

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
CONSERVAÇÃO - PPGCIAC

DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA NO SEDIMENTO DE
UM LAGO AMAZÔNICO IMPACTADO POR REJEITO DE
BAUXITA (LAGO BATATA - PORTO TROMBETAS, PA) E
SUA IMPORTÂNCIA PARA O PROCESSO DE
RESTAURAÇÃO

Leonardo Nunes Penha

2015

DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA NO SEDIMENTO DE
UM LAGO AMAZÔNICO IMPACTADO POR REJEITO DE
BAUXITA (LAGO BATATA - PORTO TROMBETAS, PA) E
SUA IMPORTÂNCIA PARA O PROCESSO DE
RESTAURAÇÃO

Leonardo Nunes Penha

Dissertação de mestrado apresentada no programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Conservação.

Orientador: Dr. Francisco de Assis Esteves.

Co-orientador: Dr. Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Macaé (RJ)

Junho/2015

Penha, Leonardo Nunes

Dinâmica da matéria orgânica no sedimento de um lago amazônico impactado por rejeito de bauxita (lago Batata - Porto Trombetas, PA) e sua importância para o processo de restauração/ Leonardo Nunes Penha. - Rio de Janeiro: UFRJ/ NUPEM, 2015.

Xii, 70f.: 29,7 cm.

Orientador: Dr. Francisco de Assis Esteves

Co-orientador Dr. Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Dissertação (Mestrado) - UFRJ/ NUPEM/ Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação, 2015.

Referências Bibliográficas: f. 56-62.

1. Restauração de ecossistemas aquáticos. 2. Lagos amazônicos. 3. Matéria orgânica no sedimento. 4. Impacto por rejeito de bauxita. 5. *Oryza glumaepatula*. I. Esteves, Francisco de Assis. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Núcleo de Pesquisas e Desenvolvimento Sócio Ambiental de Macaé, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação. III. Título

DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA NO SEDIMENTO DE UM LAGO
AMAZÔNICO IMPACTADO POR REJEITO DE BAUXITA (LAGO BATATA -
PORTO TROMBETAS, PA) E SUA IMPORTÂNCIA PARA O PROCESSO DE
RESTAURAÇÃO

Leonardo Nunes Penha

Orientador: Dr. Francisco de Assis Esteves.

Co-orientador: Dr. Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Dissertação de mestrado submetida ao programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Conservação.

Aprovada por:

Presidente, Dr. Francisco de Assis Esteves (NUPEM - UFRJ)

Dr. Bias Marçal de Farias (CEMPES - PETROBRÁS)

Dr. Rodrigo Lemes Martins (NUPEM - UFRJ)

Macaé (RJ)

Junho/2015

AGRADECIMENTOS

AOS PROFESSORES FRANCISCO DE ASSIS ESTEVES E MARCOS PAULO FIQUEIREDO DE BARROS, PELA ORIENTAÇÃO, PELA CONFIANÇA, E POR TORNAR POSSÍVEL ESSE PROJETO EM TODOS OS ASPECTOS. AGRADEÇO POR ME POSSIBILITAREM CONTATO COM UM EXCELENTE LABORATÓRIO DE LIMNOLOGIA.

AOS DOUTORES FREDEIRICO MEIRELLES, VINICIUS FARJALA E ANA PETRY, PELAS VALIOSAS SUGESTÕES E REVISÕES EM DIVERSOS MOMENTOS DURANTE O DESENVOLVIMENTO DESTA PROJETO DE PESQUISA.

AGRADEÇO À FUNDAÇÃO CAPES, POR FINANCIAR ESTA DISSERTAÇÃO ATRAVÉS DA CONCESSÃO DE BOLSA DE ESTUDO E À MINERAÇÃO RIO DO NORTE (MRN), PELO APOIO LOGÍSTICO NAS COLETAS NO LAÇO BATATA.

AO PROFESSOR ALBERT SUHETT, PELA PACIÊNCIA E PELAS VALIOSAS SUGESTÕES PARA O TEXTO DA DISSERTAÇÃO DURANTE A PRÉ-BANCA.

AOS DOUTORES BIAS MAÇAL DE FARIAS E RODRIGO LEMES PELA PARTICIPAÇÃO E SUGESTÕES CONCEDIDAS NA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO.

AGRADEÇO AOS COLEGAS DE TRABALHO, THIAGO MARTINS, THIAGO BENEVIDES, MARIANNA HUÇET, ROBERTO GAÚCHO, MARIA SILVINA, RODRIGO FELIX (DE TEMPOS), FABRICIO GONÇALVES, ORLANDO, BRUNO CARIJÓ, BRUNO FORTE, ANDERSSON GRIPP, IZABELA, RAFAELA ERASMI, RAYANNE, QUILHERME ALFENAS, JOÃO MARCELO E MUITOS OUTROS, PELOS BONS MOMENTOS DE DESCONTRAÇÃO E DE DISCUSSÃO CIENTÍFICA.

AGRADEÇO TAMBÉM AOS AOS ESTAGIÁRIOS LUAN, JERSICA, JOÃO GABRIEL E JULINE PELA AJUDA IMPRESCINDÍVEL NAS ANÁLISES DE LABORATÓRIO.

A TODA MINHA FAMÍLIA, AO MEU PAI MARCO, A MINHA MÃE ANA LÚCIA, E IRMÃO DEDÉ, PELA AJUDA EM TODOS OS MOMENTOS, POR ESTAREM SEMPRE AO MEU LADO, ME APOIANDO E ME DANDO A FORÇA NECESSÁRIA. A MINHA NAMORADA LINDA ROSIANE, PELO AMOR E COMPREENSÃO.

EM FIM, A TODOS QUE COLABORARAM PARA A FINALIZAÇÃO DESSE TRABALHO.

RESUMO

DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA NO SEDIMENTO DE UM LAGO AMAZÔNICO IMPACTADO POR REJEITO DE BAUXITA (LAGO BATATA - PORTO TROMBETAS, PA) E SUA IMPORTÂNCIA PARA O PROCESSO DE RESTAURAÇÃO

Leonardo Nunes Penha

Orientador: Dr. Francisco de Assis Esteves.

Co-orientador: Dr. Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Resumo da Dissertação de mestrado submetida ao programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Conservação.

Em Oriximiná, no estado do Pará, a exploração de bauxita resultou no descarte de cerca de 24 milhões toneladas de rejeito mineral no lago Batata, entre os anos de 1979 e 1989, atingindo os compartimentos bentônico e pelágico, e assoreando áreas de vegetação marginal (igapó). Como consequência da deposição do rejeito da bauxita sobre o sedimento do lago, a disponibilidade de nutrientes e energia nesse compartimento foi reduzida drasticamente afetando também o compartimento pelágico devido à resuspensão do sedimento. Após medidas de mitigação aplicadas iniciou-se então o processo de restauração passiva do sistema (resiliência), junto com a formação de uma camada de matéria orgânica sobre a camada de rejeito de bauxita e redução da presença de rejeito na coluna d'água ao longo dos anos. Utilizando a concentração de matéria orgânica no sedimento (MOS) como indicador de qualidade ambiental no compartimento bentônico, o presente estudo tem como principais objetivos: (I) Avaliar a influência do pulso de inundação no processo de restauração natural do compartimento bentônico do lago Batata, entre os anos de 1989 e 2013, mediante o cálculo de tendências temporais de MOS ao longo dos anos (II) Testar o papel da MOS como fator responsável pela redução da concentração de sólidos totais em suspensão na coluna d'água (STS), através da comparação de séries de MOS, STS e profundidade do lago Batata, pelo método de correlação cruzada. (III) Investigar o papel do arroz bravo (*Oryza glumeapatula*) na restauração das áreas impactadas pelo rejeito, através da avaliação da distribuição vertical da MOS ao longo de testemunhos do sedimento, tomando como referência regiões menos impactadas à jusante do lago. O acréscimo da concentração de MOS ocorre principalmente durante as fases enchente/águas altas do pulso de inundação, através do processo de carreamento do material orgânico advindo

do igapó, macrófitas, e vegetação terrestre. A fase de enchente ainda se destaca como o período de maior MOS, por conta do aporte via escoamento pluviométrico e estágio de decomposição menos avançado da carga de MO recentemente depositada. Também foi constatado que as variações interanuais do pulso de inundação influenciaram no processo de restauração do sedimento. Nos anos de cheias extremas, ocorre um maior aporte de material alóctone, que por sua vez, é incorporado ao sedimento cerca de um ano depois. Não foi encontrada evidência para suportar a hipótese de que a camada orgânica é responsável pela redução da resuspensão do sedimento, pois não houve correlação entre o acréscimo de MOS e a redução do STS ao longo dos anos. Provavelmente a recuperação da transparência do lago se deve à compactação do rejeito, independentemente do teor orgânico. Por último, o trabalho demonstrou a contribuição dos estandes de arroz bravo (*Oryza glumaepatula*) para o aumento da MO das camadas superficiais do sedimento (até 6 cm de profundidade). No entanto, a distribuição vertical não entre áreas impactadas com e sem arroz não se diferenciou estatisticamente, mas a taxa de ganho de MOS por centímetro de camada formada tende a ser maior com a colonização do arroz. Os resultados dessa pesquisa destacaram a importância de mecanismos intranuais e interanuais de deposição da MOS, ambos governados pelo pulso de inundação. A contribuição dos estandes de arroz bravo (*Oryza glumaepatula*) também foi importante na restauração do compartimento bentônico em termos de MOS, frente ao impacto mineral por rejeito de bauxita.

Palavras-chave: Restauração de ecossistemas aquáticos, lagos amazônicos, matéria orgânica no sedimento, impacto por rejeito de bauxita, *Oryza glumaepatula*.

Macaé (RJ)

Junho/2015

ABSTRACT

DYNAMICS OF SEDIMENT ORGANIC MATTER IN AN AMAZONIAN LAKE IMPACTED BY BAUXITE TAILINGS (LAGO BATATA - PORTO TROMBETAS, PA), AND IT'S IMPLICATIONS FOR THE RESTORATION PROCESS

Leonardo Nunes Penha

Orientador: Dr. Francisco de Assis Esteves.

Co-orientador: Dr. Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Abstract da Dissertação de mestrado submetida ao programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Conservação.

In Oriximiná (PA), bauxite mining resulted in the disposal of about 24 million tons of mineral waste in the Lake Batata, between the years 1979 and 1989, reaching the benthic and pelagic compartments and silting areas of marginal vegetation (igapó). As a result of the deposition, the availability of nutrients and energy in this compartment was reduced drastically, also affecting the pelagic compartment through sediment resuspension. After mitigation procedures the passive restoration process began (resilience), and then a layer of organic material was observed above the layer of bauxite tailing, along with reduction of the presence of tailings in the water column over years. Using the concentration of organic matter in the sediment (SOM) as an environmental quality index, this study's main objectives are: (I) To assess the influence of the flood pulse in the natural restoration process of the benthic compartment, between the years 1989 and 2013 through the calculation of SOM time trends (II) Test the role of SOM as a factor responsible for reducing the concentration of suspended material in the water column (SM), through time series comparison (cross-correlation method) of three variables: SOM, SM and depth of the Lake Batata (III) To investigate the role of wild rice (*Oryza glumeapatula*) in the restoration of the impacted area, through the evaluation of SOM vertical distribution along sediment cores, using as reference less-impacted regions. The increase of SOM concentration occurs primarily during flood/high waters stages of the flood pulse, through the input of organic material from the flooded forest, macrophytes and terrestrial vegetation. The flood stage still stands out as the greatest SOM concentration period, due to the input via pluviometric flow plus the less advanced decomposition stage of the recently deposited OM charge. It was also found that interannual variations of the flood pulse influence indirectly in the sediment restoration process. In the years of extreme floods, there is a greater catchment of allochthonous organic material, which is incorporated into the sediment about a year later. There was no evidence to support the hypothesis that the organic layer is responsible for the reduction in SM, as there was no correlation between these two variables. Probably the recovery of transparency of the lake over years occurred due to other processes regardless the organic content, as physical compression of the waste. Finally, this study demonstrated the contribution of stands of wild rice (*Oryza*

glumaepatula) to the increasing of the OM to the surface layers of sediment (up to 6 cm deep). In the other hand, the vertical distributions in the impacted areas with and without rice were not statistically different. Comparatively, The SOM gain rate per centimeter of layer formed was up to 3 times higher in some rice stations. The results of this research highlighted the importance of intrannual and interannual mechanisms of deposition of SOM, both governed by the flood pulse. The contribution of stands of wild rice (*Oryza glumaepatula*) was also important in the restoration of the benthic compartment in terms of superficial SOM, facing the impact of mineral bauxite tailings.

Key-words: Restoration of aquatic ecosystems, Amazonian lakes, sediment organic matter, impact by bauxite tailings, *Oryza glumaepatula*.

Macaé (RJ)

Junho/2015

LISTA DE ABREVIACÕES

Variáveis ambientais

MOS	Porcentagem de matéria orgânica no sedimento (peso seco)
STS	Concentração de sólidos totais em suspensão
CT séston	Porcentagem de carbono total no séston (em suspensão)
MOP	Matéria orgânica particulada
MOPG	Matéria orgânica particulada grossa
MOPF	Matéria orgânica particulada fina

Estações de coleta

REF1; REF2	Estações de referência
IMP1; IMP2; IMP3	Estações impactadas pelo rejeito de bauxita
IMP4; IMP5	
ARR1; ARR2	Estações impactadas pelo rejeito de bauxita e colonizadas por estandes de arroz bravo (<i>Oryza glumaepatula</i>).

Fases do pulso de inundação

E	Enchente - período de enchimento do lago
AA	Águas altas - período de profundidade máxima
V	Vazante - período de esvaziamento do lago
AB	Águas baixas - período de profundidade mínima

Estatística

FCC	Função correlação cruzada
------------	---------------------------

SUMÁRIO:

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 A indústria do alumínio paraense e os impactos da mineração de bauxita sobre os ecossistemas aquáticos amazônicos	1
1.2 A restauração ecológica em ecossistemas aquáticos impactados por rejeito de bauxita	5
1.3 A dinâmica da matéria orgânica particulada em ecossistemas aquáticos amazônicos influenciados pelo pulso de inundação	7
1.4 Contextualização da pesquisa - histórico de pesquisas no Lago Batata	9
2. OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo principal	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. HIPÓTESES	13
4. MATERIAL E MÉTODOS	14
4.1 Área de estudo	14
4.2 Base de dados históricos - Matéria orgânica do sedimento, sólidos totais em suspensão e profundidade do lago Batata	19
4.2.1 Monitoramento da matéria orgânica na superfície do sedimento	20
4.2.2 Monitoramento dos sólidos totais em suspensão	21
4.3 Análise de séries temporais	23
4.4 A influência do pulso de inundação no processo de restauração da matéria orgânica no sedimento	24
4.4.1 Metodologia para análise de tendência temporal	24
4.4.2 Avaliação da dinâmica de sólidos totais em suspensão	26
4.5 A influência da camada de matéria orgânica no sedimento sobre a redução dos sólidos totais em suspensão	27

4.5.1 Metodologia para comparação de séries temporais	27
4.6 A distribuição vertical da matéria orgânica no sedimento	29
4.6.1 Amostragem para avaliação da matéria orgânica em testemunhos do sedimento	29
4.6.2 Comparação entre curvas de acumulação	30
5. RESULTADOS	31
5.1 Análise de tendência das séries temporais de MOS (1989-2013) e avaliação do séston (2013), nas quatro fases do pulso de inundação.	31
5.2 Correlação cruzada entre séries temporais de matéria orgânica no sedimento (MOS), sólidos totais em suspensão (STS) e profundidade do lago Batata (1989-2013).	37
5.3 Percentual de matéria orgânica ao longo do perfil vertical do sedimento.	40
6. DISCUSSÃO	46
6.1 A tendência temporal (1989 - 2013) dos teores matéria orgânica no sedimento em áreas impactadas e de referência do lago Batata, e a influência do pulso de inundação no processo de restauração	46
6.2 A associação interanual entre o aporte de material alóctone e a variação da matéria orgânica do sedimento na área impactada	50
6.3 A distribuição vertical dos teores de matéria orgânica do sedimento	53
7. CONCLUSÕES	55
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
9. ANEXOS	63

1. INTRODUÇÃO

1.1 A indústria do alumínio paraense e os impactos da mineração de bauxita sobre os ecossistemas aquáticos amazônicos

O minério de bauxita é um recurso não renovável utilizado como principal matéria prima na fabricação do alumínio metálico, que por sua vez, é importante em diversas atividades econômicas como nas indústrias metalúrgica, aeronáutica, farmacêutica e alimentar (BNDES, 2010). As condições ideais para a formação desse minério são encontradas em solos de clima tropical a subtropical, tais como o da floresta Amazônica, onde o alto grau de intemperismo e lixiviação eliminam as impurezas presentes no corpo do mineral (silicatos e argilominerais), à medida que concentram o elemento alumínio (Al) na forma de gibsitita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e bohemita ($\text{AlO}(\text{OH})$) em maior proporção (USGS, 2014).

Nesse contexto, o Brasil possui a terceira maior reserva do planeta e é atualmente o terceiro maior produtor de bauxita do mundo (USGS, 2014). Em 2013 sua produção foi estimada em 32,8 milhões de toneladas, uma contribuição de 12,7% para a produção mundial ficando atrás somente da Austrália (29,9%) e da China (18,2%) (DNPM, 2013). Os maiores produtores nacionais estão localizados no estado do Pará, onde três grandes empresas (ALCOA, MRN e Hydro) são responsáveis por mais de 90% da mineração de bauxita brasileira (DNPM, 2012).

A cadeia produtiva do minério de alumínio, que engloba a extração de bauxita e a produção de alumina e alumínio, abrange três regiões diferentes do Pará (SILVA, 2007). Na região do Sudeste paraense e do Baixo amazonas, estão concentradas as empresas especializadas na extração do minério, enquanto na região Metropolitana de Belém se concentram as indústrias de transformação (IBGE, 2013, XAFI, 2008). Recentemente a Votorantim Metais se instalou no município de Rondon do Pará (DEZEM, V. 2012), onde se espera que a empresa se destaque como a segunda maior refinaria de alumínio do mundo com início das atividades previstas para 2017 (DNPM 2013; AluminaRondon, 2015) (figura 1).



Figura 1: Localização dos polos de atividade das indústrias do alumínio no estado do Pará. Fonte: modificado de “Votorantim lança projeto de US\$ 3,3 bilhões no Pará” por Vanessa Dezem (2012). Acessível no sítio: <http://amazonia.org.br>.

A logística de exploração não difere muito entre as empresas atuantes no Pará. A ALCOA (*Aluminium Company of America*), a MRN (Mineração Rio do Norte), e a Hydro (Paragominas) seguem, de uma forma geral, as seguintes etapas de produção: (I) remoção da vegetação no local da extração (desmatamento) (II) retirada de camadas do solo (decapeamento) (III) extração do minério (IV) trituração e lavagem da bauxita para retirada de frações granulométricas mais finas (beneficiamento) e (V) revegetação da área mineirada (reabilitação). Apesar das diversas medidas de controle, ocorrem diversos impactos ambientais e sociais provenientes do manuseio da bauxita.

A porção de terra total voltada à exploração de minerais metálicos (incluindo a bauxita) perfaz 0,10% do território do Pará (IBGE, 2013), no entanto, os impactos ambientais causados no entorno dessas áreas podem alcançar grandes extensões geográficas, principalmente pelo aumento da erosão e lixiviação de solutos e pela emissão de rejeitos (PARROTTA, KNOWLES, 1999). Na Amazônia, poucos casos de poluição dos corpos d'água pela indústria do alumínio são reportados na literatura científica. O caso mais conhecido talvez seja a do lago Batata no município de Oriximiná, seguido pelo caso do município Juriti onde diversas nascentes foram suprimidas. Nesse último caso, os trabalhos acadêmicos focam em conflitos socioambientais envolvendo o uso da terra, trazendo poucos dados ecológicos sobre a natureza do impacto.

O desmatamento e a consequente exposição do solo resultam por si só, em diversos impactos ambientais aos ecossistemas terrestres e aquáticos, como a perda de biodiversidade, na qualidade da água e mudanças na intensidade das variações no regime hidrológico (FEARNSIDE, 2005). Na região amazônica, impactos da erosão podem ter consequências ainda mais intensas em períodos de maior pluviosidade, assim como ocorreu na implantação do projeto de mineração da ALCOA no município de Juriti em 2006. Nessa localidade, o desmatamento e os aterros feitos para a construção de uma ferrovia para o transporte de bauxita, provocaram severos danos às nascentes da microbacia do rio Água Boa (MARTURANO et alii, 2012) e da bacia do rio Aruã (WANDERLEI, 2008). Além disso, o aumento da erosão resultou no assoreamento de vários cursos d'água na região (CNEC, 2005) (figura 3 A).

Após as fases de desmatamento e extração, a indústria do beneficiamento da bauxita visa refinar o material à alumina por meio do processo Bayer (digestão com NaOH, clarificação, precipitação e calcinação) (HIND et alii, 1999 apud SILVA-FILHO et alii, 2007), gerando um rejeito mineral insolúvel, composto por partículas muito finas (argila) e pobre em matéria orgânica, denominado “lama vermelha”. A quantidade de rejeito gerado depende basicamente da origem da bauxita e das condições de extração (IAI, 2014). De acordo com Silva-Filho et alii (2007) as referências mais comuns na literatura consideram que uma refinaria típica gera entre 1 e 2 toneladas de rejeito de bauxita por tonelada de alumina produzida, entretanto, o referido autor ressalta a escassez de dados oficiais publicados sobre quantidade de rejeito gerado no Brasil e no mundo. Como a maior parte da produção brasileira está localizada no Pará, pode-se inferir, no melhor cenário, que das 10,5 milhões de toneladas de alumina produzidas anualmente no Brasil (DNPM 2013), uma mesma quantidade de rejeito é estocado em solo amazônico no mesmo período (figura 2).

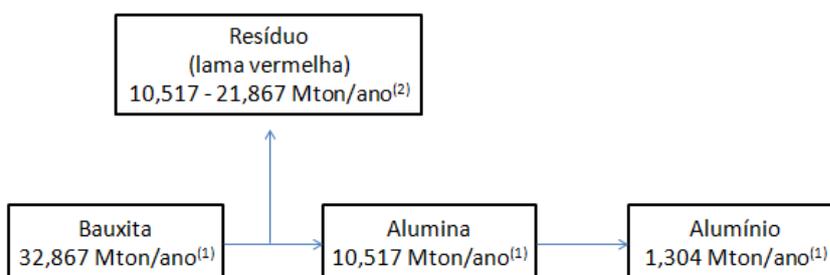


Figura 2: Balanço de massa da produção de alumínio brasileira (em milhões de toneladas) no ano de 2013. Departamento Nacional de Produção Mineral (2013)⁽¹⁾; Silva-filho *et al* (2007)⁽²⁾.

O impacto ambiental dependerá também da maneira com que a *lama vermelha* é transportada e disposta ao final do processo. O método conhecido como “*off-shore disposal*” consiste no lançamento do rejeito em um corpo hídrico receptor, rio ou oceano, gerando alterações consideráveis aos ecossistemas aquáticos, como foi o caso do Lago Batata, em Oriximiná entre os anos de 1979 e 1989. Segundo Panosso et alii. (1995) e Bozelli et alii. (2000) o lago Batata chegou a ter cerca de 30% de sua área total afetada pelo rejeito proveniente da lavagem da bauxita (sem adição de NaOH), atingindo os compartimentos bentônico e pelágico, além de assorear áreas de vegetação marginal (igapó) (figura 3 B). Ainda que tenha havido muitas melhorias por conta da restauração natural desse ecossistema, os impactos causados no lago Batata persistem até os dias de hoje. O método “*off-shore disposal*” foi praticamente abandonado, persistindo somente em países com pouco espaço para descarte de rejeito, como o Japão e a Itália (AGRAWAL et alii, 2004; HYUM et alii, 2005 apud SILVA-FILHO et alii, 2007).

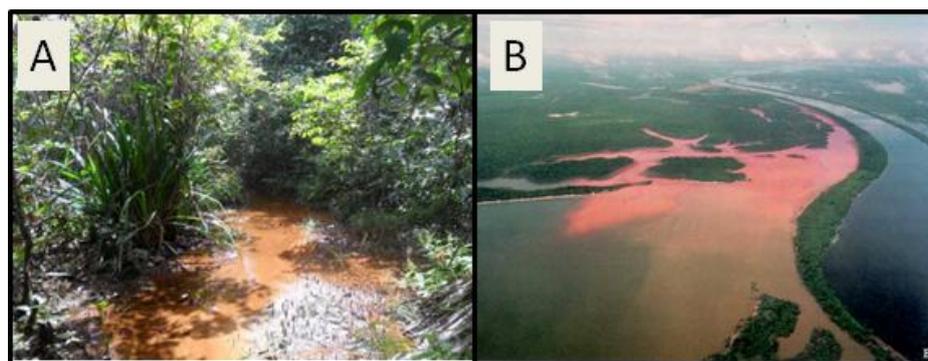


Figura 3. Casos famosos de poluição pela indústria do alumínio no estado do Pará. A -. Assoreamento do principal igarapé que abastece a comunidade de São Pedro, no município de Juriti. (Fonte: MARTURANO et alii, 2012) B - Despejo do rejeito de bauxita no lago Batata, no município de Oriximiná (Fonte: Mineração Rio do Norte - MRN).

Atualmente os métodos de disposição conhecidos como “*dry stacking*” são mais comumente aplicados. Eles consistem na secagem do rejeito em tanques ou diques construídos no local já minerado antes do replantio, permitindo assim um melhor manuseio, maior segurança, geração de um menor volume de lama, menor área ocupada e reabilitação mais fácil da área já lavrada (SILVA-FILHO et alii, 2007).

Tendo em vista a considerável quantidade de rejeito produzida e disposta em solo amazônico, e os riscos de contaminação das águas naturais durante seu manuseio (ex: extravazamento de lama vermelha, rompimento de diques, etc), o desenvolvimento

de técnicas de restauração de ambientes aquáticos, assim como o entendimento dos processos ecológicos em rios e lagos impactados por esse tipo de atividade, têm papel fundamental na conversão de ecossistemas degradados em ambientes sustentáveis.

1.2 A restauração ecológica em ecossistemas aquáticos impactados por rejeito de bauxita

Apesar dos vários benefícios que os ecossistemas aquáticos proporcionam ao homem, também é grande o número de fatores antrópicos que levam a degradação desses ambientes. O acelerado desenvolvimento das atividades humanas e da demanda por recursos naturais (urbanização, atividades industriais, uso da terra para agricultura, etc.) vem alterando e comprometendo o funcionamento dos ecossistemas aquáticos. As atividades industriais e de mineração em especial, têm sido responsáveis pela destruição de ecossistemas, alterações químicas da água e alterações físicas dos habitats em todo o mundo (MALMQVIST, RUNDLE, 2002).

Diante das ameaças à integridade dos ecossistemas aquáticos, o grau de degradação de um ambiente frente a um impacto vai depender em parte da capacidade natural de resistência (resistir a distúrbios) e da resiliência (retornar ao equilíbrio de onde foi desviado). Porém, quando o impacto é de tal magnitude que o sistema não consegue retornar às suas características iniciais, o tempo necessário para atingir características funcionais perenes (associadas à biodiversidade e à heterogeneidade de habitats) se torna relativamente longo. Sendo assim, é necessário auxiliar no retorno das condições naturais do ambiente com a implementação de projetos de restauração ecológica.

O termo “restauração ecológica” é utilizado de forma confusa na literatura com frequência. Isso se deve a uma sutil diferença entre a definição determinada pela legislação brasileira e aquela utilizada em publicações acadêmicas internacionais. De acordo com o Sistema Nacional de Unidades de Conservação - SNUC (2000) a “restauração ecológica” é a restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada o mais próximo possível de sua condição natural. Esse conceito possui algumas limitações teóricas pertinentes, como por exemplo, a impossibilidade de retornar o ambiente ao sua condição original em muitos casos, e até mesmo a determinação de uma condição original visto as mudanças naturais constantes,

intrínsecas do ambiente. Sendo assim, utiliza-se no Brasil o termo “recuperação ecológica”, que pode ser definido como a restituição para uma condição não degradada, podendo essa ser diferente da condição original.

No presente trabalho, foram utilizadas as terminologias da literatura internacional, definidas pela *Society for Ecological Restoration* - SER (2004), pois essas são menos específicas e mais abrangentes na maioria dos casos. Segundo a SER (2004), em termos conceituais, a “restauração ecológica” é a prática de auxiliar no reestabelecimento de um ecossistema degradado, danificado ou destruído (por causas antrópicas ou naturais), enquanto a “ecologia da restauração” é a ciência sobre a qual se baseia a prática. Idealmente, a ecologia da restauração fornece conceitos claros, modelos, metodologias e ferramentas que apoiam a prática dos profissionais da restauração ecológica.

Segundo Palmer et alii (2005), a restauração em ecossistemas aquáticos pode ser (I) “passiva” quando se permite que as forças hidráulicas naturais atuem vagarosamente e restaurem a heterogeneidade natural, ou (II) mais específica e “ativa” quando é feita através da modificação da forma e estrutura do sistema ou da reintrodução de elementos naturais (ex: vegetação, nutrientes). Em ambos os casos, o objetivo final do processo é retornar o ecossistema o mais próximo de sua trajetória histórica original, ainda que na maior parte dos casos, essa trajetória seja difícil ou impossível de se determinar com exatidão (SER, 2004). Sendo assim, a escolha de um ambiente de referência que tenha sofrido pouco ou nenhum impacto é fundamental para orientar com clareza os objetivos do processo de restauração. De acordo com a SER (2004), o sítio de referência pode ser um ecossistema adjacente preservado com condições ambientais comparáveis, uma parcela menos perturbada do próprio ecossistema impactado, ou até mesmo registros do ambiente antes do impacto ser causado.

As características biológicas utilizadas para avaliar o sucesso da restauração são diversas. Segundo Ruiz-Jean et alii (2005) os parâmetros indicadores de restauração ecológica mais usuais podem ser agrupados em três principais categorias: (I) estrutura da vegetação (II) diversidade de espécies e (III) processos ecológicos. Os processos ecológicos (ex: ciclagem de nutrientes), por sua vez, são os menos utilizados como indicadores na literatura, por necessitarem de um período relativamente extenso de estudo para serem avaliados (RUIZ-JEAN et alii, 2005). Em ecossistemas aquáticos lóticos dos Estados Unidos, por exemplo, o objetivo mais comum dos projetos de

restauração é o manejo das margens através de revegetação (sementes/mudas) no intuito de reduzir o assoreamento (PALMER et alii, 2007). Por outro lado, nos projetos de restauração de sistemas lênticos as abordagens são mais diversificadas, pois o comportamento das variáveis abióticas é relativamente mais fácil de avaliar, como o fósforo e nitrogênio total, clorofila *a*, profundidade do disco de Secchi e material sólido em suspensão (PEREIRA, 2011).

Os trabalhos de restauração em áreas impactadas por rejeito de bauxita, por sua vez, tem focado em ambientes terrestres, através da avaliação do replantio após a atividade de exploração, algumas delas em “*pit lakes*” artificiais criadas para disposição do rejeito (NORMAN et alii, 2006; GARDNER, BELL, 2007;.KOCH, HOBBS, 2007; GRANT et alii, 2007; COURTNEY, et alii, 2010). No bioma amazônico brasileiro, um projeto pioneiro de restauração às margens do lago Batata (PA) teve como objetivo auxiliar na regeneração da mata de igapó impactada por rejeito mineral. Nesse projeto, uma região de replantio de mudas nativas da região foi tratada com adição de sementes e serapilheira ao solo. A técnica se mostrou eficaz mesmo sob a ação do pulso hidrológico, que remove parte do material orgânico alocado (DIAS, et alii 2012). A restauração do lago Batata é um desafio inédito no mundo devido à natureza e magnitude do impacto. Enquanto as metodologias desenvolvidas para restaurar lagos visam, normalmente, a retirada de nutrientes excedentes provenientes do despejo de esgoto *in natura*, a situação oposta ocorre no lago Batata, ou seja, os compartimentos naturais foram empobrecidos em termos de matéria orgânica e nutrientes essenciais ao funcionamento do ecossistema (ESTEVES, 2011).

1.3 A dinâmica da matéria orgânica particulada em ecossistemas aquáticos amazônicos influenciados pelo pulso de inundação

A bacia amazônica é considerada o maior sistema fluvial do mundo, cobrindo uma área de mais de 300.000 Km² (IRION et alii, 1997) a qual é responsável pela drenagem de cerca de 37% do território da América do Sul e escoar 18% do total da água doce que atinge os oceanos. Nesse sistema, as variações sazonais no nível das águas são principalmente governadas pelo pulso hidrológico dos grandes rios da região, fruto das variações em aspectos climáticos como a precipitação e o degelo dos Andes (JUNK et alii, 1984). Através desse ciclo, os corpos d’água (rios e lagos) ultrapassam os limites de suas calhas, expandindo-se sobre florestas alagáveis, e por fim promovendo a

interconexão entre diferentes ecossistemas. Esse sistema dinâmico recebe o nome de rio-planície de inundação, no qual a inundação anual periódica é o principal agente controlador e modelador da estrutura e da dinâmica das comunidades e dos principais processos aquáticos (JUNK et alii, 1989) (figura 4). Lagos associados a rios são muito frequentes nas planícies de inundação amazônica e geralmente são rasos (raramente ultrapassando os 15 metros de profundidade), sendo conectados permanentemente, ou por um período do ano, ao rio principal com o qual trocam parte da água (MELACK et alii, 1991).

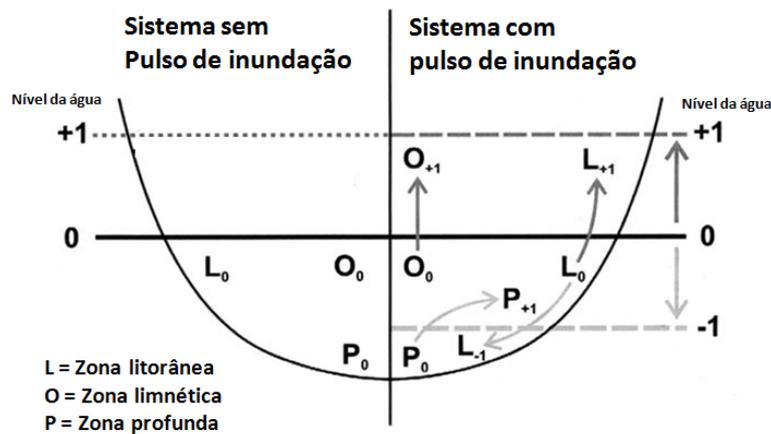


Figura 4: Modelo generalizado das variações no nível d'água causadas pelo pulso de inundação nos compartimentos de um ecossistema aquático continental. Fonte: Adaptado de Junk e Wantzen (2004).

A dinâmica dos pulsos de inundação desempenha um papel importante na regulação das concentrações de componentes particulados e dissolvidos na coluna d'água afetando diretamente o *status* hidroquímico e estrutural dos corpos d'água (JUNK et alii, 1989). À medida que os ambientes se conectam via inundação, as interações entre ecossistemas promovem intensa troca de materiais e energia, representada principalmente pelo aporte dos estoques de material orgânico acumulado no solo da floresta inundável para dentro dos corpos d'água receptores. A fonte de matéria orgânica particulada exógena a um determinado corpo d'água é denominada "alóctone", enquanto a fonte endógena, advinda da produção primária fitoplanctônica e de detritos originários de macrófitas do próprio ecossistema é denominada "autóctone". Juntas essas duas vias contribuem para a cadeia de detritos, que são a principal fonte de energia e nutrientes em ecossistemas aquáticos continentais (ESTEVES, GONÇALVES-JÚNIOR, 2011).

Uma vez carregada para dentro do corpo d'água, o processo de decomposição da matéria orgânica particulada grossa (MOPG) pode ser descrito como: (I)

condicionamento: modificação da matéria orgânica pela ação de micro-organismos como fungos e bactérias, tornando-a palatável para invertebrados aquáticos e fisicamente menos consolidada e (II) fragmentação: efeito da abrasão física do fluxo de água e da atividade alimentar de invertebrados, transformando a MOPG em matéria orgânica particulada fina (MOPF).

A deposição de MOPG e MOPF, por sua vez, sustenta o estoque de matéria orgânica no sedimento (MOS), composta principalmente por resíduos de plantas (folhas, raízes, caules) em diferentes estágios de decomposição, pela fauna bentônica associada ao sedimento e pela matéria orgânica estável também chamada de húmus. A maior concentração de MOS está geralmente associada à camada superior mais recente e biologicamente mais ativa, pois nela se encontram as condições favoráveis para o desenvolvimento de organismos bentônicos (ESTEVES, CAMARGO, 2011). A granulometria do sedimento e a batimetria do corpo d'água também são fatores importantes na distribuição espacial da MOS.

O processo de decomposição da MOS, por sua vez, tem um papel importante na transferência da energia acumulada no sedimento e também na ciclagem dos nutrientes para todo o sistema (ESTEVES, GONÇALVES-JÚNIOR, 2011). A respiração bentônica juntamente com processos biológicos de fermentação no sedimento são vias importantes da mineralização da MOS, disponibilizando nutrientes na forma inorgânica dissolvida para o ecossistema. Muitas pesquisas têm mostrado que os nutrientes dissolvidos na água intersticial do sedimento podem chegar a concentrações muito superiores às encontradas na coluna d'água (OHLE, 1976; FURTADO et alii, 2002). A decomposição da MOS também pode resultar na saída de nutrientes do sistema, como a perda de carbono na forma de gases estufa (CO_2 ou CH_4) (ESTEVES, CAMARGO, 2011). Essa via é regulada principalmente pela disponibilidade O_2 no sedimento, controlada pela redução da profundidade.

1.4 Contextualização da pesquisa - histórico de pesquisas no lago Batata

Na região de Porto de Trombetas, no município de Oriximiná no estado do Pará, a empresa Mineração Rio do Norte (MRN) iniciou a extração de bauxita no final dos anos 70. Um total de aproximadamente 24 milhões de toneladas de rejeito mineral, resultante do beneficiamento (livre de NaOH), foi descartado no lago Batata entre 1979 e 1989, assoreando a região norte do corpo principal do lago e também outras áreas

alagáveis colonizadas pela vegetação de igapó. Frente a esse quadro, em 1988 iniciou-se o programa de Monitoramento Ecológico do Lago Batata, no qual uma variedade de dados limnológicos são avaliados em diversas divisões e compartimentos do lago. Muitos desses resultados estão na obra editada por Bozelli e colaboradores, publicada em 2000.

Como consequência da deposição do rejeito da bauxita sobre o sedimento do lago Batata, a disponibilidade de nutrientes e outros recursos naturais essenciais ao estabelecimento da biota nesse compartimento foi reduzida drasticamente. Pesquisas pretéritas identificaram diversos desdobramentos do impacto nas proximidades do ponto de lançamento do rejeito, como a redução da densidade de organismos bentônicos (CALLISTO, ESTEVES, 1995) e alterações na estrutura desta comunidade bentônica (FONSECA, ESTEVES, 1999), diminuição das concentrações de carbono orgânico total, nitrogênio orgânico total e fósforo total (cerca de 30 vezes menores) (ROLAND et alii, 2000), e redução dos teores de matéria orgânica (ROLAND et alii, 2000).

Os impactos causados pelo rejeito também se estenderam para o compartimento pelágico devido à resuspensão do sedimento impulsionada pela cinética das águas do rio Trombetas e pela ação dos ventos, principalmente no período de águas baixas (figura 5 B). Após o impacto, uma maior concentração de partículas minerais em suspensão foi responsável por atenuar a radiação incidente na coluna d'água, que por sua vez, é um fator limitante para as comunidades fitoplanctônicas, coordenando as taxas fotossintéticas e a distribuição vertical desses organismos. Estudos conduzidos no lago Batata identificaram ainda, na região impactada, uma redução da produção primária (ROLAND, 1995; ROLAND et alii, 2002; GUENTHER, BOZELLI, 2004) afetando indiretamente o zooplâncon, (BOZELLI, ESTEVES, 1995). Segundo Panosso (1993), o rejeito foi responsável por configurar heterogeneidade espacial de diversas variáveis limnológicas nesse ecossistema como transparência da coluna d'água, alcalinidade total, condutividade elétrica, nutrientes totais e clorofila *a*.

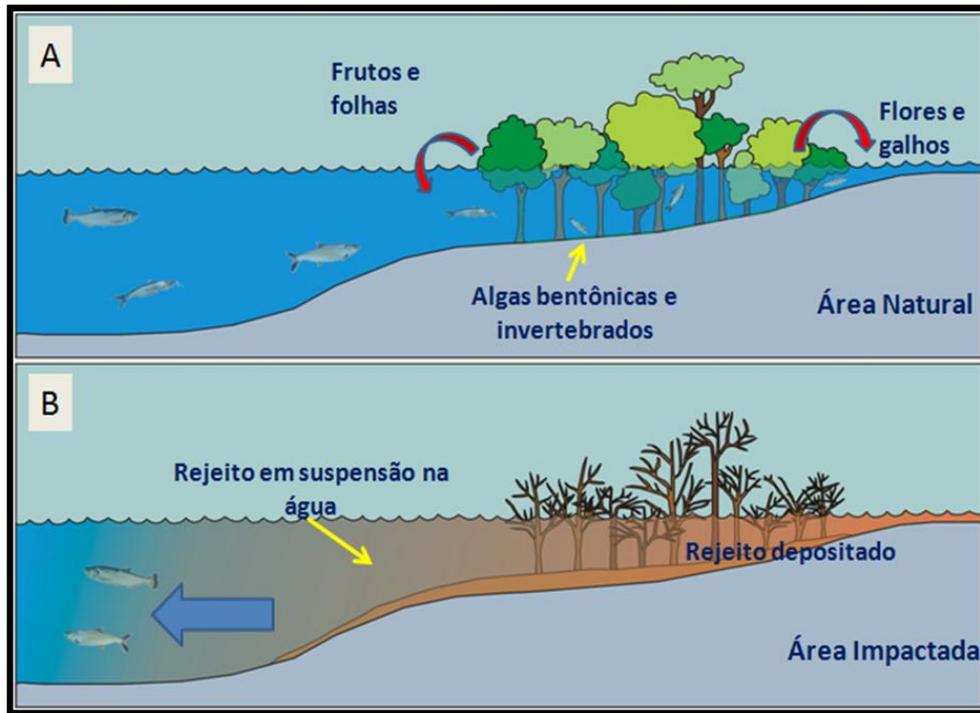


Figura 5: O efeito do rejeito de bauxita sobre a floresta de igapó do lago Batata. (A) áreas naturais afastadas do ponto onde foi lançado o rejeito e (B) áreas impactadas onde houve assoreamento e extensão do impacto para a coluna d'água, um processo favorecido pela baixa profundidade. Fonte: Esteves (2000).

Como medidas de mitigação aplicadas à partir de 1989, foram construídos tanques apropriados para o descarte do rejeito e foi promovido plantio para o restabelecimento da vegetação de igapó. Iniciou-se então o processo de restauração passiva do sistema (resiliência) com formação de uma camada de matéria orgânica sobre a camada de rejeito de bauxita (figura 6).

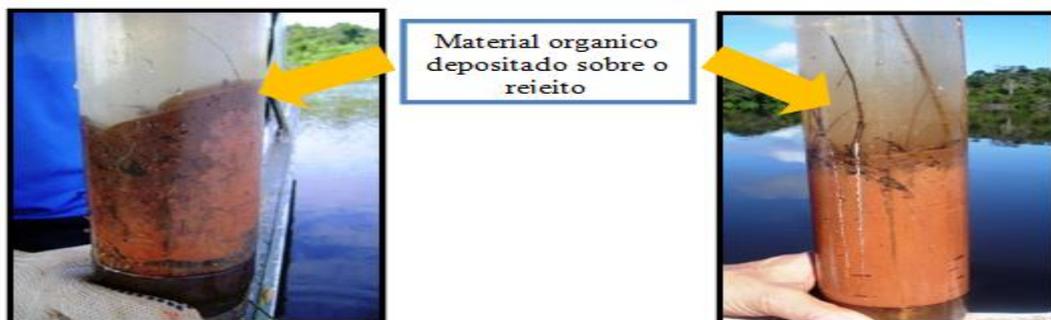


Figura 6. Amostras de sedimento retiradas da região impactada (estação IMP1) em 2007. Nota-se a camada de matéria orgânica de coloração marrom sobre e misturada à camada de rejeito de bauxita de coloração avermelhada. Fonte: Esteves et alii, (2012). Foto: Marcos Paulo Figueiredo de Barros.

Dados do monitoramento indicam que a turbidez e sólidos totais em suspensão no lago Batata apresentaram uma tendência de redução ao longo dos anos (ESTEVEES, 2012), o que sugere um possível mecanismo de bloqueio da resuspensão do rejeito por parte da camada orgânica superposta ao sedimento.

Tendo em vista a melhoria gradual do lago Batata em vários aspectos ecológicos, o presente trabalho utilizou a matéria orgânica do sedimento como indicador da restauração passiva do lago frente ao impacto por rejeito mineral, ainda que esse conceito seja mais amplo envolvendo estrutura e funcionamento das comunidades biológicas. Partindo da premissa que os teores de matéria orgânica aumentaram na região impactada ao longo dos anos, o trabalho visa investigar a participação do pulso de inundação na eficiência desse processo.

O trabalho também visa investigar a influência da formação da camada de matéria orgânica no sedimento sobre a redução da concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água. Esse parâmetro pode ser um fator chave importante para a melhoria do lago de uma forma geral, visto que a importância desse compartimento para a ciclagem de matéria e fluxo de energia, que influenciam o metabolismo de todo o ecossistema (ESTEVEES & CAMARGO, 1982).

Por último, testemunhos do sedimento foram utilizados para investigar o papel do arroz bravo (*Oryza glumeapatula*) como importante fonte alóctone de material orgânico para a área impactada. Essa espécie coloniza de forma extensiva a região marginal do lago Batata, assoreada pelo rejeito e pode ter participado de forma significativa na história de restauração do lago.

2. OBJETIVOS

Objetivo principal:

Investigar o processo de restauração ecológica do lago Batata em termos de conteúdo de matéria orgânica no sedimento e sua relação com a redução dos impactos na coluna d'água.

Objetivos:

1. Realizar um diagnóstico espacial das tendências de aumento/redução da concentração de matéria orgânica no sedimento do lago Batata ao longo de 25 anos, e a influência do pulso de inundação nesse processo.

2. Verificar a influência da matéria orgânica do sedimento sobre a recuperação da coluna d'água.

3. Avaliar a distribuição vertical da matéria orgânica do sedimento em áreas impactadas sem vegetação aquática, áreas impactadas colonizadas por estandes de arroz bravo (*Oryza glumeapatula*) e áreas de referência, focando no papel da macrófita como importante fonte autóctone de matéria orgânica.

3. HIPÓTESES

1. O pulso de inundação contribui para a formação da camada de matéria orgânica sobre o sedimento nas áreas impactadas.

2. O aumento da concentração de matéria orgânica no sedimento impactado é responsável pela redução de sólidos totais em suspensão na coluna d'água.

3. A biomassa do arroz bravo (*Oryza glumeapatula*) contribui de forma significativa para a restauração dos teores de material orgânico do sedimento nas áreas impactadas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

O lago Batata está localizado na margem direita do rio Trombetas ($1^{\circ}25'$ e $1^{\circ}35'$ S, $56^{\circ}15'$ e $56^{\circ}25'$ O) na região de Porto Trombetas no município de Oriximiná (PA) (figura 7). Ambos são influenciados pelo pulso de inundação e pertencentes ao tipo de planície de inundação de rios de águas claras, com baixa concentração de sólidos inorgânicos em suspensão e de matéria orgânica dissolvida (SIOLI, 1984), além da presença de vegetação característica de igapó. A área total do lago Batata varia entre 18 a 30 km² entre os períodos de águas baixa e alta respectivamente, com profundidades médias de 2,5 m e 10 m (PANOSSO et alii., 1995). Como é típico nos ambientes aquáticos amazônicos de águas claras, o lago tem uma baixa condutividade elétrica ($11,2$ e $12,0 \mu\text{S cm}^{-1}$) e é ligeiramente ácido com valores de pH em torno de 5,4 e 6,9 (ESTEVEVES et alii, 1994).

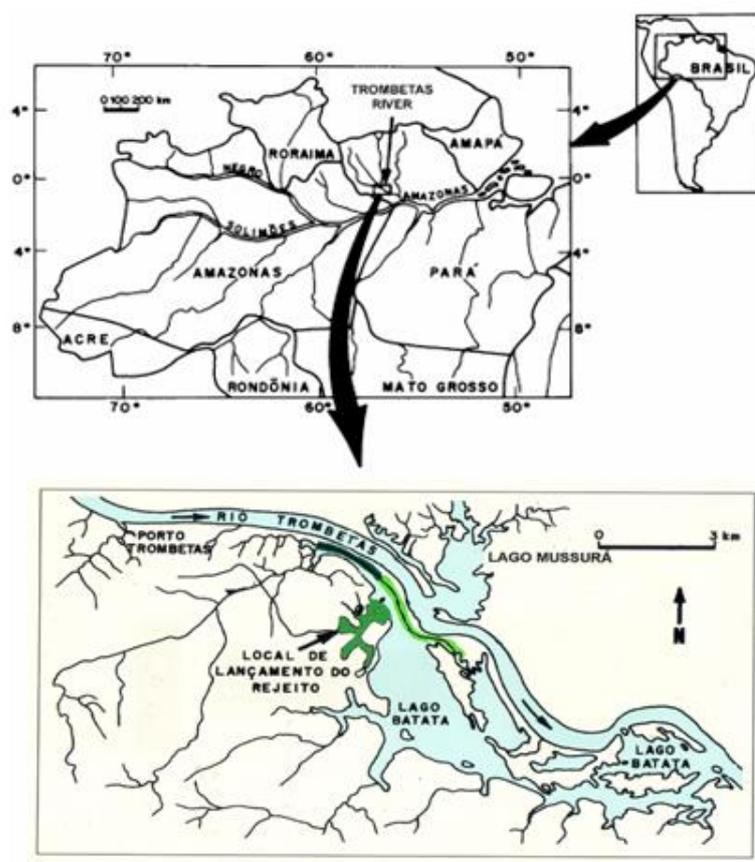


Figura 7. Mapa indicando a localização geográfica do Lago Batata no município de Oriximiná (PA). Área onde houve o lançamento de rejeito mostrada em verde. Fonte: Adaptado de Panosso (2000)

Segundo Panosso (2000), o lago Batata pode ser descrito como um lago de forma dendrítica (não-circular) possuindo quatro subunidades fisiográficas: corpo principal, baía, desembocadura e canal. A montante do corpo principal localiza-se a área impactada pelo rejeito de bauxita enquanto à jusante da mesma subunidade estão as áreas consideradas livres do rejeito. A estreita associação morfológica entre o lago Batata e o rio Trombetas torna difícil a distinção entre sistemas lótico e lêntico, devido a conexão promovida pelo pulso hidrológico durante o período de águas altas (BOZELLI et alii. 2000).

Os menores valores de profundidade no lago Batata são normalmente observados no mês de novembro, e ainda neste mês começa o processo de enchimento do lago (período de enchente) que pode durar até a segunda quinzena do mês de maio ou junho. Quando é atingida a profundidade máxima, o nível d'água começa a baixar, caracterizando o período de vazante (normalmente de junho a novembro) até que seja atingido o menor nível d'água. É importante destacar que os períodos de águas altas (maior profundidade) e águas baixas (menor profundidade) são extremamente curtos já que o nível de água máximo/mínimo não permanece estabilizado por muitos dias. Além disso, pode-se observar variações interanuais no que diz respeito ao período no qual se dá o maior ou menor nível d'água (figura 8) (FIGUEIREDO-BARROS, 2008).

Os altos índices pluviométricos entre novembro e junho também são responsáveis pela variação da profundidade no lago Batata, no entanto, a variação na profundidade causada por um evento de chuva é menos expressiva e menos duradoura em relação à influência das águas advindas da conexão com o rio Trombetas. Enquanto o pulso de inundação governa a profundidade dos grandes rios Amazônicos, o regime pluviométrico exerce maior influência sobre a profundidade dos igarapés, uma oscilação que pode ser observada em questão de poucas horas. Nesse sentido, o igarapé Caranã que drena para a região impactada do lago Batata é uma importante fonte de matéria orgânica alóctone em períodos de maior índice pluviométrico.

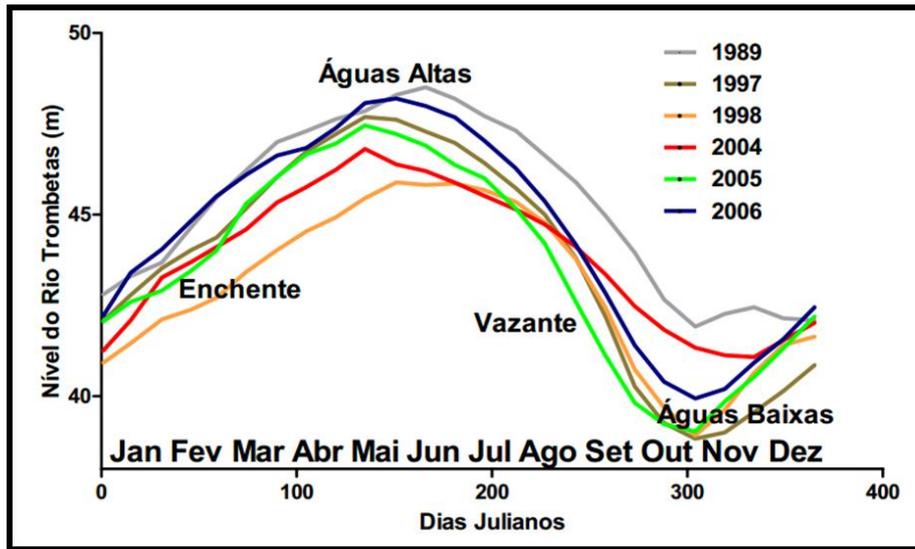


Figura 8. Curva de nível do Rio Trombetas determinados em alguns anos entre 1989 e 2006. Os meses e os 4 períodos do pulso de inundação são indicados. Fonte: Tese - Figueiredo-Barros (2008).

As variações na profundidade do lago Batata resultam em correntes internas que resuspendem parcialmente o rejeito depositado sobre o sedimento natural. Nos períodos de menor profundidade a maior turbulência na coluna d'água promove o aumento da turbidez, que pode ser considerado o principal fator impactante no lago. A resuspensão do rejeito de bauxita também é responsável pela degradação visual do ecossistema como observado na figura 9 (ESTEVES, 2000).

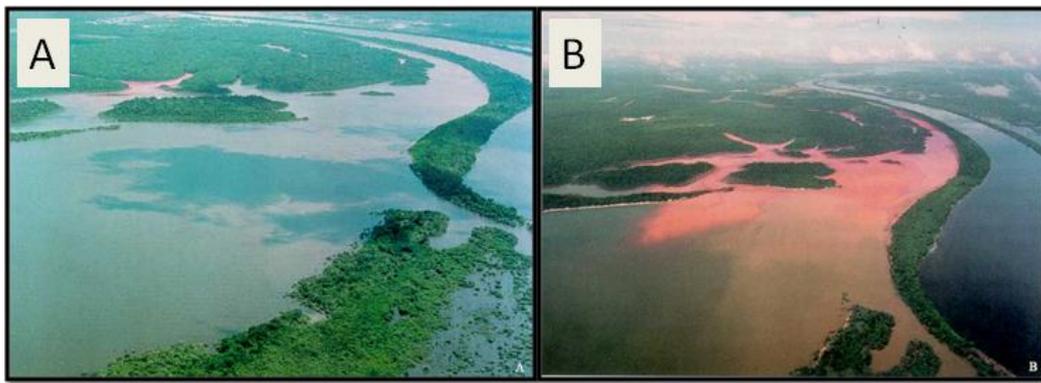


Figura 9: Vista aérea da área impactada do lago Batata (A) no período de águas altas e (B) no período de águas baixas. Fonte: Mineração Rio do Norte - MRN.

A malha amostral foi composta por nove estações de coleta, sendo cinco delas localizadas em áreas consideradas como 'impactadas' próximas ao local de descarte do

rejeito (IMP1, IMP2, IMP3, IMP4, IMP5), duas em áreas impactadas colonizadas por bancos de arroz bravo (*Oryza glumaepatula*) (ARR1 e ARR2) e outras duas localizadas em áreas-controle mais afastadas do impacto, consideradas como ‘estações de referência’ (REF1 e REF2) (figura 10).

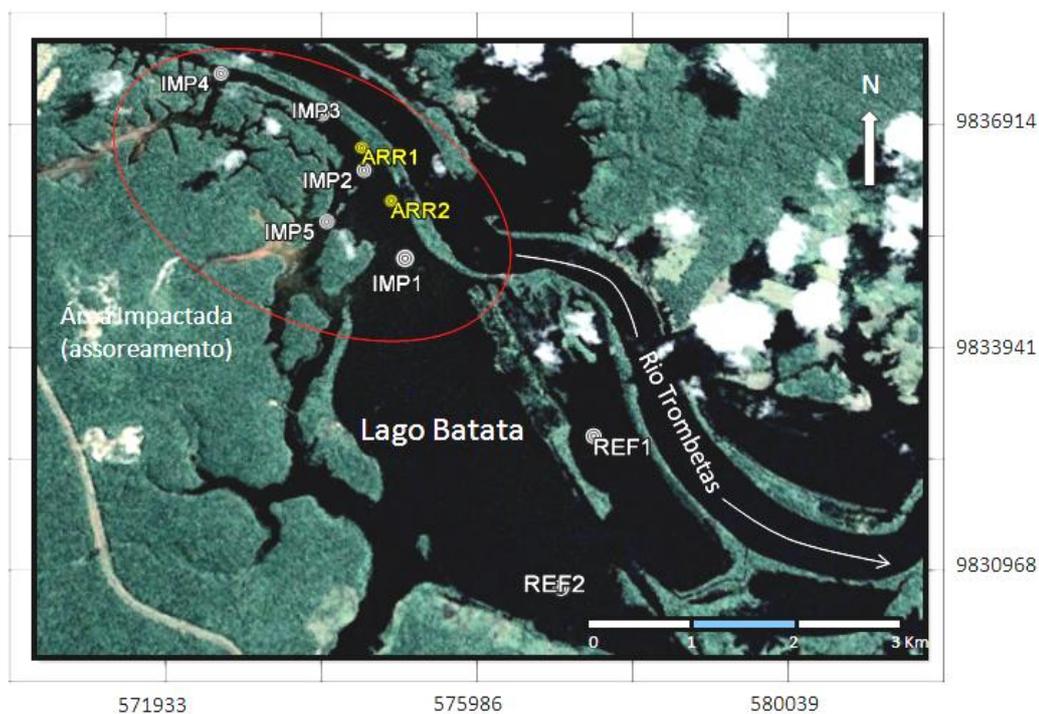


Figura 10: Localização das estações de coleta no Lago Batata. Pontos brancos referentes às estações amostradas no monitoramento do ambiente aquático. Área impactada circunscrita em vermelho. Estações próximas a bancos de arroz (pontos amarelos) foram acrescentadas somente no estudo de testemunhos do sedimento (presente estudo). Coordenadas em UTM - 21M. Fonte: Google Earth - imagem de Jan/2008 (acessado em Jan/2014).

Tabela 1. Caracterização das estações de coleta e coordenadas UTM - 21M.

Estação	Quanto ao impacto	Quanto à inundação	Coordenadas	
			Sul	Leste
REF1	Natural	Permanente	9832615 m	577463 m
REF2	Natural	Permanente	9830746 m	576980 m
IMP1	Impactada	Permanente	9834974 m	575182 m
IMP2	Impactada	Periódica	9836240 m	574659 m
IMP3	Impactada	Periódica	9837062 m	574102 m
IMP4	Impactada	Periódica	9837676 m	572744 m
IMP5	Impactada	Periódica	9835497 m	574182 m
ARR1	Impactada	Periódica	9836579 m	574627 m
ARR2	Impactada	Periódica	9835804 m	575009 m

Diferente do que foi constatado nas estações REF1, REF2 e IMP1, os pontos IMP2, IMP3, IMP4, IMP5, ARR1 e ARR2 não permanecem inundados durante todo o ano. Na fase de águas baixas (AB), e eventualmente na fase de vazante (V), essas regiões secam, impossibilitando a coleta de sedimento e água dentro de uma condição de inundação padronizada. É importante ressaltar que as estações impactadas apresentam algumas diferenças entre si, que podem ser atribuídas principalmente por características morfométricas. Por exemplo, IMP2, IMP3 e IMP4 estão localizadas em uma região de colonização natural do igapó sobre o rejeito. Essa região é um estreitamento mais à montante do lago, que durante as águas baixas (AB) se assemelha a um pequeno riacho que flui em direção à jusante do corpo principal. Essas estações recebem maior influência do aporte de águas do igarapé Caranã (impactado) e da vegetação marginal próxima (figura 11).

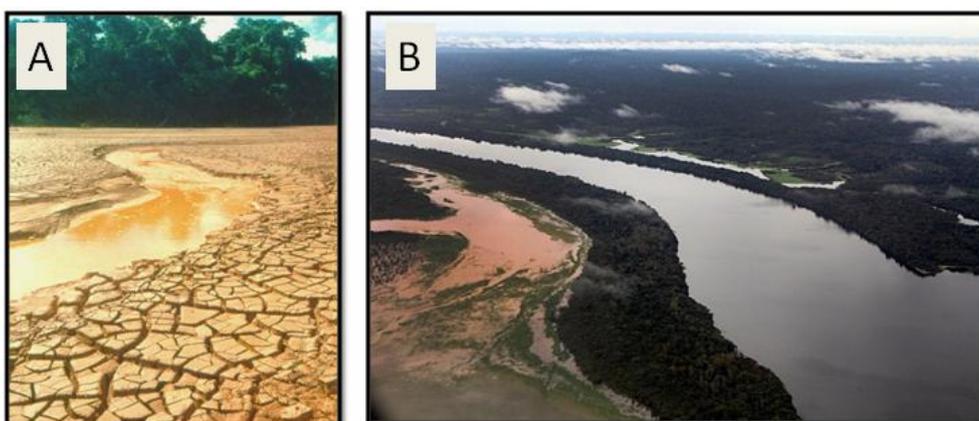


Figura 11: A - Foto da área assoreada seca durante a fase de águas baixas, quando não é possível coletar pela falta de acesso. B - Foto aérea da área impactada na fase de águas baixas, com a colonização do arroz bravo (*Oryza glumaepatula*) sobre o sedimento impactado. A redução do nível d'água resulta em um contraste evidente entre o lago Batata e o rio Trombetas. Fonte: Laboratório de Limnologia - UFRJ.

A estação IMP5 se caracteriza pela maior declividade do terreno e pela seca precoce durante a redução do nível d'água, ficando exposta por um período relativamente mais longo do que as outras estações. Como consequência, IMP5 apresenta baixa retenção de matéria orgânica no solo e pouca vegetação de igapó, motivo pelo qual Dias e colaboradores selecionaram um sítio na mesma região para implantação de um projeto de restauração ecológica (DIAS, et alli 2012).

Os pontos de coleta ARR1 e ARR2 se caracterizam pela presença de bancos de arroz bravo (*Oryza glumaepatula*). Essa espécie vegetal coloniza algumas áreas

marginais do lago e morre quando submersa por longos períodos de inundação na fase de águas altas (AA). A biomassa morta de arroz pode ser encontrada em camadas superficiais sobre o sedimento impactado e em outras regiões mais à jusante, pois são arrastadas por correntes internas do lago Batata (observação de campo). Pode-se dizer que de uma forma geral todas as estações impactadas recebem influência do arroz bravo, mesmo aquelas não colonizadas por essa macrófita.

4.2 Base de dados históricos - Matéria orgânica do sedimento, sólidos totais em suspensão e profundidade do lago Batata

As séries históricas foram obtidas pelo Programa de Monitoramento Ecológico do Lago Batata, realizado pelo Laboratório de Limnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Nesse programa, são realizadas quatro campanhas ao ano, nos meses de Março, Junho, Setembro e Dezembro. Tais intervalos representam, respectivamente, os períodos de enchente (E), águas altas (AA), vazante (V) e águas baixas (AB) do ciclo hidrológico (BOZELLI et alii, 2000). Para o presente trabalho foram utilizadas séries históricas de sete estações de monitoramento: REF1, REF2, IMP1, IMP2, IMP3, IMP4 e IMP5.

Ao todo, foram selecionadas três variáveis abióticas mais diretamente relacionadas às hipóteses testadas nesse estudo, a saber: profundidade do lago Batata, sólidos totais em suspensão (STS), concentração de matéria orgânica no sedimento superficial (MOS). No campo a profundidade do lago foi aferida utilizando corda graduada. Os métodos de estimação de MOS e STS serão descritos a seguir nos próximos subitens.

Cada série é composta por 100 observações referentes aos 25 anos com coletas trimestrais (1989 - 2013). Os dados foram plotados em ordem cronológica em planilha Excel (*Microsoft Office 2007*) e rotulados por estação de coleta e fases do pulso de inundação. Em seguida foi realizada uma inspeção visual preliminar em busca de pontos discrepantes (*outliers*) e elementos faltantes (*missing values*). No total, foram achados nas séries de MOS, STS e Profundidade, respectivamente, 28,8%, 21,4% e 21,0% dos elementos faltantes, sendo 20,5%, 19,4% e 19,2% concentrados nas fases de vazante e águas baixas das estações IMP2, IMP3, IMP4 e IMP5. As estações REF1, REF2 e IMP1,

por outro lado, apresentaram séries mais integras, com menos de 4% de elementos faltantes (anexo 1).

4.2.1 Monitoramento da matéria orgânica na superfície do sedimento

O sedimento foi coletado utilizando um amostrador do tipo Kajak com ‘corer’ (tubo de acrílico, Ø = 8 cm e área 50 cm²) modificado conforme Ambühl & Bühler (1978) (figura 12 - A e B). De cada amostra coletada, foi retirada a fração superior de 3 cm e acondicionada em frasco plástico para secagem em estufa à 105 °C por 72 horas. Essa temperatura é suficiente para eliminar a umidade da amostra sem causar combustão da matéria orgânica. Após a secagem, as amostras foram maceradas e armazenadas em *zip lock* livres de umidade. O teor de MOS foi então determinado pelo método de perda de massa por combustão (JACKSON, 1962). Cerca de 1g de cada fração foi incinerado em duplicata a 550 °C por 4 horas utilizando cadinhos de porcelana (figura 12). As cinzas restantes foram retiradas da mufla com dessecador e levadas á balança analítica para repesagem. O teor de matéria orgânica do sedimento (MOS) foi então calculado pela diferença entre as pesagens (Eq.1).

$$\text{MOS (\%)} = ((P_i - P_f) / P_a) \times 100$$

Eq.1: onde: P_i = peso do conjunto (amostra seca + cadinho) antes da incineração; P_f = peso do conjunto (amostra + cadinho) após a incineração; e P_a = peso da amostra seca antes da incineração.

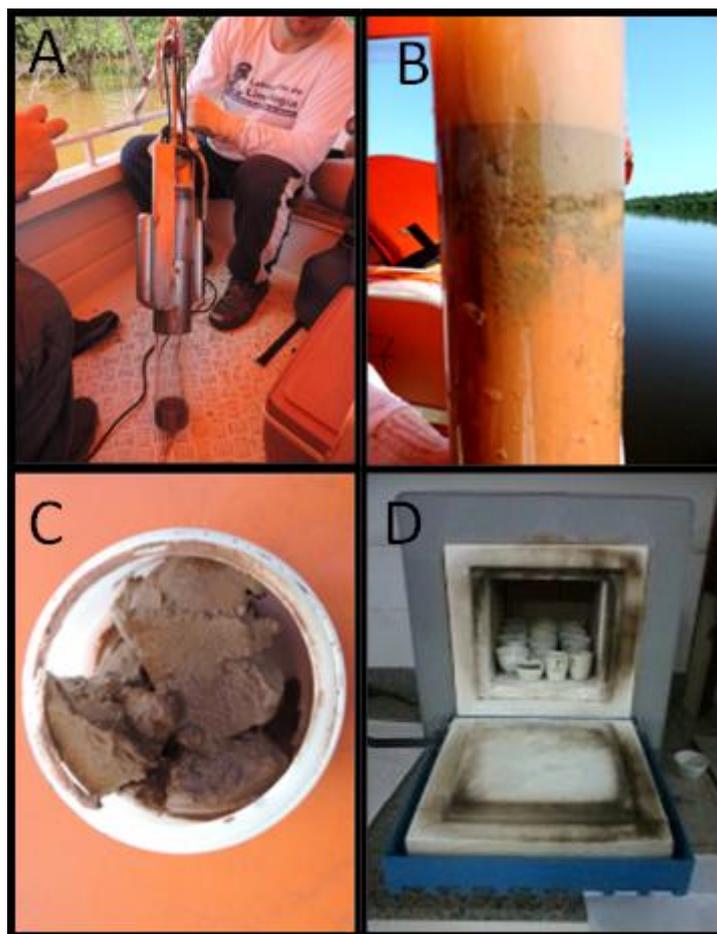


Figura 12: Etapas da coleta de sedimento e análise de MOS (A) Amostrador tipo KAJAC. (B) ‘corer’ contendo amostra de sedimento coletada na estação IMP3 (C) fração 0-3 cm em pote de plástico pronto para secagem (D). Combustão do material seco em mufla utilizando barcas de porcelana.

4.2.2 Monitoramento dos sólidos totais em suspensão

Para avaliação de sólidos totais em suspensão (STS) foram retiradas amostras de água da sub superfície (até 15 cm abaixo da lâmina d’água) com frascos de polietileno. As amostras foram filtradas em filtros de fibra de vidro (0,7 µm de diâmetro dos poros), previamente secos em estufa a 60°C por 48h e pesados. Após a filtração da água, os filtros contendo material em suspensão concentrado foram novamente secos e pesados pelo mesmo procedimento (figura 13). Por fim, os valores de STS foram estimados pela diferença entre as duas pesagens tendo por base o volume filtrado (Eq.2)

$$STS \text{ (mg/L)} = ((Ff - Fi) / V)$$

Eq 2: onde: Fi = peso do filtro seco em miligramas antes de sua utilização na filtração; Ff = peso do filtro seco em miligramas após a filtração; e V = volume de amostra filtrado em litros.

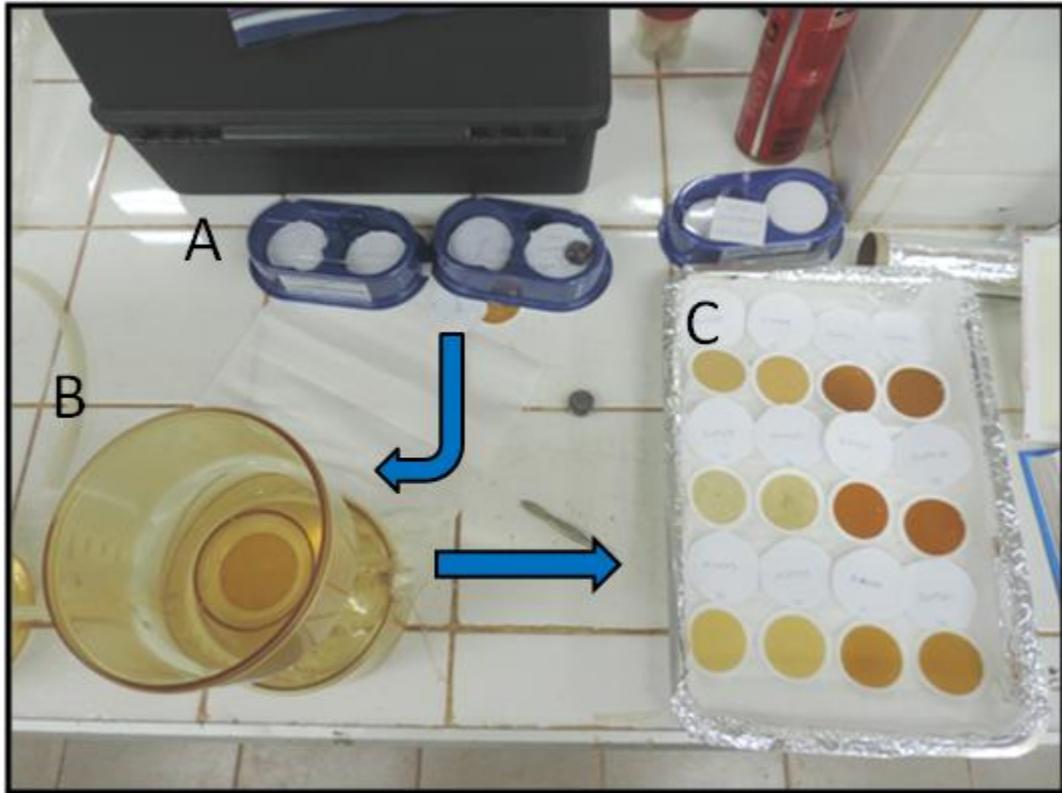


Figura 13: Etapas da análise de sólidos totais em suspensão (STS) (A) Filtros de fibra de vidro previamente secas e pesadas (B) Kit para filtragem utilizando bomba a vácuo (C) Filtros dispostos em bandeja de alumínio para secagem em estufa.

4.3 Análise de séries temporais

Uma série temporal é uma sequência de medições de uma variável feitas sequencialmente ao longo do tempo em intervalos determinados (dias, meses, trimestres, anos), na qual os valores vizinhos podem ser temporalmente dependentes entre si (dependência serial), com distribuição não necessariamente estável (SEBER, WILD, 2004). Diferente de dados estatísticos comuns os dados temporais são dependentes de seu ordenamento para análise (SEBER, WILD, 2004). A análise de séries temporais, por sua vez, requer um conjunto de técnicas específicas para descrever e modelar essa dependência, visto que a maioria dos procedimentos estatísticos foi desenvolvida para analisar observações independentes (EHLERS, 2009). O modelo aditivo geral para uma série temporal é dado pela equação 4.

$$Y_t = T_t + S_t + C_t + \varepsilon_t$$

Eq.4: Onde: Y_t é a variável aleatória no momento t ; T_t , S_t e C_t são componentes determinísticos do modelo, que correspondem à tendência (mudança geral a longo prazo), sazonalidade (variação intranual) e ciclo (variação interanual) respectivamente. ε é a componente aleatória ou ruído.

O estudo de séries temporais pode ser dividido em duas principais vertentes: a descrição de propriedades da série e formulação de modelos de previsão. Nesse sentido, Legendre e Legendre (1998) discutem as principais técnicas utilizadas em estudos ecológicos, dentre elas, a detecção da componente de tendência monotônica através do teste não paramétrico de Mann-Kendall (MK) e a maximização da correlação entre séries temporais por defasagens através da correlação cruzada (*cross-correlation*).

No presente estudo, as análises de séries temporais foram conduzidas no pacote *Time Series Analysis* do programa Statistica 8 (STATSOFT) de acordo com as orientações e critérios para interpretação discutidos em Legendre e Legendre (1998).

4.4 A influência do pulso de inundação no processo de restauração da matéria orgânica no sedimento

4.4.1 Metodologia para análise de tendência temporal

O teste de tendência não paramétrico de Mann-Kendall (MANN, 1945) (KENDALL, 1975) foi aplicado às séries de MOS para determinar se essa variável tende a crescer ou decrescer ao longo tempo. Essa metodologia vem sendo amplamente utilizada na literatura em estudos climatológicos e hidrológicos de longa duração (YUE, WANG, 2004) (MAVROMATIS, STATHIS, 2011). O teste de Mann-Kendall apresenta algumas vantagens sobre os métodos de regressão, como o não requerimento da conformação em uma distribuição em particular, a invariabilidade a dados transformados (ex. log), além da baixa sensibilidade à sazonalidade e valores faltantes na série (HIRSCH, SLACK, 1984).

Para avaliar a contribuição de cada fase do pulso na restauração do sedimento de forma separada, cada série temporal de MOS foi dividida em quatro séries sazonais menores (enchente, águas altas, vazante e águas baixas) (figura 14).

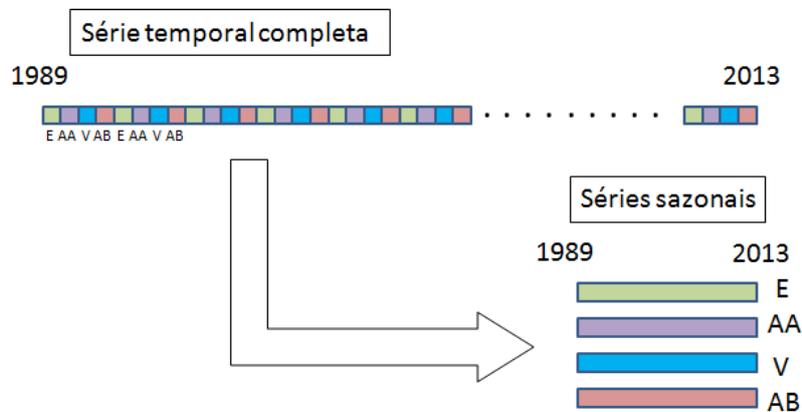


Figura 14: Separação das séries temporais completas (n máximo = 100) em séries sazonais (n máximo = 25) correspondentes á cada uma das quatro fases do pulso de inundação: E (enchente), AA (águas altas), V (vazante) e AB (águas baixas).

Cada observação da série T_i ($i = 1, 2, 3, \dots$) é comparada com aquelas mensuradas posteriormente T_j ($j = i+1, i+2, i+3, \dots$). A estatística S é obtida pelo somatório dos sinais, que pode ser “+1” quando o valor posterior é maior do que o anterior, “-1” para cada caso de inversão (valor posterior menor que o anterior), ou “0” no caso de valores idênticos (Eq.5).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sinal}(T_j - T_i)$$

$$\text{Sinal}(T_j - T_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } T_j - T_i > 0 \\ 0 & \text{se } T_j - T_i = 0 \\ -1 & \text{se } T_j - T_i < 0 \end{cases}$$

Eq.5: Onde: T_j e T_i são observações nos trimestres j e i , sendo $j > i$ respectivamente.

O valor de S indica o sentido da tendência monotônica (crescente ou decrescente), no entanto, é necessário testar sua significância estatística sobre hipótese nula da inexistência de tendência. A distribuição amostral de S é então assumida como distribuição normal Z com média igual a 0 e variância determinada (Eq.6).

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases}$$

Onde,

$$\text{VAR}(S) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}$$

Eq.6: Cálculo para transformação da série na distribuição Z .

Por fim, o somatório dos sinais S pode ser mais bem representado na forma da estatística τ (tau) (Eq.7), que por sua vez, assume um valor entre -1 (séries estritamente decrescentes) e +1 (séries estritamente crescentes, sem casos de inversão), analogamente ao coeficiente de correlação em análises de regressão (NNSMP, 2011). Pode-se dizer que o índice τ (no contexto do teste de Mann-Kendall) indica o grau de semelhança entre uma determinada série e ela mesma reorganizada de forma crescente.

$$\tau = \frac{S}{n(n-1)/2}$$

Eq.7: Cálculo da estatística τ , onde S é o somatório dos sinais e n é o número de observações na série.

4.4.2 Avaliação da dinâmica dos sólidos totais em suspensão

Grande parte do material orgânico chega ao sedimento via deposição de partículas provenientes de áreas alagáveis, que por sua vez, podem ser resuspensos em fases de baixa profundidade do lago. Portanto, torna-se interessante avaliar a qualidade orgânica do séston e sua origem (detrítica ou fitoplanctônica). Em um ambiente aquático com significativa presença de partículas minerais na coluna d'água (rejeito), o carbono total (CT) contido nos filtros de STS foi utilizado como indexador da matéria orgânica particulada em suspensão. A origem do séston e do seu teor de CT foi avaliado por meio da relação dessas variáveis com os valores de clorofila a .

Para essa avaliação foram selecionados filtros STS, oriundos das campanhas de monitoramento de 2013, no qual foi possível coletar durante as quatro fases do pulso de inundação e na maioria das estações de amostragem. (tabela 2).

Tabela 2: Amostras de séston (filtros de fibra de vidro) utilizadas para determinação da porcentagem de carbono total (CT séston).

Ano	2013			
	E	AA	V	AB
Fase do pulso				
REF1	x	x	x	x
REF2	x	x	x	x
IMP1	x	x	x	x
IMP2	x	x	x	x
IMP3	x	x	x	x
IMP4	x	x	x	
IMP5	x	x	x	

Os filtros de STS foram cortados em 4 partes e incinerados em analisador de carbono modelo TOC-SSM-5000 (SHIMADZU). A quantidade de carbono total (Qcarb) foi utilizada para calcular o teor de carbono total no séston através da equação 8.

$$CT (\%) = (Qcarb / (Ff - Fi)) \times 100$$

Eq 8: onde: Qcarb = peso de carbono total contido no filtro em miligramas; Fi = peso do filtro seco em miligramas antes de sua utilização para filtração; Ff = peso do filtro seco em miligramas após a filtração.

A clorofila α é um pigmento encontrado em organismos fotossintetizantes, sendo um dos principais moléculas responsáveis pela ocorrência desse processo. Em ambientes aquáticos esse parâmetro é indicador da biomassa fitoplanctônica. A determinação da concentração de clorofila α no ano de 2013 foi realizada em duplicata sempre em penumbra. Para isso, filtros contendo o séston foram macerados utilizando etanol 90% aquecido a 75-80°C para extração de pigmentos. Em seguida o volume gerado foi filtrado utilizando-se filtros GF-52 e as amostras foram lidas em espectro fotômetro nos comprimentos de onda 665 e 750nm (ES). Por último foram adicionados duas gotas de HCl 2N refeita a leitura nos mesmos padrões após a acidificação (EA). A concentração final foi determinada através da equação 9.

$$\text{Clorofila } \alpha \text{ (}\mu\text{g / L)} = (29,6 \times v \times (\text{ES} - \text{EA})) / V \times Z$$

Eq 9: onde: 29,6 é o fator de correção; v = volume da amostra extraído; ES = Abs entre 665 - 700 nm; EA = Abs entre 665 - 700 nm acidificado com HCl 2N; V = volume da mostra filtrada e Z = passo óptico da cubeta (1 cm)..

As quatro fases do pulso de inundação foram unidas e as variáveis STS, CT séston e clorofila α foram correlacionadas entre si através da correlação de Spearman. Não foi possível correlacionar as variáveis separadas por fase do pulso, pois as estações de referência e a áreas impactadas durante as águas baixas não tiveram amostras o suficiente para um resultado robusto. Foi encontrado um *outlier* na concentração de clorofila α na estação 10C durante a enchente (87,25 $\mu\text{g/L}$). Para evitar distorção nas análises esse valor não foi utilizado no calculo de média e nas correlações de Spearman.

4.5 A influência da camada de matéria orgânica no sedimento sobre a redução dos sólidos totais em suspensão

4.5.1 Metodologia para comparação de séries temporais

Para testar a hipótese de que o aumento da concentração de matéria orgânica no sedimento promove a redução da quantidade de partículas em suspensão, procurou-se verificar se as variações em MOS estão correlacionadas com as mudanças que ocorrem

no STS. Para entender melhor as relações encontradas foi verificada também a influência da profundidade do lago Batata, sobre essas duas variáveis. A comparação de séries foi realizada somente nas estações de coleta que apresentaram séries temporais mais íntegras, a saber: REF1, REF2, e IMP1. Os poucos valores faltantes foram substituídos pela média de sua respectiva fase do pulso de inundação (E, AA, V ou AB).

O método de correlação cruzada (*cross-correlation*) visa identificar a defasagem de tempo (k) que maximiza a correlação produto-momento de Pearson (R^2) entre pares de séries necessariamente de mesma extensão (LEGENDRE, LEGENDRE, 1998). As defasagens são feitas na forma de atrasos (k) e adiantamentos ($-k$), observação por observação. Nesse processo os valores da extremidade das séries vão se perdendo, à medida que o módulo de “ k ” se afasta do 0 (figura 15).

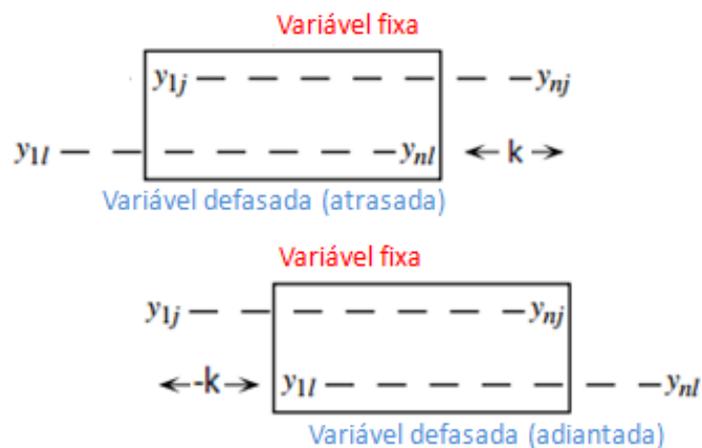


Figura 15: Representação de correlação cruzada. As observações dentro do quadrado são utilizadas na correlação. Fonte: adaptado de Legendre & Legendre (1998).

A melhor correlação não necessariamente ocorre na defasagem $k=0$. Segundo LEGENDRE e LEGENDRE (1998) em determinadas interações ecológicas o tempo de atraso entre duas variáveis (ex. densidade populacional de predadores e presas) tende a gerar correlações significativas somente para defasagens diferentes de zero. Nesse caso, pode-se dizer que a variável resposta se atrasa em relação à variável preditora, indicando relação causal. É importante ressaltar que o valor máximo de k deve ser limitado de acordo com o conhecimento prévio sobre a natureza das variáveis visto que, correlações sem sentido ecológico podem ser causadas pelo acaso (relação espúria).

A correlação cruzada é geralmente plotada na forma de função de correlação cruzada (FCC), que permite uma melhor visualização da variação em R^2 (eixo y) em

relação às defasagens k (eixo x). O limite de confiança aproximado (LC) (num nível de 5%) é calculado a partir da equação 10.

$$LC = \pm 2/\sqrt{n}$$

Eq.10: Cálculo do limite de confiança. Onde n = número de observações da série.

4.6 A distribuição vertical da matéria orgânica no sedimento

4.6.1 Amostragem para avaliação da matéria orgânica em testemunhos do sedimento

Com o objetivo de investigar a distribuição da MOS abaixo da camada superficial de 3 cm, testemunhos do sedimento foram coletados no período de 2012 a 2014, principalmente nas fases de enchente, águas baixas e uma única vez durante a vazante. Foram realizadas amostragens nas estações de referência (REF1 e REF2), impactadas (IMP1, IMP2, IMP3 e IMP4) e impactadas colonizadas por arroz (ARR1 e ARR2), totalizando 24 testemunhos retirados de oito pontos do lago (tabela 3). A estação IMP5 não foi contemplada nessa abordagem devido às dificuldades de coleta, descritas na seção 4.1.

Os perfis foram coletados numa profundidade mínima de 14 cm no sedimento, fracionados a cada 2 cm e então armazenadas em frascos plásticos. A matéria orgânica do sedimento (MOS) foi estimada pelo mesmo método utilizado pelo monitoramento do lago Batata (combustão e gravimetria), descrito na seção 4.2. A figura 16 mostra a coloração do sedimento nas amostras coletadas em 2014.

Tabela 3. Testemunhos do sedimento (14 cm de profundidade) utilizados no presente estudo.

Ano	2012		2013			2014
	E	AB	E	V	AB	E
REF1	x		x	x	x	
REF2	x	x				x
IMP1	x		x	x	x	
IMP2	x					x
IMP3	x	x				
IMP4	x		x	x		
ARR1			x	x	x	x
ARR2				x	x	

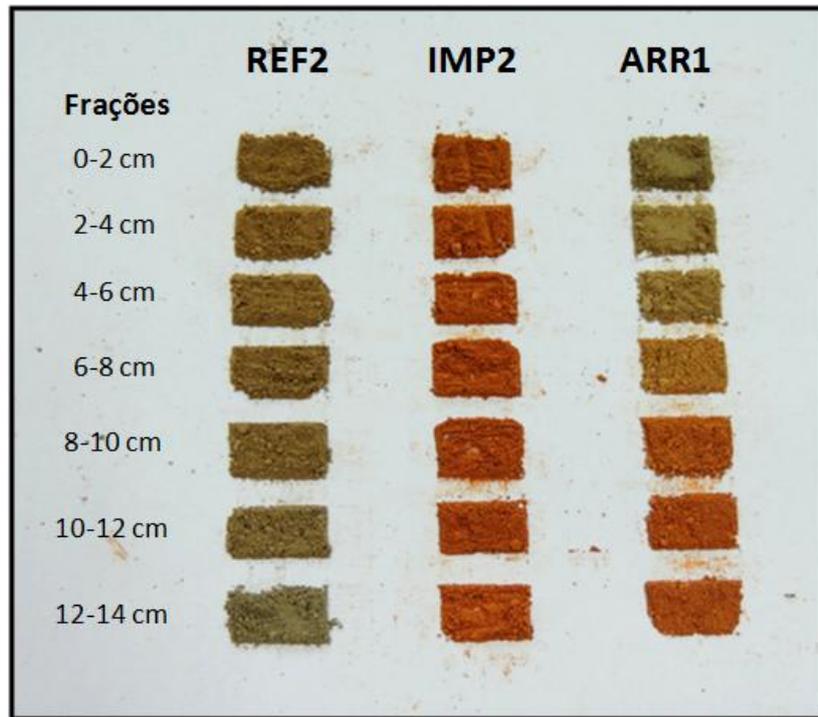


Figura 16. Coloração das frações que compõem os testemunhos do sedimento coletados em março de 2014. A coloração avermelhada é associada ao rejeito de bauxita enquanto a coloração marrom esta associada a concentração de matéria orgânica.

4.6.2 Comparação entre curvas de acumulação

Os testemunhos foram agrupados por estação de coleta, REF1, REF2, IMP1, IMP2, IMP3, IMP4, ARR1 e ARR2, e pelas regiões distintas, REF, IMP e ARR, cada uma possuindo 7, 11 e 6 réplicas respectivamente. O aumento nos teores de MOS em função da profundidade do testemunho (14 cm) foi então modelada utilizando regressão linear, partindo da camada mais inferior (12 - 14 cm) para a mais superior (0 - 2 cm). Para isso, as frações foram transformadas em variável contínua através da média entre o máximo e o mínimo de cada categoria (0 - 2 = 1 cm; 2 - 4 = 3 cm; 4 - 6 = 5 cm, e assim sucessivamente). Quando bem ajustadas, as inclinações das curvas (*slopes*) informam a taxa de ganho ou perdas de MOS por centímetro de camada formada.

As inclinações das regiões REF, IMP e ARR foram comparadas por meio de uma análise de covariância (ANCOVA), com teste a posteriori de Tuckey HSD, ambos feitos no programa Statistica 8 (STATSOFT), com o principal intuito de investigar a contribuição do arroz Bravo (*Oryza glumaepatula*) para a restauração dos teores de MOS.

5. RESULTADOS

5.1 Análise de tendência das séries temporais de MOS (1989-2013) e avaliação do séston (2013), nas quatro fases do pulso de inundação

A estatística descritiva para as séries temporais de MOS está apresentada na tabela 4. A maior porcentagem de MOS encontrada foi de 29,41% na estação REF1 durante a vazante de 1992, enquanto a menor foi de 10,97% na estação IMP5 durante a enchente de 2008 (anexo 1). O maior e o menor valor médio foram respectivamente 21,68% (REF1) e 15,33% (IMP5). O coeficiente de variação (CV) nas estações amostradas não ultrapassou 20%, sendo o maior desvio encontrado na estação IMP3.

Tabela 4. Estatística descritiva das séries temporais completas de MOS (1989 - 2013) nas sete estações estudadas. A integridade das séries pode ser observada a partir do número de observações válidas (n amostral), obtidas em um total de 100 campanhas.

Estação de coleta	n amostral	Média (%)	Desvio padrão (%)	CV (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)
REF1	89	21,68	2,14	9,89	14,33	29,41
REF2	92	20,76	1,71	8,26	16,70	27,50
IMP1	94	17,24	2,23	12,91	13,70	27,21
IMP2	60	16,17	1,83	11,30	12,18	22,91
IMP3	60	18,64	3,70	19,84	12,59	26,64
IMP4	57	17,68	2,79	15,80	13,62	25,50
IMP5	43	15,33	2,28	14,91	10,97	20,89

O resultado da análise de tendência aplicada às séries completas e séries sazonais está apresentado na tabela 5. Nas séries completas, foi observado um aumento significativo nos teores de MOS superficiais (3cm) nas estações IMP1, IMP2, IMP3 e IMP4 ao longo dos 25 anos monitorados (1989 - 2013). As estações de referência, por sua vez, apresentaram decréscimo nos teores de MOS, porém, em menor magnitude. Em média, os valores de τ nas estações REF e IMP foram respectivamente de -0,185 e 0,327 (considerando somente as tendências estatisticamente significativas $p < 0,10$).

Na avaliação das séries sazonais, foram observadas tendências de acréscimo em todas as estações impactadas, excetuando a IMP5. As tendências de acréscimo nas estações impactadas se concentraram nas fases de enchente (E) e águas altas (AA), sendo que, no geral, os valores de τ foram maiores na enchente em relação às águas

altas (em média, $\tau_{IMP(E)}=0,455$; $\tau_{IMP(AA)}=0,337$). Nas fases de vazante (V) e águas baixas (AB) raramente foi observado alguma tendência significativa. Apesar da inexistência de tendência, as séries sazonais de MOS nas fases de V e AB apresentaram, de forma pontual, valores relativamente elevados em algumas estações de coleta. Isso demonstra como o resultado da análise de tendência não deve ser interpretado como um indicativo de amplitude dos valores da série, ou seja, mesmo que um elevado valor de τ seja observado em uma determinada fase do pulso, outras fases com menor tendência podem apresentar eventualmente teores mais elevados de MOS.

Nas estações de referência as tendências sazonais indicaram decréscimo na concentração de matéria orgânica durante a fase de (E) e (AB) para a estação REF1, e durante a fase de (AA) durante para a estação REF2. Sendo assim, parece não ter havido um padrão sazonal claro nessas estações de coleta, o que dificulta na interpretação do efeito do pulso no sedimento.

Tabela 5: Estatística τ (tau) para séries temporais completas e sazonais de matéria orgânica do sedimento (MOS), ambas no período de 1989 - 2013. Valores marcados com asterisco (*) são tendências estatisticamente significativas ($p < 0,10$). Tendências para séries sazonais com n amostral abaixo de '10' não foram determinadas.

Estação de coleta	Série completa	Enchente	Águas altas	Vazante	Águas baixas
REF1	-0,175*	-0,290*	0,012	-0,091	-0,448*
REF2	-0,195*	-0,075	-0,301*	-1,429	-0,208
IMP1	0,247*	0,407*	0,353*	0,188	-0,100
IMP2	0,381*	0,489*	0,390*	0,217	-
IMP3	0,380*	0,505*	0,255*	0,382*	-
IMP4	0,303*	0,420*	0,351*	-0,179	-
IMP5	0,014	0,235	-0,046	-	-

Na tabela 6 estão apresentados os valores de STS, teores de CT no séston e a concentração clorofila α , obtidos no ano de 2013. Os resultados também estão apresentados na forma de gráfico de colunas na figura 17. O maior e o menor valor de STS encontrado foi de 32,67 mg/L (estação IMP4 na vazante) e 0,30 mg/L (estação REF1 na enchente) respectivamente. O teor de CT no séston por sua vez variou entre 87,05% (estação IMP3 na enchente) e 5,11% (estação IMP4 na vazante). Por último, as concentrações de clorofila α encontrados nesse ano variaram de 21,20 $\mu\text{g/L}$ (estação IMP1 nas águas baixas) a 0,30 $\mu\text{g/L}$ (estação IMP4 na vazante) (anexo 2)

Tabela 6: Valores médios de sólidos totais em suspensão (STS), teor de carbono total (CT) e concentração de clorofila α , para as áreas de referência (REF) e impactada (IMP), e seus respectivos desvios padrão (DP). Os valores foram determinados ao longo das quatro fases do pulso de inundação enchente (E), águas altas (AA), vazante (V) e águas baixas (AB) no ano de 2013.

		Fase do pulso de inundação				
		E	AA	V	AB	
STS (mg/L)	REF	Média	1,35	1,15	1,88	8,58
		DP	(1,48)	(0,21)	(1,24)	(3,08)
	IMP	Média	4,21	1,70	10,83	7,31
		DP	(3,88)	(0,51)	(12,64)	(1,26)
CT (%)	REF	Média	41,27	42,12	33,80	35,68
		DP	(8,80)	(10,12)	(14,29)	(8,86)
	IMP	Média	55,96	44,22	27,33	29,06
		DP	(22,10)	(7,97)	(16,65)	(17,95)
Clorofila α ($\mu\text{g/L}$)	REF	Média	5,23	3,15	9,91	17,79
		DP	(0,11)	(0,61)	(7,40)	(4,83)
	IMP	Média	3,42	3,68	4,31	5,94
		DP	(1,68)	(0,92)	(2,44)	(6,01)

Os resultados mostraram que em ambas as áreas REF e IMP, os valores médios de STS tendem a ser superiores durante o período de esvaziamento do lago Batata (vazante/águas baixas). A concentração de STS na área de referência se manteve abaixo de 2 mg/L durante as fases de E, AA e V, sofrendo um aumento de pelo menos 4,5 vezes na fase de AB ($8,58 \pm 3,08$ mg/L). Já nas áreas impactadas, os valores STS mais elevados foram encontrados na fase V, porém, com um alto desvio padrão ($10,83 \pm 12,64$ mg/L), seguido pelo seu segundo maior valor, na fase de AB ($7,31 \pm 1,26$ mg/L).

Comparando as duas áreas na mesma fase do pulso, a maior variabilidade espacial de STS no lago pôde ser observada nas fases de E e V do ano de 2013. Durante a enchente, a área impactada apresentou STS mais elevado em relação à área de referência (4,21 e 1,35 mg/L, respectivamente). O teor de CT no séston, por sua vez, também foi maior na estação impactada durante a enchente. Na vazante, a área impactada novamente apresentou STS mais elevado em relação à área de referência (10,83 e 1,88 mg/L, respectivamente), uma diferença de aproximadamente 5,7 vezes.

O teor de CT do séston foi maior durante o período de E/AA do Batata e menor durante as fases de V/AB quando a profundidade é reduzida. O resultado reflete o aporte de material orgânico particulado alóctone à medida que as áreas marginais são

inundadas, e inversamente, a influência do rejeito mineral em suspensão com a redução da profundidade, o que resulta em um teor de CT reduzido (figura 17 B). A concentração de clorofila a por sua vez, foi superior durante o esvaziamento do lago (fases V e AB) em ambas as áreas de REF e IMP. Na área de referência a amplitude dos valores de clorofila foi maior, variando de 3,15 $\mu\text{g/L}$ (AA) á 17,79 $\mu\text{g/L}$ (AB), um acréscimo de 5,7 vezes. Já na área impactada a diferença entre o valor médio mínimo (3,42 $\mu\text{g/L}$ - E) e máximo (5,94 $\mu\text{g/L}$ - AB) foi de somente 1,7 vezes (figura 17 C).

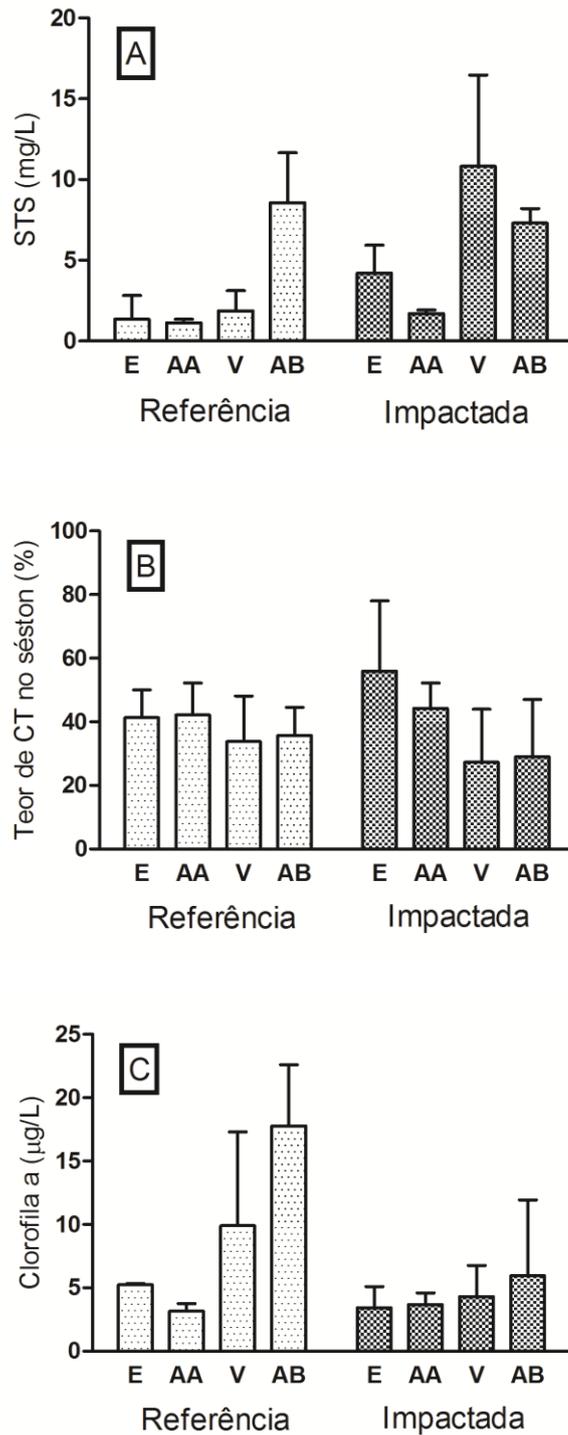


Figura 17: (A) Valores médios de sólidos totais em suspensão (STS), (B) teor de carbono total no séston e (C) Clorofila a, amostrados no ano de 2013. Região de referência (colunas claras): E (n = 2); AA (n = 2); V (n = 2) e AB (n = 2). Região impactada (colunas escuras): E (n = 5); AA (n = 5); V (n = 5) e AB (n = 2), exceto para clorofila a onde E na região impactada tem n = 4. Barras verticais representam desvio padrão.

Na tabela 7 é apresentado o resultado das correlações de Spearman entre as variáveis STS, teor de CT e clorofila α , nas duas áreas estudadas. Na área de referência, foi encontrada uma correlação significativa positiva entre STS e clorofila α (R Spearman = 0,79; $p < 0,01$), indicando forte associação entre essas variáveis quando o rejeito não está presente.

Na área impactada, foi observada uma correlação significativa negativa entre STS e teor de CT (R Spearman = -0,45; $p = 0,06$), o que demonstra o efeito do rejeito em suspensão na redução da qualidade orgânica do STS, principalmente nas fases de baixa profundidade. Por outro lado, em momentos alta profundidade o STS é diluído, ao mesmo tempo em que o material particulado orgânico alóctone é carregado para dentro do lago Batata.

Tabela 7: Resultado na análise de correlação de Spearman entre STS vs teor de CT, entre STS vs clorofila α , e entre teor de CT vs clorofila α , para as áreas de referência e impactada. As correlações foram feitas utilizando as quatro fases do pulso de inundação do ano de 2013 como réplicas. Os valores marcados em asterisco (*) são estatisticamente significativos ($p < 0,10$).

	n	R (Spearman)	Valor - p
ÁREA DE REFERÊNCIA	STS x Teor de CT		
	8	-0,32	0,43
	STS x Clorofila α		
	8	0,79*	0,01
	Teor CT x Clorofila α		
	8	-0,21	0,61
ÁREA IMPACTADA	STS x Teor de CT		
	17	-0,45*	0,06
	STS x Clorofila α		
	16	0,03	0,89
	Teor CT x Clorofila α		
	16	0,19	0,46

5.2 Correlação cruzada entre séries temporais de matéria orgânica no sedimento (MOS), sólidos totais em suspensão (STS) e profundidade do lago Batata (1989-2013)

As funções de correlação cruzada (FCCs) para MOS vs STS, STS vs profundidade e MOS vs profundidade, estão apresentadas respectivamente nas figuras 18, 19 e 20. As FCCs entre MOS vs STS não corroboraram com a hipótese de que a camada de MOS reduz a quantidade de STS. Ao invés disso, foi encontrada na estação IMP1 correlação positiva significativa entre essas variáveis ($r^2 = 0,28 \pm 0,10$) mediante defasagem em quatro trimestres, ou seja, se a série de STS for atrasada em 1 ano ($k=4$), ela passa a se relacionar de forma positiva com a MOS. Isso é o mesmo que dizer que nessa estação os picos de MOS estão de alguma forma relacionados com picos de STS que ocorreram há cerca de 1 ano atrás no mesmo local (figura 18).

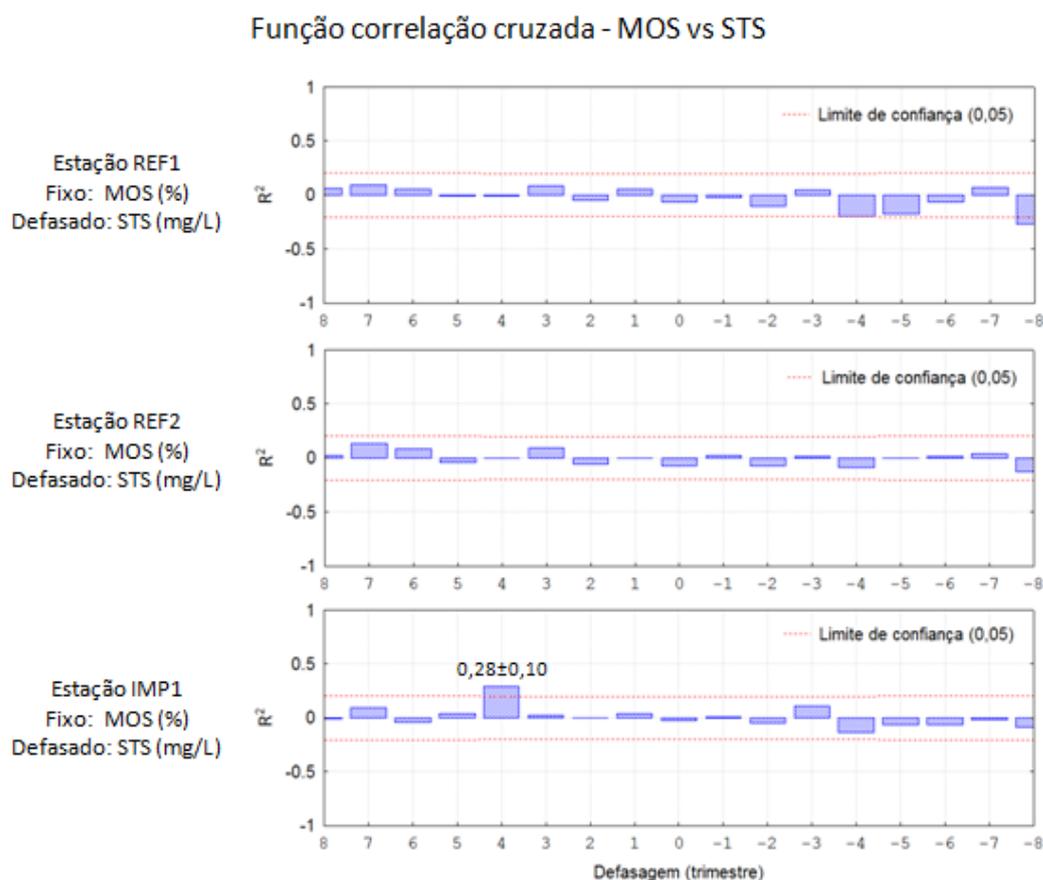


Figura 18: Função correlação cruzada (FCC) entre MOS e STS nas estações REF1, REF2 e IMP1, onde no eixo y estão os coeficiente produto-momento de Pearson (R^2) e no eixo x estão as defasagens da variável STS em relação á variável MOS, em um intervalo de 2 anos (8 trimestres).

Nas FCCs entre STS vs profundidade, foi observado para três estações de coleta: REF1, REF2 e IMP1, uma correlação negativa significativa (R^2) de -0,55, -0,52 e -0,53, respectivamente. A resposta do STS à variação na profundidade do lago Batata pode ser caracterizada como instantânea, pois ocorreu na defasagem $k=0$. O grau de relação entre as duas variáveis (R^2), por sua vez, parece não ter sido afetado pela presença do rejeito de bauxita no sedimento da estação (figura 19).

Para ambos os sentidos da defasagem, a cada 1 semestre houve outra correlação significativa de sinal oposto, mostrando que o STS e a profundidade possuem oscilações sincronizadas, que se repetem entre os anos. O comportamento conservativo da FFC, alternando entre fases positivas e negativas, demonstra como a relação entre as duas variáveis pode ser considerada forte, pois se manteve estável mesmo sobre a interferência de erros sistemáticos e aleatórios de 100 observações. Nesse sentido, a profundidade do lago Batata controla cerca de 50% da variação de STS, sendo o restante associado à outros fatores e ruídos ambientais.

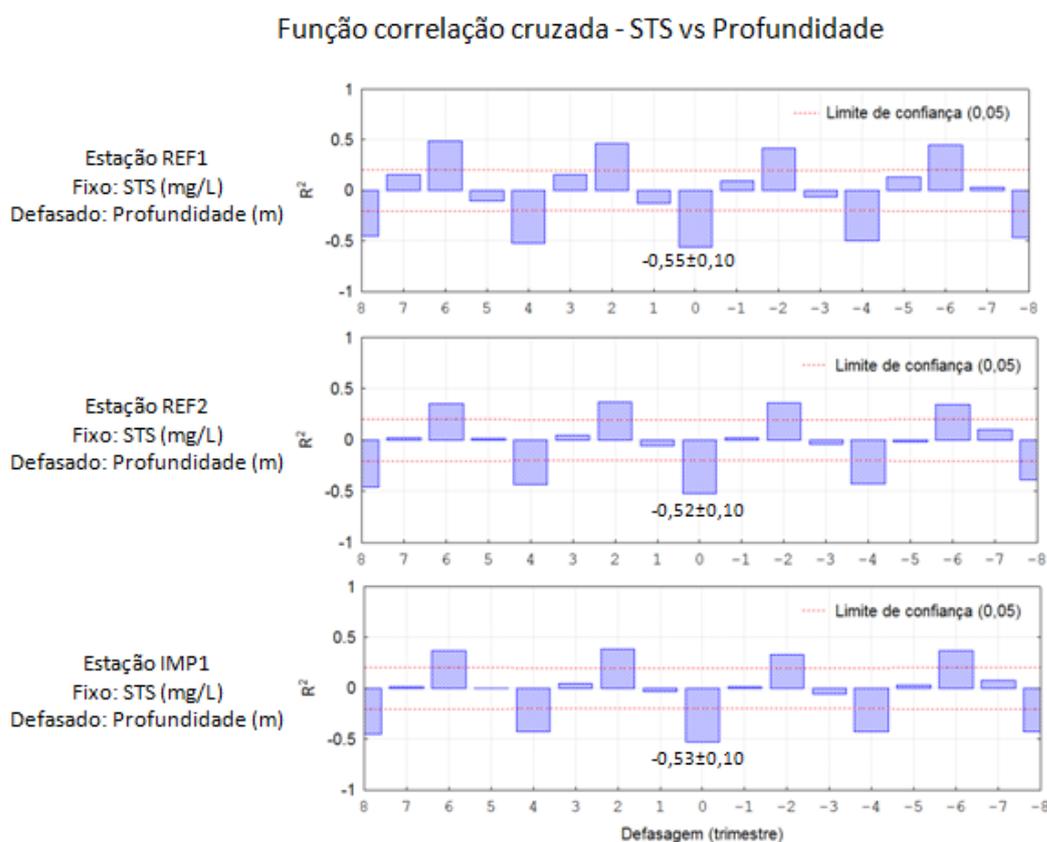


Figura 19: Função correlação cruzada (FCC) entre STS e profundidade do lago Batata nas estações REF1, REF2 e IMP1, onde no eixo y estão os coeficiente produto-momento de Pearson (R^2) e no eixo x estão as defasagens da variável profundidade em relação á variável STS, em um intervalo de 2 anos (8 trimestres).

Nas FCCs entre MOS vs profundidade não foi observada qualquer relação significativa nas estações estudadas. Esse resultado indica que as duas variáveis variam de forma distinta. Enquanto a profundidade varia na forma de pulsos anuais, é possível que a variação na MOS esteja associada à outros padrões mais aleatórios, como as diferenças interanuais na amplitude da própria inundação do lago.

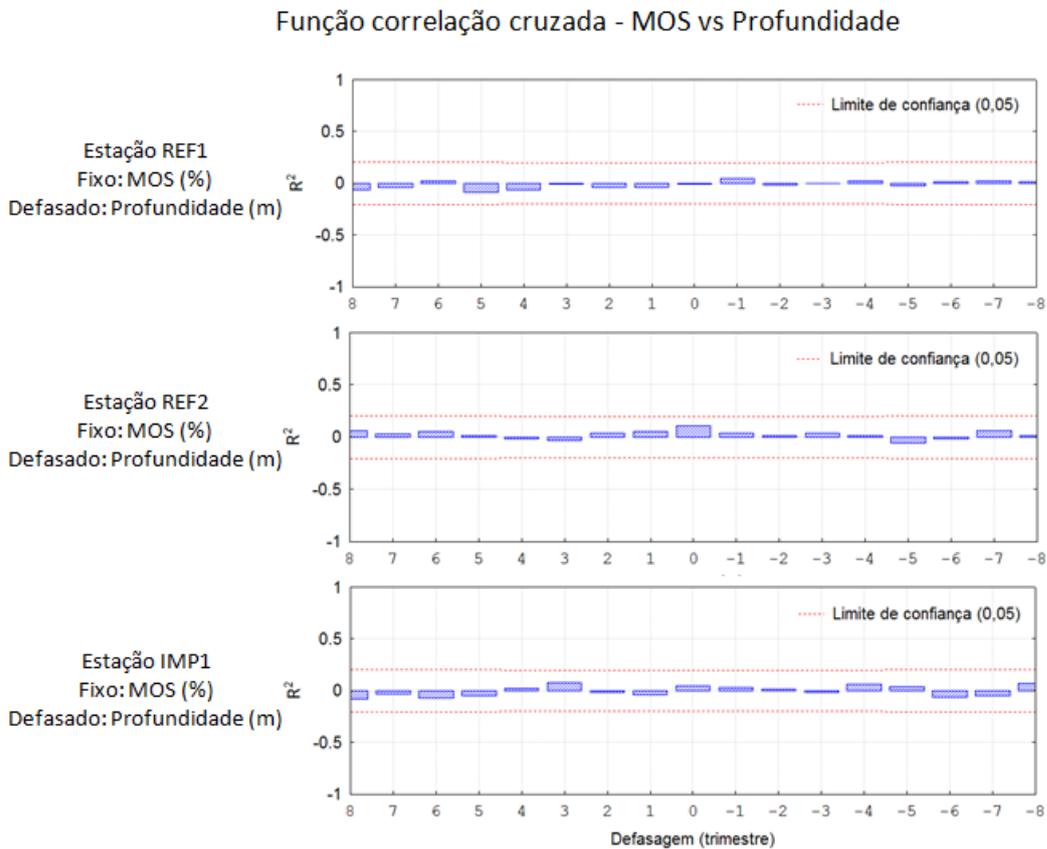


Figura 20: Função correlação cruzada (FCC) entre MOS e profundidade do lago Batata nas estações REF1, REF2 e IMP1, onde no eixo y estão os coeficiente produto-momento de Pearson (R^2) e no eixo x estão as defasagens da variável profundidade em relação á variável MOS, em um intervalo de 2 anos (8 trimestres).

5.3 Percentual de matéria orgânica ao longo do perfil vertical do sedimento

Os valores médios encontrados para cada estação de coleta e as curvas de ganho de MOS estão apresentadas na tabela 8. O menor teor de MOS encontrado entre as médias das frações foi de 14,45% (na camada mais inferior da IMP2) enquanto o maior valor foi de 23,60% (na camada superficial da REF1). As estações de referência apresentaram o maior valor médio de concentração de MOS do testemunho, mas por outro lado também apresentaram pouca diferença entre a fração entre fundo e superfície. Os maiores percentuais de superfície nem sempre foram nas estações de referência, as estações IMP1, IMP4, ARR1 e ARR2, por exemplo, apresentaram porcentagens de MOS na superfície superiores àquele observado na estação REF2.

Excetuando a estação ARR1, a tendência de acréscimo de MOS ao longo do sedimento foi significativa e linear para todas as outras estações impactadas ($R^2 > 0,60$; $p < 0,05$). A estação ARR2 apresentou a maior taxa de incorporação de material orgânico, aproximadamente 0,66% a cada 2 cm de camada depositada, enquanto nas demais estações impactadas a taxa variou de 0,21% a 0,41% a cada 2 cm.

Tabela 8: Teores médios e máximos de matéria orgânica do sedimento (MOS), encontrados em cada estação de coleta. Análise de tendência linear no sentido fundo-superfície. Os coeficientes de inclinação (tendência) marcados com asterisco (*) são significativamente diferentes de “0” ($p < 0,05$). O valor R^2 é o coeficiente de determinação para o ajuste das concentrações de MOS ao modelo linear.

Estação de coleta	Nº de réplicas	Média do testemunho % (teor superficial %)	Diferença entre fundo e superfície (%)	Coefficiente de inclinação	R^2 (linear)
REF1	4	22,09 (23,60)	1,65	0,14	0,51
REF2	3	20,77 (21,37)	0,62	0,03	0,15
IMP1	4	17,35 (21,41)	5,96	0,41*	0,78
IMP2	2	15,40 (17,46)	3,02	0,21*	0,80
IMP3	2	18,08 (20,13)	3,93	0,31*	0,99
IMP4	3	19,18 (21,39)	2,67	0,20*	0,61
ARR1	3	19,22 (22,45)	3,96	0,22	0,35
ARR2	3	17,47 (21,72)	7,27	0,66*	0,94

As frações dos testemunhos do sedimento utilizados no presente estudo apresentaram teores acima de 10 %, podendo ser classificados como sedimento orgânico (UNGEMACH, 1960 apud ESTEVES, CAMARGO, 2011). Os teores encontrados nas camadas mais profundas dos testemunhos aparentemente foram muito elevados levando

em consideração o impacto por rejeito mineral. Possivelmente a metodologia para determinação de MOS utilizada no presente estudo foi sensível à granulometria argilosa do rejeito, inflando os valores de MOS. Segundo Dias et alii (2004) o aquecimento em mufla à temperaturas acima de 360°C provoca a perda de componentes inorgânicos voláteis, como a água de constituição presente na estrutura mineral. O autor sugere o método da titulação de Walkley-Black na dosagem de carbono orgânico como mais apropriado para amostras sólidas de solos e sedimentos. Mesmo contendo erros, os métodos estatísticos utilizados no presente trabalho dependem de comparações proporcionais e hierarquizações entre amostras, o que reduz erros sistemáticos causados pelo método analítico da mufla.

Na figura 21 está apresentada a distribuição vertical de MOS nas estações estudadas. Em algumas estações, as concentrações de MOS decrescem com a profundidade e voltam a crescer à partir da fração 6-8 cm, reduzindo assim, o coeficiente de ajuste linear (R^2) para o testemunho (ex: REF1, REF2, ARR1). Por outro lado, em outras estações como a IMP3, os percentuais de MOS decresceram gradualmente ao longo de todo perfil, resultando em bons ajustes ($R^2 = 0,99$) (tabela 8).

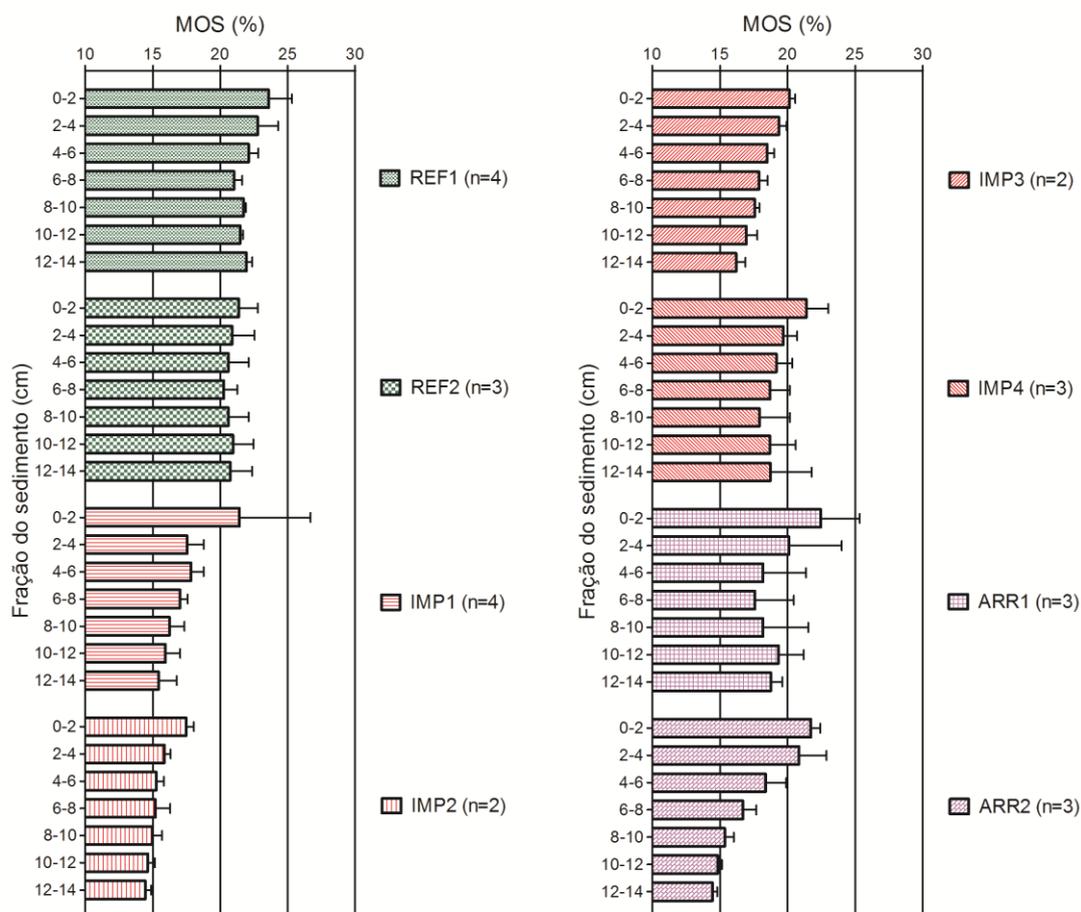


Figura 21: Valores médios dos percentuais de matéria orgânica no sedimento (MOS) e seus respectivos desvios padrão, distribuídos verticalmente em testemunhos do sedimento (14 cm de profundidade). Amostras coletadas em estações de referência (verde), impactadas (vermelho) e impactadas colonizadas por estandes de arroz bravo (*Oryza glumaepatula*) (roxo).

A tabela 9 mostra a concentração média de MOS e a análise de tendência linear quando as estações de coleta são agrupadas de acordo com os três tipos de regiões amostradas: REF, IMP e ARR. A área REF apresentou um valor de concentração média de MOS superior (21,45%) em relação às áreas IMP e ARR (respectivamente, 17,56% e 18,22%). A maior concentração de superfície (22,65) e a menor diferença entre a fração entre fundo e superfície (1,21%) também foram observadas em REF.

Nas áreas IMP e ARR, a tendência de acréscimo de MOS ao longo do perfil do sedimento foi significativa (diferente de “0”) e linear ($R^2_{\text{Pearson}} > 0,86$; $p < 0,05$), enquanto na área de REF a distribuição não foi linear ($R^2_{\text{Pearson}} = 0,43$) e a tendência não se diferiu significativamente de 0. Dentre as três áreas estudadas, a região

impactada colonizada por arroz bravo (ARR) foi a que apresentou a maior taxa de incorporação de material orgânico, aproximadamente 0,48% a cada 2 cm de camada depositada, enquanto na área impactada sem a presença do arroz (IMP) a taxa foi de 0,32% a cada 2 cm.

Tabela 9: Teores médios e máximos de matéria orgânica do sedimento (MOS), encontrados em cada estação de coleta, e a média para cada uma das três áreas estudadas. Análise de tendência linear no sentido fundo-superfície. Os coeficientes de inclinação (tendência) marcados com asterisco (*) são significativamente diferentes de “0” ($p < 0,05$).

Área	Nº de réplicas	Média do testemunho % (teor superficial %)	Diferença entre fundo e superfície (%)	Coefficiente de inclinação	r^2 (linear)
REF	7	21,45 (22,65)	1,21	0,09	0,43
IMP	11	17,56 (20,45)	4,41	0,32*	0,86
ARR	6	18,22 (22,09)	5,91	0,48*	0,86

A figura 22 mostra a distribuição vertical quando as estações de coleta são agrupadas de acordo com os três tipos de regiões amostradas REF, IMP e ARR. A porcentagem de MOS na fração 0-2 cm da área ARR (22,09%) foi mais próxima dos teores da área de REF do que aquela observada na fração 0-2 cm da área IMP (20,45%). A fração 0-2 cm da área IMP, no entanto apresentou maior desvio padrão em relação às outras frações superficiais, sugerindo uma maior heterogeneidade na região impactada.

Foi possível observar nas estações IMP e ARR, um decréscimo nas porcentagens de matéria orgânica com a profundidade, enquanto nas estações REF a distribuição foi mais homogênea ao longo do perfil, com porcentagens sempre acima de 20%. Esse resultado mostra o efeito do rejeito nas camadas mais inferiores das áreas que foram impactadas (IMP e ARR).

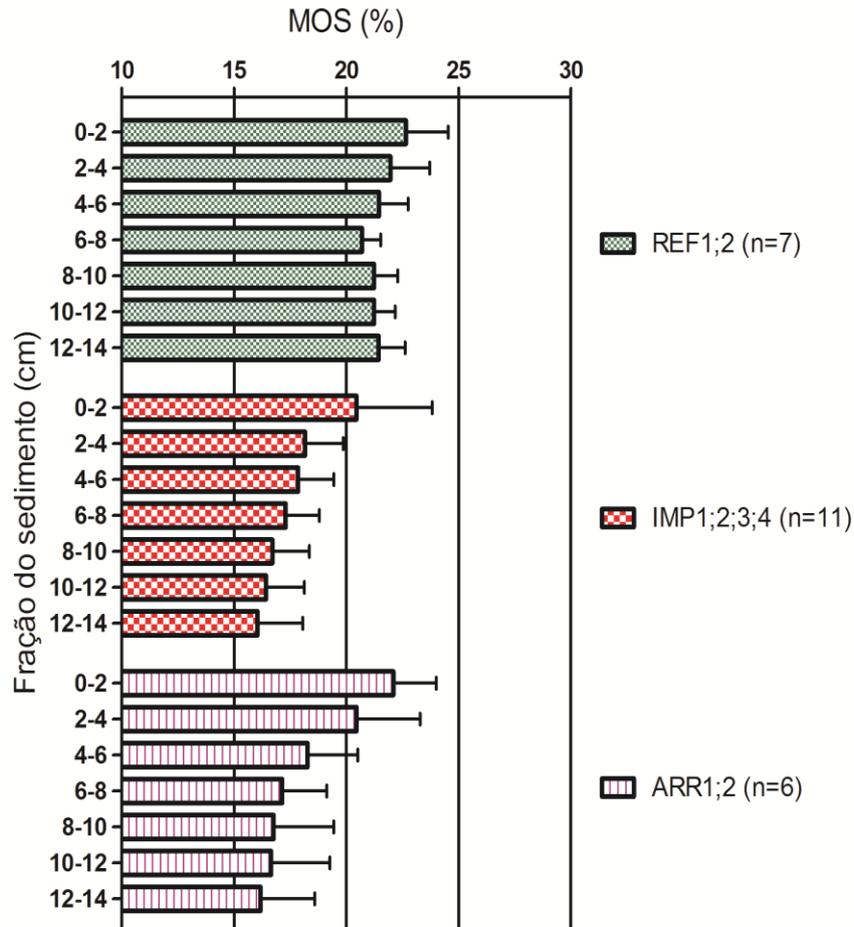


Figura 22: Valores médios dos percentuais de matéria orgânica no sedimento (MOS) e seus respectivos desvios padrão, juntando todas as amostras coletadas em áreas de referência (verde) (média: REF1, REF2), impactadas (vermelho) (média: IMP1, IMP2, IMP3, IMP4) impactadas colonizadas por estandes de arroz bravo (roxo) (média: ARR1, ARR2)

Os resultados da análise de covariância e do teste a posteriori de Tukey HSD estão apresentados na tabela 10 e na tabela 11 respectivamente. A inclinação que representa o ganho de MOS (no sentido fundo-superfície) da região impactada (IMP) se igualou à inclinação da área colonizada por arroz (ARR), sendo ambas maiores e estatisticamente diferentes da área de referência (REF) (figura 23). Esse resultado indica que apesar da contribuição da biomassa de arroz para superfície do sedimento impactado, o ganho de material orgânico por essa fonte não incrementa as camadas mais inferiores do sedimento, como resultado, as taxas de acúmulo de MOS por centímetro de camada formada nas áreas IMP e ARR foram estatisticamente iguais (ANCOVA, $p < 0,01$).

Tabela 10: Valores de p da análise de covariância ANCOVA utilizado para comparar as curvas de incremento de MOS ao longo do perfil do sedimento.

Fonte de variação	G.L	SQD	QM	F	Valor-p	Diferença significativa?
Intercepto	1	1497,173	1497,173	1622,235*	<0,01	-
Tratamento (Área)	1	29.762	29.762	32,248*	<0,01	Sim
Fração	2	63,224	31,612	34,252*	<0,01	Sim
Erro	17	15,689	0,923	-	-	-

Tabela 11: Valores de p do teste a posteriori de Tukey HSD da análise de covariância (ANCOVA). Diferenças entre áreas estatisticamente significativas marcadas com asterisco (*) ($p < 0,01$)

Tratamento	REF	IMP	ARR
REF			
IMP	0,000161*		
ARR	0,000171*	0,419278	

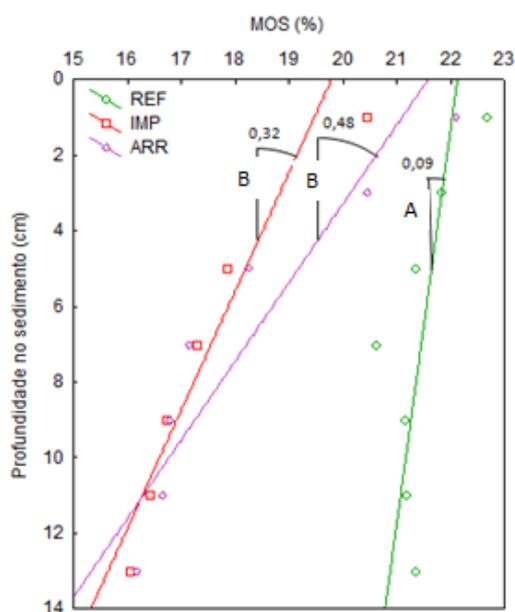


Figura 23. Ajuste linear da distribuição vertical de MOS ao longo do perfil, e o valor do coeficiente de inclinação para as três áreas estudadas: áreas de referência (verde) (média: REF1, REF2), impactadas (vermelho) (média: IMP1, IMP2, IMP3, IMP4) impactadas colonizadas por estandes de arroz bravo (roxo) (média: ARR1, ARR2). As letras indicam os coeficientes angulares estatisticamente iguais (ANCOVA - pós-teste de Tukey ($p < 0,01$)).

6. DISCUSSÃO

6.1 A tendência temporal (1989 - 2013) dos teores matéria orgânica no sedimento em áreas impactadas e de referência do lago Batata, e a influência do pulso de inundação no processo de restauração.

As tendências temporais de MOS ao longo dos 25 anos estudados (1989 - 2013) mostraram comportamentos distintos entre as áreas impactadas e de referência do lago Batata. Foi observado um acréscimo nas concentrações MOS na maioria das estações impactadas (IMP1, IMP2, IMP3 e IMP4). Parâmetros bióticos monitorados na região impactada do lago Batata já haviam indicado o reestabelecimento de diversos grupos associados ao compartimento bentônico. O aumento da riqueza de macroinvertebrados bentônicos nos últimos 10 anos (ESTEVES et alli, 2013) e de peixes nos últimos 15 anos (com ocorrência de espécies bentófagas) (LIN, CARAMASCHI, 2005; ESTEVES et alli, 2012) são alguns índices positivos que corroboram com as tendências descritas no presente trabalho, dado a importância da MOS na sustentação da cadeia trófica no sedimento.

Nas estações de referência o fenômeno oposto foi observado, houve um decréscimo nos teores de MOS ao longo dos anos monitorados. Devido a sua localização à jusante da área impactada, é possível que a estação REF2 tenha acumulado quantidades-traço de rejeito com o passar do tempo, trazidos por meio da cinética das águas a cada evento de pulso hidrológico. Isso, no entanto, não explica a tendência de acúmulo de MOS decrescente observada na estação REF1, que por sua vez está localizada numa baía protegida por uma faixa de terra (tabela 4). Sendo assim, os resultados sugerem que no lago Batata ocorre um processo de redução de MOS independente do impacto causado pelo rejeito.

A tendência de decréscimo na área de referência pode ter sido consequência de fatores hidrológicos, que não favoreceram o acúmulo de MOS ao longo do período estudado. Nesse sentido, o que foi observado nessa área pode estar associado à resuspensão e exportação de sedimento para fora do sistema, juntamente com uma baixa sedimentação de MOP. Em se tratando de sedimentação, Ferrão-filho (2000) observou no mesmo sistema uma maior taxa de sedimentação de MOP na estação REF2 em relação à estação IMP1, entre os anos de 1990 e 1991. Por uma questão morfológica, as fontes de MOP (igapó, macrófitas e vegetação terrestre) responsáveis pela manutenção do teor orgânico no compartimento bentônico, se encontram relativamente

mais distantes dos pontos de coleta REF (área aberta central) do que os pontos de coleta IMP (estreitamento do lago, com profundidade rasa e ocupado por igapó e estandes de arroz bravo). Tais características particularidades observadas entre as regiões estudadas nesse trabalho pareceu ter limitado a utilização da área de referência como área controle da impactada.

A avaliação das tendências em séries sazonais mostrou a contribuição individual de cada fase do pulso sobre as tendências encontradas nas séries completas. Em se tratando da região impactada, os resultados mostraram que a matéria orgânica é acrescentada à camada superficial do sedimento principalmente nas fases de enchente (E) e águas altas (AA) do pulso de inundação. Tais resultados corroboram com o modelo proposto por Junk (1989) no qual a inundação das regiões alagáveis promove a transferência de materiais (ex: serapilheira da vegetação de igapó) para dentro dos corpos d'água. A mortandade dos estandes de arroz bravo (*Oryza glumaepatula*) durante as águas altas possivelmente contribuiu com a tendência encontrada nessas fases do pulso.

Os coeficientes de tendência nas áreas impactadas foram geralmente superiores na fase de E quando comparados à fase de AA. Esse padrão sugere que o aporte de MO advinda do igapó é maior no primeiro contato das águas com a região terrestre (fase de enchente), se reduzindo ao longo de três meses até a fase de águas altas, quando grande parte da serapilheira produzida na última seca já foi transportada para o corpo d'água. Outra fonte importante de MO durante a enchente é o carreamento de material advindo do igarapé Caranã, durante o período de chuvas. Esse curso d'água deságua próximo à estação IMP4, e o conteúdo orgânico carregado possivelmente contribui para a MOS nas demais estações impactadas à jusante.

O efeito da decomposição sobre a biomassa de macrófita já depositada no sedimento é outro fator importante a se considerar. Em um experimento realizado por Enrich-Prast et alli, (2004), *litterbags* contendo biomassa de arroz bravo (*Oryza glumaepatula*) no lago Batata perderam cerca de 90% de seu peso seco em 120 dias (de março (E) até julho (AA) de 1995). Assim sendo, a hipótese de que a MOS se encontra em um estado mais avançado de decomposição durante a fase de águas altas pode ser a principal explicação para a diferença encontrada nos valores de tendência entre E e AA.

Foram encontrados poucos casos de tendência significativa nas fases de vazante (V) e águas baixas (AB) em todas as áreas estudadas, sugerindo que no lago Batata a

fase de descida das águas pouco contribuiu para o acréscimo ou decréscimo dos teores de MOS. No entanto, é possível que o ganho anual de MOS (durante a enchente/águas altas) seja “mascarado” por, pelo menos, dois processos capazes de resuspender parte da camada orgânica formada sobre o rejeito: (I) a formação de correntes internas através da ação de ventos, favorecido pela redução da profundidade do lago (como ocorre tipicamente em lagos rasos) (WETZEL, 2001) e (II) o carreamento do sedimento promovido pelo aumento da velocidade da corrente no lago Batata, sobretudo durante a vazante. Devido à esses dois fatores pode-se especular que a fase de vazante/águas baixas a MOS se encontra distribuída de forma mais heterogênea.

A avaliação da qualidade do séston no ano de 2013, apesar de pouco representativo no processo histórico da restauração, auxiliou no entendimento da dinâmica de sólidos (orgânicos e inorgânicos) entre as áreas marginais, a coluna d'água e o sedimento impactado. Nas estações impactadas, o aumento no STS foi acompanhado de uma redução das proporções de CT no séston. Esse comportamento antagônico sugere que o material particulado em suspensão sofre uma maior interferência do sedimento impactado (rejeito + MOS) durante as fases de V e AB. O maior valor de STS na região impactada durante a fase de enchente também pode ter ocorrido devido à proximidade dessas regiões da vegetação marginal (igapó).

A ausência de correlação significativa entre a clorofila *a* e as variáveis STS e CT no séston na área impactada, pode significar que o *pool* de partículas orgânicas em suspensão, apesar de reduzida pela interferência do rejeito, está mais relacionado com a matéria orgânica detrítica (advinda do igapó ou da resuspensão de sedimento) do que com a biomassa fitoplanctônica. A interpretação desse resultado em conjunto com a análise de tendência, sugere que o ganho anual de MOS pode não ter sido observado nas fases V e AB devido ao processo de resuspensão do sedimento superficial (3 cm) para a coluna d'água (figura 24). Sendo assim, o acesso ao histórico de acumulação de MOS através da amostragem de testemunhos do sedimento pode trazer mais informações à dinâmica da restauração do sedimento do lago Batata.

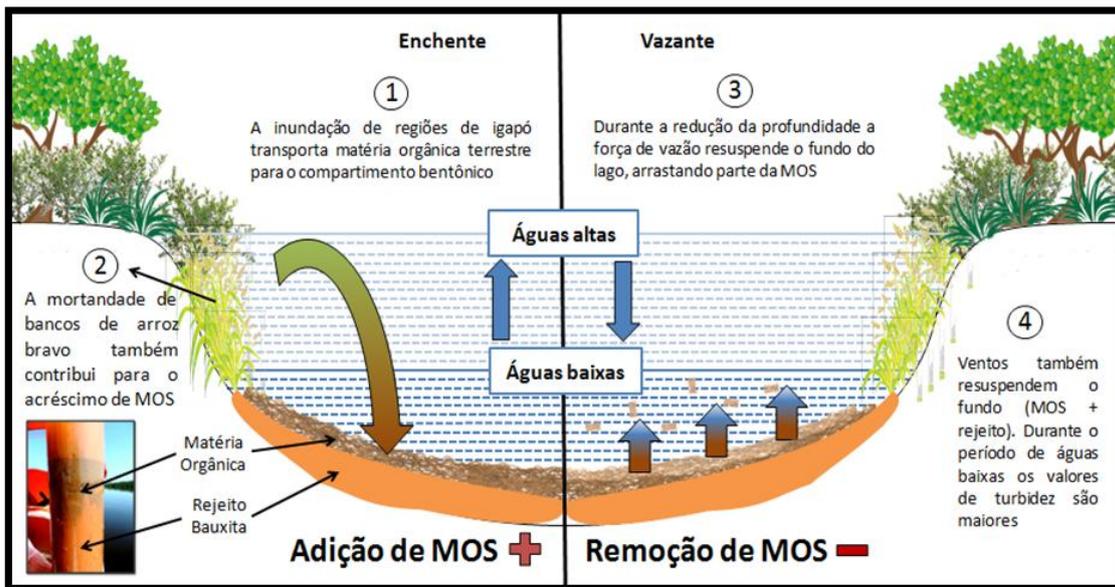


Figura 24: Modelo ilustrando (I) o processo de formação da camada de matéria orgânica sobre o sedimento durante o enchimento do lago Batata (fases de enchente e águas altas) e (II) o processo de resuspensão de parte da camada de MOS durante a descida das águas (fases de vazante e águas baixas). Linhas pontilhadas azul escuro representam a profundidade mínima durante a fase de águas baixas e as linhas pontilhadas azul claro representam a profundidade máxima durante a fase de águas altas.

Um estudo sobre a dinâmica do séston no lago Batata foi realizado entre os anos de 1989 e 1991 por Ferrão-filho (2000). Esse autor correlacionou valores de STS, carbono orgânico particulado total (COP) e clorofila *a* em 5 estações de referência e 5 estações impactadas. No referido trabalho foi encontrada uma relação significativa entre STS e clorofila *a* ($r^2=0,12$; $p<0,05$) e entre COP e clorofila *a* ($r^2 = 0,10$; $p < 0,05$). Em comparação com os resultados do presente estudo, pode-se inferir que nos primeiros anos de restauração do lago Batata, as variações observadas na fração orgânica em suspensão estavam mais associadas à produção fitoplanctônica, já que camada de MOS ainda não havia se estabelecido.

Por fim, foi possível observar correlação positiva entre STS e clorofila *a* na área de referência (R Spearman=0,79; $p<0,01$) e nenhuma correlação entre essas variáveis na área impactada (R Spearman=0,03; $p<0,01$). Esse resultado corrobora com o trabalho de Panosso (1993) realizado no lago Batata, indicando que em condições naturais a quantidade de sólidos em suspensão depende do processo de concentração e diluição da comunidade fitoplanctônica. A presença do rejeito, no entanto, parece interferir tanto no STS quanto na produção fitoplanctônica, o que pode explicar a ausência de correlação na área impactada.

6.2 A associação interanual entre o aporte de material alóctone e a variação da matéria orgânica do sedimento na área impactada

A análise de correlação cruzada não mostrou evidências para suportar a hipótese de que a camada de MOS regula o processo de resuspensão do rejeito. Caso esse processo ocorra no lago, o aumento da transparência da coluna d'água por conta da restauração da MOS ao longo dos anos deveria resultar em uma correlação negativa na FCC (MOS vs STS) da estação impactada, no momento 0, ou dentro de um intervalo de defasagens $-k$ não muito distantes de 0. No entanto, não foram encontradas correlações instantâneas entre as duas variáveis.

Ao invés disso, os resultados sugerem que na estação IMP1 haja uma relação de causa e efeito interanual entre essas variáveis, no qual altos valores na série de STS antecedem picos na série de MOS ($r^2 = 0,28 \pm 0,10$). Uma inspeção mais detalhada da série bruta mostra que a maior parte dos valores extremos de STS ocorreram durante a fase de vazante (V) e águas baixas (AB), seguidos por picos de MOS aproximadamente 1 ano depois (figura 25). Possivelmente o processo captado por essa análise foi a sedimentação de partículas orgânicas em suspensão advindas do ano anterior, juntamente com uma parcela depositada no ano atual. Segundo Ferrão-filho (2000) a taxa de sedimentação na estação IMP1 do lago Batata varia amplamente entre 1,2 e 34,8 $\text{g}_{\text{peso seco}} \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com maior deposição de carbono orgânico particulado durante o mês de dezembro (AB).

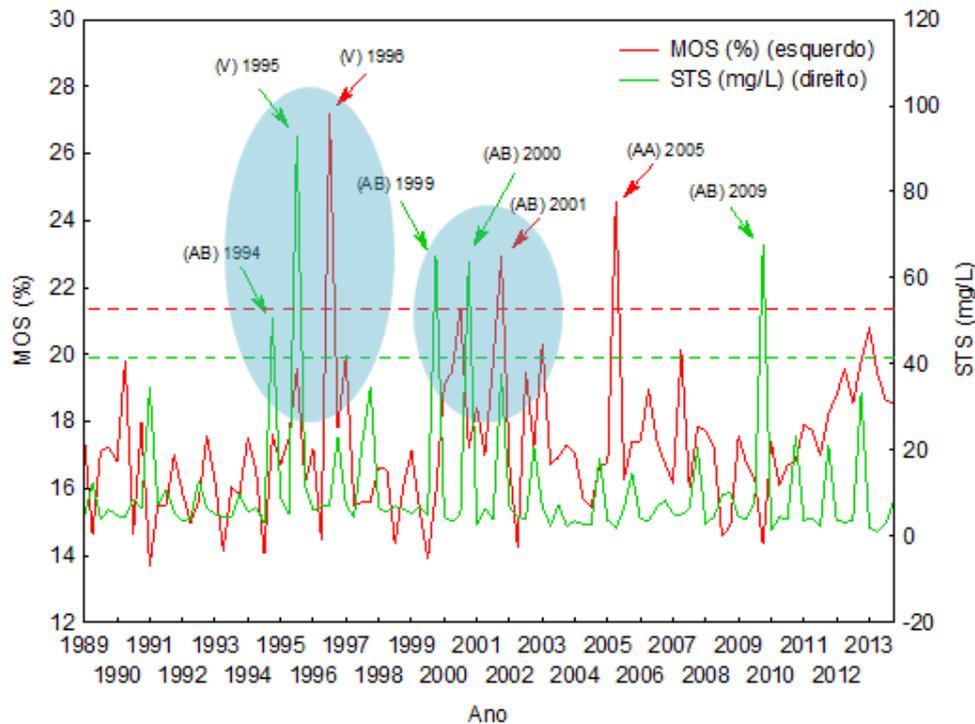


Figura 25: Séries de MOS (vermelho) e STS (verde) na estação REF1, ao longo dos 25 anos monitorados. As linhas pontilhadas demarcam o critério de definição dos valores extremos (acima da média + 2DP da série). O limites foram de 21,56 % para MOS e 41,67 mg/L para STS. Na área azul estão situações onde picos de STS antecedem picos de MOS.

A função de correlação cruzada entre STS e profundidade, por sua vez, indicaram que a variação hidrológica do lago Batata controla de forma imediata cerca de 53% da variação do STS. Os altos coeficientes de determinação encontrados possivelmente estão associados ao processo cíclico de diluição e concentração do séston, promovidos pela variação bem marcada do pulso de inundação.

Em se tratando de diferenças interanuais, vale resaltar que a mensuração trimestral da variação das águas no lago Batata é pontual e muito esparsa temporalmente para capturar alguns atributos hidrológicos importantes. Um estudo mais refinado a respeito das variações fluviométricas no lago Batata (CABRAL, 2014) calculou à partir de séries temporais diárias os eventos extremos de profundidade máxima e mínima desde 1972, dos quais justamente os anos de águas muito altas coincidiram com os picos de STS encontrados no presente estudo (figura 26). Dessa forma, é possível concluir que os valores extremos de STS encontrados principalmente na fase de V e AB (marcados em verde na figura 25 e 26) não são ocasionados por alta resuspensão em anos muito secos, e sim, pela concentração da maior carga alóctone aportada em anos de águas muito altas.

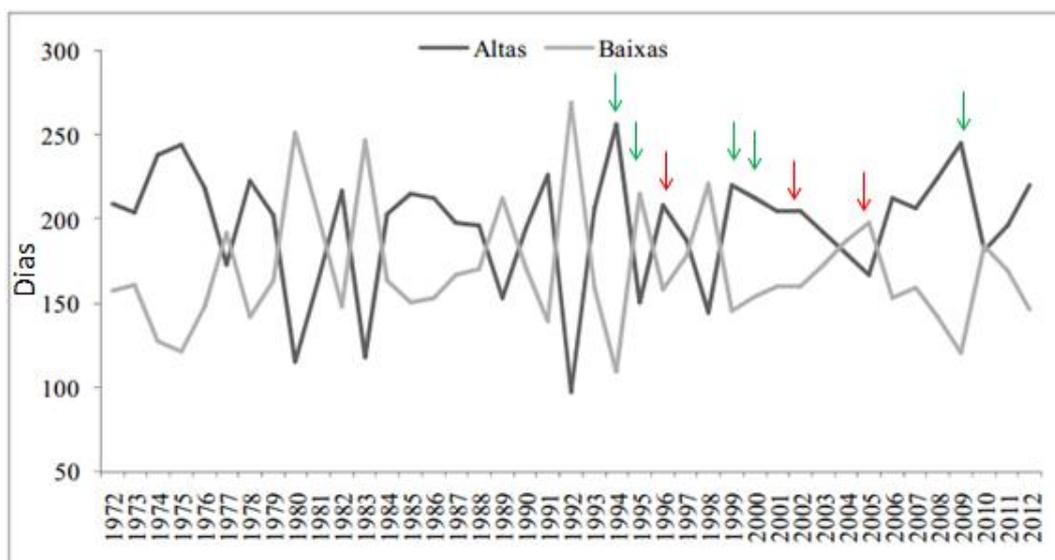


Figura 26: variações entre o total anual de dias de duração de águas altas (linha cinza escuro) e águas baixas (linha cinza claro) entre 1972 e 2012, com base nas alturas diárias registradas pela régua fluviométrica do rio Trombetas (Oriximiná, PA), representando seu trecho médio-inferior (fonte: modificado de Cabral, 2014). As setas vermelhas e verdes são, respectivamente, valores extremos de MOS e STS destacados nesse estudo, conforme apresentado na figura 25.

Não foi encontrada correlação significativa entre profundidade e a MOS para nenhuma das estações avaliadas, demonstrando que, apesar do aporte orgânico alóctone nas águas altas (confirmado pela análise de tendência sazonal), a variação na porcentagem de MOS, considerando toda a variação anual, é pouco responsiva às sazonalidade do pulso de inundação. O resultado da correlação cruzada entre MOS e profundidade pode parecer contraditório ao que foi observado na análise de tendência, no entanto o método de correlação pode ter sido mais sensível à distribuição heterogênea da MOS observada nas fases de V e AB devido à resuspensão do sedimento (como especulado anteriormente no tópico 6.1), enviesando assim o padrão de acúmulo adquirido nas fases de E e AA.

Segundo Panosso e Kubrusly (2000) pelo menos dois tipos de variações temporais determinam o funcionamento do lago Batata, as de curta escala (sazonais) e as de longa escala (interanuais). As variações interanuais em especial, são determinadas por diferenças na amplitude das inundações a cada ciclo sucessivo. A partir das relações discutidas até o momento no presente estudo, é possível afirmar que ambas as variações interanuais na amplitude do pulso de inundação, e as sazonais confirmadas pela análise de tendência, exercem influência sobre a restauração dos teores de MOS. Nos anos de

cheia extrema, que pode estar associado também à alta pluviosidade média anual, uma carga maior de material orgânico alóctone é carregado para dentro do lago Batata, sendo que parte dela só é incorporada ao sedimento no ano seguinte. Em outras palavras, os altos valores de STS são um reflexo da amplitude média anual da cheia enquanto os picos de MOS são um reflexo da maior carga alóctone do ano anterior.

6.3 A distribuição vertical dos teores de matéria orgânica no sedimento

O presente estudo demonstrou a importância do arroz como fornecedor de matéria orgânica para as camadas mais superficiais dos testemunhos ARR, essa diferença pôde ser constatada não somente pelas concentrações de MOS determinadas, mas também a partir da coloração das amostras, na qual as frações mais superficiais (até 6 cm) em ARR são mais escurecidas em relação às frações superficiais de IMP, indicando maior teor de MOS (figura 16). No entanto, em se tratando do testemunho como um todo, as tendências de acúmulo de MOS entre regiões IMP e ARR não foram diferentes entre si, indicando que os estandes de arroz bravo (*Oryza glumaepatula*) não influenciou de forma significativa na distribuição vertical da MOS ao longo do perfil.

A concentração média e a concentração superficial dos perfis de MOS, demonstra que as regiões diretamente colonizadas por arroz bravo (ARR) e aquelas que recebem o aporte de MO “indireto” durante as fases de enchente/águas altas (IMP), apresentam diferenças importantes. Possivelmente o enraizamento da macrófita ao sedimento impactado foi responsável por resguardar parte da biomassa (folhas e raízes) no local, resultando assim, em teores mais elevados de MOS com o passar de sucessivos ciclos de germinação e morte do arroz. Essa fonte autóctone de MO se mostrou importante para a restauração do ambiente, juntamente com as fontes alóctones discutidas nos tópicos anteriores.

Individualmente, os testemunhos obtidos da região IMP e da região ARR mostraram ser muito heterogêneos entre si, sugerindo que a MOS se distribui em machas no assoalho do lago Batata. Por exemplo, a estação ARR2 apresentou o maior coeficiente de inclinação linear de MOS por centímetro do sedimento dentre as estações estudadas, enquanto na ARR1, foi encontrado o menor coeficiente (cerca de três vezes menor), que por sua vez não apresentou bom ajuste linear (tabela 8). Em se tratando de restauração, pode-se inferir que além do aumento da MOS, a heterogeneidade do

sedimento pode ter sido outro fator importante para o retorno das comunidades bentônicas do lago Batata.

Utilizando a mesma metodologia para determinação de MOS, Figueiredo-Barros (2008) fez um estudo comparativo entre três lagos amazônicos, o lago Batata, o lago Mussurá (localizado próximo ao lago Batata na margem esquerda do rio Trombetas) e o lago Sapucaá, encontrando valores médios de 21,73%, 21,95%, 12,71% respectivamente. Apesar do impacto pelo rejeito, o lago Batata apresentou teores de MOS estatisticamente iguais ao lago Mussurá, sugerindo que a região pode apresentar alta produção de detritos orgânicos na faixa de inundação do rio Trombetas os mesmos que são responsáveis pela manutenção dos teores de MOS nos lagos da região.

O padrão de distribuição vertical encontrado no testemunho da área impactada também foi encontrado em perfis do sedimento obtidos em outros sistemas lagunares neotropicais. Loreiro et alli (2012) observou decréscimo de nutrientes associados à MOS (C, N, P e S) em testemunhos de 60 cm na Lagoa Rodrigo de Freitas (RJ), e Alves et alli (2013) encontrou na lagoa Manguaba (AL) redução gradativa de MOS até os 15 cm de profundidade. Provavelmente o processo de sedimentação de MOP dá origem a essa conformação, pois o material orgânico mais recente se encontra nas camadas superiores enquanto a matéria orgânica biologicamente menos ativa denominada “sedimento permanente”, se encontra estocada nas camadas mais profundas (ESTEVES, CAMARGO, 2011). No caso do lago Batata, esse padrão de decréscimo linear com a profundidade ocorreu também por influência do rejeito de bauxita, fato que pode ser confirmado pela homogeneidade dos valores de concentração ao longo dos perfis verticais das estações de referência.

Levando em conta as taxas de acréscimo encontradas nesse estudo é possível inferir que a região ARR se recupera do impacto mais rapidamente em relação à região IMP. Nesse sentido, apesar das diferenças morfométricas, a distribuição encontrada na área REF pode ser tomada como referência do lago, no entanto, sem as taxas de sedimentação mais atuais não se pode calcular o quanto cada centímetro do perfil representa em termos cronológicos. Partindo da premissa que a deposição no lago Batata é constante espacialmente e temporalmente, é possível prever um cenário no qual o sedimento da área ARR e IMP alcançarão a área REF em cerca de 2 e 12 cm de camada nova, respectivamente. Sendo assim, os estandes de arroz bravo tem o potencial de tornar a restauração do compartimento bentônico até seis vezes mais rápida.

7. CONCLUSÕES

* O acréscimo dos teores de matéria orgânica no sedimento impactado ocorre principalmente durante as fases enchente e águas altas do pulso hidrológico. As fases de vazante e águas baixas não mostraram tendência, possivelmente devido à resuspensão do sedimento (ventos /correntes internas) e decomposição parcial da matéria orgânica depositada no mesmo ano.

* As variações interanuais do pulso de inundação também influenciaram no processo de restauração do sedimento, sendo os anos de cheias extremas, importantes para o maior aporte de material alóctone, que por sua vez, é incorporado ao sedimento cerca de um ano depois.

* O material particulado orgânico em suspensão nos primeiros anos de restauração esteve mais associado às fontes autóctones (biomassa fitoplanctônica), mas à medida que a camada de MOS se formou sobre o sedimento impactado, o carbono em suspensão passou a receber contribuição de detritos resuspendidos.

* Não foi constatada correlação entre o acréscimo de MOS e a redução do STS ao longo dos anos. Provavelmente a recuperação da transparência do lago se deve à compactação do rejeito, independentemente do teor orgânico.

* A contribuição dos estandes de arroz bravo (*Oryza glumaepatula*) na restauração do compartimento bentônico se restringiu às primeiras camadas do sedimento (até 6 cm de profundidade), mas não se diferenciou da área impactada sem arroz (IMP) em termos de distribuição vertical de MOS.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAWAL, A.; SAHU, K. K.; PANDEY, B. D. Solid Waste Management in Non-ferrous Industries in India. **Resources e Conservation and Recycling**, n. 42, p. 99 - 120. 2004

ALUMINARONDON 2015. Publicado em sítio eletrônico. Acessível em: <<http://www.aluminarondon.com.br/pt-br/Paginas/ConhecaAluminaRondon.aspx>>. Acessado em: Dez 2014.

ALVES, M. C.; SPORL, G.; BERNARDES M. C.; KNOPPRS, B. A. Traçadores da material orgânica nos sedimentos de um sistema lagunar tropical do nordeste do Brasil. **A Geoquímica no Brasil e no Mundo**. Sociedade Brasileira Geoquímica, 2013.

BNDES - BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO. A indústria do alumínio: estrutura e tendências. **BNDES Setorial: Insumos Básicos** [CARDOSO, J. G. da R., CARVALHO, P. S. L., FONSECA, P. S. M., SILVA, M. M., ROCIO, M. A. R. (Eds.)] n.33. p43-88 2010.

BOZELLI, R. L. Zooplankton In: BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; ROLAND, F. **Lago Batata: Impacto e recuperação de um ecossistema amazônico**. Rio de Janeiro: IB-UFRJ/SBL, p. 119–138, 2000.

BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A. Species diversity, evenness and richness of the zooplankton community of Batata and Mussurá lakes of the Trombetas river, Amazônia, Brazil. **International Conference on Tropical Limnology: Tropical Lakes and Reservoirs**, v 2, p. 87-93. 1995

CALLISTO, M. F. P.; ESTEVES, F. A. Distribuição da comunidade de macroinvertebrados bentônicos de um ecossistema amazônico impactado por rejeito de bauxita - Lago Batata, Pará, Brasil. In: ESTEVES F. A. (Ed.). Estrutura, Funcionamento e Manejo de Ecossistemas Brasileiros. **Oecologia Brasiliensis**, v.1, Rio de Janeiro. p. 281-291. 1995

CNEC - Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores. RIMA - Relatório de Impacto Ambiental. Alcoa, Juruti, Pará, p.69, 2005

COURTNEY, R.; MULLEN, G.; HARRINGTON, T. An Evaluation of Revegetation Success on Bauxite Residue. **Restoration Ecology**, v. 17, n. 3, p 350-358. Mar 2009.

DEZEM, V. Votorantim lança projeto de US\$ 3,3 bilhões no Pará. **Valor Econômico**, Jul 2012. Disponível em: <http://amazonia.org.br/2012/07/votorantim-lan%C3%A7a-projeto-de-us-33bil%C3%B5es-no-par%C3%A1/>. Acesso em: 18 nov. 2014.

DIAS, A. T. C.; BOZELLI, R. L.; DARIGO, R. M.; ESTEVES, F. A.; SANTOS, H. F.; FIGUEIREDO-BARROS, M. P.; NUNES, M. F. Q. S.; ROLAND, F.; ZAMITH, L. R.; SCARANO F. R. Rehabilitation of a bauxite tailing substrate in Central Amazonia: The effect of litter and addition on flood-prone forest restoration. **Restoration Ecology**, v. 20, N. 4, p. 483-489. Jul. 2012.

DIAS, J. C.; LIMA, W. N. Comparação de métodos para determinação de matéria orgânica em amostras ambientais. **Revista científica da UFPA**. v. 4, 2004.

DNPM/PA - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Alumínio. **Sumário Mineral 2013**. 2013. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/aluminio-sumario-mineral-2014>>. Acessado em: Dez 2014.

DNPM/PA - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Alumínio. **Sumário Mineral 2012**. 2012. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/aluminio-sumario-mineral-2013>>. Acessado em: Dez 2014.

EHLERS, R. S. Análise de séries temporais. Ed 5, Apostila desenvolvida como material didático institucional - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). p. 1-20, 2009

ENRICH-PRAST, A.; MEIRELLES-PEREIRA, F.; ESTEVES, F. A. Development of periphytic bacteria associated with the detritus of Amazonian aquatic macrophyte *Oryza Glomaepatula*. **Amazoniana**, v. 18, p. 81-93, 2004.

ESTEVES F. A.; Princípios ecológicos para a restauração do impacto. In: BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; ROLAND, F. **Lago Batata: Impacto e recuperação de um ecossistema amazônico**. Rio de Janeiro: IB-UFRJ/SBL, p. 1-16, 2000.

ESTEVES F. A.; Restauração de ecossistemas lacustres. In: ESTEVES, F. A. (Coord.). **Fundamentos de Limnologia**. 3º ed, Rio de Janeiro: Interciência, p. 657-699, 2011.

ESTEVES F. A.; CAMARGO, A. F. M. Sedimentos Límnicos. In: ESTEVES, F. A. (Coord.). **Fundamentos de Limnologia**. 3º ed, Rio de Janeiro: Interciência, p. 339-354, 2011.

ESTEVES F. A.; GONÇALVES-JÚNIOR, J. F. Etapas do metabolismo aquático. In: ESTEVES, F. A. (Coord.). **Fundamentos de Limnologia**. 3º ed, Rio de Janeiro: Interciência, p. 119-124, 2011.

ESTEVES, F. A.; ROLAND F.; BOZELLI R. L. Monitoramento ecológico do lago Batata 2010 (PA-Brasil). 144 p. 2012.

ESTEVES, F. A.; BOZELLI R. L.; ROLAND, F. Comparison of the metabolism of two floodplain lakes of Trombetas river (Pará, Brazil) based on a study of diel variation. **Amazoniana**, v. 13, p. 33-46. 1994.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia brasileira história, índices e consequências. **Megadiversidade**. v.1, n. 1, INPA, Manaus, Amazonas, Jul. 2005

FERRÃO-FILHO, A. S. Dinâmica do séston. In: BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; ROLAND, F. **Lago Batata: Impacto e recuperação de um ecossistema amazônico**. Rio de Janeiro: IB-UFRJ/SBL, p. 179-202, 2000.

- FIGUEIREDO-BARROS, M. P. Efeito da variabilidade espaço-temporal e bioturbação por invertebrados bentônicos na concentração e emissão de metano (CH₄) em ecossistemas aquáticos continentais. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - programa de pós-graduação em Ecologia, 171 p. 2008
- FONSECA, J. J. L.; ESTEVES, F. A. Influence of bauxite tailings on the structure of benthic macroinvertebrates community in an Amazonian lake (lago Batata, Pará - Brazil). **Rev. Bras.** v. 59, n. 3, São Carlos, 1999.
- FURTADO, A. L. S.; CASPER, P.; ESTEVES, F. A. Methanogenesis in an impacted and dystrophic coastal lagoons (Macaé, Brazil). **Braz. Arch. Biol. Techn.** n. 45, v. 2, p. 195-202. 2002.
- GARDNER, J. H.; BELL, D. T. Bauxite Mining Restoration by Alcoa World Alumina Australia in Western Australia: Social, Political, Historical, and Environmental Contexts. **Restoration Ecology**, v. 15, n. 4 (suplemento), p. S3-S10. Dez. 2007.
- GUENTHER, M.; BOZELLI, R. Effect of inorganic turbidity on the phytoplankton of an Amazonian Lake impacted by bauxite tailings. **Hydrobiologia**, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, v. 511, p. 151-159, 2004
- GOLDIN, A. Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in noncalcareous soils. **Commun. Soil Sci. Plant. Anal.** v. 18, p. 1111-1116, 1987.
- GRANT, C. D.; WARD, S. C.; MORLEY, S. C. Return of Ecosystem Function to Restored Bauxite Mines in Western Australia. **Restoration Ecology**, v. 15, n. 4 (suplemento), p. S94-S103. Dez 2007.
- HIND, R. A.; BHARGAVA, S. K.; GROCCOTT, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **Colloids and surfaces: Physicochemical and engineering aspects**. n. 146, p. 359-374. 1999.
- HIRSCH, R.M.; SLACK, J. R. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. **Water Resources Research**, v. 20, n. 6, p.727-732. 1984
- HYUN, J.; ENDOH, S.; MASUDA, K.; SHIN, H.; OHYA, H.; Reduction of chlorine in bauxite residue by fine particle separation. **International Journal of Mineral Processing**. n. 76, p. 13-20. 2005
- IAI - INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. Bauxite Residue Management: Best Practice. pp. 32. Ago 2014.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Projeto Levantamento e Classificação do Uso da Terra. **Relatório Técnico: Uso da Terra no Estado do Pará**. Rio de Janeiro, 2013.
- IRION, G.; JUNK, W. J.; MELLO, J. A. S. N. The large central Amazonian river floodplains near Manaus: geological, climatological, hydrological and geomorphological aspects. In: JUNK W. J. **The Central Amazon Floodplain**. Ed. Springer-Verlag: New York, p. 23-46, 1997.

- JACKSON, M. L. Soil Chemical Analysis. Prentice-Hall, INC. Englewood Cliffs, New York, USA. 1962.
- JUNK, W. J.; BAYLEY, P.; SPARKS, R. The flood pulse concept in riverfloodplain systems. **Special Publication of the Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 106, p. 110-127, 1989.
- JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F.; LOURIVAL, R.; WITTMANN, F. K.; LACERDA, P.; BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; CUNHA, C. N.; MALTCHIK, L.; SCHÖNGART, J.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; AGOSTINHO, A. A. Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. **Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst**, v. 24, p. 5-22, 2014.
- JUNK, W. J.; WANTZEN, K. M. 2004 The flood pulse concept: new aspects, approaches and applications - an update. In **Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries**, Bangkok: FAO Regional Office for Asia and the Pacific; RAP Publication. p.117-140, 2003.
- KENDALL, M. G. Rank Correlation Methods. Charles Griffin, London, 1975
- KOCH, J. M.; HOBBS, R. J. Synthesis: Is Alcoa Successfully Restoring a Jarrah Forest Ecosystem after Bauxite Mining in Western Australia? **Restoration Ecology**, v. 15, n. 4 (suplemento), p. S137-S144, 2007.
- LOREIRO, D.; FERNADEZ, M.; HERMS, F.; ARAÚJO, C.; LACERDA, L. D. Distribuição dos metais pesados em sedimentos da lagoa Rodrigo de Freitas. **Oecologia Australis**. v. 16, n. 3, p. 353-364, 2012
- CABRAL, G. L. L. Efeitos de eventos climáticos globais, regionais e antrópicos sobre a taxocenose de peixes de um lago amazônico. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - programa de pós-graduação em Ecologia, p. 115, 2014.
- LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. Ecological Data Series. In: **Numerical Ecology**. Ed. 2, p. 637-704. 1998
- LIN, D. S. C.; CARAMASCHI, E. P. Responses of the fish community to the flood pulse and the siltation in a flood plain lake of the Trombetas River, Brazil. **Hidrobiologia**, v. 545, p. 75-91, 2005
- MALMQVIST, B.; RUNDLE, S. R. Threats to the running water ecosystems of the world. **Environmental Conservation**. n. 29, p. 134-153, 2002
- MANN, H. B. Non-parametric test against trend. **Econometrica**. v. 13, p. 245-259, 1945.
- MARTURANO, E. S.; SILVA, E. G.; SANTOS, O. P.; BASTOS, R. S. Mineração na Amazônia e impactos na nascente da microbacia do rio Água Boa em Juriti. **Revista Geonorte**, v.3, n.4, p 1093 - 1104, 2012.
- MAVROMATIS, T.; STATHIS, D. Response of the Water Balance in Greece to Temperature and Precipitation Trends. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 104, p. 13-24, 2011.

MELACK J. M.; SIPPEL S. J.; VALERIANO D. M.; FISHER T. R.. Environmental conditions and change on the Amazon floodplain: an analysis with remotely sensed imagery. In: **24th International Symposium on Remote Sensing of Environment**. 1991.

NNSMP - NATIONAL NONPOINT SOURCE MONITORING PROGRAM. Statistical Analysis for Monotonic Trends. **Technotes**, v. 6, 23 p. Nov. 2011.

NORMAN, M. A.; KOCH, J. M.; GRANT, C. D.; MORALD, T. K.; WARD, S. C. Vegetation succession After bauxite mining in western Australia. **Restoration Ecology**, v. 14, n. 2, p. 278-288. Jun 2006.

OHLE, W. General consideration on environmental problems of lakes. In: **International Congress Of Scientists On The Human Environment**. Kyoto, Japan. p. 383-390. 1976

PALMER, M. A.; BERNHARDT, E. S.; ALLAN, J. D.; LAKE, P. S.; ALEXANDE, G. R.; BROOKS, S.; CARR, J.; CLAYTON, S.; DAHM, C. N.; FOLLSTAD-SHAH, J.; GALAT, D. L.; LOSS, S. G.; GOODWIN, P.; HART, D. D.; HASSETT, B.; JENKINSON, R.; KONDOLF, G. M.; LAVE, R.; MEYER, J. L.; O'DONNELL, T. K.; PAGANO, L.; SUDDUTH, E. Standards for ecologically successful river restoration. **Journal of Applied Ecology**, v. 42, p. 208-217, 2005.

PALMER, M. A.; ALLAN, J. D.; MEYER, J.; BERNHARDT, E. S. River restoration in the twenty-first century: data and experimental knowledge to inform future efforts. **Restoration Ecology**, v. 15, n. 3, p. 472-481. 2007.

PANOSSO, R. F. Considerações geográficas e geomorfológicas. In: BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; ROLAND, F. **Lago Batata: Impacto e recuperação de um ecossistema amazônico**. Rio de Janeiro: IB-UFRJ/SBL, p. 37-54, 2000.

PANOSSO, R.; KUBRUSLY, L. Avaliação espacial e temporal das variáveis limnológicas básicas e nutrientes. In: BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; ROLAND, F. **Lago Batata: Impacto e recuperação de um ecossistema amazônico**. Rio de Janeiro: IB-UFRJ/SBL, p. 55-72, 2000.

PANOSSO, R. F.; MUEHE, D.; ESTEVES, F. A. Morphological characteristics of an Amazon floodplain lake (Lake Batata, Pará State, Brazil). **Amazoniana** v. 13, p. 245-258, 1995

PANOSSO, R. F. Influência do regime hidrológico e das características morfométricas sobre algumas variáveis limnológicas de um lago amazônico (lago Batata, PA) impactado por rejeito de bauxita. Rio de Janeiro, UFRJ PPGE 120 p. 1993

PARROTA, J. A.; KNOWLES, O. H. Restoration of tropical moist forests on bauxite-mined lands in Brazilian Amazon. **Restoration Ecology** v.7, p. 103-116. 1999

PEREIRA, A. L. Princípios da restauração de ambientes aquáticos continentais, Universidade Federal do Paraná (UFPR) – Laboratório de Ecologia, Pesca e Ictiologia (LEPI). Palotina, PR, p. 21, 2011.

ROLAND, F. Produção primária fitoplanctônica em um lago amazônico impactado por rejeito de bauxita - lago Batata, Pará. Tese - Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) - programa de pós-graduação em Ecologia e Recursos Naturais, p. 117. 1995

ROLAND, F.; ESTEVES, F. A.; BARBOSA, F. A. R. Relationship between antropogenically caused turbidity and phytoplankton production in a clear Amazonian floodplain lake. **Amazoniana**, v. 12, n. ½, p. 65-77, 2002

ROLAND, F.; CELINA, M. L. F.; KUBRUSLY, L. Nutrientes e composição química do sedimento. In: BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; ROLAND, F. **Lago Batata: Impacto e recuperação de um ecossistema amazônico**. Rio de Janeiro: IB-UFRJ/SBL, p. 205-215, 2000.

RUIZ-JEAN, M. C.; AIDE, T. M. Restoration success: How is it being measured? **Restoration Ecology**. v. 13, n. 3, p. 569 - 577, 2005

SEBER, G. A. F.; WILD, C. J. Encontros com o acaso: Primeiro curso de análise de dados e inferência. 1º edição. Ed. LTC, p. 359-377. 2004.

SER - SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION. Princípios da SER *international* sobre a restauração ecológica. **Grupo de Trabalho sobre Ciência e Política**. v. 2, p. 15, Out 2004.

SILVA J. P. S. Impactos ambientais causados por mineração. **Revista espaço da Sophia**. n.08, ANO 1, ISSN 1981-318x, mensal, Nov. 2007

SILVA-FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; Da MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, característica, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**. v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007.

SIOLI, H. The Amazon and its main affluents: Hydrography, morphology of the river courses, and river types. In: SIOLI, H. (Ed.). The Amazon: limnology and landscape of a mighty tropical river and its basin. **Dordrecht Sci.**, v. 7 (Studies in ecology), p. 493-570. 1984.

SNUC - SISTEMA NACIONAL DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO. Lei N° 9.985, Capítulo I, Art. 2°. Regulamentado pelo art. 225, § 1°, incisos I, II, III, VII da **Constituição Federal**. Brasília, DF, 18 jul. 2000. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=322>

UNGEMACH, H. Sedimentchemismus und seine beziehung zum Stoffhaushalt in 40 europaischen Seen. Universitat Kiel. 1960

USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Bauxite and Alumina. **Mineral commodity summaries**. p. 26-27. Fev. 2014. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/bauxite/>. Acessado em: Dez 2014.

YUE, S., WANG, C. The Mann-Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series. **Water Resources Management**, v. 18, p. 201-218. 2004.

WANDERLEI, L. J. M. Conflitos e impactos ambientais na exploração dos recursos minerais na Amazônia. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - PPGG/UFRJ - em 2008.

WETZEL R. G. Sediments e microflora In: **Limnology: Lake and River Ecosystems (3° edition)**. Ed. Elsevier. p. 631-664. 2001

XAFI J. J. da S.; TEIXEIRA S. G.; FONSECA, D. D. F. Geodiversidade do Pará - Programa Geologia do Brasil: Levantamento da geodiversidade. Belém, Brasil CPRM. 2013.

9. ANEXOS

Anexo 1: Dados brutos de matéria orgânica no sedimento superficial (3 cm) nas estações estudadas

Ano	Fase do pulso de inundação	REF1	REF2	IMP1	IMP2	IMP3	IMP4	IMP5
1989	E							
1989	AA	23,27	24,90	14,64				
1989	V							
1989	AB							
1990	E		19,18	16,82	13,84	12,59	14,46	13,08
1990	AA		20,71	19,82		16,03	14,62	15,49
1990	V	14,33	16,70	14,66				
1990	AB	23,58	22,38	17,96				
1991	E	23,10	27,50	13,70	13,50	13,10	14,00	13,20
1991	AA	23,80	22,30	15,50	14,40	15,90	14,50	13,70
1991	V	23,70	22,30	15,50	15,00	14,70	21,40	
1991	AB	22,10	21,30	17,00				
1992	E	23,20	21,95	15,87	14,60	14,56	15,99	
1992	AA	17,36	21,70	14,97	14,64	15,86	18,32	
1992	V	29,41	23,07	15,63				
1992	AB	23,27	22,37	17,57				
1993	E	23,15	21,46	16,20				
1993	AA	21,94	21,08	14,12				
1993	V	21,73	20,51	16,04				
1993	AB			15,83				
1994	E							
1994	AA			16,54				
1994	V			14,07				
1994	AB			17,63				
1995	E	23,82	21,28	16,70	15,46	18,36	15,28	
1995	AA	22,25	20,85	17,47	15,66	18,79	14,73	16,00
1995	V	21,92	20,96	19,58				
1995	AB	22,80	20,47	16,18				
1996	E	22,41	22,41	17,16	15,43	15,57	18,11	14,07
1996	AA	22,50	22,25	14,46	15,32	16,27	16,05	14,34
1996	V	22,84	22,84	27,21	14,87	14,87	20,69	
1996	AB	22,30	22,30	17,81				
1997	E	22,71	21,02	19,97	15,24	20,47	17,27	14,64
1997	AA	21,40	20,00	15,48	15,06	19,46	25,50	
1997	V	22,20	20,80	15,60	16,10	15,80		
1997	AB		19,87	15,61				
1998	E	22,19	18,51	16,63	15,74	16,45	16,20	
1998	AA	21,61	20,32	16,57	15,52	20,75	14,32	
1998	V	23,63	21,32	14,34	14,77	23,53	20,95	
1998	AB	21,56	21,38	16,04				
1999	E	18,15	18,34	17,12	18,45	13,45	14,43	17,56
1999	AA	24,18	21,92	15,39	12,18	19,27	15,30	19,29
1999	V	25,12	26,42	13,90	12,92	13,93	14,89	
1999	AB	22,46	18,58	15,87				
2000	E	23,59	21,98	19,10	16,53		18,78	
2000	AA	18,29	19,30	19,51	18,73	23,47	15,45	

2000	V	21,30	22,89	21,37				
2000	AB	19,81	23,02					
2001	E	21,15	20,22	18,42	16,77	17,24	17,08	18,12
2001	AA	17,45	18,73	16,99	16,81	17,64	18,56	18,63
2001	V	18,69	21,78	19,76	20,12	20,02	18,26	18,65
2001	AB	27,18	23,56	22,92				
2002	E	20,19	21,55	16,66	16,78	15,45	16,23	20,89
2002	AA	18,54	18,91	14,25	13,24	14,56	14,54	20,67
2002	V	21,45	20,46	19,48	18,15	17,89	17,80	18,44
2002	AB	22,45	21,74					
2003	E	20,54	19,30	20,31	22,91	14,00	15,78	
2003	AA	21,63	19,88	16,71	18,49	19,28	16,06	14,35
2003	V	21,39	19,25	16,93	17,12	15,06	16,75	
2003	AB	21,58	17,31	17,31				
2004	E	21,79	19,92	17,03	14,42	22,44	18,99	13,64
2004	AA	20,64	19,94	15,67	15,56	14,83	16,36	13,28
2004	V	21,30	20,07	15,43	15,28	15,67	16,28	14,31
2004	AB	21,47	19,39	16,70				
2005	E	22,18	19,94	16,75	15,74	21,29	15,49	14,49
2005	AA	21,76	19,40	24,58	16,00	14,58	16,36	13,99
2005	V	20,90	19,06	16,28				
2005	AB	21,45	19,44	17,40				
2006	E	22,90	20,77	17,40	16,16	23,33	23,88	14,88
2006	AA	22,57	21,59	18,95	17,05	18,76	18,45	15,99
2006	V	22,22	20,92	17,42	15,95	25,23		
2006	AB	22,02	20,50	16,75				
2007	E	21,28	19,80	16,15	15,50	24,63	13,96	13,66
2007	AA	23,86	22,24	20,13	18,17	21,20	18,83	16,99
2007	V	22,02	20,54	16,00	16,56	16,65	21,91	
2007	AB	19,72	21,49	17,85				
2008	E	21,67	20,42	17,73	16,14	17,50	17,11	10,97
2008	AA	21,44	19,09	17,20	16,46	22,45	13,62	12,81
2008	V	19,03	18,78	14,56	12,24	13,72		12,99
2008	AB	15,37	18,46	14,89				
2009	E	21,73	20,03	17,56	16,81	21,19	22,21	13,22
2009	AA	20,78	18,58	16,73	16,03	15,17	16,08	14,02
2009	V	17,83	18,75	16,24	15,46	20,13	20,34	11,41
2009	AB	19,80	18,59	14,33				
2010	E	22,03	20,64	17,37	18,41	20,88	21,29	15,14
2010	AA	17,63	18,73	16,10	15,56	16,23	18,39	17,68
2010	V	21,47	20,57	16,69				
2010	AB	19,53	18,81	16,81				
2011	E	21,66	20,58	17,93	16,28	20,84	22,59	14,72
2011	AA	24,11	21,21	17,73	17,75	19,47	23,01	14,54
2011	V	22,33	19,58	17,01	16,23	24,15	19,08	15,21
2011	AB	22,63	20,66	18,23				
2012	E	21,16	22,13	18,80	17,53	25,71	18,84	15,45
2012	AA	22,21	21,71	19,57	17,15	21,35	17,43	14,92
2012	V	22,53	21,07	18,55	18,68	26,64	16,93	15,76
2012	AB	21,99	21,33	19,81				
2013	E	22,87	21,17	20,79	16,88	20,49	21,04	17,91
2013	AA	22,38	20,58	19,43	17,01	24,13	18,62	14,75
2013	V	22,52	21,32	18,63	17,51	22,32	18,56	15,23
2013	AB	21,38	21,38	18,54	17,23	23,37		

Anexo 2: Dados brutos de STS, concentração de CT séston e concentração de clorofila α nas estações estudadas.

Sólidos totais em suspensão (STS mg/L) 2013				
Estação	E	AA	V	AB
REF1	0,30	1,30	1,00	10,75
REF2	2,40	1,00	2,75	6,40
IMP1	2,00	1,00	3,00	8,20
IMP2	2,17	1,50	2,50	6,42
IMP3	2,00	1,70	5,25	
IMP4	11,00	1,90	32,67	
IMP5	3,90	2,40	10,71	
Média	3,40	1,54	8,27	7,94
DP	3,51	0,51	11,22	2,05
Média REF	1,35	1,15	1,88	8,58
DP REF	1,48	0,21	1,24	3,08
Média IMP	4,21	1,70	10,83	7,31
DP IMP	3,88	0,51	12,64	1,26

Teor de carbono total (%) 2013				
Estação	E	AA	V	AB
REF1	47,49	34,97	23,69	29,41
REF2	35,04	49,28	43,90	41,94
IMP1	51,48	45,02	19,13	41,76
IMP2	45,77	49,85	44,33	16,37
IMP3	87,05	36,72	24,86	
IMP4	66,82	53,85	5,11	
IMP5	28,66	35,68	43,23	
Média	51,76	43,62	29,18	32,37
DP	19,75	7,78	15,13	12,17
Média REF	41,27	42,12	33,80	35,68
DP REF	8,80	10,12	14,29	8,86
Média IMP	55,96	44,22	27,33	29,06
DP IMP	22,10	7,97	16,65	17,95

Concentração de clorofila α ($\mu\text{g/L}$) 2013				
Estação	E	AA	V	AB
REF1	5,15	3,58	4,68	21,20
REF2	5,31	2,72	15,14	14,37
IMP1	3,54	4,05	4,68	12,88
IMP2	2,42	4,36	4,13	2,52
IMP3	5,75	4,49	5,84	2,41
IMP4		3,19	0,30	
IMP5	1,98	2,30	6,61	
Média	4,03	3,53	5,91	10,68
DP	1,61	0,83	4,53	8,13
Média REF	5,23	3,15	9,91	17,79
DP REF	0,11	0,61	7,40	4,83
Média IMP	3,42	3,68	4,31	5,94
DP IMP	1,68	0,92	2,44	6,01

Anexo 3: Valores de porcentagem de MOS nos testemunhos do sedimento obtidos de 2012 a 2014.

	Fração (cm)	Estação de coleta							
		REF1	REF2	IMP1	IMP2	IMP3	IMP4	ARR1	ARR2
Março 2012	0-2	26,18	21,34	18,85	17,88	19,82	19,83	-	-
	2-4	25,01	21,16	15,82	16,18	18,95	19,57	-	-
	4-6	22,34	20,58	18,59	15,65	18,13	18,14	-	-
	6-8	20,17	20,39	17,09	15,97	17,41	18,42	-	-
	8-10	21,67	20,76	16,38	15,47	17,30	18,05	-	-
	10-12	21,42	21,05	16,43	14,99	16,38	17,31	-	-
	12-14	21,96	21,20	16,46	14,74	15,72	16,56	-	-
Dezembro 2012	0-2	-	22,79	-	-	20,43	-	-	-
	2-4	-	22,38	-	-	19,77	-	-	-
	4-6	-	22,13	-	-	18,85	-	-	-
	6-8	-	21,18	-	-	18,32	-	-	-
	8-10	-	22,02	-	-	17,81	-	-	-
	10-12	-	22,37	-	-	17,51	-	-	-
	12-14	-	22,10	-	-	16,67	-	-	-
Março 2013	0-2	22,83	-	18,96	-	-	23,05	19,16	-
	2-4	22,27	-	17,88	-	-	18,72	15,85	-
	4-6	22,97	-	17,00	-	-	18,88	14,91	-
	6-8	21,00	-	16,79	-	-	17,40	14,82	-
	8-10	21,89	-	15,69	-	-	15,61	14,36	-
	10-12	21,31	-	15,50	-	-	-	-	-
	12-14	21,49	-	14,50	-	-	-	-	-
Setembro 2013	0-2	22,98	-	29,32	-	-	21,28	23,88	21,84
	2-4	21,96	-	18,65	-	-	20,76	23,56	18,85
	4-6	21,82	-	18,68	-	-	20,46	21,29	16,63
	6-8	21,50	-	17,77	-	-	20,27	20,56	15,56
	8-10	21,81	-	17,73	-	-	20,10	19,55	14,59
	10-12	21,77	-	17,15	-	-	20,03	18,02	14,53
	12-14	22,48	-	16,69	-	-	20,89	18,16	14,46
Dezembro 2013	0-2	22,43	-	18,51	-	-	-	24,33	22,36
	2-4	21,86	-	17,87	-	-	-	20,86	22,94
	4-6	21,27	-	17,10	-	-	-	18,32	19,52
	6-8	21,39	-	16,43	-	-	-	17,35	17,26
	8-10	21,50	-	15,11	-	-	-	20,63	15,61
	10-12	21,40	-	14,67	-	-	-	20,63	14,96
	12-14	21,88	-	14,07	-	-	-	19,37	14,10
Março 2014	0-2	-	19,97	-	17,05	-	-	-	20,98
	2-4	-	19,11	-	15,51	-	-	-	20,70
	4-6	-	19,12	-	14,85	-	-	-	18,94
	6-8	-	19,18	-	14,42	-	-	-	17,28
	8-10	-	19,04	-	14,46	-	-	-	15,86
	10-12	-	19,36	-	14,24	-	-	-	15,06
	12-14	-	18,95	-	14,15	-	-	-	14,80
Média da estação	0-2	23,60	21,37	21,41	17,46	20,13	21,39	22,45	21,72
	2-4	22,77	20,88	17,55	15,85	19,36	19,68	20,09	20,83
	4-6	22,10	20,61	17,84	15,25	18,49	19,16	18,17	18,36
	6-8	21,02	20,25	17,02	15,19	17,87	18,70	17,58	16,70
	8-10	21,72	20,61	16,23	14,97	17,56	17,92	18,18	15,35
	10-12	21,47	20,93	15,94	14,62	16,95	18,67	19,33	14,85
	12-14	21,95	20,75	15,43	14,45	16,19	18,72	18,76	14,45

Anexo 4: Dados brutos do monitoramento de matéria orgânica no sedimento superficial (3 cm) nas estações estudadas

