

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

ENOQUE GONÇALVES RIBEIRO

ANÁLISE DE SÉRIE TEMPORAL PARA DIAGNÓSTICO E PROJEÇÃO DE
RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE UM LAGO AMAZÔNICO IMPACTADO POR
REJEITO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Conservação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Conservação.

Orientador: Dsc. MARCOS PAULO FIGUEIREDO BARROS

Macaé
Julho de 2019

CIP - Catalogação na Publicação

GR482a Gonçalves Ribeiro, Enoque
ANÁLISE DE SÉRIE TEMPORAL PARA DIAGNÓSTICO E
PROJEÇÃO DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE UM LAGO
AMAZÔNICO IMPACTADO POR REJEITO DE MINERAÇÃO DE
BAUXITA / Enoque Gonçalves Ribeiro. -- Rio de
Janeiro, 2019.
93 f.

Orientador: Marcos Paulo Figueiredo de Barros.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Campus Macaé, Programa de Pós
Graduação em Ciências Ambientais e Conservação, 2019.

1. Lago Batata. 2. Monitoramento de Longa
Duração. 3. Rejeitos de Bauxita. 4. Pulso de
Inundação Amazônico. 5. Prática Estatística e
Computacional. I. Figueiredo de Barros, Marcos
Paulo, orient. II. Título.

ANÁLISE DE SÉRIE TEMPORAL PARA DIAGNÓSTICO E PROJEÇÃO DE
RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE UM LAGO AMAZÔNICO IMPACTADO
POR REJEITO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA

ENOQUE GONÇALVES RIBEIRO

Orientador: Marcos Paulo Figueiredo Barros

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Conservação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Conservação.

Aprovada em 09 de Julho de 2019.

Presidente: Marcos Paulo Figueiredo Barros, Dr. - UFRJ

Clarice Casa Nova, Dra. - UFRJ

Mauricio Mussi Molisani, Dr. - UFRJ

Macaé
Julho de 2019

A todos que dedicam suas vidas em prol
de fazer “*balbúrdia*” pela Amazônia.

Agradecimentos

Ao meus amigos e familiares pela paciência e compreensão do distanciamento nesta etapa de vida, espero que tenham sentido tanto quanto eu :)

Aos colegas do Instituto NUPEM e da Super TIC Macaé pelo apoio e incentivo. Aos meus colegas, amigos e professores do PPGCiAC e Laboratório de Ecologia Aquática, obrigado pelo caminhar e crescimento coletivo, pelos inestimáveis momentos de descontração e desconcentração em meio a tanta correria e “gritos de socorro” atendidos. Destaco aqui os companheiros sempre presentes nessa caminhada: Ramon Fontes, Meriane Paula, Lorena A., Lorena B., Kayza Freitas, Mariana Andrade, João Gabriel e Rodrigo Félix.

A todos que se empenharam na minha felicidade e realização, dedicando tempo, amor, confiança, sabedoria e atenção nessa jornada. Em especial aos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho: Maria Silvina Bevilacqua, Thais Almeida, Izabela Santos, Bruno Fortes, Aline Gomes, Rodrigo Félix, Anderson Gripp, Irineu Lima, Rodrigo Lemes, Mauricio Mussi, Clarice Casa Nova, Mario Schultz e Ana Petry, a quem posso dizer que minha formação não teria sido a mesma sem sua pessoa.

Aos professores Francisco de Assis Esteves, Reinaldo Luiz Bozelli e Fabio Roland pela oportunidade de integrar sua equipe e trabalhar com os dados gerados por uma equipe pioneira no que tange recuperação de lagos amazônicos impactados por atividades antrópicas. Ao agradecê-los estendo meus agradecimentos a todos os pesquisadores e estudantes que contribuíram na coleta de amostras e no registro dos dados.

E principalmente ao meu orientador Marcos Paulo por ser um referencial de profissional, educador e amigo. Pelo exemplo de atuação solidária, generosa e pelo respeito com que trata aquilo que é da ordem do humano: frustrações, expectativas, risos e sonhos. Pela orientação segura e competente, empenho, dedicação, paciência e tolerância desde o primeiro dia em que nos falamos até a orientação de meu doutorado advindo; e pela disponibilidade em me atender fosse em uma reunião, durante o almoço ou um trajeto de carro; usando a tecnologia por e-mail ou mensagens (horas de áudio); estando em Macaé ou

Porto Trombetas. Sem sua orientação e auxílio este trabalho não teria alcançado o nível de detalhe e observações que foram possíveis.

Este trabalho foi conduzido com apoio da MRN (Mineração Rio do Norte), ICMBio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade) e de auxílio de Editais PROAP da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior juntamente com Ministério da Educação do Brasil

"So the problem is not so much to see what nobody has yet seen, as to think what nobody has yet thought concerning that which everybody sees."

(Arthur Schopenhauer)

"בואי נרוץ רחוק
תני לי רק כמה דקות
להיזכר במקומות שאז היינו ילדים
לא פחדנו סתם לחיות בלי המינוס, הצרות
בלי לתלות את התקוות
כמו כביסה על חבלים

כמו איזה שני משוגעים
שמרנו רגעים בלב, שתינו ת'נוף
ואת היית יפה כמו פרח שאסור היה לקטוף
רציתי רק לקטוף אותך, רציתי לקטוף

כמו איזה שני משוגעים, בואי נרוץ רחוק
ברגליים יחפות מזיכרונות ואכזבות שאז רצינו לשחרר
כמעט וויתרנו על עצמינו נברח רחוק מהשגרה
כמו אז שהסתפקנו באושר הפשוט"

(אליה רוסיליו, סתיו בגר)

*"Depois de ter dado esse passo incrível, percebo o significado de ser realmente feliz.
[...] Essa é a vida que me foi destinada."*

(Enrique Martín Morales)

Resumo

ANÁLISE DE SÉRIE TEMPORAL PARA DIAGNÓSTICO E PROJEÇÃO DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE UM LAGO AMAZÔNICO IMPACTADO POR REJEITO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA

Enoque Gonçalves Ribeiro

Orientador: Marcos Paulo Figueiredo 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.

O pulso de inundação amazônico é um dos principais determinantes dos padrões e processos ecológicos nos sistemas de várzeas. Localizado na margem direita do Rio Trombetas, o Lago Batata (Oriximiná, Pará, Brasil) é um típico lago da planície de inundação de águas claras da Amazônia, que sofreu impactos antropogênicos. Durante dez anos (de 1979 até 1989) recebeu rejeito das atividades de mineração de bauxita que assorearam 30% de sua área total elevando o nível em até 6 m; entre outros numerosos impactos locais destaca-se o aumento de Turbidez e Sólidos Totais Suspensão. Desde 1989, um complexo programa de monitoramento limno-ecológico ocorre em duas áreas desse ecossistema: a área impactada e a área natural. O objetivo desta pesquisa foi diagnosticar o estado atual do Lago Batata e projetar possíveis períodos para recuperação ambiental por meio de análise de séries temporais de 28 anos de monitoramento após cessado o lançamento de rejeito. Considerando que as modificações dos parâmetros ambientais estão relacionadas à flutuação do nível da água, para melhor avaliar os dados do Lago Batata, caracterizamos a intensidade e duração de cada fase do pulso de inundação do Rio Trombetas, com medições feitas no porto de Porto Trombetas. No presente estudo, analisamos 28 anos de variáveis ambientais monitoradas no Lagoa Batata e diagnosticamos os efeitos remanescentes do assoreamento por rejeito de bauxita na área impactada comparando com os dados da área natural. Ambas as áreas apresentaram padrões sazonais e de longo prazo semelhantes respeitando as características e a composição de cada ponto de amostragem. Foram analisadas as tendências e as análises de previsão foram realizadas para as variáveis: Sólidos Totais Suspensos, Turbidez, Matéria Orgânica e Nitrogênio Total. Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que durante a fase de Águas Altas há um comportamento homogêneo em todo o lago devido à entrada de grande volume de água do Rio Trombetas. Por outro lado, durante as Águas Baixas, houve heterogeneidade nas variáveis ambientais no lago, onde foi possível observar que o Sólidos Totais em Suspensão e a Turbidez separaram a estação impactada das naturais. Isso se torna mais pronunciado quando a fase tem intensidade forte. Durante a fase de Águas Baixas, a área impactada apresenta as melhores condições para a germinação e estabelecimento de *Oryza glumaepatula*, espécie que contribui consideravelmente para o aumento da Matéria Orgânica no sedimento da área impactada, sendo indicada como peça fundamental para a restauração e o melhor parâmetro a ser tomado como referência na avaliação da restauração do Lago Batata. A Matéria Orgânica está cobrindo o rejeito de mineração de bauxita no fundo do lago, evitando sua ressuspensão e consequentemente contribuindo para a redução dos níveis de Turbidez e Sólidos Totais em Suspensão. O diagnóstico atual é que, após vinte e oito anos, as variáveis ambientais selecionados indicam que o lago apresenta sinais de recuperação. As previsões feitas para o ponto de amostragem (E10) indicaram que a Turbidez e o Sólidos Totais em Suspensão permanecerão reduzindo, o Nitrogênio Total aumentando, mas ainda longe dos valores registrados na área natural, e a Matéria Orgânica também permanece com um crescimento singular, definindo seus valores em 2020 próximo aos registrados na estação natural (E07). Ressalta-se que, devido à imprevisibilidade do pulso de inundação e à intensidade e duração de suas fases, os parâmetros podem apresentar mudanças bruscas, mas tendem a retornar e manter sua trajetória de recuperação.

Palavras-chave: Lago Batata; Monitoramento de Longa Duração; Rejeitos de Bauxita; Pulso de Inundação Amazônico; Prática Estatística e Computacional.

Abstract

TIME SERIES FOR DIAGNOSIS AND FORECASTING OF ENVIRONMENTAL RESTORATION OF AMAZONIAN LAKE IMPACTED BY BAUXITE MINING TAILINGS

Enoque Gonçalves Ribeiro

Supervisor: Marcos Paulo Figueiredo Barros

Abstract of the Master's Dissertation submitted to the Environmental Sciences and Conservation Program at Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), as part of the requisites required to obtain a Master's Degree in Environmental Sciences and Conservation.

The Amazonian flood pulse is the major determinant of ecological patterns and processes in river-floodplain systems. Located in the flood area of the right bank of Trombetas River, Batata Lake (Oriximiná, Pará State, Brazil) is a typical floodplain Amazonian clear water lake which has undergone anthropogenic impacts. During ten years (from 1979 until 1989) it received a continuous discharge of bauxite tailings due to mining activities, which covered thirty percent of its total area, raising the level of the substrate up to 6 m, increasing the Turbidity, and Total Suspended Solids, beyond other numerous local impacts. Since 1989 a complex limno-ecological monitoring program occurs in two areas in this ecosystem: the impacted and non-impacted. The goal of this research has been to diagnose the current state of the Batata Lake and to forecast environmental restoration by analyzing the time series of monitoring domain twenty-eight years after discharge was halted. Considering that environmental parameters modifications are related to water level fluctuation, to better evaluate the Batata Lake data we characterized the intensity and duration of each phase of the flood pulse of the considered water height of Trombetas River taken from Porto Trombetas harbor. In the present study, we analyzed 28 years of the environmental parameters monitored in Batata Lake and we diagnose the remaining effects of the siltation by bauxite tailings in the impacted area comparing with the data of the non-impacted. Both areas displayed similar seasonal and long-term patterns respecting the characteristics and composition of each sampling point. We analyzed a trend, and forecasting analyses were performed on environmental parameters: Total Suspended Solids, Turbidity, Organic Matter and Total Nitrogen. The results obtained in this research indicate that during the phase of high waters there is a homogeneous behavior throughout the lake due to the entrance of great mass of water from the Trombetas River. On the other hand, during the low waters, the environmental parameters showed to be heterogeneous in the lake, which event was possible to observe for Total Suspended Solids and Turbidity, which separated the sampling point of the impacted area of the non-impacted. This becomes more pronounced when the phase has a strong intensity. During the low waters phase, the impacted area also presents the best conditions for germination and establishment of *Oryza glumaepatula*. This species contributes considerably to the increase of Organic Matter in the sediment of the impacted area, being indicated as a fundamental piece for the restoration process and the best parameter to be taken as a reference when evaluating the restoration of Batata Lake. The Organic Matter is responsible for covering the bauxite mining tailings in the lake sediment, avoiding its suspension and consequently contributing to the reduction of Turbidity levels and Total Suspended Solids. The current diagnosis is that after twenty-eight years the selected environmental parameters indicate that the lake shows signs of restoration. The forecasts made for sampling point (E10) indicated that Turbidity and Total Suspended Solids levels will remain reducing, while Total Nitrogen increasing but still far from the values recorded in the non-impacted areas, as Organic Matter also will remain with a singular growth and set its values in 2020 close to those recorded in the sampling point (E07). It must be emphasized that, due to the unpredictability of the flood pulse and the intensity and duration of its phases, the parameters may show abrupt changes, but tend to return and maintain their recovery trajectory.

Keywords: Batata Lake; Long-term Monitoring; Bauxite Tailings; Amazonian Flood-Pulse; Computational and statistical practice.

Sumário

1	Introdução	17
2	Objetivo	26
3	Metodologia	27
3.1	Área de Estudo.....	27
3.2	Coleta de Dados	28
3.3	Análise de dados	29
4	Resultados	33
4.1	Caracterização do pulso de inundação	33
4.1.1	Duração.....	34
4.1.2	Intensidade	36
4.2	Variáveis ambientais do Lago Batata	39
4.2.1	Profundidade	45
4.2.2	Sólidos Totais em Suspensão (STS)	46
4.2.3	Turbidez	48
4.2.4	Matéria Orgânica do Sedimento	52
4.2.5	Nitrogênio Total do Sedimento.....	55
4.3	Relação pulso de inundação com as variáveis ambientais.....	59
5	Discussão	60
6	Conclusão	66
	Referências.....	68
	APÊNDICES	73
	APÊNDICE A – Sumário das variáveis amostradas no Lago batata.....	73
	APÊNDICE B – Caracterização do pulso de inundação	76
	APÊNDICE C – Valor R da correlação de Spearman	79
	APÊNDICE D – Sumário do resultado da PCA	80
	APÊNDICE E – Resultados dos testes de Kruskal-Wallis, Wilcoxon e Mann-Kendall	81
	APÊNDICE F – Pontos de mudança de algumas variáveis ambientais do Lago batata por estação de amostragem	85
	APÊNDICE G – Previsão de 10 anos para algumas variáveis da Estação Impactada E10 do Lago Batata.....	89
	APÊNDICE H – Série histórica de variáveis ambientais do Lago Batata relacionadas a caracterização das fases do pulso de inundação	91

Lista de Figuras

Figura 1. Margem do Lago Batata assoreada por rejeito de mineração de bauxita.	20
Figura 2. Sedimento do Lago Batata da área impactada com rejeito de mineração de bauxita.....	21
Figura 3. Lago Batata em 2017, área não atingida pelo rejeito de mineração de bauxita na década de 80.	22
Figura 4. Lago Batata em 2017, área impactada pelo rejeito de mineração de bauxita na década de 80.	22
Figura 5. (A) Área impactada onde ocorreu plantio de igapó. (B) Área impactada com germinação de <i>Oryza glumaepatula</i> (arroz selvagem). (C) <i>Oryza glumaepatula</i> (arroz selvagem) se desenvolvendo a medida que a nível d'água aumenta.	24
Figura 6. Estações de amostragem do Lago Batata, área alagada impactada por rejeito de mineração em destaque com pontilhado vermelho.	27
Figura 7. Valores Mínimos (MIN) e Máximos (MAX) alcançados nas fases de Águas Baixas e Águas Altas no Médio-Baixo curso do Rio Trombetas de 1973 a 2017. Azul = MAX, Laranja = MIN, Vermelho = Média dos valores máximos e Verde = Média dos Mínimos.....	33
Figura 8. Duração do pulso de inundação no Médio-Baixo curso do Rio Trombetas para as fases de Enchente (A), Águas Altas (B), Vazante (C) e Águas Baixas (D) para os anos de 1973 a 2017.....	35
Figura 9. Intensidade do pulso de inundação no Médio-Baixo Trombetas para as fases de Águas Altas (A) e Águas Baixas (B), considerando os níveis registrados de 1973 a 2017...	37
Figura 10. Modelo final de caracterização do pulso de inundação para o Médio-Baixo curso do Rio Trombetas. Curva dos valores médios de 43 anos do nível da água no Médio-Baixo curso do Rio Trombetas, indicando as quatro fases do pulso de inundação. Definido os valores limítrofes e faixas de intensidade para as fases de Águas Altas e Águas Baixas.	38
Figura 11. Matriz de Correlação Spearman ($r > 0.8$ ou $r < -0.8$, $p < 0.05$) para variáveis ambientais amostradas no Lago Batata.	39

Figura 12. (A) Mapa Fatorial para PCA das variáveis ambientais do Lago Batata e (B) percentual de explicação de cada dimensão da PCA.	40
Figura 13. (A) Coordenadas das variáveis em relação para formar a dimensão (B) Percentual de contribuição das variáveis para formação dos componentes principais.	41
Figura 14. Apresentação bidimensional de dados multivariados (A) agrupados pelas fases do pulso de inundação e (B) agrupados pelas estações de amostragem.	43
Figura 15. Série histórica de Profundidade (m) = ZMAX_M, registrados para E07, E08 e E10 no Lago Batata de 1989 a 2017. Em azul escuro série de dados e em azul claro a linha de tendência ao longo da série temporal.	45
Figura 16. Comparação dos valores de Sólidos Totais em Suspensão (mg.L^{-1}) = STS para a E07, E08 e E10 do Lago Batata nas fases de E, AA, V e AB do pulso de inundação para registros de 1989 a 2017, (Wilcoxon, $p < 0.05$).	46
Figura 17. Tendência (Trend) e Pontos de Mudança (Trend Change) para a variável ambiental Sólidos Totais em Suspensão (STS) registrados de 1989 a 2017 no Lago Batata. ...	47
Figura 18. Previsões (Forecasted Value) para o comportamento de Sólidos Totais em Suspensão para Estação 10 (E10) são mostradas em uma linha azul claro com uma área sombreada em azul para os intervalos de confiança de 80%.	48
Figura 19. Comparação dos valores de Turbidez (NTU) = TURBIDITY para as E07, E08 e E10 do Lago Batata nas fases de E, AA, V e AB do pulso de inundação para registros de 1994 a 2017, (Wilcoxon, $p < 0.05$).	49
Figura 20. Tendência (Trend) e Pontos de Mudança (Trend Change) para a variável ambiental Turbidez registrados de 1994 a 2017 no Lago Batata.	51
Figura 21. Previsões (Forecasted Value) para o comportamento de Turbidez (NTU) = TURBIDITY para Estação 10 = E10 são mostradas em uma linha azul claro com uma área sombreada em azul para os intervalos de confiança de 80%. Em azul escuro temos os valores observados de Turbidez na E10 de 1994 a 2017.	52

<p>Figura 22. Comparação dos valores de Matéria Orgânica do Sedimento (% p.s.) = ORGANIC_MATTER para as E07, E08 e E10 do Lago Batata nas fases de E, AA, V e AB do pulso de inundação para registros de 1989 a 2017, (Wilcoxon, $p < 0.05$).</p>	53
<p>Figura 23. Tendência (Trend) e Pontos de Mudança (Trend Change) para a variável ambiental Matéria Orgânica do Sedimento registrados de 1989 a 2017 no Lago Batata. Matéria Orgânica do Sedimento (% p.s.) = ORGANIC_MATTER. Estação 07 (E07), Estação 08 (E08) e Estação 10 (E10).</p>	54
<p>Figura 24. Previsões (Forecasted Value) para o comportamento de Matéria Orgânica do Sedimento (% p.s.) = ORGANIC_MATTER, para Estação 10 (E10) são mostradas em uma linha azul claro com uma área sombreada em azul para os intervalos de confiança de 80%. Em azul escuro temos os valores observados de Matéria Orgânica do Sedimento na E10 de 1989 a 2017.</p>	55
<p>Figura 25. Comparação dos valores de Nitrogênio Total do Sedimento (% p.s.) = N.TOTAL_SED para as E07, E08 e E10 do Lago Batata nas fases de E, AA, V e AB do pulso de inundação para registros de 1989 a 2017, (Wilcoxon, $p < 0.05$).</p>	56
<p>Figura 26. Tendência (Trend) e Pontos de Mudança (Trend Change) para a variável ambiental Nitrogênio Total do Sedimento registrados de 1989 a 2017 no Lago Batata. Nitrogênio Total do Sedimento (% p.s.) = N.TOTAL_SED. Estação 07 (E07), Estação 08 (E08) e Estação 10 (E10).</p>	57
<p>Figura 27. Previsões (Forecasted Value) para o comportamento de Nitrogênio Total do Sedimento (% p.s.) = N.TOTAL_SED, para E10 são mostradas em uma linha azul claro com uma área sombreada em azul para os intervalos de confiança de 80%. Em azul escuro temos os valores observados de Nitrogênio Total do Sedimento na E10 de 1989 a 2017.</p>	58
<p>Figura 28. Série histórica de Sólidos Totais em Suspensão para as estações de amostragem E07, E08 e E09 do Lago Batata e caracterização do pulso de inundação do Rio Trombetas quanto a duração e intensidade de 1989 a 2017.</p>	91
<p>Figura 29. Série histórica de Turbidez para as estações de amostragem E07, E08 e E09 do Lago Batata e caracterização do pulso de inundação do Rio Trombetas quanto a duração e intensidade de 1989 a 2017.</p>	92

Figura 30. Série histórica de Matéria Orgânica para as estações de amostragem E07, E08 e E09 do Lago Batata e caracterização do pulso de inundação do Rio Trombetas quanto a duração e intensidade de 1989 a 2017. 93

Figura 31. Série histórica de Nitrogênio Total do Sedimento para as estações de amostragem E07, E08 e E09 do Lago Batata e caracterização do pulso de inundação do Rio Trombetas quanto a duração e intensidade de 1989 a 2017..... 94

Lista de Tabelas

Tabela 1. Variáveis ambientais amostradas no Lago Batata.	28
Tabela 2. Definição dos valores limítrofes para as transições entre as fases do pulso com base nas médias dos valores máximos e mínimos do nível do Rio Trombetas de 1973 a 2017.	33
Tabela 3. Duração do pulso de inundação, em dias, para o Médio-Baixo curso do Rio Trombetas considerados os registros de 1973 a 2017.	34
Tabela 4. Intensidade do pulso de inundação para o Médio-Baixo curso do Rio Trombetas baseado nos níveis registrados de 1973 a 2017.	36
Tabela 5. Resultado MASE para variáveis de STS, Turbidez, Matéria Orgânica e Nitrogênio Total do Sedimento.	44
Tabela 6. Sumário das variáveis registradas de 2008 a 2017 e previstas de 2018 a 2027 para as variáveis de STS, Turbidez, Matéria Orgânica e Nitrogênio Total do Sedimento.	45
Tabela 7. Valores mínimos, máximos, médias e desvio padrão das variáveis ambientais amostradas no Lago Batata de 1989 a 2017.	73
Tabela 8. Classificação da intensidade do pulso de inundação no Médio-Baixo curso do Rio Trombetas no período de 1973 a 2017.	76
Tabela 9. Quantidade de dias e caracterização das fases do pulso de inundação no Médio-Baixo Trombetas para os anos de 1973 a 2017.	77
Tabela 10. Valor R da correlação de Spearman para as variáveis do Lago Batata.	79
Tabela 11. Autovalores e a proporção de variâncias retidos pelos componentes principais (dimensão).	80
Tabela 12. Resultados do teste de Kruskal-Wallis ($p < 0.05$) para as variáveis ambientais por estação de amostragem para cada fase do pulso de inundação (PS).	81
Tabela 13. Resultados do teste de Wilcoxon ($p < 0.05$) para Profundidade das estações de amostragem Estação 07 = E07, Estação 08 = E08 e Estação 10 = E10.	81

Tabela 14. Resultados do teste de Wilcoxon ($p < 0.05$) para STS para E07, E08 e E10 nas fases de E, AA, V e AB.....	82
Tabela 15. Resultados do teste de Wilcoxon ($p < 0.05$) para Turbidez, para E07, E08 e E10 nas fases de E, AA, V e AB.....	82
Tabela 16. Resultados do teste de Wilcoxon ($p < 0.05$) para Matéria Orgânica do Sedimento para E07, E08 e E10 nas fases de E, AA, V e AB.....	83
Tabela 17. Resultados do teste de Wilcoxon ($p < 0.05$) para Nitrogênio Total do Sedimento para E07, E08 e E10 nas fases de E, AA, V e AB.....	83
Tabela 18. Teste Mann-Kendall ($p < 0.05$) para Sólidos Totais em Suspensão.	83
Tabela 19. Teste Mann-Kendall ($p < 0.05$) para Turbidez.	84
Tabela 20. Teste Mann-Kendall ($p < 0.05$) para Matéria Orgânica do Sedimento.	84
Tabela 21. Teste Mann-Kendall ($p < 0.05$) para Nitrogênio Total do Sedimento.....	84
Tabela 22. Tabela conjunta da caracterização do pulso quanto a intensidade e duração das fases para os anos em que as variáveis ambientais apresentaram pontos de mudança. Para STS e Turbidez em verde valores de decréscimo e vermelho valores de acréscimo, para Nitrogênio Total do Sedimento e Matéria Orgânica do Sedimento em verde valores de acréscimo e vermelho valores de decréscimo.	85
Tabela 23. Previsão para as variáveis ambientais Sólidos Totais em Suspensão, Turbidez, Matéria Orgânica do Sedimento e Nitrogênio Total do Sedimento na estação E10 do Lago Batata no período de 2018 a 2027.	89

1 Introdução

As atividades antrópicas têm causado severos danos aos ecossistemas aquáticos continentais e, conseqüentemente, provocado alterações no ciclo hidrológico, nos ciclos biogeoquímicos e na biodiversidade. Alguns impactos sobre corpos hídricos apresentam difícil reversão ou tratamento e as medidas mitigatórias podem ter elevado custo. Tais impactos sobre bacias hidrográficas, reservatórios e lagos, se estendem às questões sociais, econômicas e políticas. Dentre os muitos problemas resultantes de ações antrópicas, o carreamento de sedimento fino destaca-se como um dos mais sérios sobre corpos hídricos devido às suas conseqüências, que vão desde a redução da produção primária fitoplanctônica - alterando a cadeia trófica - até problemas sociais como, por exemplo, captação de água e geração de energia hidroelétricas.

A região amazônica é responsável por cerca de 20% do escoamento global de rios e detém, devido a suas características geomorfológicas, uma extensa planície de inundação que contribui em grande parte no balanço hídrico e energético desse ecossistema (Coe, Costa, & Howard, 2008; Sioli & Klinge, 1964). Mesmo assim esses corpos d'água tem sido alvo de grandes perturbações antrópicas como a instalação de hidrelétricas, atividades de mineração e alteração no uso e cobertura do solo que ocasionam alteração na dinâmica de sedimentos, desmatamento, mudanças no regime de inundação, alteração nos ciclos biogeoquímicos, entre outro impactos (Castello & Macedo, 2016).

Um componente importante para o sistema de várzea são os lagos de várzea, corpos hídricos encontrados nas depressões das planícies e que conservam alguma conectividade com o rio e assim designados por apresentarem as características de um ecossistema aquático lântico, normalmente rasos, sem correntes, onde se desenvolvem comunidades produtoras, consumidoras e decompositoras. No período das cheias amazônicas, os ecossistemas aquáticos recebem um maior volume de água o que resulta no aumento do nível dos rios, estabelecendo assim comunicação entre os rios e lagos, enquanto que na época de seca os ecossistemas permanecem isolados ou se comunicam por meio de canais (Esteves, 2011). Entretanto, o conceito de lago como unidade funcional (Forbes, 1925) não se aplica aos lagos

da planície de inundação, uma vez que os processos ecológicos e a manutenção de populações é controlado pelo pulso de inundação que é a variação do nível das águas e se constitui na principal força responsável pela existência, produtividade e interações da maior parte da biota em sistemas lênticos de planícies de inundação (Junk, W. L.; Bayley, P. B.; Sparks, 1989).

Nesse ambiente as trocas laterais entre a planície de inundação com o canal do rio, e a ciclagem de nutrientes com a planície de inundação têm um maior impacto direto sobre a biota do que o espiralamento de nutrientes (Newbold, Elwood, O'Neill, & Winkle, 1981). Em um sistema lótico com planície de inundação em climas temperados, subtropicais ou tropicais, a maior parte da produtividade da biota advém diretamente ou indiretamente das trocas com a planície de inundação e não do carreamento de matéria orgânica, ou seja, o aporte de nutrientes nos grandes rios advém dos lagos e corpos hídricos menores a ele conectados.

As águas de ambientes lênticos, em geral, apresentam baixa turbidez, entretanto ela pode ser elevada devido alterações do ambiente como vento, corrente e chuvas. Em muitos casos, essas partículas em suspensão originam-se de materiais carreados pelas chuvas quando não há mata ciliar; de atividades de mineração; de efluentes domésticos e industriais lançados em corpos hídricos sem tratamento, entre outras atividades que aportam sedimentos e rejeitos de material diretamente ou indiretamente em corpos hídricos.

De forma geral, o carreamento de sedimentos e rejeitos em ecossistemas aquáticos podem causar muitos danos, sejam eles de ordem econômica ou ambiental. Frequentemente, provocam assoreamento e quando suspensos na coluna d'água, aumentam os valores de turbidez que é o impacto mais observável em um primeiro momento. Turbidez é a medida do grau de redução de transparência de um fluido devido à presença de partículas em suspensão, conferindo a esse uma aparência turva. Como exemplo de matéria orgânica e inorgânica suspensa encontram-se sólidos dissolvidos em forma ionizada, compostos orgânicos dissolvidos, microrganismos, coloides, silte, argila entre outros. A turbidez pode diminuir a zona eufótica que por consequência afeta a realização de fotossíntese pelos produtores primários. Isto pode resultar na perda significativa da riqueza e diminuição da abundância de todos os grupos funcionais tróficos, além de afetar a sobrevivência dos organismos pela dificuldade de visualizar o alimento, entupimento de brânquias e de estruturas alimentares,

bem como interferir na geração de energia, na pesca, nos usos doméstico, agrário, industrial e de recreação de um corpo hídrico (Couceiro, 2009).

Entre os principais impactos sofridos pelos ecossistemas amazônicos, os impactos oriundos de atividades de mineração desestabilizam o ambiente físico e químico e podem ocasionar mudanças na dinâmica e estrutura das comunidades biológicas (Reinaldo Luiz Bozelli, Esteves, & Roland, 2000). Apesar dos poucos estudos realizados neste âmbito, um estudo de longa duração em um lago amazônico impactado por rejeito da lavagem de minério de bauxita confirma a dificuldade do ecossistema retornar as condições originais, mas também aponta em seu monitoramento a recuperação, dado o retorno de vários processos ecológicos na área de impacto direto, e.g. (Dias et al., 2012; Scarano et al., 2018; Soares, Cabral, Estrella, & Caramaschi, 2017).

O Lago Batata é um típico lago de planície de inundação de águas claras da região Amazônica, circundado por mata de igapó e originalmente caracterizados por águas ligeiramente ácidas, baixas concentrações de nutrientes e pobres em partículas em suspensão. Localiza-se na margem direita do Rio Trombetas na região de Porto Trombetas no município de Oriximiná – PA, com área aproximada na época de seca de 18 km², o mesmo sofre flutuações em seu nível de água de até 8 m e apresenta profundidade média de 2.19 m (Panosso, Muehe, & Esteves, 1995; Prance, 1980).

Na região está localizada uma das maiores jazidas de bauxita do mundo que respondem por 90% das reservas nacionais que somam 3,4 bilhões de toneladas (10% das reservas mundiais), e conseqüentemente, uma das maiores instalações para extração, beneficiamento, transporte ferroviário, secagem e embarque do minério nos navios (Mártires, 2009). As operações em Porto Trombetas foram iniciadas na década de 70 com produção inicial anual de 3.35 milhões de toneladas de bauxita. Atualmente a capacidade de produção anual da MRN instalada é de 18.1 milhões de toneladas, respondendo por 73% da produção nacional (Mártires, 2009).

Para comercialização da bauxita a mesma passa por um processo de beneficiamento, que consiste na lavagem do minério para retirada de argilas. Ao contrário de outros países que mineram bauxita, as técnicas empregadas no Brasil geram efluentes líquidos o que torna

a destinação desse tipo de rejeito também inédito. Para lavagem do minério não é utilizado nenhum composto químico, somente água do próprio Rio Trombetas.

Desse processo resulta aproximadamente 25% de rejeito de bauxita, uma lama de cor avermelhada e consistência aquosa, apresentando como principais características granulométricas as porcentagens de 9% de areia grossa; 4% de areia fina; 24% de silte; e 53 % de argila. O rejeito apresenta ainda componentes químicos encontrados juntamente com a bauxita extraída nas minas, como 17% SiO_2 ; 30% de Al_2O_3 ; 21% Fe_2O_3 ; 37% de calunita; e 23% de gibisita. Apesar disto, o mesmo não apresenta nenhuma toxicidade, uma vez que o alumínio e os demais elementos estão indisponíveis para absorção pela biota (Lapa, 2000).

Atualmente o rejeito é depositado em reservatórios construídos em áreas já mineradas e posteriormente é feito plantio sobre os tanques. Todavia por falta de metodologias adequadas e segundo legislação vigente, entre os anos de 1979 a dezembro de 1989, o rejeito de bauxita foi lançado diretamente no Lago Batata (R. L. Bozelli, Esteves, & Rolland, 2000). Com um total diário de 50 mil/m³, calcula-se que neste período foram lançados 180 milhões de m³ de rejeito (Panosso et al., 1995) aproximadamente 3 vezes ao volume do recente vazamento da barragem de Fundão em Mariana – MG (IBAMA, 2015).

Como resultado, 630 ha, cerca de 30% da área do lago, foi impactada. A medida que o rejeito era depositado no lago, ocorreu o assoreamento de suas áreas alagáveis que tiveram o leito elevado de 5 a 6 metros em alguns trechos devido à sedimentos de maior granulometria (Figura 1) (R. L. Bozelli et al., 2000).

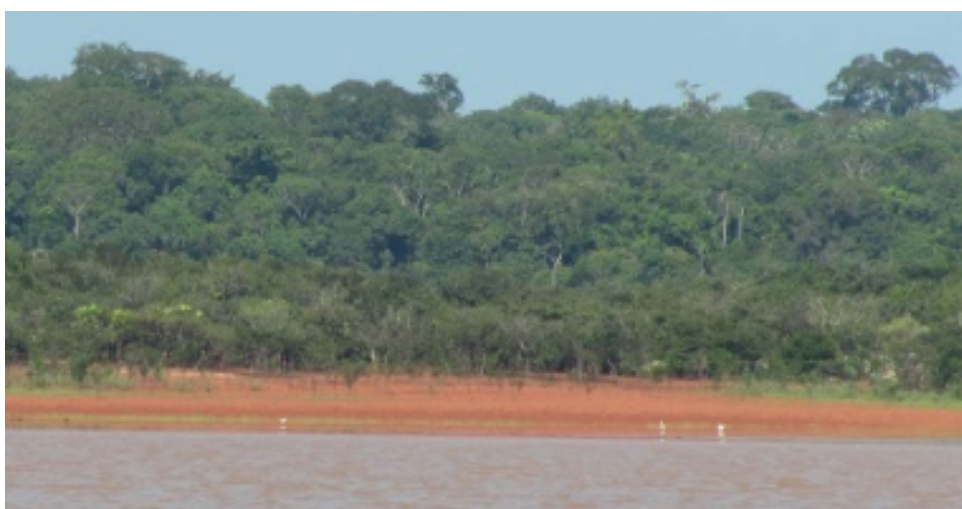


Figura 1. Margem do Lago Batata assoreada por rejeito de mineração de bauxita.

O rejeito criou uma nova camada de sedimento no lago e a argila, de menor granulometria (Callisto & Esteves, 1996) e menos densa, permaneceu em suspensão na coluna d'água. Além disto o rejeito depositado sobre o sedimento natural pode ser ressuspensão em função de correntes internas, rajadas de vento e turbulência na coluna d'água, o que aumenta drasticamente a turbidez na água e atua sobre a degradação visual do ecossistema (Figura 2).



Figura 2. Sedimento do Lago Batata da área impactada com rejeito de mineração de bauxita.

A elevada turbidez pode ser considerada uma das principais evidências da natureza física deste impacto na parte permanentemente inundada do Lago Batata. A turbidez nas áreas de deposição de rejeito alterou a penetração de luz, o que interferiu diretamente nos produtores primários fitoplanctônicos. Para além dos danos à produção primária fitoplanctônica, a resposta dos organismos varia dependendo das concentrações de rejeito e a variabilidade do pulso hidrológico, que facilita a recomposição das populações. A presença de rejeito em suspensão promoveu sensível perda de habitat para reprodução e alimentação de peixes, no entanto observa-se a recuperação desta comunidade na área impactada (Reinaldo Luiz Bozelli et al., 2000).

Evidencia-se ainda a cor avermelhada em contraste com áreas não impactadas do lago que apresentam cor azul verde claro, que são explicados dados os valores de turbidez registrados nos monitoramentos no período de águas baixas de 1995 a 2000, cujo registro

médio de 135,16 NTU na área impactada em comparação a 18,4 NTU na área não impactada, sendo respectivamente o maior valor registrado de 287 NTU e 33,6 NTU (Figura 3 e Figura 4).



Figura 3. Lago Batata em 2017, área não atingida pelo rejeito de mineração de bauxita na década de 80.



Figura 4. Lago Batata em 2017, área impactada pelo rejeito de mineração de bauxita na década de 80.

Devido ao assoreamento de grandes áreas de igapó do lago, o mesmo passou a apresentar distintas características hidrológicas e ecológicas, o que levou a diferenciação em três áreas impactadas para fins de restauração. Área onde a colonização natural era possível de ocorrer sem a necessidade de intervenção, cerca de 20 ha paralelo ao rio Trombetas; área onde surgiu a necessidade de plantio porque a colonização natural seria muito mais lenta em relação a primeira, localizada na margem oposta ao Rio Trombetas com área de 120 ha; e área permanentemente alagada por períodos longos, que corresponde a 16 ha (R. L Bozelli et al., 2000).

O retorno dos ecossistemas lacustres ao seu estado ecológico original, constitui-se uma tarefa tecnicamente difícil. A Lei 9.985/2000 definiu restauração como sendo a restituição de um ecossistema degradado para uma condição mais próxima possível de sua condição original. Por outro lado, recuperação foi definida como restituição de um ecossistema degradado a uma condição não degradada (Brasil, Presidência da República - Casa Civil, 2000).

Pesquisas foram realizadas no intuito de recuperar a área permanentemente alagada do Lago Batata através de ações corretivas e de monitoramento, entretanto, como as intervenções para reduzir a turbidez na água são passíveis de causarem impactos ainda maiores devido o emprego de compostos químicos para precipitar argilas, esta possibilidade até então não foi discutida com veemência.

O rejeito depositado no lago permanece no ambiente sujeito aos processos de deslocamento, suspensão e sedimentação (Figura 4). A turbidez é um importante filtro ambiental para as taxocenoses aquáticas e embora apresente valores gradativamente menores no decorrer do monitoramento do Lago Batata (R. L Bozelli et al., 2000), é observado que a mesma pode se elevar subitamente em períodos de secas e fortes ventos dada a natureza do impacto (Carneiro, Bozelli, & Esteves, 2003).

Nesse contexto, foi iniciado em 1989 o Programa de Monitoramento e Estudos Ecológicos do Lago Batata, que desde então vêm acumulando uma série histórica de dados sobre este ecossistema impactado com rejeito de mineração de bauxita e dos resultados das ações de mitigação sobre ele executados, como o plantio de igapó e o manejo de *Oryza glumaepatula* (arroz selvagem) (Figura 5 A, 5 B e 5 C) (Esteves, 2000; Scarano et al., 2018).



Figura 5. (A) Área impactada onde ocorreu plantio de igapó. (B) Área impactada com germinação de *Oryza glumaepatula* (arroz selvagem). (C) *Oryza glumaepatula* (arroz selvagem) se desenvolvendo a medida que a nível d'água aumenta.

A série histórica acumulada pelo programa de monitoramento é composta por uma enorme massa de dados de parâmetros físico-químicos que na primeira década não haviam atingido patamares considerados estáveis, entretanto as concentrações de nutrientes, matéria orgânica e granulometria do sedimento, que foram drasticamente afetadas com o lançamento de rejeito, já apresentavam expressiva melhora durante monitoramento (Reinaldo Luiz Bozelli et al., 2000).

Monitoramento e estudos ecológicos é um ramo da ecologia que visa mensurar o comportamento do ambiente por meio de amostragens contínuas e sistemática de variáveis físicas, químicas e biológicas de um ecossistema ao longo do tempo, produzindo informação sobre o nível de conservação, preservação, degradação e recuperação ambiental (Lovett et al., 2007). Sendo, portanto, de fundamental importância para diagnosticar as consequências do impacto, direcionar as medidas de recuperação e avaliar os resultados.

Os registros das atividades de monitoramento coletados e ordenados no tempo de forma sequencial formam uma série temporal por onde é possível extrair informações significativas para estudar tendências, reconhecer padrões no espaço e/ou tempo a partir da interpretação da variação de parâmetros e por meio das observações numéricas anteriores prever valores futuros da série (Hyndman & Athanasopoulos, 2018). Cada parâmetro registrado com sua informação de tempo é uma série temporal que possui características próprias como: sazonalidade, *outliers*, ciclos, tendência, frequência etc.

O Lago Batata é um raro corpo hídrico impactado por rejeito de mineração que possui uma extensa série de dados temporais do monitoramento da coluna d'água e do sedimento. Tal série permite o estudo de tendências ao longo do tempo, ou seja, verificar as condições presentes a partir da interpretação da variação de parâmetros e reconhecer padrões no espaço e/ou tempo, projetando situações futuras.

Frente a necessidade de responder a órgãos ambientais, à empresa de mineração e também com a responsabilidade de recuperar um ecossistema degradado, o presente trabalho justifica-se pela análise minuciosa das variáveis ambientais do Lago Batata e do pulso de inundação para a partir de então, entender a dinâmica e o comportamento deste corpo hídrico, reconhecendo variações nos parâmetros e os padrões no espaço e no tempo para direcionar medidas mais acuradas de recuperação.

2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo, frente a dinâmica hidrológica imposta pelo pulso de inundação e após 28 anos de cessado o lançamento de rejeito de mineração, diagnosticar o estado atual da área impactada e permanentemente alagada do Lago Batata e realizar previsões sobre alguns parâmetros ambientais associados a recuperação do ecossistema. Para isto pretende-se:

1. Caracterizar a duração e intensidade dos períodos do pulso de inundação para o Médio-Baixo curso do Rio Trombetas.
2. Registrar os anos em que ocorreram eventos extremos relacionados ao nível do Rio Trombetas.
3. Verificar a relação do pulso de inundação e dos eventos extremos com algumas variáveis ambientais do Lago Batata.
4. Verificar a situação atual da transparência d'água e qualidade do substrato na estação impactada ao longo da série histórica.
5. Prever quando o teor de Matéria Orgânica e concentração de Nitrogênio Total do Sedimento da estação impactada atingirá os valores amostrados na estação natural.

3 Metodologia

3.1 Área de Estudo

O Lago Batata localiza-se na margem direita no Médio-Baixo curso do rio Trombetas ($1^{\circ}28'02.2''S$ a $1^{\circ}32'25.0''S$ e $56^{\circ}17'23.2''W$ a $56^{\circ}20'11.5''W$), cerca de 7 Km a jusante de Porto Trombetas no município de Oriximiná – PA. O Lago Batata, é um lago de águas claras, originalmente caracterizados por águas ligeiramente ácidas, baixas concentrações de nutrientes e pobres em partículas em suspensão. O mesmo teve 30% de sua área impactada pelo aporte de rejeito de mineração de 1979 a 1989.

Desde 1989 o Programa de Monitoramento e Estudos Ecológicos do Lago Batata realiza o monitoramento em estações de amostragem na área impactada e natural. Atualmente são amostradas 8 estações e este trabalho se valerá da estação impactada E10, e das naturais E07 e E08 (Figura 6).

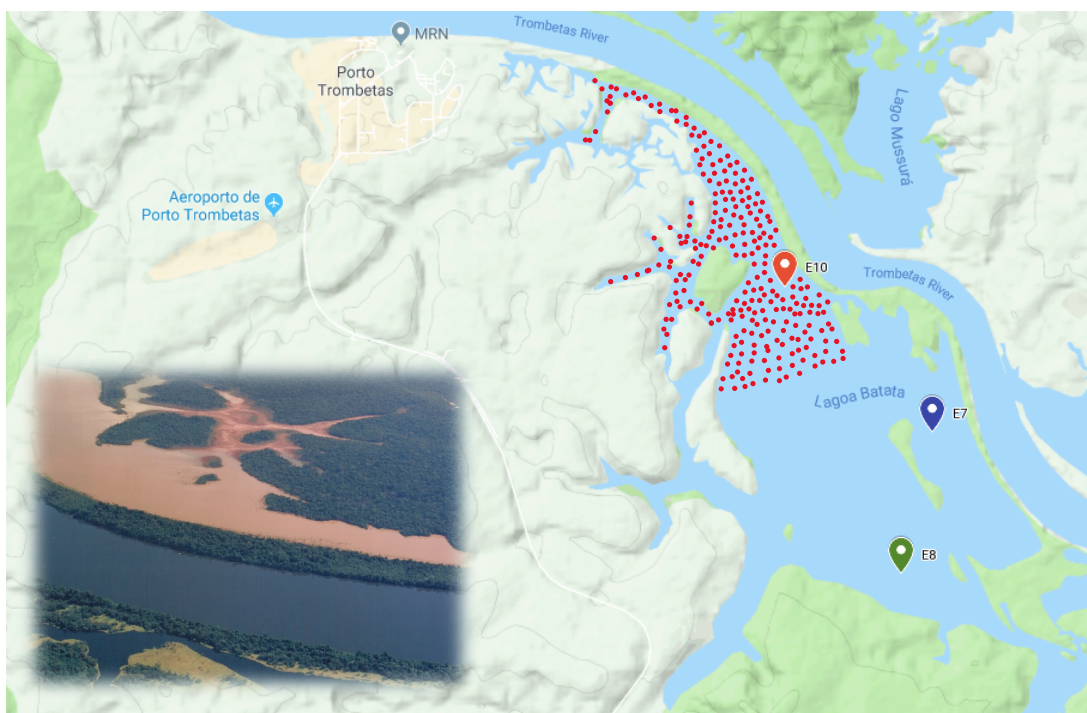


Figura 6. Estações de amostragem do Lago Batata, área alagada impactada por rejeito de mineração em destaque com pontilhado vermelho. Em detalhe foto área da área impactada de 1988. E07 $1^{\circ}30'47.5''S$ $56^{\circ}18'12.9''W$), E08 $1^{\circ}31'54.8''S$ $56^{\circ}18'27.4''W$) e E10 ($1^{\circ}29'38.5''S$ $56^{\circ}19'22.4''W$). Imagem corte lateral do Rio Trombetas que apresenta águas claras e o do Lago Batata com tonalidade avermelhada em parte da área impactada. Foto: Arquivo do Projeto de Monitoramento e Estudos Ecológicos do Lago Batata.

3.2 Coleta de Dados

Os registros fluviométricos diários de 1973 a 2017 realizados no porto no Distrito de Porto Trombetas foram fornecidos pela Mineração Rio do Norte (MRN). Foi registrado o valor em metros superior a 38.16 m, que se refere ao marco zero da régua do localizada no porto.

Os dados limnológicos da coluna d'água e sedimento do Lago Batata são oriundos do Programa de Monitoramento e Estudos Ecológicos do Lago Batata que é realizado pelo Laboratório de Limnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) desde 1989. Os registros foram obtidos em amostragens trimestrais durante cada uma das fases do pulso de inundação de 1989 a 2017, exceto os dados de Turbidez que teve o início de sua amostragem em 1994. A Tabela 1 lista as variáveis amostradas na superfície da coluna d'água ou no sedimento, no Apêndice A na Tabela 7 apresenta os valores mínimos, máximos, média e desvio padrão de cada variável por estação de amostragem e fase do pulso de inundação.

Tabela 1. Variáveis ambientais amostradas no Lago Batata.

	VARIÁVEL AMBIENTAL	UNIDADE	DESCRIÇÃO
1	SECCHI	Metros (m)	Extinção de Disco de Secchi
2	ZEU	Metros (m)	Estimada a partir da Extinção de Disco de Secchi
3	ZMAX_M	Metros (m)	Profundidade da estação de amostragem
4	STS	mg.L ⁻¹	Sólidos Totais em Suspensão
5	CONDUCTIVITY	μS.cm ⁻¹	Condutividade Elétrica
6	pH	Escala Logarítmica	Potencial Hidrogeniônico
7	ALKALINITY	μEqCO ₂ .L ⁻¹	Alcalinidade
8	OXYGEN SATURATION	mg.L ⁻¹	Oxigênio Dissolvido
9	N.TOTAL	mg.L ⁻¹	Nitrogênio Total
10	P.TOTAL	μg.L ⁻¹	Fósforo Total
11	TURBIDITY	NTU	Turbidez
12	CHLOROPHYLL_A	μg.L ⁻¹	Clorofila a
13	N.TOTAL_SED	% PESO SECO (%p.s.)	Nitrogênio Total do Sedimento
14	ORGANIC_MATTER	% PESO SECO (%p.s.)	Matéria Orgânica

Para cada estação de amostragem foi aferido a profundidade, estimada a Zona Eufótica pela extinção do disco de Secchi e registrado os valores de Oxigênio Dissolvido utilizando sonda portátil. Foram coletadas amostras de água com garrafa do tipo Van Dorn e

conduzidas ao Laboratório da MRN onde foram analisadas quanto ao pH (pHmêtro portátil calibrado com tampões 4 e 7), Condutividade Elétrica (Condutivimêtro eletrônico portátil), Alcalinidade total (titulometria segundo o método de Gran, 1952) e Turbidez (Turbidímetro portátil).

Para determinar as concentrações de Clorofila a e Sólidos Totais em Suspensão, foi filtrado, em duplicata para cada análise, filtros de fibra de vidro GF1 (0,7 μm de diâmetro dos poros) amostras de água. A Clorofila foi extraída por etanol e lida em seguida lida. As concentrações de Fósforo Total foram estimadas segundo o método do complexo azul de molibdênio, através de leitura em espectrofotômetro (Murphy & Rlpely, 1962) e, as de Nitrogênio Total pelo método de conversão, por digestão, para nitrogênio dissolvido.

Foram coletadas frações superficiais do sedimento (0-3 cm de profundidade) com coletor tipo core e determinada a concentração de Matéria Orgânica através de incineração de uma alíquota de 1,5 gramas da amostra macerada após seca em estufa. O resultado foi obtido pela diferença entre o peso seco da amostra inicial e o peso das cinzas originais da combustão da mesma, e expressa em porcentagem de peso seco.

O Nitrogênio Total foi determinado pelo método de Kjeldahl, que se baseia na digestão do material macerado (cerca de 0,3 gramas) por ácido sulfúrico em presença de catalisador misto, composto por selênio, sulfato de potássio e sulfato de cobre. Posteriormente, a amostra é alcalinizada e a amônia liberada é recebida em solução de ácido bórico, que é titulada em seguida com ácido clorídrico.

3.3 Análise de dados

Métodos de estatística descritiva foram adotados para caracterizar o pulso de inundação para o Médio-Baixo curso do Rio Trombetas quanto a sua Duração para as fases de Enchente, Águas Altas, Vazante e Águas Baixas, e quanto a Intensidade para as fases de Águas Altas e Águas Baixas (Bittencourt & Amadio, 2007). Foram utilizados registros fluviométricos diários de 1973 a 2017, sendo desconsiderado o ano de 2000 por apresentar 71% de *missing values*, totalizando 43 anos de registros. O valor limítrofe para fase de Águas Altas foi definido

a partir da média menos o desvio padrão e para a fase de Águas Baixas, definido pelo valor médio acrescido do desvio padrão.

A partir da classificação dos valores limítrofes que registram a mudança entre as fases do período hidrológico, foi calculada a duração em dias de cada uma das fases. Os anos em que os valores limítrofes não foram atingidos, por apresentarem eventos fracos de cheia ou seca, não foram considerados para a contagem de dias que cada fase acumulou naquele ano e posteriormente para efeito e classificação, os mesmos foram calculados com base no dia em que a linha média atinge os valores limítrofes. O intervalo de duração típica de cada fase foi calculada a partir da soma e subtração do desvio padrão ao valor da média de dias que a fase apresentou nos 43 anos, e a partir desse intervalo definido os limites em dias para cada fase em Curto e Longo.

Para as fases de Águas Altas e Águas Baixas foi definida a intensidade do pulso de inundação em eventos Fracos, Típicos ou Fortes. Para tal foi adotado o intervalo de confiança de 0.05 da média dos valores máximos e mínimos anuais do nível do Rio Trombetas. Os limites superiores e inferiores definiram o intervalo adotado para um período Típico e a abaixo ou acima do limite inferior e superior, foram definidas a intensidade Fraca ou Forte para as fases de Águas Altas e Águas Baixas.

As matrizes de correlação de Spearman foram obtidas para determinar a relação estatística significativa ($r > 0.8$ ou $r < -0.8$, $p < 0.05$) para as 14 variáveis ambientais amostradas no Lago Batata. Foi aplicada uma Análise de Componentes Principais (PCA) para 344 registros, descritos por 12 variáveis ambientais amostradas em três estações de monitoramento nas quatro fases do pulso de inundação para compreender a estrutura dos dados e reduzir a massa de dados com a menor perda possível de informação (Hongyu, Lúcia, Sandanielo, & Jorge De Oliveira Junior, 2015).

Para determinar se existe alguma diferença estatisticamente significativa entre as estações de amostragem foi feito uma análise de variância por meio do teste de Kruskal-Wallis ($p < 0.05$) para as variáveis ambientais selecionadas nos dois primeiros componentes principais. Para os grupos que apresentaram diferença significativas foi realizado teste de Wilcoxon ($p < 0.05$) para identificar os pares de grupos diferentes entre si.

Foi verificada a tendência das variáveis ambientais indicadas na PCA para cada estação de amostragem. O teste de Mann-Kendall ($p < 0.05$) foi adotado por ser indicado para verificar a existência e significância da tendência em séries temporais de dados ambientais (Sneyers, 1975).

Dentre as técnicas estatísticas utilizadas para previsão em séries temporais, umas das mais recentes está no pacote de código aberto Prophet, disponível em Python e R (Taylor & Letham, 2019). Indicado para séries longas de dados o pacote apresenta um modelo de série temporal que identifica e ajusta automaticamente ao tratamento de sazonalidade, tendência e eventos, sendo robusto ao tratamento de registros faltantes, pontos de mudança e *outliers* (Taylor & Letham, 2018).

O método Prophet foi utilizado para detectar alterações que apresentam capacidade de mudar a trajetória das variáveis ambientais, os chamados ponto de mudança, para realizar o treinamento e teste do método preditivo, para verificar a precisão do método de predição Prophet para as variáveis ambientais do Lago Batata e efetuar a previsão para algumas dessas variáveis ambientais da E10 (Taylor & Letham, 2018, 2019). Os pontos de mudança indicam a mudança no comportamento de tendências de uma variável e podem ser crescente, decrescente ou constante (Zhang et al., 2009). As etapas de treinamento indicam o quão viável o método é capaz de prever qualquer parâmetro de um método de previsão e os dados de teste são usados para avaliar a precisão alcançada pelo método. Para previsão das variáveis ambientais 60% dos registros observados da série de dados foram utilizados para treinar o método de previsão e 40% dos registros para testar. O percentual adotado atendeu ao requisito em que o conjunto de teste deve apresentar a quantidade de registros idealmente igual ou próximo do prazo a ser previsto (Hyndman & Athanasopoulos, 2018).

Para treinamento, teste e previsão foram adotados nível de significância de 0.20 e 40 prazos de previsão, ou seja, 10 anos de previsão considerando que os dados foram amostrados trimestralmente e possuem sazonalidade com frequência igual a quatro.

A acurácia da previsão foi verificada pela medida de precisão MASE (*mean absolute scaled error*) ($MASE < 1$), indicada para registros próximos de zero ou que apresentem escalas muito diferentes e apresentem sazonalidade, além de ser a menos sensível a *outliers* (Hyndman & Koehler, 2005).

As análises foram realizadas utilizando a plataforma R Statistics que é uma linguagem para computação de técnicas estatísticas e para preparação de visualização gráfica (Borcard, Gillet, Legendre, & Daniel Borcard, 2011).

4 Resultados

4.1 Caracterização do pulso de inundação

Para cada um dos 43 anos de registros do nível do Rio Trombetas foram verificados os menores e maiores registros (Figura 7) e então calculados a média e o desvio padrão para os valores mínimos e máximos dos 43 anos de registros (Tabela 2).

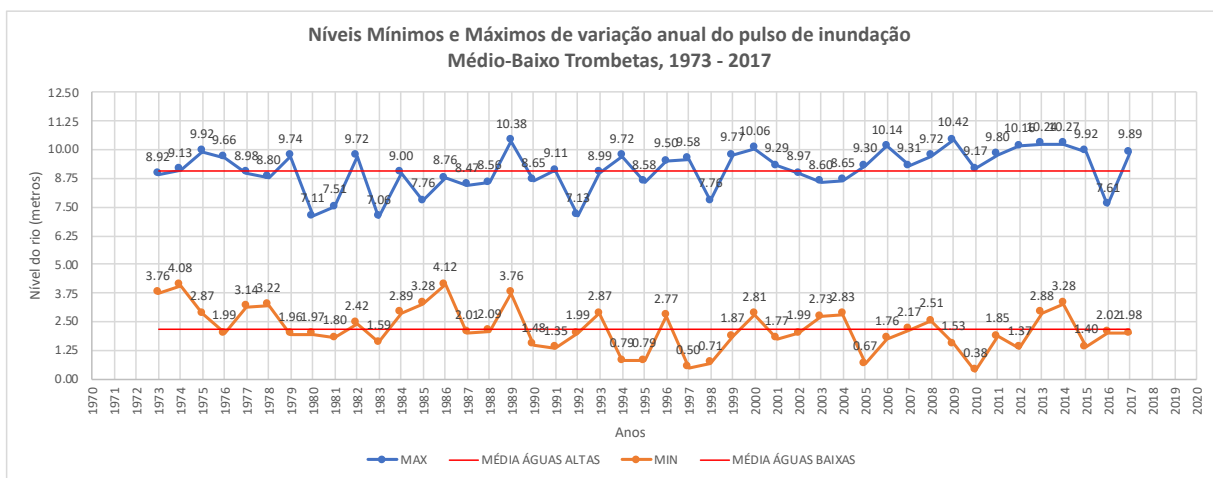


Figura 7. Valores Mínimos (MIN) e Máximos (MAX) alcançados nas fases de Águas Baixas e Águas Altas no Médio-Baixo curso do Rio Trombetas de 1973 a 2017. Azul = MAX, Laranja = MIN, Vermelho = Média dos valores máximos e Verde = Média dos Mínimos.

Os valores limítrofes para as transições entre as fases do pulso foram definidos para Águas Altas e Águas Baixas (Tabela 2). As transições entre as fases do pulso de inundação foram definidas entre 3.11 m e 8.17 m. Logo, a fase de Enchente inicia em 3.11 m e encerra com 8.17 m, a fase de Águas Altas inicia e encerra com 8.17 m, seguida pelo início da Vazante com a descida do nível até 3.11 m quando se inicia a fase de Águas Baixas.

Tabela 2. Definição dos valores limítrofes para as transições entre as fases do pulso com base nas médias dos valores máximos e mínimos do nível do Rio Trombetas de 1973 a 2017.

Valores Máximos		Valores Mínimos	
Média	9.08	Média	2.16
Desvio Padrão	0.91	Desvio Padrão	0.95
Média - Desvio Padrão	8.17	Média + Desvio Padrão	3.11

4.1.1 Duração

A duração, em dias, das fases do pulso de inundação é apresentada na Tabela 3. A classificação da duração do pulso de inundação para as fases do pulso de inundação no período de 1973 a 2017 através da diferença da quantidade de dias em relação a média de dias que a fase apresentou no período (Figura 8). A quantidade de dias e classificação para cada ano podem ser verificados no Apêndice B na Tabela 9, e as médias das fases de Águas Altas e Águas Baixas na Tabela 2.

Tabela 3. Duração do pulso de inundação, em dias, para o Médio-Baixo curso do Rio Trombetas considerados os registros de 1973 a 2017.

FASE DO PULSO	CURTO	TÍPICO	LONGO
Enchente	< 90 dias	90 a 140 dias	> 140 dias
Águas Altas	< 70 dias	70 a 140 dias	> 140 dias
Vazante	< 55 dias	55 a 95 dias	> 95 dias
Águas Baixas	< 45 dias	45 a 90 dias	> 90 dias