



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

**CLAYCIANE SANTOS DO NASCIMENTO**

**METAIS E SEUS EFEITOS EM BAIXOS NÍVEIS DE ORGANIZAÇÃO BIOLÓGICA:  
UMA ANÁLISE ECOTOXICOLÓGICA EM DISTINTOS COMPARTIMENTOS  
AMBIENTAIS DE IGARAPÉS NO MUNICÍPIO DE BARCARENA/PA**

**BELÉM/PA  
2021**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**METAIS E SEUS EFEITOS EM BAIXOS NÍVEIS DE ORGANIZAÇÃO BIOLÓGICA:  
UMA ANÁLISE ECOTOXICOLÓGICA EM DISTINTOS COMPARTIMENTOS  
AMBIENTAIS DE IGARAPÉS NO MUNICÍPIO DE BARCARENA/PA**

**Dissertação apresentada por:**

**CLAYCIANE SANTOS DO NASCIMENTO**

**Orientadora: Dra. Lílian Lund Amado (UFPA)**

---

**BELÉM/PA  
2021**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com  
ISBDSistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)**

---

N244m Nascimento, Clayciane Santos do.  
Metais e seus efeitos em baixos níveis de organização biológica  
: Uma análise ecotoxicológica em distintos compartimentos  
ambientais de igarapés no município de Barcarena/PA /  
ClaycianeSantos do Nascimento. — 2021.  
xv, 45 f f. : il. color.

Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dra. Lílian Lund Amado  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em  
Ciências Ambientais, Belém, 2021.

1. Metais. 2. Alumínio. 3. biomarcadores. 4. Barcarena.  
5. Amazônia. I. Título.

CDD 551.4607

---



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

**METAIS E SEUS EFEITOS EM BAIXOS NÍVEIS DE ORGANIZAÇÃO BIOLÓGICA:  
UMA ANÁLISE ECOTOXICOLÓGICA EM DISTINTOS COMPARTIMENTOS  
AMBIENTAIS DE IGARAPÉS AMAZÔNICOS**

**CLAYCIANE SANTOS DO NASCIMENTO**

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Oceanografia na Área  
de Ciências Ambientais e Linha de Pesquisa Avaliação e Gestão de Recursos  
Aquáticos**

Data da Aprovação: 30/06/2021

Banca Examinadora:

*Lilian Lund Amado*

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Lílian Lund Amado - Orientadora  
(UFPA-ICB)

*Leandro Machado de Carvalho*

Prof. Dr. Leandro Machado de Carvalho - Membro 1  
(UFSM)

*Marcelo Rollnic*  
Prof. Dr. Marcelo Rollnic  
IG/UFPA  
SIAPE-1729914

Prof. Dr. Marcelo Rollnic - Membro 2  
(UFPA-IG)

*Sildiane Martins Cantanhêde*

Dr<sup>ª</sup>. Sildiane Martins Cantanhêde - Membro 3  
(UFPA-IG)

À minha mãe-vó, *in memoriam*, Laura Barbosa,  
Às minhas tias: Cirlene, Laurilene e Cristiane,  
À minha prima Laura Grazielly.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente e incondicionalmente a Deus por ter me dado forças nos momentos difíceis, quando eu mesma já não acreditava, quando tudo parecia ser impossível. À minha família especialmente minha mãe-vó Laura (*in memoriam*) e minhas tias (Cirlene, Laurilene e Cristiane) por durante toda a minha vida terem me ofertado todo o suporte necessário, repito sempre que possível que eu nada seria se não fosse vocês.

À minha orientadora Dra. Lílian Amado, por ter me recebido tão bem no Laboratório de Ecotoxicologia Aquática – LABECOTOX e mais recentemente quando meu notebook deu problema, não pensou duas vezes em me oferecer sua sala para eu trabalhar. Além disso, sempre se manteve próxima (ainda que distante devido aos acontecimentos da pandemia), tanto nas suas orientações como para falar uma palavra amiga ou dar um “abraço virtual”. ‘Àquela’ nossa conversa foi essencial para a conclusão deste trabalho, sua confiança em mim me inspirou a prosseguir, lhe serei eternamente grata.

À toda a equipe do LABECOTOX, em especial a Irina Carvalho, Sildiane Cantanhêde, pelo companheirismo, momentos de descontração e ajudas nas dosagens e análises. A Alana Nauar (dupla), João Pedro, João Paulo, Sissa, Tayná, Lindsey, Yure, Lia, Haru, Dani, Sarita, Lucas (sua ajuda com o mapa foi de extrema importância) e por último, mas não menos importante à Carla e ao John pelas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho. A convivência com todos vocês nesses dois anos (pelo menos no tempo que foi possível) foi incrível.

Aos meus amigos de jornada que me acompanham por longos anos e compartilham das felicidades, vitórias, angústias, tristezas e todos os sentimentos possíveis que a vida acadêmica (e pessoal) proporciona: Alyson Carvalho, Nayara Azevedo, Luana Aires, Suelen Furtado e Lana Farias, (as duas últimas foram essenciais para a finalização desse trabalho, quebraram uma “árvore” no empréstimo dos seus notebooks, obrigada meninas).

À Universidade Federal do Pará – UFPA, sempre levarei comigo o orgulho de ter feito parte dessa casa. Ao Instituto de Ciências Biológicas – ICB e ao Laboratório de Pesquisa em Monitoramento Marinho – LAPMAR, pelos espaços disponibilizados e por terem sido meu abrigo por longos períodos nesses dois anos. À Empresa Hydro pela concessão da bolsa. Por fim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

Os metais estão incluídos entre os contaminantes que influenciam a dinâmica dos ecossistemas aquáticos, o que torna necessário estudos que visem avaliar tanto as concentrações destes elementos no ambiente como possíveis efeitos de toxicidade em organismos aquáticos devido a biodisponibilidade. Neste contexto, os estudos de biomonitoramento, especialmente envolvendo variáveis ecotoxicológicas, relacionados com respostas, em baixo nível de organização biológica são úteis para avaliar a qualidade ambiental. O presente estudo ecotoxicológico inclui três abordagens: (1) análise da concentração dos metais Al, Cr, Pb, Ba, Ni e Mn em matrizes abióticas (água e sedimento de igarapés); e (2) bióticas utilizando o peixe - *Hyphessobrycon heterorhabdus* inteiro e o caranguejo - *Trichodactylus borellianus* utilizando as brânquias e músculo, além de uma espécie de planta da Família Marantacea e (3) através da avaliação de efeitos adversos primários com o uso de biomarcadores de exposição (Capacidade Antioxidante Total) e efeito (Lipoperoxidação). As coletas foram realizadas na área da rede hidrográfica que influencia a Bacia do rio Murucupi, nas comunidades Bom Futuro, Vila Nova e no distrito da Vila do Conde em três períodos climáticos sendo eles: Estiagem (Campanha 1: Nov/2018), Chuvoso (Campanha 2: Mar/2019) e período de Transição (Campanha 3: Jun/2019). Os pontos de coleta foram determinados de forma a contemplar um gradiente de influência de atividades industriais, bem como de outros tipos de atividade que ocorrem na região e que também apresentam potencial de contaminação. A dispersão dos pontos ocorreu da seguinte forma: Potencial impacto direto, próximos à distintas influências antrópicas (PM1, PM2, PM3, PM4 e PM5); Potencial impacto indireto: (PC2, PC3 e PC5); e Pontos controles: (PC1, PC6, PC7, PC8 e PC9). Em geral, no sedimento dos igarapés as análises dos metais apresentaram uma distribuição dentro da mesma faixa em termos de concentrações medidas, sem diferenças significativas entre pontos amostrados e entre períodos de coletas. Os elementos que se destacaram quanto as concentrações foram Al, Ba e Cr. Dos metais analisados, apenas Cr, Ni e Pb são mencionados na resolução CONAMA N° 454/2012. Todos eles encontram-se abaixo do limite legal estabelecido. Para as análises na água (fração total), durante os três períodos houve uma distribuição dentro das mesmas faixas em termos de concentrações medidas. Não houve aumento ou diminuição expressiva para os elementos estudados. Dentre os metais analisados, apenas Al (fração total) não é mencionado na resolução CONAMA N° 357/2005. Todos os demais estão abaixo do limite aceitável estabelecido pelo órgão de

proteção ambiental. O único metal que mostrou aumento de concentração entre campanhas na fração total da água foi o Ba. O Al foi o metal mais abundante na fração total da água com concentrações que não apresentaram diferenças entre períodos. Para os organismos, os peixes coletados apresentaram maiores concentrações de Al e Ba na estação chuvosa em comparação com peixes da mesma espécie coletados na estação de estiagem. Os metais Al e Mn não apresentaram diferenças entre pontos no mesmo período. O Pb foi registrado em maiores concentrações durante a estiagem. As plantas também não apresentaram diferenças significativas nem entre os pontos nem entre períodos para nenhum dos metais. No entanto, demonstraram uma tendência de aumento no acúmulo de Pb, Mn e Ba durante o período de transição. Quanto à avaliação das respostas biológicas com o uso de biomarcadores de exposição e efeito, nos caranguejos houve indução das defesas antioxidantes nas brânquias dos organismos do ponto PC1 durante o período chuvoso. O peixe *H. heterorhabdus* apresentou maior capacidade antioxidante para organismos do PC07 durante este período. Conclui-se que existe um padrão bem marcado e sazonal dos metais nos diferentes compartimentos ambientais que são seguidos pelos biomarcadores, refletindo mudanças relacionadas à geologia local e fisiologia dos organismos. Os principais metais encontrados nos compartimentos abióticos (água - fração total e dissolvida e sedimento) e bióticos (peixes, invertebrados e planta) demonstraram uma forte relação com a formação geológica local, sendo Al (o mais concentrado), Ba e Mn os mais representativos. Portanto, com base nos resultados aqui descritos, são necessários estudos para estabelecer *baselines* ambientais que levem em consideração as características químicas e físicas locais e o nível de sensibilidade / tolerância dos organismos residentes. Esses estudos estabelecerão as bases para o estabelecimento de restrições legais aplicáveis que sejam compatíveis com as realidades ambientais locais.

**Palavras-chave:** metais; alumínio; biomarcadores; Barcarena; Amazônia.

## ABSTRACT

Metals are included among the contaminants that influence the dynamics of aquatic ecosystems, which requires studies aimed at evaluating both the concentrations of these elements and possible toxicity effects on aquatic organisms due to bioavailability. In this context, biomonitoring studies, especially involving ecotoxicological variables, related to responses, at a low level of biological organization are useful to assess environmental quality. The present ecotoxicological study includes three approaches: (1) analysis of the concentration of metals in Al, Cr, Pb, Ba, Ni and Mn in abiotic elements (water and stream sediment); (2) biotic compartments (fish - *Hyphessobrycon heterorhabdus*; crab - *Trichodactylus borellianus* and vegetable a plant species Family Marantaceae), in addition to the (3) assessment of primary adverse effects through the use of exposure and effect biomarkers. The collections were carried out in the area of the hydrographic network that influences the Murucupi Basin, in the communities Bom Futuro, Vila Nova and in the district of Vila do Conde and were carried out in three climatic periods, namely: Dry (Campaign 1: Nov/2018), Rainy (Campaign 2: Mar/2019) and Transition period (Campaign 3: Jun/2019). The collection points were determined in order to contemplate a gradient of influence from the company's activity and from other types of activity that take place in the region. The points were dispersed as follows: Potential direct impact (PM1, PM2, PM3, PM4 and PM5); Potential indirect impact: (PC2, PC3 and PC5); and Control points: (PC1, PC6, PC7, PC8 and PC9). The species were collected in different streams that are located in a region with a history of bauxite processing activity (Barcarena, PA), in addition to the direct anthropogenic influence of the city. The collections were carried out in the area of the hydrographic network that influences the Murucupi Basin, in the communities Bom Futuro, Vila Nova and in the district of Vila do Conde and were carried out in three climatic periods, namely: Dry (Campaign 1: Nov/2018), Rainy (Campaign 2: Mar/2019) and Transition period (Campaign 3: Jun/2019). The collection points were determined in order to contemplate a gradient of influence multiple anthropogenic influences. The points were dispersed as follows: Potential direct impact (PM1, PM2, PM3, PM4 and PM5); Potential indirect impact: (PC2, PC3 and PC5); and Control points: (PC1, PC6, PC7, PC8 and PC9). In general, in the sediment of the streams, the analysis of metals presented a distribution within the same range in terms of measured concentrations, without significant differences between sampled points and between sampling periods. For the in-water analyses, during the three

periods there was a distribution within the ranges according to the terms of measurements. There was no significant increase or decrease for the elements studied, among the metals analyzed, only Al (total fraction) is not mentioned in CONAMA Resolution N°. 357/2005. All others are below the acceptable limit established by the environmental protection agency. The only metal that showed an increase in concentration between campaigns in the total fraction of water was Ba. Al was the most abundant metal with concentrations that did not differ between periods. For organisms, fish collected showed higher concentrations of Al and Ba in the rainy season compared to fish of the same species collected in the dry season. The metals Al and Mn did not show differences between points in the same period. Pb was recorded in higher concentrations during the dry season. Plants also did not show significant differences neither between points nor between periods for any of the metals, however, they showed a tendency to increase the accumulation of Pb, Mn and Ba during the transition period. As for the evaluation of biological responses using exposure and effect biomarkers, in crabs there was induction of antioxidant defenses in the gills of organisms from point PC1 during the rainy season. The fish *H. heterorhabdus* showed greater antioxidant capacity for organisms from PC07 during this period. It is concluded that there is a well-marked and seasonal pattern of metals in different environmental compartments that are followed by biomarkers, reflecting changes related to local geology and physiology of organisms. The main metals found in the abiotic (water - total and dissolved fraction and sediment) and biotic (fish, invertebrates and plant) compartments showed a strong relationship with the local geological formation, with Al, Ba and Mn being the most representative. Being, the Al the most concentrated. Therefore, based on the results described here, studies are needed to establish environmental baselines that take into account local chemical and physical characteristics and the level of sensitivity / tolerance of resident organisms. These studies will lay the groundwork for establishing applicable legal restrictions that are compatible with local environmental realities.

**Keywords:** metals; aluminum; biomarkers; Barcarena; Amazônia.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Localização dos pontos amostrados nos igarapés: Potencial impacto direto, localizados no rio Murucupi (PM1, PM2, PM3, PM4 e PM5), Potencial impacto indireto (PC2, PC3 e PC5) e Controles (PC1, PC6, PC7, PC8 e PC9). ..... 6
- Figura 2- Espécies biomonitoras dos igarapés (*Hyphessobrycon heterorhabdus*) e o caranguejo (*Trichodactylus borellianus*), respectivamente. .... 8
- Figura 3 - Distribuição e acúmulo de todos os metais nos sedimentos dos pontos amostrados nos igarapés amostrados (A unidade do eixo Y é de mg/kg total). O Al não é representado na figura por seus valores serem de uma ordem de grandeza muito superior ao demais, conforme consta na tabela 4. .... 19
- Figura 4- Distribuição e acúmulo de todos os metais nas águas (fração total) dos pontos amostrados nos igarapés amostrados (A unidade do eixo Y é de µg/L total). O Al não é representado na figura por seus valores serem de uma ordem de grandeza muito superior aos demais..... 22
- Figura 5 - Concentração de alumínio dissolvido (µg/L) em áreas com distintas distâncias de um pólo industrial em igarapés durante o período de estiagem (Nov/2018), o período chuvoso (Mar/2019) e transição (Jun/2019). Os dados são expressos como a mediana ± quartil. O limite da legislação CONAMA 357/2005 está sendo exibido como uma linha. Como não houve diferenças entre os pontos, não foi colocado as letras maiúsculas e minúsculas para diferenciar. .... 23
- Figura 6 - ACAP em brânquias de *T. borellianus* de todos os locais amostrados (n=6 a 8 amostras, variando por ponto) durante os períodos de estiagem (Nov/2018) e chuvoso (Mar/2019). Letras maiúsculas diferentes representam diferença estatística (p<0,05) entre estações para o mesmo ponto e letras minúsculas diferentes representam diferença estatística (p<0,05) entre pontos para o mesmo período. Dados representados em mediana±1° quartil. .... 26
- Figura 7 - Capacidade antioxidante total em músculo de *T. borellianus* de todos os locais amostrados (n=3 a 12 amostras, variando por ponto) durante o período de estiagem (Nov/2018). Letras diferentes representam diferença estatística (p<0,05) entre pontos para o mesmo período. Dados representados em média±erro padrão. .... 27

- Figura 8 - Lipoperoxidação no músculo de *T. borellianus* de todos os locais amostrados (n= 5 a 14 amostras, variando por ponto) durante o período de estiagem (Nov/2018). Letras minúsculas diferentes representam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre pontos para o mesmo período. Dados representados em média $\pm$ erro padrão. .... 27
- Figura 9 - Capacidade antioxidante total em *H. heterorhabdus* de todos os locais amostrados (n=12 a 16 amostras, variando por ponto) durante os períodos de estiagem (Nov/2018), Chuvoso (Mar/2019) e Transição (Jun/2019). Letras maiúsculas diferentes representam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre estações para o mesmo ponto e letras minúsculas diferentes representam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre pontos para o mesmo período. Dados representados em mediana $\pm$ 1<sup>o</sup> quartil. .... 28
- Figura 10 - Lipoperoxidação em *H. heterorhabdus* de todos os locais amostrados (n= 6 a 10 amostras, variando por ponto) durante os períodos chuvoso (Mar/2019) e transição (Jun/2019). Letras maiúsculas diferentes representam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre estações para o mesmo ponto e letras minúsculas diferentes representam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre pontos para o mesmo período. Dados representados em mediana $\pm$ 1<sup>o</sup> quartil. .... 29

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Dados de parâmetros físico-químicos (Temperatura; Potencial Hidrogeniônico; Oxigênio Dissolvido e Condutividade Elétrica) das águas dos locais de igarapés amostrados durante os períodos de estiagem (nov/18), chuvoso (mar/19) e de transição (jun/19). A sigla NC significa que o valor de referência para o parâmetro físico-químico correspondente não consta a resolução CONAMA 357/2005.... 13
- Tabela 2 - Valores de peso total (PT), comprimento do cefalotórax (CC), altura do cefalotórax (AC) e largura do cefalotórax (LC) dos caranguejos *Trichodactylus borellianus* de igarapés, coletados durante os períodos de estiagem (nov/2018) e chuvoso (jun/2019). As letras minúsculas diferentes representam diferenças ( $p < 0,05$ ) entre os locais no mesmo período. As letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ( $p < 0,05$ ) no mesmo local ao longo dos períodos amostrados. Os dados são expressos como a mediana  $\pm$  quartil..... 15
- Tabela 3 - Valores de peso total (PT), comprimento total (CT) e comprimento padrão (CP) dos peixes *H. heterorhabdus* nos de igarapés coletados durante os períodos de estiagem (nov/2018), chuvoso (mar/2019) e transição (jun/2019). As letras minúsculas diferentes representam diferenças ( $p < 0,05$ ) entre os locais no mesmo período. As letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ( $p < 0,05$ ) no mesmo local ao longo dos períodos amostrados. Os dados são expressos como a mediana  $\pm$  quartil..... 16
- Tabela 4 - Concentração de metais no sedimento (mg/kg) em áreas com distintas distâncias do empreendimento da ALUNORTE em igarapés durante o período de estiagem (Nov/2018), período chuvoso (Mar/2019) e transição (Jun/2019). As letras minúsculas diferentes representam diferenças ( $p < 0,05$ ) entre os locais no mesmo período. As letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ( $p < 0,05$ ) no mesmo local ao longo dos períodos amostrados. NC significa valores limites de metais que não constam na resolução CONAMA N° 454/2012. Os dados são expressos como a média  $\pm$  erro padrão. Os valores que não apresentam letras é devido a ausência de réplicas suficientes acima do limite de detecção, não sendo possível realizar análise estatística. .... 18

- Tabela 5- Concentração total de metais na água ( $\mu\text{g/L}$ ) em áreas de igarapé durante o período de estiagem (Nov/2018), período chuvoso (Mar/2019) e período de transição (Jun/2019). Os valores abaixo do limite de detecção (-). As letras minúsculas diferentes representam diferenças ( $p < 0,05$ ) entre os locais no mesmo período. As letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ( $p < 0,05$ ) no mesmo local ao longo dos períodos amostrados. NC significa valores limites de metais que não constam na resolução CONAMA N° 357/2005. Os dados são expressos como a média  $\pm$  erro padrão. .... 21
- Tabela 6 - Concentração de metais totais no músculo do peixe *H. heterorhabdus* (mg/kg) de áreas com distintas distâncias de um pólo industrial em igarapés durante o período de estiagem (nov/2018), período chuvoso (Mar/2019) e período de transição (Jun/2019). Os valores abaixo do limite de detecção (-). As letras minúsculas diferentes representam diferenças ( $p < 0,05$ ) entre os locais no mesmo período. As letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ( $p < 0,05$ ) no mesmo local ao longo dos períodos amostrados. Os dados são expressos como a média  $\pm$  erro padrão ..... 24
- Tabela 7 - Concentração de metais totais na planta Marantacea (mg/kg) de áreas com distintas distâncias de um pólo industrial em igarapés durante o período de estiagem (Nov/2018), período chuvoso (Mar/2019) e período de transição (Jun/2019). As letras minúsculas diferentes representam diferenças ( $p < 0,05$ ) entre os locais no mesmo período. As letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ( $p < 0,05$ ) no mesmo local ao longo dos períodos amostrados. Os dados são expressos como a média  $\pm$  erro padrão ..... 25

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>RESUMO</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	x
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
2 OBJETIVO GERAL.....	5
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	6
3.1 ÁREA DE ESTUDO .....	6
3.2 COLETAS DE ÁGUA E SEDIMENTO.....	7
3.3 COLETAS DE ORGANISMOS .....	8
3.4 ANÁLISE DE METAIS EM SEDIMENTO E ÁGUA.....	9
3.6 ANÁLISE DE BIOMARCADORES .....	10
<b>3.6.1 Dissecação</b> .....	10
<b>3.6.2 Preparação das amostras</b> .....	10
<b>3.6.3 Análise de proteínas totais</b> .....	11
<b>3.6.4 Capacidade antioxidante total (ACAP)</b> .....	11
<b>3.6.5 Lipoperoxidação (LPO)</b> .....	11
3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	12
<b>4 RESULTADOS</b> .....	13
4.1 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DA ÁGUA .....	13
4.2 BIOMETRIA DOS ORGANISMOS .....	14
<b>4.2.1 Caranguejos (<i>Trichodactylus Borellianus</i>)</b> .....	14
<b>4.2.2 Peixes (<i>Hyphessobrycon heterorhabdus</i>)</b> .....	15
4.3 ANÁLISE DE METAIS.....	16
<b>4.3.1 Sedimento</b> .....	16
<b>4.3.2 Água</b> .....	19
<b>4.3.3 Organismos</b> .....	23
<b>4.3.3.1 Peixe (<i>H. heterorhabdus</i>)</b> .....	23

4.3.3.2 <i>Planta Família Marantaceae</i> .....	24
4.4 BIOMARCADORES .....	25
<b>4.4.1 Caranguejo (<i>T. Borellianus</i>)</b> .....	25
4.4.1.1 <i>Brânquias</i> .....	25
4.4.1.2 <i>Músculo</i> .....	26
<b>4.4.2 Peixe <i>H. heterorhabdus</i></b> .....	28
<b>5 DISCUSSÃO</b> .....	30
5.1 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS .....	30
5.2 BIOMETRIA DOS ORGANISMOS .....	31
5.3 ANÁLISE DE METAIS (SEDIMENTOS, ÁGUA E ORGANISMOS) .....	31
5.4 BIOMARCADORES .....	35
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	38
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	39

## 1 INTRODUÇÃO

Os metais estão incluídos entre os contaminantes que podem alterar a dinâmica dos ambientes aquáticos, o que torna relevante estudos que busquem avaliar tanto as concentrações destes elementos no ambiente como possíveis efeitos de toxicidade em organismos aquáticos (Álvarez *et al.* 2017, Piassão *et al.* 2018). Esses elementos estão presentes na água, solo, sedimentos, ar e organismos vivos, e têm origem essencialmente natural, a qual, caracteriza-se por ser um fenômeno geológico, sazonal, influenciado pelo clima, e geralmente não causa poluição (Bradl 2005, Wuana & Okieimen 2011, Armah *et al.* 2014).

As fontes naturais de metais advêm de erupções vulcânicas, erosão de depósitos minerais, evaporação oceânica e processos pedogênicos gerais que propiciam sua ocorrência no meio ambiente (Bradl 2005, Zeng *et al.* 2014). E as concentrações variam consideravelmente de uma área para outra, conforme a composição química da rocha-mãe, a qual, pode determinar o conteúdo de metais no solo, enquanto o clima e os organismos do solo afetam a especiação dos metais. (Álvarez *et al.* 2017).

A partir da exploração dos recursos minerais na manufatura de diversos produtos industrializados, os metais contaminam o ambiente através de subprodutos da atividade humana, como por exemplo: lixo acumulado nas ruas, resíduos orgânicos de animais, resíduos provenientes de construção civil, óleos e graxas deixados por veículos, ligações incorretas ou clandestinas de resíduos sanitários na rede de drenagem pluvial, e poluentes aéreos (Jesus *et al.* 2004, Belluta *et al.* 2008). Em um aspecto mais geral, as causas de poluição antrópica por metais são atribuídas às indústrias, à agricultura e à urbanização. Entre as indústrias poluidoras, há a contaminação direta durante a extração, processamento e uso de metais; porém, a maioria das indústrias polui também de forma indireta (Wuana & Okieimen 2011).

Em rios e igarapés (denominação regional para riachos), os impactos diretos causados por metais são decorrentes em sua maioria, da construção de usinas hidroelétricas e hidrovias; impactos indiretos das mudanças de uso da terra, como desmatamento, construção de estradas ou crescimento de cidades (através do descarte inadequado de esgoto sanitários) e/ou via atividades de mineração. (Espírito-Santo & Zuanon 2016). O processo de urbanização sem o devido planejamento nas cidades brasileiras vem ocasionando contaminação dos sistemas aquáticos e provocando

anomalias nos processos biológicos, físicos e químicos dos sistemas naturais (Nascimento *et al.* 2015).

Dentre todos os principais impactos que ameaçam os ecossistemas aquáticos, esses elementos desempenham um papel importante devido a sua não degradabilidade e, em alguns casos, a possibilidade de bioconcentração e biomagnificação (Zhang *et al.* 2012, Townsend *et al.* 2013, Ye *et al.* 2015). A toxicidade e a mobilidade dos metais dependem não só das suas concentrações (frações total e dissolvida), mas também da sua forma química específica. A especiação de metais potencialmente tóxicos subsidia informações importantes para avaliar a toxicidade e o risco ecológico aos animais (Ye *et al.* 2015). Desse modo, os metais podem se apresentar em diferentes formas químicas: solúvel, ligados à matéria orgânica, ligados aos óxidos/hidróxidos de ferro, alumínio e manganês, carbonatos, fosfatos sulfatos (ou outros minerais secundários), ou ligados aos silicatos (Devesa-Rey *et al.* 2010).

Algumas dessas formas químicas podem favorecer a biodisponibilidade de metais no ambiente aquático, visto que, apresentam diferentes níveis de toxicidade e mobilização no meio (Zheng *et al.* 2013, Ye *et al.* 2015). A dinâmica entre as diferentes frações geoquímicas é o alicerce fundamental para a compreensão da biodisponibilidade e facilidade de liberação dos compostos no meio, cooperando para a avaliação ambiental (Karbassi *et al.* 2010). Daí a importância de determinar não somente seu teor total, mas sua concentração nas frações geoquímicas de sedimentos e fração total e dissolvida na água de igarapés.

Conforme Leal & Leitão (2016) os igarapés constituem as cabeceiras de diversas sub-bacias que compõem a grande bacia amazônica, drenando amplas extensões de florestas de terra firme e fazendo uma conexão fundamental entre os ambientes terrestres e aquáticos. Suas águas costumam ser pobres em nutrientes e sua fauna depende do fornecimento de matéria orgânica (frutos, galhos, folhas e insetos) pela floresta (Leal & Leitão 2016).

Caracterizam-se por sua vasta extensão e variedade de habitats para a fauna, o que fazem com que contribuam por grande parte da biodiversidade aquática da região amazônica. Além disso, os igarapés fornecem recursos vitais para as populações humanas, como água potável para consumo próprio e para o gado, irrigação de cultivos de alto valor, como frutas e verduras, peixes para consumo e comércio ornamental, e áreas de recreação (Leal & Leitão 2016). No entanto, apesar da eminente importância para a

manutenção da biodiversidade e de outros serviços ambientais, os igarapés têm sido menos estudados do que outros ecossistemas aquáticos e terrestres da Amazônia.

Na região amazônica, além da ampla ocorrência de igarapés é sabido que é existente um subsolo com gigantescas reservas de minérios tradicionais em exploração como ferro, bauxita, ouro, cassiterita e manganês (Brasil 2004). No entanto, são escassos os estudos ecotoxicológicos *in situ* que visem a avaliação de ecossistemas aquáticos sob influência dessas reservas. A região de Barcarena, PA, é bem representativa da paisagem de planície amazônica, constituída de terrenos sedimentares, vegetação tipo hiléia, abundância de igarapés que se interligam com a baía de Marajó, situados em área estuarina, caracterizada por fluxos e refluxos de marés (Lima & Kobayashi, 1988). Essa região possui extenso histórico de exploração e manufatura de minérios, sobretudo a bauxita de onde advém o alumínio (Lima & Mota 2009) além de apresentar sedimentos do Terciário (Formação Barreiras). Essa formação concentra-se na porção continental estando exposta na maior parte do município (Oliveira 2013).

Tendo em vista, todo este contexto acerca da poluição de ambientes aquáticos, ocasionada principalmente por metais (e a escassez de estudos relacionados à ambientes de igarapés), diversos estudos inferem que esses elementos, podem gerar distúrbios em biomoléculas essenciais nos organismos, que podem ser identificadas e quantificadas por ensaios biológicos específicos. (Monserrat *et al.* 2007, Amiard-Triquet 2011, Amiard-Triquet *et al.* 2013, Pereira *et al.* 2014). Portanto, as respostas biológicas obtidas a partir dessa abordagem são validadas para mensurar as mudanças ambientais e, assim, fornecer informações úteis para ações que promovam o monitoramento eficiente e a manutenção da integridade ambiental. (Buss *et al.* 2003).

E para a obtenção dessas respostas faz-se necessário o uso de modelos biológicos, que caracterizam as espécies "sentinelas" (também conhecidos como organismos biomonitores), assim denominadas devido à capacidade fisiológica de suportarem diferentes níveis de estresse ambiental e elucidar de forma precoce a toxicidade de metais em ambientes naturais (Amorim 2003), muitas delas com importante função ecossistêmica (Pereira *et al.* 2014). Um dos modelos passíveis como organismos biomonitores são os crustáceos, pois são relevantes na cadeia trófica como alimento para muitos outros organismos (como peixes, anfíbios, aves aquáticas e humanos), transferindo energia para os demais níveis tróficos (Cremona *et al.* 2008). Além de plantas como exemplo as pertencentes à família Marantaceae, que na região de Barcarena possui

ampla ocorrência. Plantas desta família são amplamente usados em decorações de casas e jardins (como plantas ornamentais) (Vieira *et al.* 2012).

E como forma de avaliar os efeitos nocivos nesses organismos biomonitorios, a exemplo, o acúmulo de metais, utilizam-se os biomarcadores, que podem ser definidos como sistemas (bioquímicos, fisiológicos e histológicos) usados para identificar processos de sensibilização ou de toxicidade como função de condições ambientais adversas (Silva & Fonseca 2003). E isto, sustenta o fato de que os distúrbios causados por xenobióticos em meio aquático, por exemplo, causam inicialmente alterações comportamentais, fisiológicas, bioquímicas ou estruturais em um determinado organismo e em caso dessas alterações serem detectadas com antecedência, pode ser possível identificar problemas antes que o ecossistema aquático seja afetado como um todo (Jimenez & Stegeman 1990).

Nesse contexto, a preservação dos recursos hídricos amazônicos é necessária para a região de Barcarena, devido ao seu território ser amplamente influenciado por reservas de minérios e consequente exploração e manufatura, além da influência antrópica multifatorial. Assim, é primordial monitorar a poluição dos ambientes aquáticos que estão presentes neste município, especificamente estudos sobre o aporte de metais através de suas concentrações na água, sedimento e organismos, além da detecção de efeitos biológicos primários em organismos residentes.

## **2 OBJETIVO GERAL**

Analisar a variação espacial e sazonal das concentrações de metais na água superficial, sedimento e organismos provenientes de uma região com histórico de atividades industriais (Barcarena, PA) e outras múltiplas influências antrópicas, relacionando com respostas, em baixo nível de organização biológica, em 3 spp. amazônicas de igarapés do entorno.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analisar a concentração de metais (Al, Cr, Pb, Ba, Ni e Mn) na água superficial (fração total e dissolvida) e sedimento (fração total).
- Analisar a concentração de metais (Al, Cr, Pb, Ba, Ni e Mn) em espécies de vertebrado, invertebrado e vegetal;
- Analisar respostas subcelulares como biomarcadores de exposição (ACAP, GST) e de efeito (LPO).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O município de Barcarena (S 01°30'21" W 48°37'33") tem uma área de 1.316 km<sup>2</sup> e está localizado na mesorregião metropolitana de Belém. As coletas foram realizadas na área da rede hidrográfica que influencia a Bacia do Murucupi, nas comunidades Bom Futuro, Vila Nova e no distrito da Vila do Conde e foram realizadas em três períodos climáticos sendo eles: Estiagem (Campanha 1: Novembro/2018), Chuvoso (Campanha 2: Março/2019) e período de Transição (Campanha 3: Junho/2019).

Este estudo foi realizado em conjunto com a empresa Hydro ALUNORTE, que atua na região no beneficiamento da bauxita desde 1995. Desta forma, os pontos de coleta foram determinados de forma a contemplar um gradiente de influência das atividades industriais, bem como de outros tipos de atividade que ocorrem na região e que também apresentam potencial de contaminação. Os pontos de coleta estão marcados na Figura 1 e foram classificados conforme sua proximidade com potenciais fontes de poluição.

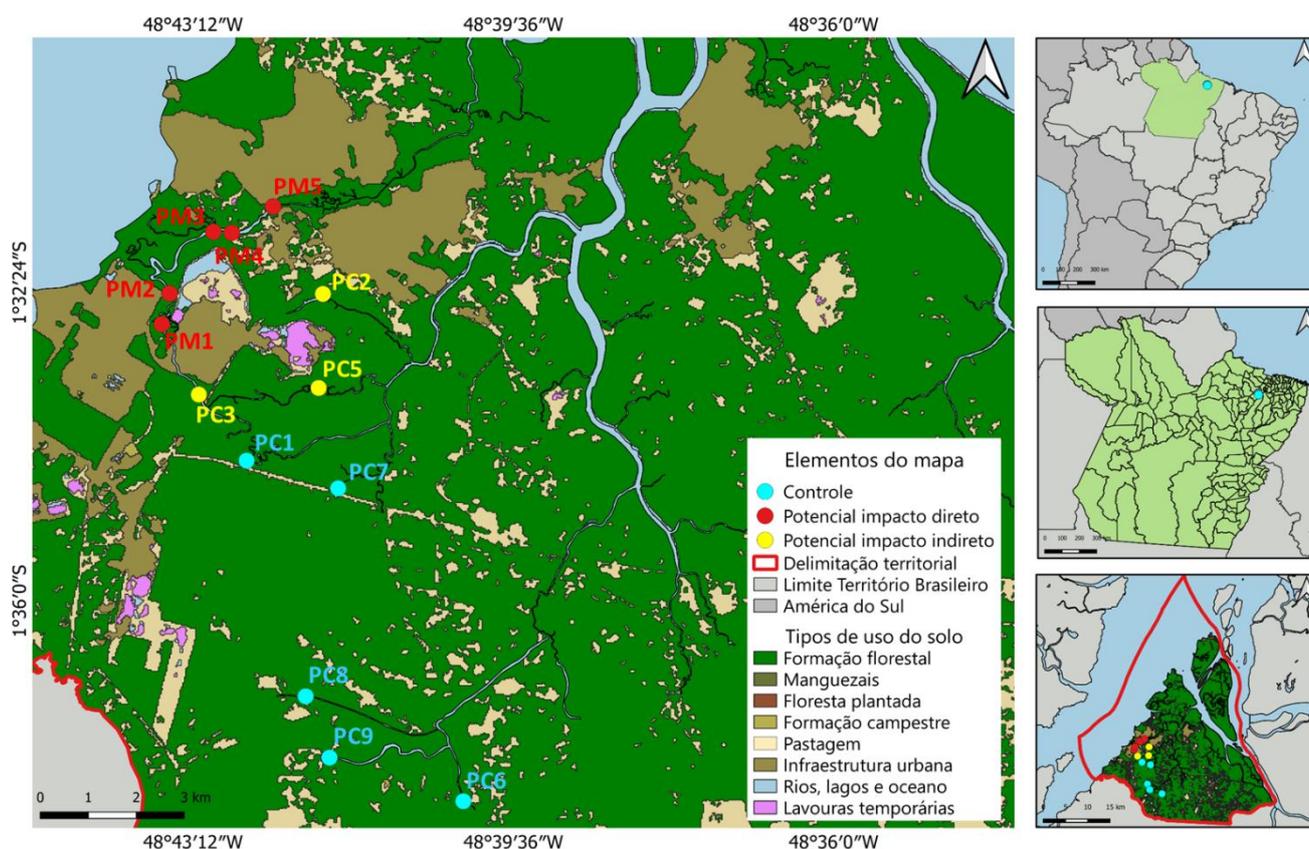


Figura 1 - Localização dos pontos amostrados nos igarapés: Potencial impacto direto, localizados no rio Murucupi (PM1, PM2, PM3, PM4 e PM5), Potencial impacto indireto (PC2, PC3 e PC5) e Controles (PC1, PC6, PC7, PC8 e PC9).

Fonte: Elaborado pela Autora.

- Potencial Impacto direto (Murucupi): (PM1, PM2, PM3, PM4 e PM5): estas áreas situam-se muito próximas a fontes de potencial contaminação sendo algumas dentro de uma empresa de beneficiamento de bauxita (PM1 e PM2 próximos das zonas de operação industrial). Os demais integram o Rio Murucupi e são diretamente influenciados por descarte de esgotos, e lixo (origem doméstica e industrial)
- Potencial impacto indireto: (PC2, PC3 e PC5): PC2 fica em área próxima e fora da empresa, PC3 e PC5 (canal de maré) estão dentro da área da empresa, porém mais distantes das zonas de operação das atividades industriais.
- Pontos controles: (PC1, PC6, PC7, PC8 e PC9): São os pontos afastados das atividades industriais e demais atividades antrópicas, inseridos dentro das comunidades ribeirinhas.

### 3.2 COLETAS DE ÁGUA E SEDIMENTO

Em todas as campanhas foram coletadas amostras de água e sedimentos, em triplicata e aleatoriamente, em todos os pontos dos igarapés, exceto, o ponto PM01 durante a Campanha 1, onde apenas os sedimentos foram coletados, uma vez que estava seco no período de amostragem.

As coletas e preservação de águas superficiais e sedimentos para análise de metais seguiram os padrões da Agência Nacional de Águas (ANA, resolução nº 724/2011) e são descritos resumidamente abaixo.

As amostras de água foram coletadas manualmente a 30 cm da superfície e armazenadas em garrafas de poliuretano esterilizadas e acidificadas em solução de ácido nítrico:álcool 97,8° (1:1000). Após a coleta, as amostras foram congeladas até o momento da análise.

Foram registrados os dados físico-químicos da água (condutividade, oxigênio dissolvido, pH e temperatura) com o auxílio de uma sonda multiparamétrica (HACH HQ40D). A sonda foi calibrada sempre antes das coletas com os padrões específicos para cada uma das variáveis a serem quantificadas, adquiridos junto à empresa fabricante do equipamento (marca alemã HACH), com exceção da solução de oxigênio dissolvido que é da marca HANNA.

As amostras de sedimento foram coletadas com o auxílio de uma draga tipo Core, retirando 20 cm do perfil vertical e armazenadas em sacos plásticos. Tanto as

amostras de água (congeladas) como de sedimento (secas em estufa) foram enviadas para o Laboratório de Análises Químicas (LACHEM) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), para as análises de metais. Para a garantia da qualidade durante o transporte até o destino para a análise, as amostras foram enviadas sob refrigeração em embalagens isotérmicas. Todas as amostras enviadas foram cuidadosamente identificadas com etiquetas resistentes e embaladas individualmente, evitando contaminação cruzada. No laboratório, as amostras de água já acidificadas foram filtradas (em membranas de nylon de porosidade 0,22  $\mu\text{m}$ ) para a análise da fração dissolvida dos metais em estudo. A seguir foram analisadas por espectrometria de absorção atômica com atomização em chama (F-AAS) e forno de grafite (GF-AAS).

### 3.3 COLETAS DE ORGANISMOS

Foram escolhidos como biomonitores espécies de vertebrado, invertebrado (Figura 2) e uma planta herbácea pertencente à família Marantacea, todos com ampla ocorrência nos pontos de amostragem. A espécie de peixe selecionada foi a *Hyphessobrycon heterorhabdus*, coletada utilizando arrasto de curta duração. O biomonitor invertebrado escolhido foi a espécie de caranguejo *Trichodactylus borellianus*, esses organismos foram coletados usando matapi com tempo de permanência nos igarapés de 24h. Ressalta-se que no período de estiagem, os pontos PC3 e PM3 estavam secos. Portanto, na Campanha 1, os organismos foram amostrados somente nos pontos PC1 e PC7 (amostras de peixes e caranguejos para análises bioquímicas e de metal).

Para a espécie de planta biomonitora, utilizou-se somente as folhas que foram coletadas manualmente, às margens dos igarapés. Nos pontos PM2 e PM3 não foi encontrado exemplares de plantas no período chuvoso.

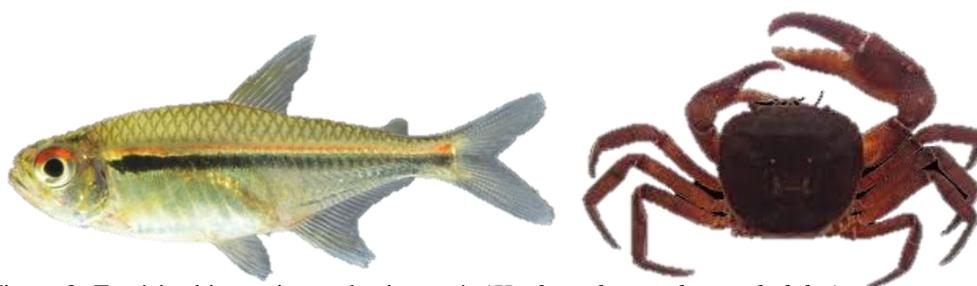


Figura 2- Espécies biomonitoras dos igarapés (*Hyphessobrycon heterorhabdus*) e o caranguejo (*Trichodactylus borellianus*), respectivamente.

Fonte: Souza-Carvalho (2018) e Faria *et al.* (2021)

Após a captura, todos os organismos coletados foram imediatamente colocados em uma caixa de isopor com gelo até serem transferidos para o galão contendo nitrogênio líquido. Posteriormente, os organismos foram armazenados em tubos falcon de 50 mL, e acomodados em galão contendo nitrogênio, até a chegada ao Laboratório de Ecotoxicologia Aquática na Universidade Federal do Pará, local onde foram acondicionados em ultrafreezer a  $-80^{\circ}\text{C}$ , até a análise dos biomarcadores.

### 3.4 ANÁLISE DE METAIS EM SEDIMENTO E ÁGUA

As amostras de sedimento foram inicialmente processadas por digestão ácida empregando a mistura oxidante  $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ , de acordo com o método de referência EPA3050B descrito pela Agência de Proteção Ambiental (EPA, EUA) (Método 3050B: Digestão Ácida de Sedimentos, Lodos e Solos, Revisão 2). Após a digestão total, as amostras foram diluídas em água ultrapura (Milli-Q) e analisadas de acordo com as metodologias validadas para cada elemento.

As amostras de água foram analisadas diretamente, sem processamento ou diluição. Nos dois casos (sedimento e água – fração total e dissolvida), as análises foram realizadas por espectrometria de absorção atômica, utilizando técnicas de atomização por chama e forno de grafite (NOVAA 300 e Analytik Jena Zenit 600) para Al, Cr, Pb, Ba, Ni e Mn. As concentrações dos elementos foram calculadas em  $\mu\text{g/L}$  (ppb) para água e  $\text{mg/kg}$  (ppm) para sedimentos, de acordo com as massas empregadas no processo de digestão inicial.

As análises foram realizadas por metodologia validada especificamente para este tipo de amostra, empregando Espectrometria de Absorção Atômica com Atomização em Forno de Grafite (GF-AAS) e Chama (F-AAS) e Digestão por Radiação de Microondas (MW Pro, Anton Paar) sob alta pressão ( $\sim 60$  bar). As análises foram realizadas de acordo com os parâmetros experimentais de atomização e medidas por AAS da referência [Welz, B, Sperling, M. – Atomic Absorption Spectrometry, Wiley-VCH, Thirdedition, Weinheim, 1999]. As metodologias por AAS envolveram a revalidação dos métodos previamente validados, empregando amostras Certificadas pelo NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) e pelo European Reference Materials (ERM).

### 3.5 ANÁLISE DE METAIS EM ORGANISMOS

A determinação dos metais nos organismos (peixes e plantas) foi feita em triplicata para cada ponto, agrupando-se indivíduos para se atingir a biomassa necessária para o método (aproximadamente 1g) em um tubo de quartzo. Dez mililitros de ácido nítrico P.A. (65%) foram adicionados, seguidos de aquecimento até a digestão completa. Três mililitros de peróxido de hidrogênio (50%) foram adicionados durante o aquecimento.

Após a conclusão da digestão, as amostras foram diluídas em 50 mL de água ultra pura (Mili-Q). As análises foram realizadas por espectrometria de absorção atômica, utilizando técnicas de atomização por chama e forno de grafite (NOVAA 300 e Analytik Jena Zenit 600) para Al, Cr, Pb, Ba, Ni e Mn. As concentrações dos elementos são calculadas em mg/kg (ppm) de acordo com as massas empregadas no processo de digestão inicial.

### 3.6 ANÁLISE DE BIOMARCADORES

#### 3.6.1 Dissecação

O peixe *H. heterorhabdus*, por ter tamanho reduzido, foi utilizado inteiro nas análises e foi pesado e mensurado (comprimento total e comprimento parcial) com o auxílio de um paquímetro. Os caranguejos *Trichodactylus borellianus* foram pesados e medidos o comprimento total, a largura e a altura do cefalotórax, também utilizando um paquímetro. Em seguida, as brânquias (para análises de biomarcadores) e músculos (para análises de metais e biomarcadores) foram removidos com o auxílio de tesouras e pinças cirúrgicas. Para análise das brânquias do caranguejo foi feito *pool* de indivíduos para formar uma amostra (necessário para se atingir a biomassa mínima para o teste). As folhas da planta herbácea coletada foram submetidas a análise de metais exclusivamente.

#### 3.6.2 Preparação das amostras

As amostras foram retiradas do ultrafreezer e pesadas em balança de precisão e, quando necessário, foram feitos *pools* para atingir o peso mínimo requerido pelo teste. Em seguida, adicionou-se solução tampão contendo Tris-HCl (100 mM), EDTA (2 mM), MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O (5 mM) em pH 8,0 em uma proporção de 1:4 (peso: volume). As amostras foram colocadas em homogeneizador do tipo Potter e centrifugadas a 20.000 x g, 4 °C, 20 min. Após a centrifugação, os pellets foram descartados e os sobrenadantes retirados

e separados em alíquotas (posteriormente utilizadas em dosagem de proteínas totais e biomarcadores de exposição) para em seguida serem armazenadas em *ultra-freezer* (-80 °C). Dois biomarcadores foram selecionados: Capacidade antioxidante total (ACAP) como biomarcador de exposição e lipoperoxidação (LPO) como biomarcador de efeito.

### **3.6.3 Análise de proteínas totais**

A análise de proteínas totais foi realizada com kit comercial (Doles LTDA, Brasil), com base no teste de biureto para proteínas (citratetrisódio 114mmol/L, carbonato de sódio 210mmol/L e sulfato de cobre 10mmol/L). As leituras foram realizadas em leitor de microplacas multimodal (Victor X3, Perkin Elmer) a 550nm. Os resultados foram expressos em miligramas de proteínas/mL. Estes dados são utilizados para a padronização das amostras para a dosagem da capacidade antioxidante total, não sendo considerados biomarcadores .

### **3.6.4 Capacidade antioxidante total (ACAP)**

A capacidade antioxidante total contra radicais peroxil foi analisada segundo o método de Amado et al. (2009). Este protocolo baseia-se na detecção de espécies reativas de oxigênio (EROs) por fluorimetria (ex/em: 485/520 nm), com o uso do 2',7' diclorofluoresceína (H<sub>2</sub>DCF-DA, Molecular Probes) como substrato e a geração de radicais peroxil pela decomposição térmica do 2,2'-azobis (ABAP, Sigma-Aldrich) a 37 °C. O ABAP produz radicais peroxil que são interceptados pelas defesas antioxidantes presentes na amostra, quanto maior a capacidade da amostra interceptar os radicais peroxil, menor a fluorescência. A fluorescência total produzida é calculada pela integração das unidades de fluorescência (UF) ao longo do tempo de leitura, depois de ajustar os dados de UF a uma função polinomial de segunda ordem. Os resultados foram expressos como a diferença de área de UF/min na mesma amostra com e sem ABAP e relativizado pela área sem ABAP. O inverso da diferença de área relativa com e sem ABAP foi considerada como medida da capacidade antioxidante.

### **3.6.5 Lipoperoxidação (LPO)**

A lipoperoxidação foi determinada de acordo com Hermes-Lima *et al.* (1995) adaptado para microplacas segundo Monserrat *et al.* (2003). As amostras foram homogeneizadas (1:4 m/v) em metanol 100% a frio (4°C). Os homogenizados foram

centrifugados a 1000 x g, durante 10 min a 4 °C. As leituras foram realizadas em leitor de microplaca (Victor X3, Perkin Elmer) no comprimento de 550nm. O hidroperóxido de cumeno (CHP) foi usado como padrão de hidroperóxido lipídico (concentração final de 5 nM). A quantidade de lipídeos peroxidados (LPO) foi expressa em nMol de CHP/g de tecido úmido.

### 3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram testados quanto a sua normalidade (teste de Shapiro-Wilks) e homocedasticidade (teste de Levene). Quando necessário, para o ajuste aos pressupostos da ANOVA, foram transformados matematicamente (Zar 1984). Após esta etapa, os dados foram analisados através do teste de ANOVA, e posteriormente submetidos a teste post hoc de Tukey para identificar onde residiam as diferenças, quando existentes. Quando os pressupostos da ANOVA não foram atingidos, foi feito o teste não paramétrico de *Kruskal-Wallis*. Para os dados de biomarcadores das espécies de igarapés foi utilizado o Teste t-student. O nível de significância adotado foi de 5% (Zar 1984).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DA ÁGUA

Os parâmetros físico-químicos da água estão representados na Tabela 1. Somente os valores de temperatura não apresentaram variação entre os pontos de amostragem e períodos climáticos. No ponto PM1 não houve registros dos parâmetros, pois encontrava-se seco no período de estiagem.

No período de estiagem observou-se que o pH se manteve próximo da faixa do neutro, com valores levemente ácidos (5,15 a 6,78), sendo o local PM2 com o pH mais ácido. Os locais PM2 e PM5 demonstraram menores valores de Oxigênio Dissolvido (OD) (3,62 mg/L e 3,67 mg/L, respectivamente). A Condutividade Elétrica (CE) no local PM02 apresentou maior valor (0,20  $\mu$ S/cm).

No período chuvoso observou-se o pH mais ácido (4,66) no PC8. Nesta campanha, o OD foi registrado com valores mais baixos que na campanha anterior (na faixa de 2-6 mg/L), sendo PC3 (2,34 mg/L) e PM2 (3,30 mg/L) com menores valores. A CE no PM01 (0,241  $\mu$ S/cm) foi o maior valor registrado no período.

No período de transição o pH apresentou-se nas mesmas faixas dos períodos anteriores. A concentração de OD apresentou um ligeiro aumento em relação ao período chuvoso, ficando na faixa entre 2-8 mg/L, destacando-se o PM1 que apresentou o menor valor (2,57 mg/L). A CE registrada no ponto PC2 foi o maior valor de (1,195  $\mu$ S/cm) do período.

Tabela 1 - Dados de parâmetros físico-químicos: Temperatura (Temp); Potencial Hidrogeniônico (pH); Oxigênio Dissolvido (OD) e Condutividade Elétrica (CE) das águas dos locais de igarapés amostrados durante os períodos de estiagem (nov/18), chuvoso (mar/19) e de transição (jun/19). NC (Não Consta) significa que o valor de referência para o parâmetro físico-químico correspondente não consta a resolução CONAMA 357/2005.

(continua)

Pontos	Estiagem												
	PC1	PC2	PC3	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PM1	PM2	PM3	PM4	PM5
Temp. (°C)	26,00	29,45	26,80	26,10	24,60	26,20	26,20	23,83	seco	26,20	25,40	26,60	28,70
pH	6,13	6,78	6,54	6,28	5,32	5,49	5,21	5,38	seco	5,15	5,77	5,18	5,95
OD (mg/L)	8,62	6,83	6,75	7,59	7,88	6,84	8,26	7,60	seco	3,62	7,52	8,39	3,67
CE ( $\mu$ S/cm)	0,02	0,038	0,037	0,031	0,015	0,018	0,016	0,02	seco	0,202	0,04	0,037	0,079

(conclusão)

Chuvoso													
Temp. (°C)	25,60	29,42	25,83	25,59	24,85	-	25,81	25,46	26,00	25,00	25,02	24,42	24,40
pH	7,52	6,77	4,80	5,23	5,28	-	4,66	4,94	5,57	5,93	5,67	5,90	6,23
OD (mg/L)	-	5,51	2,34	4,13	4,35	-	3,40	5,73	2,57	3,30	4,52	4,65	6,04
CE. (µS/cm)	-	0,03	0,09	0,02	0,01	-	0,02	0,02	0,24	0,09	0,04	0,04	0,04
Transição													
Temp. (°C)	-	29,43	25,06	24,89	24,72	-	26,00	24,64	26,00	25,61	25,29	25,12	26,55
pH	5,39	6,77	5,20	5,45	5,30	4,91	4,93	5,16	5,57	5,54	5,32	5,61	6,09
OD (mg/L)	8,62	6,17	4,54	5,86	6,11	6,84	5,83	6,66	2,57	3,46	6,02	6,52	4,85
CE (µS/cm)	-	1,91	0,04	0,02	0,01	-	0,02	0,02	0,24	0,15	0,04	0,04	0,06

CONAMA 357/2005: Temp: NC; pH: 6,0-9,0; OD: >6mg/L; CE: NC

## 4.2 BIOMETRIA DOS ORGANISMOS

### 4.2.1 Caranguejos (*Trichodactylus borellianus*)

Os caranguejos coletados nos pontos onde a captura foi possível durante a estiagem (PC1 e PC7 Nov/2018), não demonstraram diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) para nenhuma variável de biometria analisada (Tabela 2).

Não houve diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) para os parâmetros biométricos analisados quando comparados os caranguejos dos pontos PC1, PC2, PC7 e PM3 coletados no período chuvoso. Os caranguejos dos pontos PC1 e PC7 apresentaram maiores valores de peso ( $12,36 \pm 11,39$ g;  $10,42 \pm 9,5$ g, respectivamente), comprimento do cefalotórax ( $2,7 \pm 2,57$ cm;  $2,6 \pm 2,6$ cm, respectivamente), e largura do cefalotórax ( $3,25 \pm 3,07$ cm;  $3,1 \pm 3,0$ cm, respectivamente) na estação chuvosa em relação a estiagem.

No período de transição, apesar de ter sido feito o mesmo esforço de captura das outras campanhas, não foi possível a captura de nenhum indivíduo desta espécie nos pontos selecionados.

Tabela 2 - Valores de peso total (PT), comprimento do cefalotórax (CC), altura do cefalotórax (AC) e largura do cefalotórax (LC) dos caranguejos *Trichodactylus borellianus* de Igarapé, coletados durante os períodos de estiagem (nov/2018) e chuvoso (jun/2019). As letras minúsculas diferentes representam diferenças ( $p < 0,05$ ) entre os locais no mesmo período. As letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ( $p < 0,05$ ) no mesmo local ao longo dos períodos amostrados. Os dados são expressos como a mediana  $\pm$  quartil.

Local	PT	CC	AC	LC
<b>Estiagem</b>				
PC1	9,00 $\pm$ 6 <sup>Aa</sup>	2,50 $\pm$ 2,40 <sup>Aa</sup>	1,50 $\pm$ 1,32 <sup>Aa</sup>	2,95 $\pm$ 2,75 <sup>Aa</sup>
PC2	-	-	-	-
PC7	7,00 $\pm$ 6 <sup>Aa</sup>	2,40 $\pm$ 2,30 <sup>Aa</sup>	1,30 $\pm$ 1,22 <sup>Aa</sup>	2,75 $\pm$ 2,60 <sup>Aa</sup>
PM3	-	-	-	-
<b>Chuvoso</b>				
PC1	12,36 $\pm$ 11,39 <sup>Ba</sup>	2,70 $\pm$ 2,57 <sup>Ba</sup>	1,60 $\pm$ 1,48 <sup>Aa</sup>	3,25 $\pm$ 3,07 <sup>Ba</sup>
PC2	8,18 $\pm$ 4,40 <sup>a</sup>	2,45 $\pm$ 2,37 <sup>a</sup>	1,40 $\pm$ 1,30 <sup>a</sup>	2,70 $\pm$ 2,60 <sup>a</sup>
PC7	10,42 $\pm$ 9,5 <sup>Ba</sup>	2,60 $\pm$ 2,60 <sup>Ba</sup>	1,50 $\pm$ 1,40 <sup>Aa</sup>	3,10 $\pm$ 3,00 <sup>Ba</sup>
PM3	7,19 $\pm$ 6,24 <sup>a</sup>	2,30 $\pm$ 2,20 <sup>a</sup>	1,35 $\pm$ 1,25 <sup>a</sup>	2,65 $\pm$ 2,52 <sup>a</sup>

#### 4.2.2 Peixes (*Hyphessobrycon heterorhabdus*)

Os peixes coletados onde a captura foi possível durante a estiagem (Nov/2018, PC1 e PC7) não apresentaram diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) para os parâmetros biométricos analisados (Tabela 3).

No período chuvoso (Mar/2019), os peixes do ponto PC1 apresentaram os menores valores ( $p < 0,05$ ) de peso (0,05 $\pm$ 0,04g), CT (1,5 $\pm$ 1,45cm) e CP (1,5 $\pm$ 1,05 m) em relação aos demais pontos.

No período transicional (Jun/2019), nos peixes coletados onde a captura foi possível, não foram detectadas diferença biométrica entre os organismos nos distintos pontos de Igarapé. Também não ocorreram diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) entre os parâmetros e entre os períodos de coleta.

Tabela 3 - Valores de peso total (PT), comprimento total (CT) e comprimento padrão (CP) dos peixes *H. heterorhabdus* nos de igarapés coletados durante os períodos de estiagem (nov/2018), chuvoso (mar/2019) e transição (jun/2019). As letras minúsculas diferentes representam diferenças ( $p < 0,05$ ) entre os locais no mesmo período. As letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ( $p < 0,05$ ) no mesmo local ao longo dos períodos amostrados. Os dados são expressos como a mediana  $\pm$  quartil

Local	PT	CT	CP
<b>Estiagem</b>			
PC1	0,160 $\pm$ 0,14 <sup>Aa</sup>	2,19 $\pm$ 2 <sup>Aa</sup>	1,90 $\pm$ 1,90 <sup>Aa</sup>
PC7	0,165 $\pm$ 0,13 <sup>Aa</sup>	2,17 $\pm$ 1,90 <sup>Aa</sup>	2,30 $\pm$ 2,11 <sup>Aa</sup>
PC3	-	-	-
PM3	-	-	-
<b>Chuvoso</b>			
PC1	0,05 $\pm$ 0,04 <sup>Ab</sup>	1,50 $\pm$ 1,45 <sup>Ab</sup>	1,50 $\pm$ 1,05 <sup>Ab</sup>
PC7	0,26 $\pm$ 0,21 <sup>Aa</sup>	2,70 $\pm$ 2,50 <sup>Aa</sup>	2,20 $\pm$ 2,10 <sup>Aa</sup>
PC3	0,23 $\pm$ 0,19 <sup>Aa</sup>	2,50 $\pm$ 2,40 <sup>Aa</sup>	2,10 $\pm$ 1,8 <sup>Aa</sup>
PM3	0,23 $\pm$ 0,20 <sup>Aa</sup>	2,70 $\pm$ 2,60 <sup>Aa</sup>	2,20 $\pm$ 2,05 <sup>Aa</sup>
<b>Transição</b>			
PC1	-	-	-
PC7	-	-	-
PC3	0,34 $\pm$ 0,25 <sup>Aa</sup>	3 $\pm$ 2,80 <sup>Aa</sup>	2,50 $\pm$ 2,37 <sup>Aa</sup>
PM3	0,22 $\pm$ 0,17 <sup>Aa</sup>	2,45 $\pm$ 2,30 <sup>Aa</sup>	2,10 $\pm$ 1,80 <sup>Aa</sup>

### 4.3 ANÁLISE DE METAIS

#### 4.3.1 Sedimento

A Tabela 4 mostra a relação entre as concentrações de todos os metais analisados nos sedimentos das três campanhas e em todos os pontos dos igarapés estudados. As análises dos metais apresentaram uma distribuição dentro da mesma faixa em termos de concentrações medidas, sem diferenças significativas entre pontos amostrados e entre períodos de coletas. Não houve aumento ou diminuição expressiva para os elementos estudados durante as campanhas. Na Figura 3, que apresenta de forma ilustrativa a contribuição total (*Input*) dos metais analisados nos pontos estudados, observa-se que a região compreendida nos pontos PC5 e PM2 ocorre um acúmulo maior de metais nos sedimentos dos Igarapés quando analisados de forma cumulativa. Nesta figura, o Al não foi representado por ter uma ordem de grandeza muito superior aos demais metais.

Os elementos que se destacaram quanto as concentrações foram Al (Estiagem: 4985 $\pm$ 142,75  $\mu$ g/L - 41729 $\pm$ 11574,10  $\mu$ g/L; Chuvoso: 1434 $\pm$ 404  $\mu$ g/L - 30600 $\pm$ 2279

$\mu\text{g/L}$ ; Transição:  $1973,73 \pm 1402,33 \mu\text{g/L}$  -  $37494 \pm 15700 \mu\text{g/L}$ ) seguido por Ba (Estiagem:  $0,08 \pm 0,06 \mu\text{g/L}$  -  $31,25 \pm 9,53 \mu\text{g/L}$ ; Chuvoso:  $0,97 \pm 0,32 \mu\text{g/L}$  -  $41,26 \pm 1,18 \mu\text{g/L}$ ; Transição:  $1,77 \pm 0,03 \mu\text{g/L}$  -  $117,47 \pm 51,71 \mu\text{g/L}$ ) e Cr (Estiagem:  $4,54 \pm 2,53 \mu\text{g/L}$  -  $49,19 \pm 33,89 \mu\text{g/L}$ ; Chuvoso:  $2,18 \pm 0,47 \mu\text{g/L}$  -  $31,19 \pm 4,13 \mu\text{g/L}$ ; Transição:  $3,43 \pm 1,25 \mu\text{g/L}$  -  $41,68 \pm 22,14 \mu\text{g/L}$ ). É válido ressaltar que, para Ba, os maiores valores foram encontrados no PC5 em todos os períodos. Para Cr durante os períodos chuvoso e transição, destaca-se o PM2, no qual apresentaram maiores concentrações do elemento. Dos metais analisados, apenas Cr, Ni e Pb são mencionados na resolução CONAMA N° 454/2012. Todos eles encontram-se abaixo do limite legal executável.

Tabela 4 - Concentração de metais no sedimento (mg/kg) em áreas com distintas distâncias de um polo industrial em Igarapés durante o período de estiagem (Nov/2018), período chuvoso (Mar/2019) e transição (Jun/2019). As letras minúsculas diferentes representam diferenças ( $p < 0,05$ ) entre os locais no mesmo período. As letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ( $p < 0,05$ ) no mesmo local ao longo dos períodos amostrados. NC significa valores limites de metais que não constam na resolução CONAMA N° 454/2012. Os dados são expressos como a média  $\pm$  erro padrão. Os valores que não apresentam letras é devido a ausência de réplicas suficientes acima do limite de detecção, não sendo possível realizar análise estatística.

Local	Cr	Ni	Pb	Ba	Al	Mn
<b>Estiagem</b>						
PC1	49,19 $\pm$ 33,89	3,33 $\pm$ 0,55	<0,04-0,86	17,27 $\pm$ 8,71	37623 $\pm$ 16492	28,37 $\pm$ 22,69
PC2	25,59 $\pm$ 3,83	1,01 $\pm$ 0,30	2,50 $\pm$ 0,47	0,57 $\pm$ 0,24	17101,14 $\pm$ 2548,7	2,97 $\pm$ 1,49 <sup>Aa</sup>
PC3	21,21 $\pm$ 10,41	0,86 $\pm$ 1,22	1,80 $\pm$ 1,28	5,50 $\pm$ 1,67	20163,63 $\pm$ 16441,95	2,28 $\pm$ 0,65 <sup>Aa</sup>
PC5	49,19 $\pm$ 33,89	5,47 $\pm$ 0,96	0,18 $\pm$ 0,16	31,25 $\pm$ 9,53	21285,69 $\pm$ 5982,53	25,81 $\pm$ 20,70 <sup>Aa</sup>
PC6	7,05 $\pm$ 6,00	0,45 $\pm$ 0,37	0,74 $\pm$ 0,66	0,08 $\pm$ 0,06	5205,64 $\pm$ 5103,43	0,87 $\pm$ 0,46 <sup>Aa</sup>
PC7	12,03 $\pm$ 3,60	0,60 $\pm$ 0,30	1,55 $\pm$ 1,31	2,49 $\pm$ 1,26	8956,95 $\pm$ 6214,51	1,78 $\pm$ 1,51 <sup>Aa</sup>
PC8	4,54 $\pm$ 2,53	0,91 $\pm$ 0,47	2,40 $\pm$ 1,43	0,24 $\pm$ 0,10	4985 $\pm$ 142,75	1,05 $\pm$ 0,46 <sup>Aa</sup>
PC9	11,15 $\pm$ 2,53	0,66 $\pm$ 0,70	2,05 $\pm$ 1,56	0,23 $\pm$ 0,21	8853 $\pm$ 8099,16	1,54 $\pm$ 1,29 <sup>Aa</sup>
PM1	7,54 $\pm$ 8,59	3,88 $\pm$ 0,55	1,79 $\pm$ 1,61	0,70 $\pm$ 0,72	8633 $\pm$ 8439,58	1,30 $\pm$ 0,55 <sup>Aa</sup>
PM2	42,70 $\pm$ 5,03	3,88 $\pm$ 0,55	0,98 $\pm$ 0,32	6,66 $\pm$ 0,60	41729 $\pm$ 11574,10	3,43 $\pm$ 0,24 <sup>Aa</sup>
PM3	27,58 $\pm$ 14,58	2,04 $\pm$ 0,55	0,21 $\pm$ 0,22	6,97 $\pm$ 2,40	27798 $\pm$ 11481,20	3,96 $\pm$ 2,39 <sup>Aa</sup>
PM4	26,68 $\pm$ 3,514	3,16 $\pm$ 0,75	0,23 $\pm$ 0,16	10,22 $\pm$ 2,40	36982 $\pm$ 3295,22	4,34 $\pm$ 3,52 <sup>Aa</sup>
PM5	26,61 $\pm$ 6,36	1,89 $\pm$ 0,23	3,19 $\pm$ 0,95	1,04 $\pm$ 0,23	23418 $\pm$ 5374,46	4,18 $\pm$ 1,22 <sup>Aa</sup>
<b>Chuvoso</b>						
PC1	4,2 $\pm$ 2,82	0,74 $\pm$ 0,39	3,65 $\pm$ 3,09	6,38 $\pm$ 5,75	17027 $\pm$ 15796	1,62 $\pm$ 0,6
PC2	12,2 $\pm$ 1,40	0,39 $\pm$ 0,11	1,64 $\pm$ 0,09	4,61 $\pm$ 0,33	13414 $\pm$ 2232	4,13 $\pm$ 0,77
PC3	11,32 $\pm$ 2,40	0,66 $\pm$ 0,24	3,66 $\pm$ 0,97	12,43 $\pm$ 2,35	21227 $\pm$ 3348	7,79 $\pm$ 1,45
PC5	19,70 $\pm$ 4,16	4,01 $\pm$ 0,26	6,42 $\pm$ 1,05	41,26 $\pm$ 1,18	21227 $\pm$ 5283	82,79 $\pm$ 22,21
PC6	3,10 $\pm$ 1,14	0,09 $\pm$ 0,04	0,94 $\pm$ 0,27	1,73 $\pm$ 0,09	3527 $\pm$ 1391	1,37 $\pm$ 0,30
PC7	2,18 $\pm$ 0,47	<0,03-0,06	0,65 $\pm$ 0,11	0,97 $\pm$ 0,32	1434 $\pm$ 404	0,89 $\pm$ 0,26
PC8	6,33 $\pm$ 1,98	0,15 $\pm$ 0,01	2,4 $\pm$ 0,80	2,01 $\pm$ 0,60	4530 $\pm$ 1398	1,51 $\pm$ 0,42
PC9	10,45 $\pm$ 2,12	0,36 $\pm$ 0,11	3,84 $\pm$ 0,81	5,98 $\pm$ 1,14	11662 $\pm$ 3678	3,81 $\pm$ 0,71
PM1	4,38 $\pm$ 2,09	0,27 $\pm$ 0,04	2,55 $\pm$ 0,32	4,21 $\pm$ 1,03	9668 $\pm$ 2676	2,93 $\pm$ 0,89
PM2	31,19 $\pm$ 4,13	2,40 $\pm$ 0,13	9,28 $\pm$ 0,61	18,71 $\pm$ 0,71	30600 $\pm$ 2279	6,59 $\pm$ 0,20
PM3	12,27 $\pm$ 2,92	0,52 $\pm$ 0,08	3,12 $\pm$ 1,02	6,32 $\pm$ 2,03	13156 $\pm$ 3821	6,63 $\pm$ 1,91
PM4	15,16 $\pm$ 14,2	1,08 $\pm$ 0,17	6,73 $\pm$ 0,03	17,60 $\pm$ 0,90	28045 $\pm$ 6574	5,43 $\pm$ 1,24
PM5	31,06 $\pm$ 1,97	1,02 $\pm$ 0,06	6,38 $\pm$ 0,34	17,27 $\pm$ 1,21	26074 $\pm$ 3753	5,74 $\pm$ 0,14
<b>Transição</b>						
PC1	3,49 $\pm$ 0,78	<0,03	<0,04 $\pm$ 0,03	1,77 $\pm$ 0,03	2147,66 $\pm$ 319,68	0,20 $\pm$ 0,09
PC2	13,79 $\pm$ 5,17	0,76 $\pm$ 0,27	0,93 $\pm$ 0,40	7,45 $\pm$ 3,80	141135 $\pm$ 864,48	1,79 $\pm$ 0,56
PC3	13,49 $\pm$ 2,44	1,61 $\pm$ 0,24	1,44 $\pm$ 0,22	11,69 $\pm$ 2,26	19302,06 $\pm$ 2950,96	4,78 $\pm$ 1,29
PC5	22,49 $\pm$ 8,47	5,17 $\pm$ 2,18	4,51 $\pm$ 1,20	117,47 $\pm$ 51,71	11879,77 $\pm$ 7059,76	48,63 $\pm$ 24,52
PC6	10,39 $\pm$ 0,39	0,68 $\pm$ 0,10	0,98 $\pm$ 0,01	13,03 $\pm$ 5,12	4417,68 $\pm$ 28,58	1,26 $\pm$ 0,14
PC7	9,30 $\pm$ 6,85	1,15 $\pm$ 0,70	3,07 $\pm$ 2,24	8,66 $\pm$ 5,25	8670,91 $\pm$ 6668,69	1,51 $\pm$ 0,93
PC8	3,43 $\pm$ 1,25	0,52 $\pm$ 0,12	0,84 $\pm$ 0,10	3,01 $\pm$ 0,28	1973,73 $\pm$ 1402,33	0,62 $\pm$ 0,13
PC9	10,05 $\pm$ 3,89	0,82 $\pm$ 0,34	1,25 $\pm$ 0,68	4,44 $\pm$ 2,15	9655 $\pm$ 7261,72	1,64 $\pm$ 1,00
PM1	13,41 $\pm$ 3,74	1,41 $\pm$ 0,27	2,01 $\pm$ 0,52	10,66 $\pm$ 3,14	19223 $\pm$ 7501	2,04 $\pm$ 0,52
PM2	41,68 $\pm$ 22,14	2,78 $\pm$ 1,33	10,31 $\pm$ 5,02	35,16 $\pm$ 18,17	37494 $\pm$ 15700	3,20 $\pm$ 1,32
PM3	29,69 $\pm$ 3,53	0,61 $\pm$ 0,21	1,31 $\pm$ 0,38	11,62 $\pm$ 3,80	18923,3 $\pm$ 7651,1	1,80 $\pm$ 0,56
PM4	12,65 $\pm$ 5,14	0,73 $\pm$ 0,32	1,67 $\pm$ 1,32	8,06 $\pm$ 3,41	6640,23 $\pm$ 1218,32	1,57 $\pm$ 0,38
PM5	71,90 $\pm$ 15,07	1,90 $\pm$ 0,06	5,41 $\pm$ 0,20	42,68 $\pm$ 2,00	34920,39 $\pm$ 6514,15	2,32 $\pm$ 0,17
CONAMA	90	35,9	91,3	NC	NC	NC

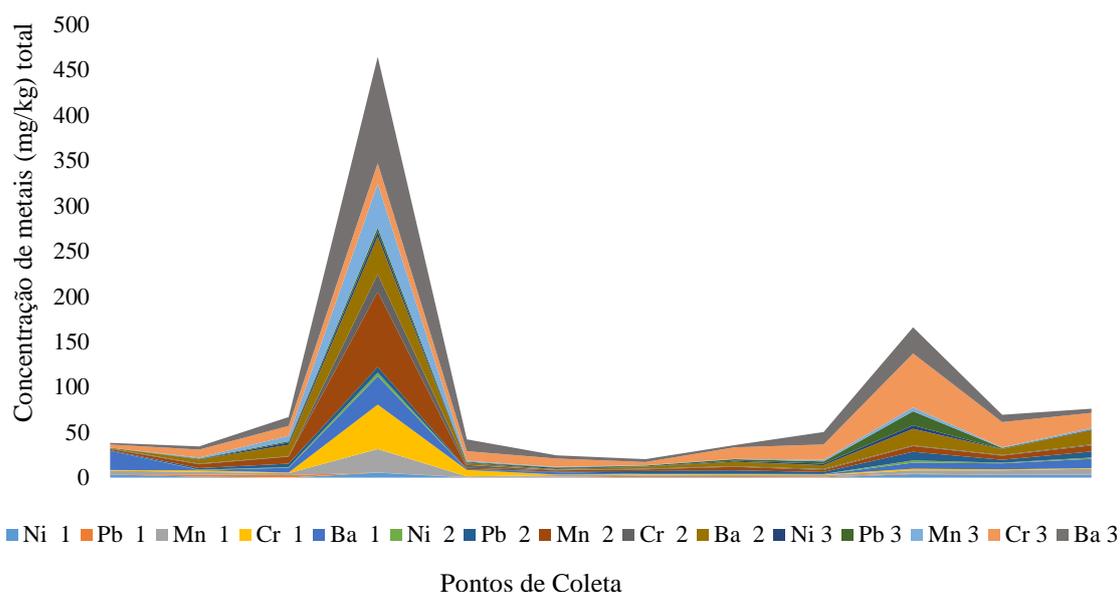


Figura 3 - Distribuição e acúmulo de todos os metais nos sedimentos dos pontos amostrados nos igarapés amostrados (A unidade do eixo Y é de mg/kg total). O Al não é representado na figura por seus valores serem de uma ordem de grandeza muito superior ao demais, conforme consta na tabela 4.

#### 4.3.2 Água

As análises dos metais (fração total) nas três campanhas apresentaram uma distribuição dentro das mesmas faixas em termos de concentrações medidas. Não houve aumento ou diminuição expressiva para os elementos estudados nas três campanhas (Tabela 5).

Dentre os metais analisados, apenas Al (fração total) não é mencionado na resolução (CONAMA N° 357/2005). Todos os demais estão abaixo do limite aceitável estabelecido pelo órgão de proteção ambiental.

O único metal que mostrou aumento de concentração entre campanhas na fração total da água foi o Ba. Este elemento na Estiagem nos pontos: PC7, PC8, PM4 e PM5 apresentou valores abaixo do limite de detecção e  $9,62 \pm 4,42$   $\mu\text{g/L}$  como concentração máxima. No período Chuvoso:  $1,79 \pm 1,0$   $\mu\text{g/L}$  -  $17,96 \pm 5,50$   $\mu\text{g/L}$  (valores mínimo e máximo) e para o período de Transição nos pontos PM2 e PM3 demonstraram valores abaixo do limite de detecção e concentração máxima de  $26,90 \pm 6,39$   $\mu\text{g/L}$ . O Al foi o metal mais abundante com variações de concentrações que não apresentaram diferenças entre períodos: Estiagem:  $276 \pm 39,5$   $\mu\text{g/L}$  -  $3693 \pm 1872,20$   $\mu\text{g/L}$ ; Chuvoso:  $112,9 \pm 12,7$   $\mu\text{g/L}$  -  $979,2 \pm 772,9$   $\mu\text{g/L}$ ; Transição:  $44,01 \pm 2,30$   $\mu\text{g/L}$  -  $574,6 \pm 385,96$   $\mu\text{g/L}$ . O Mn durante a Estiagem nos pontos PC7 e PM4 também apresentaram valores abaixo do limite de detecção e concentração máxima de  $48,12 \pm 36,22$ . Para o período Chuvoso, os pontos

PC1, PC6, PC7, PC8 e PC9 demonstraram valores abaixo do limite de detecção e concentração máxima de  $5,10 \pm 2,37$  e durante a Transição os pontos PM3 e PM4 demonstraram valores abaixo do limite de detecção e concentração máxima de  $14,29 \pm 1,65$ . Ba e Mn apresentaram faixas menores de concentrações e alguns pontos contendo amostras com valores abaixo do limite de detecção, porém mensuráveis na maioria dos pontos em todas as campanhas. Os demais (Ni, Pb e Cr) apresentaram-se em concentrações abaixo do limite de detecção do método na maioria dos pontos.

Tabela 5- Concentração total de metais na água ( $\mu\text{g/L}$ ) em áreas de Igarapé durante o período de estiagem (Nov/2018), período chuvoso (Mar/2019) e período de transição (Jun/2019). Os valores abaixo do limite de detecção (-). As letras minúsculas diferentes representam diferenças ( $p < 0,05$ ) entre os locais no mesmo período. As letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ( $p < 0,05$ ) no mesmo local ao longo dos períodos amostrados. NC significa valores limites de metais que não constam na resolução CONAMA N° 357/2005. Os dados são expressos como a média  $\pm$  erro padrão.

Local	Cr	Ni	Pb	Ba	Al	Mn
<b>Estiagem</b>						
PC1	3,17 $\pm$ 0,35 <sup>a</sup>	4,73 $\pm$ 4,12 <sup>Aa</sup>	<0,6-6,36	9,62 $\pm$ 4,42 <sup>Aa</sup>	134,41 $\pm$ 84,26 <sup>Aa</sup>	16,32 $\pm$ 15,08 <sup>a</sup>
PC2	1,20 $\pm$ 0,45 <sup>Aa</sup>	<0,40	<0,60	<0,5 - 4,45	276 $\pm$ 39,5 <sup>Aa</sup>	3,5 $\pm$ 1,73 <sup>a</sup>
PC3	2,96 $\pm$ 0,41 <sup>a</sup>	<0,4-2,27	<0,60	1,94 $\pm$ 0,14 <sup>Aa</sup>	3693 $\pm$ 1872,20 <sup>Aa</sup>	3,8 $\pm$ 3,38 <sup>a</sup>
PC5	<0,6-3,31	<0,40	<0,60	<0,5 - 2,35	1052,62 $\pm$ 596,37 <sup>Aa</sup>	48,12 $\pm$ 36,22 <sup>Aa</sup>
PC6	1,13 $\pm$ 0,41 <sup>a</sup>	1,44 $\pm$ 0,21 <sup>a</sup>	<0,6-1,26	<0,5 - 0,62	269,33 $\pm$ 32,73 <sup>Aa</sup>	5,09 $\pm$ 2,38 <sup>a</sup>
PC7	<0,60	<0,40	<0,60	<0,50	296,72 $\pm$ 51,47 <sup>Aa</sup>	<0,80
PC8	<0,60	<0,40	<0,60	<0,50	919,1 $\pm$ 595,9 <sup>Aa</sup>	3,26 $\pm$ 0,10 <sup>a</sup>
PC9	2,11 $\pm$ 1,58 <sup>a</sup>	<0,40	<0,60	<0,5 - 3,15	535,43 $\pm$ 189 <sup>Aa</sup>	3,70 $\pm$ 0,95 <sup>a</sup>
PM2	0,77 $\pm$ 0,002 <sup>Aa</sup>	1,77 $\pm$ 0,47 <sup>a</sup>	<0,60	8,35 $\pm$ 3,15 <sup>Aa</sup>	313,26 $\pm$ 88,7 <sup>Aa</sup>	2,49 $\pm$ 0,79 <sup>Aa</sup>
PM3	2,11 $\pm$ 0,91 <sup>a</sup>	<0,40	<0,6-0,06	2,07 $\pm$ 0,67 <sup>Aa</sup>	263,46 $\pm$ 78,89 <sup>Aa</sup>	6,13 $\pm$ 3,98 <sup>Aa</sup>
PM4	0,76 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>	<0,40	<0,60	<0,50	563,13 $\pm$ 192,46 <sup>Aa</sup>	<0,80
PM5	0,94 $\pm$ 0,76 <sup>Aa</sup>	<0,40	<0,60	<0,50	108,21 $\pm$ 22,75 <sup>Aa</sup>	3,46 $\pm$ 1,09 <sup>Aa</sup>
<b>Chuvoso</b>						
PC1	<0,60	<0,4 0	<0,60	11,21 $\pm$ 0,97 <sup>Aa</sup>	325,5 $\pm$ 131,2 <sup>Aa</sup>	<0,80
PC2	0,84 $\pm$ 0,17 <sup>Aa</sup>	<0,4-2,16	<0,60	8,74 $\pm$ 1,33 <sup>Aa</sup>	491,7 $\pm$ 187,3 <sup>Aa</sup>	4,81 $\pm$ 0,96 <sup>Aa</sup>
PC3	<0,60	<0,40	<0,60	9,20 $\pm$ 1,27 <sup>Aa</sup>	979,2 $\pm$ 772,9 <sup>Aa</sup>	<0,80
PC5	<0,6-1,05	<0,40	<0,60	8,57 $\pm$ 0,24 <sup>Aa</sup>	208,8 $\pm$ 97,8 <sup>Aa</sup>	2,75 $\pm$ 0,67 <sup>Aa</sup>
PC6	<0,6-0,63	<0,40	<0,60	17,96 $\pm$ 5,50 <sup>Aa</sup>	299,1 $\pm$ 116,8 <sup>Aa</sup>	<0,80
PC7	<0,6-0,69	<0,40	<0,60	8,35 $\pm$ 0,24 <sup>Aa</sup>	434,6 $\pm$ 84,02 <sup>Aa</sup>	<0,80
PC8	<0,6-0,61	<0,40	<0,60	6,09 $\pm$ 0,83 <sup>Aa</sup>	829,6 $\pm$ 441,4 <sup>Aa</sup>	<0,80
PC9	<0,60	<0,40	<0,60	3,09 $\pm$ 0,89 <sup>Aa</sup>	112,9 $\pm$ 12,7 <sup>Aa</sup>	<0,80
PM1	1,02 $\pm$ 0,10 <sup>a</sup>	<0,40	<0,60	4,31 $\pm$ 1,03 <sup>Aa</sup>	613,7 $\pm$ 53,83 <sup>Aa</sup>	<0,8-1,24
PM2	1,47 $\pm$ 0,60 <sup>Aa</sup>	<0,40	<0,60	3,60 $\pm$ 1,18 <sup>Aa</sup>	651,9 $\pm$ 72,4 <sup>Aa</sup>	5,10 $\pm$ 2,37 <sup>Aa</sup>
PM3	<0,6-0,95	<0,40	<0,60	2,16 $\pm$ 0,99 <sup>Aa</sup>	445 $\pm$ 77,8 <sup>Aa</sup>	1,56 $\pm$ 0,39 <sup>Aa</sup>
PM4	<0,6-0,78	<0,40	<0,60	1,79 $\pm$ 1,02 <sup>Aa</sup>	351,6 $\pm$ 90,2 <sup>Aa</sup>	<0,8-0,20
PM5	1,50 $\pm$ 0,03 <sup>Aa</sup>	0,83 $\pm$ 0,10	<0,60	9,84 $\pm$ 2,42 <sup>Aa</sup>	258,4 $\pm$ 69,94 <sup>Aa</sup>	4,45 $\pm$ 1,95 <sup>Aa</sup>
<b>Transição</b>						
PC1	<0,60	0,53 $\pm$ 0,04 <sup>Aa</sup>	<0,60	11,48 $\pm$ 1,58 <sup>Aa</sup>	44,01 $\pm$ 2,30 <sup>Aa</sup>	1,78 $\pm$ 0,46 <sup>Aa</sup>
PC2	<0,60	<0,40	<0,60	13,36 $\pm$ 1,60 <sup>Aa</sup>	81,96 $\pm$ 25,68 <sup>Aa</sup>	2,06 $\pm$ 0,15 <sup>Aa</sup>
PC3	<0,60	1,04 $\pm$ 0,29 <sup>a</sup>	<0,60	14,59 $\pm$ 0,64 <sup>Aa</sup>	96,54 $\pm$ 2,67 <sup>Aa</sup>	3,48 $\pm$ 0,33 <sup>Aa</sup>
PC5	<0,60	<0,40	<0,60	26,90 $\pm$ 6,39 <sup>Aa</sup>	287,14 $\pm$ 115,63 <sup>Aa</sup>	14,29 $\pm$ 1,65 <sup>Aa</sup>
PC6	<0,60	<0,40	<0,60	19,50 $\pm$ 0,80 <sup>Aa</sup>	307,10 $\pm$ 146,65 <sup>Aa</sup>	3,74 $\pm$ 0,90 <sup>Aa</sup>
PC7	<0,60	<0,40	<0,60	19,54 $\pm$ 1,47 <sup>Aa</sup>	184,74 $\pm$ 58,30 <sup>Aa</sup>	<0,8 $\pm$ 0,95
PC8	<0,60	<0,4-1,31	<0,60	21,36 $\pm$ 6,03 <sup>Aa</sup>	574,6 $\pm$ 385,96 <sup>Aa</sup>	1,98 $\pm$ 0,13 <sup>Aa</sup>
PC9	<0,60	<0,40	<0,60	20,72 $\pm$ 0,84 <sup>Aa</sup>	95,63 $\pm$ 13,5 <sup>Aa</sup>	1,29 $\pm$ 0,09 <sup>Aa</sup>
PM1	<0,60	<0,40	<0,60	19,25 $\pm$ 1,43 <sup>Aa</sup>	83,46 $\pm$ 21,64 <sup>Aa</sup>	12,00 $\pm$ 0,09 <sup>Aa</sup>
PM2	<0,60	<0,40	<0,60	<0,05- 24,39	328,53 $\pm$ 62,71 <sup>Aa</sup>	1,52 $\pm$ 0,40 <sup>Aa</sup>
PM3	<0,60	<0,40	<0,60	<0,05- 1,76	222,06 $\pm$ 25,66 <sup>Aa</sup>	<0,80
PM4	<0,60	<0,4-1,06	<0,60	1,58 $\pm$ 0,48 <sup>Aa</sup>	183,4 $\pm$ 4,81 <sup>Aa</sup>	<0,80
PM5	<0,60	<0,40	<0,60	3,56 $\pm$ 1,04 <sup>Aa</sup>	277,1 $\pm$ 101,62 <sup>Aa</sup>	1,78 $\pm$ 0,46 <sup>Aa</sup>
CONAMA	50	25	10	700	NC	100

Considerando a contribuição total (*Input*) dos metais analisados nos pontos estudados (Figura 4), observa-se que os pontos PC5, PC6, PM2 e PM5 apresentaram um acúmulo maior de metais nas águas dos igarapés amostrados, considerando os metais de forma cumulativa. Nesta figura, o Al não foi representado por ter uma ordem de grandeza muito superior aos demais metais.

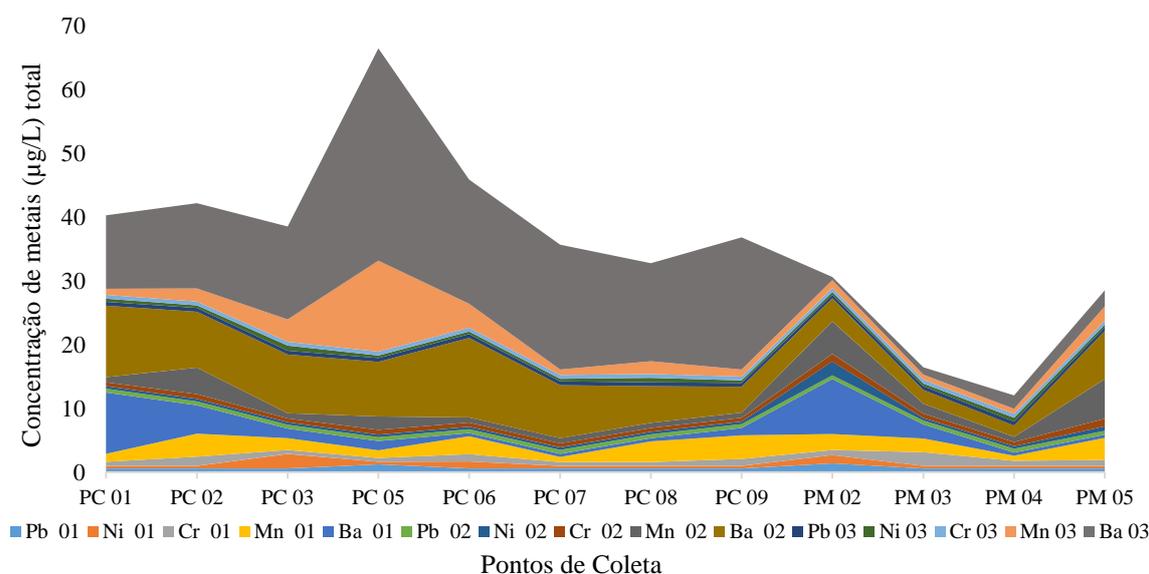


Figura 4- Distribuição e acúmulo de todos os metais nas águas (fração total) dos pontos amostrados nos igarapés amostrados (A unidade do eixo Y é de µg/L total). O Al não é representado na figura por seus valores serem de uma ordem de grandeza muito superior aos demais

Em relação às frações dissolvidas dos metais analisados nas águas, a maioria apresentou-se abaixo do limite de detecção do método, com exceção do Al dissolvido que apresentou altas concentrações. Os demais metais ou apresentaram-se abaixo do limite de detecção na maioria dos pontos (o caso do Ni, Pb e Cr) ou estiveram presentes, mas em concentrações bem baixas e semelhantes a fração total (Ba, Mn). Desta forma, na Figura 5 observa-se os dados de Al dissolvido que foi o mais concentrado e o que é controlado pela Resolução (CONAMA 357/2005).

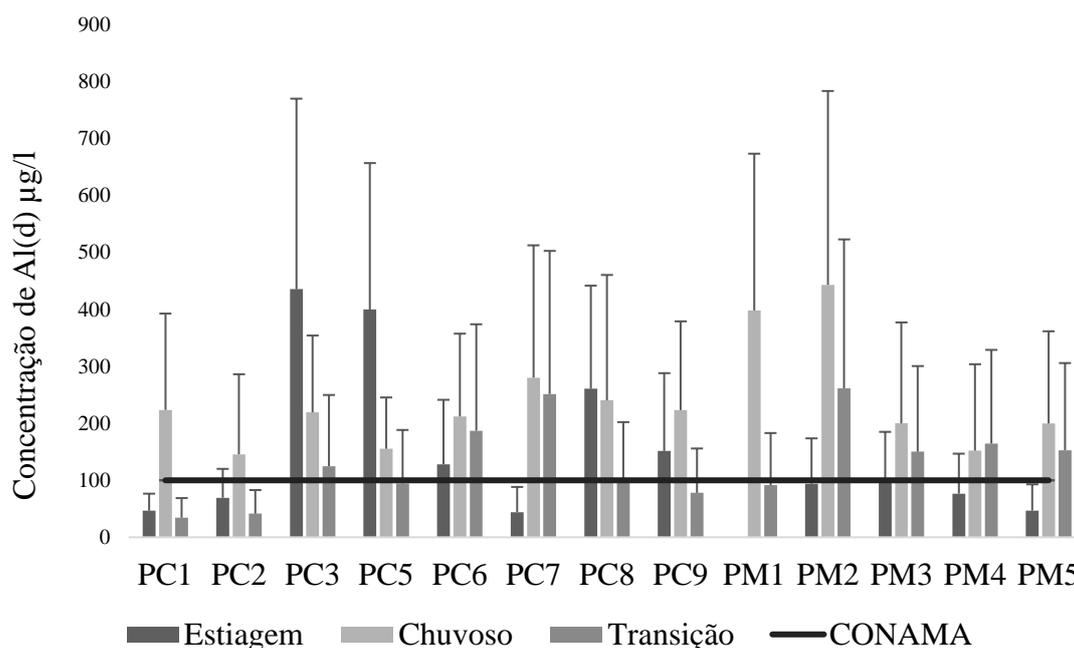


Figura 5 - Concentração de alumínio dissolvido ( $\mu\text{g/L}$ ) em áreas com distintas distâncias de um pólo industrial em Igarapés durante o período de estiagem (Nov/2018), o período chuvoso (Mar/2019) e transição (Jun/2019). Os dados são expressos como a mediana  $\pm$  quartil. O limite da legislação CONAMA 357/2005 está sendo exibido como uma linha. Como não houve diferenças entre os pontos, não foi colocado as letras maiúsculas e minúsculas para diferenciar.

### 4.3.3 Organismos

#### 4.3.3.1 Peixe (*H. heterorhabdus*)

Os peixes não apresentaram diferenças ( $p > 0,05$ ) em termos de concentração de Al e Mn entre pontos no mesmo período (Tabela 6). O Pb foi registrado em maiores concentrações durante a estiagem nos peixes capturados em PC7 ( $0,30 \pm 0,01$  mg/kg) em relação aos animais do ponto PC1. Para o elemento Ba, os animais coletados em PC1 ( $7,10 \pm 0,49$  mg/kg) apresentaram uma maior concentração em relação ao PC7 ( $2,18 \pm 0,98$  mg/kg) na estiagem. Na estação chuvosa, houve uma maior concentração de Ba nos peixes de PC7 ( $15,87 \pm 0,04$  mg/kg) em relação aos dos demais pontos. No período de transição, os indivíduos do PM3 ( $9,13 \pm 1,19$  mg/kg) apresentaram uma concentração maior de Ba em relação ao PC3 ( $6,36 \pm 0,58$  mg/kg). Em relação ao Mn, houve uma menor concentração em peixes no PC1 na estação de estiagem ( $4,27 \pm 0,41$  mg/kg) para a chuvosa ( $11,71 \pm 2,98$  mg/kg).

Tabela 6 - Concentração de metais totais no músculo do peixe *H. heterorhabdus* (mg/kg) de áreas com distintas distâncias de um pólo industrial em Igarapés durante o período de estiagem (nov/2018), período chuvoso (Mar/2019) e período de transição (Jun/2019). Os valores abaixo do limite de detecção (-). As letras minúsculas diferentes representam diferenças ( $p < 0,05$ ) entre os locais no mesmo período. As letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ( $p < 0,05$ ) no mesmo local ao longo dos períodos amostrados. Os dados são expressos como a média  $\pm$  erro padrão

Local	Cr	Ni	Pb	Ba	Al	Mn
<b>Estiagem</b>						
PC1	0,29 $\pm$ 0,04	0,07 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	0,03 $\pm$ 0,002 <sup>a</sup>	2,18 $\pm$ 0,98 <sup>Ab</sup>	26,63 $\pm$ 12,95 <sup>Aa</sup>	4,27 $\pm$ 0,41 <sup>Aa</sup>
PC3	-	-	-	-	-	-
PC7	<0,02	0,04 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	0,30 $\pm$ 0,01 <sup>Ab</sup>	7,10 $\pm$ 0,49 <sup>Aa</sup>	69,14 $\pm$ 16,98 <sup>Aa</sup>	3,46 $\pm$ 0,20 <sup>Aa</sup>
PM3	-	-	-	-	-	-
<b>Chuvoso</b>						
PC1	<0,02	<0,01-0,01	<0,03	4,41 $\pm$ 1,45 <sup>Aa</sup>	25,99 $\pm$ 6,71 <sup>Aa</sup>	11,71 $\pm$ 2,98 <sup>Ba</sup>
PC3	<0,02	<0,01-0,14	<0,03	6,61 $\pm$ 1,21 <sup>Aa</sup>	41,20 $\pm$ 12,28 <sup>Aa</sup>	13,38 $\pm$ 6,36 <sup>Aa</sup>
PC7	<0,02	<0,01-30,1	0,35 $\pm$ 0,05 <sup>A</sup>	15,87 $\pm$ 0,04 <sup>Bb</sup>	49,91 $\pm$ 2,07 <sup>Aa</sup>	7,76 $\pm$ 1,84 <sup>Aa</sup>
PM3	0,71 $\pm$ 0,08	0,17 $\pm$ 0,08	<0,03	4,78 $\pm$ 1,37 <sup>Aa</sup>	47,37 $\pm$ 13,75 <sup>Aa</sup>	3,81 $\pm$ 0,36 <sup>Aa</sup>
<b>Transição</b>						
PC1	<0,02	<0,01	<0,03-0,03	4,55	11,60	0,89
PC3	<0,02	<0,01-0,10	0,03 $\pm$ 0,008 <sup>a</sup>	6,36 $\pm$ 0,58 <sup>Aa</sup>	25,19 $\pm$ 6,78 <sup>Aa</sup>	2,42 $\pm$ 0,47 <sup>Aa</sup>
PC7	<0,02	<0,01	<0,03 - 0,09	2,41	66,9	0,57
PM3	<0,02	<0,01	0,08 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>	9,13 $\pm$ 1,19 <sup>Ab</sup>	96,59 $\pm$ 64,98 <sup>Aa</sup>	0,98 $\pm$ 0,08 <sup>Aa</sup>

#### 4.3.3.2 Planta Família Marantaceae

As plantas coletadas não apresentaram diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) nem entre os pontos nem entre períodos para nenhum dos metais (Tabela 7). Não foi encontrada a espécie nos pontos PM2 e PM3 no período chuvoso. Na estação de transição não foi possível encontrar espécimes nos pontos PC1, PC3, PM1, PM3 e PM5. As análises dos metais nas 3 campanhas mostram uma tendência de aumento no acúmulo de Pb, Mn e Ba nas plantas durante o período de transição.

Tabela 7 - Concentração de metais totais na planta Marantacea (mg/kg) de áreas com distintas distâncias de um pólo industrial em Igarapés durante o período de estiagem (Nov/2018), período chuvoso (Mar/2019) e período de transição (Jun/2019). As letras minúsculas diferentes representam diferenças ( $p < 0,05$ ) entre os locais no mesmo período. As letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ( $p < 0,05$ ) no mesmo local ao longo dos períodos amostrados. Os dados são expressos como a média  $\pm$  erro padrão

Local	Cr	Ni	Pb	Ba	Al	Mn
<b>Estiagem</b>						
PC 01	0,43 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup>	0,45 $\pm$ 0,21 <sup>Aa</sup>	<0,03	4,26 $\pm$ 0,7 <sup>Aa</sup>	92,21 $\pm$ 19,50 <sup>Aa</sup>	68,23 $\pm$ 4,73 <sup>Aa</sup>
PC 03	1,95 $\pm$ 0,51 <sup>a</sup>	0,31 $\pm$ 0,07 <sup>Aa</sup>	0,17 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>	4,14 $\pm$ 1,56 <sup>Aa</sup>	1054,61 $\pm$ 45,12 <sup>Aa</sup>	18,27 $\pm$ 7,64 <sup>Aa</sup>
PC 05	2,05 $\pm$ 0,61 <sup>a</sup>	1,57 $\pm$ 0,27 <sup>a</sup>	0,28 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>	10,85 $\pm$ 0,71 <sup>Aa</sup>	1561,70 $\pm$ 864,45 <sup>a</sup>	145,76 $\pm$ 62,22 <sup>Aa</sup>
PC 07	0,55 $\pm$ 0,17 <sup>a</sup>	0,38 $\pm$ 0,18 <sup>Aa</sup>	<0,03	0,86 $\pm$ 0,20 <sup>Aa</sup>	141,32 $\pm$ 29,81 <sup>Aa</sup>	66,33 $\pm$ 2,65 <sup>Aa</sup>
PM 01	0,88 $\pm$ 0,17 <sup>a</sup>	0,37 $\pm$ 0,03 <sup>Aa</sup>	0,21 $\pm$ 0,13 <sup>a</sup>	2,02 $\pm$ 1,18 <sup>Aa</sup>	407,64 $\pm$ 222,38 <sup>Aa</sup>	51,35 $\pm$ 2,45 <sup>Aa</sup>
PM 02	1,31 $\pm$ 0,09 <sup>a</sup>	0,19 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>	0,08 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup>	1,13 $\pm$ 0,25 <sup>a</sup>	504,61 $\pm$ 6,18 <sup>a</sup>	56,18 $\pm$ 1,45 <sup>a</sup>
PM 03	1,05 $\pm$ 0,41 <sup>a</sup>	0,65 $\pm$ 0,42 <sup>a</sup>	<0,03-0,08	2,55 $\pm$ 1,55 <sup>a</sup>	375,70 $\pm$ 169,92 <sup>a</sup>	99,19 $\pm$ 46,41 <sup>a</sup>
<b>Chuvoso</b>						
PC 01	<0,02	0,079 $\pm$ 0,01 <sup>Aa</sup>	<0,02	5,41 $\pm$ 1,79 <sup>Aa</sup>	1280 $\pm$ 1007,3 <sup>Aa</sup>	108,02 $\pm$ 46,47 <sup>Aa</sup>
PC 03	<0,02	0,50 $\pm$ 0,006 <sup>Aa</sup>	<0,02	1,44 $\pm$ 0,06 <sup>Aa</sup>	480,8 $\pm$ 10,69 <sup>Aa</sup>	205,14 $\pm$ 135,40 <sup>Aa</sup>
PC 05	<0,02	1,73 $\pm$ 0,32 <sup>Aa</sup>	<0,02	3,72 $\pm$ 1,80 <sup>Aa</sup>	163 $\pm$ 14,01 <sup>Aa</sup>	307,65 $\pm$ 131,71 <sup>Aa</sup>
PC 07	<0,02	0,52 $\pm$ 0,10 <sup>Aa</sup>	<0,02	2,40 $\pm$ 1,26 <sup>Aa</sup>	255,37 $\pm$ 90,43 <sup>Aa</sup>	88,53 $\pm$ 29,08 <sup>Aa</sup>
PM 01	<0,02	1,30 $\pm$ 0,43 <sup>Aa</sup>	<0,02	0,83 $\pm$ 0,04 <sup>Aa</sup>	1352,87 $\pm$ 1103,74 <sup>Aa</sup>	92,154 $\pm$ 25,21 <sup>Aa</sup>
PM 02	<0,02	-	<0,02	-	-	-
PM 03	<0,02	-	<0,02	-	-	-
<b>Transição</b>						
PC 01	-	-	-	-	-	-
PC 03	-	-	-	-	-	-
PC 05	<0,03-0,11	0,76 $\pm$ 0,12 <sup>Aa</sup>	0,57 $\pm$ 0,18 <sup>Aa</sup>	8,98 $\pm$ 6,59 <sup>Aa</sup>	292,89 $\pm$ 190,22 <sup>Aa</sup>	879,06 $\pm$ 421,29 <sup>Aa</sup>
PC 07	0,28	0,97 $\pm$ 0,17 <sup>Aa</sup>	0,20 $\pm$ 0,01 <sup>Aa</sup>	6,75 $\pm$ 1,86 <sup>Aa</sup>	657,37 $\pm$ 147,13 <sup>Aa</sup>	122,37 $\pm$ 23,56 <sup>Aa</sup>
PM 01	-	-	-	-	-	-
PM 02	-	-	-	-	-	-
PM 03	-	-	-	-	-	-

#### 4.4 BIOMARCADORES

##### 4.4.1 Caranguejo (*T. Borellianus*)

###### 4.4.1.1 Brânquias

###### 4.4.1.1.1 Capacidade antioxidante total – ACAP

Não houve diferenças entre pontos para nenhum dos períodos conforme observado na Figura 6. O ponto PC1 demonstrou menor capacidade antioxidante durante o período de estiagem (0,29 $\pm$ 0,27) em comparação ao período chuvoso (0,84 $\pm$ 0,52).

No ponto PM3 só foi possível a coleta de caranguejos durante o período chuvoso, pois na estiagem ainda não se tinha clareza da demanda de biomassa e os poucos indivíduos capturados foram usados em testes para padronizar o ensaio do biomarcador. Além disso, não houve captura de nenhum animal em nenhum ponto no período de transição muito embora as armadilhas tenham sido colocadas.

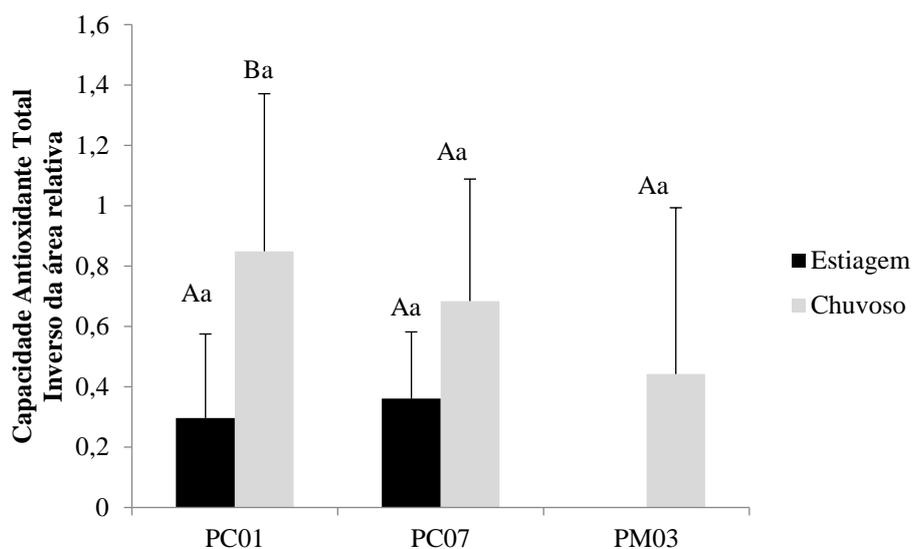


Figura 6 - ACAP em brânquias de *T. borellianus* de todos os locais amostrados ( $n=6$  a 8 amostras, variando por ponto) durante os períodos de estiagem (Nov/2018) e chuvoso (Mar/2019). Letras maiúsculas diferentes representam diferença estatística ( $p<0,05$ ) entre estações para o mesmo ponto e letras minúsculas diferentes representam diferença estatística ( $p<0,05$ ) entre pontos para o mesmo período. Dados representados em mediana $\pm$ 1º quartil.

#### 4.4.1.1.2 Lipoperoxidação - LPO

A pouca quantidade de tecido disponível limitou a aplicação do método devido ao tamanho diminuto dos organismos coletados no período de estiagem (Nov/2018). As amostras do período chuvoso (Mar/2019) foram dosadas, no entanto, responderam negativamente ao ensaio, problema causado pelo reagente Xylenol. E durante a o período de transição (Jun/2019) não houve organismos coletados em nenhum dos pontos de amostragem. Esses fatores inviabilizaram a dosagem deste biomarcador de efeito.

#### 4.4.1.2 Músculo

##### 4.4.1.2.1 Capacidade antioxidante total - ACAP

Não houve diferença ( $p>0,05$ ) entre os organismos dos locais amostrados durante o período de estiagem (Figura 7).

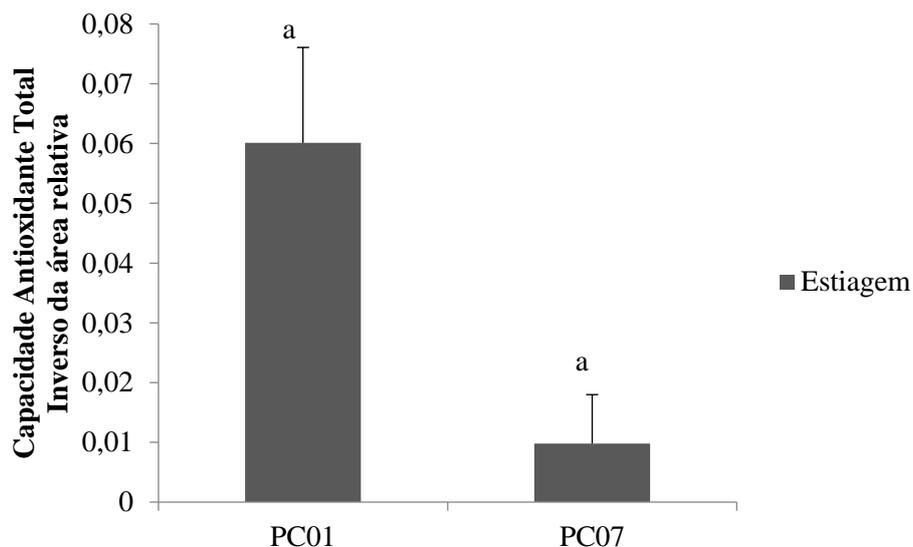


Figura 7 - Capacidade antioxidante total em músculo de *T. borellianus* de todos os locais amostrados (n=3 a 12 amostras, variando por ponto) durante o período de estiagem (Nov/2018). Letras diferentes representam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre pontos para o mesmo período. Dados representados em média  $\pm$  erro padrão.

#### 4.4.1.2.2 Lipoperoxidação - LPO

Não houve diferença ( $p > 0,05$ ) entre os organismos dos dois pontos amostrados (Figura 8).

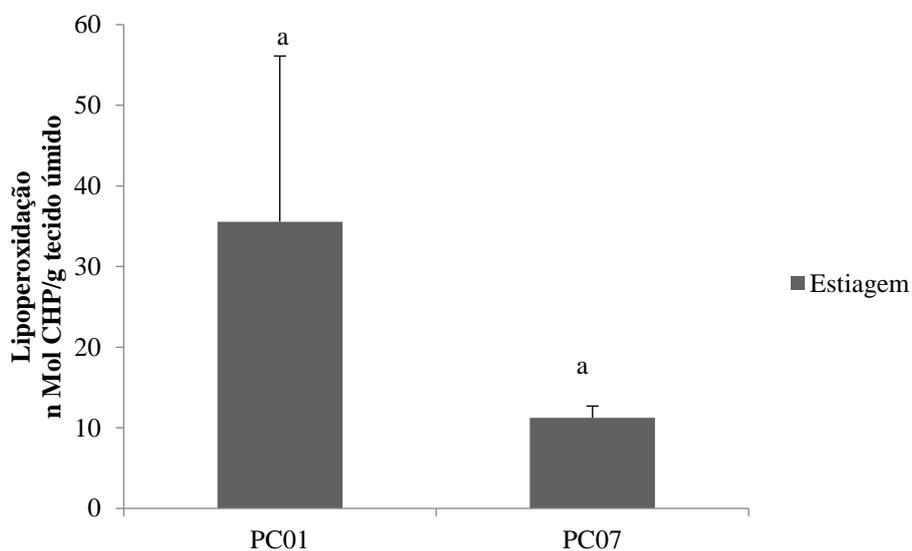


Figura 8 - Lipoperoxidação no músculo de *T. borellianus* de todos os locais amostrados (n= 5 a 14 amostras, variando por ponto) durante o período de estiagem (Nov/2018). Letras minúsculas diferentes representam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre pontos para o mesmo período. Dados representados em média  $\pm$  erro padrão.

#### 4.4.2 Peixe *H. heterorhabdus*

##### 4.4.2.1 Capacidade antioxidante total - ACAP

Não houve diferenças entre locais para nenhum período amostrado ( $p > 0,05$ ). Houve diferença para os organismos do ponto controle PC7 entre os períodos de estiagem ( $0,20 \pm 0,13$ ) e chuvoso ( $7,52 \pm 3,18$ ), havendo no último, indução da capacidade antioxidante (Figura 9).

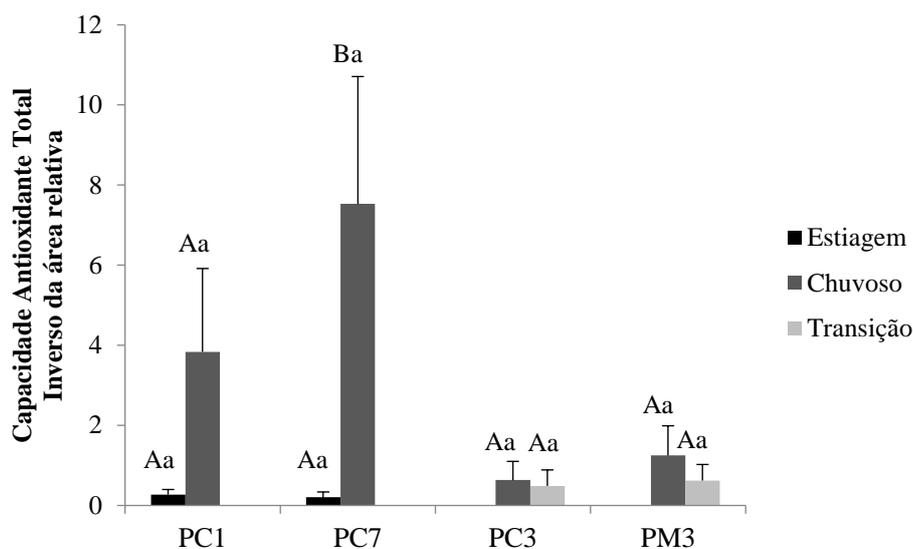


Figura 9 - Capacidade antioxidante total em *H. heterorhabdus* de todos os locais amostrados ( $n=12$  a  $16$  amostras, variando por ponto) durante os períodos de estiagem (Nov/2018), Chuvoso (Mar/2019) e Transição (Jun/2019). Letras maiúsculas diferentes representam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre estações para o mesmo ponto e letras minúsculas diferentes representam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre pontos para o mesmo período. Dados representados em mediana  $\pm 1^\circ$  quartil.

##### 4.4.2.2 Lipoperoxidação - LPO

Cada amostra do organismo *H. heterorhabdus*, correspondeu a um indivíduo amostrado, considerando que na literatura não consta nenhum trabalho que tenha utilizado essa espécie de peixe para a metodologia que foi empregada, um grande quantitativo das amostras da primeira coleta (Nov/2018), destinadas a LPO, foram utilizadas nas necessárias padronizações para aquisição das condições de ensaio.

Desse modo, a Figura 10 apresenta os resultados das amostras do período chuvoso (Março/2019) e período de transição (Junho/2019) para este biomarcador. Infere-se que não houve diferença ( $p > 0,05$ ) nem entre pontos controles (PC1 e PC7) e os pontos de impacto direto (PM3) e indireto (PC3) durante o período chuvoso bem como não houve diferença entre períodos ( $p > 0,05$ ) para os pontos PC3 e PM3.

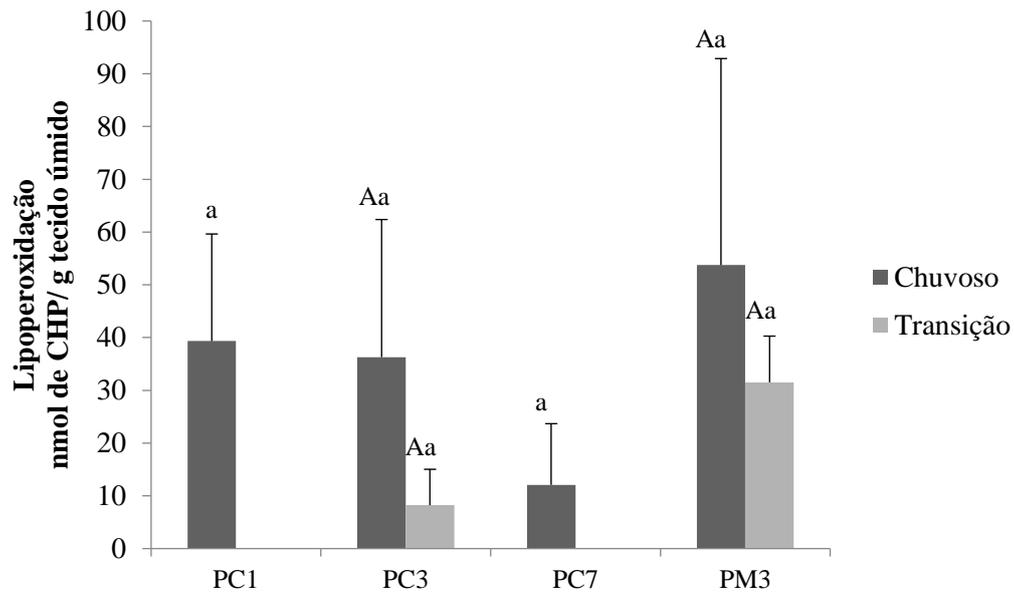


Figura 10 - Lipoperoxidação em *H. heterorhabdus* de todos os locais amostrados (n= 6 a 10 amostras, variando por ponto) durante os períodos chuvoso (Mar/2019) e transição (Jun/2019). Letras maiúsculas diferentes representam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre estações para o mesmo ponto e letras minúsculas diferentes representam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre pontos para o mesmo período. Dados representados em mediana $\pm$ 1ºquartil.

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Os valores dos parâmetros físico-químicos obtidos neste trabalho, refletem peculiaridades conhecidas da influência dos rios de águas brancas sobre os igarapés amazônicos. Os igarapés são caracterizados por apresentarem temperatura praticamente constante ao longo do ano por terem, em sua maioria, a presença de mata ciliar ou floresta nos seus arredores, recebendo pouca incidência de radiação solar (Fittkau 1964).

Silva (2010) observou pH em igarapés de 5,5 a 6,9 na Amazônia e Piratoba *et al.* (2017) em estudo localizado em um trecho do Rio Pará (curso d'água próximo aos pontos coletados) encontraram valores médios de pH entre 7,22 a 7,39 durante o período chuvoso, neste estudo o valor médio de pH para o mesmo período foi de 5,7. Furch & Junk (1997) em estudo na mesma região encontraram o pH baixo e mais ácido para rios de águas brancas, assim como as águas dos pontos analisados. Na estação chuvosa e de transição, os valores de pH observados nos pontos de igarapé (PC6, PC7, PC8, PC9, PM1, PM2, PM3, PM4, PM5) estão abaixo dos valores estabelecido pelo (CONAMA N° 357/2005) para água doce, onde todas as classes devem ter um pH de 6 a 9, caracterizando assim, águas de igarapés amazônicos que naturalmente possuem águas ácidas.

A condutividade elétrica nas regiões tropicais, segundo Esteves (2011) está relacionada com as características geoquímicas da região e condições climáticas (periodicidade de precipitações). Nos pontos analisados observou-se uma baixa condutividade, tal resultado é esperado, uma vez, que existe baixa concentração de sais nestes corpos d'água.

Nos períodos chuvoso e de transição, o oxigênio dissolvido foi registrado com valores mais baixos e durante a estiagem apresentou maiores valores. É sabido que, o nível de oxigênio dissolvido é um poderoso indicador da qualidade da água, pois sua diminuição está intimamente relacionada ao aumento de matéria orgânica na água e ao fenômeno da eutrofização (Coffin *et al.* 2018). Portanto, a diminuição no teor de oxigênio pode indicar uma alta concentração de macronutrientes essenciais (como fósforo e nitrogênio), que afetam a composição da água e potencializam a biodisponibilidade de metais tóxicos (Duan *et al.* 2014), principalmente em condições de acidez (Chasin & Azevedo 2003). Assim, durante o período das chuvas, é possível que as mesmas estejam contribuindo para a ressuspensão da matéria orgânica presente nas folhas das margens e fundo do rio, elevando a concentração de nutrientes na água.

Ressalta-se que os parâmetros físico-químicos entre os pontos classificados como controles e os pontos com maior interferência antrópica não apresentaram variações e vários pontos (especificamente nas medições de oxigênio dissolvido e pH) mostraram-se abaixo dos limites preconizados pelo CONAMA, entretanto, levando em consideração que são igarapés amazônicos, é o esperado

## 5.2 BIOMETRIA DOS ORGANISMOS

Durante a estação chuvosa é esperado que ocorra os maiores valores de biometria do caranguejo devido ao maior aporte de nutrientes ocasionado pelo aumento da pluviosidade, assim como foi encontrado neste estudo. De acordo com Hartnoll (1988) diversas espécies de caranguejos de água doce são mais ativas durante os períodos de chuva em virtude da expansão das áreas úmidas ou alagadas. O alto índice pluviométrico nesse período não somente torna as águas superficiais menos salinas, como também as tornam mais ricas em nutrientes, carregados pelas chuvas. No período chuvoso, os animais estão investindo em crescimento e guardando energia para o momento da muda (Luvizotto-Santos *et al.* 2003).

No período chuvoso, os peixes coletados no ponto PC1 apresentaram os menores valores de peso, comprimento total e padrão, tal fato pode estar relacionado a um deslocamento de energia, que não foi direcionado ao crescimento. Durante a estação chuvosa ocorre a lixiviação da área entorno e o retrabalhamento do sedimento de fundo, com isso expondo os organismos a contaminantes. No período de transição, os peixes do ponto PM3 (ponto de impacto direto) apresentaram os menores valores de comprimento padrão, o que pode estar relacionado ao fato de que este ponto possui múltiplas influências e de acordo com Cunico *et al.* (2011) há evidências de que igarapés com influência de áreas urbanas impactadas pela poluição tendem a apresentar alterações na estrutura da comunidade local.

## 5.3 ANÁLISE DE METAIS (SEDIMENTOS, ÁGUA E ORGANISMOS)

No presente estudo, foi demonstrado pela primeira vez as concentrações de metais presentes no sedimento, na água e organismos presentes nos igarapés durante três períodos climáticos.

As concentrações de metais em suas frações totais para Al, Mn, Ba, Pb, Cr e Ni em sedimentos foram encontradas em níveis similares entre os pontos, sendo a

concentração de Al superior aos demais metais. Este dado ressalta a relação com a formação geológica do município de Barcarena, que possui em seu arcabouço geológico a formação Barreiras (Rossetti 2001). Para este fator abiótico todos os metais analisados foram detectados (Cr, Ni e Pb) abaixo dos limites estipulados pela Resolução (CONAMA Nº 454/2012), vale ressaltar que, a contaminação dos sedimentos pode ser utilizada como um importante indicador ambiental de poluição, sendo útil para mapear, traçar e monitorar fontes antropogênicas de contaminação e/ou anomalias causadas por processos geoquímicos naturais (Carmo *et al.* 2011). No entanto, para este estudo não houve diferenças entre os pontos controle e pontos impactados, porém, é importante mencionar que a influência da sazonalidade e do nível de antropização ao longo das bacias hidrográficas pode exercer efeitos sobre o transporte e a disponibilidade de metais em ambientes aquáticos (Brigham *et al.* 2009, Brito *et al.* 2017, Squadrone 2013).

A concentração de Al na sua fração total, foi o elemento mais abundante nas águas dos igarapés em todos os pontos amostrados, podendo sugerir constituição local, pois é um elemento majoritário na formação Barreiras. Do mesmo modo, o Al dissolvido também esteve bem concentrado nas amostras de água dos igarapés. É sabido que, o alumínio pode ocorrer na água em diferentes formas e sua concentração depende de fatores físicos, químicos e geológicos. Para este estudo, observou-se que a sazonalidade também é um fator a ser avaliado, pois, no período chuvoso, todos os pontos de coleta apresentaram níveis de Al acima do permitido (Resolução CONAMA 357/2005) e nas demais campanhas a maioria dos pontos ultrapassou o estipulado na referida resolução. Mais uma vez, esse comportamento reforça ser uma característica natural, uma vez que, não houve diferenciação entre pontos e comportamentos sazonais semelhantes entre todas as áreas de amostragem.

Nos peixes, o Al também se apresentou elevado, porém, não houve diferença entre os animais dos pontos onde as coletas foram possíveis. O Al não é um metal essencial, ou seja, não possui funções biológicas conhecidas, portanto, dependendo da sensibilidade das espécies envolvidas, qualquer concentração encontrada no organismo pode causar toxicidade (Newman 2010). Entretanto, é relevante destacar que a região é naturalmente rica em alumínio e a acumulação desse metal, até níveis limiares, pode não necessariamente levar a danos fisiológicos uma vez que os processos adaptativos de organismos residentes podem mitigar possíveis danos.

Durante o período chuvoso observou-se no estudo, o aumento de Ba no sedimento no ponto PC5 (ponto distante das zonas de operação das atividades industriais). Segundo

He *et al.* (2000) durante este período, ocorre um aumento da lixiviação e erosão, com isso, carreando metais para os corpos d'água e aumentando assim a sua concentração. Somado aos processos naturais que ocorrem no período chuvoso está o aporte antropogênico de todos os elementos, o que potencializa o aumento da concentração dos elementos neste período específico. Além do Ba, foi verificado um maior *input* geral de metais no PC5 (na análise cumulativa). Neste sentido, é importante que se realizem estudos para a compreensão da hidrodinâmica dos igarapés que compõem a bacia do Murucupi e bacias adjacentes, visando compreender como os diferentes riachos podem contribuir com o aporte de contaminantes de outras áreas e entre si.

Para o Ba, na análise de fração total da água, este elemento foi o único metal que mostrou aumento de concentração entre campanhas na fração total da água. Conforme Lima (2008) o Ba é encontrado na formação barreiras na forma do mineral Barita, a formação geológica que ocorre onde foi realizado o estudo. Este elemento pode causar toxidez a plantas e invertebrados se disponível em elevados teores no solo, além de interferir na disponibilidade de S, devido à formação de sulfatos de baixa solubilidade (Coscione & Berton 2009).

Nos organismos (peixes e plantas) coletados no PC7 durante as estações de estiagem e chuvosa, maiores concentrações de Ba foram observadas. O Ba é um metal não essencial e tem toxicidade conhecida, mesmo uma pequena quantidade de ingestão pode causar sintomas em seres humanos, como vômitos, cólicas estomacais, diarreia e dificuldade respiratória (CETESB, 2012). A espécie *H. heterorhabdus* não tem interesse comercial e não é usada para consumo humano, mas pode ser usada como alimento para vertebrados maiores sendo um intermediário na teia trófica. Embora isso não seja uma regra, certos metais presentes nos músculos podem atingir os organismos no topo da cadeia (como os humanos) através dos alimentos por meio do processo de biomagnificação. Nesse processo, a concentração de metais de transição ao longo da cadeia trófica aumenta, e a concentração torna-se cada vez maior em organismos com níveis tróficos mais elevados (Arantes *et al.* 2018). As maiores concentrações de Ba no PM3 em relação aos outros elementos, podem estar relacionadas ao fato deste ponto estar dentro das zonas de operação das atividades industriais.

O manganês, é um metal abundante em ambientes naturais (Bordean *et al.* 2014), porém é comumente encontrado em depósitos de minério de ferro (Coppo *et al.* 2018). Durante o período chuvoso, no ponto PC1, a concentração de Mn nos peixes foi maior em comparação ao período de estiagem, possivelmente devido a ressuspensão

hidrodinâmica sofrida pelas partículas orgânicas no corpo aquático. Este composto é um metal essencial importante, que pode ser usado como cofator para várias enzimas (superóxido dismutase, piruvato carboxilase, etc.). Sua ausência no organismo de peixes pode causar problemas na reprodução, retardo no desenvolvimento e má-formação de peixes juvenis (Olmedo 2013, Hosseini *et al.* 2013). Por ser um metal essencial, o limite de toxicidade é diferente daquele de metais não essenciais (como Pb e Al), e os organismos têm maior tolerância.

O metal Pb apresentou forte relação com os pontos de potencial impacto direto. Em um estudo de Reeves *et al.* (2001) observou-se em solo de áreas próxima a polos industriais podem apresentar altas concentrações de metais tóxicos como Pb, Ni, Cr e Cd. Além disso, o Pb é um elemento frequentemente relacionado a *inputs* de áreas urbanizadas (Mao *et al.* 2014). A fonte de Pb observado em organismos do PC7 durante a estiagem não pôde ser determinada. Este foi considerado um ponto de controle e não se esperava a presença de metais que estivessem mais relacionados a atividade antropogênica. Nesse sentido, é importante e recomendável estudar a hidrodinâmica dos rios que fazem parte da Bacia do Murucupi e bacias adjacentes, para que seja possível entender como as substâncias (inclusive poluentes) fluem entre os diversos componentes da água e potenciais ocorrências naturais.

O chumbo é um elemento não biodegradável e não essencial para funções biológicas (Peakall & Burger 2003, Ribeiro *et al.* 2014). No caso dos peixes, o envenenamento por esse elemento pode levar a uma série de doenças, tais como: baixa fertilidade, diminuição da capacidade de defesa imunológica, diminuição da taxa de crescimento e patologias que podem levar à morte dos indivíduos (Meneses 2008, Queiroz 2009).

No presente estudo observou-se concentrações de Pb nas plantas de Marantacea dos pontos PC5 e PC7 durante o período de transição. Sabe-se que o Pb é um metal não-essencial que é tóxico para muitos organismos, incluindo vegetais (Romeiro *et al.* 2007). Sua absorção pode causar problemas para as plantas, incluindo inibição do crescimento e fotossíntese, alteração da absorção de nutrientes, balanço hídrico da planta e outros fatores (Sharma & Dubey 2005). Durante os três períodos de amostragem, observou-se um acúmulo de Al, Mn, Ni e Ba nas plantas, potencializando assim o possível papel das plantas herbáceas na bioacumulação e fitorremediação em áreas com alto teor de metal.

#### 5.4 BIOMARCADORES

Não houve diferença entre os organismos nos pontos de controle PC1 e PC7 para capacidade antioxidante e dano oxidativo no músculo da espécie de caranguejo. Por serem pontos de controle, os resultados refletem as respostas esperadas para organismos oriundos de ponto com menor influência antrópica. Ambientes com histórico de impacto antrópico elevam a demanda metabólica de seus organismos residentes, que realocam o gasto energético para processos de biotransformação e detoxificação (Wepener 2008), no entanto, isto não foi verificado neste estudo.

Nas brânquias dos caranguejos, foi observada maior capacidade antioxidante no organismo de PC1 durante o período chuvoso. Observou-se que houve um aumento substancial das concentrações totais de todos os metais tanto na água como no sedimento, que, aliado à maior turbulência causada pelas chuvas, elevam a demanda metabólica e o sistema de defesa antioxidante. De acordo com Raymond *et al.* (2012) as brânquias além de ser um órgão com diversas funções metabólicas para os crustáceos, também absorvem muitos metais tóxicos e em estudos de Pinheiro *et al.* (2012) e Ortega *et al.* (2017) os autores demonstraram que as brânquias superacumulam metais tanto em estudos de campo quanto em ensaios de laboratório.

Para os peixes e caranguejos, não houve diferença na capacidade antioxidante entre os pontos de controle PC1 e PC7 durante a estiagem. É importante ressaltar que os dados dos biomarcadores confirmam os dados de quase todos os metais encontrados para sedimentos, água e organismos (peixes advindos destes pontos) sem diferenciação entre os controles.

Na estação chuvosa, em peixes notou-se a ocorrência do aumento da capacidade antioxidante dos organismos PC7, e o resultado pode estar relacionado às maiores concentrações de Pb e Ba encontradas nos organismos deste ponto nos períodos de estiagem e chuvoso. É possível que os níveis desses metais sejam constantes devido ao lançamento de efluentes persistente neste local, o que faz com que os animais se adaptem a essa condição, elevando suas defesas antioxidantes e evitando o estresse oxidativo.

Devido ao tamanho reduzido dos exemplares de *H. heterorhabdus*, os peixes foram utilizados inteiros nas análises. Análises bioquímicas que utilizem o organismo inteiro ainda são pioneiras, mas seus resultados são altamente relevantes, como mostra o estudo de Hinck *et al.* (2008), sobre a concentração de metais em carpas *Cyprinus carpio* e no peixe *Micropterus salmoides* advindos de diversas áreas com histórico de descarga de metais tóxicos e pesticidas, utilizando indivíduos inteiros em suas análises. Os autores

verificaram que a concentração de metal excede o limite nesta área, e há uma correspondência entre a atividade das enzimas hepáticas e o dano histológico.

Não houve diferença entre locais para nenhum período amostrado, indicando que não há toxicidade em organismos próximos à região sob múltiplas influências antropogênicas, porém houve diferença entre períodos no ponto controle (PC7) durante o chuvoso. No entanto, uma análise mais aprofundada é necessária para um diagnóstico completo. O sistema de defesa antioxidante é um mecanismo complexo constituído por muitas moléculas que estão envolvidas no processo de prevenção do estresse oxidativo e dos efeitos tóxicos, portanto, além de abranger um maior tempo de análise para analisar amostras de saúde ambiental, também necessita de amostras maiores (Birben *et al.* 2012).

Assim, de modo geral, os dados de biomarcadores em organismos de Igarapé demonstraram similaridade nos níveis de estresse oxidativo entre os pontos sob influência das atividades industriais e os pontos controle, sugerindo que não há efeitos significativos do ponto de vista biológico, em baixos níveis de organização. E nos pontos onde houveram diferenças está relacionado, além da sazonalidade, condiz com o fato da área de estudo estar sob múltiplas influências antropogênicas por um vasto período de tempo, caracterizando uma exposição crônica aos derivados das ações antrópicas. Desta forma, é provável que os organismos residentes tenham desenvolvido estratégias adaptativas para a sobrevivência no local.

No Brasil, respostas biológicas de organismos aquáticos são frequentemente relatadas, incluindo alterações de atividades enzimáticas (Carvalho Neta *et al.* 2017, Carvalho Neta *et al.* 2019, Oliveira *et al.* 2019, Jesus *et al.* 2020, Pinheiro-Sousa *et al.* 2020), alterações histológicas e/ou morfológicas em diversos tecidos como brânquias, fígado e músculos Pinheiro-Sousa *et al.* 2013, Jerome *et al.* 2017, Castro *et al.* 2018, Oliveira *et al.* 2019), e mudanças comportamentais (Carvalho Neta *et al.* 2012). Este tipo de análise mostra padrões mais sutis do que aqueles traçados pela análise de metais, observando-se maiores demandas metabólicas durante a estação chuvosa, que estão intimamente relacionadas a mudanças fisiológicas que toxicidade.

Carvalho-Neta & Abreu-Silva (2010); Carvalho-Neta *et al.* (2012); Sousa *et al.* (2013); Carvalho Neta *et al.* (2019) identificaram alterações biológicas significativas (comportamentais, histológicas e enzimáticas) em peixes e crustáceos em ambientes aquáticos com influência antrópica. Isso só ressalta a necessidade de usar ferramentas como biomarcadores em procedimentos de biomonitoramento, evidenciando diferentes

panoramas de compartimentos biológicos e descrevendo a história adaptativa de espécies residentes.

## 6 CONCLUSÃO

Este estudo foi pioneiro na região, no que tange, uma avaliação ecotoxicológica envolvendo três abordagens altamente interligadas: avaliação da contaminação do meio abiótico (água e sedimento), avaliação da contaminação de representantes do componente biótico do ecossistema (invertebrados, animais e plantas) e efeitos adversos primários (através da avaliação de biomarcadores bioquímicos). Este tipo de avaliação ecotoxicológica integrada possibilita um diagnóstico mais completo, levando em consideração níveis importantes da complexidade dos ecossistemas.

Com base nos resultados obtidos, verificou-se, de maneira geral, que os metais em compartimentos abióticos estão distribuídos de forma semelhante em todos os pontos de pesquisa. Além disso, suas concentrações nesses compartimentos denotam variações sazonais, que respondem de maneira similar em todos os pontos. É válido salientar que em pelo menos uma campanha de coleta, a concentração de alumínio dissolvido foi superior ao nível especificado na Resolução (CONAMA 357/2005) em todos os pontos.

Os dados de todos os pontos, em conjunto, indicam que as concentrações de metais e suas variações sazonais têm origem natural maior do que a influência antrópica, uma vez que, normalmente os pontos de controle não se diferenciaram dos pontos de maior influência antrópica. Os resultados encontrados nos compartimentos abióticos são corroborados pelos resultados encontrados nos organismos. No geral, a concentração de metais tóxicos nos tecidos dos organismos do estudo foi baixa, o que refletiu nas poucas alterações em nível molecular.

Portanto, com base nos resultados aqui descritos, são necessários estudos para estabelecer *baselines* ambientais que considerem as características químicas e físicas locais e o nível de sensibilidade / tolerância dos organismos residentes. Esses estudos fornecerão bases para o estabelecimento de restrições legais aplicáveis que sejam compatíveis com as realidades ambientais locais.

Os resultados dos biomarcadores confirmaram o histórico das espécies nativas se adaptando às condições únicas de concentração de alumínio e outros metais típicos da região amazônica. Além de enfatizar a importância da sazonalidade, também característica da região para a dinâmica das respostas antioxidantes.

## REFERÊNCIAS

- Álvarez A., Saez J. M., Costa J. S. D., Colin V. L., Fuentes M., Cuozzo S. A., Benimeli C. S., Polti M. A., Amoroso M. J. 2017. Actinobacteria: current research and perspectives for bioremediation of pesticides and heavy metals. *Chemosphere*, **166**: 41-62.
- Amiard-Triquet C. 2011. Pollution tolerance: from fundamental biological mechanisms to ecological consequences. In: Amiard-Triquet C. & Rainbow P.S., Roméo M. (eds.). *Tolerance to environmental contaminants*. [S.l.], CRC Press; Taylor & Francis Group. 433 p.
- Amiard-Triquet C., Cossu-Leguille C., Mouneyrac C. 2013. Biomarkers of defense, tolerance and ecological consequences. In: Amiard-Triquet C., Amiard J.C. & Rainbow, P.S. (eds.). *Ecological biomarkers*. CRC Press; Taylor & Francis Group, 450p.
- Amorim L. C. A. 2003. Os biomarcadores e sua aplicação na avaliação da exposição aos agentes químicos ambientais. *Rev. Bras. Epidemiol*, **6**: 158 – 170.
- Arantes C.C., Winemiller K.O., Petrere M., Castello L., Hess L.L., Freitas C.E.C. 2018. Relationships between forest cover and fish diversity in the Amazon River floodplain. *J. Appl. Ecol.* **55**: 386–395.
- Armah F.A. 2014. Relationship between coliform bacteria and water chemistry in groundwater within gold mining environments in Ghana. *Water Qual. Exposure Health*. **5**: 183 – 195.
- Belluta I., Tofoli L. A., Corrêa L. C., Carvalho L.R., Silva A. M. M. 2008. Impactos provocados por metais potencialmente tóxicos dissolvidos em água e me sedimentos no córrego do Cintra-Botucatu-SP. *Salusvita*, **27** (2): 99–118.
- Bordean D. M. *et al.* 2014. Soil manganese enrichment from industrial inputs: a gastropod perspective. *PLoS One*, São Francisco, Reino Unido, **9** (1): 1–8.
- Bradl H. 2005. *Heavy metals in the environment: origin, interaction and remediation: origin, interaction and remediation*. Amsterdam, Academic Press.
- Brasil. 2004. *Plano Amazônia sustentável*. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/noticia.asp?id=63&cod=BUSCA>. Acesso em: 13 fev. 2021.
- Brigham M.E., Went D.A., Aiken G.R., Krabbenhoft D. P. 2009. Mercury cycling in stream ecosystems. 1. Water column chemistry and transport. *Environ. Sci. Technol*, **43**: 2720-2725.
- Burger J. & Gochfeld M. 2011. Mercury and selenium levels in 19 species of saltwater fish from New Jersey as a function of species, size, and season. *Sci. Total Environ*, **8**: 1418-1429.
- Buss D. F., Baptista D. F., Nessimian, J. L. 2003 Bases conceituais para a aplicação de biomonitoramento em programas de avaliação da qualidade da água de rios. *Cadernos de Saúde Pública*, **19**: 465-473.

- Carmo C. A., Abessa D. M. S., Machado Neto J. G. 2011. Metais em águas, sedimentos e peixes coletados no estuário de São Vicente-SP, Brasil. *O Mundo da Saúde*, **35**(1): 64-70.
- Carvalho-Neta R. N. F., Torres A. R., Abreu-Silva, A.L. 2012. Biomarkers in Catfish *Sciades herzbergii* (Teleostei: Ariidae) from polluted and non polluted areas (São Marcos' Bay, Northeastern Brazil). *Appl. Biochem. Biotechnol.* **166**: 1-12.
- Carvalho Neta R. N. F., Andrade T. S. O. M., Oliveira S. R. S., Torres Junior A. R., Cardoso W. S., Santos D. M. S., Batista W. S., Serra I. M. R. S., Brito N. M. 2019. Biochemical and morphological responses in *Ucides cordatus* (Crustacea, Decapoda) as indicators of contamination status in mangroves and port areas from northern Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**: 15884–15893.
- Chasin A. A. M. & Azevedo F. A. 2003. Intoxicação e avaliação da toxicidade. In: Azevedo F.A. & Chasin A. A. M. *As bases toxicológicas da ecotoxicologia*, RIMA. São Carlos, 322p.
- Coffin M. R. S., Courtenay S. C., Pater C. C., Van Den Heuvel M. R. 2018. An empirical model using dissolved oxygen as an indicator for eutrophication at a regional scale. *Marine Pollution Bulletin*, **33**: 261–270.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental- CETESB. 2012. *Crômio e seus compostos*: ficha de informação toxicológica. São Paulo. Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wpcontent/uploads/sites/24/2013/11/Cromio.pdf>. Acesso em 05 abr. 2021.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. 2005. *Resolução nº 357*, de 17 de Março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA; “Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais”; publicada no Diário Oficial da União em 18/03/2005; Brasília, DF. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em 19 de mar. 2021.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. 2012. *Resolução nº 454*, de 01 de Novembro de 2012, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA; “Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional”. Brasília, DF. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em 19 de mar. 2021.
- Coppo G. C. *et al.* 2018. Genotoxic, biochemical and bioconcentration effects of manganese on *Oreochromis niloticus* (Cichlidae). *Ecotoxicology*, **27** (8): 1150-1160.
- Coscione A.R. & Berton, R.S. 2009. Barium extraction potencial by mustard, sunflower and castor bean. *Sci. Agric*, **66**: 59-63.

- Cremona F., Planas D., Lucotte M. 2008. Assessing the importance of macroinvertebrate trophic dead ends in the lower transfer of methylmercury in littoral food webs. *Aquatic Science*, **65**: 2043–2052.
- Cunico A. M., Allan J. D., Agostinho A. A. 2011 Functional convergence of fish assemblages in urban streams of Brazil and the United States. *Ecological Indicators*. **11**: 1354- 1359.
- Devesa-Rey R., Díaz-Fierros F., Barral M. T. 2010. Trace metals in river bed sediments: an assessment of their partitioning and bioavailability by using multivariate exploratory analysis. *Journal of Environmental Management*.. **9**(12): 2471-2477.
- Duan D., Ran Y., Cheng H., Chen J., Wan G. 2014. Contamination trends of trace metals and coupling with algal productivity in sediment cores in Pearl River delta, south China. *Chemosphere*.. **103**: 35–43.
- Espírito-Santo H. M. V. & Zuanon J. 2016. Temporary pools provide stability to fish assemblages in Amazon head water streams. *Ecology of Freshwater Fish*. *Ecology of Freshwater Fish.*, **26**: 475-483.
- Birben E., Sahiner U. M., Sackesen, C., Erzurum S., Kalayci O. 2012 Oxidative stress and antioxidant defense. *World Allergy Organ J.*, **9**: 9–12.
- Esteves F. A. 2011. *Fundamentos de limnologia*. 3. ed. Rio de Janeiro, Interciência. 826 p.
- Faria T. C., Guimarães K. L. A., Rodrigues L. R. R., Oliveira C., Lima F. C.T. 2021. A new *Hyphessobrycon* (Characiformes: Characidae) of the *Hyphessobrycon heterorhabdus* species-group from the lower Amazon basin, Brazil. *Neotropical Ichthyology*, **19**: 1-18.
- Ferreira D. L. N., Silva C. N., Lopes L. H. 2011. Sensoriamento remoto e análise multitemporal da ocupação humana e do uso do solo no município de Barcarena-PA (2000-2009). In: Nahum J. S. (org). *Dinâmicas territoriais e políticas no município de Barcarena no Estado do Pará*. Belém, Açaí, p. 105-125.
- Fittkau E. J. 1964. Remarkson Limnology of Central Amazon Rain-forest Stream. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **15**: 1092-1096.
- Furch K. & Junk W.J. 1997. The physical and chemical properties of Amazonian waters and their relationships with the Biota. In: Prance G.T. & Lovejoy T.E. (eds.) *Key environments Amazonia*. Oxford, New York, Toronto, Sydney, Frankfurt, Pergamon Press, p. 3-17.
- Hartnoll R.G. 1988. Growth and molting. In: Burggren W.W. & McMahon B.R. (eds.). *Biology of the land crabs*. Cambridge, Cambridge University Press, p. 186-210.
- He Z. L., Alva A. K., Calvert D. V., Banks D. J. 2000. Effects of leaching solution properties and volume on transport of metals and cations from a Riviera fine sand. *Journal Environmental Science Health*, **35**: 981–998.

Hermes-Lima M., Willmore W. G., Storey K. B. 1995. Quantification of the lipid peroxidation in tissue extracts based on Fe (III) xylenol orange complex formation. *Free Radical Biology & Medicine*, **19**: 271-280.

Hinck J. E., Blazer V. S., Denslow N. D., Echols K. R., Gale R. W., Wieser C., May T. W., Ellersieck M., Coyle J. J., Tillitt D. E. 2008. Chemical contaminants, health indicators, and reproductive biomarker responses in fish from rivers in the Southeastern United States. *Science of the Total Environment*, **390**: 538-557.

Hosseini M., Mohammad S., Nabavi B., Arsa, Y. 2013. Bioaccumulation of trace mercury in trophic levels of benthic, benthopelagic, pelagic fish species, and sea birds from Arvand river, Iran. *Biological Trace Element Research*, **156**: 175-180.

Jesus H. C., Costa E. A., Mendonça A. S. F., Zanonade E. 2004. Distribuição de metais pesados em sedimentos do sistema estuarino da Ilha de Vitória-ES. *Química Nova*, **27**: 378-385.

Jimenez B. D. & Stegeman J. J. 1990. Detoxication enzymes as indicators of environmental stress on fish. *American Fisheries Society Symposium*, **8**: 67-79.

Joseph D. L. & Newman D. A. 2010. Emotional intelligence: an integrative meta-analysis and cascading model. *Journal of Applied Psychology*. **95**:54 -78.

Karbassi A., Bidhendi G., Pejman A. Bidhendi M. E. 2010. Environmental impacts of desalination on the ecology of Lake Urmia. *Journal of Great Lakes Research*. **36**: 419-424.

Leal C. G. & Leitão R. P. 2016. Pequenos gigantes (Igarapés amazônicos em paisagens antropizadas). *Policy Brief. Rede Amazônia Sustentável*, **1**: 1- 3.

Lima C. M. 2008. *Ocorrência de barita no grupo barreiras - litoral norte do estado da Bahia*. Monografia, Universidade Federal da Bahia Instituto de Geociências, Salvador, 67 p.

Lima D. R. & Mota J. A. 2009. A produção do alumínio primário na Amazônia e os desafios da sustentabilidade ambiental. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental*, (02): 65-70, jul.

Lima W. N. & Kobayashi C. N. 1988. Sobre o quimismo predominante nas águas do sistema flúvio-estuarino de Barcarena, Pa, *Geochimica Brasiliensis*, **2**: 53-71.

Luvizotto-Santos R., Lee J. T., Branco Z. P., Bianchini A., Nery L. E. M. 2003. Lipids as energy source during salinity acclimation in the euryhaline crab *Chasmagnathus granulata* Dana, 1851 (Crustacea-Grapsidae). *Journal of Experimental Zoology*, **295A**: 200 - 205.

Mao Q., Huang G., Ma K., Sun, Z. 2014. Variations of soil lead in different land uses along the urbanization gradient in the Beijing metropolitan area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **11**: 3199-3214.

- Meneses T. S. 2008. *Fauna, pesca e contaminação por metais pesados em pescado no litoral de Sergipe*. Dissertation, Mestrado em Saúde e Ambiente, Universidade Tiradentes, Aracaju, 115 f.
- Monserrat J. M., Geracitano L. A., Pinho G. L. L., Vinagre T. M., Faleiros, M., Alciati J. C., Bianchini A. 2003. Determination of lipid peroxides in invertebrates tissues using the Fe (III) xylenol orange complex formation. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **45**: 177-183.
- Monserrat J.M., Martínez P.E., Geracitano L.A., Amado L.L., Martins C.M.G., Pinho G.L.L., Chaves I.S., Ferreira-Cravo M., Ventura-Lima J., Bianchini A. 2007. Pollution biomarkers in estuarine animals: critical review and new perspective. *Comp. Biochem. Physiol*, **146**: 221–234.
- Nascimento B. L. M. *et al.* 2015. Comportamento e avaliação de metais potencialmente tóxicos Cu (II), Cr (III), Pb (II) e Fe (III) em águas superficiais dos Riachos Capivara e Bacuri Imperatriz-MA, Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro. **20**: 369-378.
- Ortega P., Custodio M. R., Zanotto F. P. 2017. Characterization of cadmium transport in hepatopancreatic cells of a mangrove crab *Ucides cordatus*: the role of calcium. *Aquat. Toxicol*, **188**: 92-99.
- Pinheiro M. A. A., Silva P. P. G., Duarte L. F. A., Almeida A.A., Zanotto F.P. 2012. Accumulation of six metals in the mangrove *Rhizophora mangle* (Angiosperma: Rhizophoraceae). *Ecotoxicol. Environ. Saf*, **81**: 114-121.
- Oliveira D. C. 2013. *Distribuição de metais pesados e isótopos de pb em sedimentos de fundo do rio Murucupi Barcarena-Pa*. Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 79 f.
- Olmedo P., Pla A., Hernandez A. F., Barbier F., Ayouni L., Gil, F. 2013. Determination of toxic elements (mercury, cadmium, lead, tin and arsenic) in fish and shellfish samples. Risk assessment for the consumers. *Environment International*, **59**: 63-72.
- Pereira C. D. S. *et al.* 2014. Ecological relevance of sentinels biomarker responses: a multi-level approach. *Mar. Environ. Res*, **96**: 118–126.
- Peakall D. & Burger J. 2003. Methodologies for assessing exposure to metals: speciation, bioavailability of metals and ecological host factors. *Ecotoxicology and Environmental safety*, **56**: 110-121.
- Pereira S. F., Lima M. A., Freitas K. H., Mescouto C. S., Saraiva A. F. 2014. Estudo químico ambiental do rio Murucupi – Barcarena, PA, Brasil, área impactada pela produção de alumínio. *Ambi-Agua*, Taubaté, **2**: 62-82.

- Piassão J. F. G. *et al.* 2019. Análise da Bioacumulação de Metais e Biomarcadores de Estresse Oxidativo em Crustáceos do gênero *Aegla* (Crustacea, Anomura). *Perspectiva*, **43**: 111-122.
- Piratoba A. R. A., Ribeiro H. M. C., Morales G. P. Gonçalves W. G. 2017. Caracterização de parâmetros de qualidade da água na área portuária de Barcarena, PA. *Revista Ambiente e Água*, **12**: 435-456.
- Queiroz M. T. A. 2006. *Bioacumulação de metais pesados no Rio Piracicaba, Minas Gerais, aplicando a análise por ativação Neutrônica Instrumental*. Dissertation, Mestrado em Engenharia Industrial, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, 71p.
- Raymond P. H., Lucu C., Onken H., Weihrauch D. 2012. Multiple functions of the crustacean gill: osmotic/ionic regulation, acid-base balance, ammonia excretion, and bioaccumulation of toxic metals. *Frontiers in Physiology*, **3**:1-33.
- Ribeiro A. M., Risso W. E., Fernandes M. N., Martinez C. B. 2014. Lead accumulation and its effects on the branchial physiology of *Prochilodus lineatus*. *Fish Physiology and Biochemistry*. **40**: p. 645-657.
- Romeiro S., Lagôa A. M. M. A., Furlani P. R., De Abreu C. A., Pereira, B. F. F. 2007. Absorção de chumbo e potencial de fitorremediação de *Canavalia Ensiformes*. *L. Bragantia*. **66**: 327-334.
- Rossetti D. F. 2001. Late cenozoic sedimentar evolution in northeastern Pará, Brasil, within the context of sea levels changes. *Journal of South American Earth Sciences*, **14**: 77-89.
- Reeves R.D., Schwartz C., Morel J. L., Edmondson J. Distribution and metal-accumulating behavior of *Thlaspi caerulescens* and associated metallophytes in France. 2001. *International Journal of Phytoremediation*, **3**:145–172.
- Sharma P. & Dubey R. S. 2005. Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of plant physiology*, **17**: 35-52.
- Silva M.B. 2010. *Análise dos níveis de metais potencialmente tóxicos e análise microbiológica nas águas da bacia do Educandos (Manaus - AM)*. Dissertation, Mestrado em Biotecnologia e Recursos Naturais, Universidade Estadual do Amazonas, UEA, Manaus, 58p.
- Silva J. & Fonseca M. B. 2003. Estudos Toxicológicos no Ambiente e na Saúde Humana. In: Silva J., Erdtmann B., Henriques J.A.P. (org.). *Genética toxicológica*. Porto Alegre, Alcance, p.70-84.
- Sousa D. B. P., Almeida Z. S., Carvalho-Neta R. N. F. 2013. Biomarcadores histológicos em duas espécies de bagre estuarinos da Costa Maranhense, Brasil. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec*, **65**: 369-376.

- Souza-Carvalho E. A. 2018. Sistemática e revisão taxonômica dos caranguejos de água doce do gênero *Trichodactylus* Latreille, 1828 (Decapoda: Trichodactylidae): uma abordagem molecular e morfológica. PhD Theses, Programa de Pós-Graduação em Ciências), Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 83p.
- Squadrone S., Prearo M., Brizio P., Gavinelli S., Pellegrino M., Scanzio T. Guarise S., Benedetto A., Abete M. C. 2013. Heavy metals distribution in muscle, liver, kidney and gill of European catfish (*Silurus glanis*) from Italian Rivers. *Chemosphere*. **2**: 358-365.
- Townsend J. M., Rimmek C. C, Driscoll C. T. C., Farland K. P. 2013 Mercury concentrations in tropical resident and migrant songbirds on Hispaniola. *Ecotoxicology*. **22**: 50-59.
- Vieira S., Forzza R. C., Wanderley M. G. L. 2012. Marantaceae. In: Wanderley M. G. L., Shepherd G. J., Melhem T. S. Giullietti A.M., Martins, S. E. (org.). *Flora fanerogâmica do Estado de São Paulo*. 1ed. São Paulo: Fapesp. p. 7-380.
- Wepener V. 2008. Application of active biomonitoring within an integrated water resources management framework in South Africa. *South Africa Journal of Science*. **104**: 9-10.
- Wuana R.A. & Okieimen F. E. 2011. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *ISRN Ecology*, **166**: 1-20.
- Ye H., Zang S., Xiao H., Zhang L. 2015. Speciation and ecological risk of heavy metals and metalloid in the sediments of Zhalong Wetland in China International. *Journal Environment. Science Technology*, **12**: 115-124.
- Zar J. H. 1984. *Biostatistical analysis*. 2. ed. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 718 p.
- Zeng D., Zhu K., Pei X. 2014. of heavy metal circulation in biosphere. *Agric. Sci. Tech*, **15**: 642 – 647.
- Zhang G.S., Liu D.Y., Wu H.F., Chen L.L., Han Q.X. 2012. Heavy metal contamination in the marine organisms in Yantai coast, northern Yellow Sea of China. *Ecotoxicology*, **21**: 1726-1733.
- Zheng S. A., Zheng X. Q., Chen C. 2013. Transformation of metal speciation in purple soil as affected by waterlogging. *International Journal Environment Science Technology*, **10**: 351-35.