %) na carga de sedimentos no trecho do rio Madeira que abrange as cabeceiras andinas até a confluência com o rio Amazonas, indicando uma redução na capacidade energética deste rio em transportar materiais. Entretanto, a análise da composição mineralógica dos sedimentos em suspensão do curso principal apresentou alta correlação com a composição dos rios Ucayali e Marañon nos Andes.

Formações geológicas que armazenam água e possibilitam que grandes quantidades dessa água se movam são denominadas de aquíferos. O rio Solimões drena as formações Içá e Solimões que são compostas, respectivamente: arenitos, argilitos, siltitos e turfas; e arenitos, argilitos, e linhitos. Às margens do curso principal, na época do holoceno, se formaram os depósitos aluvionares e depósitos de terraços aluviais compostos de areia, silte, argila e cascalhos inconsolidados (FEITOSA et al., 2008, CPRM, 2005).

Segundo Queiroz e colaboradores (2009), as unidades geológicas das formações Içá, Solimões e de sedimentos quaternários, que consistem em rochas sedimentares, influem de forma significativa na hidroquímica dos afluentes e da bacia de drenagem do rio Solimões (Figura 5), ressaltando a influência predominante do material particulado em suspensão de origem andina. Os principais minerais presentes na formação Solimões são: quartzo, caulinita, illita, hematita+goethita e muscovita. Com relação à composição química, predominam os seguintes elementos na forma de óxidos estáveis: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , CaO , MgO e Na_2O . Em contrapartida, a formação Içá é constituída de arenitos, arenitos argilosos fluviais rosados, siltitos, argilitos e turfas datada do pleistoceno (QUEIROZ, et al., 2009; HORBE et al., 2007; CPRM, 2005).

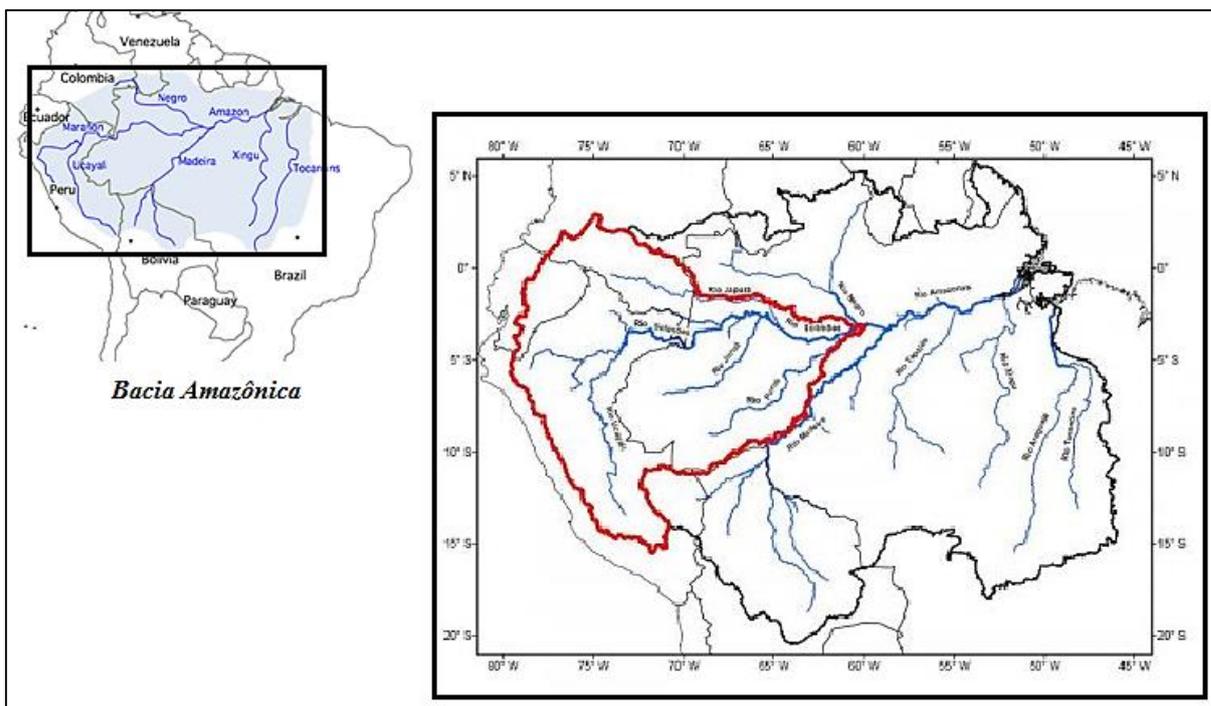


Figura 5 – Bacia do rio Solimões (FONTE: PAIVA, 2009)

Pereira (2012) investigou a influência dos fatores de origem natural da bacia de drenagem sobre parâmetros físico-químicos como: carbono orgânico particulado, carbono orgânico dissolvido, carbono inorgânico dissolvido, pH, fósforo total e nitrogênio total do rio Solimões/Amazonas e seus principais tributários. Ele verificou altas correlações entre as características naturais da bacia de drenagem e os parâmetros avaliados onde, devido a constância encontrada nessas características é possível estimar, por meio de desvios significativos nestes parâmetros, a ocorrência de perturbações nos sistemas como, por exemplo, fatores de origem antropogênica.

Koumrouyam e Santana (2008) estudaram a concentração total e em frações geoquímicas de metais em sedimento no lago do Parú (Manacapuru – AM) sob influência do pulso de inundação do baixo Rio Solimões utilizando a metodologia de extração sequencial para separação dos elementos nas frações geoquímicas trocáveis. Este estudo mostrou que as concentrações de Cu e Mn não sofreram variações significativas nos períodos amostrados,

sendo que os metais Fe, Zn e Co demonstraram ter suas concentrações dependentes do processo de inundação do Rio Solimões.

3.3. Rio Madeira

A bacia do Rio Madeira (Figura 6) está localizada na parte sudoeste da região Amazônica, drenando uma parte significativa da bacia coberta pela densa floresta tropical. O fluxo total deste rio varia entre 20.000 m³/s no período de seca e 48.000 m³/s no período chuvoso. Na estação chuvosa, o rio principal é coberto pelas águas transbordando pela floresta adjacente, levando à formação de inúmeros lagos marginais (PFEIFFER et al., 1991).

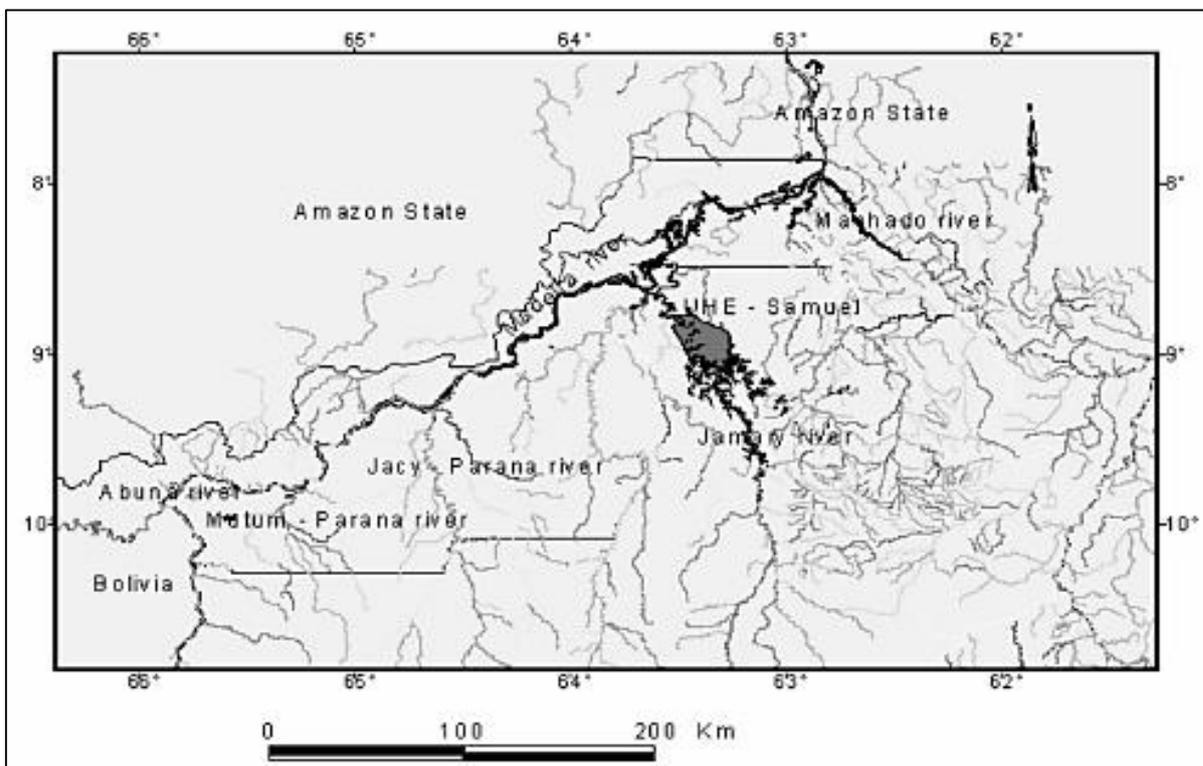


Figura 6 – Bacia do rio Madeira na floresta Amazônica (FONTE: BASTOS et al., 2008)

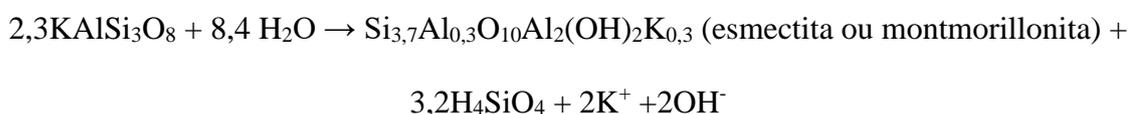
Segundo Santos e Ribeiro (1988) e Junk e Furch (1980), o Rio Madeira é caracterizado por ser o maior abastecedor de sais dissolvidos e de sedimentos do canal principal da Bacia Amazônica, fator resultante do aumento da vazão no período de cheia e descida das águas. As águas que o formam provêm dos Andes peruanos e bolivianos, assim

como também do Escudo do Brasil Central. Entre seus principais afluentes da margem esquerda podem ser citados os rios Novo, Beim, Veloso e Abunã. Os afluentes da margem direita são os rios Aripuanã, Manicoré, Marmelos, Ji-Paraná, Jamari e Jaci-Paraná, sendo estes oriundos dos Escudos do Brasil Central e são característicos por serem rios de grande extensão, no entanto com pequenos volumes, em comparação com os afluentes do Rio Amazonas.

O Rio Madeira apresenta um hidrograma plurimodal na estação de Abunã localizada à jusante da fronteira Bolívia e Brasil, onde o período de cheia é registrado entre os meses de janeiro a junho. Após a confluência com o rio Amazonas, o período de cheia ocorre no período de fevereiro a julho. A ocorrência de apenas um pico de cheia no primeiro semestre do ano, característico de rios originários do hemisfério Sul, permite classificar o regime hidrológico do rio Madeira como sendo do tipo tropical austral (Filizola *et al.*, 2002). Tomando a estação de Óbidos como referência, o período de descida das águas e pico de seca ocorre no período de Outubro a Novembro (FILIZOLA E GUYOT, 2011).

Este rio constitui-se em um sistema complexo devido à sua drenagem por terrenos mistos (orogênicos, plataformas e crátons) resultando no transporte de carga de sólidos de diversas origens, enriquecendo a água com um matiz de elementos. Boa parte da carga de sólidos em suspensão deste rio é proveniente dos Andes, ocorrendo que 50% desta carga é transportada para o rio Amazonas (248 a 600 milhões de toneladas por ano). Entre as fontes antrópicas mais conhecidas que influem no aporte de substâncias nessa região são citadas: lançamentos de esgotos domésticos e industriais causada pela ocupação ascendente do local, atividades garimpeiras e processos de dragagem para obtenção de areia (LATRUBESSE *et al.*, 2005). Galvão e colaboradores (2009b) demonstraram por meio de análise estatística univariada dos dados de sólidos em suspensão e alguns metais (Co, Cr, Pb, Hg, Zn, Mn, Fe), que as concentrações desses metais se mostraram independente em relação aos fatores de

Diferente do rio Solimões que drena áreas de densa mata pluvial, o tipo de solo predominante no rio Madeira é do tipo latossolo amarelo e vermelho-amarelo, que segundo Rocha (2009) e colaboradores, são originados a partir da lavagem alcalina, resultando em perda de boa parte da sílica dos feldspatos que compõem a formação original. Ao processo de eliminação total da sílica e formação de oxi-hidróxidos de alumínio e de ferro dá-se o nome de elitização ou ferralitização, originando minerais secundários como a esmectita, conforme a seguinte reação (TEIXEIRA et al., 2000):



Logo, além da formação geológica influenciar diretamente na pedogênese do solo e, conseqüentemente, em sua composição mineralógica, o tipo de cobertura vegetal estabelecida no terreno influencia na distribuição dos tipos de solo em uma bacia hidrográfica.

3.4. Indicadores ambientais como ferramenta auxiliar no diagnóstico de recursos hídricos

A qualidade da água de um recurso hídrico pode sofrer alteração por meio de uma série de fatores, entre eles destacam-se a cobertura vegetal, a geologia, morfologia e fatores de origem antrópica. Estes fatores podem ser divididos em pontuais e não-pontuais. As fontes pontuais, como efluentes domésticos e industriais, podem ser facilmente identificadas enquanto que as fontes não-pontuais, como atividades agropecuárias e o acúmulo de resíduos no solo despejados inadequadamente no solo, são difíceis de se identificar (BAYRAM et al., 2013; TUNDISI, 2008). Em conjunto com a água, a carga sedimentar é considerada um

componente de grande importância no que se refere à avaliação da qualidade de um recurso hídrico, refletindo a condição do ambiente aquático (MEI et al., 2011).

Sedimentos são constituídos de partículas com granulometria e composição química variadas, sendo formados pelo acúmulo gradativo de substâncias e compostos oriundos de processos químicos e biológicos ocorridos ao longo do tempo que se depositam no fundo de um corpo hídrico. Destaca-se a importância de sedimentos como indicadores de qualidade de um sistema aquático, de forma que alterações na qualidade do corpo hídrico podem ser detectadas e identificadas por meio da análise destes (ROCHA et al., 2009).

Além de atuarem como meio de transporte e acumulação de poluentes, os sedimentos contribuem na disponibilização de contaminantes ao meio hídrico devido sua capacidade de responder às alterações sofridas no ambiente. Este processo integra a complexa dinâmica dos ecossistemas aquáticos, sendo a matéria orgânica e os materiais sólidos particulados agentes adsorventes de contaminantes, principalmente metálicos, provenientes de despejo industrial, resíduos domésticos e/ou disposição inadequada de resíduos sólidos. Os contaminantes despejados no meio são distribuídos ao longo dos compartimentos do ambiente aquático (coluna d'água, material particulado em suspensão e sedimentos), com isso, verifica-se a necessidade de se aprofundar no estudo da dinâmica de interação entre estes compartimentos, como também a avaliação dos impactos sofridos ao longo de um corpo hídrico por meio da análise e integração de cada um destes agentes (PINTO et al., 2009; ALMEIDA e ROCHA, 2006).

Uma ferramenta chave para averiguar os efeitos de origem antrópica nos estudos de avaliação de impacto ambiental, é o levantamento de atividades desenvolvidas no solo ao longo do curso de um afluente ou rio principal. Fatores como o aumento de áreas de superfície terrestre impenetráveis, aumento de escoamento e a descarga de poluentes pontuais ou não-

pontuais resultam na destruição de habitats, perda na diversidade de espécies, abastecimento de partículas em suspensão provenientes de áreas urbanizadas, fator este que aumenta quantitativamente a carga de contaminantes em um recurso hídrico e sua degradação progressiva (CALDERON et al., 2014). Neste mesmo estudo, estes verificaram que as variáveis que mais definem a qualidade ambiental são a cobertura vegetal, urbanização e a qualidade da água (aplicação de índice de qualidade de água simplificado) e as variáveis menos indicativas, neste caso, são a identificação e quantificação de anfíbios (bioindicadores) e o índice biótico de macro-invertebrados. Entretanto, a associação entre os fatores químicos e biológicos em estudos ambientais ainda constitui uma forma de gerar diagnósticos mais completos, necessitando de uma seleção mais minuciosa de bioindicadores e parâmetros físicos e químicos.

O aumento de nutrientes nos corpos hídricos é majoritariamente causado pelo lançamento de esgotos domésticos e uso de fertilizantes na agricultura. No intuito de reduzir ou eliminar o impacto em um corpo hídrico causado pela implantação de cultivo do tipo restolho, algumas medidas podem ser tomadas para o controle da alteração de alguns indicadores ambientais. Para se reduzir o aporte de partículas em suspensão, reduzindo a turbidez dessas águas localizadas próximas às áreas de plantio, o ato de se evitar lavrar a terra ou deixá-la nua, permite a redução no processo erosivo, como também a redução no aporte de fósforo no corpo hídrico. O redirecionamento ou uso controlado de fertilizantes resultam na redução da contribuição do aumento nos níveis de nitrogênio e o uso de adubo e calcário auxilia na redução da acidez do solo e, conseqüentemente, dos corpos que recebem essas águas (ANA, 2013; BOWMER, 2011). Os fertilizantes são compostos basicamente de uréia ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$), superfosfato (P_2O_5), sulfato de amônio [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$] e cloreto de potássio (KCl) (PANTOJA et al., 2015).

Contudo, apesar de receber maior atenção, a influência antropogênica não é a única responsável pela composição química dos mananciais subterrâneos e superficiais. Conforme citado por Queiroz e colaboradores (2009), alguns elementos possuem relação direta com os tipos de rochas em ambientes que mantêm suas características naturais preservadas, como por exemplo: Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr, HCO_3^- e SO_4^{2-} possuem relação com carbonatos e gipsita; K^+ , B e Na^+ com illita; Si com bentonita e fontes termais; Na^+ e Cl^- com evaporitos; Fe e B com glauconita. Martinelli e colaboradores (1993), esclarecem que as regiões andinas e sub-andinas suprem por volta de 90 % da carga de sedimentos da bacia Amazônica. Esta carga de sedimentos pode sofrer alterações em sua composição orgânica e inorgânica após sua deposição na bacia sendo reintroduzidos ao curso hídrico por meio de sua ressuspensão. O estudo proposto por Martinelli associou a composição química de elementos em maior teor com a composição mineralógica de amostras de sedimento em um trecho de 2400 km ao longo do rio Amazonas, além de ter avaliado a contribuição relativa do intemperismo *versus* a contribuição das águas dos tributários na composição química desses sedimentos.

Além da composição química da água ser resultante de um conjunto de processos químicos e da interação entre sistemas aquáticos, terrestres e da atmosfera, essa composição também é resultado de atividades de organismos que interferem nos ciclos biogeoquímicos. Entre as substâncias dissolvidas podem ser citados os íons principais que são nomeados de “conservativos”, que não sofrem alteração significativa na sua concentração independente das atividades de organismos, e os íons “nutrientes principais” ou “não-conservativos” que sofrem variações significativas em função das atividades dos organismos. Entre os íons não-conservativos, destacam os íons traço que são requeridos por diversos organismos, como metais, por exemplo (TUNDISI, 2008; VON SPERLING, 2005).

3.4.1. Metais

A contaminação por metais traço pode afetar tanto o ciclo geoquímico desses elementos como os parâmetros que se referem à qualidade ambiental. Na natureza esses elementos estão predominantemente presentes no solo e adsorvidos nos sólidos em suspensão. A disponibilização destes na natureza ocorre pelo intemperismo das rochas e escoamento superficial ocasionado pelas chuvas que carrega esses elementos presentes nos perfis do solo dessa região. Entre as fontes antrópicas dos metais traço podem ser citadas a disposição incorreta de resíduos sólidos, liberação de efluentes industriais não tratados e alterações nos fatores físicos e químicos que influenciam nos processos de adsorção e dessorção desses metais em partículas (KABATA-PENDIA e PENDIAS, 2001; GUILHERME et al., 2005; STUMM e MORGAN, 1996; SIOLI et al., 1967). Recentemente, estudos sobre metodologias de extração química sequencial foram desenvolvidos para analisar elementos potencialmente tóxicos na qualidade da água no intuito de avaliar possíveis impactos e verificação da influência sazonal sobre o comportamento de metais de transição (KOUMROUYAU e SANTANA, 2008). Segundo Rocha e colaboradores (2009), parâmetros como dureza, pH e salinidade possuem grande influência na especiação de metais, sendo estes geralmente mais biodisponibilizados na forma de íons livre.

A contaminação de corpos hídricos pelos elementos Cu, Zn, Pb e Cd, tem sido motivo de preocupação ao redor do mundo devido a capacidade cumulativa destes nos compartimentos que compõem o ecossistema aquático como solos, água superficiais e subterrâneas e sedimentos. Além de se depositarem no material particulado e sedimento de um corpo hídrico, estes metais tem a capacidade de se acumular nas raízes de plantas distribuídas ao longo do local de incidência destes, podendo alcançar a cadeia alimentar de animais e seres humanos (AL MUSHARAFI et al., 2013). Os efluentes domésticos consistem

na principal forma de disposição de metais dentre as fontes antrópicas existentes, devido a maior capacidade de adsorção destes pelo material particulado. Alguns metais como Cd, Cu, Pb, Cr, Ni e Zn possuem suas concentrações mais alteradas pelo despejo de águas residuais. Diferente das diversas formas de degradação, a contaminação das águas por metais através do despejo de resíduos industriais, domésticos e sólidos, apresenta alto risco devido sua incapacidade de eliminação do meio por intermédio de fatores naturais (GOMES et al., 2009).

Gomes e colaboradores (2009), em estudo realizado no Rio Negro e pequenos tributários, verificou concentrações elevadas dos metais Cd, Fe, Ni e Pb no material particulado, principalmente no período de vazante. Este aumento da concentração foi resultado das atividades desenvolvidas ao longo da bacia do Rio Tarumã, além de ser influenciada pela presença marcante de estaleiros e marinas. Apesar deste aporte reduzir a qualidade da água do Rio Negro na porção localizada na orla da cidade, a sua alta vazão dilui significativamente a concentração destes metais aportados.

3.5. Legislação ambiental: Levantamento e perspectivas

A contaminação de sedimentos é proveniente da acumulação de substâncias orgânicas e inorgânicas que são disponibilizadas para o ambiente por meio de fontes pontuais, como a dragagem e o derrame, ou não-pontuais, como a deposição de partículas atmosféricas, erosão do solo e descarga de águas subterrâneas. Quando este ecossistema é afetado pela deposição constante de contaminantes, além da integridade do ecossistema aquático ser afetada, a saúde humana pode ser indiretamente afetada. O monitoramento dos níveis de contaminantes em sedimentos de corpos hídricos e levantamento de suas possíveis fontes devem acarretar em ações imprescindíveis na avaliação destes ambientes e, caso necessário, efetuar ações de remediação deste recurso hídrico.

Em diversos países ao redor do mundo a preocupação com a integridade dos corpos hídricos é refletida na elaboração de legislações que visam o monitoramento e avaliação dos corpos hídricos com relação à substâncias que podem ser nocivas à saúde quando suas concentrações se encontram acima das estabelecidas por estas. No Brasil, os Ministérios da Saúde e do Meio Ambiente, por meio de portarias e resoluções, possuem a incumbência de estabelecer os critérios que permitem avaliar a qualidade de águas superficiais e subterrâneas destinadas para diversos fins e para lançamento de efluentes. Entretanto, existe uma lacuna quando se refere à integridade dos sedimentos, onde verifica-se a inexistência de uma legislação nacional para este fim. O Conselho Nacional do Meio Ambiente por meio da resolução número 344/2004 (CONAMA, 2004) estabelece as diretrizes gerais com relação ao material dragado em águas jurisdicionais brasileiras. Todavia, os valores de referência estabelecidos pela resolução, são os mesmos atribuídos pelo Guia de Qualidade de Sedimento Canadense para a Proteção da Vida Aquática - Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Este guia possui como atribuição fornecer proteção da vida em águas doces e marinhas de diversos estressores antropogênicos, não sendo restringido a uma espécie particular, mas as informações das espécies específicas são fornecidas em fichas técnicas. O Guia também expõe dois grupos de valores máximos recomendados denominados ISQGs (Interim Sediment Quality Guidelines – Orientações Provisórias de Qualidade do Sedimento) e PEL (Probable Effect Level – Nível Provável de Efeito). O primeiro valor é considerado quando os dados estão disponíveis mais limitados. O segundo valor leva em consideração os efeitos biológicos adversos causados pelo aumento da concentração de determinados elementos onde este, utilizado em conjunto com os ISQGs permite estabelecer uma faixa de concentração tolerável dos elementos abrangidos (CCME, 1995).

O Departamento de Meio Ambiente e Conservação (DEC, em inglês), na Austrália, adotou o Guia da Austrália e Nova Zelândia para Qualidade de água doce e salgada -

Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality (ANZECC e ARMCANZ, 2000) para avaliação dos níveis de algumas substâncias em sedimentos. O Guia estabelece duas concentrações (Diretrizes de Qualidade de sedimentos interinos - Interim Sediment Quality Guidelines: ISQGs), uma denominada baixa concentração ISQG e alta concentração ISQG. Os valores inferiores ao baixo ISQG são contados por possuírem baixa incidência de apresentar efeitos adversos. As substâncias que apresentam concentrações próximas ou superiores ao alto ISQG são consideradas por possuírem maior probabilidade de apresentar efeitos biológicos negativos à saúde humana.

A National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) consiste em uma agência norte-americana que, por meio do Programa "National Status and Trends" (NSeT), desenvolveu o Guia para Qualidade de Sedimento, de maneira informal, levando em consideração os efeitos toxicológicos que algumas substâncias possuem, conforme suas concentrações sofrem alterações. As concentrações estipuladas consideradas "seguras" foram divididas em dois conjuntos de valores nomeados "Effect Range-Low - ERL" e "Effects Range-Median - ERM", onde o primeiro abrange concentrações onde efeitos adversos raramente ocorrem e o último abrange concentrações onde esses efeitos ocorrem com frequência, para cada substância (NOAA, 1999).

4. MATERIAL E MÉTODO

4.1. Área de estudo

A área estudada abrange dois grandes sistemas fluviais localizados na bacia Amazônica: Solimões/Amazonas e Madeira/Amazonas (Figura 8). Os pontos de amostragem foram elencados por critérios de proximidade a estações hidrométricas monitoradas pelos serviços nacionais (Observatório de Pesquisa em meio ambiente relativo à hidrologia e geodinâmica da Bacia Amazônica - ORE/HYBAM) de forma a facilitar a obtenção de dados de vazão e cota dos rios abrangidos, visando à integração destes no contexto do estudo.

As medições de vazão foram realizadas com um Perfilador de Corrente Doppler-Acústico (ADCP) em cada ponto de coleta. Esta etapa contou com o apoio do Laboratório de Potamologia Amazônica do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Amazonas (LAPA, DGEOG/UFAM) e do Instituto Francês de Pesquisas para o Desenvolvimento (IRD).

A delimitação do período de realização das coletas foi feita em função do regime hidrológico da estação de Óbidos que, segundo esta, os períodos de águas altas e águas baixas ocorrem, respectivamente, entre os meses de abril a junho e setembro a novembro.

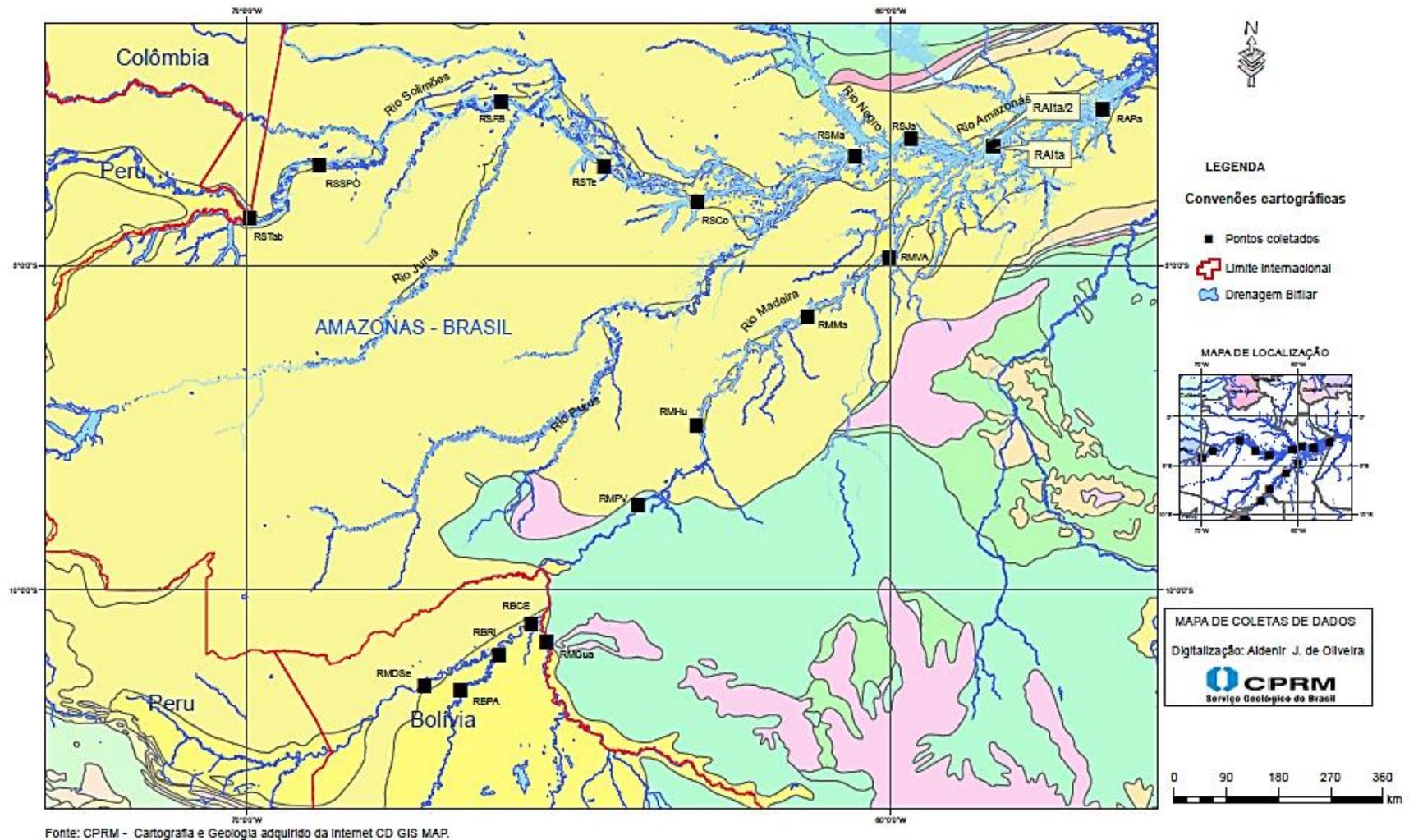


Figura 8 – Localização dos pontos de coleta distribuídos ao longo do trecho Solimões/Amazonas. As legendas dos pontos são detalhadas nas Tabelas 2 e 3.

Cada ponto de coleta foi devidamente georreferenciado com auxílio de aparelho de GPS no momento da amostragem. A localização dos pontos de coleta quanto às cidades e rios nos dois sistemas fluviais está detalhada na Tabela 1.

Tabela 1 – Nomes e localização dos tributários analisados

SISTEMA FLUVIAL			
MADEIRA/AMAZONAS		SOLIMÕES/AMAZONAS	
Rio	Município/País	Rio	Município/País
Beni	Rurrenabaque - BO	Solimões	Tabatinga - BR
Madre de Dios	Sena – BO	Solimões	São Paulo de Olivença - BR
Beni	Peña Amarilla - BO	Solimões	Fonte Boa - BR
Beni	Riberalta - BO	Solimões	Tefé - BR
Mamoré	Guayaramerím – BO	Solimões	Coari - BR
Beni	Cachuela Esperanza - BO	Solimões	Manacapuru - BR
Madeira	Porto Velho - BR	Amazonas	Jatuarana - BR
Madeira	Humaitá – BR	Amazonas	Itacoatiara - BR
Madeira	Manicoré – BR		
Amazonas	Fazenda Vista Alegre – BR	Amazonas	Parintins - BR
Amazonas	Itacoatiara - BR		

As coletas de amostras de água e sedimento no trecho Solimões/Amazonas no período de 18 de fevereiro a 8 de abril de 2013 abrangendo a época de alta pluviosidade e regime de águas altas. A amostragem teve início no município de Tabatinga-AM, sendo finalizada no município de Parintins. Os rios abrangidos e a localização geográfica, além da codificação atribuída de cada ponto são detalhados na Tabela 2.

Tabela 2 – Descrição dos pontos de coleta na bacia do rio Solimões e suas respectivas coordenadas geográficas

Código da amostra	Rios	Municípios	Coordenadas	
			Latitude	Longitude
RSTab	Solimões	Tabatinga	4°16'21,43"S	69°56'48,59"O
RSSPO	Solimões	São Paulo de Olivença	3°28'17,04"S	68°51'50,37"O
RSFB	Solimões	Fonte Boa	2°28'52,93"S	66° 2'29,80"O
RSTe	Solimões	Tefé	3°28'25,90"S	64°26'44,97"O
RSCo	Solimões	Coari	4°1'44,11"S	62°59'54,20"O
RSMa	Solimões	Manacapuru	3°19'35,08"S	60°33'9,25"O
RSJa	Solimões	Jatuarana	3° 3'17,21"S	59°40'47,07"O
RAPa	Amazonas	Parintins	2°36'31,90"S	56°42'15,41"O
RAIta	Amazonas	Itacoatiara	3°10'7,03"S	58°24'35,78"O

No contexto das atividades do Projeto GEF – Amazonas, as campanhas realizadas no sistema fluvial Madeira/Amazonas ocorreram no período de 14 a 27 de outubro de 2013, abrangendo o período de estiagem desta região, tendo seu início na cidade de Rurrenabaque e prosseguiu até Guayaramerín-BO abrangendo os rios Beni, Madre de Dios e Mamoré, onde tiveram o seu término no município de Itacoatiara-AM (Tabela 3).

Tabela 3 – Descrição dos pontos de coleta localizados na bacia hidrográfica do Madeira e suas respectivas coordenadas geográficas.

Código da amostra	Rio	Município	Coordenadas	
			Latitude	Longitude
RBRu	Beni	Rurrenabaque	14°26'27,49"S	67°32'6,29"O
RMDSe	Madre de Dios	Sena	11°28'12,60"S	67°14'12,51"O
RBPA	Beni	Peña Amarilla	11°32'53,68"S	66°40'25,70"O
RBRi	Beni	Riberalta	10°59'40,00"S	66° 4'31,20"O
RBCE	Beni	Cachuela Esperanza	10°32'14,11"S	65°35'5,50"O
RMGua	Mamoré	Guayaramerín	10°48'44,71"S	65°20'34,73"O

RMPV	Madeira	Porto Velho	8°41'17,91"S	63°55'7,10"O
RMHu	Madeira	Humaitá	7°28'25,61"S	63° 0'52,89"O
RMMa	Madeira	Manicoré	5°47'10,25"S	61°17'28,65"O
RMVA	Madeira	Vista Alegre	4°53'34,37"S	60° 1'24,59"O
RAIta/2	Amazonas	Itacoatiara	3°10'24,82"S	58°24'42,34"O

4.2. Amostragem de água e sedimento

As campanhas de campo contaram com o apoio das equipes da rede observacional de parâmetros ambientais ORE/HYBAM presentes em cada um dos países envolvidos, além do apoio do Instituto Francês de Pesquisas para o Desenvolvimento (IRD) que fornece o suporte para o observatório. O deslocamento para realização das campanhas foi feito com o auxílio de lanchas deslizadoras e/ ou voadeiras.

A metodologia para coleta e preservação das amostras coletadas foi seguida conforme especificada pelo Standard Methods for Water and Wastewater Examination da American Public Health Association (APHA, 2012) conforme discriminado para cada parâmetro de análise.

A coleta das amostras de água foi efetuada pela imersão da garrafa van Dorn (Figura 9) a 30 cm abaixo da lâmina d'água e posteriormente armazenadas em frascos apropriados para cada parâmetro de análise. As amostras de cada ponto de coleta foram preservadas conforme critério de cada parâmetro e armazenadas a 4°C para posterior análise no local da coleta. No laboratório, a metodologia seguida para determinação de Sólidos Totais Suspensos (STS), foi conforme recomendação de APHA (2012) e obedeceu às seguintes etapas: A amostra de água foi filtrada em um filtro de fibra de vidro com porosidade de 0,45µm previamente pesado. O filtro contendo a amostra foi seco em estufa a 105 °C e, novamente,

pesado. A razão da diferença entre os pesos pelo volume de amostras filtrado (100 mL) é a concentração de STS em mg.L^{-1} .

Durante a amostragem os recipientes foram lavados três vezes com a própria amostra. Simultaneamente foram mensurados in loco os parâmetros temperatura, oxigênio dissolvido (OD), condutividade, turbidez e pH por meio da imersão dos sensores diretamente nos corpos d'água.



Figura 9 – Amostrador de van Dorn. FONTE:

https://www.shoppingdolaboratorio.com.br/produto.php?cod_produto=2023812

Para cada ponto de coleta de sedimento foram retiradas três tomadas de sedimentos em pontos que se distanciam da margem na proporção de 25, 50 e 75 % em distância, com coletor van Veen (Figura 10). Essas amostras foram transferidas para bandejas de aço-inox e homogeneizadas, com o objetivo de se obter uma amostra composta, ou amostra bruta, representativa da área amostrada. Posteriormente, realizou-se a separação de alíquotas que foram acondicionadas em frascos específicos, de acordo com o parâmetro a ser determinado, considerando espécies inorgânicas e orgânicas. Durante o transporte, as amostras foram mantidas sob refrigeração a 4 °C, e foram congeladas até o início dos ensaios.



Figura 10 – Amostrador de van Veen.

4.3. Metodologia analítica

As metodologias elencadas na análise dos parâmetros que servirão como indicadores de qualidade de ambientes aquáticos foram seguidas conforme recomendações de APHA (2012) e da United States Environmental Protection Agency.

4.3.1. Determinação de íons por cromatografia iônica

A metodologia para quantificação dos íons F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- e SO_4^{2-} nas amostras de água seguiu o escopo recomendado pela United States Environmental Protection Agency (EPA, 2003) – Método 300.1. O modelo do cromatógrafo utilizado foi o ICS 5000 da marca Dionex, com KOH como gerador de eluente. A coluna é do tipo AS-19 da marca Dionex Thermo Fisher. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Análises Minerais – CPRM. As curvas de calibração foram geradas a partir de padrões multi-elementares com rastreabilidade National Institute of Standards and Technology. O limite de quantificação para os íons F^- , Cl^- , NO_2^- , SO_4^{2-} e NO_3^- foi de $0,01mg.L^{-1}$.

4.3.2. Análise mineralógica dos sedimentos

As amostras de sedimento para análise mineralógica pela técnica de difração de raios X (DRX) foram tratadas para eliminação da matéria orgânica (Figura 11) da seguinte maneira:

Uma fração da amostra seca de cada sedimento foi transferida para um béquer e adicionou-se água destilada suficiente para cobrir todo o material. Os béqueres foram transferidos para chapa aquecedora à temperatura suficientemente alta para o conteúdo entrar em ebulição.

Foram adicionadas, aos poucos, alíquotas de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) 30% até cessar a produção de fumos brancos. As amostras foram secas em estufa a $60^\circ C$ e maceradas em gral de ágata para posterior análise no aparelho. Esta etapa foi efetuada nas instalações do Laboratório de Saneamento, Faculdade de Tecnologia/UFAM.



Figura 11 – Tratamento das amostras de sedimento para análise mineralógica por DRX

A identificação mineralógica do sedimento por DRX foi realizada em Difratorômetro de raios-X modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da PANalytical, com Goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta) e com tubo de raios X cerâmico de anodo de Cu ($K\alpha$ 1,5406 Å), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200W, 60kv. O detector utilizado é do tipo RTMS, Pixel/1D. A aquisição de dados foi feita com o software X'Pert Data Collector, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com o software X'Pert HighScore versão 3.0d, também da PANalytical. A identificação dos minerais foi feita através da comparação do difratograma obtido com padrões (fichas) do banco de dados do ICDD-PDF (International Center for Diffraction Data – Powder Diffraction File).

4.3.3. Análise granulométrica dos sedimentos

O preparo das amostras de sedimento para análise granulométrica obedeceu as seguintes etapas: As amostras de sedimentos foram secas em estufa a 60 °C durante 24 h. Pesou-se aproximadamente 20,0 g de cada amostra e estas foram transferidas para béquers de 100 mL. Adicionou-se 30 mL de NaOH 1mol L⁻¹ como agente dispersante e deixou-se em repouso durante 24 h. Após este período, as amostras foram passadas em peneira de 63µm e o material foi lavado com água corrente até a completa remoção do material mais fino. A porção retida na peneira foi levada para secar em estufa a 80°C durante 24 horas e, posteriormente, foi peneirada em uma série de padrão de peneiras com as seguintes dimensões: 1,0; 0,5; 0,25 e 0,125 mm. O material filtrado foi levado para ser analisado em um analisador de tamanho de partícula por difração laser Mastersizer 2000. Todas as etapas são resumidas na Figura 12.

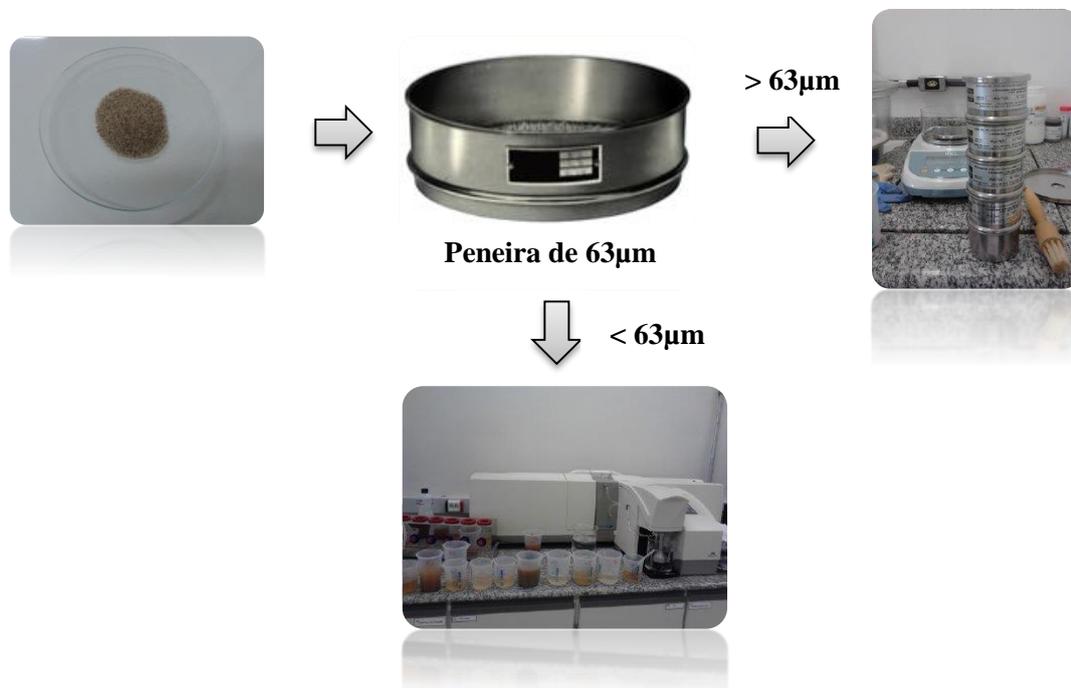


Figura 12 – Separação da fração silte-argila para análise no granulômetro e fracionamento das demais partículas

A classificação atribuída às partículas foi dada conforme designado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (Tabela 4) baseada em seus diâmetros equivalentes (ABNT, 1995). Ambas as análises granulométricas e mineralógicas foram realizadas no Laboratório de Análises Mineraias – LAMIN/CPRM sede em Manaus – AM.

Tabela 4 – Classificação das partículas conforme seus diâmetros

Fração granulométrica	Diâmetro equivalente
Matação	$200 < \Phi \leq 1000\text{mm}$
Pedra de mão	$60 < \Phi \leq 200\text{mm}$
Pedregulho	$2,0 < \Phi \leq 60\text{mm}$
Pedregulho grosso	$20 < \Phi \leq 60\text{mm}$
Pedregulho médio	$6,0 < \Phi \leq 20\text{mm}$
Pedregulho fino	$20 < \Phi \leq 2,0\text{mm}$
Areia	$0,06 < \Phi \leq 2,0\text{mm}$
Areia grossa	$0,6 < \Phi \leq 2,0\text{mm}$
Areia média	$0,2 < \Phi \leq 0,6\text{mm}$
Areia fina	$0,06 < \Phi \leq 0,2\text{mm}$
Silte	$0,002 < \Phi \leq 0,06\text{mm}$
Argila	$\Phi \leq 0,002\text{mm}$

Os dados de granulometria foram convertidos em termos de porcentagem e plotados em um gráfico de barras empilhadas com o auxílio do software OriginPro 8.

4.3.4. Metodologia para quantificação dos metais

A Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) consiste em uma técnica largamente usada em análises químicas devido ao seu caráter multi-elementar, alta sensibilidade e precisão, rapidez e capacidade de determinação simultânea. O plasma indutivamente acoplado é um gás parcialmente ionizado (geralmente, argônio) produzido em uma tocha de quartzo usando uma fonte de alimentação de

radiofrequência de 1 a 2,5kW. As amostras são tipicamente introduzidas na tocha em forma de aerossol (MORGANO et al., 1999; OLESIK, 1991).

4.3.4.1. Tratamento das amostras e análise

A técnica selecionada para quantificação de metais nas amostras de sedimento foi a da Espectroscopia de Emissão Óptica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

A análise laboratorial das amostras de sedimento do trecho Solimões/Amazonas foi realizada pela empresa Bioagri Ltda. – Piracicaba/SP. A metodologia aplicada para o preparo das amostras e análise em ICP-OES foi conforme a recomendada pela USEPA método 6010C. O procedimento para tratamento das amostras de sedimento correspondentes ao trecho Solimões/Amazonas para análise por ICP-OES foi seguido conforme recomendação da Environmental Protection Agency (EPA, 1996): Método 3050B e suas etapas são detalhadas na Figura 13.

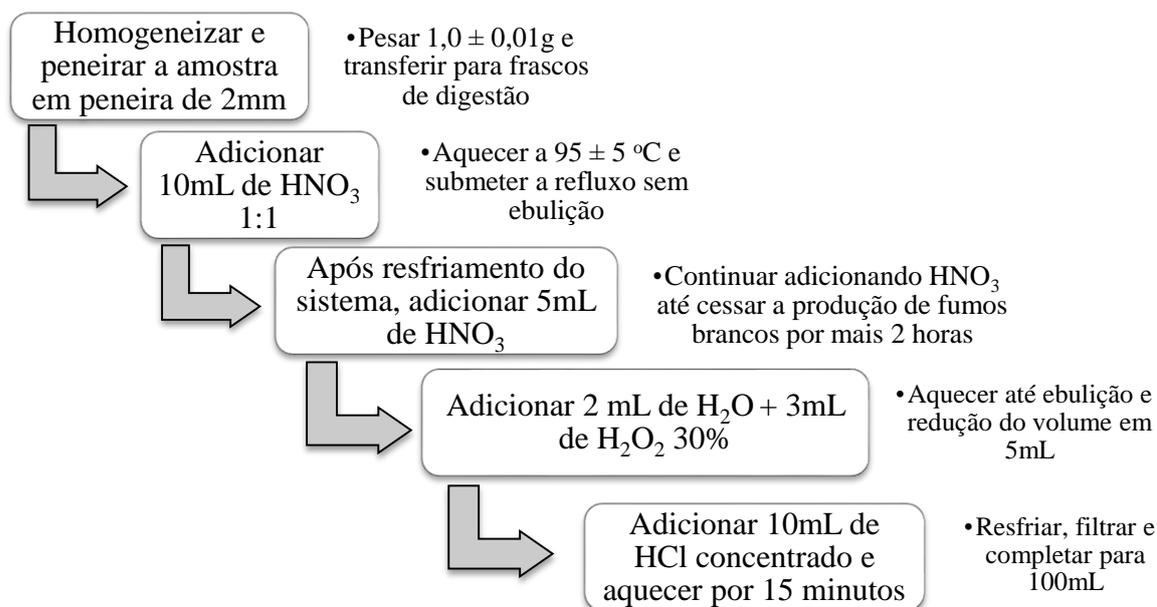


Figura 13 – Esquema de dissolução das amostras de sedimento para análise de metais por ICP-OES

Com o objetivo de se conhecer a quantidade mínima de analito que uma técnica é capaz de quantificar ou detectar, é necessário se obter o limite de quantificação e de detecção durante o procedimento analítico, de preferência, ou que esses valores sejam previamente estabelecidos. Essa etapa em conjunto com o conhecimento da faixa linear, auxilia na seleção adequada da metodologia a ser utilizada, além de se evitar cometer erros de extrapolação da concentração efetuado automaticamente pelo software específico para cada aparelho. O controle de qualidade do método com dados de limite de quantificação e estão disponibilizados na Tabela 5.

Tabela 5 – Limites de quantificação e branco para as determinações de metais da coleta do sistema Solimões/Amazonas

Amostras de sedimento			
<i>Metal</i>	<i>Unidade</i>	<i>Limite de quantificação</i>	<i>Branco de análise</i>
Ferro	mg.kg ⁻¹	1,0	< 1,0
Manganês	mg.kg ⁻¹	1,0	< 1,0
Zinco	mg.kg ⁻¹	1,0	< 1,0
Níquel	mg.kg ⁻¹	1,0	< 1,0
Cobre	mg.kg ⁻¹	1,0	< 1,0
Cádmio	mg.kg ⁻¹	0,1	< 0,1
Chumbo	mg.kg ⁻¹	1,0	< 1,0

O método selecionado para extração dos metais das amostras de sedimento correspondente ao trecho Madeira/Amazonas foi o proposto pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA: EPA 3051 (US-EPA, 1994). As etapas consistem na pesagem de 0,5 g da amostra seca e adicionaram-se 10 mL de HNO₃ destilado em um destilador de ácido Sub-Boiling Distillacid. Após a vedação dos tubos de teflon, estes foram submetidos a aquecimento em um digestor MARS que aquece a amostra por radiação micro-ondas. O forno foi configurado na seguinte programação:

- Rampa de aquecimento: Atingir 175°C em 5,5 minutos
- Temperatura fixa: 170-180°C por 10 minutos
- Pressão interna: 7,5±0,7 atm
- Potência máxima: 1100W

Após o resfriamento, as amostras foram filtradas em filtro de fibra de vidro nº 41 Whatman e aferidas com água para 50mL. Os padrões de metais utilizados foram do tipo I da PerkinElmer onde foi preparada uma curva para cada metal nas seguintes concentrações:

- Ferro (ppm): 1; 10; 25; 50; 100 e 150.
- Mn (ppb): 50; 100; 250; 500; 1000 e 2000
- Zn e Cu (ppb): 25;50; 125; 250 e 500
- Ni (ppb): 10; 20; 50; 100 e 200
- Cr, Pb e Cd: 5; 10; 25; 50 e 100

O espectrômetro de emissão óptica utilizado foi da marca THERMO, modelo ICAP 7600 duo. Todo o procedimento de tratamento das amostras e injeção no aparelho foi realizado no Laboratório de Química Analítica Ambiental – LQAA/INPA. Os limites de detecção e branco de análise estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Limites de detecção e branco de análise correspondente às coletas de segunda fase

Amostras de sedimento			
<i>Metal</i>	<i>Unidade</i>	<i>Limite de detecção</i>	<i>Branco de análise</i>
Ferro	mg.kg ⁻¹	0,14	< 0,14
Manganês	mg.kg ⁻¹	0,08	< 0,08
Zinco	mg.kg ⁻¹	0,08	< 0,08
Níquel	mg.kg ⁻¹	0,35	< 0,35
Cobre	mg.kg ⁻¹	0,83	< 0,83
Cádmio	mg.kg ⁻¹	0,08	< 0,08
Chumbo	mg.kg ⁻¹	1,24	< 1,24

4.4. Análise estatística dos dados e obtenção de dados secundários auxiliares

Todos os dados foram organizados em planilhas e submetidos a análise estatística descritiva. As variáveis foram testadas quanto à normalidade por meio do teste de Shapiro-Wilk com o auxílio do software de uso livre Action 2.4. Conforme os resultados dos testes de normalidade realizaram-se as análises de correlação entre os parâmetros metais, íons e granulometria. Para parâmetros que seguem a distribuição normal foi aplicada a análise de correlação de Pearson e para os que não seguem a distribuição normal, a de Spearman.

A análise das componentes principais (PCA) dos dados normalizados foi realizada com o objetivo de averiguar as variáveis responsáveis pela maior parte da variância dos dados, além de verificar relações e padrões de comportamento entre os locais de coleta. O software utilizado para análise das componentes principais foi o software para análises multivariadas The Unscrambler X 10.3.

Testes não-paramétricos são aplicados quando a distribuição normal dos dados é desconhecida, ou quando estes são constatados não seguirem uma distribuição normal para um grupo de parâmetros.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No intuito de avaliar como alguns indicadores variam ao longo dos trechos analisados, primeiramente é abordada a importância de parâmetros físico-químicos (temperatura, condutividade, turbidez, sólidos totais suspensos, pH) e composição iônica (F^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- e SO_4^{2-}) na caracterização destes ambientes com base nos fatores de origem natural e possíveis fontes antropogênicas. Posteriormente são apresentados os dados de granulometria e composição mineralógica, comparando os dados obtidos com os de estudos já efetuados na região. Buscando observar possíveis fontes de contaminação ou similaridade entre os pontos

amostrados foram aplicados testes estatísticos (correlação e análise de componentes principais) que permitem visualizar essas características.

5.1. Solimões/Amazonas: Análise dos parâmetros físico-químicos e concentração de ânions

Comparando os dados obtidos das variáveis físicas e químicas com a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente n. 357/2005 (CONAMA, 2005), para águas de classe 2, que podem ser observados nas Tabelas 7 e 11, verifica-se que a turbidez apresenta-se bem acima do valor máximo permitido. Apesar da turbidez está fora do valor de padrão de qualidade segundo esta resolução ambiental para águas superficiais, esta característica é inerente às águas do Rio Solimões e demais rios de águas brancas, ocasionada pela presença significativa de sólidos em suspensão. O Rio Marañon, um dos formadores do Solimões, possui a sua nascente na Cordilheira dos Andes, onde a passagem abrupta de um domínio andino para a planície amazônica resulta no aumento do transporte de partículas suspensas rio abaixo, justificando os altos valores de turbidez neste trecho do Rio Solimões. Os pontos localizados entre os municípios de Tabatinga e Coari estão localizados sobre a formação Solimões e Içá, datadas do período Neógeno, onde são consideradas formações recentes, conforme visualizado no Anexo I.

Sobre estas se formaram os depósitos aluvionares e os depósitos de terraços fluviais que são sedimentos inconsolidados propícios a sofrerem suspensão e ressuspensão das partículas de menor granulometria. Estes depósitos são característicos pela complexidade da distribuição das partículas de argila, silte, areia e cascalho, onde as de maior granulometria se depositam na base dos canais e as mais finas no topo destes (FEITOSA, 2008). O transporte destas partículas ao longo do escoamento superficial é dependente da intensidade das chuvas e da cobertura do solo.

Em contraste com os dados de turbidez (Tabela 7) obtidos neste estudo (169,37 - 471,58 UNT), estão os dados explanados no trabalho de Queiroz e colaboradores (2009), onde os valores se encontravam na faixa de 19,0 a 37,0 UNT. Esta diferença pode ser atribuída ao período hidrológico em que estas análises foram efetuadas e aos locais de amostragem. As amostras de água avaliadas por Queiroz (2009) foram analisadas em novembro de 2004, fim do período de estiagem, em um trecho do Solimões localizado entre os municípios de Tefé e Codajás. A amostragem no trecho do Solimões/Amazonas, no presente estudo, abrangeu o período de alta pluviosidade (janeiro a maio), logo esta diferença pode ser atribuída ao carreamento de partículas para o corpo hídrico com advento de alta precipitação atmosférica.

Tabela 7 – Resultados físicos e químicos das amostras coletadas no sistema Solimões/Amazonas

Parâmetros	Temperatura (°C)	Condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	pH	Turbidez (UNT)	STS (mg.L^{-1})
VMP*	-	-	6,0 - 9,0	≤ 100	-
RSTab	27,09	160	7,36	471,58	188,0
RSSPO	27,19	140	7,31	371,56	282,8
RSFB	27,52	110	6,71	238,48	119,2
RSTe	28,07	90	6,59	182,88	76,0
RSCo	28,16	90	6,64	199,25	40,8
RSMa	28,3	80	6,52	192,59	78,8
RSJa	28,48	60	6,28	169,37	46,0
RAPa	28,51	60	6,31	182,39	142,0
RAIta	27,69	270	6,18	232,55	85,6

LEGENDA:

*Valor máximo permitido pela Resolução CONAMA 357/2005

As siglas RS e RA são referentes aos Rios Solimões e Amazonas, respectivamente, seguidas das iniciais dos municípios

Destaca-se o valor máximo de turbidez observado no município de Tabatinga-AM (>471 UNT), onde foi registrado o menor valor de vazão ($52.820 \text{ m}^3/\text{s}$), conforme visualizado na Tabela 8, mostrando a influência da diluição na disponibilidade de partículas em suspensão. Outro fator, porém não comprovado pela ausência de registros de pluviosidade deste município, é a influência da remoção da cobertura vegetal no município de Tabatinga-AM e

de Letícia-CO na qualidade do rio, sendo que o ponto se encontra à jusante destas cidades e, portanto, mais suscetível a influência do processo erosivo ocasionado por influência antropogênica. Outro destaque foi o aumento significativo da turbidez no ponto RAIta (232,55 UNT) apesar de sofrer um aumento na vazão (209.900 m³/s). O ponto se localiza a jusante de Itacoatiara, no rio Amazonas, após a confluência do Rio Solimões com o Rio Negro em conjunto com o aporte do Rio Madeira nesse canal. Logo, a turbidez é influenciada significativamente pelo aporte de material em suspensão proveniente do Rio Madeira no período hidrológico avaliado, conforme já mencionado por Meade e colaboradores (1985).

Tabela 8 – Dados de vazão dos pontos localizados no sistema Solimões/Amazonas

Ponto	Data	Município	Rio	Vazão (m³/s)
RSTab	18/02/2013	Tabatinga	Solimões	52.820
RSSPO	20/02/2013	São Paulo de Olivença	Solimões	62.970
RSFB	23/02/2013	Fonte Boa	Solimões	74.920
RSTe	24/02/2013	Tefé	Solimões	98.960
RSCo	25/02/2013	Coari	Solimões	101.800
RSMa	27/02/2013	Manacapuru	Solimões	112.800
RSJa	01/03/2013	Jatuarana	Amazonas	123.600
RAIta	08/04/2013	Itacoatiara	Amazonas	209.900

Com relação aos parâmetros pH e condutividade elétrica (CE) das águas coletadas no sistema Solimões/Amazonas observa-se um decréscimo em ambas variáveis ao longo do trecho rio abaixo, este causado pelo aporte dos rios Negro e Preto da Eva. Estes resultados se encontram em consonância com o estudo realizado por Santos e Ribeiro (1988) no trecho do rio Solimões entre Tabatinga e Santarém que também apontaram essa diminuição gradativa nos valores desses parâmetros em pontos coletados em frente aos seguintes municípios: Tabatinga (pH = 7,20; CE = 132,20 µS/cm); São Paulo de Olivença (pH = 7,10; CE = 110,68 µS/cm); Tefé (pH = 6,98; CE = 91,04 µS/cm) e Codajás (pH = 6,98; CE = 54,30). Esse decréscimo pode ser atribuído pelo fator de diluição causado pelo aumento da vazão à jusante.

Ao se avaliar a qualidade dessas águas com base nos ânions analisados (Tabela 9), verifica-se que a concentração destes encontra-se bem abaixo da máxima permitida pela resolução CONAMA 357/2005. O íon cloreto é um parâmetro de grande importância devido a ser um bom indicador de impacto causado por aterros sanitários, esgotos domésticos e lixões, além de ser um íon bastante solúvel e estável (Feitosa, 2008). Entretanto, verificou-se que a concentração deste se encontrou na faixa de 0,987-4,92 mg.L⁻¹, sofrendo uma diminuição gradativa rio abaixo causada pelo fator de diluição, ocorrência também observada por Santos et al. (2006) em amostras coletadas no Rio Tarumã e seus afluentes. Valores menores e especialmente flutuantes foram registrados por Queiroz (2009) e colaboradores na faixa de 0,2-1,0 mg L⁻¹.

Tabela 9 – Resultados dos ânions quantificados nas amostras de água coletadas no sistema Solimões/Amazonas

PARÂMETRO	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²
UNIDADE	mg/L					
VMP*	1,40	250	1,0	-	10,0	250
RSTab	0,0686	4,92	ND	0,0135	0,513	ND
RSSPO	0,0626	3,95	0,120	ND	ND	ND
RSFB	0,0494	3,31	0,0440	ND	0,374	ND
RSTe	0,0435	2,62	0,0491	0,0122	0,0554	ND
RSCo	0,0420	2,76	0,0278	0,0170	0,397	ND
RSMa	0,0406	2,34	0,0497	0,0124	0,217	ND
RSJa	0,0313	1,81	0,0405	ND	0,0536	ND
RAPa	0,0364	0,987	0,0131	ND	ND	ND
RAIta	0,0375	1,025	0,0177	ND	ND	ND

LEGENDA:

*Valor máximo permitido pela Resolução CONAMA 357/2005

ND: Não determinado

Com relação ao íon brometo (Br⁻), a resolução do CONAMA 357/2005 não possui um valor mínimo estabelecido devido a este íon não apresentar toxicidade significativa à saúde humana. Todavia, a formação do íon bromato (BrO₃⁻) a partir da oxidação dos íons Br⁻, pela ação do ozônio ou de íons OH⁻, é um fator preocupante para a Organização Mundial da Saúde

devido ao seu potencial carcinogênico mesmo em concentrações na faixa dos $\mu\text{g.L}^{-1}$ (GONÇALVES et al. 2004). Com base nos teores de Br^- expostos na Tabela 9, é possível visualizar que no Rio Solimões e Rio Amazonas os valores se encontram bem baixos, sendo que em alguns pontos não foi possível detectá-lo pela técnica utilizada.

Constituinte essencial de proteínas e nutriente indispensável no crescimento de algas, o nitrogênio é um elemento de grande importância nos recursos hídricos. Os íons NO_3^- e NO_2^- estão entre as formas bioquimicamente interconvertíveis do ciclo do nitrogênio de maior interesse no que se refere à qualidade dos corpos hídricos. Em mananciais superficiais, o nitrato apresenta-se em baixas concentrações, sendo estas maiores em águas subterrâneas. Entre as fontes de origem antropogênica destas espécies podem ser citadas: os despejos domésticos, industriais e atividades agropecuárias, onde as formas predominantes do nitrogênio podem indicar o estágio de contaminação em que se encontra este manancial (FREITAS et al., 2001; VON SPERLING, 2005). No entanto, analisando as concentrações de NO_3^- e NO_2^- no sistema Solimões/Amazonas, é possível observar que estas se encontram bem abaixo do máximo recomendado pela resolução, não sendo possível visualizar qualquer influência de origem antropogênica, indicando que este trecho mantém suas características naturais. Vale destacar que a alta descarga líquida neste trecho influencia significativamente na baixa concentração destes íons.

5.2. Madeira/Amazonas: Análise dos parâmetros físico-químicos e concentração de ânions

A expedição de coleta no sistema Madeira/Amazonas (14 a 27 de outubro de 2013) abrangia o período de estiagem, sendo esta refletida pelos baixos valores de vazão (Tabela 10) do rio Madeira e seus formadores ($1.800-11.985\text{m}^3.\text{s}^{-1}$).

A bacia Amazônica é característica por uma marcante variabilidade na distribuição espacial de suas chuvas onde, a região de maior densidade está localizada no delta Amazônico e a noroeste da bacia, alcançando a média de 3000mm/ano. A pluviosidade decresce na planície peruana e boliviana e no estado de Roraima-BR, alcançando uma média de 1500 mm/ano. Na região dos altos Andes, com altitudes de 3000 metros acima do nível do mar, a pluviosidade alcança valores menores que 1000mm/ano (ESPINOZA VILLAR et al., 2009). Nessa região estão localizadas as nascentes dos principais formadores do rio Madeira, refletindo assim na baixa vazão destes tributários, observada na Tabela 10.

Tabela 10 – Dados de vazão e cota do trecho Madeira/Amazonas

Ponto	Data	Largura (m)	Vazão (m ³ /s)
RBRu	14/10/13	360	2.084
RMDSe	16/10/13	373	4.150
RBPA	16/10/13	326	1.800
RBRi	17/10/13	508	5.137
RBCE	17/10/13	632	6.442
RMGua	18/10/13	875	1.700
RMPV	20/10/13	797	10.850
RMHu	22/10/13	1.046	11.400
RMMa	23/10/13	864	10.345
RMVA	25/10/13	1.422	11.985
RAIta/2	27/10/13	3.146	106.670

Legenda:

As siglas RMD, RB, RM e RA são referentes aos Rios Madre de Dios, Beni, Madeira e Amazonas, respectivamente, seguidas das iniciais dos municípios. Com exceção do código RMGua, referente ao Rio Mamoré em Guayaramerín

A variação na condutividade elétrica pode estar associada tanto a fatores de origem natural como de fontes antropogênicas. Todavia, quando se trata da análise da variação espacial de indicadores em conjunto com a avaliação da qualidade de um corpo hídrico, este parâmetro se torna fundamental nessa assimilação. Os resultados dos parâmetros físicos e químicos analisados são mostrados na Tabela 11, em comparação com os valores máximos permitidos pela resolução do CONAMA 357/2005.

Os dados para o Rio Beni, mostraram uma variação desuniforme na condutividade ao longo deste percurso. A distância significativa (~392 km) entre os pontos em Rurrenabaque (RBRu) e em Peña Amarilla (RBPA) não permitem de forma conclusiva inferir a causa do aumento (52 à 65,7 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) na condutividade, podendo este ser causado pela continua dissolução dos minerais e da matéria orgânica conforme o avançar da planície de inundação. O Rio Madre de Dios (RMDSe) apresentou a menor condutividade (34,5 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e uma vazão de 4.150 $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

O encontro deste Rio em Riberalta (RBRi) resultou no aumento da vazão (5.137 $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) e conseqüente diluição do material dissolvido, resultando na diminuição da condutividade (49 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) em relação à Peña Amarilla - RBPA (65,7 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Guayaramerín - RMGua (rio Mamoré) apresentou a maior condutividade (89,2 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), baixa turbidez (99,3 UNT) e baixa quantidade de sólidos suspensos (48,9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

Tabela 11 - Resultados físicos e químicos das amostras coletadas no sistema Madeira/Amazonas.

Parâmetros	Temperatura (°C)	Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH	Turbidez (NTU)	STS ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
<i>VMP*</i>	-	-	<i>6,0 a 9,0</i>	<i>≤100</i>	-
RBRu	26,6	52,0	6,24	749	484
RMDSe	27,3	34,5	6,51	602	567
RBPA	30,8	65,7	6,91	641	598
RBRi	28,8	49,0	6,9	547	440
RBCE	25,9	46,5	6,69	637	504
RMGua	29,2	89,2	6,34	99,3	48,9
RMPV	29,9	63,0	6,42	226	135
RMHu	28,4	64,5	6,75	217	148
RMMa	29,6	74,0	7,06	157	103
RMVA	30,4	66,5	7,15	151	35,8
RAIta/2	30,5	43,4	6,9	96,8	22,5

LEGENDA:

*Valores máximos permitidos pela resolução do CONAMA 357/2005

Em períodos de seca, em regiões compostas de aquíferos com alta porosidade, os rios são abastecidos pelas águas de origem subterrânea, onde a litologia influencia na composição química dos mananciais superficiais, resultando no aumento da condutividade. A baixa pluviosidade característica do período de seca resulta também na menor erosão da planície aluvial, ocasionando em baixa concentração de material em suspensão. Outro fator que possibilita inferir esses resultados é a baixa vazão em RMGua ($1.700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) que influencia na deposição das partículas finas rio abaixo, aumentando a concentração destas nos sedimentos de fundo.

Ainda com base na condutividade, os pontos localizados no rio Madeira a partir de Porto Velho-RO, apresentaram valores maiores que os demais pontos. ANA (2011) afirma que a bacia do Madeira, na Amazônia, possui um dos maiores percentuais de uso antrópico do solo, seguida das bacias dos rios Xingu e Tapajós. O trecho do rio que drena o estado de Rondônia possui a maior extensão de registro de atividades agropecuárias (1.355.243 ha) da margem direita da bacia Amazônica, além da presença marcante de vegetação secundária em Porto Velho-RO. Apesar de não conclusiva, não se descarta a possibilidade de influência antrópica na condutividade dessas águas.

A resposta para a alta turbidez (547-749 UNT) e alta concentração de sólidos em suspensão ($440\text{-}598 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) no trecho do rio Beni entre o município de Rurrenabaque-BO e Cachuela Esperanza-BO pode ser encontrada nos seus formadores. As bacias que drenam os Andes possuem características distintas e drenam unidades geomorfológicas diferentes, além dos gradientes de altitudes que variam de 6500 a 120 m. Um exemplo é a bacia do rio La Paz que possui alta susceptibilidade à erosão e drena unidades sedimentares terciárias-quadernárias do Altiplano. Os vales do “Yungas” abrangem uma bacia composta de rochas paleozoicas cobertas de densa vegetação hiper-úmida. Outra unidade geomorfológica são as colinas do Alto-Beni que abrange uma série de sedimentos terciários (neógeno). A mudança abrupta de

um regime andino para planície ocasiona na lixiviação de partículas provenientes dessas formações inconsolidadas de idade geológica recente (MARTINELLI et al. 1993).

As diferenças observadas entre os valores de turbidez e STS entre o rio Beni e o Mamoré podem ser atribuídas às diferentes taxas de erosão que são controladas pelo tipo de vegetação predominante na planície. Segundo Guyot e colaboradores (1988), as taxas de erosão do rio Beni e do rio Mamoré medidas variaram, respectivamente, de 521 a 6000 t.km⁻² e 310 a 2600 t.km⁻² por ano. Nas bacias localizadas ao sul da região, as taxas de erosão são maiores onde se observa a vegetação bem esparsa (Figura 14), diferente das bacias distribuídas ao norte, que apesar da alta pluviosidade, as taxas de erosão são controladas pela densa vegetação.

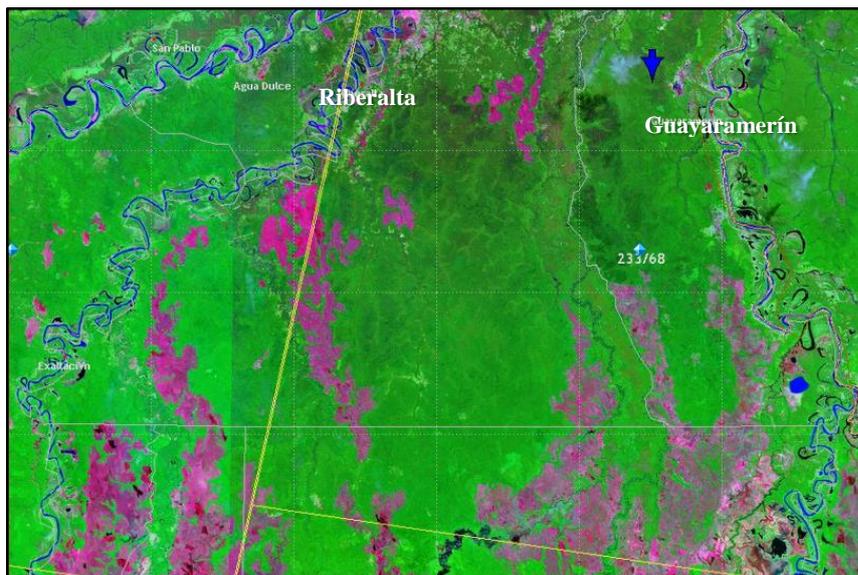


Figura 14 - Imagem de sensoriamento remoto da região que abrange os municípios de Guayaramerín-BO e Riberalta – BO. Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – Catálogo de Imagens Satélite LandSat 5. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>

Em Porto Velho (RMPV) é possível visualizar (Tabela 11) uma redução de até 3 vezes nos valores de STS (135 mg.L⁻¹) e turbidez (226 UNT) em comparação com seus tributários. Localizada à ~14 km à montante de Porto Velho, a Usina Hidrelétrica de Santo Antônio

(UHE-Santo Antônio) pode ser uma das responsáveis pela retenção de boa parte do material em suspensão. Todavia, uma discussão dessa estirpe não será aprofundada neste estudo devido à ausência de dados próprios da UHE-Santo Antônio como tempo de retenção, profundidade e largura do reservatório no período hidrológico abrangido.

Em ambos os trechos avaliados (Solimões e Madeira/Amazonas) foram coletadas amostras em Itacoatiara (RAIta – abril/2013 e RAIta/2- outubro/2013) onde é possível avaliar a influência da sazonalidade no conjunto dos dados. Segundo Filizola e Guyot (2009), no primeiro semestre do ano, o Rio Solimões e o Madeira são os principais contribuintes do material em suspensão transportado pelo Rio Amazonas. Todavia, no período de junho a novembro, onde ocorre a ascensão do Rio Negro e a descida dos rios Andinos, a quantidade de material em suspensão encontrada no Rio Amazonas é menor que no primeiro semestre, apesar do Rio Negro contribuir com uma descarga de, aproximadamente, 35% para o curso principal, indicando que os rios Madeira e Solimões são os principais provedores do material em suspensão do rio Amazonas. Este padrão pode ser visualizado com base nos valores nos pontos RAIta e RAIta/2 foram 232,55 e 96,8 UNT; 85,6 e 22,5 mg.L⁻¹; 209.900 e 106.670 m³.s⁻¹, para os parâmetros turbidez, STS e vazão, respectivamente, indicando que no período de estiagem, o rio Madeira pouco contribui com aporte de material em suspensão no rio Amazonas e tão menos com sua descarga.

Em relação ao ponto em Porto Velho – RO (RMPV), com base nos íons (Tabela 12) F⁻ (0,09 mg.L⁻¹), Cl⁻ (1,179 mg.L⁻¹), NO₃⁻ (1,345 mg.L⁻¹), NO₂⁻ (0,016mg.L⁻¹) e SO₄²⁻ (13,731mg.L⁻¹), verificou-se que estes se apresentaram baixos em comparação aos demais pontos no Rio Madeira. O ponto amostrado se localiza a uma distância de, aproximadamente 6,0 km da frente do município indicando que, caso este tenha sofrido algum impacto de

origem antropogênica, este sofreu diluição e não foi possível visualizá-lo à jusante do município.

O ponto RMHu apresentou os maiores valores dos ânions F^- ($0,112 \text{ mg.L}^{-1}$), NO_2^- ($0,875 \text{ mg.L}^{-1}$) e NO_3^- ($3,926 \text{ mg.L}^{-1}$), apesar da vazão sofrer um pequeno aumento ($11.400 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) sendo um forte indício de aporte recente de esgoto sanitário não-tratado. A região Norte, é a região com os menores valores percentuais de municípios assistidos por esgotamento sanitário, onde dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS do Governo Federal são inexistentes para o município de Humaitá – AM. Essa realidade, em conjunto com o crescimento demográfico resulta no aumento do impacto dos recursos hídricos causado pelo aporte de fontes pontuais e não-pontuais de poluição.

Tabela 12 – Resultados dos ânions quantificados nas amostras coletadas no sistema Madeira/Amazonas

PARÂMETRO	F^-	Cl^-	NO_2^-	Br^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
	mg/L					
VMP*	1,4	250	1	-	10	250
RBRu	0,077	0,464	0,13	ND	1,792	9,981
RMDS_e	0,079	0,413	0,017	ND	0,975	10,06
RBPA	0,078	0,756	0,206	ND	1,696	15,285
RBRI	0,063	0,407	0,084	ND	2,011	5,789
RBCE	0,097	0,763	0,064	ND	1,289	19,518
RMGua	0,099	2,555	0,084	0,015	1,625	22,964
RMPV	0,09	1,179	0,016	ND	1,345	13,731
RMHu	0,112	1,84	0,875	0,013	3,926	16,423
RMMa	0,093	1,623	0,013	0,013	1,277	14,881
RMVA	0,048	2,172	0,702	ND	2,793	4,995
RAIta/2	0,09	1,073	0,017	ND	1,158	15,258

LEGENDA:

- Valores máximos permitidos pela resolução do CONAMA 357/2005

ND: Não detectado

A Cordilheira dos Andes contém maiores áreas em que se concentram depósitos de evaporitos e carbonatos da Bacia Amazônica. Segundo McClain e Naiman (2008) o maior fluxo de íons Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- e SO_4^{2-} ocorrem em rios que drenam depósitos carbonáticos

e altos fluxos de Na^+ e Cl^- ocorrem em rios que drenam depósitos de evaporitos. Segundo Stallard e Edmond (1983) as cabeceiras do Rio Solimões possuem maior quantidade de depósitos de evaporitos e carbonatos em relação às cabeceiras do Rio Madeira. Esta ocorrência reflete na percentagem de íons com que esses rios contribuem para o rio Amazonas. Os dados obtidos de Cl^- no trecho Solimões/Amazonas ($0,987-4,92 \text{ mg.L}^{-1}$) e no trecho Madeira/Amazonas ($0,407-2.172 \text{ mg.L}^{-1}$) refletem essa ocorrência, sendo que o fator de diluição permite melhor visualizar esta discrepância. No trecho Solimões/Amazonas, os valores de descarga medidos variaram entre $52.820 - 209.900 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, onde no trecho Madeira/Amazonas entre $2.804-106.670 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, indicando em termos proporcionais, uma maior contribuição dos rios provenientes dos Andes peruanos com relação ao teor de íons.

5.3. Análise dos dados granulométricos dos sedimentos de fundo

A formação dos solos e da carga sedimentar possui sua origem no processo erosivo das unidades litológicas por onde ocorre o escoamento superficial ou, deflúvio. Uma rede hidrográfica é responsável pelo transporte para o oceano de boa parte deste material carregado durante a erosão, onde maiores taxas deste processo são observadas em bacias que drenam cadeias de montanhas ativas, como os Andes, neste caso. A carga sedimentar de um sistema lótico é formada pela matéria em suspensão e pelo sedimento de fundo e sua formação é dependente de diversos processos hidrológicos como o escoamento superficial e sua intensidade, permeabilidade da superfície do terreno, tipo de vegetação e temperatura. Entre os fatores antrópicos que influenciam na erosão destaca-se o desmatamento, exploração mineral, atividades agrícolas e aumento da densidade demográfica (FEITOSA, 2008; FILIZOLA e GUYOT, 2009).

A composição mineralógica e as características físicas das partículas que compõem o sedimento de fundo e em suspensão refletem o ambiente por onde os mananciais superficiais percorrem, além de preservarem a assinatura das fontes destas partículas. O processo erosivo sofrido ao longo de uma bacia hidrográfica é dependente dos seguintes fatores: precipitação, litologia, morfologia, cobertura vegetal, características da paisagem e fatores antropogênicos. Avaliar a granulometria, tanto do material particulado em suspensão como do sedimento de fundo é fundamental para a avaliação da dinâmica de entrada, transporte e deposição do sedimento, além de permitir associar esses dados com a entrada de nutrientes no corpo hídrico (Pavanelli e Selli, 2013).

No trecho Solimões/Amazonas (Figura 15), é possível perceber que os sedimentos de fundo são compostos basicamente de areia fina e média, com baixo teor de silte+argila.

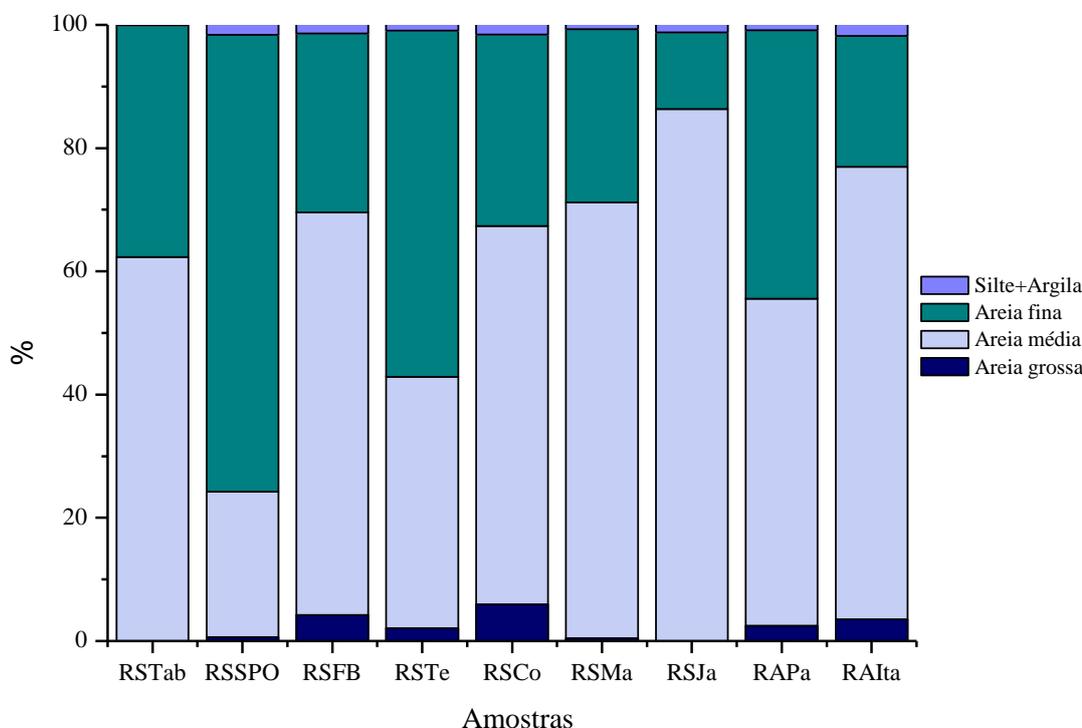


Figura 15 – Composição granulométrica dos sedimentos de fundo no trecho Solimões/Amazonas, segundo a classificação da ABNT (1995).

No trecho entre os municípios de São Paulo de Olivença (RSSPO) e Jatuarana (RAJa) é possível observar o aumento gradual no teor de areia média da montante à jusante onde a causa desse aumento, conforme Quadro 1, se encontra na erosão gradativa das margens do rio. Vale ressaltar a possível influência do aporte de tributários menores ao longo deste trecho, todavia, esta não pode ser comprovada por meio dos dados disponíveis.

Quadro 1 – Associação entre a granulometria e problemas ambientais associados (Adaptado de WHO, 1996).

Tamanho da partícula	Problemas ambientais	Problemas de engenharia associados
Siltes e argilas	Erosão, principalmente perda da cobertura de solo em áreas de agricultura; queda de barrancos pela ação das águas	
	Alta recarga de sedimentos para os reservatórios	Assoreamento dos reservatórios
	Transporte químico de nutrientes, metais e compostos organoclorados	
	Assoreamento dos locais de desova dos peixes e perturbação de habitats (por erosão ou assoreamento) de organismos bentônicos	
Areia	Erosão do leito do rio e das margens	Deposição do canal fluvial, problemas de navegação; Instabilidade das seções transversais do rio
	Perturbação do habitat	
Cascalho	Instabilidade do canal agregada ao processo de dragagem	Instabilidade do canal do rio leva a problemas de navegação e controle de inundações
	Perturbação do habitat	

O Rio Beni e o Mamoré contribuem no período, respectivamente, com 72 % e 28 % da carga de sedimento do Rio Madeira, onde são considerados os dois principais tributários deste rio. A planície boliviana é composta de sedimentos aluviais recentes, tendo o seu nível controlado pelos afloramentos dos escudos Brasileiros pré-cambrianos localizados à jusante de Villa Bella - BO. Guyot e colaboradores (1999), em estudo da composição granulométrica

de sedimentos de fundo e em suspensão nos tributários formadores do rio Madeira distribuídos ao longo da planície boliviana, coletadas em períodos de baixa vazão (1988-1989) verificaram que estes apresentaram partículas de maior diâmetro (10-100 μm) após a confluência com o rio Alto-Beni, entretanto, nas demais amostras localizadas à jusante deste ponto, observou-se a composição predominante de partículas finas (0,09-0,15 mm) até a confluência com o Rio Madeira.

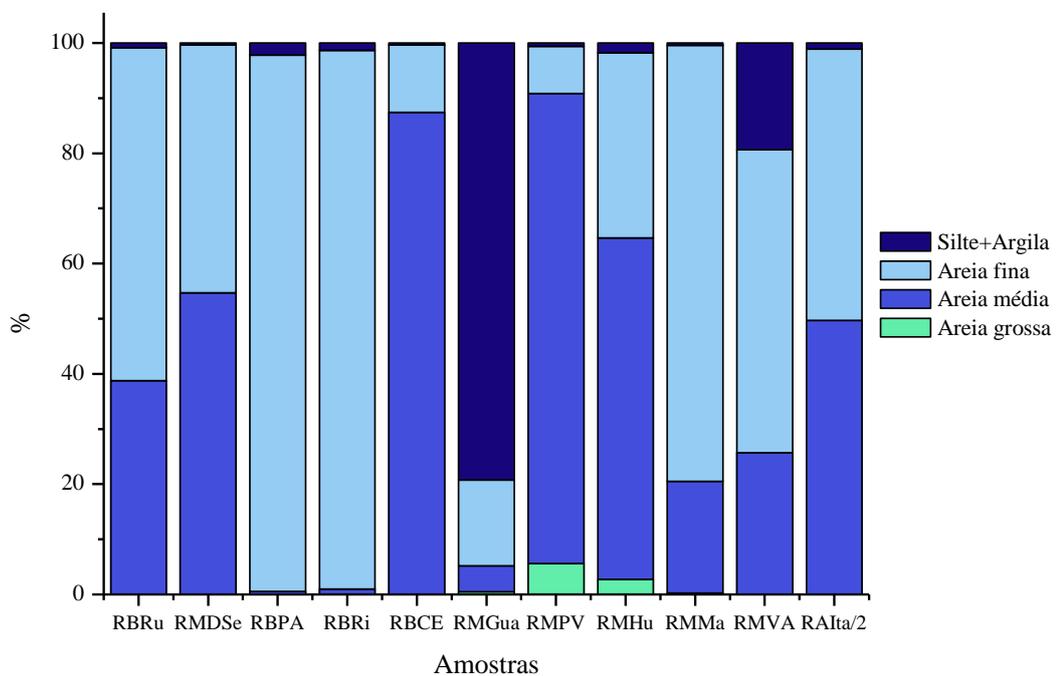


Figura 16 - Composição granulométrica dos sedimentos de fundo no trecho Madeira/ Amazonas

Um comportamento similar foi observado analisando a Figura 16, onde se verificou a predominância de areia fina e média em RBRu e areia fina em RBPA e RBRI, onde estes dois últimos são municípios com densidades demográficas diferentes sendo o de Riberalta o mais denso indicando que o uso do solo não tem influenciado significativamente na dinâmica dos sedimentos de fundo nesta região onde estes são predominantemente de origem andina.

O sedimento analisado no rio Beni é majoritariamente composto de areia fina. Entretanto ocorre uma mudança brusca no tamanho da partícula em frente ao município de Cachuela Esperanza – BO, aumentando consideravelmente a porcentagem de areia média neste sedimento depositado. Um dos principais fatores é a erosão do leito e das margens e carreamento das partículas menores causados pelo aumento da velocidade das águas neste ponto próximo a uma cachoeira, além da constante ação do intemperismo sobre os afloramentos de rocha presente neste ponto. Outra ocorrência que se observa, já registrada em estudos anteriores (MCCLAIN e NAIMAN, 2008) é a redução do tamanho das partículas no trecho do rio Madeira entre os municípios de Porto Velho e Manicoré, esta sendo atribuída a perda da capacidade energética do rio transportar os materiais.

A contínua deposição do material de maior tamanho a montante resulta na composição majoritária de areia (fina e média) nos sedimentos de fundo, onde a fração de silte+argila é transportada como material particulado em suspensão que é composto basicamente de partículas com essa granulometria. Entretanto, a amostra RMGua apresentou porcentagem da fração silte+argila (>79 %) distinta das demais. De forma simplificada, a resposta para a predominância de partículas finas nesse ponto se encontra no comprimento de sua planície de inundação (~1900 km). O constante desgaste à jusante reduz o diâmetro das partículas e a transformação da matéria orgânica ao longo do rio, enriquece o sedimento de material fino particulado. De forma qualitativa, foi possível observar o maior consumo de H₂O₂ 30% no processo de tratamento dessa amostra para análise mineralógica, indicando que ela é rica em matéria orgânica resultante desta decomposição.

A análise no granulômetro permite distinguir e quantificar as frações <63µm, nas quais estão inclusas as frações silte+argila. Porém, é possível observar que uma parte de areia foi quantificada pelo método levando em consideração que boa parte das partículas não são esféricas, logo o algoritmo do granulômetro leva em consideração partículas com o formato

irregular, ou seja, que passaram pela peneira de 63 μm . Nas Figuras 17 e 18 é possível observar que a fração argila é a menos abundante em todos os pontos, sendo que nas amostras do trecho Solimões/ Amazonas, estas apresentaram uma faixa pequena (5,25-8,16%).

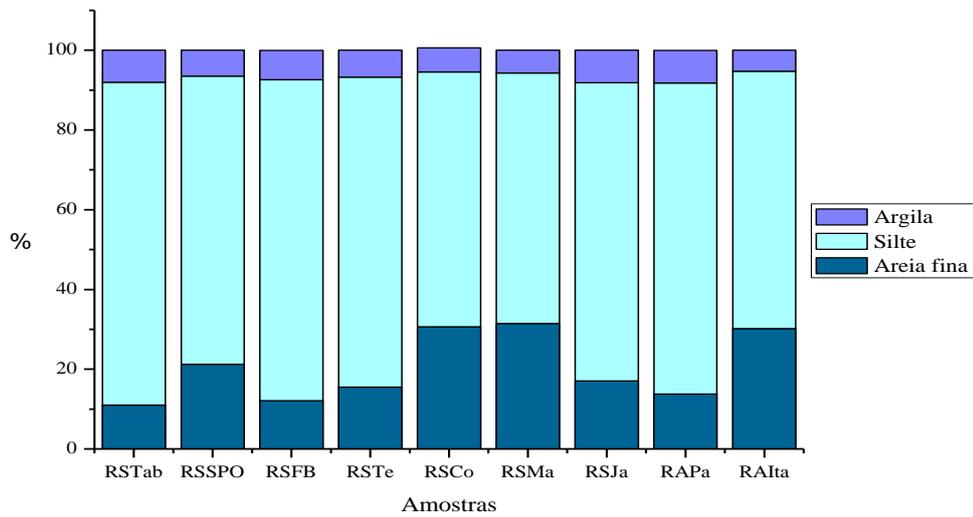


Figura 17 – Composição granulométrica (<0,063 μm) dos sedimentos de fundo no trecho Solimões/ Amazonas

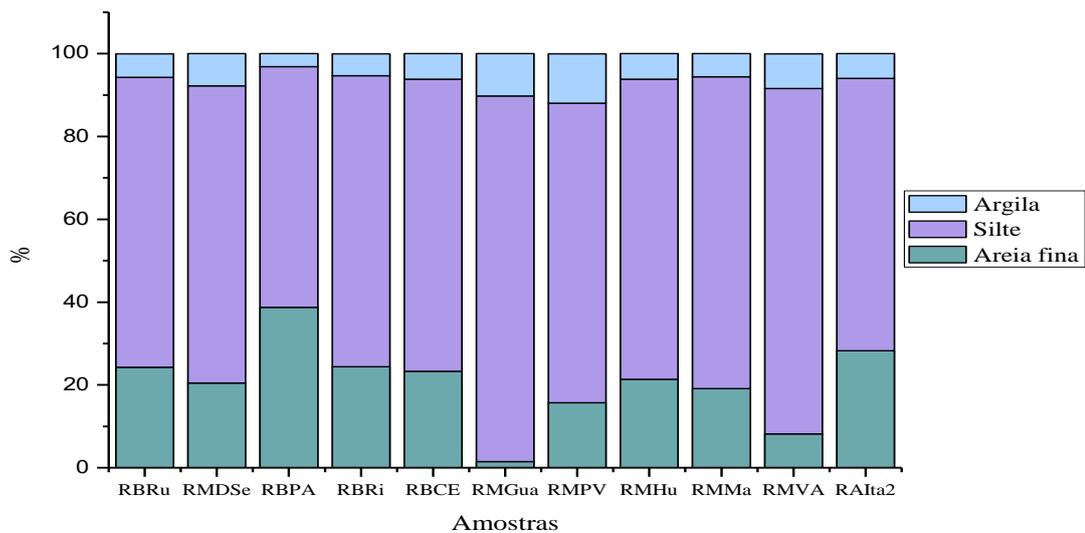


Figura 18 - Composição granulométrica (<0,063 μm) dos sedimentos de fundo no trecho Solimões/ Amazonas

Conforme anteriormente explanado, o ponto em Guayaramerín-BO mostrou alta porcentagem da fração silte+argila em relação aos demais pontos do sistema Madeira/ Amazonas. A predominância da fração silte, confirme a hipótese já esplanada desse sedimento ser rico em matéria orgânica acumulada ao longo do trecho do rio Mamoré.

5.4. Avaliação dos dados mineralógicos

O trecho do rio Solimões até sua confluência no Amazonas drena diferentes unidades litoestratigráficas como a formação Solimões, Içá, Alter do Chão, além dos depósitos quaternários originados a partir do intemperismo dessas formações. O intemperismo consiste em um conjunto de transformações aos quais os minerais e sedimentos são submetidos por intermédio de fatores físicos, químicos, geológicos, biológicos e mecânicos. A estabilidade das rochas primárias depende da sua gênese, onde rochas formadas sob altas pressões e temperaturas são mais suscetíveis a sofrer alteração. Entre os produtos de intemperismo podem ser citados: minerais secundários, polímeros orgânicos, minerais primários, sólidos amorfos e íons solúveis que são incorporados ao recurso hídrico influenciando significativamente em sua composição mineralógica e, conseqüentemente, em sua hidroquímica (Teixeira et al., 2000).

Na maioria das amostras de sedimento de fundo do rio Solimões (Tabela 13), os minerais mais encontrados foram quartzo, albita, clinocloro, muscovita e microclina. Diversos estudos no rio Solimões e em seus lagos da várzea, relatam a presença de caulinita, esmectita, illita, hematita+goethita e muscovita, em diferentes matrizes (HORBE et al., 2007; QUEIROZ et al., 2009; GUIMARÃES et al., 2013). Pereira e colaboradores (2006) na análise de

sedimentos em suspensão e de fundo em águas costeiras sob influência do Rio Amazonas, verificou que os seguintes minerais foram identificados na fração argila: caulinita, clorita, illita e traços de esmectita; estes predominando sobre a matéria orgânica contida nas amostras. Horbe e colaboradores (2009), ao avaliarem perfis sobre a formação Solimões e sedimentos quaternários na região de Coari-AM, identificaram que a composição mineralógica da fração silte+argila na formação Solimões e depósitos quaternários foram, respectivamente, quartzo, caulinita, illita, hematita+goethita e muscovita; e quartzo, caulinita, K-feldspatos, plagioclásio, micas e hematita. Rosseti e colaboradores (2005), ao abordar sobre depósitos quaternários de idade avançada na Amazônia Ocidental, verificou que a seguinte composição mineralógica: esmectita, caulinita, clorita, illita, anfibólio, hiperstênio, augita e epidoto.

Tabela 13 – Composição mineralógica dos sedimentos no trecho Solimões/Amazonas

Pontos	Rios	Municípios	Composição mineralógica
RSTab	Solimões	Tabatinga	Quartzo, albita, muscovita, clinocloro, augita, illita
RSSPO	Solimões	São Paulo de Olivença	Quartzo, albita, clinocloro, muscovita e anquerite,
RSFB	Solimões	Fonte Boa	Quartzo, albita, anortita e nimita
RSTe	Solimões	Tefé	Quartzo, microclina, nimita, muscovita, albita
RSCo	Solimões	Itapéua	Quartzo, albita, clinocloro, muscovita, microclina, lantanita
RSMa	Solimões	Manacapuru	Quartzo, anortoclásio, albita, muscovita, nimita
RSJa	Solimões	Jatuarana	Quartzo, albita, microclina, muscovita, clinocloro
RAPa	Amazonas	Parintins	Quartzo, albita, nimita, muscovita, microclina
RAIta	Amazonas	Itacoatiara	Quartzo, albita, muscovita, microclina, nimita

A augita $[Ca(Mg,Fe)Si_2O_6]$ foi visualizada apenas no ponto em frente ao município de Tabatinga (RSTa). Este mineral é classificado no grupo de minerais pesados, ou seja, com peso específico $>2,85 \text{ g/cm}^3$. Apesar deste grupo de minerais serem característicos por sua

alta estabilidade, a augita possui baixa estabilidade segundo a classificação proposta por Pettijohn et al. (1973), logo, a ocorrência em apenas um ponto especificamente não permite inferir sobre a origem deste no sedimento. Todavia, Motta (2008) no estudo dos afloramentos da formação Içá e sedimentos do Solimões verificou a predominância de piroxênios e anfibólios nestes últimos, podendo a ocorrência da augita (piroxênio) estar associada à formação Solimões. Apenas em São Paulo de Olivença (RSSPO) foi visualizada a presença de rutilo (TiO₂), mineral pesado classificado como “ultra-estável”. Este mineral, segundo Motta (2008) foi encontrado nos afloramentos da formação Içá e em sedimentos do rio Solimões, onde nesta primeira, a maior ocorrência é registrada na porção superior da formação. Estes dados, em conjunto com demais estudos, indicam a necessidade de investigação aprofundada acerca da ocorrência de minerais pesados ao longo da Bacia do Solimões e a origem destes.

Tanto no trecho do Rio Solimões quanto do rio Madeira (Tabela 14), é possível visualizar a ocorrência de albita na maioria das amostras de sedimento de fundo. Essa frequência pode ser atribuída ao fato da albita ser encontrada na maioria das rochas plutônicas e também em rochas metamórficas, principalmente, associada à anortita (MACHADO, 2015). O processo contínuo de intemperismo dos Andes, deposição das partículas e o retorno destas ao corpo hídrico, associada à estabilidade relativa da albita são fatores que explicam sua ocorrência nos sedimentos dos rios Andinos.

Tabela 14 – Composição mineralógica do sedimento no trecho Madeira/Amazonas

Pontos	Rios	Municípios	Composição mineralógica
RBRu	Beni	Rurrenabaque	Quartzo, clorita, muscovita, microclina
RMDS	Madre de Dios	El Sena	Quartzo, muscovita, nimita, microclina, albita, bixbyite, andaluzite
RBPA	Beni	Peña Amarilla	Quartzo, ilita, clorita, rutilo
RBRi	Beni	Riberalta	Quartzo, ilita, clorita, microclina, lantanita
RBCE	Beni	Cachuela Esperanza	Quartzo, clinocloro, ilita, albita, ortoclásio
RMGua	Mamoré	Guayaramerín	Quartzo, muscovita, nimita, albita

RMPV	Madeira	Porto Velho	Quartzo, clinocloro, albita, ilita, microclina
RMHu	Madeira	Humaitá	Quartzo, albita, ilita, nimita, microclina
RMMa	Madeira	Manicoré	Quartzo, albita, ilita, clinocloro, microclina, lantanita
RMVA	Madeira	Fazenda Vista Alegre	Quartzo, ilita, clinocloro, albita, lantanita
RAIta/2	Amazonas	Itacoatiara	Quartzo, albita, nimita, ilita, microclina, lantanita

A andaluzita (Al_2SiO_5) também é classificada como um mineral pesado de alta estabilidade, segundo a classificação de Pettijohn *et al.* (1973). Apenas no Rio Madre de Dios (RMDSe) foi detectada a presença deste mineral. Motta (2008), ao estudar os minerais pesados da formação Içá nas frações 0,250-0,125 mm e 0,125-0,062 mm, verificou que a andaluzita é um dos minerais pesados mais abundantes (59 %), principalmente na porção inferior da formação Içá. A composição química e classificação de cada mineral detectado em ambos os trechos foi listado no Quadro 2.

Quadro 2 – Composição química das espécies predominantes nos sedimentos dos trechos avaliados.

Espécie	Composição química	Classificação
<i>Albita</i>	$(Na,K)[AlSi_3O_8]$	Família: Feldspatos Sub-Família: Na,K - feldspatos
<i>Muscovita</i>	$KAl_2[Si_3Al]O_{10}(OH)_2$	Família: Micas
<i>Clinocloro</i>	$(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2(Mg,Fe)_2(Al,Fe,Cr,Ti)(OH)_6$	Família: Cloritas
<i>Augita</i>	$Ca(Mg,Fe)Si_2O_6$	Família: piroxênio Sub-família: Ca,Na-piroxênio
<i>Ankerita</i>	$Ca(Mg_{0,67},Fe_{0,33}^{2+})(CO_3)_2$	Grupo: dolomita
<i>Lantanita (La)</i>	$(Nd,La)_2[CO_3]_3 \cdot 8H_2O$	Família: Lantanita
<i>Rutilo</i>	TiO_2	Família: Rutilo
<i>Anortita</i>	$CaAl_2Si_2O_8$	Família: Feldspatos Grupo: Plagiocásio
<i>Ilita</i>	$(K,H_3O)Al_2Si_3Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	Família: Micas Sub-família: vermiculite
<i>Nimita</i>	$(Ni,Mg,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$	Grupo: cloritas
<i>Microclína</i>	$KAlSi_3O_8$	Família: Feldspatos Sub-família: Na,K-feldspatos

<i>Anortoclásio</i>	(Na,K)[AlSi ₃ O ₈]	Família: Feldspatos Sub-Família: Na,K - feldspatos
<i>Muscovita bárca</i>	(K,Na,Ca,Ba)(Al,Fe,Ti,Mg) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	Família: Micas
<i>Clorita</i>	Mg ₄ (Mg,Al,Cr,Fe,Ni) ₂ [(Si,Al) ₂ Si ₂ O ₁₀](OH) ₈	Família: Cloritas
<i>Bixbyite</i>	(Fe,Mn) ₂ O ₃	Família: Corundum
<i>Andaluzita</i>	Al ₂ SiO ₅	Família: Cianita
<i>Ortooclásio</i>	KAlSi ₃ O ₈	Família: Feldspatos
<i>Muscovita vanádica</i>	K(Al,V) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	Família: Micas

Conforme explanado anteriormente, a composição granulométrica dos sedimentos tanto do sistema Solimões/Amazonas como do Madeira/Amazonas é composta majoritariamente de areia fina e média, composta basicamente de quartzo. Contudo, essa predominância resultou na limitação da detecção de alguns minerais pela técnica de DRX, sendo recomendada a remoção do quartzo para a melhor definição dos demais picos em estudos futuros. O quartzo (SiO₂) é o mineral mais abundante, onde ocorre como principal constituinte de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Sua estabilidade é alta, devido à sua baixa susceptibilidade de sofrer intemperismo, onde é possível observar ao longo do rio o arredondamento e diminuição gradativa dos seus grãos (DEER et al., 2000) .

Depois do quartzo, a albita foi o mineral mais abundante no trecho Solimões/Amazonas estando presente em praticamente todas as amostras. Devido a sua estabilidade relativa, este mineral é transportado ao longo do rio depositando-se no fundo e na várzea do rio Solimões, sendo apenas suscetível a sofrer dissolução incongruente por ácidos, segundo Feitosa e colaboradores (2008). Martinelli et al. (1993), com base na análise mineralógica dos sedimentos distribuídos ao longo do Rio Solimões, verificou a abundância de Na-plagioclásios, Ca-plagioclásios, illita, esmectita-vermiculita e quartzo nestes depósitos. Com base nesta comparação é possível observar que a dinâmica da várzea permanece

inalterada ao longo dos anos sendo, todavia prematuro afirmar com base apenas nos dados disponíveis.

Quando submetidos ao intemperismo, os feldspatos e as micas dão origem aos argilominerais de alta estabilidade. Estes minerais microcristalinos estáveis são formados de minerais secundários derivados da decomposição de minerais primários rocha original, estando presentes na zona não-saturada do solo e em rochas sedimentares (FEITOSA et al., 2008). Os argilominerais são encontrados na fração argila (< 2µm), sendo que em todas as amostras de sedimento avaliadas, essa fração apresentou baixíssimas porcentagens, sendo de difícil detecção pelo difratômetro de raios-X, dificultando assim a sua identificação. O intemperismo de K-feldspatos dá origem à caulinita, conforme a reação:



Entretanto, na Figura 19 é possível observar um espaço entre 3 a 20° (2θ) que, conforme observado por Martinelli e colaboradores (1993), que indica a presença de caulinita e minerais de argila (esmectitas, vermiculitas e micas).

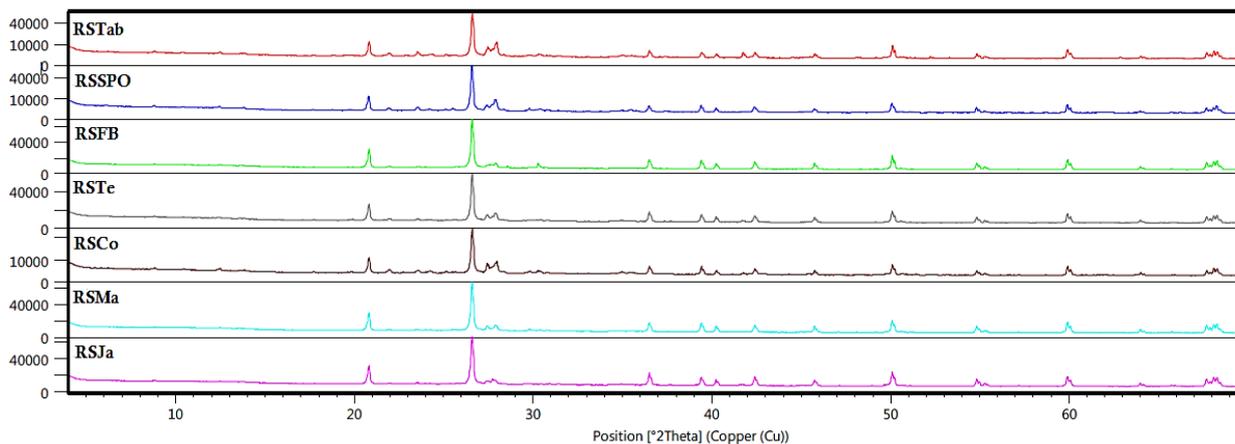
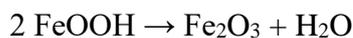


Figura 19 – Análise comparativa entre os difratogramas das amostras do rio Solimões

A muscovita pertence ao grupo das micas e possui ocorrência em grande variedade de ambientes geológicos. O K e Al presente em sua estrutura básica, $K_2Al_4(Si_6Al_2O_{20})(OH,F)_4$, podem ser substituídos de forma isomórfica por elementos como Mg, Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn, Li, Cr, Ti e V. Essa substituição pôde ser observada no ponto do Rio Mamoré em frente ao município de Guayaramerín, onde foi identificada a muscovita vanádica. A alteração da muscovita por meio da dissolução incongruente leva à formação da ilita, um mineral argiloso de composição $KAl_2(AlSi_3O_3O_{10})(OH)_2$ (DEER et al., 2000).

Nos difratogramas não foram visualizados os minerais hematita e goethita, sendo estes encontrados com certa frequência em estudos dos rios Andinos como o Solimões (Horbe et al. 2007) e Madeira (QUEIROZ et al. 2011). Segundo Queiroz e colaboradores (2011), em um estudo de amostras de sedimento de fundo coletadas no Rio Madeira em um trecho entre o município de Porto Velho até a desembocadura no Amazonas, verificou não ser possível a identificação da hematita e goethita por DRX sendo aplicado o uso de lupa binocular para identificar estes minerais que foram encontrados na forma de oólitos. Os oólitos são grãos redondos de granulometria que varia entre 0,25 a 2mm que se forma em torno de núcleos de quartzo ou de fragmento de concha (WINGE, 2001). Hematita e goethita geralmente são encontradas associadas na natureza devido ao processo de desidratação da goethita (TEIXEIRA et al. 2000) que ocorre conforme a seguinte reação de desidratação:



A alta estabilidade da hematita, segundo a série de Goldich (Teixeira et al., 2000) permite que ela seja encontrada em diversos pontos nos afloramentos da formação Içá e nos sedimentos do Rio Solimões, segundo Motta (2008).

A detecção do mineral rutilo (TiO_2) foi observada RBPA (Penã Amarilla – Rio Beni) sendo que devido à sua baixa abundância, já verificada por Queiroz e colaboradores (2011), este possivelmente não foi detectado por DRX nas demais amostras, sendo a sua presença confirmada em tributários formadores do rio Madeira que possuem suas nascentes provenientes de rochas cratônicas.

Com base nos difratogramas dos pontos localizados em Riberalta (RBRI), Manicoré (RMMA), Vista Alegre (RMVA) e Itacoatiara (RAIta/2), há um indício significativo da presença do mineral Lantanita (La), sendo necessária a confirmação desta ocorrência através da remoção do quartzo das amostras. Entretanto a ocorrência em apenas alguns dos pontos amostrados não permite afirmar a origem deste mineral. No mesmo estudo realizado por Queiroz et al. (2011), verificou-se que dentre os elementos terras raras (ETR), La (lantânio), Ce (Césio) e Nd (Neodímio) são os metais que apresentaram maior porcentagem (79%) no rio Madeira e tributários. A fórmula da lantanita encontrada por DRX nesse trabalho é $(\text{La}, \text{Nd})_2[\text{CO}_3]_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ enriquecendo o sedimento dos elemento La e Nd, logo, este mineral possui alta estabilidade e alta incidência ao longo do rio Madeira e seus formadores.

Apesar de receber o aporte de alguns afluentes, como: Candeias do Jamari, Machado, Marmelos, Abunã, Jaci-Paraná, Canumã, Aripuanã, Acará e Madeirinha; que são provenientes de rochas cratônicas (Grupo Colider, Suite Intrusiva São Romão e complexo Jamari), através da comparação dos difratogramas (Figura 20) dos pontos do rio Madeira, verificou-se que a composição mineralógica sofreu pouca variação ao longo de seu curso.

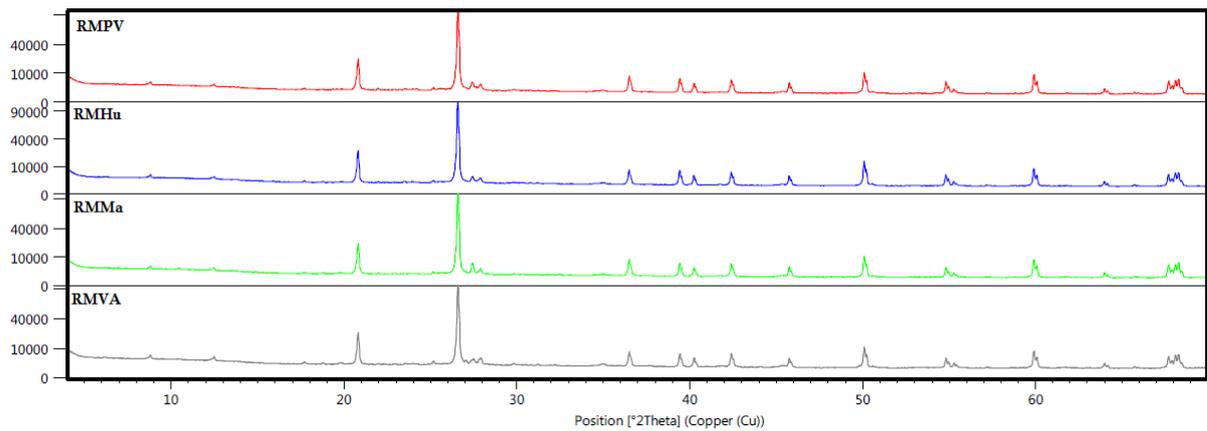


Figura 20 - Análise comparativa entre os difratogramas do rio Madeira

Apenas no ponto RMDSe foi registrado o mineral bixbyite $(\text{Fe,Mn})_2\text{O}_3$. A bixbyite é um óxido de manganês que geralmente é encontrado associado com o berílio, quartzo, hematita e topázio. Sua principal ocorrência foi em veias hidrotermais ou pneumatolíticas e em cavidades onde predomina o metamorfismo. Este mineral foi descoberto em Thomas Range, Utah, Estados Unidos, sendo que fontes não oficiais apontaram o registro da ocorrência deste na mina de Chocaya, em Potosí - Bolívia (NEUENDORF et al., 2005).

O rio Mamoré drena diversas unidades litoestratigráficas, entre elas podem ser citadas unidades datadas do paleoproterozóico-mesoproterozóico como o Complexo Gnáissico-Migmático Jaru em Nova Mamoré - RO; do Mesoproterozóico como a Formação Mutum Paraná e Suíte Intrusiva São Lourenço-Caripunas em Abunã - RO e as Suítes Intrusivas Teotônio e Santo Antônio em Jaciparaná e Porto Velho – RO. Além disto, ao longo das margens dos rios Mamoré e Madeira, datadas do Cenozóico se formaram os sedimentos aluvionares e coluvionares que se depositaram nos canais fluviais e nas planícies de inundação, os terraços fluviais sub-recentes cuja composição é de areia e argila; e coberturas sedimentares indiferenciadas compostas de sedimentos com granulometria que varia de cascalho a argila onde o processo de lateritização é significativo (CPRM, 1999). Segundo

Quadros e Rizzoto (2007) apenas no estado de Rondônia estão cadastradas 25 minas, além de 4 ocorrências para extração da brita, estando algumas distribuídas ao longo da BR-364. A brita é formada a partir da moagem das gnaisses, compostas de mais de 20 % de feldspato potássico, como microclínio e/ou ortoclásio; de plagioclásio, como albita, oligoclásio e andesita; além de quartzo e biotita (MACHADO, 2015).

5.5. Avaliação dos teores de metais dos sedimentos de fundo

Um dos desafios nos estudos de impactos ambientais é o desenvolvimento de metodologias que permitam identificar as fontes de contaminação metálica através da avaliação e integração dos diversos compartimentos que compõem o corpo hídrico (sedimento, água, solos de várzea e diversos bioindicadores). Entretanto, o estudo dos compartimentos isolados não permitem inferir com precisão as fontes pontuais ou não-pontuais de contaminantes, além de não possibilitar a distinção entre os fatores de origem antropogênica das fontes naturais de metais no ambiente (MILLER et al., 2007). Contudo, o conhecimento das concentrações de metais potencialmente tóxicos nos sedimentos, em conjunto com os valores estabelecidos pelas legislações vigentes permitem caracterizar este compartimento com relação a sua qualidade.

As legislações ambientais abordadas neste estudo não estabeleceram valores mínimos permitidos para os íons Fe e Mn devido a estes apresentarem altas concentrações em corpos hídricos associadas à composição mineralógica do ambiente. Outro fator é o desconhecimento das concentrações mínimas destes elementos associadas a efeitos na saúde humana, sendo conhecida apenas a influência destes elementos nas alterações dos padrões organolépticos da água.

Analisando os dados de Fe (Tabela 15), é possível observar um decréscimo gradativo à jusante até Manacapuru (RSMa). A alta concentração de Fe pode ser atribuída a presença de silicatos ferromagnesianos como as cloritas e, principalmente a esmectita, $\text{Li}_{0,32}(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$, não visualizada por DRX. Martinelli e colaboradores (1993) na análise de sedimentos acumulados na várzea do rio Solimões até a foz no Amazonas, verificou o decréscimo na concentração de Fe, Mg e Al presentes na fração de argila 2:1 indicando que estes sedimentos depositados sofrem erosão, resultando na diminuição destes elementos e enriquecimento de SiO_2 à jusante. Logo, a redução do Fe pode ser atribuída à deposição desses minerais na várzea, no período da cheia.

Tabela 15 – Concentração (mg.kg^{-1}) dos metais analisados no trecho Solimões/Amazonas

		Metais							
Amostras		Fe	Mn	Cr	Zn	Ni	Cu	Pb	Cd
RSTab		10967	173	5,8	36	8,3	9,7	3,7	<LD
RSSPO		10051	155	6,2	41	8,4	6,5	3,2	<LD
RSFB		7818	145	5,8	36	6,5	6,2	2,8	<LD
RSTe		7735	234	5	32	6,4	3,9	2,5	<LD
RSCo		5896	184	4,6	30	4,5	4,3	<LD	<LD
RSMa		5932	103	3,9	30	4,4	3,3	<LD	<LD
RSJa		7575	157	5,2	32	6,4	5,5	2,6	<LD
RAPa		15515	198	14	30	8,5	<1*	5,6	<LD
RAIta		13439	147	12	31	9,1	<LD	4,9	<LD
CSQG*	ISQG	-	-	37,3	123	-	35,7	35	0,6
	PEL	-	-	90	315	-	197	91,3	3,5
ANZECC**	ISQG-Low	-	-	80	200	21	65	50	1,5
	ISQG-High	-	-	370	410	52	270	220	10
NOAA	ERL	-	-	81	150	20,9	34	46,7	1,2
	ERM	-	-	370	410	51,6	270	218	9,6

*Canadian Sediment Quality Guidelines (CCME,1995); **Australian and New Zealand Guidelines (ANZECC e ARMCANZ, 2000)

NOAA: National and Oceanic Atmospheric Administration

LD: Limite de detecção

O chumbo é considerado um metal potencialmente perigoso em escala global e regional. Este possui diversas aplicações na indústria, entretanto, destaca-se que a principal fonte de chumbo na atmosfera consiste na emissão por veículos automotores. A remoção da

cobertura vegetal e a pluviosidade são fatores que influenciam na deposição, infiltração no solo e posterior arraste de chumbo para os corpos hídricos. Em águas naturais, a espécie predominante de Pb é na forma de $\text{PbCO}_3(\text{aq})$ onde a concentração deste sofre acréscimo conforme o pH aumenta. Além de atuarem como meio de transporte e acumulação de poluentes, os sedimentos contribuem na disponibilização de contaminantes ao meio hídrico devido sua capacidade de responder às alterações sofridas no ambiente (OLIVEIRA e LACERDA, 1987; STUMM e MORGAN, 1996). No sistema Solimões/Amazonas, a concentração deste elemento apresentou valores próximos ao limite de detecção da técnica, onde as maiores concentrações foram encontradas em Parintins ($5,6 \text{ mg.kg}^{-1}$) e Itacoatiara ($4,9 \text{ mg.kg}^{-1}$). Entretanto, as baixas concentrações deste elemento e o aporte dos rios Madeira e Negro não permitem discernir com precisão a causa deste aumento, devido ao desconhecimento da contribuição destes tributários no teor de metais para o rio Amazonas.

Com base nos metais Zn e Ni, pouca diferença foi observada entre ambos os trechos avaliados. No Solimões/Amazonas os teores de Zn e Ni encontrados foram, respectivamente, 30-41 e 4,4-9,1 mg.kg^{-1} ; e no Madeira/Amazonas foram, respectivamente, 21,3-63,0 e 7,7-21,0 mg.kg^{-1} . No estudo efetuado por Siqueira (2006) e colaboradores em sedimentos coletados na Plataforma Continental Amazônica este quantificou a concentração de Zn e Ni na fração $<63 \mu\text{m}$ e os valores médios encontrados foram, de modo respectivo, $127,7 \text{ mg.kg}^{-1} \pm 39,18$ e $40,0 \text{ mg.kg}^{-1} \pm 9,54$. Neste mesmo estudo, com base nos baixos teores de matéria orgânica, os elementos traço foram associados às partículas cristalinas presentes no sedimento. A maior diferença entre o estudo de Siqueira e colaboradores. (2006) e o presente estudo se deve à fração de sedimento analisada, refletindo nos maiores valores encontrados por Siqueira e colaboradores.

Quando o ambiente recebe o aporte de substâncias de origem antropogênica, este busca restabelecer o equilíbrio no intuito de reduzir o impacto induzido por essa ocorrência. O foco em diversos estudos no material particulado em suspensão se deve à capacidade destes em adsorver diversos íons, principalmente os metálicos, além da capacidade de precipitar ou ressuspender conforme a dinâmica hidrológica do ambiente lótico.

Na Tabela 16 são mostradas as concentrações dos metais mensurados no sistema Madeira/Amazonas em comparação com os valores limites recomendados pelas agências reguladoras ambientais abrangidas, sendo possível visualizar as concentrações se encontram abaixo destes limites.

Tabela 16 - Concentração (mg.Kg⁻¹) dos metais analisados no trecho Madeira/Amazonas

		Metais							
Amostras		Fe	Mn	Cr	Zn	Ni	Cu	Pb	Cd
RBRu		18478,1	216,1	7,4	35,7	10,6	6,8	7,6	<LD
RMDS		11573,6	207,0	8,5	24,6	12,1	4,5	6,2	<LD
RBPA		10853,2	122,9	5,6	26,5	8,8	3,6	6,2	<LD
RBRi		16853,2	257,1	12,5	42,5	18,3	9,0	6,0	<LD
RBCE		9544,3	295,3	6,5	22,5	11,7	3,1	4,4	<LD
RMGua		30518,3	579,0	19,0	63,0	21,0	14,7	14,4	<LD
RMPV		10281,9	207,0	6,1	22,2	11,0	2,7	4,9	<LD
RMHu		10498,0	239,6	6,1	24,3	11,8	3,4	4,4	<LD
RMMa		11538,5	175,4	7,2	26,2	11,5	3,7	4,9	<LD
RMVA		12877,7	216,1	8,5	28,4	11,9	3,9	5,8	<LD
RAIta/2		10127,8	120,4	7,6	21,3	7,7	1,9	3,6	<LD
CSQG*	ISQG	-	-	37,3	123	-	35,7	35	0,6
	PEL	-	-	90	315	-	197	91,3	3,5
ANZECC**	ISQG-Low	-	-	80	200	21	65	50	1,5
	ISQG-High	-	-	370	410	52	270	220	10
NOAA	ERL	-	-	81	150	20,9	34	46,7	1,2
	ERM	-	-	370	410	51,6	270	218	9,6

*Canadian Sediment Quality Guidelines (CCME,1995); **Austrian and New Zealand Guidelines (ANZECC e ARMCANZ, 2000)

NOAA: National and Oceanic Atmospheric Administration

LD: Limite de detecção

Na bacia Amazônica, 85 % da matéria orgânica transportada, ou ocorre na forma coloidal, ou permanece dissolvida. Richey e colaboradores (1990) afirmam que 90% da matéria orgânica é encontrada na forma de carbono orgânico particulado fino (COPF) onde boa parte desta fração (>90 %) se encontra associada aos minerais presentes no material particulado em suspensão. Essa associação mantém a integridade desta matéria orgânica. Os quatro maiores tributários Andinos contribuem com aproximadamente 50 % da matéria orgânica dissolvida que é aportada no curso principal, entretanto, boa parte dessa matéria é proveniente dos rios que drenam as planícies. Com isso, a distribuição da matéria orgânica nos compartimentos dinâmicos do rio influencia significativamente no processo de auto-depuração de um sistema lótico.

A quantidade de metais presente nos sedimentos geralmente está associada à fração mais fina (silte e argila) devido a esta possuir uma maior superfície de contato, onde, em diversos estudos ocorre a remoção das partículas >63 µm para quantificação dos metais nos sedimentos. Fatores hidrológicos e físico-químicos das águas influenciam nos processos de adsorção, precipitação e ressuspensão da carga de sedimento, sendo importante associar o teor de metais com variáveis como pH, temperatura e teor de íons dissolvidos. Nos sedimentos analisados no trecho Madeira/Amazonas, com exceção do ponto RMGua, as frações dominantes nos pontos foram de areia fina e média, sendo esse fator refletido na maior concentração de metais. Siqueira e colaboradores (2006) ao avaliar o teor de metais em sedimentos de fundo em águas costeiras sob influência do rio Amazonas, averiguaram matéria orgânica, responsável por complexarem com os metais, aparecerem em baixa quantidade nestes sedimentos (1,3 %± 0,5). Siqueira verificou que boa parte da matéria orgânica encontra-se associada ao material em suspensão, sendo impedidas de depositarem. Frankowski et al. (2009), confirmou esta hipótese ao quantificar metais como Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn em cada fração de sedimento, particionado por peneiramento. Eles verificaram que os

menores conteúdos de metal pesado foram encontrados nas frações 0,5-0,25 e 0,25-0,1 mm e as maiores nas frações 0,1-0,063 e <0,063 mm, entretanto, o compartimento que exibe o maior teor destes metais é o sedimento em suspensão.

Com relação ao rio Madeira, uma principal preocupação no que se refere ao aporte de substâncias nocivas e cumulativas, como os metais, é a influência das atividades mineradoras amplamente difundidas na região. Segundo Malm (1995), área de mineração distribuída ao longo do rio Madeira nos municípios de Guajará-Mirim, Porto Velho, Humaitá e Manicoré tem sido investigada, principalmente no intuito de se avaliar a poluição por mercúrio distribuído em diversas matrizes, onde foi explanado que os garimpeiros e ribeirinhos sofrem direta e indiretamente com a exposição ao Hg, apresentando altas concentrações deste metal em amostras de cabelo e na ictiofauna regional. Em CPRM (1999), para o estado de Rondônia, é possível observar a presença expressiva de garimpos auríferos principalmente em Abunã e Nova Mamoré, além de minas em atividade no município de Jacipará e Porto Velho. Outros garimpos encontram-se distribuídos ao longo do rio Abunã, afluente da margem esquerda do Rio Madeira.

Excluindo o ponto RMGua, que consiste em um sedimento siltico-argiloso, ao comparar o teor de metais do trecho Madeira/Amazonas com o do Solimões/Amazonas, observa-se que aqueles possuem uma faixa de concentração maior para vários elementos como Fe (10127,8-18478,1 mg.kg⁻¹), Mn (120,4-295,4 mg.kg⁻¹), Ni (7,7-18,3 mg.kg⁻¹) e Pb (3,6-7,6 mg.kg⁻¹), com exceção de Cr (5,6-12,5 mg.kg⁻¹), Cu (1,9-9,0 mg.kg⁻¹) e Zn (21,3-42,5 mg.kg⁻¹), sendo que ambos os sistemas são similares no que se refere à teor de silte + argila.

Em uma análise da influência de rejeitos de sulfetos de usinas extratoras de Pb e Zn, realizada por Bogush e Lazareva (2011), foi possível verificar a distribuição dos metais, tanto nos depósitos de sulfeto, quanto nos diversos compartimentos do Rio Malaya Talmovaya (Polônia). Com base na análise dos sedimentos de fundo, em suspensão e de água, foi possível

visualizar o acúmulo dos metais oriundos dos rejeitos da usina no sedimento de fundo, no entanto, esta contaminação não influenciou significativamente, no impacto dos demais compartimentos do rio. Apesar da distinção das localidades, de modo comparativo, o teor de metais encontrados no presente estudo é bem menor que os do estudo efetuado por Bogush e Lazareva (2011) para todos os metais, com exceção de Fe, que apresentou altas concentrações em RBRu (18478 mg.kg⁻¹) e RBRi (16853,2 mg.kg⁻¹). Logo, apenas a análise dos dados metálicos não permite afirmar a influência de atividades mineradoras na composição metálica dos sedimentos de fundo.

Com isso, os metais aportados no meio hídrico de origem antropogênica em ambientes lóticos, são capturados pelo material em suspensão como os argilominerais e os diversos compostos orgânicos (carbono orgânico particulado, coloidal e dissolvido) dificultando sua deposição na fração total dos sedimentos de fundo, principalmente em ambientes onde a auto-depuração é amplamente favorecida devido às altas vazões.

Elbaz-Poulichet e colaboradores (1999), na análise de sedimentos em suspensão de formadores do rio Madeira, verificaram que o Cd, juntamente com o Zn apresentou associação com os íons SO₄²⁻ e com a alcalinidade, indicando que a fonte destes elementos é a mesma, como o intemperismo de gipsita ou pirita.

O Cd não foi detectado pela técnica utilizada (ICP-OES), sendo a ocorrência deste mencionada por Elbaz-Poulichet et al. (1999) nos sedimentos em suspensão em trecho dos rios Beni e Mamoré com concentrações que variaram de 0,14 a 0,25 mg.kg⁻¹. Entretanto a técnica utilizada por Elbaz-Poulichet na quantificação de metais e o compartimento analisado fez a diferença na detecção do cádmio nas amostras avaliadas.

5.6. Análise estatística

Para verificar a correlação entre os indicadores, primeiramente foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk pelo software Action 2.9 para os dados dos trechos estudados no intuito de avaliar quais parâmetros seguem uma distribuição normal. Para este teste, o nível de significância adotado foi de 5% ($\alpha = 0,05$) onde, as amostras que provêm de uma distribuição normal apresentam o $W_{\text{calculado}} > W_{\text{tabelado}}$. Os resultados obtidos são explanados nas Tabelas 17 e 18. A maior parte dos indicadores avaliados no trecho Solimões/Amazonas apresentou distribuição normal, sendo aplicado a estes a análise de correlação de Pearson, com exceção dos íons NO_2^- e NO_3^- , dos metais Cr e Zn e dos parâmetros condutividade e temperatura.

De forma distinta do rio Solimões, a maioria dos indicadores do trecho Madeira/Amazonas apresentou distribuição não-normal. Para avaliar a correlação entre os parâmetros, foi aplicado teste de correlação de Spearman para dados não-paramétricos, sendo incluídos neste teste os íons F^- e Cl^- , além dos teores de areia média e fina.

Tabela 17 – Resultados do teste de Shapiro-Wilk para os parâmetros mensurados no trecho Solimões/Amazonas, onde $W_{0,05;9}$: 0,829.

Distribuição Normal				Distribuição não-normal				
Fe	Wcalc.	0,903	F⁻	Wcalc.	0,891	NO₂⁻	Wcalc.	0,806
	P-valor	0,270		P-valor	0,202		P-valor	0,024
Mn	Wcalc.	0,972	Cl⁻	Wcalc.	0,961	NO₃⁻	Wcalc.	0,823
	P-valor	0,907		P-valor	0,805		P-valor	0,037
Temperatura	Wcalc.	0,913	Areia grossa	Wcalc.	0,910	Cr	Wcalc.	0,746
	P-valor	0,341		P-valor	0,319		P-valor	0,005
STS	Wcalc.	0,877	Areia média	Wcalc.	0,955	Zn	Wcalc.	0,820
	P-valor	0,145		P-valor	0,742		P-valor	0,034
Ni	Wcalc.	0,888	Areia fina	Wcalc.	0,942	Condutividade	Wcalc.	0,821
	P-valor	0,189		P-valor	0,602		P-valor	0,035
Cu	Wcalc.	0,952	Silte+Argila	Wcalc.	0,945	Turbidez	Wcalc.	0,753
	P-valor	0,712		P-valor	0,641		P-valor	0,006
Pb	Wcalc.	0,942	pH	Wcalc.	0,872			
	P-valor	0,599		P-valor	0,129			

Tabela 18 – Resultados do teste de Shapiro-Wilk para os parâmetros mensurados no trecho Madeira/Amazonas, onde $W_{0,05;11}$: 0,85.

Distribuição Normal	Distribuição Não-normal
---------------------	-------------------------

Temperatura	Wcalc.	0,926	Areia grossa	Wcalc.	0,554	Mn	Wcalc.	0,742
	P-valor	0,372		P-valor	6,9E-06		P-valor	0,002
Condutividade	Wcalc.	0,969	Silte+Argila	Wcalc.	0,465	Cr	Wcalc.	0,714
	P-valor	0,878		P-valor	5,74E-07		P-valor	0,001
pH	Wcalc.	0,948	Turbidez	Wcalc.	0,835	Zn	Wcalc.	0,733
	P-valor	0,614		P-valor	0,027		P-valor	0,001
F⁻	Wcalc.	0,960	STS	Wcalc.	0,834	Ni	Wcalc.	0,814
	P-valor	0,777		P-valor	0,026		P-valor	0,014
Cl⁻	Wcalc.	0,910	NO₂⁻	Wcalc.	0,664	Cu	Wcalc.	0,761
	P-valor	0,245		P-valor	0,0001		P-valor	0,003
Areia média	Wcalc.	0,924	NO₃⁻	Wcalc.	0,813	Pb	Wcalc.	0,707
	P-valor	0,356		P-valor	0,014		P-valor	0,001
Areia fina	Wcalc.	0,930	Fe	Wcalc.	0,698			
	P-valor	0,416		P-valor	0,000			

A normalidade dos dados de pH e condutividade no rio Madeira/Amazonas indica que estes parâmetros no período da seca se mantêm estáveis tanto no curso principal do rio Madeira quanto nos formadores, sendo que as pequenas diferenças podem ser atribuídas ao aporte de pequenos tributários que possuem suas nascentes na planície aluvial como o rio Jamari, Machado, Marmelos, Manicoré, Maturá e do Paraná do Canhumã, não sendo confirmada nem descartada a possível contribuição de fatores antrópicos. Esta mesma observação pode ser aplicada aos teores de F⁻ e Cl⁻. A anormalidade do conjunto de dados para cada parâmetro indica a presença de valores extremos no trecho avaliado, fazendo-se necessária a identificação e análise destes dados em cada ponto individualmente.

Com base na Tabela 19 (Solimões/Amazonas), o teor de Fe apresentou correlação significativa com o Ni (0,886, p-valor: 0,001) e o Pb (0,976, p-valor: 6,7x10⁻⁶). Além de indicar que estes metais estão adsorvidos na mesma fração do sedimento, a presença de cloritas nestes também pode ser responsável por essa alta correlação. A alta correlação negativa (-0,99, p-valor: 1,9x10⁻⁷) entre o teor de areia média e fina indica que a dinâmica do rio com relação à dissolução das partículas maiores associada aos processos de deposição e ressuspensão permanecem inalteradas ao longo dos ~1660 km avaliados.

A associação entre o teor de areia fina e a concentração de sólidos totais suspensos (0,737; p-valor:0,02) pode indicar que no período de cheia a dinâmica da várzea que envolve acumulação dos sólidos suspensos na planície e reposição das partículas ao corpo hídrico permanece constante. No período da cheia, onde ocorrem altas vazões o rio carrega uma grande quantidade de partículas em suspensão que são compostas não somente da fração silte+argila, como também de areia fina. Outro fator que confirma essa hipótese é a baixa correlação entre a fração silte+argila com os demais parâmetros.

Analisando a Tabela 19, com relação ao teor de Cu no trecho Solimões/Amazonas, verificou-se alta correlação entre este elemento com o teor de Cl^- (0,92, p-valor:0,0004), F (0,78, p-valor:0,01) e pH (0,83, p-valor:0,005). Outra correlação significativa é entre Cl^- e F (0,92, p-valor:0,0004) e pH com F e Cl^- (0,97 e 0,95). Essa alta correlação é uma indicação de que esses parâmetros influenciam na concentração de Cu no sedimento de fundo. Segundo Benedetti et al. (2003), maior parte deste metal está contida na fração dissolvida (<5000 Da) de carbono orgânico em época de transição da cheia para a seca. Neste estudo citado anteriormente verificou-se que a maior parte do carbono orgânico se encontra na fração dissolvida e coloidal, no período de cheia, indicando que boa parte da fração de carbono particulado se encontra precipitada nesta época do ano. Todavia, os baixos valores de cobre e de matéria orgânica no sedimento não permitem discernir em qual fração o Cu é mais encontrado.

Stumm e Morgan (1996) mostraram que, em fase sólida, a forma predominante do Cu é na forma CuO e $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ e que em águas naturais, as espécies predominantes são CuCO_3 e $\text{Cu}(\text{OH})_2$, logo, o aumento do pH nas águas resulta no aumento dos íons CO_3^{2-} e OH^- no meio que influencia na formação prevaiente destas espécies, liberando para o

ambiente os íons F^- e Cl^- . Porém, pela ausência de dados da especiação do Cu e quantificação deste nas diferentes frações orgânicas que compõem este sedimento, esta hipótese não pôde ser confirmada.

Segundo Siqueira e colaboradores (2006), o Zn é encontrado na natureza como sulfeto, sendo associado a outros elementos metálicos como Cd, Pb e Cu. Todavia esta condição, segundo Stumm e Morgan (1996) somente é obedecida em ambientes anóxicos, sendo que no meio hídrico as espécies mais comuns desses metais são os carbonatos, formando com estes complexos de alta estabilidade. No entanto, esta associação pôde ser observada na correlação efetuada entre os parâmetros do trecho Madeira/Amazonas (Tabela 20) neste estudo, onde o Zn apresentou alta correlação com Cu (0,90, p-valor:0,001) e Pb (0,78, p-valor:0,011). Outra correlação negativa significativa é entre o íon SO_4^{2-} com Zn (-0,64, p-valor: 0,021), Cu (-0,70, p-valor: 0,03) e Pb (-0,53, p-valor:0,12), confirmando a presença destes elementos associados aos sulfetos nos sedimentos de fundo.

No item 5.5 do presente estudo é levantada importância de se avaliar a influência das atividades garimpeiras, tão difundidas na região, na composição metálica do sedimento. Contudo, essa associação não foi possível de ser realizada apenas com base nas concentrações em si, havendo a necessidade de avaliá-los estatisticamente. Embora, a alta concentração de SO_4^{2-} seja uma característica natural no Rio Madeira e seus formadores, a alta correlação destes íons com os metais Fe, Pb, Cu e Zn pode também apontar a possível influência dos rejeitos do garimpo no aporte destes metais e acúmulo nos sedimentos de fundo, sendo essa hipótese já levantada, mas não confirmada por Elbaz-Poulichet et al. (1999) para os afluentes do Rio Madeira.

Tabela 19 – Matriz de correlação de Pearson para os dados do trecho Solimões/Amazonas

	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>F⁻</i>	<i>Cl⁻</i>	<i>Areia grossa</i>	<i>Areia média</i>	<i>Areia fina</i>	<i>Silte+Argila</i>	<i>pH</i>	<i>STS</i>
Fe	0,22	0,89	-0,33	0,98	0,04	-0,32	-0,06	-0,15	0,16	-0,02	-0,11	0,40
Mn	1	0,19	-0,05	0,25	0,00	-0,02	0,22	-0,43	0,40	-0,11	0,01	-0,05
Ni		1	-0,01	0,92	0,31	-0,02	-0,22	-0,27	0,29	0,06	0,16	0,60
Cu			1	-0,27	0,78	0,92	-0,37	-0,12	0,17	-0,41	0,83	0,43
Pb				1	0,02	-0,31	-0,08	-0,10	0,11	0,01	-0,13	0,38
F⁻					1	0,92	-0,26	-0,53	0,57	-0,34	0,97	0,79
Cl⁻						1	-0,25	-0,38	0,42	-0,38	0,95	0,56
Areia grossa							1	0,03	-0,15	0,55	-0,30	-0,38
Areia média								1	-0,99	-0,09	-0,57	-0,70
Areia fina									1	0,00	0,61	0,74
Silte+Argila										1	-0,33	-0,09
pH											1	0,76

Tabela 20 – Matriz de correlação de Spearman para os dados do trecho Madeira/Amazonas

	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>Turbidez</i>	<i>STS</i>	<i>F⁻</i>	<i>Cl⁻</i>	<i>NO₂⁻</i>	<i>NO₃⁻</i>	<i>SO₄⁻²</i>	<i>Areia grossa</i>	<i>Areia média</i>	<i>Areia fina</i>	<i>Silte+ Argila</i>
Fe	0,14	0,54	0,90	0,39	0,94	0,78	0,25	0,13	-0,76	-0,33	0,24	0,36	-0,82	-0,31	-0,60	0,65	0,22
Mn	1	0,10	0,28	0,59	0,31	-0,02	0,32	0,22	0,02	-0,12	0,36	0,54	-0,04	-0,01	0,35	-0,19	-0,04
Cr		1	0,37	0,54	0,58	0,20	-0,21	-0,21	-0,54	-0,38	-0,18	-0,16	-0,73	-0,51	-0,20	0,30	-0,14
Zn			1	0,39	0,92	0,78	0,37	0,27	-0,73	-0,35	0,39	0,50	-0,64	-0,40	-0,72	0,78	0,37
Ni				1	0,58	0,12	-0,04	0,13	-0,21	-0,13	0,13	0,27	-0,41	-0,05	0,03	0,03	-0,07
Cu					1	0,78	0,38	0,33	-0,66	-0,49	0,20	0,28	-0,70	-0,40	-0,54	0,64	0,07
Pb						1	0,68	0,60	-0,71	-0,56	0,14	0,10	-0,53	-0,43	-0,56	0,58	0,05
Turbidez							1	0,90	-0,18	-0,67	0,14	0,03	0,09	-0,31	-0,03	0,13	-0,24
STS								1	-0,07	-0,66	0,15	-0,07	0,22	-0,32	-0,04	0,10	-0,24
F⁻									1	0,33	-0,25	-0,28	0,85	0,53	0,60	-0,56	-0,42
Cl⁻										1	0,16	0,28	0,18	0,54	0,21	-0,36	0,33
NO₂⁻											1	0,82	-0,01	-0,25	-0,19	0,18	0,78
NO₃⁻												1	-0,21	0,14	-0,20	0,19	0,76
SO₄⁻²													1	0,25	0,41	-0,39	-0,19
Areia grossa														1	0,35	-0,44	-0,10
Areia média															1	-0,96	-0,52
Areia fina																1	0,41

Na tabela 20, também é possível observar a correlação significativa entre o Fe e o SO_4^{2-} (0,82, p-valor: 0,007). Segundo Elbaz-Poulichet e colaboradores (1999), a concentração de SO_4^{2-} pode ser associada ao intemperismo de folhelhos que contém enxofre, além da dissolução da gipsita, $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, em menor escala. Entretanto a alta correlação negativa entre o SO_4^{2-} dissolvido com o Fe presente no sedimento indica a dissolução de depósitos de pirita (FeS_2) acumulado, confirmando a hipótese levantada por Elbaz-Poulichet e colaboradores (1999).

5.7. Análise multivariada: Análise de componentes principais

Uma ferramenta bastante difundida quando se refere à análise exploratória de dados é a Análise de Componente Principal (PCA, em inglês). Uma quantidade considerável de variáveis é reduzida a um número menor de variáveis latentes conhecidas como componentes principais (CPs). O gráfico de scores é um gráfico bidimensional de duas componentes principais, onde geralmente PC_1 e PC_2 são responsáveis pela maior parte da variação dos dados, além de permitir visualizar quais amostras se assemelham entre si. O gráfico de loadings permite verificar quais variáveis (parâmetros) descrevem as diferenças ou semelhanças entre as amostras.

No intuito de se detectar a presença de outliers, a visualização do gráfico de scores ajuda a identificar possíveis valores que não se encaixam no modelo, entretanto o gráfico de resíduos \times influência auxilia na melhor identificação destes valores. Além de detectar os outliers, este gráfico propõe a identificação das amostras que mais influenciam na variação dos valores. O software Unscrambler X disponibiliza a opção de aplicar a elipse de Hotelling T^2 que permite discernir outliers. Para o conjunto de dados analisado, tanto do sistema

Solimões/Amazonas e Madeira/Amazonas, não foram identificados outliers conforme o teste de Hotelling T^2 (Figuras 23 e 26).

O ponto RAPa apresenta um distanciamento significativo dos demais pontos. Através do gráfico de influência (Figura 21), com relação à PC1, verifica-se que esta amostra apresenta-se distinta das demais, indicando que ela pode ser um outlier. Conforme visualizado no gráfico de loadings (Figura 22), observa-se que a variável responsável por esse desvio é o Fe. Analisando os dados brutos, verifica-se que, tanto RAIta (13439 mg.kg^{-1}) e RAPa (15515 mg.kg^{-1}) apresentam os maiores teores de Fe, sendo que ambas possuem a mesma composição mineralógica, teor de silte e argila equivalentes, as amostras foram coletadas à jusante dos municípios e nas datas de amostragem não foram registradas precipitação nos dias anteriores.

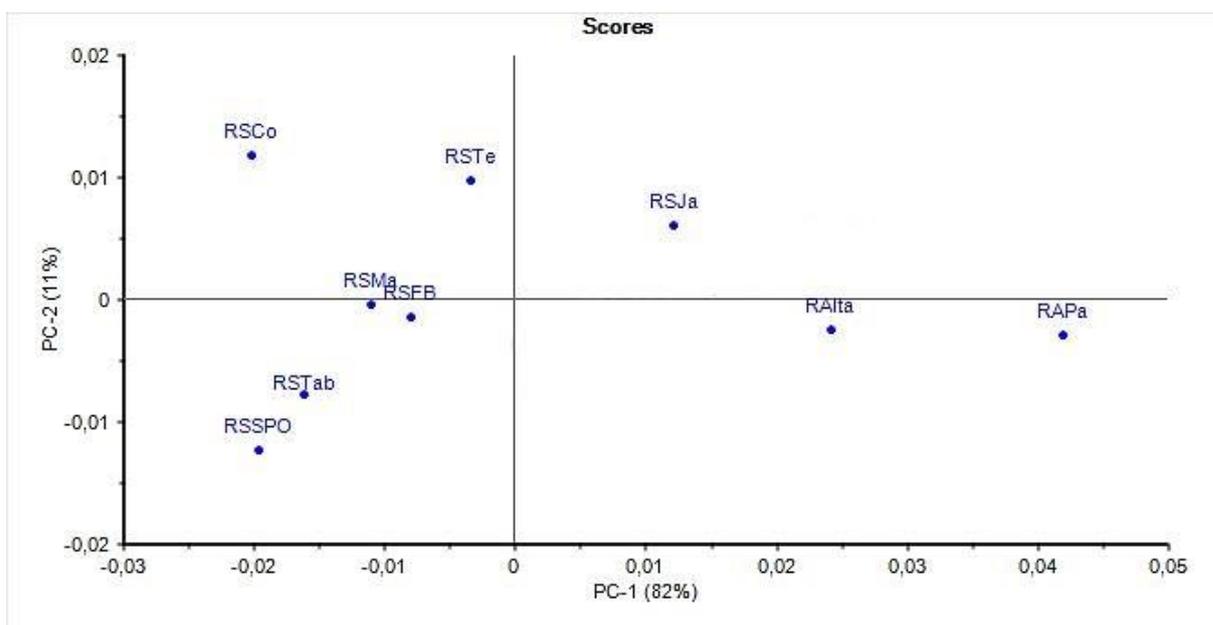


Figura 21 – Gráfico de scores PC_1 x PC_2 para o sistema Solimões/Amazonas para distribuição entre pontos de coleta.

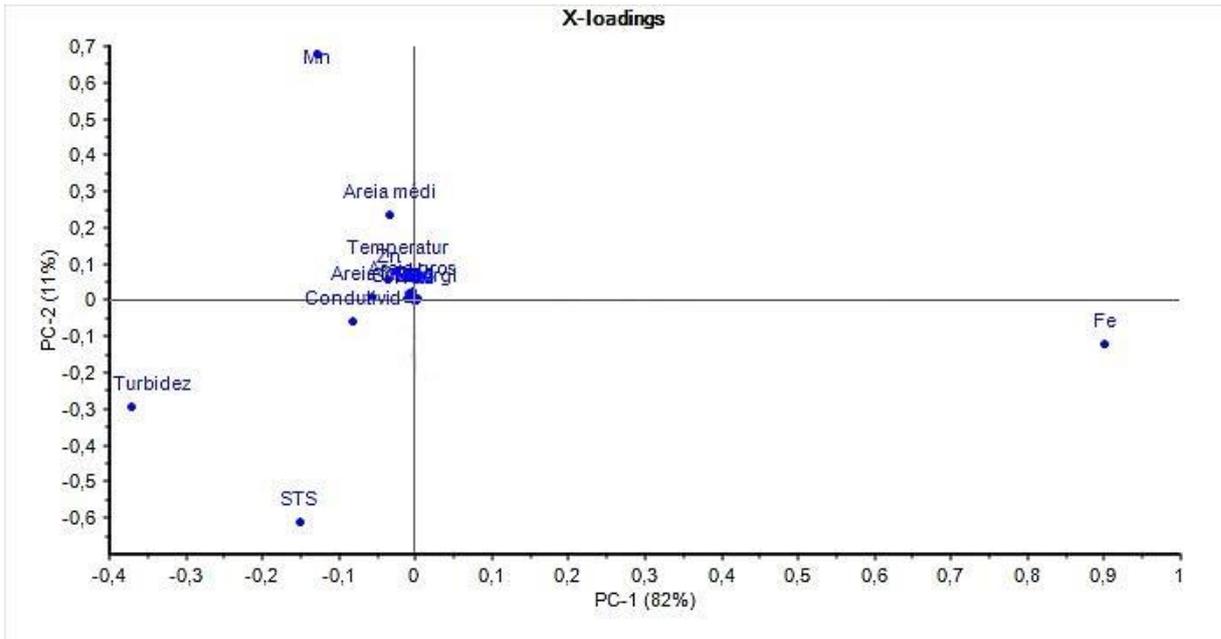


Figura 22 - Gráfico de loadings PC₁ x PC₂ do sistema Solimões/Amazonas para distribuição entre os parâmetros.

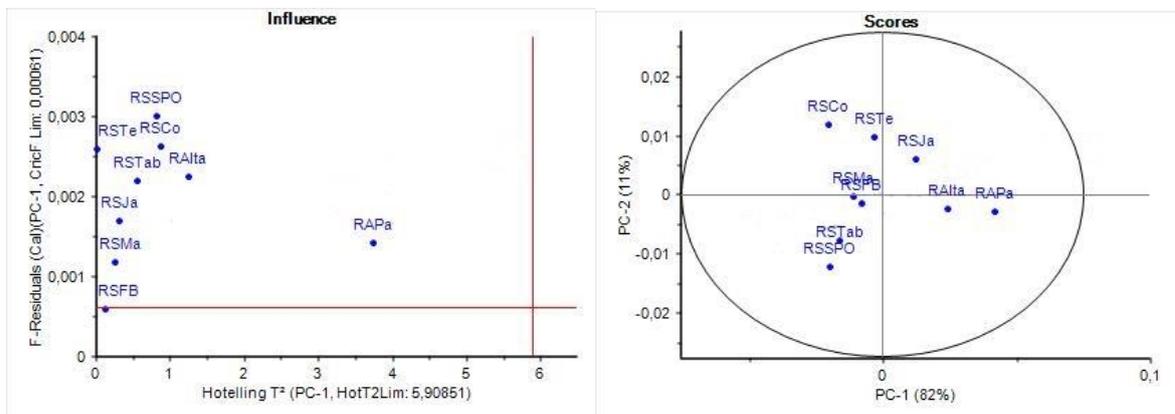


Figura 23 – Gráfico de influências e elipse de Hotelling² para o trecho do Solimões/Amazonas

Uma das explicações para esta ocorrência pode ser encontrada através do fenômeno hidrológico descrito por Filizola e Guyot (2007), que verificou que nos meses de março e abril, início da subida das águas, a quantidade de matéria em suspensão transportada pelo rio Madeira é maior que a quantidade transportada pelo rio Solimões e, no trecho entre

Manacapuru e Óbidos, a tendência é de deposição. À montante do município de Itacoatiara-AM, o rio Amazonas recebe o aporte do rio Madeira. Todavia, conforme a Figura 18, esta deposição é observada no teor de partículas de areia fina não sendo observado o aumento do teor de silte e argila nos sedimentos de fundo. A presença de clinocloro, $(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{Mg,Fe})_2(\text{Al,Fe,Cr,Ti})(\text{OH})_6$, foi detectada com mais frequência nos pontos distribuídos no rio Madeira, e este mineral é susceptível à decomposição por ataque ácido assim como as cloritas, logo o aumento no teor de ferro neste ponto pode ser atribuído ao aporte do rio Madeira no rio Amazonas.

Os pontos RSTab e RSSPO se agrupam no terceiro quadrante do gráfico de scores (Figura 21) com base nos parâmetros turbidez e STS, segundo o gráfico de loadings (Figura 22). Na Tabela 7, verifica-se que estes pontos apresentaram os maiores valores de turbidez (471,58 e 371,56 UNT) e STS (188 e 282,8 mg.l^{-1}) do conjunto de dados. No período de cheia, as partículas em suspensão tendem a sedimentar rio abaixo, sendo os maiores valores registrados à jusante e o processo erosivo é maior em períodos chuvosos e em áreas onde houve alteração na cobertura vegetal. No caso de Tabatinga-AM que, apesar de possuir uma densidade demográfica relativamente baixa (16,21 hab/km^2), a proximidade com o município de Leticia/CO implica que esta região possui boa parte de sua cobertura vegetal removida, influenciando no carregamento de partículas para o curso principal em período de alta pluviosidade além da tendência do aumento no processo erosivo das margens.

Variáveis com baixos loadings, independente do sinal, não devem ser utilizadas para interpretação, devido a estas serem pouco significativas no que se refere a componente principal levada em consideração. No gráfico de loadings (Figura 25), referente à PCA do trecho Madeira/Amazonas verifica-se que a maioria das variáveis possuem baixos loadings, significando que estas não influenciam significativamente na variação dos dados.

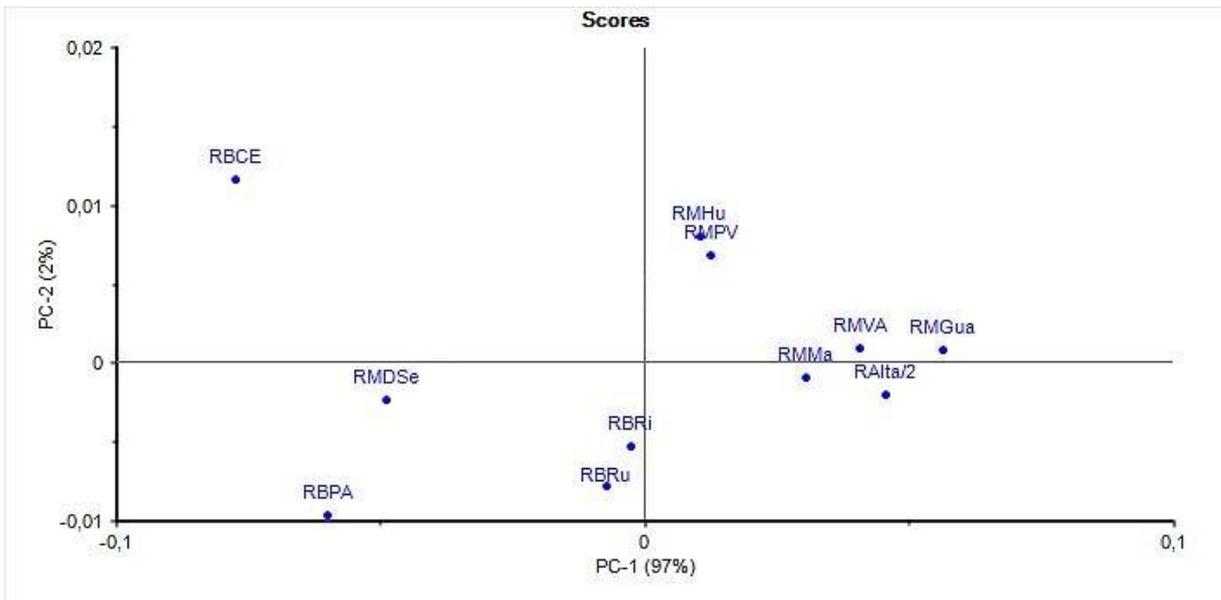


Figura 24 - Gráfico de scores PC₁ x PC₂ do sistema Madeira/Amazonas

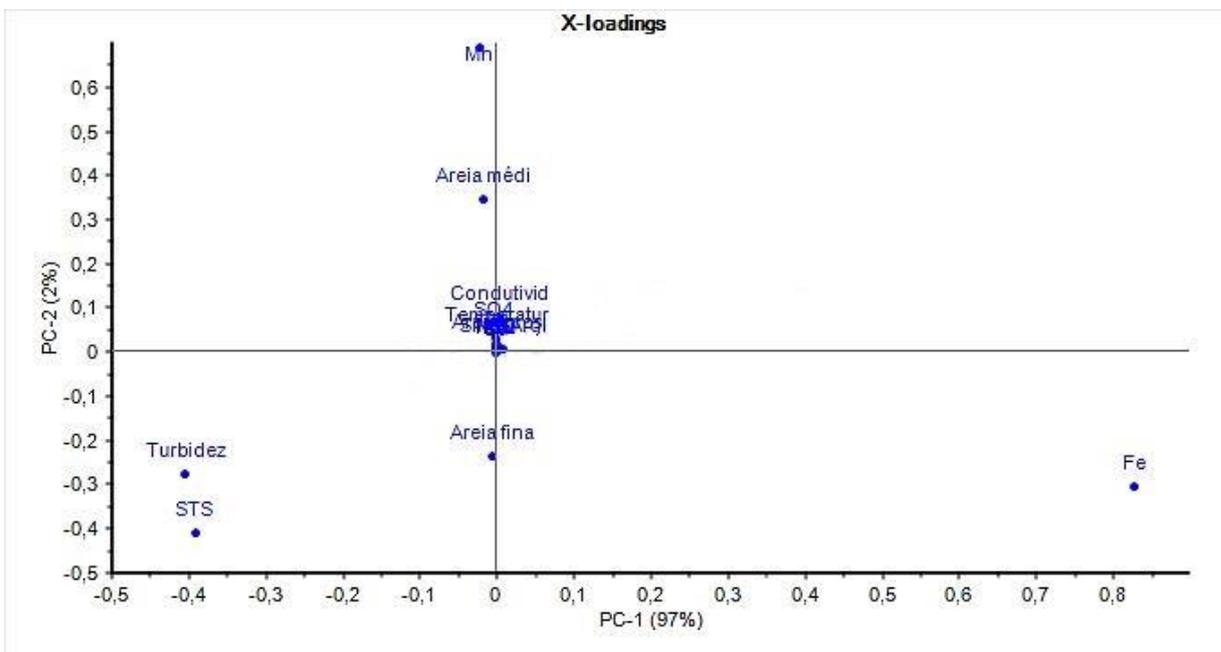


Figura 25 – Gráfico de loadings PC₁ x PC₂ do sistema Madeira/Amazonas

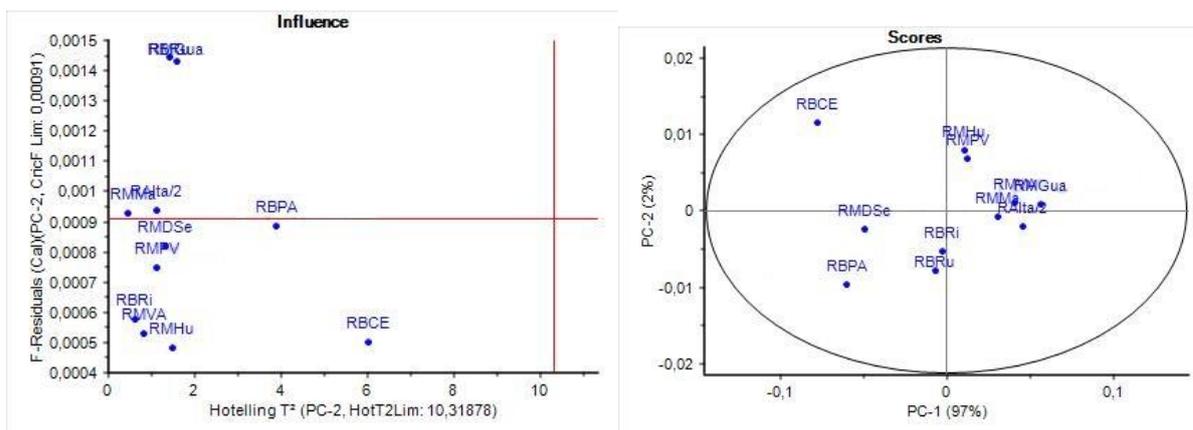


Figura 26 – Gráfico de influência e elipse de Hotelling² para o trecho do Madeira/Amazonas

No gráfico de scores (Figura 24), para este trecho, é possível verificar o agrupamento das amostras RMMa, RMVA, RAIta/2, sendo que o gráfico de loadings aponta que o parâmetro responsável pela semelhança entre estes pontos é o teor de Fe. As amostras RMHu, RBCE e RMPV se assemelham no teor de areia média, com base em PC2. Analisando a Figura 25, é possível observar que estes pontos, apesar da distância, apresentam os maiores valores no que se refere ao teor de areia média, sendo que com relação à RMPV, levanta-se a possibilidade de ocorrência de processos erosivos de origem antrópica nesta região, onde se destaca a presença marcante de vegetação secundária, atividades agropecuárias e vastas áreas com vegetação escassa. O ponto RBCE se destacou dos demais com base no teor de areia média, devido aos fatores anteriormente explanados no item 5.3.

De forma distinta dos resultados obtidos por Lacerda (2009) e colaboradores, os pontos do rio Madeira e do rio Beni apresentaram comportamento distinto no período da seca com base no gráfico de scores, indicando que o rio Madeira tem sofrido alterações que distinguem sua dinâmica de seu principal formador, o rio Beni. Outra diferença observada foi a semelhança do ponto do rio Mamoré (RMGua) com dois pontos do rio Madeira e

Amazonas. Entretanto neste estudo foram levados em consideração distintos indicadores ambientais de água e sedimento, diferente do estudo proposto por Lacerda et al. (2009) que avaliou os parâmetros oxigênio dissolvido, % de saturação oxigênio dissolvido, pH, condutividade elétrica, temperatura (água e ar) e demanda química de oxigênio.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Comparando os dados obtidos dos parâmetros físicos e químicos e concentração de ânions, foi possível verificar que em ambos os trechos, com exceção da turbidez, estes se encontram abaixo dos valores máximos recomendados pela resolução do CONAMA 357/2005. A alta turbidez é uma característica natural dos rios Andinos, causada pela mudança abrupta de gradientes de altitude, além destes rios drenarem terrenos onde se formaram depósitos aluvionares e depósitos de terraços fluviais inconsolidados, sendo esta característica bastante relatada em estudos efetuados nestes rios. A associação da quantificação destes indicadores com dados hidrológicos e climatológicos permite uma melhor visualização do comportamento dessas partículas, além de permitir detectar alterações de fonte antropogênica que afetam a dinâmica do rio.

O rio Solimões recebe o aporte de diversos rios que possuem suas nascentes na planície aluvional, resultando no aumento da vazão e na diluição das partículas em suspensão e dissolvidas à jusante do canal, sendo possível visualizar este fator nos parâmetros turbidez, STS e condutividade elétrica. No trecho Madeira/Amazonas, as distâncias entre os pontos resultam em uma flutuação nos dados de condutividade não permitindo discernir com precisão a causa dessa flutuação, entretanto, o encontro dos formadores do rio Madeira (Beni e Mamoré) resultaram em uma aumento significativo do material em suspensão e aumento da vazão à partir de Porto Velho-RO.

Com relação ao teor de ânions no trecho Solimões/Amazonas, verificou-se que todos (F^- , Cl^- , NO_3^- e NO_2^-) apresentaram concentrações bem abaixo do máximo recomendado pela resolução. No trecho Madeira/Amazonas, diferente do esperado, verificou-se que a concentração dos ânions no ponto em Porto Velho-RO (RMPV) esteve entre os menores valores medidos e, no ponto em Humaitá-AM (RMHu) entre os maiores valores.

A análise granulométrica permite verificar a dinâmica das partículas e a interação destas com o ambiente por onde passam além de, possibilitar a visualização da influência dos processos de alteração do uso e cobertura do solo. Ambos os trechos avaliados apresentaram teores de areia fina e média como composição predominante nos sedimentos de fundo, com exceção do ponto RMGua em Guayaramerín-BO, refletindo na maior concentração de metais nesta amostra. Em todas as amostras de sedimento, na análise no granulômetro, foi possível observar a predominância da fração silte, sendo esta uma característica dos rios Andinos, relatada em outros estudos.

Nos sedimentos de fundo verificou-se a predominância de quartzo, clinocloro, ilita, muscovita e microclina na fração total destes. A alta intensidade do sinal das reflexões do quartzo dificultou a visualização de outros minerais (argilominerais) relatados com frequência em outros estudos na região, sendo a presença destes constatada apenas pela análise visual dos difratogramas. A presença de minerais pesados como a andaluzita, augita e rutilo foram visualizadas no trecho Solimões/Amazonas onde esta ocorrência pode ser associada às formações Içá e Solimões. A lantanita, um mineral relativamente raro de alta estabilidade, foi detectada em diversos pontos no trecho Madeira/Amazonas, sendo esta ocorrência ainda não relatada nos estudos realizados na bacia do rio Madeira.

Com base nos dados de metais, verificou-se que o trecho Madeira/Amazonas apresentou uma faixa de concentração de Zn e Ni maior em relação ao sistema

Solimões/Amazonas, podendo esta ser atribuída aos depósitos de pirita e gipsita presentes no rio Madeira e seus formadores, não sendo descartada possível influência das atividades de mineração bastante difundidas na bacia do Madeira. Esta relação foi mais bem consolidada com base na análise de correlação entre os parâmetros para este trecho.

A análise de correlação e de componentes principais possibilitou visualizar a similaridade entre os pontos de coleta e verificar quais parâmetros são responsáveis pelo agrupamento ou distinção entre os pontos localizados em um mesmo trecho, proporcionando concluir que os trechos Solimões/Amazonas e Madeira/Amazonas mantêm suas características naturais apesar da intensa alteração na cobertura vegetal, atividades mineradoras bastante difundidas na bacia do Madeira e pela baixa densidade populacional dos municípios presentes na área estudada, que podem contribuir com a emissão de esgotos e outros efluentes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Cadernos de Recursos Hídricos: Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil*. Brasília: ANA, 2005, p. 134.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Projeto gerenciamento integrado e sustentável dos recursos hídricos transfronteiriços na bacia do rio Amazonas visão estratégica para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos e do solo, frente às mudanças climáticas e para o desenvolvimento sustentável da bacia hidrográfica do rio Amazonas*. Brasília: 2006.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Plano estratégico de recursos hídricos dos afluentes da margem direita do rio Amazonas*. v. 1, Brasília: ANA, 2011.

AL-MUSHARAFI, S. K., MAHMOUD, I. Y., E AL-BAHRY, S. N. *Heavy metal pollution from treated sewage effluent*. APCBEE Procedia, v. 5, 2013, p. 344–348.

ALMEIDA, C. A., ROCHA, O. *Estudo comparativo da qualidade dos sedimentos dos reservatórios do Rio Tietê (SP)*. Journal of the Brazilian Society Ecotoxicology, n. 2, v. 1, 2006, p. 141-145.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6502: Rochas e Solos*. Rio de Janeiro: 1995.

AUSTRALIAN AND NEW ZEALAND ENVIRONMENT AND CONSERVATION COUNCIL AND AGRICULTURE AND RESOURCE MANAGEMENT COUNCIL OF AUSTRALIA AND NEW ZEALAND, *Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality*, v. 1, 2000.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORK ASSOCIATION; WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22th ed., New York: 2012, p. 1268.

BASTOS, W. R.; REBELO, M. F.; FONSECA, M. F.; ALMEIDA, R.; MALM, O. *A description of Mercury in fishes from the Madeira River Basin Amazon, Brazil*. Acta Amazonica, v. 38, n. 3, 2008, p. 431-438.

BAYRAM, A., ÖNSOY, H., BULUT, V. N. E., AKINCI, G. *Influences of urban wastewaters on the stream water quality: a case study from Gumushane Province, Turkey*. Environmental Monitoring Assessment, v. 185, 2013. p. 1285–303.

BENEDETTI, M. F., MOUNIER, S., FILIZOLA, N., BENAÏM, J., E SEYLER, P. *Carbon and metal concentrations, size distributions and fluxes in major rivers of the Amazon basin*. Hydrological Processes, v. 17, 2003, p. 1363–1377.

BERNARDI, J. V. E.; LACERDA, L. D.; DÓREA, L. D.; LANDIM, P. M. B.; GOMES, J. P. D.; ALMEIDA, R.; MANZATTO, A. G.; BASTOS, W. R. *Aplicação da análise das componentes principais na ordenação dos parâmetros físico-químicos no alto Rio Madeira e afluentes, Amazônia Ocidental*. Geochimica Brasiliensis, v.23, 2009, p. 001-158.

BESER DE DEUS, L. A.; SANTOS, C. S. M. *A utilização de sistema de informação geográfica como suporte ao gerenciamento de bacias hidrográficas transfronteiriças – SIG GeoAmazonas*. Revista Geográfica da América Central, Número especial EGAL, 2011, p. 1-17.

BOGUSH, A. A., E LAZAREVA, E. V. *Behavior of heavy metals in sulfide mine tailings and bottom sediment (Salair, Kemerovo region, Russia)*. Environmental Earth Sciences, v. 64, n. 5, 2011, p. 1293–1302.

BOWMER, K. H. *Water resource protection in Australia: Links between land use and river health with a focus on stubble farming systems*. Journal of Hydrology, v. 403, 2011, p. 176–185.

CALDERON, M. R., GONZÁLEZ, P., MOGLIA, M., GONZÁLES, S. O., JOFRÉ, M. *Use of multiple indicators to assess the environmental quality of urbanized aquatic surroundings in San Luis, Argentina*. Environmental Monitoring. Assessment, v. 186, 2014, p. 4411–4422.

CCME - CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT. *CCME EPC-98E: Protocol for the derivation of Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*: 1995.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. *Resolução nº 344*. São Paulo: 2004, 9 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. *Resolução nº 357*. São Paulo: 2005, 27 p.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. *Mapa Geológico do Estado de Rondônia* [mapa]. Porto Velho: 1999.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. *Mapa geológico do estado do Amazonas* [mapa]. Manaus: 2005.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. *Minerais constituintes das rochas: Uma introdução*. 2^a ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2000.

ELBAZ-POULICHET, F.; SEYLER, P.; MAURICE-BOURGOIN, L.; GUYOT, J.; DUPUY, C. *Trace element geochemistry in the upper Amazon drainage basin (Bolivia)*. Chemical Geology, v. 157, 1999, p. 319-334.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OF THE UNITED STATES. *Test methods for evaluating solid waste physical/chemical methods (SW-846)*. CD-ROM USEPA, Revision 2 – September, 1994. Method 300.0 – Determination of inorganic anions by ion chromatography. Cincinnati: 1993.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OF THE UNITED STATES. *Test methods for evaluating solid waste physical/chemical methods (SW-846)*. CD-ROM USEPA, Revision 2 – September, 1994. Method 3050B – Acid digestion of sediments, sludges and soils. 1996.

ESPINOZA VILLAR, J. C., GUYOT, J. L., RONCHAIL, J., COCHONNEAU, G., FILIZOLA, N., FRAIZY, P., VAUCHEL, P. *Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974–2004)*. Journal of Hydrology, v. 375, 2009, p. 297–311.

FEITOSA, F. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812p.

FERREIRA, S. J. F.; REICHARDT, K.; MIRANDA, S. Á. F. *Características físicas de sedimentos e solos de dois lagos de várzea na Amazônia Central*, Acta Amazonica, v. 29, n. 2, 1999, p. 277–292.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. *Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia*. Revista Brasileira de Geociências, v. 41, 2011, p. 566-576.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L.; MOLINIER, M.; GUIMARÃES, V.; OLIVEIRA, E.; FREITAS, M. A. *Caracterização hidrológica da Bacia Amazônica. Amazônia uma perspectiva interdisciplinar*. Manaus: EDUA, 2002, p. 33-53

FILIZOLA, N., E GUYOT, J. L. *Suspended sediment yields in the Amazon basin: an assessment using the Brazilian national data set*. Hydrological Process, v. 23, 2009, p. 3207–3215.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L.; *The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazon*. Hydrological Sciences Journal, v. 49, n. 1, 2004, p. 143-153.

FILIZOLA, N.; SONDAG, F.; MOURÃO, M. H.; SPÍNOLA, N.; COCHONNEAU, G.; OLIVEIRA, M. A.; GUIMARÃES, V.; CARTAXO, E.; GUYOT, J. L. *Base Operacional da rede observacional de parâmetros ambientais (ORE/HYBAM) na Amazônia Brasileira*, In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVII, 2007, São Paulo. Resumos... Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2008, p. 8.

FRANKOWSKI, M., SOJKA, M., ZIOŁA-FRANKOWSKA, A., SIEPAK, M., E MURAT-BŁAŻEJEWSKA, S. *Distribution of heavy metals in the Mała Węlna River system (western Poland)*. Oceanological and Hydrobiological Studies, v. 38, n. 2, 2009, p. 51–61.

FREITAS, M. B.; BRILHANTE, O. M.; ALMEIDA, L. M. *Importância da análise de água para a saúde pública em duas regiões do Estado do Rio de Janeiro: enfoque para coliformes fecais, nitrato e alumínio*. Cadernos de Saúde Pública, v. 17, n. 3, 2001, p. 651-660.

GALVÃO, R. C. F.; GOMES, J. P. O.; ALMEIDA, R.; BERNARDI, J. V. E.; BASTOS, W. R.; LACERDA, L. D. *Geoquímica Ambiental da Bacia do Rio Madeira, RO*. Geochimica Brasiliensis, v. 23, n. 1, 2009a, p. 001-158.

GALVÃO, R. C. F.; GOMES, J. P. O.; ALMEIDA, R.; BERNARDI, J. V. E.; BASTOS, W. R.; LACERDA, L. D. *Variação sazonal de elementos-traço associados aos sólidos em suspensão no alto rio Madeira, Amazônia Ocidental*. Geochimica Brasiliensis, v. 23, n.1, 2009b, p. 067-078.

GIBBS, R. G. *The Geochemistry of the Amazon river system: Part I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids*. The Geological Society of America Bulletin, v. 78, 1967, p. 1203-1232.

GOMES, A., PINTO, N., MARIA, A., HORBE, C., ROCHA, S., ATILA, S., MANUEL, H. *Efeitos da ação antrópica sobre a hidrogeoquímica do rio Negro na orla de Manaus/AM*. Acta Amazonica, v. 39, n. 3, 2009, p. 627–638.

GONÇALVES, M. E. P.; CAMÕES, M. F.; PAIVA, J. M.; BENOLIEL, M. J.; CARNEIRO, R. N. *Validação do método de determinação simultânea dos íons brometo e bromato por cromatografia iônica em águas de consumo humano*. Química Nova, v. 27, n. 3, 2004, p. 503–507.

GORAYEB, A.; LOMBARDO, M. A.; PEREIRA, L. C. C.; *Qualidade da água de abastecimento na Amazônia: O exemplo da bacia hidrográfica do rio Caeté*. Mercator, v. 9, n. 18, 2010, p. 135-157.

GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J.; PIERANGELI, M. A. P.; ZULIANE, D. Q.; CAMPOS, M. L.; MARQUI, G. *Elementos traço em solos e sistemas aquáticos*. Tópicos em Ciências do Solo, v. 4, 2005, p. 345-390.

GUIMARÃES, S. T., LIMA, H. N., TEIXEIRA, W. G. Caracterização e classificação de gleissolos da várzea do rio Solimões (Manacapuru e Iranduba). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 2, 2013, p. 317–326.

GUYOT, J. L.; BOURGES, J.; HOORELBECKE, R.; ROCHE, M. A.; CALLE, H.; CORTES, J.; GUZMAN, M. C. B.; *Exportation de matières en suspension des Andes vers l'Amazonis par le Rio Beni, Bolivie*. In: *Sediment Budgets – Proceedings of the Porto Alegre Symposium*, Wallington (CT): IAHS Press, 1988. Bordas: IAHS publication, p. 443-452.

GUYOT, J. L., JOUANNEAU, J. M., E WASSON, J. G. *Characterisation of river bed and suspended sediments in the Rio Madeira drainage basin (Bolivian Amazonia)*. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 12, n. 4, 1999, p. 401–410.

HORBE, A. M. C.; PAIVA, M. R. P.; MOTTA, M. B.; HORBE, M. A.; *Mineralogia e geoquímica dos perfis sobre sedimentos neógenos e quaternários da bacia do Solimões na região de Coari-AM*. *Acta Amazonica*, v. 37, n. 1, 2007, p. 81-90.

HORBE, A. M. C., ANA, G., SANTOS, S. *Chemical composition of black-watered rivers in the Western Amazon Region (Brazil)*, v. 20, n.6, 2009, p. 1119–1126.

JOHNSON, A. M. *The climate of Peru, Bolivia and Ecuador*. In: *Climates of Central and South America*, Schwerdtfeger W. (ed.), *World Survey of Climatology*, v. 12, p. 147-218, Elsevier, 1976.

JUNK, W. J.; FURCH, K. *Química da água e macrófitas aquáticas de rios e igarapés na Bacia Amazônica e nas águas adjacentes*. *Acta Amazonica*, v. 10, n. 2, 1980, p. 611-635.

JUNK, W. J.; MELLO, J. A. S. N. *Impactos ecológicos das represas hidrelétricas na bacia amazônica brasileira*. *Estudos avançados*, v. 4, n. 8, 1990.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. *Trace elements in soils and plants*, 3. ed., CRC Press, Boca Raton, 2001, 413 p.

KOUMROUYAN, A.; SANTANA, G. *Química de elementos-traço nos sedimentos do Lago do Parú (Manacapuru - Amazonas), sob influência do pulso de inundação do baixo Rio Solimões*, *Acta Amazonica*, v. 38, n. 3, 2008, p. 401-502.

LATRUBESSE, E.M.; STEVAUX, J.C.; SINHA, R.; *Tropical rivers*. Geomorphology, n. 70, 2005, p. 187-206.

MACHADO, F. B.; Banco de dados do Museu Heinz Ebert. Departamento de Petrologia e Metalogenia IGCE/UNESP. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/museudpm/>. Acesso em: 17 de agosto de 2015.

MALM, O., CASTRO, M. B., BASTOS, W. R., BRANCHES, F. J. P., GUIMARÃES, J. R. D., ZUFFO, C. E., E PFEIFFER, W. C. *An assessment of Hg pollution in different goldmining areas, Amazon Brazil*. Science of the Total Environment, v. 175, n. 2, 1995, p. 127–140.

MANGIAROTTI, S.; MARTINEZ, J. M.; BONNET, M. P.; BUARQUE, D. C.; FILIZOLA, N.; MAZZEGA, P. *Discharge and suspended sediment flux estimated along the mainstream of the Amazon and the Madeira Rivers (from in situ and MODIS Satellite Data)*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 21, 2013, p. 341 a 355.

MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.; DEMATTE, J. L. I.; RICHEY, J. E. ; DEVOL, A. H. *Chemical and mineralogical composition of Amazon river floodplain sediments, Brazil*. Applied Geochemistry, v. 8, 1993, p. 391-402.

MCCLAIN, M. E.; NAIMAN, R. J. *Andean influences on the biogeochemistry and ecology of the Amazon River*. Bioscience, v. 58, n. 4, 2008, p. 325-338.

MEADE, R. H.; DUNNE, T.; RICHEY, J. E.; SANTOS, U. de M.; SALATI, E.; *Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon river of Brazil*. Science, n. 228, 1985, p. 488-490.

MEI, J., LI, Z., SUN, L., GUI, H., E WANG, X. *Assessment of heavy metals in the urban river sediments in Suzhou City, Northern Anhui Province, China*. Procedia Environmental Sciences, v. 10, 2011. p. 2547–2553.

MENDES, A. C., TRUCKENBROD, W., CÉSAR, A., E NOGUEIRA, R. *Análise faciológica da Formação Alter do Chão (Cretáceo , Bacia do Amazonas), próximo à cidade de Óbidos, Pará , Brasil*. Revista Brasileira de Geociências, v. 42, n. 1, 2012, p. 39–57.

MILLER, J. R., LECHLER, P. J., MACKIN, G., GERMANOSKI, D., E VILLARROEL, L. F. *Evaluation of particle dispersal from mining and milling operations using lead isotopic*

fingerprinting techniques, Rio Pilcomayo Basin, Bolivia. Science of the Total Environment, v. 384, n. 1-3, 2007, p. 355–373.

MORGANO, M. A.; QUEIROZ, S. C. N.; FERREIRA, M. M. C. *Determinação dos teores de minerais em sucos de frutas por espectrometria de emissão óptica em plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)*. *Ciência e Tecnologia Alimentícia*, v. 19, n. 3, 1999, p. 344-348.

MOTTA, M. B.; Proveniência da formação Içá e de sedimentos do rio Solimões, entre os municípios de Tefé e Manacapuru – Amazonas.2008. p. 112. Dissertação de mestrado. UFAM- PPGGeociências, Manaus.

NEUENDORF, K. E.; MEHL, J. P.; JACKSON, J. A.; *Glossary of geology*, 5. ed. Alexandria:American Geological Institute, 2005, p. 800.

NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. *Screening Quick Reference Tables*. Seattle: NOAA, 1999, 12 p.

OLESIK, J. W.; *Elemental analysis using an evaluation and assessment of remaining problems: ICP-OES and ICP/MS*. *Analytical chemistry*, v. 63, n. 1, 1991, p. 12-21.

OLIVEIRA, R. R. DE; LACERDA, L. D. DE. *Contaminação por chumbo na serrapilheira do Parque Nacional da Tijuca - RJ*. *Acta Botânica Brasilica*, v. 1, 1987, p. 165–169.

PAIVA, R.; *Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica de Grandes Bacias: Rio Solimões*. 2009. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PANTOJA, N. G. P.; CASTRO, L. M.; ROCHA, S. D.; SILVA, J. A.; RIBEIRO, J. S. P.; DONALD, A. R.; SILVA, L. M.; OLIVEIRA, T. C. S. *Quality of the Solimões River water for domestic use by the riverine community situated in Manacapuru-Amazonas-Brazil*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015: no prelo.

PAVANELLI, D., E SELLI, L. *Effective Size Characteristics of Suspended Sediment and Nutrient Concentrations during Flood Events in the Reno River Tributaries (Northern Italy)*. *Procedia Environmental Sciences*, v. 19, 2013. p. 723–732.

PEREIRA, E. L. S.; *Influência das características naturais e antrópicas da bacia de drenagem sobre as propriedades físico-químicas do rio Solimões/Amazonas e seus principais tributários*

brasileiros. 2012. Dissertação de mestrado Programa de Pós - Graduação em Clima e Ambiente. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.

PEREIRA, S. F. P., PIRES, O. O., SARAIVA, A. F., OLIVEIRA, G. R., SOUSA JUNIOR, P. M., MIRANDA, R. G., ... SALES, R. S. *Distribuição de elementos tóxicos no estuário do Rio Amazonas*. Eclética Química, v. 36, n.1, 2011, p. 46–63.

PETTIJOHN, F.J.; POTTER, P. E.; SIEVER, R. *Sand and Sandstone*. New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 1973, p. 102-143.

PFEIFFER, W. C.; MALM, O.; SOUZA, C. M. M.; DRUDE DE LACERDA, L.; SILVEIRA, E.G.; BASTOS, W. R.; *Mercury in the Madeira River ecosystem, Rondônia, Brazil*. Forest Ecology and Management. v. 38, 1991, p. 239-245.

PINTO, A. G. N.; HORBE, A. M. C.; SILVA, M. S. R.; MIRANDA, S. A. F. ; PASCOALOTO, D.; SANTOS, H. M. C. *Efeitos da ação antrópica sobre a hidrogeoquímica do rio Negro na orla de Manaus / AM*. Acta Amazonica, v. 39, n. 3, 2009, p. 627-638.

QUADROS, M. L. E. S; RIZZOTO, G. J. Geologia e recursos minerais do Estado de Rondônia: Sistema de Informações Geográficas – SIG: Texto Explicativo do Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado de Rondônia. Porto Velho: CPRM, 2007, 153p.

QUEIROZ, M.M.A.; HORBE, A. M. C.; SEYLER, P.; MOURA, C.A.V. *Hidroquímica do rio Solimões na região entre Manacapuru e Alvarães - Amazonas- Brasil*. Acta Amazonica, v. 39, n. 4, 2009, p. 943-952.

QUEIROZ, M. M. A.; HORBE, A. M. C.; SEYLER, P.; MOURA, C. A. V. *Mineralogia e química dos sedimentos de fundo do médio e baixo Madeira e de seus principais tributários – Amazonas – Brasil*. Acta Amazonica, v. 41, n. 4, 2011, p. 453-464.

RATISBONA, L.R.; The climate of Brazil. In *Climates of Central and South America*, Schwerdtfeger W. (ed.), WorldSurvey of Climatology, v. 12, Elsevier, 1976, p. 219-293.

RICHEY, J. E.; HEDGES, J. T.; DEVOL, A.H.; QUAY, P. D. *Biogeochemistry of carbon in the Amazon river*. Limnology and Oceanography, v. 35, 1990, p. 352-371.

ROCHA, L. C. R.; HORBE, A. M. C. Contaminação provocada por um depósito de lixo no aquífero Alter do Chão em Manaus – AM. Acta Amazonica, v. 36, n. 3, 2006, p. 307-312.

ROCHA, J. C.; ROSA, A. H.; CARDOSO, A. A.; Introdução à Química Ambiental. 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2009, p. 256.

ROCHE, M.A.; FERNANDEZ, C.; ALIAGA, A.; PEÑA J.; SALAS, E.; MONTAÑO, J.L.; Balance hídrico de Bolivia. La Paz: Publ. UNESCOPHICAB, 1992, p. 16.

ROSSETTI, D. F.; TOLEDO, P. M. DE; GÓES, A. M. *New geological framework for Western Amazônia (BRAZIL) and implications for biogeography and evolution*. Quaternary Research, v. 63, 2005, p. 78–89.

SANTOS, U. M.; RIBEIRO, M. N. G. *A Hidroquímica do rio Solimões – Amazonas*. Acta Amazônica, v. 18, n. 3-4, 1988, p. 145-172.

SANTOS, I. N.; HORBE, A. M. C.; SILVA, M. D. S. R.; MIRANDA, S. Á. F. *Influência de um aterro sanitário e de efluentes domésticos nas águas superficiais do rio Tarumã e afluentes - AM*. Acta Amazonica, v. 36, n. 2, 2006. p. 229–235.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. 2. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000, p. 207.

SEYLER, P. T., E BOAVENTURA, G. R. *Distribution and partition of trace metals in the Amazon basin*. Hydrological Processes, v. 17, n. 7, 2003, p. 1345–1361.

SIOLI, H., *Hydrochemistry and geology in the Brazilian Amazon region*. Amazoniana, v. 1, 1967, p. 267-277.

SIOLI, H. *Amazônia – Fundamentos da Ecologia da maior região de Florestas Tropicais*. Trad. J. Becker. Rio de Janeiro: Vozes, 1985, p. 72.

SIQUEIRA, G. W.; FÁTIMA, S.; PEREIRA, P.; APRILE, F. M. *Determinação dos elementos-traço (Zn, Co e Ni) em sedimentos da Plataforma Continental Amazônica sob influência da descarga do rio Amazonas*. Acta Amazonica, v. 36, n. 92, 2006, p. 321–326.

STALLARD, R. F.; EDMOND, J. M. *Geochemistry of the Amazon 2: the influence of geology and weathering environment on the dissolved load*. Journal of Geophysical Research, v. 88, n. 14, 1983, p. 9671–9688.

STUMM, W.; MORGAN, J.J.; Aquatic chemistry: chemical equilibrium and rates in natural waters, 3 ed., New York: John Wiley e Sons Inc., 1996, p. 1022.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Orgs.) *Decifrando a Terra*. Oficina de Textos, São Paulo: 2000, p. 568.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Limnologia. São Paulo: Oficina de textos, 2008, p. 631.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 3. ed., 2005, p. 452.

WELZ, B.; SPERLING, M. Atomic Absorption Spectrometry, 3. ed., VCH, Weinheim, 1999.

WINGE, M. et. al. 2001 - 2015 . Glossário Geológico Ilustrado. Disponível na Internet em <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>> Acesso em: 01 de agosto de 2015 .

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION; Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes; UNEP/WHO, 1996.

