INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Avaliação da distribuição de metais e outros elementos de interesse em perfis de
sedimentos do Reservatório Ponte Nova, São Paulo.**

CLAUDIA SONEHARA CAVALCANTI DE ARRUDA

**Dissertação apresentada como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientadora:
Profa. Dra. Ana Maria Graciano Figueiredo**

**São Paulo
2021**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Avaliação da distribuição de metais e outros elementos de interesse em perfis de
sedimentos do Reservatório Ponte Nova, São Paulo.**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

CLAUDIA SONEHARA CAVALCANTI DE ARRUDA

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Aplicações

Orientadora:

Profa. Dra. Ana Maria Graciano Figueiredo

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar: ARRUDA, C. S. C. d. . Avaliação da distribuição de metais e outros elementos de interesse em perfis de sedimentos do Reservatório Ponte Nova, São Paulo. 2021. 131 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Arruda, Claudia Sonehara Cavalcanti de
Avaliação da distribuição de metais e outros elementos de interesse em perfis de sedimentos do Reservatório Ponte Nova, São Paulo. / Claudia Sonehara Cavalcanti de Arruda; orientador Dra. Ana Maria Graciano Figueiredo. -- São Paulo, 2021.
131 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2021.

1. sedimentos. 2. reservatórios. 3. metais. 4. INAA . I. Graciano Figueiredo, Dra. Ana Maria , orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autora: Claudia Sonehara Cavalcanti de Arruda

Título: Avaliação da distribuição de metais e outros elementos de interesse em perfis de sedimentos do Reservatório Ponte Nova, São Paulo.

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências

Data: 19/05/2021

Banca Examinadora

Profa Dra.: Ana Maria Graciano Figueiredo
Instituição: IPEN

Julgamento: Aprovado

Profa. Dra.: Andreza Portella Ribeiro
Instituição: UNINOVE

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Robson Leocádio Franklin
Instituição: CETESB

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.:
Instituição: _____

Julgamento: _____

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Profa. Dra. Ana Maria G. Figueiredo pela orientação, pelos ensinamentos, dedicação e apoio.

Ao Prof. Dr. Gilson Alves Quinágua pela oportunidade e incentivo desde o curso de pós-graduação.

Ao prof. Dr. Robson Leocádio Franklin pelos ensinamentos e orientação nas análises de água e sedimento feitas no Laboratório de Química Inorgânica da CETESB e pelas contribuições no Seminário de Área.

Aos funcionários do Setor de Amostragem da CETESB pelas coletas das amostras e a todos os funcionários do Laboratório de Química Inorgânica da CETESB que me ajudaram no preparo das amostras.

Ao Prof. Dr. Wanilson Luiz Silva que me orientou nas análises granulométricas realizadas na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) no Instituto de Geociências-Laboratório de Análise Ambiental.

A todos os pesquisadores e funcionários e do Centro do Reator de Pesquisa (CERPq), em especial ao Dr. Paulo Sergio Cardoso da Silva pelos ensinamentos e Regina Beck Ticianelli pela orientação e ajuda no preparo das amostras de sedimento.

Aos que sempre me apoiaram e ajudaram nesses dois anos de mestrado:
Carol Theophilo, Carol Albuquerque, Rafaella, Jefferson, Iberê, Gabriel, Caio, Danielle, Lilian e Osmar e principalmente a Gisiele que me ajudou nas contagens, nas disciplinas e por toda as experiências que compartilhamos.

Aos meus pais por absolutamente tudo, vocês são o meu maior presente, eu não estaria aqui sem vocês.

Ao CNPQ, pela bolsa concedida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/USP).

RESUMO

ARRUDA, CLAUDIA S.C. Avaliação da distribuição de metais e outros elementos de interesse em perfis de sedimentos do Reservatório Ponte Nova, São Paulo. 2021. 131p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – CNEN/SP, São Paulo.

O estudo da distribuição de metais em sedimentos é muito importante do ponto de vista da poluição ambiental. O reservatório de Ponte Nova, localizado na bacia superior do rio Tietê, cobre uma área de 25,7 km² e é um importante reservatório no abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo. Foram realizadas coletas de água e de perfis de sedimentos na barragem em agosto de 2018 (ponto P1) e em fevereiro de 2019 (pontos P1, P2 e P3). A Análise por Ativação com Nêutrons Instrumental (INAA) foi aplicada às amostras de sedimentos para determinar elementos majoritários (Fe, K e Na), traços (As, Ba, Br, Co, Cr, Cs, Hf, Rb, Sb, Sc, Ta, Tb, Th, U, Zn e Zr) e terras raras (Ce, Eu, La, Lu, Nd, Sm, Tb e Yb), e a técnica de Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES) para determinar Cd, Cu, Mn, Ni, P e Pb. Para análise de metais em água, utilizou-se a técnica de Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS). Os resultados de metais em água foram avaliados por comparação com a legislação CONAMA 357. Os perfis de sedimento foram avaliados com as Diretrizes Canadenses de Qualidade de Sedimentos (TEL e PEL) e com os índices de poluição, Fator de Enriquecimento (FE) e Índice de Geoacumulação (IGeo). Os valores obtidos na análise das amostras de água mostraram-se abaixo dos valores estipulados pela legislação CONAMA 357. Para os perfis de sedimento, a comparação com os valores de orientação do Canadá, mostrou que somente Cr e Pb excederam o TEL em algumas amostras. Em relação aos valores dos índices de poluição, valores de $FE > 2$ foram obtidos para As nos pontos P1 agosto/2018, indicando enriquecimento significativo nas primeiras camadas do perfil, e Cu e Mn enriquecimento moderado. No ponto P2, para As e Ba os valores FE ficaram no intervalo $2 < FE < 5$ (enriquecimento moderado), e os resultados de IGeo foram semelhantes aos obtidos por FE. A análise estatística mostrou que os elementos analisados se agruparam de acordo com a granulometria apontando uma porcentagem maior de silte e argila nas primeiras camadas. Em comparação a estudos realizados anteriormente no reservatório, não

foram observadas mudanças significativas no comportamento e na concentração dos elementos estudados, o que pode indicar que não há uma contribuição antrópica importante dos elementos analisados no reservatório.

Palavras-chaves: sedimentos, reservatórios, metais, INAA

ABSTRACT

ARRUDA, CLAUDIA S.C. Assessment of the distribution of metals and other elements of interest in sediment profiles of the Ponte Nova Reservoir, São Paulo. 2021. 131 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – CNEN/SP, São Paulo.

The study of the metal distribution in sediments is very important from environmental pollution point of view. The Ponte Nova reservoir, located in the upper basin of the Tietê River, in the southern region of the state of São Paulo, covers an area of 25.7 km², and is very important in supplying the metropolitan region of São Paulo. Sediment profiles and water samples were collected at the reservoir in August 2018 (point P1) and in February 2019 (points P1, P2 and P3). Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA) was applied to sediment samples to determine major elements (Fe, K and Na), traces (As, Ba, Br, Co, Cr, Cs, Hf, Rb, Sb, Sc, Ta, Tb, Th, U, Zn and Zr) and rare earth elements (Ce, Eu, La, Lu, Nd, Sm, Tb and Yb), and Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP OES) was applied to determine Cd, Cu, Mn, Ni, P and Pb. For metal analysis in water, Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) was employed. The results of metals in the water samples were evaluated by comparison with the CONAMA 357 legislation and those of sediment profiles with the Canadian Sediment Quality Guidelines (TEL and PEL). The sediment profiles were evaluated with the Canadian Sediment Quality Guidelines (TEL and PEL) and with the pollution indices, Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (IGeo). The values obtained from the analysis of the water samples were below the values stipulated by the CONAMA 357 legislation. For the sediment profiles, the comparison with the Canadian guidance values showed that only Cr and Pb exceeded the TEL in some samples. In relation to pollution indices values, Enrichment Factor > 2, was obtained for As at point P1 August/2018, indicating significant enrichment in the first layers of the profile, and for Cu and Mn moderate enrichment. At point P2, for As and Ba the FE values were in interval 2 < FE < 5 (moderate enrichment), and the IGeo results were similar to those obtained by FE. Statistical analysis showed that the analyzed elements were grouped according to the granulometry, which showed a higher percentage of silt and clay in the first layers. In comparison to studies previously carried out in the reservoir, no significant

changes in the concentration and behaviour of the studied elements were observed, which may indicate that there is no important anthropogenic contribution from the analysed elements in the reservoir.

Key words: sediments, reservoirs, metals, INAA

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição e localização dos pontos de coleta.....	22
Tabela 2 - Valores de TEL e PEL.....	29
Tabela 3 - Categorias do Fator de Enriquecimento	30
Tabela 4 - Classificação do nível de poluição segundo IGeo.....	31
Tabela 5 - Intervalo Granulométrico (mm) – Escala de Udden-Wentworth	33
Tabela 6 - Dados de coleta P1 Agosto/2018	34
Tabela 7 - Dados de coleta P1 fevereiro/2019.....	35
Tabela 8 - Dados de coleta P2 fevereiro/2019.....	35
Tabela 9 - Dados da coleta P3 fevereiro/2019.....	36
Tabela 10 - Comparação dos valores obtidos no presente trabalho a resultados da literatura (mg kg ⁻¹)	54
Tabela 11 - Fator de Enriquecimento Ponto P1 agosto/2018.	61
Tabela 12 - Fator de Enriquecimento ponto P1 fevereiro/2019.	62
Tabela 13 - Fator de Enriquecimento ponto P2 fevereiro/2019	62
Tabela 14 - Fator de Enriquecimento ponto P3 fevereiro/2019	63
Tabela 15 - Índice de Geoacumulação ponto P1 Agosto/2018.	65
Tabela 16 - Índice de Geoacumulação ponto P1 Fevereiro/2019.....	65
Tabela 17 - Índice de Geoacumulação ponto P2 Fevereiro/2019.....	65
Tabela 18 - Índice de Geoacumulação ponto P3 Fevereiro/2019.....	66
Tabela 19 - Cargas fatorais das Componentes Principais extraídas pela análise fatorial P1 Agosto/2018.	67
Tabela 20 - Cargas fatorais das Componentes Principais extraídas pela análise fatorial P1 Fevereiro/2019.....	68
Tabela 21 - Cargas fatorais das Componentes Principais extraídas pela análise fatorial P2....	68
Tabela 22 - Cargas fatorais das Componentes Principais extraídas pela análise fatorial P3....	69
Tabela A1 - Concentrações dos elementos analisados (em µg L ⁻¹) por ICP-MS nas amostras da coluna d' água P1 agosto/2018.....	80
Tabela A2 - Concentrações dos elementos analisados (em µg kg ⁻¹) por ICP-MS nas amostras da coluna d' água P1 fevereiro/2019.....	82
Tabela A3 - Concentrações dos elementos analisados (em µg kg ⁻¹) por ICP-MS nas amostras da coluna d' água P2 fevereiro/2019.....	84

Tabela A4 - Concentrações dos elementos analisados (em $\mu\text{g kg}^{-1}$) por ICP-MS nas amostras da coluna d' água P3 fevereiro/2019	86
Tabela B1 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (mg kg^{-1}) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P1 agosto/2018	87
Tabela B1 1 - Tabela B1 1 1 Concentrações dos elementos analisados (mg kg^{-1}) por ICP OES nas amostras de perfil de sedimento P1 agosto/2018.....	90
Tabela B2 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (em mg kg^{-1}) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P1 fevereiro/2019	91
Tabela B2 1 - Concentrações dos elementos analisados (em mg kg^{-1}) por ICP OES nas amostras de perfil de sedimento P1 fevereiro/2019.....	94
Tabela B3 - Tabela B3 Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (em mg kg^{-1}) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P2 fevereiro/2019	95
Tabela B3 1 - Concentrações dos elementos analisados (mg kg^{-1}) por ICP OES nas amostras de perfil de sedimento P2 fevereiro/2019	98
Tabela B4 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (em mg kg^{-1}) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P3 fevereiro/2019	99
Tabela B4 1 - Concentrações dos elementos analisados (mg kg^{-1}) por ICP OES nas amostras de perfil de sedimento P3 fevereiro/2019.....	102
Tabela C1 - Fator de Enriquecimento utilizando NASC P1 agosto/2018	103
Tabela C2 - Fator de Enriquecimento utilizando NASC P1 agosto/2018	103
Tabela C3 - Fator de Enriquecimento utilizando NASC P1 agosto/2018	104
Tabela C4 - Fator de Enriquecimento utilizando NASC P1 agosto/2018	104
Tabela D1 - Índice de Geoacumulação utilizando NASC P1 agosto/2018	105
Tabela D2 - Índice de Geoacumulação utilizando NASC P1 fevereiro/2019	105
Tabela D3 - Índice de Geoacumulação utilizando NASC P2 fevereiro/2019	106
Tabela D4 - Índice de Geoacumulação utilizando NASC P3 fevereiro/2019	107
Tabela E1 - Índice de Geoacumulação considerando a porcentagem de finos P1 agosto/2018.	108
Tabela E2 - Índice de Geoacumulação considerando a porcentagem de finos P1 Fevereiro/2019.....	108
Tabela E3 - Índice de Geoacumulação considerando a porcentagem de finos P2 Fevereiro/2019.....	109
Tabela E4 - Índice de Geoacumulação considerando a porcentagem de finos P3Fevereiro/2019	109

Tabela F1 - Componentes Principais extraídas pela Análise Fatorial P1 agosto/2018.	110
Tabela F2 - Componentes Principais extraídas pela Análise Fatorial P1 fevereiro/2019	111
Tabela F3 - Componentes Principais extraídas pela Análise Fatorial P2 fevereiro/2019	112
Tabela F4 - Componentes Principais extraídas pela Análise Fatorial P3 fevereiro/2019	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bacia do Alto Tietê	3
Figura 2 – Reservatório Ponte Nova.....	9
Figura 3 – Representação esquemática da interação do nêutron com um núcleo alvo.	18
Figura 4 – Pontos de Amostragem Reservatório Ponte Nova.	23
Figura 5 – Coleta do perfil sedimentar.	25
Figura 6 – Microondas utilizado no pré-preparo Modelo MARS 6.	26
Figura 7 – Gráfico do Controle de Qualidade dos elementos analisados no material de referência SOIL-7.	28
Figura 8 – Gráfico do Controle de Qualidade dos elementos analisados no material de referência TM28.	28
Figura 9 – Gráfico da Granulometria no P1 agosto/2018.....	38
Figura 10 – Gráfico da Granulometria no P1 Fevereiro/2019.....	39
Figura 11 – Gráfico da Granulometria no P2 coletado em Fevereiro/2019	40
Figura 12 – Gráfico da Granulometria no P3 coletado em Fevereiro/2019	40
Figura 13 – Elementos com concentrações maiores nas primeiras camadas P1 Agosto/2018.	42
Figura 14 – Elementos com concentrações maiores nas últimas camadas P1 Agosto/2018....	44
Figura 15 – Elementos que não apresentaram mudanças significativas de concentração ao longo do perfil P1 Agosto/2018	45
Figura 16 – Elementos com concentrações maiores nas primeiras camadas - P1Fevereiro/2019.	46
Figura 17 – Elementos com concentrações maiores nas últimas camadas - P1Fevereiro/2019	48
Figura 18 – Elementos com concentrações maiores nas primeiras camadas ao longo do perfil P2.....	49
Figura 19 – Elementos com concentrações maiores nas últimas camadas P2.	50
Figura 20 – Elementos que não apresentaram mudanças significativas de concentração ao longo do perfil P2.	51
Figura 21 – Elementos com concentrações maiores nas primeiras camadas P3	52
Figura 22 – Elementos com concentrações maiores nas últimas camadas P3	53
Figura 23 – Resultados obtidos para concentrações de As em relação a valores de TEL e PEL (mg kg ⁻¹)	56

Figura 24 – Resultados obtidos para concentrações de Cd em relação a valores de TEL e PEL (mg kg ⁻¹)	57
Figura 25 – Resultados obtidos para concentrações de Cr em relação a valores de TEL e PEL (mg kg ⁻¹)	57
Figura 26 – Resultados obtidos para concentrações de Cu em relação a valores de TEL e PEL (mg kg ⁻¹)	58
Figura 27 – Resultados obtidos para concentrações de Ni em relação a valores de TEL e PEL (mg kg ⁻¹)	58
Figura 28 – Resultados obtidos para concentrações de Pb em relação a valores de TEL e PEL (mg kg ⁻¹)	59
Figura 29 – Resultados obtidos para concentrações de Zn em relação a valores de TEL e PEL (mg kg ⁻¹)	59
Figura 30 – Dendrograma das concentrações dos elementos determinados em Agosto 2018.	70
Figura 31 – Dendrograma das concentrações dos elementos determinados em P1	71
Figura 32 – Dendrograma das concentrações dos elementos determinados em P2	72
Figura 33 – Dendrograma das concentrações dos elementos determinados em P3	73

LISTA DE ABREVIATURAS

AAS – Atomic Absorption Spectrometry
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CCME – Canadian Council of Ministers of the Environment
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP – Componente Principal
CRM – Certified Reference Material
CRPq – Centro do Reator de Pesquisa
EH – Potencial Redox
FE – Fator de Enriquecimento
GPS – Global Position System
IAEA – International Atomic Energy Agency
ICP-MS– Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
ICP OES – Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry
IGeo – Índice de Geoacumulação
INAA – Instrumental Neutron Activation Analysis
IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
LAN – Laboratório de Ativação Neutrônica
NAA – Neutron Activation Analysis
NASC – North American Shale Composite
NBR – Norma Brasileira
NIST – National Institute Standard and Technology
PCA – Principal Component Analysis
PEL – Probable Effect Level
RMSP – Região Metropolitana de São Paulo
SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
TEL – Threshold Effect Level
UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	7
2.1	Objetivos Gerais	7
2.2	Objetivos Específicos	7
3	REVISÃO DA LITERATURA	8
3.1	Reservatório Ponte Nova	8
3.1.1	Trabalhos desenvolvidos na região do Reservatório Ponte Nova	9
3.2	Perfis sedimentares	10
3.2.1	Trabalhos utilizando perfil de sedimentos no reservatório Ponte Nova	12
3.3	Metais	13
3.3.1	Arsênio (As)	14
3.3.2	Cádmio (Cd)	14
3.3.3	Chumbo (Pb)	14
3.3.4	Cromo (Cr)	15
3.3.5	Manganês (Mn)	15
3.3.6	Mercúrio (Hg)	15
3.3.7	Níquel (Ni)	15
3.3.8	Zinco (Zn)	16
3.3.9	Terras raras	16
3.4	Determinação de metais em sedimento e água	17
3.4.1	Análise por Ativação Neutrônica Instrumental (INAA)	17
3.4.2	Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES)	19
3.4.3	Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP MS)	21
4	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1	Amostragem	22
4.2	Coleta de amostras	24
4.2.1	Coleta de Água	24
4.2.2	Coleta de Sedimentos	24
4.3	Preparo de amostras	25
4.3.1	Preparo e digestão das amostras analisadas por ICP OES	25
4.3.2	Preparo das amostras analisadas por ICP MS	26
4.3.3	Preparo das amostras e análise por INAA	27
4.4	Controle de Qualidade Zeta Score	27

4.5 Valores Guia TEL e PEL	29
4.6 Índices de Poluição	29
4.6.1 Fator de Enriquecimento (FE)	29
4.6.2 Índice de Geoacumulação (IGeo)	30
4.7 Análise Granulométrica	32
4.8 Análise Estatística	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 Análise da água	34
5.2 Granulometria	38
5.3 Metais nas amostras dos perfis de sedimento	42
5.3.1 Concentração dos metais nos sedimentos estudados	42
5.3.2 TEL e PEL	56
5.3.3 Fator de Enriquecimento (FE)	61
5.3.4 Índice de Geoacumulação	64
5.3.5 Correlação de Pearson e Análise Fatorial	67
6 CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
APÊNDICE A – Resultados das concentrações de elementos analisados na coluna d’água nas duas campanhas 2018/2019.	80
APÊNDICE B – Resultados das concentrações de elementos analisados nos perfis de sedimento nas duas campanhas 2018/2019.	87
APÊNDICE C – Resultados do Fator de Enriquecimento utilizando NASC	103
APÊNDICE D – Resultados do Índice de Geoacumulação utilizando NASC	105
APÊNDICE E – Resultados do IGeo considerando a porcentagem de finos	108
APÊNDICE F - Dados complementares da Análise Fatorial	110

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural finito e de extrema importância para a manutenção da vida na Terra, seja como componente bioquímico de seres vivos ou como meio de vida de várias espécies, além de ser importante no desenvolvimento de diversas atividades econômicas (SANTIN e GOELLNER, 2013).

Segundo dados disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA):

“O Brasil possui cerca de 12% da disponibilidade de água doce do planeta. Mas a distribuição natural desse recurso não é equilibrada. A região Norte, por exemplo, concentra aproximadamente 80% da quantidade de água disponível, mas representa apenas 5% da população brasileira. Já as regiões próximas ao Oceano Atlântico possuem mais de 45% da população, porém, menos de 3% dos recursos hídricos do país” (ANA,2019).

A conservação da qualidade e quantidade da água depende das condições naturais e antrópicas das bacias hidrográficas. O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), conforme o decreto 2.612 de 03 de junho de 1998, desenvolve regras de mediação do uso da água sendo, assim, um dos grandes responsáveis pela implementação da gestão dos recursos hídricos no País. Tem, como uma de suas competências, aprovar propostas do Comitê de Bacia Hidrográfica, que promove debates sobre questões ligadas aos recursos hídricos, como a implementação de políticas para o uso dos recursos (BOSTELMANN, 2006).

No Estado de São Paulo, o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIGRH) foi criado a partir do artigo 205 da Constituição do Estado de São Paulo de 1989, para garantir a qualidade e quantidade dos recursos hídricos. Fazem parte da coordenação do SIGRH três órgãos: o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CRH); os Comitês de Bacias Hidrográficas (CBHs) e o Comitê Coordenador do Plano Estadual de Recursos Hídricos (CORHI). Os Comitês de Bacias Hidrográficas foram desenvolvidos a partir da Lei 7.663 de 30 de dezembro de 1991 e atualizados pela Lei nº 16.337, de 14 de dezembro de 2016, e totalizam 21 grupos divididos conforme a bacia hidrográfica.

Uma bacia hidrográfica é definida como a área de drenagem de um rio principal e seus afluentes, incluindo nascentes e cabeceiras, e limitada pelos divisores de água. Este

trabalho foca na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (Figura 1), que corresponde à área drenada pelo rio Tietê desde suas nascentes até a barragem de Rasgão. Esta bacia é muito importante para o Estado de São Paulo, pois cerca de 70% da superfície da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) estão situados nessa bacia, localizada no Planalto Atlântico, a uma altura média de 750 m acima do nível do mar. A área corresponde a 5.900 km², integrada por 35 municípios, e seus principais rios são: Tietê, Pinheiros, Tamanduateí, Claro, Paraitinga, Jundiaí, Biritiba-Mirim e Taiaçupeba. Seus aspectos geomorfológicos são de rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino que a circundam (CAMPOS, 2008; MORAES, 2011; FAVARO et al., 2013).

O governo do Estado de São Paulo, por meio dos Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE); Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), já criou vários projetos para utilização do rio Tietê, principalmente para abastecimento público da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

A RMSP é um dos mais extensos e populosos aglomerados urbanos da América do Sul e um dos maiores complexos industriais do mundo. Segundo o IBGE, a RMSP tinha uma população estimada em 12.325.232 de habitantes em 2020 (IBGE, 2021). A alta densidade demográfica, as dificuldades no abastecimento de água e os impactos ambientais, como poluição atmosférica e disposição de resíduos, são alguns dos problemas enfrentados pela macrometrópole paulista. Em busca de atender a população no requisito do abastecimento público de água, o governo do Estado de São Paulo vem há anos implementando ações na área de recursos hídricos, sendo uma delas a construção de reservatórios.

Figura 1 – Bacia do Alto Tietê

Fonte: autora da dissertação.

Reservatórios são corpos de água doce artificiais gerados a partir do represamento dos rios que acumulam água para diversas finalidades, sendo o abastecimento público umas das mais importantes funções, porém a construção de reservatórios provoca alterações no regime hídrico do rio; mudanças atmosféricas e biológicas, por causa dos impactos ambientais gerados no processo de construção e conclusão dos reservatórios. Porém também há impactos positivos, como a produção de energia e principalmente o abastecimento público (JORCIN, 2005).

Uma das mudanças que ocorrem na construção dos reservatórios é a mudança na velocidade da água, uma vez que o regime do rio (regime lótico) passa para um regime lêntico e, com isso, as partículas em suspensão se depositam mais rapidamente no fundo do reservatório, formando seus sedimentos. Os rios possuem um fluxo de água constante (regime lótico) que se movimenta da nascente até a foz, com a construção de reservatórios esse fluxo é alterado e a água fica retida, ou seja, não há mais um fluxo e a água fica parada, característica de lagos (regime lêntico). Os efeitos dessa mudança são percebidos na análise da qualidade da água, após a construção do reservatório, em geral, muda a capacidade de depuração, principalmente em função das características físicas do ecossistema, ou seja, diminuição da velocidade da água, aumento da retenção de sedimentos e nutrientes e a alteração das características físicas, químicas e biológicas do sistema (JORCIN, 2005; FRANKLIN, 2017; JUNQUEIRA, 2017).

O Reservatório Ponte Nova é o primeiro ponto de represamento do rio Tietê, um dos rios mais importantes do Estado de São Paulo, que é prejudicado pelo aumento de atividades antrópicas, como por exemplo, os despejos de efluentes domésticos e industriais, que podem causar alterações nos aspectos físicos, químicos e biológicos dos ambientes aquáticos. Há anos a CETESB monitora a qualidade dos reservatórios, e um dos principais objetivos é fazer o diagnóstico e avaliar sua conformidade com a legislação ambiental (MORAES, 2011).

Uma das ferramentas utilizadas no monitoramento ambiental é a análise dos perfis de sedimentos. Os sedimentos são camadas de materiais relativamente finos e divididos, que cobrem o fundo dos rios, riachos, lagos, reservatórios, baías, estuários e oceanos. Eles normalmente são constituídos de uma mistura de minerais com frações granulométricas finas, médias e grossas, incluindo argilas, silte, e areia, agregados a materiais orgânicos. Sua composição pode variar entre sedimentos compostos exclusivamente de minerais, ou predominantemente de material orgânico, mas a proporção

de minerais e matéria orgânica varia drasticamente de um local para o outro (SILVA et al., 2011; COUTINHO, 2018).

Segundo GIANNINI E MELO (2009), os sedimentos são constituídos de material orgânico (oriundo da atividade e/ou morte de organismos) e/ou inorgânico (proveniente da degradação de rochas), originado a partir do intemperismo e erosão. O intemperismo é o conjunto de modificações físicas e/ou químicas que as rochas sofrem na superfície da Terra. O intemperismo físico são todos os processos que geram a fragmentação da rocha, como as variações térmicas, que causam a expansão e contração térmica dos materiais rochosos. Já o intemperismo químico ocorre por meio de uma série de reações químicas, sendo a água da chuva seu principal agente. A água infiltra nas rochas gerando reações químicas, como por exemplo, a hidrólise. Por isso, os sedimentos são considerados uma mistura complexa sólida que pode conter argila, sílica, matéria orgânica, óxido metálicos, sulfetos, carbonatos e minerais. Sua composição varia; pode ser totalmente mineral ou com predominância orgânica, dependendo de aspectos naturais e antrópicos do ecossistema aquático estudado.

Localizados no fundo de corpos d'água, os sedimentos são considerados depósitos de uma variedade de detritos biológicos, químicos e poluentes no corpo de água; também podem ser uma fonte poluidora devido a “trocas” realizadas principalmente pela fração orgânica do sedimento com a coluna d'água. Esse processo pode ser tanto biológico: ação de bactérias oxidantes e redutoras; físicos: adsorção (processo de fixação ou retenção de moléculas que são removidas de um líquido e retidas na superfície de sólidos denominados adsorventes) e químicos: oxidação (FAVARO et al., 2007; FONSECA, 2010; GUIMARÃES, 2011; SILVA et al., 2011).

Portanto, para avaliar a qualidade desse tipo de ambiente aquático, é importante avaliar a concentração dos elementos químicos, tanto na coluna d'água como no perfil sedimentar, sendo que as primeiras camadas indicam condições ambientais recentes e as últimas camadas representam o material do início da formação do reservatório (FRANKLIN, 2017).

O estudo de perfis de sedimentos analisa os efeitos de processos naturais e antrópicos em sistemas aquáticos. Vários estudos, como os apresentados por MORAES, 2011; MORTATTI et al., 2012; ROCHA et al., 2015 e FRANKLIN, 2017, utilizaram perfis de sedimentos para descrever a história de diferentes ecossistemas.

No Reservatório Ponte Nova, a maioria dos estudos, como os de MORTATTI et.al (2010) e FAVARO et.al. (2014) só analisaram as primeiras camadas do sedimento,

porém trabalhos como os de MORAES (2011) e FRANKLIN (2017), analisaram perfis verticais no reservatório Ponte Nova e não identificaram poluição. Como o reservatório Ponte Nova é o primeiro ponto de represamento do rio Tietê e é usado para abastecimento público, este trabalho propõe avaliar a situação atual do reservatório Ponte Nova em relação à concentração e distribuição de metais, tanto na coluna d'água como no perfil sedimentar.

Esse projeto é uma parceria do Laboratório de Ativação Neutrônica do Centro do Reator de Pesquisas (LAN, CERPq) do IPEN – CNEN/SP com a CETESB, nas pessoas do Dr. Gilson Quinágua e Dr. Robson L. Franklin.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste estudo é avaliar a situação do reservatório Ponte Nova em relação à contaminação por metais e verificar se os sedimentos do reservatório contêm um registro histórico da atividade antrópica.

2.2 Objetivos Específicos

a) Aplicar a técnica de Análise por Ativação com Nêutrons Instrumental (INAA), para a quantificação de elementos maiores (Ca, Fe, K e Na) e elementos traço (As, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Hf, La, Lu, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Sm, Ta, Tb, Th, U, Yb, Zn) nos perfis de sedimentos;

b) Utilizar a técnica de Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES) para a determinação de Cd, Cu, Mn, Ni, P e Pb;

c) Utilizar a técnica de Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP MS), para análise de água;

d) Realizar uma interpretação geoquímica dos sedimentos do reservatório Ponte Nova, utilizando técnicas estatísticas multivariadas e índices de poluição, como Fator de Enriquecimento (FE), Índice de Geoacumulação (IGeo), assim como valores orientadores, TEL (Nível de Efeito Limiar) e PEL (Nível de Efeito Provável), como ferramentas para avaliar a poluição metálica desse reservatório.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Reservatório Ponte Nova

O reservatório de Ponte Nova, faz parte do Sistema Produtor Alto Tietê (SPAT) onde quatro represas são interligadas por túneis à estação de tratamento de água de Taiaçupeba. Esse reservatório foi concluído em 1971 e localiza-se na cidade de Salesópolis (Figura 2), é o primeiro ponto de represamento do rio Tietê, sendo este rio e o rio Claro seus principais contribuintes. Foi construído com o objetivo de controlar o fluxo do rio na RMSP, reforçando o controle de inundações, mas atualmente é utilizado somente para abastecimento público de água. Possui altitude máxima de 770 m, com área de 28 km² e bacia de drenagem de 320 km², volume útil de 289,9148 x 10⁶ m³, com vazão média de 8,5 m³ s⁻¹. Como, atualmente, é utilizado para abastecimento público, a SABESP varia a retirada de água conforme as necessidades da população. Um exemplo foi durante a crise hídrica de 2014 a 2015, quando a Sabesp obteve autorização do DAEE para captar mais 39,46 bilhões de litros de água da represa Ponte Nova (FRANKLIN,2017; DAEE 2019). Salesópolis possui aproximadamente 15 mil habitantes, e as atividades econômicas mais importantes em seu entorno são horti-fruti-granjeiras, que compreendem 60% do local. O clima na região é com verões chuvosos e invernos secos (na classificação de Koppen tipo Cwb) e temperatura média de 17,50°C. A precipitação média anual é de aproximadamente 1400 mm, com chuvas mais intensas nos meses de novembro a março. A área de estudo encontra-se na Área de Proteção Ambiental da Várzea do rio Tietê, a vegetação da região abrange cerca de 1,3% de Mata Atlântica natural com relevo acidentado. Apresenta uma formação geológica com maioria de rochas granitóides, mas perto da área do reservatório são encontradas proporções menores do tipo granito de cálcio e álcali; em relação aos solos, são predominantes os tipos argissolos, cambissolos e organossolos (MONTEIRO, 2007; LOPES, 2010; ROCHA et al., 2015; FRANKLIN,2017; DAEE, 2018).

Figura 2 – Reservatório Ponte Nova.

Fonte: autora da dissertação.

3.1.1 Trabalhos desenvolvidos na região do Reservatório Ponte Nova

Por sua importância econômica e ambiental, há muitos estudos realizados na região da Bacia do rio Tietê.

O trabalho do Dr. Adalberto Monteiro, em 2006, sobre a caracterização limnológica do reservatório Ponte Nova, foi fundamental para uma maior compreensão das características físicas e químicas do ambiente estudado. O trabalho foi realizado durante 12 meses, com coletas mensais de amostras de água e parâmetros físicos e químicos, como temperatura e pH. Com isso, foi possível observar que o reservatório Ponte Nova sofre estratificação térmica, o que pode influir no comportamento dos metais na água-sedimento. A estratificação térmica é um fenômeno no qual ocorrem variações de temperaturas ao longo do dia e do ano na coluna d'água; essa mudança é comum em reservatórios de climas tropicais (MONTEIRO, 2007).

NASCIMENTO E MOZETO (2008) propuseram concentrações de referência regionais de metais e metalóides em sedimentos do fundo da bacia do rio Tietê, pois a aplicação do GGRL (níveis de referência geológica global) nos cálculos de índices de

poluição como o Fator de Enriquecimento (FE) e Índice de Geoacumulação (IGeo) não considera as características geoquímicas do local, ou seja, há o risco de os resultados indicarem contaminação, sendo que as concentrações encontradas podem ser naturais para aquele local de estudo. E isso foi confirmado nos resultados obtidos no projeto para alguns elementos, que mostraram ser muito diferentes dos valores de referência global.

ALEGRE et al. (2009) tiveram como objetivo principal avaliar a toxicidade dos sedimentos do rio Tietê entre os municípios de Salesópolis e Suzano, utilizando ensaios ecotoxicológicos e, também, quantificando as concentrações de metais em amostras de sedimentos de cinco pontos no Rio Tietê, em quatro campanhas amostrais, de Salesópolis a Suzano, incluindo um ponto no reservatório de Ponte Nova, mostrando taxas mais altas de poluição por metais em Mogi das Cruzes e Suzano.

MORTATTI et al. (2010) estudaram a distribuição dos metais Cr, Cu, Ni, Zn e Pb na bacia do rio Tietê, da nascente do rio até o reservatório de Barra Bonita. Foram coletadas amostras de sedimentos da superfície de 0-5 cm. Os pontos de amostragem foram T0 (Salesópolis) a T7 (barragem de Barra Bonita). Os resultados obtidos apontaram que a extração sequencial seletiva dos metais presentes nos sedimentos de fundo mostrou que a maioria dos metais estudados se encontra na fração residual dos sedimentos, com exceção do Cu (fração biodisponível).

FÁVARO et al. (2014) há anos vêm estudando a bacia do rio Tietê em relação às contaminações antrópicas. Em 2014, estudaram a distribuição de elementos principais e traços em amostras de sedimentos em vários pontos do rio Tietê, de Salesópolis a Suzano em três campanhas. Os resultados obtidos, principalmente de Fator de Enriquecimento (FE) apontaram valores de FE superior a 1,5. Portanto, há contribuições antrópicas ao longo do Rio Tietê de P0 (nascentes) a P4 (Suzano), mas os maiores valores foram obtidos em P2 (Biritiba-Mirim).

A maioria dos trabalhos realizados no reservatório de Ponte Nova utilizou as primeiras camadas do sedimento para avaliar as concentrações de metais majoritários, traços e terras raras, porém um estudo realizado com o perfil do sedimento consegue detalhar melhor o histórico de contaminação.

3.2 Perfis sedimentares

Conforme CETESB (2019), os perfis sedimentares, também chamados de testemunhos ou perfis verticais são uma excelente ferramenta de gestão que permite a comparação das concentrações dos elementos nos sedimentos superficiais (formado pela

primeira camada do perfil) que estão em contato direto com a coluna d'água, considerada a sedimentação mais recente com as concentrações dos elementos nos sedimentos mais antigos (últimas camadas dos perfis sedimentares), chegando até à época de formação do reservatório (CETESB,2019).

Os sedimentos de reservatórios propiciam um registro histórico dos processos que ocorreram pré e pós-barramento, pois os sedimentos são mais preservados, e podem ser inclusive datados, ou seja, podem mostrar a idade e a taxa deposicional (FRANKLIN, 2017). Esse registro auxilia na compreensão dos processos que ocorreram e ocorrem no reservatório, tais como alterações significativas de textura (mudanças na granulometria) e comportamento dos elementos químicos ao longo do perfil, pois o sedimento é o destino de metais e semi-metais em ambientes aquáticos (RIBEIRO,2006; FRANKLIN, 2017).

Além disso, com a datação e/ou análise granulométrica, os perfis sedimentares podem auxiliar na compreensão das alterações geradas antes do represamento do rio, ou seja, quando havia um ambiente lótico e após mudança para um ambiente lêntico. E, principalmente, a estimar a taxa de sedimentação média em reservatórios (FRANKLIN, 2017).

A taxa de sedimentação refere-se à quantidade de material (orgânico e mineral) depositado pela ação da água em um determinado intervalo de tempo, ou seja, a sedimentação é medida em termos de acumulação vertical ao longo do tempo. Os metais podem ser transportados para o sistema aquático pelo fluxo da atmosfera ou pelo depósito no rio. No sistema aquático, os metais são transferidos para os sedimentos por adsorção sobre a matéria em suspensão e posterior sedimentação (FERREIRA, 2012).

O estudo de perfis verticais propicia uma melhor forma de distinção entre as concentrações geogênicas e as antrópicas. Por isso, vários estudos utilizaram perfis de sedimentos para descrever a história de diferentes contaminações ambientais. A CETESB, desde 2014, realiza a coleta de perfis sedimentares em reservatórios, com o objetivo de avaliar a distribuição dos elementos em profundidade e com potenciais contribuições antrópicas (CETESB,2019).

3.2.1 Trabalhos utilizando perfil de sedimentos no reservatório Ponte Nova

MORAES, 2011, coletou 4 perfis de sedimento em quatro estações de amostragem ao longo da Bacia do Alto Tietê: P1- Ponte Nova; P2- Biritiba Mirim; P3- Mogi das Cruzes; P4- Pirapora. No ponto P1, foi coletado um perfil de sedimento de 30 cm, sendo cortado a cada 1 cm. As concentrações dos elementos Al, Ca, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sc, Si, Sr e Zn foram medidas utilizando Espectrômetro de Emissão Ótica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP OES) e obtiveram-se valores médios que ultrapassaram os valores-guia de qualidade de sedimentos, reportados por TEL (Nível de Efeito Limiar, não ocorre efeito à comunidade biológica) e PEL (Nível de Efeito Provável, ocorrência de efeitos à biota) para os elementos Co, Cr, Cd, Ni e Pb, sendo que o Ni ultrapassou só o TEL (CCME,2012). Para o cálculo do Fator de Enriquecimento (FE) e Índice de Geoacumulação (IGeo), foram utilizados valores regionais, concentração da última camada do sedimento e valores de referência da crosta terrestre. Avaliando-se os resultados tanto do FE e IGeo, foi verificado que os valores da última camada do sedimento ou os valores regionais são mais adequados do que os globais, pois, utilizando-se os valores globais, tanto o FE como o IGeo se mostraram superestimados. Portanto, o FE (última camada) para Ponte Nova indicou enriquecimento moderado para Zn e Pb; enriquecimento significativo para Cu, e valores inferiores a 2 (não enriquecido) para os outros elementos. Já o IGeo apontou somente o Cu como moderado (MORAES, 2011).

ROCHA et al. (2015) estudaram a concentração de elementos metálicos, majoritários e traço em amostras de superfície e testemunhos sedimentares, em diversos pontos, desde suas cabeceiras em Salesópolis até o final, o rio Paraná. No reservatório Ponte Nova, analisaram um perfil de sedimento (30 cm), fatiado a cada 2,5 cm (12 amostras). A análise por Ativação com Nêutrons foi aplicada às amostras para determinar elementos majoritários, traços e terras raras. Do ponto de vista toxicológico, a quantificação dos metais Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Zn e do semi-metal As em sedimentos são de grande interesse e apresentam valores orientados para os limites legais. No entanto, o projeto abordou apenas os elementos que podem ser determinados pelo INAA como As, Cr e Zn. Para avaliar a contaminação do reservatório utilizaram os valores guias TEL e PEL e índices de poluição como FE e IGeo. As e Cr superaram o valor de TEL e Zn ficou abaixo de TEL, mas nenhum elemento ultrapassou os valores de PEL. Os Fatores de Enriquecimento (FE) foram calculados utilizando valores da última camada do perfil e do NASC (North American Shale Composite). Os resultados obtidos utilizando os valores da última camada se mostraram mais coerentes e todos os elementos ficaram abaixo de 2, confirmando novamente o que foi

observado por MORAES, 2011. Quanto ao IGeo, a maioria dos elementos mostrou IGeo < 0 , com exceção de Br nas duas primeiras camadas, mas como só dois valores ficaram na faixa 1-2 (moderado), os autores consideraram que não há contribuição antrópica para esses elementos.

FRANKLIN, 2017, teve como principal objetivo compreender os processos sedimentares e hidroquímicos em reservatórios tropicais, associados aos regimes hídricos de suas bacias hidrográficas, com identificação de fontes de elementos químicos, sendo um dos reservatórios o de Ponte Nova. A técnica de Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP MS) foi utilizada para avaliar as concentrações de elementos terras raras em sedimento, mas também foram analisadas amostras de água da coluna d'água e água intersticial. O projeto reafirmou a importância do uso de perfil de sedimentos para entender o histórico do reservatório e o comportamento dos elementos químicos analisados nesse local.

3.3 Metais

Segundo RIBEIRO (2006), os metais presentes nos sedimentos sofrem uma partição entre a água e as partículas suspensas, sendo que parte desta carga é metabolizada pela biota e parte terá como destino os sedimentos. A maior fração de metais é imobilizada nos sedimentos sob formas não biodisponíveis, mas existe liberação de metais dos sedimentos para os corpos d'água, podendo haver um enriquecimento destes elementos nestes sistemas, ou seja, os elementos tornam-se biodisponíveis, capazes de serem incorporados por organismos (RIBEIRO, 2006).

Os metais presentes no sedimento, tanto os de origem natural como de fontes antrópicas, podem estar associados com várias fases do sedimento. NASCIMENTO (2003), no estudo sobre a proposição de valores de referência para concentração de metais e metalóides em sedimentos límnicos e fluviais da bacia hidrográfica do Rio Tietê, SP, considerou que os metais podem estar associados a seis fases do sedimento sendo elas:

1. Adsorvidos nas partículas de superfície (argilas);
2. Ligados a carbonatos;
3. Ocluídos nos óxi-hidróxidos de ferro e/ou manganês
4. Ligados a matéria orgânica;
5. Ligados a sulfetos;
6. Ligados a matriz formada de silicatos.

As principais fontes antrópicas vêm, por exemplo da agricultura (uso de fertilizantes, pesticidas) e efluentes domésticos e industriais. Há cerca de 20 elementos considerados tóxicos, entretanto os mais estudados são: As, Cd, Cr, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn (SILVA, 2017; FRANKLIN, 2017; COUTINHO, 2018).

3.3.1 Arsênio (As)

Arsênio é um elemento natural da crosta terrestre e é amplamente distribuído por todo o ambiente. É altamente tóxico em sua forma inorgânica. As pessoas são expostas a níveis elevados de arsênio inorgânico através da água contaminada. A exposição a longo prazo pode levar à intoxicação crônica por arsênio, sendo lesões cutâneas e câncer de pele os efeitos mais característicos (COUTINHO, 2018).

A contaminação por arsênio das águas subterrâneas é generalizada e há várias regiões onde a contaminação por arsênio de água potável é significativa. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), pelo menos 140 milhões de pessoas em 50 países têm bebido água contendo arsênio a níveis acima do valor de diretriz provisória da OMS de 10 µg/L (WHO, 2001).

3.3.2 Cádmio (Cd)

O cádmio é o metal menos abundante na crosta terrestre. Só ocorre na forma de Cd^{2+} , e seus compostos são mais solúveis que os de mercúrio e chumbo. Na indústria é utilizado para a manufatura de baterias, ligas e pigmentos plásticos. Normalmente, em águas não poluídas, a concentração de cádmio é inferior a 1 µg/L, e, na água potável, as concentrações são entre 0,01 e 1 µg/L. Entretanto, devido à presença de cádmio como impureza em tubulações galvanizadas, soldas e nos acessórios metálicos, pode ocorrer contaminação de Cd na água, sendo sua forma solúvel a mais tóxica, podendo gerar efeitos carcinogênicos. A principal via de exposição é a oral, pois é um metal que se acumula em organismos aquáticos, possibilitando sua entrada na cadeia alimentar (BAIRD et al., 2011; SILVA, 2012; SILVA, 2017; COUTINHO, 2018).

3.3.3 Chumbo (Pb)

O chumbo é um elemento encontrado naturalmente no meio ambiente, principalmente na galena (PbS). Ocorre na forma de Pb^{+2} (inorgânico) e Pb^{+4} (orgânico), sendo a última a mais tóxica e volátil. A mineração deste metal e o descarte incorreto de materiais contendo chumbo são os principais meios de disponibilização do Pb para os seres

humanos. Como o chumbo é nocivo para os seres humanos, a ingestão de alimentos e bebidas contaminadas pode levar a uma doença conhecida como saturnismo (acumulação de chumbo no organismo, na maioria das vezes o Pb se acumula nos ossos). O Pb é muito utilizado na indústria principalmente na produção de baterias, sendo o descarte incorreto o responsável pela intoxicação e possível morte de aves aquáticas. Na água, o chumbo ocorre por deposição atmosférica ou lixiviação do solo, proveniente de fontes naturais ou fontes antrópicas. A dispersão pode ocorrer por ação do vento que deposita o Pb no solo e depois pode contaminar os ambientes aquáticos. Em ambientes contaminados, a maior parte do chumbo encontra-se em sedimentos, pois tem grande afinidade com a matéria orgânica (BAIRD et al, 2011; SILVA, 2012; SILVA, 2017; COUTINHO, 2018; NORRY, 2018).

3.3.4Cromo (Cr)

A maioria das águas superficiais contém entre 1 e 10 µg/L de cromo. É muito utilizado principalmente para produção de ligas metálicas. Possui dois estados de oxidação, Cr^{3+} e Cr^{6+} , sendo o Cr^{6+} (cromo hexavalente) carcinogênico (SILVA, 2012; SILVA, 2017; COUTINHO, 2018).

3.3.5Manganês (Mn)

O manganês é um metal que pode ser encontrado facilmente em diversas rochas. É muito usado na área industrial e agrícola, sendo que na agricultura é usado como fertilizante e suplemento, na forma de sulfato de manganês. Esse metal atinge principalmente o sistema nervoso e os pulmões (SILVA, 2012; SILVA, 2017; COUTINHO, 2018).

3.3.6Mercúrio (Hg)

O mercúrio bioacumula e biomagnifica na biota aquática e tem afinidade por matéria orgânica. Existe em água nas formas iônica, metálica e orgânica, sendo as formas orgânicas as mais tóxicas e muito mais solúveis. A principal via de exposição humana ao mercúrio é por ingestão de alimentos (BAIRD et al., 2011; SILVA, 2012; SILVA, 2017; COUTINHO, 2018).

3.3.7Níquel (Ni)

O níquel é um metal comum no ambiente, muito utilizado na indústria e altamente tóxico para a biota aquática. Apresenta baixa solubilidade em água, sendo depositado nos sedimentos, fixado na argila ou agregado à biota. A principal via de

exposição é o consumo de alimentos, sendo que doses elevadas de Ni podem causar câncer (BAIRD et al., 201; SILVA, 2012; SILVA, 2017; COUTINHO, 2018).

3.3.8 Zinco (Zn)

O zinco é considerado um elemento essencial e seu efeito tóxico é raro em humanos, pois não se acumula no organismo e não apresenta alta toxicidade para a biota aquática, possuindo baixa solubilidade. É usado na área médica para curar feridas e queimaduras, também é usado na indústria para prevenir corrosão de peças de ferro. O Zn é encontrado em ambientes aquáticos principalmente pelo lançamento de compostos de atividades antropogênicas como mineração; produção de aço e queima de lixo (SILVA, 2012; SILVA, 2017; COUTINHO, 2018).

3.3.9 Terras raras

Além dos metais citados acima, outra categoria de elementos que têm despertado um aumento de interesse, são os elementos de terras raras (REEs). No entanto, a expressão “terras raras” não é uma denominação apropriada para designar os elementos desse grupo. Nos lantanídeos, a maioria dos elementos é abundante (excluindo o promécio (Pm), que não ocorre naturalmente).

Atualmente, as aplicações deste grupo de elementos têm crescido no mundo e seu uso já é encontrado em várias áreas, como: hospitalar com testes de laboratório; doping de liga metálica para reforço de propriedades para usos agrícolas; catalisadores no tratamento de emissões automotivas; no craqueamento de petróleo etc.

Devido ao aumento do uso desse grupo e como existem poucos artigos na literatura relacionados ao seu comportamento nos perfis sedimentares esse projeto vai avaliar a concentração de alguns elementos terras raras como o Ce, Eu, La, Lu, Nd, Sc, Sm, Tb e Yb (FRANKLIN, 2016; SILVA, 2017).

3.4 Determinação de metais em sedimento e água

Para a determinação de elementos maiores, traços e terras raras em sedimento o presente trabalho utilizou as técnicas Análise por Ativação Neutrônica (NAA); Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES) e Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP MS) para a determinação dos elementos em água.

3.4.1 Análise por Ativação Neutrônica Instrumental (INAA)

A necessidade de métodos analíticos sensíveis e exatos para a determinação de elementos traço¹, torna-se muito importante, quando se deseja analisar sedimentos. A Análise por Ativação com Nêutrons Instrumental (da sigla em inglês INAA) é uma técnica analítica reconhecida por sua alta sensibilidade, ou seja, possibilidade de determinação de elementos na ordem de ppb, precisão e exatidão. A INAA possui, também, a possibilidade de determinação multielementar, e se destaca pelo fato de que aproximadamente 70% dos elementos da tabela periódica podem ser analisados por essa técnica. Em virtude das características mencionadas acima, e por independer do estado químico dos elementos, essa técnica vem sendo amplamente utilizada em estudos de composição elementar de diferentes tipos de matrizes, certificação de materiais de referência e também em estudos de sedimentos (LANGE, 2018; NORRY, 2018; RIBEIRO JUNIOR, 2019).

A identificação de um elemento por INAA é realizada pela medição da radiação gama induzida em uma amostra após a irradiação com nêutrons, ou seja, uma amostra é bombardeada com nêutrons, formando um núcleo composto excitado, que perde energias por um processo de desintegração rápido (da ordem de 10^{-16} a 10^{-14} s), emitindo os chamados raios gama prontos (γ_p), e formando um novo radionuclídeo que sofre contínuos processos de decaimento até atingir um novo núcleo estável. Nesta etapa, são emitidos os raios gama (γ_d) e partículas β^- (Figura 3). A energia desses raios gamas (γ_d) e o tempo de meia vida ($T_{1/2}$) são característicos de cada elemento. Quando uma amostra é irradiada em um fluxo de nêutrons, a atividade induzida pode ser expressa pela equação geral da INAA (Equação 1) (IAEA, 2001; COUTINHO, 2018).

¹ termo que se refere a elementos ou substâncias que ocorrem em concentrações da ordem de partes por milhão ou parte por bilhão

Figura 3 – Representação esquemática da interação do nêutron com um núcleo alvo.

Fonte: Modificado de RIBEIRO JUNIOR, 2019

$$A = \frac{Z \cdot \phi \cdot \sigma \cdot N \cdot m \cdot f \cdot \left(1 - e^{-\frac{-\ln 2 t_{irrad.}}{t_{1/2}}}\right)}{M} \quad (1)$$

sendo:

A = atividade induzida;

Z = coeficiente de detecção;

ϕ = fluxo de nêutrons;

σ = seção de choque para nêutrons;

N = número de 3 Avogadro;

m = massa do elemento;

f = abundância isotópica;

$t_{1/2}$ = meia-vida do isótopo;

M = massa atômica do elemento.

Como cada nuclídeo possui características específicas de energia emitida, é possível determinar os nuclídeos presentes na amostra por espectrometria de raios gama, utilizando detectores, sendo os mais usados detectores semicondutores de alta resolução de germânio hiperpuro. Analisadores de altura de pulso coletam os impulsos gerados na interação cristal de Ge com a radiação na forma de espectro de energia, esses espectros são interpretados por programas de computação que determinam as energias emitidas localizando os picos de raios gama, mas para isso é necessário calibrações prévias que auxiliam no cálculo das áreas (IAEA, 2001).

Na Análise por Ativação com Nêutrons comparativa, a amostra é irradiada juntamente com um material de referência certificado, que contém uma composição similar ao da amostra e concentrações conhecidas. Após a irradiação, a amostra e o padrão são medidos no detector semicondutor de alta resolução de germânio hiperpuro. A concentração dos elementos nas amostras (Equação 2) é obtida pela comparação da área de picos do padrão com a da amostra (IAEA, 2001).

$$C_a = \frac{(A_a m_p C_p) e^{\lambda(t_a - t_p)}}{A_p m_a} \quad (2)$$

sendo:

C_a = concentração do elemento de interesse na amostra;

C_p = concentração do elemento de interesse no padrão;

A_a = atividade do elemento na amostra;

A_p = atividade do elemento no padrão;

m_a = massa da amostra;

m_p = massa do padrão;

λ = constante de decaimento do radioisótopo formado;

t_a = tempo de decaimento da amostra;

t_p = tempo de decaimento do padrão.

Como o método é essencialmente comparativo, a INAA apresenta uma substancial liberdade de erros sistemáticos e elimina problemas relacionados ao branco analítico, pois uma vez irradiada, a amostra pode ser submetida a processamento químico sem perigo de contaminação (IAEA, 2001).

3.4.2 Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES)

A técnica de Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES) é amplamente utilizada para análises ambientais, por ser uma técnica analítica sensível, rápida e multielementar, o que permite a determinação simultânea dos metais maiores e traços. Devido à alta temperatura alcançada pela técnica e por proporcionar um ambiente mais inerte, o ICP OES minimiza as interferências de matriz, e caso elas ocorram, a técnica possui uma capacidade de corrigi-las (HOU & JONES, 2008).

Para a realização dessa técnica, os átomos dos elementos de interesse, que estão na solução a ser analisada, recebem uma descarga de radiofrequência, fazendo com que os átomos e íons sejam excitados e emitam fótons espontaneamente. Portanto, o primeiro passo dessa técnica, caso a amostra seja sólida, como as amostras de sedimento utilizadas por esse estudo, é preciso torná-la uma solução, nesse caso por meio de uma digestão ácida, descrita no item 4.3.1. Essa solução é injetada no equipamento e convertida em um aerossol, o qual, então, é direcionado para o canal central do plasma (a tocha do ICP OES possui 3 tubos de gás concêntricos: interno, intermediário e externo). Devido ao fluxo externo de argônio, a temperatura do plasma se mantém em aproximadamente 10.000 K.

Em virtude da alta temperatura, os elementos presentes na solução da amostra, que foi convertida em aerossol, são liberados como átomos livres no estado gasoso. Os átomos, ao se colidirem no interior do plasma, transmitem uma energia adicional promovendo, assim, um estado excitado. Normalmente, essa energia gerada, também é capaz de transformar os átomos em íons e, em seguida, esses íons em íons excitados. Ambos, átomos e íons excitados, podem voltar ao estado fundamental mediante a emissão de um fóton. Os átomos e íons excitados liberam fótons com energias características, que são determinadas pela estrutura do nível de energia quantizada, isto significa que cada comprimento de onda produzido pelo fóton pode ser utilizado para determinar qual foi o elemento que deu origem. Dessa forma, por meio do ICP OES a concentração de um elemento pode ser determinada, dado que a concentração do elemento na amostra em solução é proporcional ao número de fótons liberados dos átomos e íons que foram excitados (HOU & JONES, 2008).

3.4.3 Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP MS)

A Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado é uma técnica analítica com alta sensibilidade, multielementar, com baixos limites de detecção para a maioria dos elementos, além de realizar análises qualitativas e quantitativas de compostos simples até moléculas muito complexas.

O plasma de argônio indutivamente acoplado possui temperaturas de até 10000 K e essa elevada energia térmica é suficiente para causar a excitação e ionização da maioria dos elementos químicos. Por isso, o plasma de argônio, é utilizado como fonte para a ionização e excitação dos elementos contidos na amostra. Devido da pressão utilizada no processo de introdução da amostra, o espectrômetro de massas encontra-se em um ambiente de vácuo, para evitar possíveis interferências. Após a introdução da amostra há a formação de íons que são separados conforme a razão massa/carga ao passarem por um analisador de massa. Em seguida, os íons com razão massa/carga específica, isto é, aquela correspondente aos elementos a analisar, são conduzidos ao detector, em geral, por um multiplicador de elétrons para determinar o número de íons presentes e posteriormente armazenar as informações no software utilizado pelo equipamento (FALQUETO, 2008; PITRAT, 2010; SILVA, 2012; FRANKLIN, 2017; COUTINHO, 2018).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas de preparação de amostras e determinação da concentração de elementos em águas foram realizadas na sede da CETESB em São Paulo, especificamente no laboratório de Química Inorgânica. A caracterização multielementar nas amostras de sedimentos utilizando a técnica de Análise por Ativação Neutrônica (AAN) foi realizada no Laboratório de Ativação Neutrônica (LAN), localizado no Centro do Reator de Pesquisas (CERPq) do IPEN-CNEN/SP (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).

4.1 Amostragem

A amostragem foi realizada em três pontos ao longo do reservatório, sendo coletados quatro perfis de sedimentos verticais (Tabela 1) em duas coletas, com o apoio do Setor de Amostragem em Ambientes Aquáticos da CETESB, utilizando um barco equipado com o ecobatímetro, cuja função é localizar o leito original dos rios. A localização dos pontos de amostragem é apresentada na (Figura 4). O ponto P1 foi escolhido para análise sazonal sendo uma coleta no inverno (Agosto/2018) e outra no verão (Fevereiro/2019). Já o P2 e P3 foram escolhidos para a caracterização geral do reservatório, sendo coletados só em Fevereiro/2019. Todos os pontos foram georreferenciados por meio de um GPS.

Tabela 1 - Descrição e localização dos pontos de coleta

Pontos	Descrição do local	Localização Geográfica (GPS)	Profundidade (cm)	Quantidade de amostras
P1 Agosto/2018	Margem	S 23 34'304" W 45 57'239"	32,5	13 cortes
P1 Fevereiro/2019	Perto da Barragem	S 23 34'304" W 45 57'239"	42,5	17 cortes
P2	leito original do rio Tietê	S 23 33' 598" W 45 53' 554"	47,5	19 cortes
P3	leito original do rio Claro	S 23 35'057" W 45 56'256"	57,5	23 cortes

Fonte: autora da dissertação.

Figura 4 – Pontos de Amostragem Reservatório Ponte Nova.

Fonte: autora da dissertação.

4.2 Coleta de amostras

As coletas de amostras foram feitas pela equipe do Setor de Amostragem em Ambientes Aquáticos da CETESB. Os procedimentos de coleta descritos a seguir foram realizados de acordo com o Guia Nacional de Coleta.

4.2.1 Coleta de Água

Os parâmetros físicos e químicos foram determinados *in situ* nas amostras de água, sendo eles: oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, pH e temperatura. Todos estes parâmetros foram obtidos com sonda multiparâmetros com sensores calibrados antes da coleta. Os procedimentos de coletas foram realizados de acordo com o Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos (CETESB, 2011).

As amostras da coluna d'água foram coletadas com o uso de garrafas de Van Dorn de descida horizontal e transferidas para tubos de polipropileno de 15 mL previamente lavados em laboratório com ácido nítrico ultrapuro 5% e enxaguados com água da própria represa instantes antes das coletas. Foram coletadas 2 amostras de água (coluna d'água), uma amostra foi filtrada ainda em campo em membrana de acetato de celulose com 0,20 µm de porosidade, e esta fração foi considerada a “fração dissolvida”. A outra amostra foi coletada e mantida sem filtração prévia para fins de análise da “fração total” dos elementos na coluna de água, que inclui os materiais particulados. No dia da coleta de água não houve chuva durante 24 horas.

4.2.2 Coleta de Sedimentos

Os perfis de sedimentos foram coletados com um amostrador tipo *core sampler* com tubos de acrílico de 5 cm de diâmetro e com profundidade de até 60 cm, como mostra a (Figura 5), depois foram cortados a cada 2,5 cm *in situ*, totalizando 13 amostras de sedimentos no ponto P1 agosto/2018; 17 amostras no ponto 1 fevereiro/2019; 19 amostras no ponto 2 fevereiro/2019 e 23 amostras no ponto 3 fevereiro/2019.

Figura 5 – Coleta do perfil sedimentar.

Fonte: autora da dissertação

4.3 Preparo de amostras

4.3.1 Preparo e digestão das amostras analisadas por ICP OES

A análise de Cd, Cu, Mn, Ni, P e Pb em sedimentos foi realizada no Laboratório de Química Inorgânica da CETESB por ICP OES, modelo ICAP 6300 DUO da Thermo Scientific. Os materiais de referência certificados (MRC) utilizados para ICP OES foram Sandy Clay Soil (CRM 049) do Sigma-Aldrich e Buffalo River Sediment (RM8704) do NIST.

As amostras da 1ª e 2ª campanha passaram pelo processo de secagem a 40°C em estufa e em seguida foram maceradas em almofariz de ágata para homogeneização da amostra. Foram pesados aproximadamente 0,5 g das amostras e dos MRC em seguida transferidos para tubos de teflon, no qual foram adicionados 10 mL de ácido nítrico HNO_3 (65%). As amostras e os materiais de referência foram digeridos de acordo com o método EPA 3051A por microondas modelo MARS 6 da empresa CEM (Figura 6). O método EPA 3051A utilizado por esse estudo é uma digestão parcial, pois nesse método somente é utilizado o HNO_3 , a concentração da amostra pode não refletir a concentração total na

amostra. Após o resfriamento, as amostras foram transferidas por filtração para balões volumétricos de 50 mL, nos quais o volume foi completado com água ultrapura.

4.3.2 Preparo das amostras analisadas por ICP MS

A análise de Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Hf, Hg, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sc, Se, Sr, Ti, U, V e Zn em água foi realizada no Laboratório de Química Inorgânica da CETESB por ICP-MS, modelo X series 2 da Thermo Scientific.

Para o controle analítico dos dados foram utilizados os MRCs River Water Certified Reference Material for Trace Metals and other Constituents (SLRS-6) do NIST; Trace elements in natural water (SRM 1640) do NIST e Low level fortified sample for trace elements – Lake Ontario (TM 28) do Nacional Research Council Canada.

Figura 6 – Microondas utilizado no pré-preparo Modelo MARS 6.

Fonte: autora da dissertação

4.3.3 Preparo das amostras e análise por INAA

As amostras de sedimentos foram secas a 40°C em estufa, trituradas em um almofariz de ágata e homogeneizadas antes da análise. Em seguida, 100 mg das amostras de sedimentos e 100 mg dos materiais de referência basalto BE-N e granito GSN (GIT-IWG) foram precisamente pesados e selados em sacos de polietileno duplo pré-limpos, para irradiação. Amostras e materiais de referência foram irradiados por 8 horas, em um fluxo de nêutrons térmicos de $3 \text{ a } 5 \times 10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ no reator de pesquisa nuclear IEA-R1, localizado no CERPq do IPEN-CNEN/SP. As medidas da atividade induzida foram realizadas utilizando-se um detector de Ge hiperpuro GM20190, com resolução (FWHM) do sistema de 1,90 keV para o pico de raios gama de 1332 keV do ^{60}Co . Duas séries de contagem foram realizadas após a irradiação; a primeira após 7 dias da irradiação e a segunda após 15 dias de decaimento. Os espectros de raios gama foram processados no programa Vispect, que calcula as energias e as áreas dos picos dos espectros gerados. A incerteza dos resultados foi propagada a partir da incerteza dos parâmetros envolvidos nos cálculos: estatísticas de contagem; massas das amostras; materiais de referência e incerteza dos valores certificados dos materiais de referência.

4.4 Controle de Qualidade Zeta Score

Para a validação dos resultados obtidos em oito replicatas por INAA, foi utilizado o Material de Referência (MR) Soil-7 (IAEA), por conter valores certificados dos elementos analisados e suas incertezas. O MR TM28 foi utilizado por conter a concentração e incerteza da maioria dos elementos analisados por ICP-MS.

O teste zeta score foi aplicado utilizando a Equação 3. Se o zeta score for ≤ 2 , o resultado individual da amostra de controle (material de referência) estará no intervalo de confiança de 95% do valor-alvo.

$$Zeta\ Score = \frac{C_i - C_{ref}}{\sqrt{(\sigma_i^2 + \sigma_{ref}^2)}} \quad (3)$$

sendo:

C_i = concentração do elemento i na análise do material de referência;

C_{ref} = valor certificado de concentração para o elemento i;

σ_i = incerteza da concentração do elemento i na análise do material de referência;

σ_{ref} = incerteza do valor certificado para o elemento i.

Figura 7 – Gráfico do Controle de Qualidade dos elementos analisados no material de referência SOIL-7.

Figura 8 – Gráfico do Controle de Qualidade dos elementos analisados no material de referência TM28.

Para o material de referência Soil-7 (Figura 7) analisado no presente estudo, todos os resultados estavam abaixo de 2. Já o material de referência TM 28 somente Ti apresentou valor (-2,3) (Figura 8). Estatisticamente, é aceito que o zeta score possa variar entre $-3 < \text{zeta score} < +3$, portanto o elemento Ti pode ser utilizado.

4.5 Valores Guia TEL e PEL

Além do estudo do teor dos elementos de interesse nos perfis dos sedimentos, foram utilizados parâmetros ambientais para a avaliação da qualidade dos sedimentos. A CETESB adotou os valores-guia TEL (Nível de Efeito Limiar) e PEL (Nível de Efeito Provável), estabelecidos pelo Conselho Canadense do Ministério do Meio Ambiente CCME para a concentração total de arsênio, cádmio, cromo, cobre, níquel, chumbo e zinco (Tabela 2), a fim de avaliar possíveis efeitos à biota. TEL indica a concentração abaixo da qual há uma ocorrência rara de efeitos na biota e PEL indica a concentração acima da qual há ocorrência frequente de efeitos adversos na biota (CCME,2012).

Tabela 2 - Valores de TEL e PEL.

Elementos	TEL	PEL
As	5,9	17
Cd	0.6	3,5
Cr	37,3	90
Cu	35,7	197
Ni	18	35,9
Pb	35	91.3
Zn	123	315

Fonte: Modificado de CCME,2012

No Brasil ainda não há valores de referência para a concentração de contaminantes em sedimentos, por isso muitos estudos como os de ALEGRE (2009); GUIMARÃES (2011); MORAES (2011); ROCHA (2015) e SILVA (2017) utilizam os critérios estabelecidos pelo CCME . Os valores-guias são utilizados para avaliar os efeitos à biota, portanto o presente estudo estabeleceu como critério avaliar as concentrações dos elementos da (Tabela 2) até 10cm de profundidade.

4.6 Índices de Poluição

4.6.1 Fator de Enriquecimento (FE)

Outro parâmetro muito utilizado para avaliação das concentrações de elementos metálicos em sedimentos é o Fator de Enriquecimento (FE) (Equação 4). Neste estudo, foram utilizados os valores obtidos na camada (30 cm) para todos os elementos analisados (As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn) nos perfis coletados em fevereiro de 2019; no ponto P1 agosto/2018 utilizou-se a camada de 27,5 cm como valor de referência (valor de background) para o cálculo do fator de enriquecimento somente para o As, e foi empregado o elemento

Sc como normalizador. Além disso, foi utilizado o NASC (TAYLOR & MCLENNAN,1985) para comparação de resultados.

$$FE = \frac{([C_{elemento}]/[C_{Sc}]) amostra}{([C_{elemento}]/[C_{Sc}]) background} \quad (4)$$

sendo:

$([C_{elemento}]/[C_{Sc}]) amostra$ = razão entre a concentração do elemento de interesse e a concentração de Sc na amostra;

$([C_{elemento}]/[C_{Sc}]) background$ = razão entre a concentração de background do elemento de interesse e a concentração de background do Sc.

Para avaliar esse parâmetro, SUTHERLAND,2000 propôs cinco categorias para o Fator de Enriquecimento, conforme (Tabela 3) abaixo.

Tabela 3 - Categorias do Fator de Enriquecimento

FE < 2	Baixo enriquecimento
2 < FE < 5	Enriquecimento moderado
5 < FE < 20	Enriquecimento significativo
20 < FE < 40	Enriquecimento muito alto
FE > 40	Enriquecimento extremamente alto

Fonte: Modificado de SUTHERLAND,2000

4.6.2 Índice de Geoacumulação (IGeo)

O Índice de Geoacumulação (IGeo) é outra ferramenta de avaliação de nível de poluição em sedimentos (Equação 5). O índice IGeo está associado a uma escala qualitativa (Tabela 4) utilizada para determinar se há influência antrópica no local estudado.

$$Igeo = \log_2(C_{amostra}/1,5 C_{background}) \quad (5)$$

sendo:

$C_{amostra}$ = concentração do elemento de interesse na amostra;

$C_{background}$ = concentração de background do elemento de interesse.

Tabela 4 - Classificação do nível de poluição segundo IGeo

IGeo	Nível de poluição
<0	Não poluído
0 a 1	Não poluído
1 a 2	Moderadamente poluído
2 a 3	Moderadamente poluído a poluído
3 a 4	Poluído a muito poluído
4 a 5	Muito poluído
>5	Altamente poluído

No entanto, o estudo de KIM (2017) observou que no sedimento mais fino, há uma concentração maior dos elementos; devido à superfície de contato ser maior e a partir dos resultados obtidos em seu estudo de avaliação da qualidade de sedimentos da Baixada Santista, foi proposta uma nova fórmula para o cálculo do IGeo (Equação 6), levando-se em conta o teor de metais e a fração fina das amostras de sedimentos (KIM, 2017).

$$Igeo = \log_2((C_i / \%finos_i) / (1,5 * (Bg / \%finos_{Bg}))) \quad (6)$$

Sendo:

C_i - a concentração do elemento estudado;

$\%finos_i$ - o teor de finos na amostra;

Bg - o nível de referência e/ou de background do elemento i e

$\%finos_{Bg}$ - o teor de finos da amostra de referência e/ou background utilizado.

Assim é observado que, de acordo com essa equação, a concentração mais elevada não indica necessariamente uma contaminação. Nessa equação, é levada em consideração a porcentagem de finos, o valor de 1,5 é usado para corrigir variações de background e a porcentagem de finos corrige o aumento da concentração devido ao tamanho das partículas. Porém, esta equação é aplicável se, e somente se, a amostra apresentar porcentagem de finos maior do que 20%. Quando se utiliza a porcentagem de *finos* da amostra background, elimina-se a hipótese de utilização de valores da crosta ou folhelho médio North American Shale Composite (NASC) (KIM, 2017).

4.7 Análise Granulométrica

Segundo NASCIMENTO (2003), um dos parâmetros que mais influenciam as interações dos metais com o sedimento é o tamanho de partículas no sedimento, por exemplo, muitos metais concentram-se nas frações de argila e silte do perfil sedimentar. Por isso, é fundamental considerar as diferentes texturas e mineralogias de amostras de perfis verticais (NASCIMENTO, 2003).

A análise granulométrica foi realizada na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) no Laboratório de Análise Ambiental do Instituto de Geociências, pelo Prof. Dr. Wanilson Luiz Silva. O equipamento utilizado foi o Particle Size Analyzer CILAS 1090L, que permite analisar partículas com diâmetros entre 0,04 e 500 μm . O intervalo granulométrico segue a escala de Udden-Wentworth (Tabela 5).

O preparo das amostras em duplicata foi feito no Laboratório de Química Inorgânica da CETESB, onde uma alíquota da amostra (aproximadamente 1 g) foi transferida para um tubo Falcon de 50 mL e depois foram adicionados 40 mL do agente dispersante hexametáfosfato de sódio a 4%. Após essa etapa, as amostras com o dispersante foram submetidas à agitação por 24 h. Para a determinação da granulometria no equipamento, primeiramente foi necessário um pré-peneiramento das amostras em peneiras de 500, 1000 e 2000 μm e apenas a fração inferior a 500 μm foi analisada no granulômetro CILAS 1090 L.

A leitura da amostra por difração de laser foi realizada sob circulação e agitação mecânica, sendo feita a aquisição de aproximadamente 8000 medidas das proporções granulométricas, cujos resultados são uma média destas medidas. A obscuração de trabalho sempre se situa entre 5 e 30%. O padrão interno "P3 ACIL" foi usado como controle de qualidade das medidas. Em todo o procedimento de análise foi utilizada água filtrada em cartucho de 0,5 μm de porosidade. A medida do branco foi realizada sempre antes do início das análises e algumas vezes entre as amostras (em intervalos de tempo pré-determinados pelo granulômetro), calibrando automaticamente. A dispersão e homogeneização da amostra no equipamento foram feitas com emprego de ultrassom, agitação mecânica e circulação pelo sistema por 1 min antes da aquisição dos dados.

Tabela 5 - Intervalo Granulométrico (mm) – Escala de Udden-Wentworth

2,0 a 1,0 mm	Areia muito grossa
1,0 a 0,50 mm	Areia grossa
0,50 a 0,250 mm	Areia média
0,250 a 0,125 mm	Areia fina
0,125 a 0,062 mm	Areia muito fina
0,062 a 0,031 mm	Silte grosso
0,031 a 0,016 mm	Silte médio
0,016 a 0,008 mm	Silte fino
0,008 a 0,004 mm	Silte muito fino
<0,004 mm	Argila

4.8 Análise Estatística

Os valores de máximo e mínimo, assim como os índices de poluição, foram calculados com o auxílio do Excel 2019. A análise estatística dos resultados das amostras de sedimento e água foi realizada por meio do programa estatístico Action Stat versão 3.7 e do software de cálculos estatísticos STATISTICA 7 (EQUIPE ACTION STAT, 2014). Foram realizados testes de Correlação de Pearson, para correlacionar os dados de granulometria com outros parâmetros do sedimento, Análise Fatorial com extração de Componentes Principais (PCA, do inglês Principal Component Analysis) e Análise de Agrupamentos (Cluster Analysis). Para este estudo, foi adotado o nível de significância 5% e foram considerados para o cálculo todos os resultados das concentrações dos elementos nos perfis de sedimento e na coluna d'água, incluindo os valores *outliers*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise da água

Nas Tabelas 6 a 9 são apresentados os resultados dos ensaios de campo feitos pela equipe do Setor de Amostragem em Ambientes Aquáticos da CETESB *in situ*. Os resultados obtidos foram comparados com a legislação vigente CONAMA 357/05 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2005).

Tabela 6 - Dados de coleta P1 agosto/2018

Profundidade. (m)	Temp. água (°C)	OD (mg L ⁻¹)	pH	Condutividade (μS cm ⁻¹)
0,02	20,08	9,09	7,33	29
1	19,9	9,13	7,28	29
2	19,73	9,13	7,24	29
3	19,4	9,12	7,15	29
4	19,23	9,11	7,1	29
5	19,04	8,34	6,55	29
6	18,73	8,23	6,33	29
7	18,55	7,57	6,07	29
8	18,47	7,39	6,02	29
9	18,46	7,19	5,97	29
10	18,38	7	5,91	29
11	18,34	6,7	5,87	29
13	18,3	6,28	5,75	29
14	18,27	5,49	5,69	30

Fonte: CETESB, 2018

Os dados de P1 de agosto/2018 (Tabela 6) não foram obtidos no mesmo local do ponto 1 de fevereiro/2019, ocorreu um problema no ecobatimento do barco utilizado pela CETESB, desta forma, em agosto a coleta ocorreu na margem do Reservatório Ponte Nova. Neste ponto a maioria dos valores de Oxigênio Dissolvido (OD) no ponto de agosto apresentaram conformidade com a legislação CONAMA 357, menos a 14 m que ficou abaixo de 6 mg L⁻¹, o mesmo aconteceu com os valores de pH que ficaram entre 6,0 a 9,0, conforme a legislação, o que caracteriza um ambiente neutro, mudando para 5,49 no último ponto. Já a condutividade ficou abaixo de 100 μS cm⁻¹ não indicando ambientes impactados CETESB (2018).

Tabela 7 - Dados de coleta P1 fevereiro/2019

Profundidade. (m)	Temp. água (°C)	OD (mg L ⁻¹)	pH	Condutividade (μS cm ⁻¹)
Superfície	26,19	6,72	6,79	27
1	26,19	6,67	6,72	27
2	26,18	6,63	6,67	27
3	26,17	6,6	6,75	27
4	26,11	6,5	6,66	27
5	26,1	6,45	6,6	27
6	26,09	6,42	6,59	27
7	26,08	6,39	6,6	27
8	24,69	2,11	6,06	28
9	22,88	0,76	6,11	41
10	22,97	0,5	6,17	40
11	22,38	0,39	6,17	43
12	22,05	0,34	6,16	49
13	21,8	0,33	6,21	50
14	21,49	0,3	6,23	49
15	21,26	0,28	6,2	52
16	21,05	0,27	6,21	56
17	21,02	0,26	6,2	57
18	21,02	0,27	6,23	58
19	20,98	0,25	6,21	66

Fonte: CETESB,2019

Tabela 8 - Dados de coleta P2 fevereiro/2019

Profundidade. (m)	Temp. água (°C)	OD (mg L ⁻¹)	pH	Condutividade (μS cm ⁻¹)
Superfície	26,61	5,93	6,41	28
1	26,45	5,43	6,31	28
2	26,36	5,06	6,21	28
3	26,34	4,92	6,23	28
4	26,33	4,97	6,18	28
5	26,32	4,77	6,18	28
6	26,14	5,03	6,23	28
7	24,89	1,58	5,96	45
8	24,17	0,65	6,03	50
9	23,81	0,47	6,12	63
10	23,03	0,38	6,2	106

Fonte: CETESB,2019

Tabela 9 - Dados da coleta P3 fevereiro/2019

Profundidade. (m)	Temp. água (°C)	OD (mg L ⁻¹)	pH	Condutividade (μS cm ⁻¹)
Superfície	27,1	6,6	6,57	27
1	26,37	6,74	6,59	27
2	26,14	6,59	6,61	27
3	26,07	6,52	6,6	27
4	26,05	6,45	6,52	27
5	26,03	6,42	6,48	27
6	26,02	6,44	6,57	27
7	25,93	5,78	6,25	27
8	24,81	3,92	5,96	25
9	23,2	1,86	5,78	28
10	22,65	1,46	5,71	29
11	22,01	2,45	5,64	27
12	21,65	4,49	5,44	21
13	21,52	5,43	5,34	20
14	21,51	5,62	5,4	20
15	21,52	2,39	5,91	21
16	21,53	0,81	6,27	31

Fonte: CETESB, 2019

Comparando-se os pontos de fevereiro/2019 (Tabela 7 a 9), é possível verificar uma variação de temperatura a partir de 8 m de profundidade. Os reservatórios estão sujeitos à variação de temperatura, principalmente os de clima tropical, o que pode gerar o fenômeno de estratificação térmica, ou seja, há uma separação na coluna d'água, as águas mais quentes ficam na parte superior e as frias no fundo. Por causa dessas variações, não há uma mistura, por isso as primeiras camadas da coluna apresentam condições mais oxidantes e as últimas camadas mais redutoras. Esse processo também foi observado por MONTEIRO JR (2006) e FRANKLIN (2017) o que pode explicar o decaimento dos valores de OD nas maiores profundidades dos pontos 1, 2 e 3. No Ponto 2, por não ser muito fundo, não é possível observar uma variação na temperatura, mas houve um decaimento no OD de 5,93 (superfície) para 0,38 em 10 metros.

No APÊNDICE A são apresentados os resultados das concentrações dos elementos químicos totais e dissolvidos obtidos pela técnica de ICP-MS em amostras da coluna d'água nos 4 pontos (P1 agosto/2018, P1fevereiro/2019, P2 e P3) do Reservatório Ponte Nova. A coleta das amostras de água seguiu a metodologia empregada na tese de FRANKLIN (2017); as amostras da coluna d'água foram intercaladas da seguinte forma: superfície e quatro profundidades equidistantes em relação à profundidade total, incluindo a água de fundo.

No geral, as concentrações dos elementos analisados nas amostras de água se mostraram abaixo dos valores estipulados pela legislação CONAMA 357. Para os elementos

considerados potencialmente tóxicos como As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn segundo o CONAMA para águas doces -classe 1 (classe onde encontra-se o reservatório Ponte Nova), o valor máximo permitido é: As total ($0,01 \text{ mg L}^{-1}$), Cd total ($0,001 \text{ mg L}^{-1}$), Cr total ($0,05 \text{ mg L}^{-1}$), Cu dissolvido ($0,009 \text{ mg L}^{-1}$), Hg total ($0,0002 \text{ mg L}^{-1}$), Mn total ($0,1 \text{ mg L}^{-1}$), Ni total ($0,025 \text{ mg L}^{-1}$), Pb total ($0,01 \text{ mg L}^{-1}$) e Zn total (mg L^{-1}). Os resultados do presente estudo ficaram na ordem de ppb ($\mu\text{g L}^{-1}$) e a legislação estabelece valores máximos na ordem de ppm (mg L^{-1})

Comparando os resultados obtidos no presente trabalho com os dados do Relatório da Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo de 2016 CETESB (2016) os valores obtidos nas duas campanhas (2018-2019) mostraram-se menores dos obtidos no relatório de 2016; no entanto, os resultados em 2016 e no ponto P1 agosto/2018 e P3 de alguns elementos como Cd, Hg e Ni ficaram abaixo dos limites de quantificação; para o P1 fevereiro/2019 e P2 os valores de Cd e Hg também ficaram abaixo dos limites de quantificação.

FRANKLIN (2017) teve como um dos objetivos verificar como se dá o transporte dos elementos para os reservatórios, e a partição dos elementos nas águas circulantes. Para a determinação da concentração de metais na coluna d'água os elementos foram quantificados por ICP-MS ou por ICP-OES. Nos resultados da análise da água de agosto de 2013 e agosto 2014 os elementos Cd, Hf, Hg, Ni, ficaram abaixo dos limites de quantificação do método utilizado tanto nas amostras dissolvidas e totais na maior parte das amostras coletadas; isso também foi observado nos resultados do ponto P1 agosto/2018, mostrando que não houve mudanças entre 2013, 2014 e 2018 para esses elementos. Além disso, analisando os resultados de agosto 2013 e 2014 com os de agosto/2018 houve um aumento da concentração de alguns elementos (Al, As, Ba, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Li, Mn, Pb, Sc, Ti e Zn) após 12 metros. Nas análises feitas por FRANKLIN (2017) os elementos Sc e Zn foram os de maior solubilidade; Al, Fe, Mn e Pb ocorreram em proporções inferiores a 40%, o que indica que um significativo percentual da concentração destes elementos está associado ao material particulado em suspensão na água, o que pode explicar o comportamento desses elementos na coluna d'água.

Os resultados das análises da coluna d'água, FRANKLIN (2017), nas amostras de P1 fevereiro/2014 coincidem com os da amostra da coluna d'água no mesmo ponto P1 do presente estudo, em 12 metros; também foi observado um aumento nas concentrações da maioria dos elementos no ponto P1 fevereiro/2019, exceto Hf, Ni e Sb, sendo que o aumento da concentração ocorreu em 15 metros. Além disso, FRANKLIN (2017) também coletou

amostras da coluna d'água no ponto P2 (mesmo local deste estudo) em fevereiro de 2014 e mesmo que os resultados das concentrações da coleta de fevereiro/2019 tenham sido menores o comportamento dos elementos analisados nesse estudo foi o mesmo de 2014 o que indica que não houve mudanças entre 2014-2019 no ponto P2.

5.2 Granulometria

A classificação granulométrica foi realizada com base nos critérios estabelecidos pelo Laboratório de Análise Ambiental do Instituto de Geociências da UNICAMP para argila, silte e areia.

Os resultados dos perfis de sedimento mostraram valores elevados de silte (maiores do que 50%) em grande parte dos perfis, como já havia sido observado por Franklin (2017).

Figura 9 – Gráfico da Granulometria no P1 agosto/2018.

No ponto P1 agosto/2018 (Figura 9), os valores de silte ficaram próximos de 80% nas primeiras camadas; entre 10-15 cm houve uma mudança de textura com diminuição de argila e aumento de areia, mas depois se manteve constante de 17,5 a 25 cm com argila (>11%); silte (>60%) e areia (>24%). Nas últimas camadas ocorreu uma nova mudança, com a diminuição de silte e um acréscimo na porcentagem argila-areia (>42%).

Figura 10 – Gráfico da Granulometria no P1 Fevereiro/2019

Em relação ao P1 fevereiro/2019, coletado perto da barragem, houve 3 mudanças de textura, conforme indicado na (Figura 10), a primeira mudança ocorreu de 10 a 17,5 cm, com o aumento da porcentagem argila- silte de 78 para aproximadamente 94%, depois a outra mudança foi leve entre 20 e 27,5 cm, com a argila diminuindo seu percentual de 16 para 10%, e a última entre 30 e 42,5 cm, com diminuição drástica de argila e silte e aumento de areia na última camada.

Na análise do P2, ocorreu um problema com a amostra de 15 cm, não sendo possível calcular as porcentagens de argila, silte e areia nessa camada, por isso a quebra na (Figura 11). Além disso, a última camada (47,5 cm) não continha uma quantidade de amostra necessária para fazer todas as análises, por isso optou-se por fazer a análise das concentrações dos elementos químicos estudados no sedimento.

Figura 11 – Gráfico da Granulometria no P2 coletado em Fevereiro/2019

O ponto P2 foi coletado no leito original do rio Tietê e se mostrou diferente dos outros perfis; nas primeiras camadas (2,5 a 12,5 cm) a porcentagem silte-areia ficou acima de 90%, mas entre 30 e 45 cm houve uma diminuição drástica de areia e a argila aumentou percentual de 8 para 35%.

O perfil P3, coletado no leito original do rio Claro (Figura 12), possui uma profundidade de 57,5 cm e apresentou um comportamento parecido com o P1.

Figura 12 - Gráfico da Granulometria no P3 coletado em Fevereiro/2019

Entre 2,5 a 12,5 cm a porcentagem argila-silte foi >90%, de 15 a 17,5 cm houve um aumento de areia de 7% para 17%, porém em 20 cm já diminuiu para aproximadamente 8% e se manteve constante até 35 cm; entre 37,5 a 45 cm houve um aumento de areia e a diminuição de silte, a argila se manteve constante com 12%, porém nas últimas camadas, de 47,5 a 57,5 cm, a porcentagem de argila caiu e a de areia aumentou, passando de 50%.

Comparando-se os dados, é possível verificar que, depois de 30 cm, há uma mudança de textura em todos os perfis coletados nesse estudo indicando que essa fração pode ser considerada como início da formação do reservatório, ou seja, a primeira camada sedimentar depositada após a construção da barragem (transição sedimentar rio/reservatório). Essa alteração de textura em cerca de 30 cm já havia sido observada por Franklin (2014), mostrando a transição sedimento-represa/sedimento-rio.

5.3 Metais nas amostras dos perfis de sedimento

5.3.1 Concentração dos metais nos sedimentos estudados

Os resultados obtidos pela análise por INAA e ICP OES dos 4 perfis (P1 agosto/2018, P1 fevereiro/2019, P2 e P3) podem ser divididos em três grupos: concentrações maiores nas primeiras camadas; nas últimas camadas e sem variação ao longo do perfil. As concentrações dos elementos analisados nos 4 perfis encontram-se no Apêndice B.

Figura 13 - Elementos com concentrações maiores nas primeiras camadas P1 Agosto/2018

De acordo com a (Figura 13), no ponto P1 agosto/2018 (primeira campanha), os elementos analisados se dividiram bem entre os grupos. No primeiro grupo, as maiores concentrações foram observadas nas primeiras camadas (0-12,5 cm). Depois de 12,5 cm, houve uma mudança de textura, como mostrado na (Figura 9), e a partir de 30 cm, a concentração de todos os elementos diminuiu.

Essa tendência de maiores concentrações no topo em relação à base do perfil, ou seja, nos sedimentos da fase represa, são mais evidentes para os elementos Fe, As, Co, Cr, Cu e Sb. As primeiras camadas (0-15cm) apresentaram as maiores porcentagens de silte e argila, Depois de 12,5 cm, houve uma mudança de textura, com aumento da porcentagem de areia, como mostrado na (Figura 9). Franklin (2014), quando estudou perfis sedimentares de Ponte Nova, identificou nas camadas mais superficiais a presença do mineral illita, correspondente à sedimentação após a construção do reservatório, e não nas camadas mais profundas, relativas à transição represa-rio. O Fe (e os elementos menores associados, Ni, As, Sb e Cu) apresentou incrementos de suas concentrações após a construção da barragem,

Outro grupo foram os que apresentaram concentrações elevadas nas camadas mais profundas (Figura 14). Franklin (2014) observou que, nos sedimentos anteriores à formação do reservatório (após 30 cm de profundidade), foi o identificado o mineral muscovita, não verificado nas camadas sedimentares após a construção do reservatório. Nota-se, então, um aumento da concentração dos elementos Ba, Ca, Cs, Hf, Na, K, Rb, Ta, do topo para a base do perfil, o que demonstra que houve um decréscimo nas concentrações desses elementos após a formação da represa, devido às mudanças texturais e mineralógicas, com maior diversidade mineral e redução de quartzo após o barramento.

Figura 14 - Elementos com concentrações maiores nas últimas camadas P1 Agosto/2018

Já o último grupo (Figura 15), apresentou alguma alteração nas concentrações depois de 10 cm e/ou depois de 15 cm com a mudança de textura, mas os valores ficaram constantes ou não variaram muito ao longo do perfil.

Figura 15 - Elementos que não apresentaram mudanças significativas de concentração ao longo do perfil P1 Agosto/2018

Figura 16 - Elementos com concentrações maiores nas primeiras camadas - P1Fevereiro/2019.

Figura 16 – Elementos com concentrações maiores nas primeiras camadas - P1Fevereiro/2019.

(Continuação)

Figura 17 - Elementos com concentrações maiores nas últimas camadas - P1Fevereiro/2019

Na segunda campanha de fevereiro/2019, foram coletados 3 perfis (P1, P2 e P3). No ponto P1, a maioria dos elementos se encontrou no primeiro grupo (Figura 16); da mesma forma que em P1 Ago/2018, Ba, K, Na e Rb (Figura 15) se enquadraram no segundo grupo, devido ao aumento de concentração nas camadas anteriores à construção da barragem.

No ponto P2, ao contrário dos outros pontos, obtiveram-se mais elementos no segundo e terceiro grupo, como mostram as Figuras 18 e 19. Nesse perfil, como mostrado na (Figura 11), há um aumento de argila nas últimas camadas a partir de 30 cm, o que mudou o comportamento dos elementos. A temperatura da água nesse ponto mostrou uma variação de 2°C entre 6 e 8m, o que pode demonstrar uma estratificação mais próximo ao fundo.

Já o ponto P3, situado no leito original do rio Claro, foi o perfil com maior profundidade. Ao longo do perfil é possível observar que a maioria dos elementos possui altas concentrações nas primeiras camadas (Figura 21) e só Na e Rb apresentaram concentrações elevadas nas últimas camadas (Figura 22), o que pode ser explicado pela transição sedimentar represa-rio, sendo que semelhante ao ponto P1 fevereiro, não houve elementos no terceiro grupo.

O Ponto 1 foi escolhido para analisar os possíveis efeitos sazonais (verão e inverno), por isso, um perfil foi coletado em agosto/2018 e outro em fevereiro/2019. Comparando-se os resultados da concentração versus profundidade, alguns elementos mostraram o mesmo comportamento nas duas campanhas: As; Br; Ce; Co; Cr; Cu; Eu; Fe; Ni; La e Sc, com concentrações maiores nas primeiras camadas e Ba; K; Na e Rb, com concentrações maiores nas últimas camadas. Não houve também variações significativas nas concentrações dos elementos analisados nas duas campanhas, não evidenciando variação sazonal.

Avaliando-se os três perfis de fevereiro/2019, vê-se que houve um comportamento semelhante, com maiores concentrações de Fe e menores associados (As,

Cu, Sb) nas primeiras camadas, associadas os sedimentos da barragem e maiores concentrações de Ba, Na, K, Rb, na base do perfil, isto é, nos sedimentos anteriores à formação do reservatório.

Figura 18 - Elementos com concentrações maiores nas primeiras camadas ao longo do perfil P2.

Figura 19 - Elementos com concentrações maiores nas últimas camadas P2.

Figura 20 - Elementos que não apresentaram mudanças significativas de concentração ao longo do perfil P2.

Figura 21 - Elementos com concentrações maiores nas primeiras camadas P3

Figura 22 - Elementos com concentrações maiores nas últimas camadas P3

Tabela 10 - Comparação dos valores obtidos no presente trabalho a resultados da literatura (mg kg⁻¹)

Elementos	P1-Ago/18		P1-Fev/19		P2		P3		MORAES (2011)		ROCHA(2015)		FRANKLIN(2017)			
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	ago/13		fev/14	
As	4,12	0,15	3,51	0,09	1,66	0,17	4,61	0,14	n.d	n.d	2,8	1,4	4,94	3,04	4,69	2,71
Ba	653	175	298	121	627	231	301	109	n.d	n.d	357	114	168	76	394	247
Br	74	1	83	2	11	3	70	0,4	n.d	n.d	67	14	n.d	n.d	n.d	n.d
Ca%	0,83	0,48	0,56	0,10	0,87	0,34	0,77	0,08	0,35	0,25	n.d	n.d	0,18	0,01	0,17	0,09
Co	8,03	4,61	7,77	0,95	14,73	7,68	6,88	0,34	25,82	16,72	7,4	4,2	7,16	3,38	22,90	4,59
Cu	17,38	3,61	14,57	1,89	16,96	3,98	19,52	1,04	28,88	0,51	n.d	n.d	14,8	4,6	7,25	2,79
Cr	45,5	22,1	47,5	3,9	77,0	38,3	42,4	2,3	95,4	58,0	40,2	22,8	44,1	20,9	46,6	24,8
Cs	8,6	3,4	4,9	1,6	8,8	4,4	5,5	0,8	n.d	n.d	3,5	2,3	5,7	2,8	6,9	3,8
Fe%	4,25	1,37	4,27	0,41	2,08	1,24	4,25	0,18	2,94	1,78	3,8	1,7	4,18	1,42	2,24	1,20
Hf	20,4	3,4	16,8	2,7	13,0	1,3	9,0	2,6	n.d	n.d	8,5	3,9	3,82	1,59	8,30	4,03
K%	3,7	0,5	2,4	0,4	3,9	0,1	2,2	0,1	1,3	0,9	1,6	0,6	0,6	0,3	2,0	1,2
Mn	237	108	158	35	235	130	158	3	213	83	n.d	n.d	264	127	766	179
Na	4003	324	2521	344	2153	229	1218	462	1922	1268	1958	283	559	197	2316	953
Ni	13,80	6,97	14,57	1,82	16,39	7,63	11,79	0,22	26,26	14,26	n.d	n.d	15,80	9,08	17,90	8,72
P	1339	507	845	107	686	350	1096	22	n.d	n.d	n.d	n.d	3167	789	1431	499
Pb	51,8	20,5	52,4	5,2	51,3	17,6	43,1	0,2	115,7	66,5	n.d	n.d	68,4	48,6	56,9	36,8
Rb	197	40	107	33	127	41	86	47	n.d	n.d	92	34	n.d	n.d	n.d	n.d
Sb	0,50	0,07	0,48	0,07	0,29	0,1	0,68	0,04	n.d	n.d	0,38	0,23	0,41	0,16	0,17	0,062
Sc	13,4	6,3	13,5	1,4	15,4	6,1	10,9	0,6	3,6	2,0	13,1	7,6	6,8	4,3	10,2	3,2
Th	31	18	24	4	33	18	30	4	n.d	n.d	20	15	23	13	24	14
U	10,32	5,37	6,3	1,3	8,9	4,2	7,7	1,4	n.d	n.d	6,0	4,5	12,50	4,37	6,72	4,01
Zn	79	52	72	5	93	56	77	3	63	30	79	35	69	48	92	46

n.d: Não determinado

Fonte: autora da dissertação.

Comparando-se os resultados obtidos com os de MORAES (2011); ROCHA et al., (2015) e FRANKLIN(2017) (Tabela 10), observa-se que o comportamento dos elementos químicos foi semelhante ao observado neste trabalho.

MORAES, 2011, coletou um perfil em Ponte Nova em 2009 entre março e abril, fatiou a cada 1cm, e utilizou método da fusão alcalina na determinação da concentração total dos metais em sedimento. Comparando-se os resultados das concentrações totais do estudo de 2009 com os de 2018 e 2019, vê-se que os elementos Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Na, Ni, Pb, apresentaram valores acima dos obtidos na análise dos perfis de agosto/2018 e fevereiro/2019. No entanto, o comportamento da maioria dos elementos analisados por MORAES, 2011, foi igual ao dos pontos P1 fevereiro/2019 e P3. Além disso, houve mudanças nas concentrações dos elementos ao longo do perfil, porém não há como dizer se ocorreu uma mudança de textura, pois não foi feita uma correlação das concentrações dos elementos ao longo do perfil com a granulometria.

ROCHA et al. (2015) também analisaram um perfil de sedimento coletado em agosto de 2014, sendo que a metodologia aplicada foi a mesma do presente estudo. Comparando-se as concentrações dos elementos nas duas campanhas (2018-2019) com o trabalho de ROCHA et al. (2015), observou-se que os elementos As, Br e Fe tiveram a mesma distribuição. Os demais elementos (Ba, Co, Cr, Cs, Hf, K, Na, Rb, Sb, Sc, Th, U e Zn), como mostra a (Tabela 10), tiveram distribuição semelhantes aos pontos P1 agosto/2018; P1 fevereiro/2019 e P3. Por exemplo, ROCHA et al. (2015) também obtiveram maiores concentrações de Ba nas últimas camadas como nos pontos P1 agosto/2018 e P1 fevereiro/2019. Além disso, o perfil analisado em 2014 também apresentou uma mudança no comportamento dos elementos em 30 cm, como foi observado neste estudo.

FRANKLIN (2017) coletou dois perfis de sedimento em Ponte Nova, um em agosto de 2013 e outro em fevereiro de 2014, sendo que as amostras foram cortadas a cada 2,5 cm como no presente estudo, porém a abertura da amostra seguiu o método 3051 A EPA (digestão com HF e HNO₃). Comparando-se a concentração total dos elementos estudados por FRANKLIN (2017) com os obtidos nas campanhas (2018-2019), foi possível observar que o comportamento dos elementos obtidos nas análises do perfil coletado em agosto de 2013 foi igual ao coletado em agosto de 2018, o que pode indicar que não houve mudanças significativas no reservatório nesse período. Foram observadas mudanças das concentrações dos elementos analisados entre 27,5-30 cm, indicando mudança de textura. No perfil coletado em fevereiro 2014, há muita variação na concentração dos elementos principalmente nas últimas camadas, devido a mudanças de textura ao longo do perfil

Comparando-se os resultados obtidos na campanha de fevereiro/2019 aos obtidos por FRANKLIN (2017) no perfil de fevereiro/2014, é possível notar que foram semelhantes aos pontos P1 e P3, onde o comportamento dos elementos está relacionado com as mudanças de texturas que também foram observadas no estudo de FRANKLIN (2017).

5.3.2 TEL e PEL

As Figuras de 23-29 mostram os valores dos elementos As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn em relação aos valores limites de TEL e PEL. Nenhum elemento analisado excedeu o PEL nas duas campanhas.

Figura 23 - Resultados obtidos para concentrações de As em relação a valores de TEL e PEL (mg kg^{-1})

Figura 24 - Resultados obtidos para concentrações de Cd em relação a valores de TEL e PEL (mg kg⁻¹) Figura 25 - Resultados obtidos para concentrações de Cr em relação a valores de TEL e PEL (mg kg⁻¹)

Figura 26 - Resultados obtidos para concentrações de Cu em relação a valores de TEL e PEL (mg kg⁻¹)

Figura 27 - Resultados obtidos para concentrações de Ni em relação a valores de TEL e PEL (mg kg⁻¹)

Figura 28 - Resultados obtidos para concentrações de Pb em relação a valores de TEL e PEL (mg kg⁻¹)

Figura 29 - Resultados obtidos para concentrações de Zn em relação a valores de TEL e PEL (mg kg⁻¹)

Comparando-se os pontos P1 agosto/2018 e P1 fevereiro/2019, Cr e Pb apresentaram valores acima de TEL e nenhum elemento analisado ficou acima dos valores de PEL; porém, no ponto P1 agosto/2018, os resultados ficaram acima dos valores de TEL

de 2,5 a 7,5 cm para Cr e Pb, e no ponto P1 fevereiro/2019, os valores de Cr e Pb passaram TEL de 2,5 a 10 cm. Essa diferença pode ser devida à alta porcentagem de argila-silte nas primeiras camadas, sendo que no ponto P1 agosto/2018, de 2,5 a 7,5 cm, a porcentagem de argila-silte foi de aproximadamente 90%, e P1 fevereiro/2019 também apresentou esse mesmo comportamento, sendo que nesse ponto, em 10 cm, a porcentagem de silte-argila chegou a 94%.

No ponto P2, somente Cr excedeu o valor de TEL de 2,5 a 10 cm. Para As, Cd, Ni, Cu, Pb e Zn, todos os resultados ficaram abaixo dos valores de TEL. Já no ponto P3, Cr e Pb excederam o valor de TEL de 2,5 a 10 cm.

Os três perfis coletados em fevereiro mostraram valores de Cr acima de TEL e os pontos P1 fevereiro/2019 e P3 Cr e Pb excederam os valores de TEL de (2,5 a 10 cm). Comparando-se os três pontos, observou-se que a granulometria é o fator que influencia o aumento das concentrações desses elementos como discutido anteriormente nos itens 5.2 e 5.3.1.

Outros estudos no reservatório Ponte Nova obtiveram resultados de TEL e PEL semelhantes aos obtidos na análise dos 4 perfis.

MORAES(2011), em seu estudo, mostrou que os elementos Cu, Cr, Pb e Zn tiveram o mesmo comportamento apresentado nas duas campanhas (2018 e 2019) do presente estudo; entretanto, Cd e Ni, em 2009, ultrapassaram os valores de TEL, o que não ocorreu neste estudo.

ROCHA et al. (2015), também, obtiveram os mesmos resultados para As, Cr e Zn. Cr ultrapassou os valores de TEL em 2009, 2014, no estudo realizado por Rocha (2015), e em 2018 e 2019, no presente estudo. Esses resultados podem indicar que seja algo natural do local ou que haja alguma fonte de contaminação desse elemento.

Os valores de TEL e PEL dão uma ideia sobre possível toxicidade de elementos químicos em sedimentos, porém não levam em consideração o fundo geoquímico natural do local estudado, o que pode dar margem a interpretações errôneas. Por isso, são utilizadas em conjunto outras ferramentas de análise, como Fator de Enriquecimento e Índice de Geoacumulação.

5.3.3 Fator de Enriquecimento (FE)

O Fator de Enriquecimento (FE) foi calculado para os elementos As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn, apresentados nas Tabelas de 11 a 14. Para o cálculo, foi utilizado o Sc como normalizador e, conforme discutido no item 5.2, o corte em 30 cm foi considerado como *background*, pois é onde ocorre a faixa de transição rio-reservatório. No ponto P1 agosto/2018, somente para o As foi utilizado o corte em 27,5 cm, porque não foi possível determinar a concentração de As nos últimos cortes (30 e 32,5 cm). Paralelamente, foram também utilizados como valores de *background*, os valores do North American Shale Composite (NASC), para comparação.

Os resultados do FE obtidos no presente estudo utilizando os valores obtidos em 30 cm de profundidade como *background*, mostraram que no ponto P1 de fevereiro/2019 e no ponto P3, todos os elementos apresentaram $FE < 2$ (baixo enriquecimento).

Tabela 11 - Fator de Enriquecimento Ponto P1 agosto/2018.

Ponto 1 Ago-18		Fator de Enriquecimento							
Elementos	As	Ba	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
2,5	14,28	0,15	0,92	2,22	1,51	0,57	0,83	1,05	0,37
5	14,84	0,17	0,97	1,73	1,40	0,54	0,82	1,07	0,36
7,5	14,38	0,19	0,96	1,84	1,26	0,55	0,93	1,17	0,42
10	7,66	0,61	0,96	2,20	1,23	1,22	0,99	1,07	0,75
12,5	8,52	0,61	1,04	3,48	1,23	2,15	1,41	1,44	0,80
15	1,79	0,90	0,97	1,61	1,06	1,22	1,08	1,07	0,81
17,5	2,90	0,90	1,08	1,22	1,03	1,08	0,96	0,93	1,05
20	2,61	1,11	1,13	0,90	1,00	1,04	0,90	1,00	0,91
22,5	1,92	1,01	1,01	0,91	1,01	0,92	0,87	0,91	0,79
25	1,22	1,10	1,14	1,03	0,99	0,97	0,95	0,98	0,81
27,5	1,00	1,02	1,07	3,13	0,97	1,00	0,96	0,99	1,02
30		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

No ponto P1 agosto/2018, o elemento As apresentou $5 < FE > 20$ nas primeiras camadas (0-12,5 cm), mostrando enriquecimento significativo, e nos cortes 17,5 e 20 cm enriquecimento moderado e de 22,5 a 27,5 cm $FE < 2$ (baixo enriquecimento). Já para Cu, obteve-se enriquecimento moderado ($2 < FE < 5$) em 4 pontos: 2,5 cm (2,22); 10 cm (2,20); 12,5 cm (3,48) e 27,5 cm (3,13) e Mn somente em um ponto (12,5 cm) obteve-se enriquecimento moderado (2,15). Para os elementos Ba, Cr, Fe, Ni, Pb e Zn, o FE ficou abaixo de 2 (baixo enriquecimento).

Tabela 12 - Fator de Enriquecimento ponto P1 fevereiro/2019.

Ponto 1 fev/19	Fator de Enriquecimento								
Elementos	As	Ba	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
2,5	1,00	0,68	1,01	1,02	1,17	0,98	1,24	1,11	0,74
5	1,04	0,64	1,04	0,96	1,13	0,92	1,36	1,10	0,98
7,5	1,08	0,33	0,99	1,04	1,18	0,81	1,20	1,09	0,91
10	1,22	0,61	1,01	1,09	1,24	0,94	1,15	1,02	0,84
12,5	1,02	0,50	1,03	0,87	1,18	0,81	0,85	0,86	0,81
15	1,16	0,69	1,02	1,00	1,18	0,78	1,16	1,06	0,84
17,5	1,12	0,56	1,04	0,99	1,17	0,77	1,19	1,11	0,83
20	1,10	0,78	1,14	0,94	1,06	0,84	1,00	0,99	1,07
22,5	1,11	0,74	1,07	0,97	1,03	0,78	1,12	1,03	0,94
25	1,12	0,00	1,06	0,95	1,01	0,81	1,00	1,02	0,92
27,5	0,79	0,90	0,97	0,84	0,97	0,71	0,87	0,94	0,93
30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 13 - Fator de Enriquecimento ponto P2 fevereiro/2019

Ponto 2 fev/19	Fator de Enriquecimento									
Elementos	As	Ba	Cr	Cu	Cd	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
2,5	2,84	1,51	1,16	0,90	0,35	1,82	1,04	1,13	1,03	1,50
5	1,47	1,60	1,22	0,81	0,01	1,70	1,12	1,03	1,04	1,51
7,5	2,35	1,44	1,18	0,85	0,35	1,72	1,28	1,05	1,02	1,54
10	2,09	1,76	1,23	0,90	0,72	1,76	1,37	1,15	1,00	1,65
12,5	1,95	2,55	1,23	0,84	0,47	1,70	1,23	1,05	0,95	1,53
15	0,00	3,13	1,31	0,64	0,04	1,68	1,08	0,90	0,79	1,44
17,5	0,34	2,71	1,19	0,70	0,09	1,67	1,10	0,90	0,77	1,47
20	0,94	1,97	1,23	0,76	0,15	1,63	1,24	1,02	0,94	1,55
22,5	1,69	2,70	1,29	1,01	0,26	1,78	1,81	1,23	1,01	1,94
25	0,50	2,74	1,26	0,95	0,33	1,64	1,51	1,04	0,93	1,59
27,5	1,01	2,00	1,18	1,01	0,45	1,31	1,18	1,02	0,99	1,38
30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Em P2, como mostra a (Tabela 13), somente As e Ba apresentaram FE >2. Para o As, FE ficou entre 2 a 5 (enriquecimento moderado) de 2,5 a 10 cm, e para Ba, os resultados de FE de 12,5 a 17,5 cm e de 22,5 a 27,5 cm também ficaram na faixa enriquecimento moderado ($2 < FE < 5$).

Tabela 14 - Fator de Enriquecimento ponto P3 fevereiro/2019

Ponto 3 fev/19		Fator de Enriquecimento								
Elemento s	As	Ba	Cr	Cu	Cd	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
2,5	1,26	1,00	1,03	1,39	0,96	1,02	1,01	1,12	0,93	1,04
5	1,58	0,82	1,01	0,00	0,00	1,08	0,00	0,00	0,00	0,93
7,5	1,70	0,84	1,02	1,10	-0,53	1,11	1,10	1,07	0,92	0,86
10	1,29	1,05	1,05	1,41	-0,71	1,06	1,04	1,01	0,89	0,93
12,5	1,51	1,03	0,99	0,90	-0,34	1,05	1,08	0,95	0,89	0,87
15	1,41	0,98	0,99	0,95	0,02	1,04	1,09	1,06	0,97	0,87
17,5	1,38	0,93	1,04	1,00	-0,11	1,03	0,98	0,95	0,83	1,08
20	1,48	1,04	1,01	0,89	-0,10	1,00	1,09	1,05	0,95	0,96
22,5	1,03	1,16	0,98	0,86	0,25	1,02	1,09	0,99	0,91	1,04
25	1,04	0,96	0,97	0,84	0,04	1,01	1,01	0,95	0,89	1,15
27,5	1,21	0,40	1,02	0,91	0,57	1,02	0,93	0,96	0,90	0,97
30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Comparando os pontos P1 agosto/2018 e P1 fevereiro/2019, somente o ponto P1 agosto/2018 apresentou resultados de Fator de Enriquecimento >2 . Já os valores de FE 2,9 e 2,61 (enriquecimento moderado) no corte 17,5 e 20 cm se deve à mudança de textura, sendo que nessas profundidades houve um aumento da porcentagem de argila como mostra a (Figura 7). E Cu também teve o mesmo comportamento, sendo que nos 4 pontos onde os resultados de FE ficaram na faixa moderado ($2 < FE < 5$), houve mudanças de textura.

Nos perfis de fevereiro/2019, somente o ponto P2 mostrou resultados de FE >2 para As e Ba, e todos os perfis (P1 fevereiro/2019, P2 e P3) apresentaram FE <2 (baixo enriquecimento) para Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn. No ponto P2, os valores de FE ficaram entre 2 e 5 (enriquecimento moderado) para As nas primeiras camadas (0-10 cm). Já para Ba, de 12,5-17,5 cm e 22,5-27,5 cm, os valores de FE ficaram na faixa de enriquecimento moderado ($2 < FE < 5$). Comparando-se esses valores com a granulometria do perfil, foi possível observar que todos os valores de FE para Ba ficaram entre 2 a 3,13 quando aumentava a porcentagem de areia.

Além do cálculo de FE com os valores de *background*, este estudo calculou o Fator de Enriquecimento utilizando valores do NASC (Apêndice C)

No ponto P1 agosto/2018, usando o NASC, o FE para As, Ba e Zn ficou na faixa enriquecimento moderado ($2 < FE < 5$), sendo que para As, FE nas primeiras camadas de (0-7,5 cm); Ba nas últimas camadas (20-30 cm) e Zn somente um ponto em 17,5 cm. Cr; Fe; Mn e Ni FE <2 (baixo enriquecimento). Para P1 fevereiro/2019 Ba, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e

Zn FE <2 (baixo enriquecimento) e As FE >2 em quatro pontos: 10 cm (2,18); 15 cm (2,08); 17,5 cm (2,00) e 25 cm (2,01). Já em P2, somente para Ba e Zn obtiveram-se valores de FE entre 2 a 5 (enriquecimento moderado) em 1 ponto, para Ba em 15 cm e Zn em 22,5 cm. No ponto P3, diferentemente dos outros pontos, os resultados de FE para As ficaram acima de 2 de (0-30 cm), e isso se deve pelo aumento da concentração do As do ponto de transição rio-reservatório (30 cm) para o topo.

Comparando-se os resultados obtidos utilizando no cálculo do FE os valores de *background* e do NASC, vê-se que somente o As no ponto P1 agosto/2018 e Ba no ponto P2 mostraram resultados semelhantes. No entanto, os valores do FE usando NASC, se mostraram superestimados (com exceção do As), portanto, esse estudo utilizou os resultados do Fator de Enriquecimento utilizando os valores do *background* (30 cm) no cálculo do FE.

Comparando-se os resultados a trabalhos anteriores, vemos que os resultados reportados por MORAES(2011), mostraram FE considerado moderado para Cr e Zn, quando utilizado valores de fundo geoquímico regional, diferente dos resultados desse estudo. Para o Pb, assim como nas duas campanhas, o FE ficou abaixo de 2 (baixo enriquecimento).

ROCHA et al. (2015) e FRANKLIN (2017) utilizaram valores de background para o cálculo de FE, e os resultados foram semelhantes aos obtidos nas duas campanhas (2018 e 2019).

5.3.4 Índice de Geoacumulação

O Índice de Geoacumulação (IGeo) foi calculado para os elementos As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn. Para o IGeo foram utilizados os valores de *background* (camada de 30 cm), NASC e a equação elaborada por KIM, 2017, que considera a porcentagem dos finos.

Os resultados de IGeo utilizando o background (Tabelas 15-18), obtidos no presente estudo mostraram que no ponto P1 fevereiro/2019; P2 e P3, todos os elementos não apresentaram valores acima de 1, ou seja, esses pontos podem ser considerados como não poluídos para os elementos estudados.

Tabela 18 - Índice de Geoacumulação ponto P3 Fevereiro/2019.

Elementos	As	Ba	Cr	Cu	Fe %	Mn	Ni	Pb	Zn
2,5	-0,10	-0,43	-0,39	0,04	-0,40	-0,41	-0,27	-0,54	-0,38
5	0,24	-0,71	-0,41	0,00	-0,31	0,00	0,00	0,00	-0,53
7,5	0,26	-0,75	-0,47	-0,37	-0,35	-0,37	-0,40	-0,62	-0,71
10	-0,03	-0,33	-0,33	0,10	-0,31	-0,33	-0,38	-0,57	-0,49
12,5	0,17	-0,38	-0,43	-0,58	-0,35	-0,31	-0,49	-0,59	-0,62
15	0,01	-0,52	-0,50	-0,56	-0,44	-0,36	-0,40	-0,54	-0,68
17,5	-0,03	-0,59	-0,43	-0,50	-0,45	-0,52	-0,56	-0,76	-0,39
20	0,03	-0,48	-0,51	-0,70	-0,52	-0,40	-0,46	-0,61	-0,59
22,5	-0,49	-0,32	-0,57	-0,74	-0,51	-0,41	-0,55	-0,68	-0,47
25	-0,47	-0,57	-0,56	-0,77	-0,51	-0,50	-0,59	-0,69	-0,31
27,5	-0,16	-1,75	-0,41	-0,57	-0,41	-0,54	-0,50	-0,58	-0,48
30	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58

No ponto P1 de agosto/2018, os elementos As e Cu apresentaram IGeo acima de 1, apresentando alguma influência antrópica. Para o As, de 2,5 a 7,5 cm, os valores de IGeo ficaram entre 4 e 5 (Muito Poluído), de 10 a 12,5 cm ficaram entre 2 a 3 (Moderadamente Poluído a Poluído) e depois os valores diminuíram para não poluído (IGeo <1)

Na análise das campanhas inverno-verão, somente no ponto P1 agosto/2018 foram obtidos resultados de IGeo>1 para As e Cu. Nos três pontos coletados em fevereiro, todos os elementos apresentaram IGeo<1 (não poluído)

Para os resultados do IGeo utilizando o NASC (APÊNDICE D) nas duas campanhas os valores de IGeo ficaram abaixo de 1 (não poluído), para os elementos analisados por esse estudo, dessa forma, indicando que não há contribuição antrópica para esses elementos.

Comparando-se com os resultado obtidos na literatura, o estudo de MORAES (2011) que utilizou como nível de referência valores do fundo geoquímico natural regional; composição média da crosta terrestre; composição média de folhetos e composição média dos sedimentos para o cálculo do IGeo, observou-se o mesmo comportamento para o Cu em relação aos valores de IGeo do ponto P1 de agosto/2018, com valores de IGeo entre 1 e 2 (moderadamente poluído) nas primeiras camadas, mas diferentemente do presente estudo, MORAES (2011) obteve valores de IGeo moderadamente poluído para Pb. Já para os elementos Cr, Ni e Zn, foi obtido IGeo< 1 (não poluído), o que aponta que não houve alterações entre 2009 e 2018-2019 para esses elementos. Já no estudo de ROCHA et al. (2015), os resultados do IGeo foram semelhantes aos obtidos nos pontos P1fevereiro/2019, P2 e P3 utilizando o background (30 cm) e utilizando o NASC, todos os resultados também indicaram IGeo<1(não poluído) para os elementos analisados por esse estudo.

Utilizando-se o cálculo de IGeo (Equação 6), os resultados foram semelhantes aos obtidos com a aplicação da Equação 5, como mostra o APÊNDICE E, demonstrando que não houve variação utilizando-se a porcentagem de finos no cálculo.

5.3.5 Correlação de Pearson e Análise Fatorial

Foram realizadas análises fatoriais com extração de Componentes Principais (CP), para observar melhor a distribuição dos dados quanto à relevância dos fatores por componente. A análise fatorial reduziu o conjunto de dados das concentrações dos elementos analisados, a partir desta análise foram extraídas as três primeiras componentes, que representam cerca de 75,0% da variância total dos dados. As tabelas com os dados totais estão localizadas no Apêndice F.

Como descrito anteriormente, o ponto P1 foi escolhido para análise sazonal, uma coleta no inverno (agosto/2018) e outra no verão (fevereiro/2019). Na (Tabela 19) são apresentadas as cargas fatoriais maiores obtidas na análise do perfil de agosto/2018, sendo que somente duas componentes CP1 (Componente principal 1) e CP2 (Componente Principal 2) apresentaram cargas fatoriais maiores, ou seja, ficaram acima de 0,5.

Tabela 19 - Cargas fatoriais das Componentes Principais extraídas pela análise fatorial P1 Agosto/2018.

Variável	CP1	CP2
Silte	0,911	-0,214
As	0,911	-0,296
Br	0,918	-0,125
Ce	0,989	-0,032
Co	0,857	-0,474
Cr	0,845	-0,494
Cu	0,832	0,034
Eu	0,917	-0,147
Fe%	0,933	-0,317
La	0,886	-0,184
Mn	0,251	0,861
Ni	0,958	-0,126
Pb	0,957	-0,241
Sb	0,880	0,226
Sc	0,887	-0,448

Quanto maior a carga fatorial, maior será a correlação com determinado fator. No caso do P1 agosto/2018 a CP1 é composta por: silte, As, Br, Ce, Co, Cr, Cu, Eu, Fe, La, Ni, Pb, Sb e Sc, enquanto, que para CP2 somente Mn que obteve carga fatorial maior. Para o ponto P1 de fevereiro/2019 (Tabela 20), foram obtidos valores de cargas fatoriais maiores,

para duas componentes principais a CP1 representada por areia, K, Na, Rb e a CP2 composta por: Hf, Lu e Yb.

Tabela 20 - Cargas fatorais das Componentes Principais extraídas pela análise fatorial P1 Fevereiro/2019.

Variável	CP1	CP2
Areia	0,829	-0,169
Hf	0,382	0,875
K%	0,913	0,220
Lu	-0,370	0,852
Na	0,960	0,161
Rb	0,856	0,251
Yb	-0,341	0,862

Comparando-se os resultados do P1 agosto/2018 e fevereiro/2019, não houve nenhuma semelhança entre as duas campanhas; o P1 agosto/2018, na análise granulométrica, apontou que a porcentagem de silte se manteve constante ao longo do perfil, porém no ponto P1 fevereiro houve um aumento na porcentagens de areia nas últimas camadas e na análise da concentração versus profundidade foi observado um aumento na concentração dos elementos K, Na e Rb nas últimas camadas. Isso pode ser explicado pela afinidade entre areia, K e Na, pois segundo a literatura é comum altas concentrações de Na e K em areia.

Tabela 21 - Cargas fatorais das Componentes Principais extraídas pela análise fatorial P2

Variável	CP1	CP2
Areia	0,852	0,177
Br	0,506	0,774
Co	0,137	0,932
Fe%	0,103	0,959
Hf	0,927	0,331
K%	0,933	-0,001
Lu	0,503	0,756
Mn	-0,657	0,311
Na	0,968	0,182
Nd	-0,517	0,703
Rb	0,832	0,518
Ta	0,092	0,872
Yb	0,380	0,833
Zn	-0,278	0,879

No ponto P2 (Tabela 21), a Componente principal 1 é representada por areia, Hf, K, Na e Rb e a Componente Principal 2 por Br, Co, Fe, Lu, Nd, Ta, Yb e Zn.

Já no ponto P3 (Tabela 22), diferentemente dos demais pontos, apresentou 4 componentes principais sendo que a CP1 é composta por areia e Na; CP2 somente Hf ficou

acima de 0,5 com 0,749; CP3 os elementos K e Tb com os valores 0,838 e 0,718 respectivamente e o CP4 apenas Lu com 0,885.

Tabela 22 - Cargas fatorais das Componentes Principais extraídas pela análise fatorial P3

Variável	CP1	CP2	CP3	CP4
Areia	0,972	-0,115	0,082	-0,036
Hf	-0,466	0,749	0,232	0,290
K%	-0,208	-0,198	0,838	0,112
Lu	-0,189	-0,150	-0,234	0,885
Mn	-0,952	-0,002	0,067	-0,039
Na	0,829	0,362	0,347	-0,041
Tb	-0,152	-0,439	0,718	0,245

Os três perfis de fevereiro mostraram alguns resultados parecidos, como a areia e o Na no grupo da CP1 e o Hf no segundo grupo CP2. O ponto P2 apresentou mais elementos no segundo fator, ao contrário dos pontos P1 e P3. Os elementos Br, Co, Fe, Lu, Nd, Ta, Yb, Zn possivelmente estão relacionados ao grupo do Fe. Já no ponto P3, o primeiro fator corresponde a 73,84 % da variância total, no caso a areia e Na tem uma alta correlação.

Comparando-se os resultados com os obtidos por ROCHA et al. (2015), os dados das cargas maiores ficaram similares com o ponto P1 de agosto/2018 para os elementos Ce, Eu, La. Essa semelhança pode estar relacionada com a litologia da região.

Os resultados da análise das componentes principais dos perfis sedimentares nas duas campanhas (2018 e 2019) afirmam a importância do estudo da granulometria e das concentrações dos elementos em perfis sedimentares para um melhor entendimento do reservatório.

Além da Análise de Componentes Principais, foi realizada a Análise de Cluster pelo método de Ward e distâncias euclidianas. O objetivo desta análise foi verificar possíveis semelhanças entre os elementos e a granulometria.

Figura 30 - Dendrograma das concentrações dos elementos determinados em Agosto 2018

Na análise de P1 agosto/2018, dois grupos foram identificados (Figura 30): Grupo 1, formado por 2 subgrupos: subgrupo A: Sm; Nd; P e Mn, subgrupo B: Sb; Cu; Cr; Fe; Co; Br; Eu; As; La; Pb; Ni; Ce e Silte. Grupo 2, também é formado por 2 subgrupos: subgrupo A: Yb; Ta; Lu; U; Rb; Na; K; Hf; Cs e Ba; subgrupo B: Tb; Zn; Areia; Sb; Th; Ca e Argila. Pelos resultados da Análise de Cluster, é possível observar que eles confirmam os resultados observados no comportamento dos metais ao longo do perfil, com elementos associados ao Fe agrupados com silte e elementos como Na e K e Hf associados à areia.

Figura 31 - Dendrograma das concentrações dos elementos determinados em P1

Na análise de P1 fevereiro/2019, dois grupos foram observados (Figura 31): Grupo 1, formado por 2 subgrupos: subgrupo A: Yb e Lu, subgrupo B: Hf; Ba; Rb; Na; K e Areia. No Grupo 2 também houve uma subdivisão sendo que a maioria dos elementos se agruparam no subgrupo A. Comparando esse agrupamento com os resultados da análise da concentração versus profundidade, todos os elementos que se agruparam no Grupo 2, subgrupo A, estão no primeiro grupo (concentrações maiores nas primeiras camadas), associados a silte e argila, enquanto que os do Grupo 1 estão associados à areia, e mostraram concentrações maiores nas camadas mais profundas, confirmando as maiores concentrações observadas pré-reservatório.

Figura 32 - Dendrograma das concentrações dos elementos determinados em P2

Na análise de P2 (Figura 32): Grupo 1, subgrupo A: Rb; Na; Hf; Ba; K e Areia; subgrupo B: engloba a maioria dos elementos junto com silte, que no P2 tem altas porcentagens. No Grupo 2, a argila está agrupada com Cu; Pb; Sc; Eu; Cr; P; Ni; U; Sm; La; Th; Ce; Tb. Como observado na análise das concentrações dos elementos no perfil, no P2 o percentual de argila aumentava nas últimas camadas e os elementos citados no Grupo 2 também aumentam suas concentrações nas últimas camadas, o que explica esse agrupamento.

Figura 33 - Dendrograma das concentrações dos elementos determinados em P3

Na análise de P3 (Figura 33), observam-se 2 grandes grupos, sendo que o Grupo1, como no ponto P1, também, agrupa K, Na, Rb com Areia. Porém, como em P2, a argila, silte e areia estão separados, e o agrupamento de silte contém a maioria dos elementos.

6 CONCLUSÃO

Os resultados exibidos no presente trabalho, com relação à concentração de metais tóxicos, maiores e traço em perfis sedimentares, confirmaram a importância da análise de perfis sedimentares para compreender melhor a situação atual do reservatório Ponte Nova, ao comparar as concentrações dos elementos analisados nas primeiras camadas (mais recentes) com as das últimas camadas (mais antigas). Além disso, os resultados da análise granulométrica foram fundamentais, pois auxiliaram na obtenção da transição sedimentar,

Com relação aos resultados do Fator de Enriquecimento, no ponto P1 agosto/2018, os resultados de As apontaram enriquecimento significativo nas primeiras camadas e enriquecimento moderado entre 17,5 a 20 cm; Cu os resultados dos 4 pontos com FE entre 2 a 5 (enriquecimento moderado) e Mn somente um ponto o FE >2. Porém, analisando os resultados da concentração versus profundidade observou-se que elementos normalizadores como Fe e Sc acompanharam o comportamento do As, Cu e Mn, portanto é possível concluir que não há enriquecimento antrópico. Já para P2 os resultados de FE para As e Ba ficaram na faixa de enriquecimento moderado, mas comparando-se com os resultados da granulometria pode-se concluir que esses valores de FE se devam à litologia da região e não sejam decorrentes de contribuição antrópica.

Os resultados do IGeo foram semelhantes aos do obtidos pelo FE em relação aos pontos P1 agosto/2018 (As e Cu); P1 fevereiro/2019 e P3, o que reafirma que não há contribuição antrópica no reservatório Ponte Nova.

Pelos resultados obtidos, e pelos parâmetros de avaliação de contaminação utilizados, pode-se concluir que o reservatório de Ponte Nova não apresenta evidências importantes de contaminação antrópica para os elementos estudados, e que, ao longo da última década, não houve variação significativa da contaminação e distribuição dos elementos em estudo nos sedimentos do reservatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Conjuntura Dos Recursos Hídricos No Brasil. Brasília, 2019. Disponível em < <http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.bb39ac07.pdf>> Acesso Junho 2020.

ALEGRE, Gabriel Fonseca. Avaliação ecotoxicológica de sedimentos do rio Tietê, entre os municípios de Salesópolis e Suzano, SP. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BAIRD, C.; CANN, M. Química Ambiental. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 844p.

BOSTELMANN, E. Avaliação da concentração de metais em amostras de sedimento do reservatório Billings, braço Rio Grande, São Paulo, Brasil. 2006. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CAMPOS, Valéria Nagy de Oliveira. O Comitê de Bacia Hidrográfica do Alto Tietê e o Consejo de Cuenca del Valle de México. Tese (Doutorado em Integração da América Latina) - Integração da América Latina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. doi:10.11606/T.84.2008.tde-22112010-121756. p 196-234.

CCME –Canadian Council of Ministers of the Environment. 2012. Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life. Protocol for derivation of Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life. 2012

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo 2016. São Paulo: CETESB, 2017. (Série Relatórios). Disponível em: Acesso em 18 maio. 2018

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade das águas superficiais no estado de São Paulo 2008. São Paulo: CETESB, 2009. 528p. (Série Relatórios). Disponível em: . Acesso em: 10 mar. 2017.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n.º 357, de 17 de março de 2005. Publicada no DOU n.53, de 18 de março de 2005, Seção 1, p. 58-63.

COUTINHO, S. N. Estudo de bioacumulação de metais tóxicos e elementos traço em amostras de macrófitas aquáticas flutuantes do Reservatório Guarapiranga, São Paulo - SP, Brasil. 2018. 173p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

DAEE - Departamento de águas e energia elétrica 2020. Disponível em: <http://www.daee.sp.gov.br/site/sistema-produtor-alto-tiete/>. Acesso em: 20 out. 2020.

EQUIPE ESTATCAMP. *Software Action Stat*. 2014. São Carlo: Disponível em: <http://portalaction.com.br>. Acesso em 21 jan. 2021

FALQUETO, Milena Aímola. Avaliação do índice de qualidade da água (IQA) e dos elementos químicos nas águas e nos sedimentos do rio Corumbataí-SP. 2008. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Ecologia de Agroecossistemas, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

FAVARO, D. I. T., MOREIRA, S R D, MOREIRA, Edson G, MAZZILLI, B P, CAMPAGNOLLI, F. Chemical Characterization and Recent Sedimentation Rates in Sediment Cores from Rio Grande Reservoir, São Paulo, Brazil. J. Radioanal. Nucl. Chem. 273, p.451 - 463, 2007.

FAVARO, D. I. T.; ALEGRE, G. F.; BORRELY, S. I.; VUKAN, W.; VIEIRA, A. S.; OLIVEIRA, S. M. B. Major and trace element assessment of Tietê river sediments, São Paulo, Brazil. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, v. 299, n. 1, p. 797-805, 2013.

FAVARO D.I.T., ALEGRE G.F., BORRELY S.I., VUKAN W, VIEIRA A.S., OLIVEIRA S.M.B. Major and trace element assessment of Tietê River sediments, São Paulo, Brazil. J Radioanal Nucl Chem v. 299, n. 1, p.797-805, 2014.

FERREIRA, Clarisse Wanderley Souto. Sedimentação em um reservatório de água no semiárido de Pernambuco. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco. . Recife. CFCH. Programa de Pós–Graduação em Geografia, 2012.

FRANKLIN, R. L. Geoquímica e sedimentação em represas no Estado de São Paulo, Brasil. 2017. Tese (Doutorado) Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FONSECA, G. A. B. Contribuição Antrópica na Poluição de Reservatórios Hidrelétricos: o caso da Usina Hidrelétrica de São Simão - GO/MG - Rio de Janeiro/RJ. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/fonseca_barbosa.pdf. Acesso em março/2018.

GIANNINI, Paulo César Fonseca; MELO, Mario Sergio de. Do grão à rocha sedimentar: erosão, deposição e diagênese. In: Decifrando a Terra. 2009. 2 ed. São Paulo. p. 240-277. 2009.

GUIMARÃES, G. M. Avaliação da concentração de metais e elementos traço em amostras de sedimento do reservatório Guarapiranga, São Paulo-SP, Brasil. 171f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

HOU, X, JONES, B.T. Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry. In: Meyers, R.A. Encyclopedia of Analytical Chemistry, Ed. John Wiley & Sons. 21p. 2008

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Use of research reactors for neutron activation analysis, IAEA-TECDOC-1215, Viena, Austria, p. 1- 6, 2001.

JORCIN, Adriana; NOGUEIRA, Marcos G. Temporal and spatial patterns based on sediment and sediment–water interface characteristics along a cascade of reservoirs (Paranapanema River, south-east Brazil). Lakes & Reservoirs: Research & Management, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2005.

Junqueira, L.S. ;Silva, S.A., FAVARO, D. I. T. . Avaliação das concentrações de elementos terras raras, metais e traço em sedimentos do reservatório Graminha, ESP, pela técnica de ativação neutrônica. In: International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2017, 2017, Belo Horizonte. Proceedings of the International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2017, 2017. v. 01. p. 01-17.

KIM, B. S. M. Índice de Qualidade Ambiental para avaliação de metais e semimetais em sedimentos do Complexo Estuarino de Santos e São Vicente (SP, Brasil). 2017. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Química) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017

LANGE, Camila Neves. Avaliação da contaminação de solos e água subterrânea por elementos potencialmente tóxicos em um pátio de recolhimento de veículos. Estudo de caso: Ribeirão Pires, SP. 2018. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. doi:10.11606/T.85.2018.tde-25042018-104820.

LOPES, Renato Alessandro. Extração sequencial de metais pesados em sedimentos de fundo ao longo do rio Tietê (SP): Partição entre as fases lábil e residual. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MONTEIRO JUNIOR, Adalberto José. Caracterização limnológica e compartimentação do reservatório de Ponte Nova, Alto Tietê, SP-uma contribuição ao seu manejo. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo

MORAES, Graziela Meneghel de. Distribuição dos metais pesados em sedimentos de fundo na bacia do alto Tietê: Fatores de enriquecimento e Classes de poluição. 2011. Dissertação (Mestrado em Química na Agricultura e no Ambiente) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
doi:10.11606/D.64.2011.tde-01022012-155058.

MORTATTI, Jefferson; HISSLER, Christophe; PROBST, Jean-Luc. Distribuição de metais pesados nos sedimentos de fundo ao longo da bacia do Rio Tietê. *Geologia USP. Série Científica*, v. 10, n. 2, p. 3-11, 2010.

MORTATTI, J., MENEGHEL, G.M., PROBST, J.L. Heavy metal distribution in recent sediments along the Tiete River basin (Sao Paulo, Brazil). *Geochem. J.*, 46(13), p. 13-19, 2012.

NASCIMENTO, Marcos RL; MOZETO, Antonio A. Reference values for metals and metalloids concentrations in bottom sediments of Tiete River basin, Southeast of Brazil. *Soil & Sediment Contamination*, v. 17, n. 3, p. 269-278, 2008.

NORY, Renata Mendes. Identificação de fontes de contaminação urbana em poeiras de túneis da cidade de São Paulo por meio de caracterização elementar e isotópica. 2018. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
doi:10.11606/D.85.2019.tde-08022019-112203.

PITRAT, D. Avaliação da contaminação por metais em rios: estudo de caso da bacia do rio Passaúna. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná- UFPR. Curitiba, 231p. 2010.

RIBEIRO JUNIOR, Iberê Souza. Uso de sistema de coincidência gama-gama associado à espectroscopia simples em medidas de análise por ativação neutrônica. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Aplicações). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

ROCHA, F. R., SILVA, P. S. C., CASTRO, L. M., BORDON, I. C. C. L., OLIVEIRA, S. M. B.; FÁVARO, D. I. T. NAA and XRF technique bottom sediment assessment for major and trace elements: Tietê River, São Paulo State, Brazil. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 306(3), 655–665. 2015.

ROCHA, F.R., I.C.C.L. Bordon, P.S.C. SILVA, D.I.T. FAVARO, S.A. SILVA, R. L. FRANKLIN, F.J. FERREIRA, “Assessment of metal, trace and rare earth element concentrations in a sedimentary profile from Ponte Nova Reservoir, Sao Paulo state, Brazil, by NAA,” INAC 2015: International Nuclear Atlantic Conference Brazilian Nuclear Program State Policy for a sustainable world, Brazil , 2015.

SANTIN, Janaína Rigo; GOELLNER, Emanuelle. A gestão dos recursos hídricos e a cobrança pelo seu uso. Sequência (Florianópolis), Florianópolis ,n. 67,p. 199-221, Dec. 2013 . Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2177-70552013000200008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 20 julho 2019

SILVA, Paulo SC et al. Metal distribution in sediment cores from São Paulo State coast, Brazil. *Marine pollution bulletin*, v. 62, n. 5, p. 1130-1139, 2011.

SILVA, L. S. Avaliação da concentração de metais e elementos terras raras em amostras de sedimentos dos reservatórios dos sistemas Billings e Guarapiranga. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

SUTHERLAND, R. A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, v. 39(6), p. 611-627, 2000.

TAYLOR, S.R. & MC LENNAN, S.M. The Continental Crust: its composition and evolution. Oxford, London: **Blackwell Scientific**, ISBN 0 632 011483, 1985.

US EPA – United States Environmental Protection Agency. Microwave Acid Digestion of Aqueous samples and extracts. Method 3015A, 2007

US EPA – United States Environmental Protection Agency. Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sluges, Soils, and Oils. Method 3051A, 2007

WHO – World Health Organization. Arsenic and arsenic compounds. Geneva: WHO, 2001. 2 nd. 521 p. (Environmental Health Criteria 224). Disponível em: <<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc224.htm#1.2.>> Acesso em 16 março. 2018

APÊNDICE A – Resultados das concentrações de elementos analisados na coluna d'água nas duas campanhas 2018/2019.

Tabela A1 - Concentrações dos elementos analisados (em $\mu\text{g L}^{-1}$) por ICP-MS nas amostras da coluna d' água P1 agosto/2018

(Continua)

	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Hf	Hg	Li
Superior T	23,0	0,10	3,0	<0,002	0,017	0,04	0,16	0,09	64,0	<0,004	<0,005	0,08
Superior D	11,1	0,09	1,9	<0,002	0,009	0,03	0,16	0,09	10,3	<0,004	<0,005	0,08
3 metros T	19,9	0,09	3,0	<0,002	0,017	0,03	0,16	0,23	65,8	<0,004	<0,005	0,08
3 metros D	13,1	0,09	2,0	<0,002	0,009	0,04	0,16	0,07	9,3	<0,004	<0,005	0,08
6 metros T	17,6	0,17	3,3	0,0023	0,021	0,10	0,17	0,07	83,8	0,04	0,22	0,07
6 metros D	15,2	0,09	1,8	<0,002	0,008	0,04	0,16	0,34	11,6	0,01	0,06	0,08
9 metros T	30,2	0,11	3,8	<0,002	0,020	0,04	0,16	0,12	107,6	0,01	0,03	0,07
9 metros D	17,0	0,08	1,3	<0,002	0,011	0,03	0,16	0,09	16,1	<0,004	0,02	0,07
12 metros T	26,3	0,11	4,7	<0,002	0,021	0,03	0,17	0,21	102,6	<0,004	0,02	0,07
12 metros D	16,8	0,08	1,7	<0,002	0,011	0,05	0,16	0,12	47,8	<0,004	0,01	0,07
16 metros T	3700	0,24	32,1	0,0152	0,65	1,72	0,45	1,25	4502,0	0,02	0,01	1,15
16 metros D	22,9	0,11	1,3	<0,002	0,030	0,06	0,16	0,18	348,5	<0,004	<0,005	0,07

Tabela A1 - Concentrações dos elementos analisados (em $\mu\text{g L}^{-1}$) por ICP-MS nas amostras da coluna d' água P1 agosto/2018

	(Conclusão)											
	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Sc	Se	Sr	Ti	U	V	Zn
Superior T	15,18	0,02	<0,05	0,02	0,01	0,60	0,14	12,5	0,35	0,006	0,04	0,30
Superior D	0,38	0,01	<0,05	0,01	0,01	0,60	0,11	12,5	0,28	0,005	0,02	0,27
3 metros T	15,32	0,01	<0,05	0,09	0,01	0,60	0,14	12,8	0,35	0,006	0,06	0,30
3 metros D	0,25	0,01	<0,05	0,03	0,01	0,59	0,12	12,5	0,31	0,005	0,04	0,34
6 metros T	18,26	0,04	0,03	0,03	0,01	0,71	0,17	12,5	0,39	0,010	0,08	0,20
6 metros D	0,37	0,01	<0,05	0,04	0,01	0,59	0,14	12,3	0,28	0,005	0,04	0,49
9 metros T	22,69	0,01	0,01	0,03	0,01	0,60	0,13	12,5	0,39	0,007	0,06	0,19
9 metros D	0,67	0,01	0,02	0,04	0,01	0,60	0,14	12,4	0,34	0,005	0,03	0,33
12 metros T	22,08	0,01	<0,05	0,02	0,01	0,60	0,13	12,5	1,05	0,006	0,06	0,23
12 metros D	1,13	0,01	<0,05	0,04	0,01	0,59	0,13	12,6	0,36	0,005	0,04	0,30
16 metros T	91,31	0,01	0,41	3,83	0,02	1,37	0,29	14,5	37,20	0,298	3,25	4,22
16 metros D	50,01	0,02	<0,05	0,03	0,01	0,62	0,14	11,8	0,42	0,007	0,10	0,56

n.d: Não determinado

T : amostra Total

D: amostra Dissolvida

Tabela A2 - Concentrações dos elementos analisados (em $\mu\text{g L}^{-1}$) por ICP-MS nas amostras da coluna d' água P1 fevereiro/2019

(Continua)

	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Hf	Hg	Li
Superior T	24,6	0,13	1,1	0,0056	0,03	0,04	0,13	0,09	93,5	<0,004	0,08	0,05
Superior D	14,0	0,09	0,4	<0,002	0,01	0,03	0,12	0,10	34,4	<0,004	0,05	0,05
3 metros T	23,9	0,09	1,0	0,0002	0,02	0,04	0,12	0,04	96,3	<0,004	0,04	0,04
3 metros D	12,8	0,09	0,3	<0,002	0,01	0,04	0,11	0,01	38,9	<0,004	0,02	0,06
6 metros T	20,0	0,10	0,7	<0,002	0,01	0,03	0,07	0,44	107,2	<0,004	<0,005	0,03
6 metros D	11,9	0,08	0,3	<0,002	0,00	0,03	0,10	0,01	34,9	<0,004	<0,005	0,03
9 metros T	47,6	0,13	7,2	0,0003	0,09	0,04	0,11	0,06	1533,0	<0,004	<0,005	0,06
9 metros D	24,3	0,12	1,8	0,0012	0,09	0,04	0,11	0,13	1330,0	n.d	<0,005	0,07
12 metros T	50,3	0,19	10,6	0,0025	0,16	0,09	0,17	0,92	4184,0	<0,004	0,03	0,17
12 metros D	39,8	0,17	8,1	<0,002	0,15	0,05	0,17	0,39	4095,0	<0,004	0,03	0,16
15 metros T	172,6	0,59	49,0	0,0026	0,47	0,19	0,51	0,44	14810,0	0,016	0,06	0,48
15 metros D	49,1	0,21	13,2	0,0001	0,16	0,07	0,17	0,06	5030,0	<0,004	0,02	0,17
18 metros T	299,5	0,26	21,3	0,0015	0,24	0,22	0,19	0,36	5859,0	<0,004	0,01	0,19
18 metros D	51,1	0,20	16,5	<0,002	0,17	0,08	0,17	0,06	5472,0	<0,004	0,02	0,16

Tabela A2 - Concentrações dos elementos analisados (em $\mu\text{g L}^{-1}$) por ICP-MS nas amostras da coluna d' água P1 fevereiro/2019

	(Conclusão)											
	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Sc	Se	Sr	Ti	U	V	Zn
Superior T	7,78	0,17	0,07	0,03	0,02	0,43	0,12	10,4	0,37	0,028	<0,05	n.d
Superior D	0,43	0,05	0,05	0,01	0,01	0,40	0,12	10,5	0,22	0,004	<0,05	0,08
3 metros T	7,66	0,03	0,05	0,03	0,01	0,40	0,12	10,7	0,29	0,005	<0,05	n.d
3 metros D	0,36	0,02	0,06	0,04	0,01	0,39	0,14	11,0	0,22	0,004	<0,05	0,72
6 metros T	7,15	0,01	0,04	0,01	0,01	0,28	0,15	11,1	0,17	0,001	<0,05	0,26
6 metros D	0,18	0,01	0,04	0,01	0,01	0,31	0,13	10,8	0,17	0,002	<0,05	0,46
9 metros T	85,7	0,01	0,06	0,02	0,00	0,37	0,16	14,9	0,36	0,005	<0,05	n.d
9 metros D	88,3	0,01	0,06	0,02	0,01	0,37	0,13	13,4	0,25	0,003	<0,05	0,58
12 metros T	201,1	0,15	0,04	0,11	0,01	0,78	0,18	15,4	0,70	0,028	0,22	1,06
12 metros D	199,8	0,05	0,01	0,05	0,01	0,78	0,16	14,6	0,60	0,010	0,20	2,63
15 metros T	740,9	0,11	0,13	0,16	0,02	2,43	0,53	45,1	2,41	0,047	0,69	1,51
15 metros D	248,1	0,03	0,05	0,05	0,01	0,81	0,19	15,0	0,78	0,014	0,20	1,58
18 metros T	273,0	0,03	0,08	0,70	0,01	0,87	0,19	15,9	2,69	0,053	0,74	1,13
18 metros D	268,8	0,03	0,02	0,04	0,01	0,80	0,19	14,8	0,75	0,015	0,21	0,89

n.d: Não determinado

T : amostra Total

D: amostra Dissolvida

Tabela A3 - Concentrações dos elementos analisados (em µg L⁻¹) por ICP-MS nas amostras da coluna d' água P2 fevereiro/2019

	(Continua)											
	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Hf	Hg	Li
Superior T	27,3	0,09	4,1	<0,002	0,05	0,05	0,15	0,11	555,2	<0,004	0,01	0,12
Superior D	13,2	0,08	0,6	<0,002	0,01	0,02	0,16	0,04	15,69	<0,004	0,01	0,13
3,5 metros T	22,9	0,10	4,5	<0,002	0,05	0,05	0,15	0,16	502,6	<0,004	0,01	0,12
3,5 metros D	15,2	0,08	0,3	0,001	0,01	0,03	0,15	0,16	241,5	<0,004	<0,05	0,12
7 metros T	33,7	0,18	9,8	<0,002	0,30	0,06	0,18	0,16	3605	<0,004	0,01	0,13
7 metros D	24,1	0,18	3,2	<0,002	0,29	0,07	0,18	0,07	3428	<0,004	0,01	0,13
10 metros T	265,0	0,51	19,3	0,005	0,74	0,46	0,30	0,36	16170	<0,004	0,02	0,20
10 metros D	31,1	0,42	15,0	<0,002	0,60	0,17	0,25	1,16	15340	<0,004	0,01	0,14

Tabela A3 - Concentrações dos elementos analisados (em $\mu\text{g L}^{-1}$) por ICP-MS nas amostras da coluna d' água P2 fevereiro/2019

	(Conclusão)											
	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Sc	Se	Sr	Ti	U	V	Zn
Superior T	23,89	0,02	0,03	0,05	0,02	0,70	0,12	11,5	0,60	0,007	0,10	0,33
Superior D	3,27	0,01	<0,05	n.d	0,01	0,67	0,14	10,4	0,37	0,005	0,04	0,60
3,5 metros T	23,94	0,02	0,01	0,26	0,01	0,69	0,14	11,6	0,53	0,007	0,09	0,46
3,5 metros D	1,25	0,01	<0,05	0,03	0,01	0,69	0,12	10,5	0,46	0,006	0,07	1,32
7 metros T	194,1	0,02	0,02	0,05	0,01	0,75	0,14	17,2	0,70	0,010	0,14	0,42
7 metros D	192,6	0,01	0,02	0,02	0,01	0,76	0,16	15,1	0,56	0,007	0,11	0,85
10 metros T	401,4	0,03	0,18	1,29	0,01	1,14	0,22	26,0	5,28	0,082	1,26	1,80
10 metros D	395,1	0,02	0,05	0,11	0,01	1,08	0,22	25,0	1,07	0,015	0,33	2,06

n.d: Não determinado

T : amostra Total

D: amostra Dissolvida

Tabela A4 - Concentrações dos elementos analisados (em $\mu\text{g L}^{-1}$) por ICP-MS nas amostras da coluna d' água P3 fevereiro/2019

	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Hf	Hg	Li
Superior T	19,4	0,09	0,7	<0,002	0,02	0,01	0,16	0,10	138,9	<0,004	<0,05	0,11
Superior D	7,4	0,1	0,1	<0,002	0,0	0,0	0,1	0,1	38,7	<0,004	<0,05	0,1
	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Sc	Se	Sr	Ti	U	V	Zn
Superior T	10,14	0,02	<0,05	0,02	0,01	0,63	0,1	10,3	0,43	0,007	0,05	0,75
Superior D	3,22	0,01	<0,05	n.d	0,01	0,63	0,1	10,3	0,34	0,006	0,03	0,82

n.d: Não determinado

T : amostra Total

D: amostra Dissolvida

APÊNDICE B – Resultados das concentrações de elementos analisados nos perfis de sedimento nas duas campanhas 2018/2019.

Tabela B1 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (mg kg⁻¹) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P1 agosto/2018

(Continua)

	As	Ba	Br	Ca %	Ce	Co	Cr	Cs	Eu	Fe %
2,5	4,07 $\pm$ 0,78	174 $\pm$ 16	74 $\pm$ 13	0,48 $\pm$ 0,18	150 $\pm$ 3	8,0 $\pm$ 0,2	44 $\pm$ 4	3,82 $\pm$ 0,18	1,68 $\pm$ 0,14	4,25 $\pm$ 0,10
5	4,12 $\pm$ 0,79	190 $\pm$ 16	45 $\pm$ 8	0,65 $\pm$ 0,14	143 $\pm$ 3	7,2 $\pm$ 0,1	46 $\pm$ 4	3,42 $\pm$ 0,16	1,55 $\pm$ 0,12	3,84 $\pm$ 0,10
7,5	3,89 $\pm$ 0,74	207 $\pm$ 17	30 $\pm$ 5	0,65 $\pm$ 0,02	137 $\pm$ 3	7,3 $\pm$ 0,1	44 $\pm$ 4	4,03 $\pm$ 0,18	1,52 $\pm$ 0,11	3,38 $\pm$ 0,88
10	1,23 $\pm$ 0,23	389 $\pm$ 28	14 $\pm$ 3	0,48 $\pm$ 0,02	112 $\pm$ 2	5,2 $\pm$ 0,1	26 $\pm$ 3	5,63 $\pm$ 0,25	1,16 $\pm$ 0,1	1,95 $\pm$ 0,05
12,5	1,16 $\pm$ 0,22	333 $\pm$ 16	17 $\pm$ 3	0,56 $\pm$ 0,02	120 $\pm$ 3	4,6 $\pm$ 0,1	24 $\pm$ 2	5,42 $\pm$ 0,23	1,17 $\pm$ 0,09	1,65 $\pm$ 0,04
15	0,24 $\pm$ 0,05	485 $\pm$ 35	5 $\pm$ 1	0,60 $\pm$ 0,02	100 $\pm$ 2	4,9 $\pm$ 0,8	22 $\pm$ 2	6,75 $\pm$ 0,29	1,11 $\pm$ 0,08	1,41 $\pm$ 0,03
17,5	0,39 $\pm$ 0,06	483 $\pm$ 26	3 $\pm$ 1	0,68 $\pm$ 0,01	88 $\pm$ 2	4,6 $\pm$ 0,1	25 $\pm$ 2	6,94 $\pm$ 0,30	1,07 $\pm$ 0,09	1,37 $\pm$ 0,03
20	0,38 $\pm$ 0,07	648 $\pm$ 69	1,0 $\pm$ 0,3	0,71 $\pm$ 0,09	90 $\pm$ 2	5,1 $\pm$ 0,1	28 $\pm$ 1	8,09 $\pm$ 0,38	1,01 $\pm$ 0,08	1,45 $\pm$ 0,01
22,5	0,28 $\pm$ 0,07	584 $\pm$ 62	1,0 $\pm$ 0,3	0,72 $\pm$ 0,09	87 $\pm$ 2	4,9 $\pm$ 0,1	25 $\pm$ 1	7,94 $\pm$ 0,37	1,07 $\pm$ 0,06	1,45 $\pm$ 0,01
25	0,18 $\pm$ 0,06	653 $\pm$ 69	1,0 $\pm$ 0,3	0,83 $\pm$ 0,11	95 $\pm$ 2	5,1 $\pm$ 0,3	29 $\pm$ 1	8,17 $\pm$ 0,38	1,07 $\pm$ 0,07	1,45 $\pm$ 0,01
27,5	0,15 $\pm$ 0,06	612 $\pm$ 65	1,0 $\pm$ 0,4	0,73 $\pm$ 0,09	91 $\pm$ 2	5,2 $\pm$ 0,3	27 $\pm$ 1	8,05 $\pm$ 0,38	0,75 $\pm$ 0,43	1,44 $\pm$ 0,01
30	n.d	613 $\pm$ 65	1,0 $\pm$ 0,3	0,78 $\pm$ 0,1	92 $\pm$ 2	5,1 $\pm$ 0,1	26 $\pm$ 1	8,59 $\pm$ 0,40	1,16 $\pm$ 0,08	1,52 $\pm$ 0,05
32,5	n.d	629 $\pm$ 67	1,0 $\pm$ 0,3	0,81 $\pm$ 0,1	88 $\pm$ 2	5,1 $\pm$ 0,2	25 $\pm$ 1	7,76 $\pm$ 0,37	1,06 $\pm$ 0,09	1,48 $\pm$ 0,01

Tabela B1 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (mg kg^{-1}) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P1 agosto/2018

(Continuação)

Prof. (cm)	Hf	K %	La	Lu	Na	Nd	Rb	Sb
2,5	3,4 $\pm$ 0,2	0,48 $\pm$ 0,01	63 $\pm$ 3	0,29 $\pm$ 0,04	324 $\pm$ 5	46 $\pm$ 7	71 $\pm$ 2	0,5 $\pm$ 0,16
5	3,8 $\pm$ 0,1	0,49 $\pm$ 0,01	63 $\pm$ 3	0,26 $\pm$ 0,02	364 $\pm$ 5	42 $\pm$ 7	40 $\pm$ 2	0,39 $\pm$ 0,19
7,5	4,3 $\pm$ 0,2	0,57 $\pm$ 0,02	62 $\pm$ 3	0,27 $\pm$ 0,02	474 $\pm$ 6	43 $\pm$ 6	45 $\pm$ 3	0,36 $\pm$ 0,26
10	11,9 $\pm$ 0,6	2,06 $\pm$ 0,06	57 $\pm$ 3	0,40 $\pm$ 0,03	2404 $\pm$ 30	36 $\pm$ 7	128 $\pm$ 9	0,34 $\pm$ 0,09
12,5	7,3 $\pm$ 0,5	1,38 $\pm$ 0,05	58 $\pm$ 3	0,33 $\pm$ 0,02	1608 $\pm$ 21	44 $\pm$ 6	95 $\pm$ 6	0,41 $\pm$ 0,13
15	14,8 $\pm$ 0,9	2,81 $\pm$ 0,09	58 $\pm$ 3	0,56 $\pm$ 0,04	3377 $\pm$ 42	46 $\pm$ 6	167 $\pm$ 11	0,14 $\pm$ 0,05
17,5	17,7 $\pm$ 0,9	2,92 $\pm$ 0,09	52 $\pm$ 2	0,54 $\pm$ 0,04	3605 $\pm$ 45	16 $\pm$ 9	176 $\pm$ 12	0,16 $\pm$ 0,05
20	17,8 $\pm$ 1,5	3,40 $\pm$ 0,14	54 $\pm$ 1	0,55 $\pm$ 0,04	3638 $\pm$ 101	53 $\pm$ 17	187 $\pm$ 7	0,09 $\pm$ 0,01
22,5	20,1 $\pm$ 1,7	3,29 $\pm$ 0,16	53 $\pm$ 1	0,48 $\pm$ 0,03	3757 $\pm$ 104	63 $\pm$ 21	182 $\pm$ 7	n.d $\pm$ n.d
25	19,2 $\pm$ 1,6	3,49 $\pm$ 0,14	57 $\pm$ 1	0,75 $\pm$ 0,05	3878 $\pm$ 108	34 $\pm$ 13	189 $\pm$ 7	0,11 $\pm$ 0,02
27,5	19,7 $\pm$ 1,7	3,56 $\pm$ 0,15	56 $\pm$ 2	0,56 $\pm$ 0,04	3791 $\pm$ 105	55 $\pm$ 10	179 $\pm$ 7	0,07 $\pm$ 0,03
30	18,8 $\pm$ 1,7	3,48 $\pm$ 0,15	57 $\pm$ 2	0,47 $\pm$ 0,03	3859 $\pm$ 107	53 $\pm$ 10	197 $\pm$ 7	0,08 $\pm$ 0,02
32,5	20,4 $\pm$ 2,0	3,65 $\pm$ 0,16	56 $\pm$ 1	0,64 $\pm$ 0,05	4003 $\pm$ 111	31 $\pm$ 14	192 $\pm$ 7	n.d

Tabela B1 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (mg kg⁻¹) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P1 agosto/2018

(Conclusão)

Prof. (cm)	Sc	Sm	Ta	Tb	Th	U	Yb	Zn
2,5	13,4+/-1,0	7,8+/-0,1	1,8+/-0,3	0,76+/-0,28	22+/-1	5,7+/-0,7	1,9+/-0,1	54+/-4
5	13,1+/-1,0	7,6+/-0,1	1,9+/-0,2	0,56+/-0,17	22+/-1	5,4+/-0,6	1,6+/-0,2	52+/-5
7,5	12,7+/-1,0	7,5+/-0,1	2,1+/-0,2	0,65+/-0,14	22+/-1	6,1+/-1,1	1,95+/-0,09	58+/-5
10	7,6+/-0,6	7,6+/-0,1	2,1+/-0,2	0,66+/-0,13	22+/-1	6,6+/-0,9	2,5+/-0,1	62+/-5
12,5	6,4+/-0,5	7,9+/-0,1	2,0+/-0,2	0,92+/-0,25	18+/-1	5,8+/-0,7	2,4+/-0,1	56+/-4
15	6,3+/-0,5	7,6+/-0,1	2,7+/-0,3	0,70+/-0,14	22+/-1	7,3+/-0,8	3,5+/-0,2	56+/-4
17,5	6,3+/-0,5	4,2+/-0,1	2,7+/-0,3	1,01+/-0,29	22+/-1	8,4+/-1,1	3,4+/-0,2	72+/-6
20	6,9+/-0,2	7,1+/-0,1	3,0+/-0,6	0,68+/-0,29	24+/-1	8,9+/-3,0	4,3+/-1,2	68+/-9
22,5	6,8+/-0,2	7,4+/-0,1	2,9+/-0,6	0,54+/-0,34	26+/-1	9,5+/-3,5	3,8+/-1,2	59+/-7
25	7,0+/-0,3	7,8+/-0,1	3,8+/-0,8	0,74+/-0,28	25+/-1	9,8+/-3,3	6,0+/-1,7	62+/-8
27,5	7,1+/-0,3	8+/-0,1	3,4+/-0,8	0,67+/-0,27	31+/-1	10,3+/-3,4	4,6+/-1,3	79+/-10
30	7,2+/-0,3	7,8+/-0,1	3,0+/-0,6	0,75+/-0,22	25+/-1	9,2+/-3,0	3,9+/-1,2	79+/-10
32,5	7,1+/-0,3	7,5+/-0,1	3,2+/-0,7	0,70+/-0,27	26+/-1	10,0+/-3,3	4,9+/-1,4	66+/-8

n.d: não determinado

Tabela B1 1 - Concentrações dos elementos analisados (mg kg⁻¹) por ICP OES nas amostras de perfil de sedimento P1 agosto/2018.

Prof. (cm)	Cd	Mn	Ni	P	Pb
2,5	n.d	132,04	13,06	719,11	48,84
5	0,01	119,88	12,55	769,21	48,65
7,5	0,03	118,94	13,80	912,25	51,77
10	0,04	157,78	8,77	842,71	28,21
12,5	0,10	236,61	10,58	1339,4	32,20
15	0,01	132,70	7,99	695	23,64
17,5	n.d	116,81	7,12	580,05	20,49
20	n.d	121,81	7,23	552,99	23,90
22,5	n.d	108,07	6,97	506,74	21,80
25	n.d	116,47	7,76	564,55	23,85
27,5	n.d	121,26	7,94	589,73	24,32
30	n.d	123,76	8,45	558,46	25,14
32,5	n.d	118,97	7,99	581,28	24,28

n.d: Não determinado

Tabela B2 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (em mg kg⁻¹) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P1 fevereiro/2019
(Continua)

Prof. (cm)	As	Ba	Br	Ca %	Ce	Co	Cr	Cs	Eu	Fe %
2,5	2,74 +/- 0,31	231 +/- 27	83 +/- 17	0,43+/-0,04	140 +/- 10	7,1 +/-0,2	40+/-2	4,9+/-0,3	1,77+/-0,13	3,59+/-0,09
5	2,76 +/- 0,31	211 +/- 15	59 +/- 12	0,37+/-0,04	136 +/- 10	7,1 +/-0,2	40+/-2	4,2+/-0,3	1,66+/-0,14	3,37+/-0,06
7,5	3,20 +/- 0,36	121 +/- 20	83 +/- 17	0,56+/-0,04	149 +/- 11	7,0+/-0,1	42+/-2	3,7+/-0,3	1,77+/-0,14	3,94+/-0,07
10	3,51 +/- 0,40	217 +/- 17	81 +/- 16	0,45+/-0,04	148 +/- 11	7,0 +/-0,2	42+/-1	3,8+/-0,2	1,80+/-0,15	4,00+/-0,08
12,5	3,26 +/- 0,37	200 +/- 24	54 +/- 11	0,39+/-0,04	160 +/- 11	7,8 +/-0,2	48+/-2	3,8+/-0,2	1,93+/-0,15	4,27+/-0,07
15	3,35 +/- 0,38	247 +/- 25	39 +/- 8	0,52+/-0,04	139 +/- 10	6,6 +/-0,1	42+/-2	3,9+/-0,2	1,72+/-0,13	3,81+/-0,06
17,5	3,03 +/- 0,34	189 +/- 13	30 +/- 6	0,46+/-0,04	134 +/- 10	6,1 +/-0,1	40+/-2	3,7+/-0,3	1,68+/-0,14	3,55+/-0,07
20	2,97 +/- 0,34	262 +/- 30	28 +/- 6	0,56+/-0,04	129 +/- 9	6,3 +/-0,1	44+/-2	4,3+/-0,2	1,67+/-0,13	3,24+/-0,05
22,5	3,12 +/- 0,16	257 +/- 30	26 +/- 5	0,39+/-0,03	132 +/- 7	6,4 +/-0,1	43+/-2	4,0+/-0,2	1,73+/-0,11	3,26+/-0,08
25	3,06 +/- 0,16	n.d	24 +/- 5	0,35+/-0,04	133 +/- 7	6,1 +/-0,1	41+/-2	4,0+/-0,2	1,55+/-0,10	3,08+/-0,06
27,5	1,89 +/- 0,13	265 +/- 27	19 +/- 4	0,44+/-0,04	112 +/- 6	5,9 +/-0,3	33+/-1	3,8+/-0,2	1,40+/-0,15	2,62+/-0,05
30	2,09 +/- 0,10	258 +/- 27	17 +/- 3	0,3+/-0,03	105 +/- 6	5,3 +/-0,1	30+/-1	3,3+/-0,2	1,29+/-0,13	2,35+/-0,05
32,5	0,44 +/- 0,07	298 +/- 20	3 +/- 1	0,28+/-0,03	25 +/- 1	1,5 +/-0,04	9+/-1	1,6+/-0,1	0,33+/-0,02	0,66+/-0,02
35	0,51 +/- 0,09	265 +/- 21	8 +/- 2	0,22+/-0,03	55 +/- 3	2,9 +/-0,07	16+/-1	2,6+/-0,1	0,64+/-0,04	1,36+/-0,03
37,5	0,27 +/- 0,06	216 +/- 14	2 +/- 1	0,1+/-0,01	21 +/- 1	1,1 +/-0,1	6+/-0,4	1,6+/-0,1	0,29+/-0,02	0,48+/-0,01
40	0,09 +/- 0,04	272 +/- 17	2 +/- 0,3	0,13+/-0,02	18 +/- 1	1,0 +/-0,03	4+/-0,3	1,6+/-0,1	0,23+/-0,02	0,41+/-0,01
42,5	n.d	280 +/- 14	2 +/- 0,4	0,25+/-0,02	42 +/- 2	2,0 +/-0,2	8+/-1	2,4+/-0,1	0,40+/-0,03	0,62+/-0,02

Tabela B2 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (em mg kg⁻¹) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P1 fevereiro/2019
(Continuação)

Prof. (cm)	Hf	K %	La	Lu	Na	Nd	Rb	Sb
2,5	6,6+/-0,5	0,86+/-0,07	62+/-2	0,30+/-0,05	801+/-42	53,1+/-0,2	67+/-5	0,28+/-0,03
5	6,9+/-0,5	0,97+/-0,09	64+/-2	0,33+/-0,06	890+/-47	45+/-16	71+/-6	0,31+/-0,03
7,5	3,9+/-0,3	0,50+/-0,06	65+/-2	0,28+/-0,04	408+/-22	47+/-6	43+/-2	0,36+/-0,03
10	3,6+/-0,3	0,43+/-0,05	63+/-2	0,28+/-0,05	378+/-20	35+/-11	36+/-2	0,37+/-0,03
12,5	4,3+/-0,3	0,38+/-0,03	63+/-2	0,29+/-0,04	344+/-18	47+/-6	33+/-2	0,48+/-0,08
15	4,3+/-0,3	0,60+/-0,05	63+/-2	0,27+/-0,05	469+/-25	41+/-7	42+/-2	0,35+/-0,03
17,5	4,8+/-0,3	0,57+/-0,06	62+/-2	0,26+/-0,05	582+/-31	40+/-5	41+/-2	0,42+/-0,03
20	5,1+/-0,4	0,74+/-0,07	62+/-2	0,28+/-0,04	842+/-44	49+/-9	42+/-2	0,27+/-0,09
22,5	5,6+/-0,4	1,12+/-0,26	63,0+/-0,7	0,30+/-0,07	798+/-25	65+/-13	60+/-12	0,35+/-0,03
25	6,0+/-0,5	1,26+/-0,29	63,3+/-0,7	0,27+/-0,05	1098+/-35	57+/-14	68+/-13	0,42+/-0,16
27,5	8,6+/-0,6	1,60+/-0,37	50,9+/-0,6	0,26+/-0,06	1317+/-41	47+/-9	76+/-15	0,22+/-0,02
30	5,9+/-0,4	1,52+/-0,35	45,6+/-0,5	0,20+/-0,03	1360+/-43	43+/-8	71+/-14	0,23+/-0,02
32,5	16,8+/-1,1	2,17+/-0,50	12,0+/-0,1	0,53+/-0,09	2425+/-76	15+/-3	98+/-20	0,07+/-0,01
35	5,0+/-0,4	2,07+/-0,48	29,1+/-0,3	0,17+/-0,03	1975+/-62	24+/-4	96+/-19	0,11+/-0,02
37,5	2,7+/-0,2	1,88+/-0,43	11,2+/-0,1	0,07+/-0,02	2041+/-64	13+/-4	80+/-16	0,12+/-0,01
40	5,6+/-0,4	1,82+/-0,42	9,6+/-0,1	0,12+/-0,02	2312+/-73	6,0+/-2,2	93+/-19	n.d
42,5	9,4+/-0,7	2,42+/-0,56	23,1+/-0,3	0,14+/-0,02	2521+/-79	19+/-3	107+/-21	n.d

Tabela B2 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (em mg kg⁻¹) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P1 fevereiro/2019

(Conclusão)

Prof. (cm)	Sc	Sm	Ta	Tb	Th	U	Yb	Zn
2,5	11,5+/-0,4	8,0+/-0,3	1,85+/-0,2	0,64+/-0,24	21,6+/-0,9	5,8+/-0,7	2,02+/-0,24	50+/-3
5	11,2+/-0,4	7,7+/-0,3	2,03+/-0,24	0,80+/-0,31	22,2+/-0,9	6,3+/-0,4	2,25+/-0,25	65+/-3
7,5	12,5+/-0,4	7,7+/-0,3	1,76+/-0,26	0,64+/-0,23	21,1+/-0,9	5,4+/-0,3	1,91+/-0,21	67+/-3
10	12,1+/-0,4	7,7+/-0,3	1,72+/-0,20	0,53+/-0,23	20,0+/-0,9	5,2+/-0,3	1,3+/-0,51	60+/-3
12,5	13,5+/-0,5	7,9+/-0,3	1,87+/-0,25	0,66+/-0,30	22,0+/-0,9	5,9+/-0,8	2,02+/-0,31	65+/-3
15	12,1+/-0,4	7,6+/-0,3	1,73+/-0,27	0,55+/-0,26	20,1+/-0,9	5,5+/-0,3	1,74+/-0,20	60+/-3
17,5	11,4+/-0,4	7,5+/-0,3	1,72+/-0,18	0,52+/-0,19	20,3+/-0,9	5,3+/-0,6	1,84+/-0,21	56+/-3
20	11,4+/-0,4	7,5+/-0,3	1,87+/-0,20	0,69+/-0,25	23,7+/-1,0	5,3+/-0,7	2,00+/-0,23	72+/-3
22,5	11,8+/-0,4	7,8+/-0,5	1,96+/-0,32	0,69+/-0,10	20,8+/-0,9	5,1+/-1,2	1,97+/-0,18	66+/-3
25	11,4+/-0,4	8,0+/-0,5	2,04+/-0,34	0,65+/-0,18	21,1+/-0,9	5,2+/-1,5	1,81+/-0,08	62+/-3
27,5	10,1+/-0,4	6,2+/-0,4	1,91+/-0,36	0,49+/-0,15	18,1+/-0,8	4,4+/-1,1	1,58+/-0,23	55+/-3
30	8,8+/-0,3	5,5+/-0,4	1,93+/-0,36	0,69+/-0,16	15,7+/-0,7	3,5+/-0,9	1,27+/-0,18	52+/-3
32,5	2,2+/-0,1	2,1+/-0,1	1,00+/-0,15	0,35+/-0,15	6,2+/-0,3	3,2+/-0,7	3,63+/-0,16	21+/-1
35	4,4+/-0,2	3,8+/-0,2	1,09+/-0,15	0,28+/-0,19	10,4+/-0,4	2,5+/-0,6	1,09+/-0,10	31+/-2
37,5	1,6+/-0,1	1,5+/-0,1	0,38+/-0,09	0,13+/-0,14	4,1+/-0,2	1,3+/-0,5	0,42+/-0,06	12+/-1
40	1,4+/-0,1	1,34+/-0,09	0,68+/-0,10	0,21+/-0,04	6,6+/-0,3	2,3+/-0,6	0,71+/-0,04	5+/-1
42,5	2,3+/-0,1	2,9+/-0,2	0,80+/-0,20	0,28+/-0,07	9,6+/-0,4	2,6+/-0,6	0,91+/-0,13	21+/-1

n.d: Não determinado

Tabela B2 1 - Concentrações dos elementos analisados (em mg kg⁻¹) por ICP OES nas amostras de perfil de sedimento P1 fevereiro/2019

Prof. (cm)	Cd	Mn	Ni	P	Pb
2,5	n.d	156,81	13,65	828,03	49,05
5	n.d	142,65	14,57	772,25	47,38
7,5	n.d	139,97	14,35	862,74	52,42
10	n.d	158,17	13,33	829,59	47,50
12,5	n.d	151,42	11,05	774,53	45,00
15	n.d	131,19	13,42	812,26	49,57
17,5	n.d	120,80	13,00	822,13	48,45
20	0,03	132,69	10,95	813,57	43,65
22,5	0,03	127,97	12,67	818,89	47,19
25	0,03	128,33	10,91	832,53	45,18
27,5	0,02	99,42	8,42	680,34	36,66
30	0,04	121,96	8,42	685,47	33,87
32,5	0,01	43,64	1,82	134,04	6,78
35	n.d	54,29	2,38	171,39	8,60
37,5	0,01	35,27	1,98	106,65	5,85
40	0,04	43,30	2,21	112,71	5,16
42,5	0,01	150,04	8,80	381,21	20,86

n.d: Não determinado

Tabela B3 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (em mg kg⁻¹) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P2 fevereiro/2019

(Continua)

Prof. (cm)	As	Ba	Br	Ca %	Ce	Co	Cr	Cs	Eu	Fe %
2,5	1,66 $\pm$ 0,88	394 $\pm$ 19	11 $\pm$ 2	0,54 $\pm$ 0,02	131 $\pm$ 3	9,8 $\pm$ 0,2	49 $\pm$ 5	6,4 $\pm$ 0,3	1,38 $\pm$ 0,11	1,93 $\pm$ 0,07
5	0,96 $\pm$ 0,51	466 $\pm$ 21	9 $\pm$ 2	0,87 $\pm$ 0,02	149 $\pm$ 3	12,7 $\pm$ 0,5	58 $\pm$ 6	7,7 $\pm$ 0,3	1,52 $\pm$ 0,12	2,01 $\pm$ 0,08
7,5	1,57 $\pm$ 0,84	429 $\pm$ 21	10 $\pm$ 2	0,68 $\pm$ 0,02	158 $\pm$ 3	13,6 $\pm$ 0,3	57 $\pm$ 6	8,0 $\pm$ 0,3	1,61 $\pm$ 0,12	2,08 $\pm$ 0,10
10	1,34 $\pm$ 0,71	505 $\pm$ 21	9 $\pm$ 2	0,73 $\pm$ 0,02	158 $\pm$ 3	14,7 $\pm$ 0,3	58 $\pm$ 6	7,7 $\pm$ 0,3	1,55 $\pm$ 0,12	2,05 $\pm$ 0,08
12,5	1,00 $\pm$ 0,53	582 $\pm$ 22	6 $\pm$ 1	0,44 $\pm$ 0,02	119 $\pm$ 3	11,0 $\pm$ 0,2	46 $\pm$ 5	6,1 $\pm$ 0,3	1,3 $\pm$ 0,10	1,58 $\pm$ 0,06
15	n.d	627 $\pm$ 24	5 $\pm$ 1	0,67 $\pm$ 0,02	104 $\pm$ 2	8,6 $\pm$ 0,2	43 $\pm$ 5	5,5 $\pm$ 0,2	1,12 $\pm$ 0,08	1,37 $\pm$ 0,05
17,5	0,17 $\pm$ 0,09	604 $\pm$ 23	6 $\pm$ 1	0,57 $\pm$ 0,02	117 $\pm$ 3	9,4 $\pm$ 0,2	43 $\pm$ 5	6,1 $\pm$ 0,3	1,22 $\pm$ 0,09	1,51 $\pm$ 0,06
20	0,65 $\pm$ 0,35	608 $\pm$ 26	8 $\pm$ 2	0,63 $\pm$ 0,02	150 $\pm$ 3	12,1 $\pm$ 0,2	62 $\pm$ 7	8,8 $\pm$ 0,4	1,64 $\pm$ 0,12	2,05 $\pm$ 0,08
22,5	0,73 $\pm$ 0,17	521 $\pm$ 27	6 $\pm$ 1	0,37 $\pm$ 0,03	110 $\pm$ 6	9,8 $\pm$ 0,5	41 $\pm$ 3	4,4 $\pm$ 1,0	1,08 $\pm$ 0,06	1,40 $\pm$ 0,01
25	0,21 $\pm$ 0,06	510 $\pm$ 27	5 $\pm$ 1	0,37 $\pm$ 0,06	98 $\pm$ 5	7,8 $\pm$ 1,5	38 $\pm$ 3	4,5 $\pm$ 1,0	1,02 $\pm$ 0,05	1,24 $\pm$ 0,01
27,5	0,58 $\pm$ 0,14	511 $\pm$ 31	5 $\pm$ 1	0,35 $\pm$ 0,04	135 $\pm$ 7	8,7 $\pm$ 0,4	49 $\pm$ 4	5,2 $\pm$ 1,1	1,38 $\pm$ 0,09	1,37 $\pm$ 0,02
30	0,82 $\pm$ 0,19	366 $\pm$ 15	4 $\pm$ 1	0,60 $\pm$ 0,10	166 $\pm$ 9	9,1 $\pm$ 0,5	60 $\pm$ 4	6,1 $\pm$ 1,3	1,78 $\pm$ 0,04	1,49 $\pm$ 0,01
32,5	0,42 $\pm$ 0,12	288 $\pm$ 11	3 $\pm$ 1	0,68 $\pm$ 0,11	174 $\pm$ 9	9,6 $\pm$ 2,5	70 $\pm$ 5	6,1 $\pm$ 1,3	1,91 $\pm$ 0,09	1,45 $\pm$ 0,02
35	1,09 $\pm$ 0,26	304 $\pm$ 27	3 $\pm$ 1	0,55 $\pm$ 0,09	168 $\pm$ 9	8,2 $\pm$ 2,0	69 $\pm$ 5	7,0 $\pm$ 1,5	1,93 $\pm$ 0,14	1,46 $\pm$ 0,01
37,5	0,27 $\pm$ 0,11	319 $\pm$ 30	3 $\pm$ 1	0,34 $\pm$ 0,04	167 $\pm$ 9	8,5 $\pm$ 0,5	68 $\pm$ 5	6,5 $\pm$ 1,4	1,89 $\pm$ 0,04	1,38 $\pm$ 0,01
40	0,80 $\pm$ 0,31	231 $\pm$ 9	3 $\pm$ 1	0,61 $\pm$ 0,04	180 $\pm$ 4	7,7 $\pm$ 0,15	66 $\pm$ 5	6,9 $\pm$ 1,6	1,90 $\pm$ 0,16	1,25 $\pm$ 0,03
42,5	0,81 $\pm$ 0,32	275 $\pm$ 21	3 $\pm$ 1	0,58 $\pm$ 0,04	188 $\pm$ 4	8,4 $\pm$ 0,4	69 $\pm$ 5	8,2 $\pm$ 1,9	2,13 $\pm$ 0,2	1,36 $\pm$ 0,04
45	0,73 $\pm$ 0,29	362 $\pm$ 24	3 $\pm$ 1	0,63 $\pm$ 0,03	190 $\pm$ 4	8,8 $\pm$ 0,2	72 $\pm$ 5	7,9 $\pm$ 1,8	2,01 $\pm$ 0,18	1,37 $\pm$ 0,03
47,5	1,33 $\pm$ 0,52	249 $\pm$ 23	3 $\pm$ 1	0,45 $\pm$ 0,04	201 $\pm$ 4	9,2 $\pm$ 0,3	77 $\pm$ 6	8,7 $\pm$ 1,9	2,23 $\pm$ 0,2	1,41 $\pm$ 0,03

Tabela B3 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (em mg kg⁻¹) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P2 fevereiro/2019
(Continuação)

Prof. (cm)	Hf	K %	La	Lu	Na	Nd	Rb	Sb
2,5	8,0+/-0,5	1,36+/-0,1	70+/-2	0,29+/-0,05	1329+/-18	54+/-14	92+/-12	0,27+/-0,06
5	8,6+/-0,7	1,82+/-0,14	76+/-2	0,33+/-0,06	1241+/-20	59+/-18	112+/-15	0,21+/-0,05
7,5	8,6+/-0,6	1,83+/-0,14	83+/-3	0,34+/-0,05	1320+/-19	71+/-23	114+/-15	0,29+/-0,07
10	10,9+/-0,7	1,82+/-0,13	80+/-2	0,31+/-0,02	1368+/-22	69+/-23	113+/-15	0,17+/-0,04
12,5	13,0+/-1,0	2,16+/-0,19	61+/-2	0,39+/-0,07	1894+/-28	57+/-19	115+/-15	0,21+/-0,05
15	12,2+/-0,8	2,41+/-0,10	53+/-2	0,28+/-0,02	2153+/-31	37+/-9	120+/-16	0,17+/-0,04
17,5	10,5+/-0,7	2,48+/-0,21	62+/-2	0,27+/-0,04	2138+/-29	52+/-15	118+/-16	0,13+/-0,03
20	10,3+/-0,7	1,88+/-0,15	80+/-2	0,32+/-0,04	1542+/-22	88+/-15	127+/-17	0,27+/-0,06
22,5	11,0+/-0,5	3,86+/-1,82	52,6+/-0,6	0,25+/-0,02	1851+/-64	40+/-5	94+/-19	0,13+/-0,04
25	11,2+/-0,6	3,59+/-1,69	49,2+/-0,6	0,23+/-0,02	1954+/-67	40+/-4	102+/-20	0,10+/-0,03
27,5	9,1+/-0,3	2,76+/-1,30	67,8+/-0,8	0,26+/-0,04	1380+/-48	50+/-4	94+/-18	0,15+/-0,05
30	4,8+/-0,3	1,62+/-0,76	81,6+/-0,9	0,23+/-0,02	760+/-26	58+/-5	64+/-13	0,13+/-0,04
32,5	2,2+/-0,2	0,67+/-0,31	86,5+/-1,0	0,24+/-0,04	307+/-14	66+/-7	48+/-9	0,21+/-0,06
35	2,0+/-0,1	0,72+/-0,34	85,7+/-1,0	0,23+/-0,02	305+/-14	61+/-5	50+/-10	0,27+/-0,09
37,5	1,9+/-0,04	0,61+/-0,29	83,3+/-1,0	0,21+/-0,02	316+/-14	58+/-5	49+/-10	0,21+/-0,06
40	1,3+/-0,1	0,10+/-0,03	85+/-2	0,19+/-0,01	305+/-13	55+/-8	43+/-5	0,15+/-0,04
42,5	1,4+/-0,03	0,43+/-0,05	90+/-3	0,19+/-0,01	237+/-13	59+/-10	41+/-5	0,25+/-0,06
45	1,4+/-0,1	0,28+/-0,05	90+/-3	0,23+/-0,03	229+/-13	60+/-8	43+/-5	n.d
47,5	1,6+/-0,1	n.d	94+/-3	0,22+/-0,04	281+/-16	62+/-8	41+/-3	0,29+/-0,07

Tabela B3 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (em mg kg⁻¹) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P2 fevereiro/2019

(Conclusão)

Prof. (cm)	Sc	Sm	Ta	Tb	Th	U	Yb	Zn
2,5	8,6 $\pm$ 0,3	9,3 $\pm$ 0,2	1,69 $\pm$ 0,16	0,87 $\pm$ 0,22	22 $\pm$ 1	5,6 $\pm$ 1,0	2,03 $\pm$ 0,09	76 $\pm$ 7
5	9,6 $\pm$ 0,3	10,1 $\pm$ 0,2	1,98 $\pm$ 0,19	0,85 $\pm$ 0,21	26 $\pm$ 1	6,0 $\pm$ 1,3	2,26 $\pm$ 0,10	86 $\pm$ 8
7,5	9,8 $\pm$ 0,3	11,0 $\pm$ 0,2	2,04 $\pm$ 0,21	0,93 $\pm$ 0,24	27 $\pm$ 1	6,6 $\pm$ 1,0	2,44 $\pm$ 0,11	89 $\pm$ 8
10	9,4 $\pm$ 0,3	10,8 $\pm$ 0,2	2,06 $\pm$ 0,22	0,85 $\pm$ 0,21	28 $\pm$ 1	6,5 $\pm$ 1,1	2,20 $\pm$ 0,10	92 $\pm$ 9
12,5	7,5 $\pm$ 0,3	8,6 $\pm$ 0,2	1,64 $\pm$ 0,19	0,72 $\pm$ 0,18	21 $\pm$ 1	5,6 $\pm$ 1,1	2,57 $\pm$ 0,11	68 $\pm$ 6
15	6,6 $\pm$ 0,2	7,1 $\pm$ 0,1	1,76 $\pm$ 0,23	0,75 $\pm$ 0,20	20 $\pm$ 1	5,1 $\pm$ 1,2	1,99 $\pm$ 0,18	56 $\pm$ 5
17,5	7,3 $\pm$ 0,3	8,4 $\pm$ 0,2	1,70 $\pm$ 0,16	0,71 $\pm$ 0,19	21 $\pm$ 1	5,2 $\pm$ 1,1	1,89 $\pm$ 0,08	64 $\pm$ 6
20	10,2 $\pm$ 0,4	10,8 $\pm$ 0,2	2,09 $\pm$ 0,22	0,93 $\pm$ 0,26	25 $\pm$ 1	6,6 $\pm$ 1,3	2,35 $\pm$ 0,10	93 $\pm$ 9
22,5	6,3 $\pm$ 0,2	7,1 $\pm$ 0,2	1,68 $\pm$ 0,09	0,61 $\pm$ 0,09	19 $\pm$ 1	4,8 $\pm$ 1,2	1,87 $\pm$ 0,16	73 $\pm$ 3
25	6,1 $\pm$ 0,2	6,7 $\pm$ 0,2	1,46 $\pm$ 0,17	0,72 $\pm$ 0,20	18 $\pm$ 1	4,2 $\pm$ 0,9	1,51 $\pm$ 0,16	58 $\pm$ 3
27,5	8,4 $\pm$ 0,3	9,1 $\pm$ 0,3	1,67 $\pm$ 0,08	0,75 $\pm$ 0,13	23 $\pm$ 1	5,7 $\pm$ 1,5	1,87 $\pm$ 0,17	69 $\pm$ 3
30	12 $\pm$ 0,4	10,8 $\pm$ 0,4	1,46 $\pm$ 0,08	0,79 $\pm$ 0,2	27 $\pm$ 1	6,9 $\pm$ 1,8	1,74 $\pm$ 0,27	71 $\pm$ 3
32,5	13,4 $\pm$ 0,5	11,2 $\pm$ 0,4	1,57 $\pm$ 0,08	0,95 $\pm$ 0,27	28 $\pm$ 1	7,4 $\pm$ 1,8	1,71 $\pm$ 0,18	76 $\pm$ 4
35	13 $\pm$ 0,5	10,9 $\pm$ 0,4	1,73 $\pm$ 0,20	1,13 $\pm$ 0,31	27 $\pm$ 1	5,5 $\pm$ 1,6	1,63 $\pm$ 0,16	74 $\pm$ 3
37,5	12,8 $\pm$ 0,5	10,7 $\pm$ 0,4	1,42 $\pm$ 0,09	0,79 $\pm$ 0,23	28 $\pm$ 1	6,5 $\pm$ 1,6	1,47 $\pm$ 0,14	67 $\pm$ 3
40	13,6 $\pm$ 0,5	11,0 $\pm$ 0,2	1,65 $\pm$ 0,10	1,08 $\pm$ 0,35	29 $\pm$ 1	7,0 $\pm$ 1,3	1,44 $\pm$ 0,07	64 $\pm$ 3
42,5	14,4 $\pm$ 0,5	11,7 $\pm$ 0,2	1,68 $\pm$ 0,24	1,32 $\pm$ 0,42	30 $\pm$ 1	7,9 $\pm$ 1,3	1,64 $\pm$ 0,15	72 $\pm$ 6
45	14,9 $\pm$ 0,5	11,7 $\pm$ 0,2	1,72 $\pm$ 0,48	0,95 $\pm$ 0,43	30 $\pm$ 1	8,1 $\pm$ 1,4	1,59 $\pm$ 0,08	78 $\pm$ 6
47,5	15,4 $\pm$ 0,5	12,5 $\pm$ 0,2	1,58 $\pm$ 0,17	1,19 $\pm$ 0,40	33 $\pm$ 1	8,9 $\pm$ 1,5	1,91 $\pm$ 0,25	72 $\pm$ 3

n.d: Não determinado

Tabela B3 1 - Concentrações dos elementos analisados (mg kg⁻¹) por ICP OES nas amostras de perfil de sedimento P2 fevereiro/2019

Prof. (cm)	Cd	Mn	Ni	P	Pb
2,5	0,019	162,37	12,43	550,27	29,64
5	0,000	195,59	12,72	566,44	33,26
7,5	0,022	228,37	13,20	618,01	33,38
10	0,044	234,78	13,96	648,34	31,54
12,5	0,023	167,86	10,13	475,17	23,99
15	0,002	129,82	7,63	349,56	17,55
17,5	0,004	146,86	8,52	380,58	19,02
20	0,010	229,18	13,34	586,09	31,94
22,5	0,011	208,68	10,03	464,09	21,45
25	0,013	168,03	8,16	378,77	19,15
27,5	0,024	180,28	11,08	433,04	28,06
30	0,078	218,65	15,45	623,03	40,34
32,5	0,061	217,78	16,39	645,46	45,15
35	0,082	207,31	11,99	583,28	42,86
37,5	0,098	231,94	13,75	653,4	49,08
40	0,057	218,35	14,45	664,39	50,02
42,5	0,129	204,23	13,74	642,1	50,72
45	0,085	206,6	16,27	685,88	51,25
47,5	0,054	207,26	15,88	670,81	51,32

Tabela B4 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (em mg kg⁻¹) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P3 fevereiro/2019

(Continua)

Prof. (cm)	As	Ba	Br	Ca %	Ce	Co	Cr	Cs	Eu	Fe %
2,5	3,6+/-1,3	272+/-12	33+/-7	0,77+/-0,02	160+/-4	6,6+/-0,3	41+/-1	5,5+/-0,2	1,64+/-0,10	3,99+/-0,02
5	4,5+/-1,6	225+/-13	70+/-14	0,62+/-0,02	165+/-4	6,5+/-0,2	40+/-1	4,4+/-0,2	1,59+/-0,10	4,25+/-0,02
7,5	4,6+/-1,7	219+/-13	70+/-14	0,59+/-0,02	156+/-3	6,4+/-0,2	38+/-1	4,4+/-0,2	1,52+/-0,09	4,12+/-0,02
10	3,7+/-1,4	293+/-14	56+/-11	0,67+/-0,02	162+/-4	6,9+/-0,2	42+/-1	5,1+/-0,2	1,63+/-0,10	4,25+/-0,02
12,5	4,3+/-1,6	283+/-13	51+/-10	0,73+/-0,02	161+/-4	6,9+/-0,3	40+/-1	5,0+/-0,2	1,58+/-0,09	4,12+/-0,02
15	3,9+/-1,4	256+/-8	38+/-8	0,61+/-0,02	150+/-3	6,3+/-0,2	38+/-1	4,5+/-0,2	1,55+/-0,09	3,89+/-0,02
17,5	3,8+/-1,4	243+/-14	35+/-7	0,58+/-0,02	151+/-3	6,1+/-0,2	39+/-1	4,7+/-0,2	1,64+/-0,11	3,86+/-0,02
20	3,9+/-1,4	264+/-9	30+/-6	0,54+/-0,02	147+/-3	6,0+/-0,2	37+/-1	5,0+/-0,2	1,47+/-0,09	3,66+/-0,02
22,5	2,7+/-0,1	295+/-16	29+/-6	0,63+/-0,02	156+/-3	6,2+/-0,3	36+/-4	5,3+/-0,4	1,54+/-0,14	3,69+/-0,26
25	2,8+/-0,1	247+/-14	29+/-6	0,58+/-0,02	155+/-3	6,3+/-0,3	36+/-4	5,0+/-0,2	1,52+/-0,13	3,70+/-0,20
27,5	3,4+/-0,2	109+/-16	32+/-7	0,59+/-0,02	169+/-4	6,6+/-0,3	40+/-4	4,8+/-0,2	1,74+/-0,17	3,96+/-0,21
30	2,6+/-0,1	245+/-13	29+/-6	0,62+/-0,02	148+/-3	6,0+/-0,3	35+/-4	4,3+/-0,2	1,47+/-0,18	3,51+/-0,24
32,5	3,4+/-0,2	223+/-9	31+/-6	0,60+/-0,02	162+/-4	6,8+/-0,3	40+/-4	4,9+/-0,2	1,75+/-0,18	3,92+/-0,23
35	3,8+/-0,2	245+/-15	34+/-7	0,56+/-0,02	157+/-3	6,7+/-0,3	37+/-4	4,6+/-0,2	1,58+/-0,14	3,65+/-0,19
37,5	3,9+/-0,2	289+/-16	36+/-7	0,54+/-0,02	160+/-3	6,5+/-0,3	38+/-4	4,3+/-0,2	1,72+/-0,21	3,49+/-0,18
40	1,4+/-0,2	301+/-9	7+/-2	0,44+/-0,01	83+/-2	3,1+/-0,1	15+/-2	3,3+/-0,7	0,67+/-0,07	1,34+/-0,07
42,5	0,35+/-0,04	254+/-7	1,0+/-0,3	0,31+/-0,01	29+/-1	1,30+/-0,04	7+/-1	2,0+/-0,4	0,32+/-0,03	0,58+/-0,03
45	0,14+/-0,03	173+/-10	1,0+/-0,2	0,15+/-0,01	30+/-1	0,80+/-0,02	5+/-1	1,4+/-0,3	0,24+/-0,03	0,40+/-0,02
47,5	n.d	140+/-6	0,4+/-0,1	0,15+/-0,01	7,0+/-0,2	0,30+/-0,01	6+/-1	0,8+/-0,2	0,16+/-0,02	0,18+/-0,01
50	n.d	185+/-7	0,5+/-0,1	0,08+/-0,01	8,0+/-0,2	0,41+/-0,01	3+/-0,3	1,1+/-0,2	0,17+/-0,02	0,22+/-0,01
52,5	n.d	196+/-6	0,6+/-0,1	0,08+/-0,01	14,0+/-0,3	0,77+/-0,02	3+/-0,3	1,4+/-0,3	0,17+/-0,02	0,27+/-0,02
55	n.d	188+/-7	0,5+/-0,1	0,13+/-0,01	10,0+/-0,2	0,97+/-0,05	9+/-1	1,3+/-0,3	0,16+/-0,02	0,25+/-0,01
57,5	n.d	175+/-5	0,4+/-0,1	0,11+/-0,01	10,0+/-0,2	0,5+/-0,02	2+/-0,2	1,0+/-0,2	0,14+/-0,02	0,19+/-0,01

Tabela B4 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (em mg kg⁻¹) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P3 fevereiro/2019
(Continuação)

Prof. (cm)	Gd	Hf	K %	La	Lu	Na	Nd	Rb	Sb
2,5	12,86 $\pm$ 1,69	7,0 $\pm$ 0,3	2,21 $\pm$ 1,78	75,0 $\pm$ 2,4	0,31 $\pm$ 0,03	738 $\pm$ 32	58,9 $\pm$ 9,9	65 $\pm$ 5	0,58 $\pm$ 0,27
5	9,87 $\pm$ 1,30	4,8 $\pm$ 0,2	1,92 $\pm$ 1,56	75,0 $\pm$ 2,3	0,30 $\pm$ 0,02	558 $\pm$ 15	53,3 $\pm$ 6,8	51 $\pm$ 2	0,68 $\pm$ 0,32
7,5	9,28 $\pm$ 1,22	5,3 $\pm$ 0,2	2,21 $\pm$ 1,78	68,9 $\pm$ 2,1	0,29 $\pm$ 0,03	632 $\pm$ 28	52,8 $\pm$ 6,7	58 $\pm$ 2	0,52 $\pm$ 0,24
10	9,97 $\pm$ 1,31	6,7 $\pm$ 0,2	2,01 $\pm$ 1,62	72,8 $\pm$ 2,2	0,34 $\pm$ 0,02	695 $\pm$ 31	51,8 $\pm$ 6,6	68 $\pm$ 5	0,46 $\pm$ 0,22
12,5	9,61 $\pm$ 1,26	5,7 $\pm$ 0,2	1,69 $\pm$ 1,38	73,9 $\pm$ 2,2	0,30 $\pm$ 0,04	648 $\pm$ 16	52,7 $\pm$ 7,4	61 $\pm$ 4	0,25 $\pm$ 0,26
15	8,76 $\pm$ 1,15	5,6 $\pm$ 0,2	0,97 $\pm$ 1,11	69,1 $\pm$ 2,1	0,27 $\pm$ 0,02	611 $\pm$ 15	49,7 $\pm$ 6,3	56 $\pm$ 4	0,58 $\pm$ 0,27
17,5	8,64 $\pm$ 1,13	6,2 $\pm$ 0,3	1,10 $\pm$ 0,99	70,1 $\pm$ 2,1	0,31 $\pm$ 0,02	736 $\pm$ 18	49,9 $\pm$ 6,3	59 $\pm$ 4	0,49 $\pm$ 0,23
20	8,48 $\pm$ 1,11	6,0 $\pm$ 0,2	1,96 $\pm$ 1,58	68,8 $\pm$ 2,1	0,29 $\pm$ 0,02	722 $\pm$ 19	48,9 $\pm$ 6,2	62 $\pm$ 4	0,45 $\pm$ 0,21
22,5	10,84 $\pm$ 0,5	6,3 $\pm$ 0,2	0,06 $\pm$ 0,02	70,0 $\pm$ 2,0	0,32 $\pm$ 0,03	744 $\pm$ 14	46,8 $\pm$ 7,0	69 $\pm$ 2	0,35 $\pm$ 0,08
25	9,78 $\pm$ 0,45	6,0 $\pm$ 0,2	0,67 $\pm$ 0,08	69,3 $\pm$ 2,1	0,29 $\pm$ 0,02	631 $\pm$ 21	46,3 $\pm$ 7,0	64 $\pm$ 2	0,38 $\pm$ 0,09
27,5	11,26 $\pm$ 0,51	5,4 $\pm$ 0,2	0,70 $\pm$ 0,12	75,4 $\pm$ 2,2	0,30 $\pm$ 0,03	537 $\pm$ 13	47,7 $\pm$ 7,2	57 $\pm$ 2	0,43 $\pm$ 0,10
30	9,01 $\pm$ 0,40	5,0 $\pm$ 0,2	0,28 $\pm$ 0,19	66,1 $\pm$ 1,9	0,27 $\pm$ 0,03	462 $\pm$ 12	43,7 $\pm$ 6,6	50 $\pm$ 1	0,41 $\pm$ 0,10
32,5	2,14 $\pm$ 0,19	4,5 $\pm$ 0,4	0,63 $\pm$ 0,10	74,3 $\pm$ 2,1	0,27 $\pm$ 0,03	512 $\pm$ 14	48,3 $\pm$ 7,3	59 $\pm$ 2	0,45 $\pm$ 0,11
35	8,46 $\pm$ 0,37	5,3 $\pm$ 0,2	0,43 $\pm$ 0,09	69,2 $\pm$ 2,4	0,28 $\pm$ 0,03	618 $\pm$ 21	41,9 $\pm$ 6,3	50 $\pm$ 2	0,50 $\pm$ 0,12
37,5	8,64 $\pm$ 0,38	5,7 $\pm$ 0,2	n.d	73,3 $\pm$ 2,1	0,28 $\pm$ 0,03	664 $\pm$ 22	47,0 $\pm$ 7,1	47 $\pm$ 2	0,51 $\pm$ 0,12
40	6,31 $\pm$ 2,16	7,9 $\pm$ 0,3	1,34 $\pm$ 0,25	40,9 $\pm$ 0,9	0,23 $\pm$ 0,02	1198 $\pm$ 18	33,5 $\pm$ 3,1	86 $\pm$ 2	0,12 $\pm$ 0,01
42,5	2,87 $\pm$ 0,99	9,0 $\pm$ 0,4	0,92 $\pm$ 0,13	19,1 $\pm$ 0,5	0,25 $\pm$ 0,02	1218 $\pm$ 18	10,1 $\pm$ 0,9	82 $\pm$ 12	0,05 $\pm$ 0,01
45	2,94 $\pm$ 1,01	4,2 $\pm$ 0,2	1,09 $\pm$ 0,20	15,5 $\pm$ 0,4	0,16 $\pm$ 0,01	948 $\pm$ 13	14,5 $\pm$ 1,4	63 $\pm$ 9	n.d
47,5	3,03 $\pm$ 1,04	3,7 $\pm$ 0,2	0,66 $\pm$ 0,12	3,2 $\pm$ 0,1	0,89 $\pm$ 0,06	855 $\pm$ 13	7,2 $\pm$ 0,7	53 $\pm$ 7	n.d
50	1,23 $\pm$ 0,42	2,6 $\pm$ 0,1	1,20 $\pm$ 0,23	4,6 $\pm$ 0,1	0,09 $\pm$ 0,01	1195 $\pm$ 17	3,9 $\pm$ 0,4	77 $\pm$ 11	n.d
52,5	1,24 $\pm$ 0,42	3,1 $\pm$ 0,1	1,22 $\pm$ 0,23	7,5 $\pm$ 0,3	0,09 $\pm$ 0,01	1125 $\pm$ 19	4,9 $\pm$ 0,5	80 $\pm$ 12	n.d
55	0,95 $\pm$ 0,32	3,3 $\pm$ 0,1	0,93 $\pm$ 0,11	5,6 $\pm$ 0,1	0,10 $\pm$ 0,01	1058 $\pm$ 22	6,2 $\pm$ 0,6	71 $\pm$ 11	n.d
57,5	0,82 $\pm$ 0,28	3,7 $\pm$ 0,1	0,81 $\pm$ 0,10	6,3 $\pm$ 0,2	0,11 $\pm$ 0,01	826 $\pm$ 14	5,1 $\pm$ 0,5	60 $\pm$ 9	n.d

Tabela B4 - Concentrações $\pm$ incertezas dos elementos analisados (em $\mu\text{g kg}^{-1}$) por INAA nas amostras de perfil de sedimento P3 fevereiro/2019

(Conclusão)

Prof. (cm)	Sc	Sm	Ta	Tb	Th	U	Yb	Zn
2,5	10,7 $\pm$ 0,4	9,42 $\pm$ 0,17	2,54 $\pm$ 0,14	0,83 $\pm$ 0,05	30 $\pm$ 1	7,7 $\pm$ 0,6	2,29 $\pm$ 0,32	74 $\pm$ 2
5	10,7 $\pm$ 0,4	9,26 $\pm$ 0,16	2,37 $\pm$ 0,14	0,86 $\pm$ 0,07	28 $\pm$ 1	6,5 $\pm$ 1,0	2,20 $\pm$ 0,25	66 $\pm$ 2
7,5	10,2 $\pm$ 0,4	8,64 $\pm$ 0,15	2,29 $\pm$ 0,13	0,85 $\pm$ 0,05	27 $\pm$ 1	6,8 $\pm$ 0,5	2,03 $\pm$ 0,22	58 $\pm$ 2
10	10,9 $\pm$ 0,4	9,33 $\pm$ 0,16	2,45 $\pm$ 0,14	0,87 $\pm$ 0,15	29 $\pm$ 1	7,2 $\pm$ 1,2	2,52 $\pm$ 0,11	68 $\pm$ 2
12,5	10,8 $\pm$ 0,4	9,23 $\pm$ 0,16	2,39 $\pm$ 0,10	0,93 $\pm$ 0,06	29 $\pm$ 1	7,3 $\pm$ 1,2	2,31 $\pm$ 0,11	62 $\pm$ 2
15	10,3 $\pm$ 0,4	8,58 $\pm$ 0,15	2,31 $\pm$ 0,09	0,88 $\pm$ 0,05	27 $\pm$ 1	6,5 $\pm$ 1,1	1,92 $\pm$ 0,27	60 $\pm$ 2
17,5	10,2 $\pm$ 0,4	8,72 $\pm$ 0,15	2,22 $\pm$ 0,12	0,90 $\pm$ 0,06	28 $\pm$ 1	6,3 $\pm$ 1,5	1,92 $\pm$ 0,25	73 $\pm$ 2
20	10,0 $\pm$ 0,4	8,6 $\pm$ 0,15	2,34 $\pm$ 0,12	0,79 $\pm$ 0,12	28 $\pm$ 1	6,4 $\pm$ 0,5	1,96 $\pm$ 0,26	63 $\pm$ 2
22,5	9,9 $\pm$ 0,4	8,88 $\pm$ 0,34	2,42 $\pm$ 0,13	0,64 $\pm$ 0,12	30 $\pm$ 1	5,6 $\pm$ 1,5	2,37 $\pm$ 0,24	69 $\pm$ 2
25	10,1 $\pm$ 0,4	8,76 $\pm$ 0,34	2,42 $\pm$ 0,13	0,69 $\pm$ 0,12	28 $\pm$ 1	5,2 $\pm$ 1,4	2,17 $\pm$ 0,18	77 $\pm$ 3
27,5	10,7 $\pm$ 0,4	9,36 $\pm$ 0,36	2,54 $\pm$ 0,14	0,65 $\pm$ 0,15	30 $\pm$ 1	6,2 $\pm$ 0,4	2,15 $\pm$ 0,20	68 $\pm$ 2
30	9,6 $\pm$ 0,3	8,21 $\pm$ 0,32	2,15 $\pm$ 0,11	0,68 $\pm$ 0,12	27 $\pm$ 1	5,8 $\pm$ 0,4	1,89 $\pm$ 0,20	64 $\pm$ 2
32,5	10,8 $\pm$ 0,4	9,16 $\pm$ 0,35	2,58 $\pm$ 0,25	0,63 $\pm$ 0,11	29 $\pm$ 1	5,5 $\pm$ 1,4	1,9 $\pm$ 0,26	73 $\pm$ 3
35	10,5 $\pm$ 0,4	8,58 $\pm$ 0,33	2,32 $\pm$ 0,13	0,64 $\pm$ 0,12	30 $\pm$ 1	7,0 $\pm$ 0,5	1,87 $\pm$ 0,26	73 $\pm$ 2
37,5	10,4 $\pm$ 0,4	8,91 $\pm$ 0,34	2,46 $\pm$ 0,14	0,62 $\pm$ 0,11	27 $\pm$ 1	6,4 $\pm$ 0,5	1,87 $\pm$ 0,19	77 $\pm$ 3
40	4,1 $\pm$ 0,1	5,12 $\pm$ 0,22	1,64 $\pm$ 0,09	0,58 $\pm$ 0,15	21 $\pm$ 1	4,1 $\pm$ 0,3	1,51 $\pm$ 0,19	24 $\pm$ 3
42,5	2,1 $\pm$ 0,1	2,28 $\pm$ 0,10	0,83 $\pm$ 0,04	n.d	13 $\pm$ 1	3,4 $\pm$ 0,2	1,47 $\pm$ 0,18	10 $\pm$ 1
45	1,3 $\pm$ 0,1	2,39 $\pm$ 0,10	0,56 $\pm$ 0,03	n.d	9,0 $\pm$ 0,4	3,8 $\pm$ 0,9	0,92 $\pm$ 0,04	8 $\pm$ 1
47,5	0,6 $\pm$ 0,02	2,34 $\pm$ 0,100	0,42 $\pm$ 0,04	n.d	4,0 $\pm$ 0,2	3,2 $\pm$ 0,7	0,67 $\pm$ 0,04	3,0 $\pm$ 0,3
50	0,7 $\pm$ 0,02	1,09 $\pm$ 0,05	0,66 $\pm$ 0,04	n.d	5,0 $\pm$ 0,2	1,4 $\pm$ 0,3	0,54 $\pm$ 0,07	5 $\pm$ 1
52,5	0,8 $\pm$ 0,03	1,14 $\pm$ 0,05	0,45 $\pm$ 0,02	n.d	5,0 $\pm$ 0,2	1,9 $\pm$ 0,4	0,55 $\pm$ 0,03	5 $\pm$ 1
55	1 $\pm$ 0,03	0,92 $\pm$ 0,04	0,52 $\pm$ 0,03	n.d	8,0 $\pm$ 0,4	2,0 $\pm$ 0,5	0,64 $\pm$ 0,04	6 $\pm$ 1
57,5	0,7 $\pm$ 0,02	0,84 $\pm$ 0,04	1,34 $\pm$ 0,07	n.d	5,0 $\pm$ 0,2	2,0 $\pm$ 0,1	0,71 $\pm$ 0,06	4 $\pm$ 1

n.d: Não determinado

Tabela B4 1 - Concentrações dos elementos analisados (mg kg⁻¹) por ICP OES nas amostras de perfil de sedimento P3 fevereiro/2019.

Prof. (cm)	Cd	Mn	Ni	P	Pb
2,5	0,0416	146,84	11,79	861,98	40,919
5	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
7,5	n.d	151,40	10,76	786,60	38,87
10	n.d	155,06	10,93	812,86	40,20
12,5	n.d	157,62	10,15	825,24	39,54
15	0,001	151,91	10,77	827,26	41,14
17,5	n.d	136,40	9,62	763,54	35,32
20	n.d	148,07	10,32	826,71	39,15
22,5	0,010	147,21	9,74	846,59	37,34
25	0,002	137,97	9,48	850,57	36,95
27,5	0,025	134,18	10,08	909,30	39,78
30	0,039	130,39	9,48	929,58	39,77
32,5	0,027	134,70	9,59	939,41	38,04
35	0,052	127,59	10,19	1096,00	43,11
37,5	0,019	65,00	4,86	624,24	22,42
40	n.d	32,73	2,20	248,34	11,42
42,5	n.d	32,32	2,43	191,37	10,25
45	0,002	6,44	0,37	34,39	1,13
47,5	0,007	2,62	0,22	22,04	0,15
50	0,003	7,16	0,49	39,33	1,43
52,5	0,005	5,96	0,40	40,90	2,14
55	0,000	9,92	1,06	64,41	1,45
57,5	n.d	18,66	1,40	100,44	4,11

n.d: Não determinado

APÊNDICE C – Resultados do Fator de Enriquecimento utilizando NASC

Tabela C1 - Fator de Enriquecimento utilizando NASC P1 agosto/2018

Ponto 1 Ago/18		Fator de Enriquecimento					
Elementos	As	Ba	Cr	Fe	Mn	Ni	Zn
2,5	2,28	0,31	0,40	1,19	0,21	0,25	0,71
5	2,37	0,34	0,42	1,10	0,19	0,25	0,70
7,5	2,29	0,38	0,41	1,00	0,20	0,28	0,80
10	1,22	1,21	0,41	0,97	0,44	0,30	1,45
12,5	1,36	1,23	0,45	0,97	0,77	0,43	1,53
15	0,28	1,81	0,42	0,84	0,44	0,33	1,56
17,5	0,46	1,81	0,47	0,81	0,39	0,29	2,02
20	0,42	2,23	0,49	0,79	0,37	0,27	1,75
22,5	0,31	2,02	0,43	0,79	0,33	0,26	1,52
25	0,19	2,21	0,49	0,78	0,35	0,29	1,57
27,5	0,16	2,05	0,46	0,77	0,36	0,29	1,97
30	0,00	2,00	0,43	0,79	0,36	0,30	1,93

Tabela C2 - Fator de Enriquecimento utilizando NASC P1 agosto/2018

Ponto 1 Fev/19		Fator de Enriquecimento					
Elementos	As	Ba	Cr	Fe	Mn	Ni	Zn
2,5	1,79	0,47	0,41	1,17	0,29	0,31	0,77
5	1,85	0,45	0,42	1,13	0,27	0,34	1,03
7,5	1,92	0,23	0,41	1,18	0,23	0,30	0,95
10	2,18	0,42	0,41	1,24	0,27	0,29	0,87
12,5	1,81	0,35	0,42	1,19	0,24	0,21	0,85
15	2,08	0,48	0,42	1,18	0,23	0,29	0,87
17,5	2,00	0,39	0,43	1,17	0,22	0,30	0,86
20	1,96	0,54	0,46	1,07	0,24	0,25	1,12
22,5	1,98	0,51	0,44	1,03	0,23	0,28	0,98
25	2,01	0,00	0,43	1,01	0,24	0,25	0,96
27,5	1,41	0,62	0,39	0,98	0,21	0,22	0,97
30	1,79	0,69	0,41	1,00	0,29	0,25	1,04

Tabela C3 - Fator de Enriquecimento utilizando NASC P1 agosto/2018

Ponto 2		Fator de Enriquecimento					
Elementos	As	Ba	Cr	Fe	Mn	Ni	Zn
2,5	1,45	1,08	0,69	0,85	0,40	0,38	1,57
5	0,75	1,15	0,73	0,79	0,43	0,34	1,57
7,5	1,20	1,03	0,70	0,80	0,49	0,35	1,61
10	1,07	1,26	0,74	0,82	0,52	0,38	1,72
12,5	1,00	1,83	0,73	0,79	0,47	0,35	1,60
15	0,00	2,24	0,78	0,78	0,41	0,30	1,50
17,5	0,17	1,94	0,71	0,77	0,42	0,30	1,54
20	0,48	1,41	0,73	0,76	0,47	0,34	1,62
22,5	0,86	1,94	0,77	0,83	0,69	0,41	2,03
25	0,26	1,97	0,75	0,76	0,58	0,35	1,66
27,5	0,52	1,43	0,70	0,61	0,45	0,34	1,44
30	0,51	0,72	0,60	0,46	0,38	0,33	1,04

Tabela C4 - Fator de Enriquecimento utilizando NASC P1 agosto/2018

Ponto 3		Fator de Enriquecimento					
Elementos	As	Ba	Cr	Fe	Mn	Ni	Zn
2,5	2,53	0,60	0,46	1,40	0,29	0,29	1,22
5	3,17	0,49	0,45	1,49	0,00	0,00	1,09
7,5	3,40	0,51	0,45	1,52	0,31	0,27	1,01
10	2,58	0,63	0,47	1,46	0,30	0,26	1,10
12,5	3,02	0,62	0,44	1,44	0,31	0,24	1,02
15	2,82	0,59	0,44	1,42	0,31	0,27	1,03
17,5	2,76	0,56	0,46	1,41	0,28	0,24	1,26
20	2,95	0,62	0,45	1,37	0,31	0,27	1,12
22,5	2,07	0,70	0,43	1,39	0,31	0,25	1,22
25	2,07	0,58	0,43	1,38	0,29	0,24	1,35
27,5	2,42	0,24	0,45	1,40	0,26	0,24	1,13
30	2,00	0,60	0,44	1,37	0,28	0,26	1,17

APÊNDICE D – Resultados do Índice de Geoacumulação utilizando NASC

Tabela D1 - Índice de Geoacumulação utilizando NASC P1 agosto/2018

Elementos	As	Ba	Cr	Fe %	Mn	Ni	Zn
2,5	0,44	-2,45	-2,08	-0,50	-3,02	-2,74	-1,25
5	0,46	-2,33	-2,04	-0,64	-3,16	-2,79	-1,30
7,5	0,37	-2,20	-2,10	-0,83	-3,17	-2,66	-1,14
10	-1,28	-1,29	-2,84	-1,62	-2,77	-3,31	-1,03
12,5	-1,37	-1,52	-2,97	-1,86	-2,18	-3,04	-1,20
15	-3,64	-0,97	-3,09	-2,09	-3,02	-3,44	-1,19
17,5	-2,94	-0,98	-2,94	-2,14	-3,20	-3,61	-0,82
20	-2,98	-0,56	-2,75	-2,05	-3,14	-3,59	-0,91
22,5	-3,42	-0,71	-2,92	-2,05	-3,31	-3,64	-1,12
25	-4,06	-0,55	-2,71	-2,05	-3,20	-3,49	-1,04
27,5	-4,32	-0,64	-2,79	-2,06	-3,15	-3,45	-0,70
30	0,00	-0,64	-2,85	-1,98	-3,12	-3,36	-0,70
32,5	0,00	-0,60	-2,91	-2,02	-3,17	-3,45	-0,95

Tabela D2 - Índice de Geoacumulação utilizando NASC P1 fevereiro/2019

Elementos	As	Ba	Cr	Fe %	Mn	Ni	Zn
2,5	-0,13	-2,05	-2,25	-0,74	-2,78	-2,67	-1,35
5	-0,12	-2,17	-2,25	-0,83	-2,91	-2,58	-0,97
7,5	0,09	-2,97	-2,15	-0,61	-2,94	-2,60	-0,93
10	0,23	-2,14	-2,17	-0,59	-2,76	-2,71	-1,09
12,5	0,12	-2,25	-1,98	-0,49	-2,83	-2,98	-0,97
15	0,16	-1,95	-2,16	-0,66	-3,03	-2,70	-1,09
17,5	0,01	-2,34	-2,21	-0,76	-3,15	-2,74	-1,20
20	-0,01	-1,87	-2,09	-0,89	-3,02	-2,99	-0,82
22,5	0,06	-1,89	-2,12	-0,88	-3,07	-2,78	-0,95
25	0,03	0,00	-2,18	-0,96	-3,07	-3,00	-1,04
27,5	-0,67	-1,85	-2,50	-1,19	-3,43	-3,37	-1,21
30	-0,52	-1,89	-2,65	-1,35	-3,14	-3,37	-1,30
32,5	-2,77	-1,68	-4,44	-3,19	-4,62	-5,58	-2,57
35	-2,56	-1,85	-3,57	-2,14	-4,31	-5,19	-2,04
37,5	-3,47	-2,14	-5,04	-3,66	-4,93	-5,46	-3,42
40	-5,06	-1,81	-5,61	-3,87	-4,63	-5,30	-2,12
42,5	0,00	-1,77	-4,56	-3,27	-2,84	-3,31	-2,61

Tabela D3 - Índice de Geoacumulação utilizando NASC P2 fevereiro/2019

Elementos	As	Ba	Cr	Fe %	Mn	Ni	Zn
2,5	-0,85	-1,28	-1,93	-1,63	-2,73	-2,81	-0,75
5	-1,64	-1,03	-1,70	-1,58	-2,46	-2,77	-0,58
7,5	-0,93	-1,15	-1,71	-1,53	-2,23	-2,72	-0,51
10	-1,16	-0,92	-1,70	-1,55	-2,19	-2,64	-0,47
12,5	-1,58	-0,71	-2,03	-1,92	-2,68	-3,10	-0,90
15	0,00	-0,60	-2,12	-2,13	-3,05	-3,51	-1,18
17,5	-4,14	-0,66	-2,12	-1,99	-2,87	-3,35	-1,00
20	-2,21	-0,65	-1,60	-1,55	-2,23	-2,71	-0,45
22,5	-2,04	-0,87	-2,21	-2,10	-2,36	-3,12	-0,81
25	-3,84	-0,90	-2,29	-2,27	-2,68	-3,42	-1,15
27,5	-2,37	-0,90	-1,93	-2,13	-2,57	-2,97	-0,89
30	-1,87	-1,38	-1,65	-2,01	-2,30	-2,49	-0,84
32,5	-2,84	-1,73	-1,41	-2,05	-2,30	-2,41	-0,75
35	-1,46	-1,65	-1,43	-2,04	-2,37	-2,86	-0,79
37,5	-3,47	-1,58	-1,47	-2,12	-2,21	-2,66	-0,92
40	-1,91	-2,04	-1,50	-2,26	-2,30	-2,59	-1,00
42,5	-1,89	-1,80	-1,44	-2,14	-2,39	-2,66	-0,82
45	-2,04	-1,40	-1,39	-2,13	-2,38	-2,42	-0,71
47,5	-1,17	-1,94	-1,28	-2,09	-2,37	-2,45	-0,82

Tabela D4 - Índice de Geoacumulação utilizando NASC P3 fevereiro/2019

Elementos	As	Ba	Cr	Fe %	Mn	Ni	Zn
2,5	0,26	-1,81	-2,21	-0,59	-2,87	-2,88	-0,79
5	0,59	-2,08	-2,23	-0,50	0,00	0,00	-0,94
7,5	0,62	-2,13	-2,29	-0,54	-2,83	-3,02	-1,13
10	0,32	-1,70	-2,15	-0,50	-2,79	-2,99	-0,91
12,5	0,53	-1,75	-2,25	-0,54	-2,77	-3,10	-1,04
15	0,36	-1,90	-2,32	-0,63	-2,82	-3,01	-1,09
17,5	0,33	-1,97	-2,25	-0,64	-2,98	-3,18	-0,80
20	0,39	-1,85	-2,33	-0,71	-2,86	-3,08	-1,01
22,5	-0,13	-1,69	-2,39	-0,70	-2,87	-3,16	-0,89
25	-0,11	-1,95	-2,38	-0,70	-2,96	-3,20	-0,73
27,5	0,20	-3,12	-2,23	-0,60	-3,00	-3,11	-0,90
30	-0,23	-1,96	-2,41	-0,77	-3,04	-3,20	-1,00
32,5	0,19	-2,10	-2,24	-0,61	-3,00	-3,18	-0,80
35	0,35	-1,96	-2,36	-0,72	-3,07	-3,09	-0,80
37,5	0,37	-1,72	-2,32	-0,78	-4,05	-4,16	-0,74
40	-1,13	-1,67	-3,67	-2,17	-5,04	-5,31	-2,42
42,5	-3,14	-1,91	-4,78	-3,37	-5,05	-5,16	-3,65
45	-4,42	-2,47	-5,32	-3,89	-7,38	-7,87	-4,05
47,5	0,00	-2,77	-5,05	-5,05	-8,68	-8,60	-5,19
50	0,00	-2,36	-5,99	-4,77	-7,23	-7,47	-4,57
52,5	0,00	-2,29	-6,15	-4,49	-7,49	-7,77	-4,71
55	0,00	-2,34	-4,41	-4,59	-6,76	-6,36	-4,53
57,5	0,00	-2,44	-6,32	-4,95	-5,85	-5,95	-5,07

APÊNDICE F - Dados complementares da Análise Fatorial.

Tabela F1 Componentes Principais extraídas pela Análise Fatorial P1 agosto/2018.

	CP1	CP2	CP3
Argila	-0,322	-0,915	0,167
Silte	0,911	-0,214	0,133
Areia	-0,747	0,555	-0,191
As	0,911	-0,296	0,087
Ba	-0,977	-0,120	-0,095
Br	0,918	-0,125	0,035
Ca%	-0,680	-0,498	0,110
Ce	0,989	-0,032	-0,046
Co	0,857	-0,474	0,056
Cr	0,845	-0,494	0,104
Cs	-0,975	-0,087	-0,098
Cu	0,832	0,034	-0,218
Eu	0,917	-0,147	0,165
Fe%	0,933	-0,317	0,064
Hf	-0,986	-0,125	0,007
K%	-0,991	-0,094	-0,040
La	0,886	-0,184	-0,191
Lu	-0,890	-0,115	0,117
Mn	0,251	0,861	-0,324
Na	-0,995	-0,019	0,008
Nd	-0,011	-0,284	-0,818
Ni	0,958	-0,126	-0,036
P	0,577	0,677	-0,233
Pb	0,957	-0,241	-0,010
Rb	-0,992	-0,010	0,007
Sb	0,880	0,226	-0,044
Sc	0,887	-0,448	0,074
Sm	0,218	-0,179	-0,884
Ta	-0,883	-0,335	-0,040
Tb	-0,123	0,629	0,550
Th	-0,604	-0,606	-0,295
U	-0,915	-0,341	-0,034
Yb	-0,885	-0,231	-0,034
Zn	-0,701	-0,154	0,127

Tabela F2 Componentes Principais extraídas pela Análise Fatorial P1 fevereiro/2019

	CP1	CP2	CP3	CP4
Argila	-0,659	-0,173	-0,608	0,261
Silte	-0,752	0,003	-0,597	-0,050
Areia	0,829	-0,169	0,238	0,057
As	-0,936	-0,045	0,126	-0,083
Ba	0,537	0,451	-0,380	-0,490
Br	-0,772	-0,093	0,364	0,312
Ca%	-0,870	0,176	0,113	0,096
Ce	-0,994	-0,027	0,028	-0,013
Co	-0,987	0,017	0,030	-0,036
Cr	-0,990	0,021	-0,054	-0,027
Cs	-0,934	0,072	0,054	-0,251
Cu	-0,983	-0,053	0,070	0,011
Eu	-0,995	-0,012	-0,013	-0,011
Fe%	-0,986	-0,048	0,000	0,102
Hf	0,382	0,875	0,084	0,037
K%	0,913	0,220	0,049	-0,303
La	-0,990	-0,008	0,022	-0,088
Lu	-0,370	0,852	-0,013	0,352
Mn	-0,833	-0,037	0,291	-0,208
Na	0,960	0,161	0,043	-0,170
Nd	-0,877	0,144	0,053	-0,324
Ni	-0,931	-0,048	0,210	-0,053
P	-0,977	-0,003	0,065	-0,134
Pb	-0,983	-0,016	0,105	-0,054
Rb	0,856	0,251	0,175	-0,302
Sb	-0,751	-0,322	-0,075	0,045
Sc	-0,992	-0,002	-0,023	-0,016
Sm	-0,989	0,028	0,020	-0,077
Ta	-0,915	0,233	-0,056	-0,222
Tb	-0,890	0,253	0,045	-0,173
Th	-0,982	0,044	-0,005	-0,119
U	-0,957	0,188	-0,009	0,077
Yb	-0,341	0,862	0,004	0,334
Zn	-0,947	0,036	-0,090	-0,088

Tabela F3 Componentes Principais extraídas pela Análise Fatorial P2 fevereiro/2019

	CP1	CP2	CP3	CP4
Argila	-0,774	-0,411	0,169	-0,279
Silte	-0,686	0,393	0,213	-0,288
Areia	0,852	0,177	-0,209	0,322
As	-0,186	0,624	0,464	0,306
Ba	0,875	0,273	-0,073	-0,115
Br	0,506	0,774	0,051	0,078
Ca%	-0,213	0,605	0,159	-0,655
Ce	-0,983	0,091	-0,065	0,046
Co	0,137	0,932	-0,208	-0,040
Cr	-0,980	0,076	-0,017	-0,009
Cs	-0,670	0,602	0,116	0,013
Cu	-0,923	-0,261	-0,093	0,044
Eu	-0,988	0,009	0,011	0,068
Fe%	0,103	0,959	-0,018	-0,027
Hf	0,927	0,331	-0,031	0,016
K%	0,933	-0,001	-0,231	0,020
La	-0,959	0,235	-0,043	0,026
Lu	0,503	0,756	0,091	0,056
Mn	-0,657	0,311	-0,563	0,026
Na	0,968	0,182	0,017	-0,001
Nd	-0,517	0,703	-0,239	0,049
Ni	-0,890	0,211	-0,263	0,045
P	-0,916	0,266	-0,186	0,028
Pb	-0,987	-0,106	-0,046	0,026
Rb	0,832	0,518	-0,012	-0,077
Sb	-0,508	0,532	0,459	0,308
Sc	-0,989	-0,090	-0,001	0,016
Sm	-0,935	0,301	-0,071	0,071
Ta	0,092	0,872	0,049	-0,258
Tb	-0,823	0,066	0,352	0,070
Th	-0,956	0,177	-0,046	0,015
U	-0,883	0,131	-0,069	0,145
Yb	0,380	0,833	0,119	0,180
Zn	-0,278	0,879	-0,265	-0,027

Tabela F4 Componentes Principais extraídas pela Análise Fatorial P3 fevereiro/2019

	CP1	CP2	CP3	CP4
Argila	-0,751	0,391	-0,321	0,100
Silte	-0,982	0,068	-0,043	0,025
Areia	0,972	-0,115	0,082	-0,036
As	-0,543	-0,678	0,184	-0,087
Ba	-0,510	0,525	0,363	-0,062
Br	-0,866	-0,249	0,240	0,058
Ca%	-0,975	0,135	0,073	0,061
Ce	-0,993	0,026	-0,045	-0,047
Co	-0,994	0,003	-0,024	-0,061
Cr	-0,993	-0,061	-0,002	-0,018
Cs	-0,981	0,136	0,030	-0,065
Cu	-0,888	-0,136	0,185	-0,096
Eu	-0,989	-0,019	-0,068	-0,050
Fe%	-0,995	-0,060	0,022	-0,029
Hf	-0,466	0,749	0,232	0,290
K%	-0,208	-0,198	0,838	0,112
La	-0,992	0,055	-0,023	-0,041
Lu	-0,189	-0,150	-0,234	0,885
Mn	-0,952	-0,002	0,067	-0,039
Na	0,829	0,362	0,347	-0,041
Nd	-0,984	0,027	0,075	0,017
Ni	-0,956	-0,020	0,049	-0,048
P	-0,960	0,025	-0,145	-0,099
Pb	-0,965	0,025	-0,022	-0,061
Rb	0,519	0,569	0,466	-0,206
Sb	-0,365	-0,800	-0,027	-0,135
Sc	-0,996	-0,019	-0,025	-0,043
Sm	-0,992	0,020	-0,041	0,034
Ta	-0,968	0,041	-0,047	-0,105
Tb	-0,152	-0,439	0,718	0,245
Th	-0,982	0,148	-0,022	-0,050
U	-0,956	-0,005	0,085	0,172
Yb	-0,957	0,203	0,071	0,067
Zn	-0,977	0,001	-0,106	-0,076

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento,
associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e
administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear,
órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e
Comunicações.**