

## ANÁLISE DE AMBIENTES AQUÁTICOS CONTINENTAIS: INTEGRAÇÃO DA OCEANOGRAFIA FÍSICA ESTUARINA, LIMNOLOGIA E HIDROQUÍMICA PARA A ANÁLISE DE NAUFRÁGIOS METÁLICOS EM AMBIENTES DEPOSICIONAIS FLUVIAIS-ESTUARINOS-OCEANICOS

Jardel Stenio de Araujo Barbosa<sup>1</sup>

**RESUMO:** Este artigo explora a análise interdisciplinar dos naufrágios históricos em ambientes aquáticos, destacando a contribuição da Limnologia, Hidroquímica e Oceanografia Física de Estuários. Aborda-se o campo de estudo da Limnologia, que se estende desde sistemas aquáticos de água doce até estuários e zonas costeiras, o estudo aprofunda o entendimento dos processos ambientais nos fluxos aquático lênticos e lóticos e seu impacto em sítios de naufrágios de natureza metálica. A Hidroquímica é enfatizada pela sua análise da composição química da água, relevante para compreender os impactos ambientais e os mecanismos de corrosão e biodeterioração em naufrágios. Paralelamente, a Oceanografia Física Estuarina é destacada por seu papel no entendimento das variações hidrológicas e seus efeitos sobre a integridade dos naufrágios em zonas costeiras. O artigo ressalta a relevância destes campos de estudo na análise bidirecional entre naufrágios e seus ambientes aquáticos, abrangendo tanto o impacto dos naufrágios no sistema aquático quanto a influência do ambiente na preservação deles.

240

**Palavras-Chave:** Limnologia. Oceanografia Estuarina. Fluxo aquático. Naufrágios.

### INTRODUÇÃO

Este artigo propõe uma análise interdisciplinar dos naufrágios históricos em ambientes aquáticos, enfocando a contribuição das ciências da Limnologia, Hidroquímica e Oceanografia Física de Estuários. A Limnologia, inicialmente concentrada em ecossistemas de água doce como lagos e rios, expandiu seu escopo para incluir estuários e zonas costeiras, ampliando assim o entendimento dos processos ecológicos em ambientes lênticos e lóticos. Esta expansão é essencial para a compreensão integrada dos processos físicos, químicos e

---

<sup>1</sup>Doutorando em Patrimônio, Tecnologia e Território (Especialidade em Arqueologia Marítima e Naval) - Universidade Autónoma de Lisboa (UAL/PT). Mestre em Ciência e Tecnologia Marinha com ênfase em Oceanografia - Universidad Europea del Atlántico (Cantábria, Espanha). Bacharel em Arqueologia (UFPI) e Especialista em Arqueologia Náutica e Subaquática (UNESCO/IPT). Bacharel em Geografia com ênfase em Geografia Física Marinha (UNESA). Pós-Graduado em Análise de Ambientes Aquáticos e Continentais (UNIARA). Pós-Graduado em Ciências Ambientais (UFPA). Coordenador do Centro de Estudos em Arqueologia Oceanográfica e Subaquática (CEAOS) - Arqueologista. Membro do Museu Marítimo EXEA e do Centro de Geociências da Universidade de Coimbra. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1184-9037>.

biológicos nos ecossistemas aquáticos e seu impacto sobre os sítios arqueológicos subaquáticos.

A Hidroquímica, como um ramo da hidrogeologia, foca na análise da composição química da água, fornecendo informações pertinentes sobre os impactos ambientais de naufrágios e os mecanismos de corrosão e biodeterioração. Complementarmente, a Oceanografia Física Estuarina contribui para o entendimento das variações hidrológicas em ambientes costeiros e seus efeitos sobre a integridade estrutural dos naufrágios.

O objetivo do trabalho é demonstrar para pesquisadores e arqueólogos a aplicabilidade e relevância dessas disciplinas científicas na análise de naufrágios históricos em ambientes aquáticos de transição fluvial-oceano.<sup>2</sup>

Naufrágios, enquanto sítios arqueológicos e históricos, são importantes para compreender o nosso passado marítimo e fluvial, funcionando como “capsulas do tempo”, mas estão continuamente sujeitos a processos de degradação em ambientes aquáticos (HAMILTON, 1975). Estes processos são influenciados por uma variedade de fatores ambientais, incluindo as características físicas, químicas e biológicas de zonas costeiras e estuarinas.

A oceanografia física costeira e estuarina fornece métodos sobre as dinâmicas físicas desses ambientes, como correntes, marés, e processos de sedimentação. Estes aspectos físicos têm impactos diretos na estabilidade estrutural dos naufrágios e na sua interação com os sedimentos circundantes. A erosão, o soterramento, e os movimentos físicos causados por correntes e tempestades são aspectos críticos que podem acelerar a degradação dos naufrágios ou alterar seu contexto arqueológico (MIRANDA, 2002).

Por outro lado, a limnologia e a hidroquímica proporcionam métodos sobre os processos químicos e biológicos que ocorrem em ambientes de água doce e salobra. A corrosão metálica, um dos principais fatores na degradação de naufrágios, é um processo químico complexo influenciado pela salinidade, oxigenação da água, e presença de microorganismos. Por fim, o artigo ressalta a relevância dessas ciências na análise bidirecional entre naufrágios e seus ambientes aquáticos, abrangendo tanto o impacto dos naufrágios no sistema aquático quanto a influência do ambiente na preservação deles.

---

<sup>2</sup> O presente estudo está embasado nas pesquisas para a dissertação do autor defendida no ano de 2023 na Universidad Europea del Atlántico, Cantábria, Espanha.

## LIMNOLOGIA E ALGUNS CONCEITOS

A limnologia, uma disciplina científica que se concentra primariamente no estudo de ecossistemas aquáticos continentais e interiores, tais como lagos, rios e reservatórios, possui métodos e conceitos que, apesar de originalmente não serem direcionados para ambientes marinhos, podem ser efetivamente adaptados e implementados em zonas costeiras. Especificamente, este ramo da ciência pode ser aplicado no estudo de ecossistemas costeiros singulares, como as lagoas costeiras, onde sua abordagem pode oferecer uma compreensão aprimorada dos processos ecológicos, físicos e químicos nestes ambientes (ESTEVES, 1998).

De acordo com Vincent (2018), a Limnologia, como disciplina, tem se expandido para incluir o estudo de todos os ambientes aquáticos interiores, incluindo os estuários. Originalmente focada em lagos, a Limnologia, nos últimos anos, tem abordado os rios, córregos e estuários. Este alargamento de escopo é evidenciado também no trabalho de Xenopoulos et al. (2017), que destaca a continuidade e a conectividade entre ecossistemas aquáticos, desde córregos de cabeceira e águas interiores até sistemas costeiros e marinhos, enfatizando a importância da Limnologia na compreensão e da sua conexão com a Oceanografia Física Estuarina, incluindo o conceito de contínuo fluvial, o contínuo terra-oceano, os sistemas fluviais-estuários e a descarga submarina de águas subterrâneas (XENOPOULOS et al., 2017).

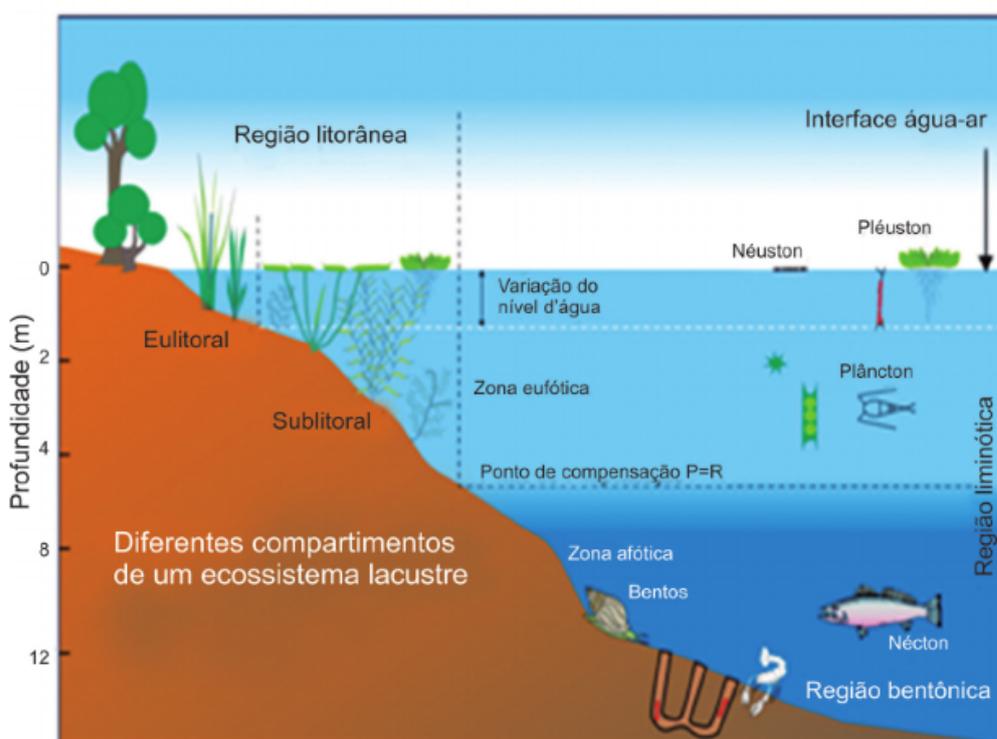
Nesses aspectos de ambientes de transições fluviais-estuarinos-oceânicos, o estudo dessas interações é crucial para compreender os efeitos de degradação de naufrágios metálicos neste ambiente. A transição fluvial-estuarina-oceânica é uma zona complexa onde interagem processos terrestres e marinhos. Esta zona possui características únicas de morfologia, sedimentação e dinâmicas hidrodinâmicas que influenciam diretamente a degradação de naufrágios metálicos.

Especificamente em lagoas costeiras, que frequentemente exibem uma mistura de águas doces e salgadas, os processos estudados pela limnologia, incluindo eutrofização, dinâmica de nutrientes e análises de estratificação de camadas aquática ganham relevância (ESTEVES, 1998).

Sobre este último, Esteves (1998) classifica o ambiente aquático continental em diversos compartimentos, delineando uma estrutura que facilita a compreensão dos complexos sistemas aquáticos. Segundo sua classificação, o ambiente aquático continental é dividido em: região litorânea, região limnética ou pelágica, região profunda, e a interface

água-ar. Cada um destes compartimentos possui características e funções ecológicas distintas dentro do ecossistema aquático.

Figura 1: Representação esquemática dos compartimentos aquáticos continentais.



Fonte: Esteves (1998)

**Região Litorânea:** Esta zona é caracterizada pela proximidade com a margem do lago e geralmente possui uma rica biodiversidade devido à abundância de luz e nutrientes. É uma área onde a interação entre o ambiente terrestre e aquático é mais intensa, influenciando significativamente os processos ecológicos (ESTEVES, p. 26, 1998).

**Região Limnótica ou Pelágica:** É a zona de águas abertas do lago, que se estende desde a região litorânea até a profundidade onde a luz solar é suficiente para suportar a fotossíntese. Esta região é o principal local de atividade do fitoplâncton e zooplâncton, desempenhando um papel crucial na cadeia alimentar aquática (ESTEVES, p. 27, 1998).

**Região Profunda:** Conhecida também como zona profunda, é a parte do lago onde a luz solar não penetra efetivamente, resultando em condições de pouca ou nenhuma fotossíntese. Esta região é caracterizada por temperaturas mais baixas e níveis de oxigênio reduzidos (ESTEVES, p. 27, 1998).

Interface Água-Ar: Esta zona representa a superfície do lago, onde ocorre a troca de gases entre a água e a atmosfera. É um compartimento crucial para os processos de oxigenação da água e para o intercâmbio de outros gases, como o dióxido de carbono (ESTEVES, p. 27, 1998).

Naufrágios históricos, principalmente de casco metálicos situados em diferentes camadas aquáticas tendem a sofrer processos de degradação que variam significativamente, devido às distintas características físicas, químicas e biológicas de cada zona (HAMILTON, 1975). Na região litorânea, por exemplo, a interação com a margem do lago, a rica biodiversidade e a abundância de luz e nutrientes podem acelerar os processos de corrosão e biodeterioração dos naufrágios. A presença constante de oxigênio e a atividade biológica nesta zona podem levar a uma rápida oxidação, gerando corrosão dos materiais metálicos que aceleram a degradação sítio arqueológico (HAMILTON, 1975).

Por outro lado, na região limnética ou pelágica, os naufrágios podem estar mais protegidos dos processos de corrosão intensa devido à menor influência dos sedimentos e menor atividade biológica direta em comparação com a região litorânea. No entanto, nesta zona, a fotossíntese do fitoplâncton pode influenciar a composição química da água, o que pode impactar a taxa de corrosão (HAMILTON, 1975).

Na região profunda, onde a luz solar é limitada ou inexistente, a redução de oxigênio e a baixa atividade biológica podem retardar a corrosão, mas o ambiente anóxico pode favorecer outros tipos de processos químicos que afetam os materiais metálicos (HAMILTON, 1975). A interface água-ar, sendo a zona de troca gasosa, pode ter um impacto variável na degradação dos naufrágios, dependendo da extensão da exposição do naufrágio a esta camada e das condições atmosféricas locais (HAMILTON, 1975).

Portanto, é importante compreender a dinâmica específica de cada camada aquática, não somente em ambientes aquáticos continentais de água doce, como amplamente explorado por Esteves (1998), mas também em ambientes marinhos, estuarinos e oceânicos, entre outros. Esta compreensão abrangente é importante para analisar os processos físicos, químicos e biológicos que influenciam naufrágios históricos de diversas naturezas.

## FLUXO HIDROLÓGICO DO AMBIENTE AQUÁTICO EM LIMNOLOGIA

Em Limnologia, "fluxo aquático lântico" refere-se a sistemas de águas paradas ou lentas, como lagos e pântanos, enquanto "fluxo aquático lótico" descreve sistemas de água

corrente, como rios e riachos. Esses termos são usados para classificar ambientes aquáticos com base na velocidade e no movimento da água, cada um com características ecológicas distintas (JONES, et al. 2017).

## AMBIENTES LÊNTICOS

Os ambientes lênticos referem-se a corpos de água estagnados ou com fluxo muito lento. Estes incluem lagos, lagoas, pântanos e reservatórios. O termo “lêntico” vem do latim “lentus”, que significa lento ou parado. Nestes ecossistemas, a água não flui de maneira constante ou rápida, permitindo a formação de um ambiente relativamente estável (PINHEIRO, 2008).

Conforme Esteves (1998), A característica marcante dos ambientes lênticos é a estratificação da água, especialmente em lagos e grandes lagoas. A estratificação ocorre quando diferentes camadas de água se formam com base em temperatura, oxigenação e densidade. Durante o verão, por exemplo, é comum que uma camada superior mais quente e oxigenada se sobreponha a uma camada mais fria e menos oxigenada, com uma zona de transição chamada termoclina (LOPES & CALIMAN, 2008).

Os ecossistemas lênticos são ricos em biodiversidade. Ainda segundo Jones et al (2017), eles suportam uma variedade de espécies de plantas, invertebrados, peixes e microorganismos. A produtividade primária nesses ambientes, principalmente devido à fotossíntese de fitoplâncton e plantas aquáticas, é um fator chave para a cadeia alimentar e a dinâmica do ecossistema (LOPES & CALIMAN, 2008).

## AMBIENTES LÓTICOS

Por outro lado, os ambientes lóticos são caracterizados por águas em movimento, como rios, riachos e córregos. O termo “lótico”, derivado do grego “lotus”, significa lavar ou correr. A característica principal dos ambientes lóticos é o fluxo contínuo de água, o que gera condições dinâmicas e variáveis (PINHEIRO, 2008).

Como descrito Esteves (1998), os ambientes lóticos são marcados por um gradiente longitudinal, onde as condições ambientais e biológicas mudam desde a nascente até a foz. Este gradiente inclui variações na velocidade da água, na carga de sedimentos e na química da água. As espécies encontradas em ambientes lóticos são adaptadas para lidar com a

correnteza, como peixes que conseguem nadar contra a corrente e invertebrados que se fixam em substratos no leito do rio (PINHEIRO, 2008).

Outro aspecto importante dos ambientes lóticos é a renovação contínua de nutrientes e oxigênio, vital para a manutenção da vida aquática. Este fluxo constante também significa que poluentes e sedimentos são transportados e dispersos ao longo do curso de água (FIA, et. Al, 2015).

A interação entre naufrágios metálicos históricos e os diversos tipos de fluxo de água, especificamente os ambientes lênticos e lóticos, exerce um papel significativo na determinação da taxa e do caráter da degradação desses naufrágios. Estes fluxos de água, definidos primariamente pela velocidade e pelo padrão do movimento da água, influenciam diretamente as condições ambientais no local do naufrágio histórico, afetando assim os processos de deterioração (HAMILTON, 1975).

## INFLUÊNCIA DOS AMBIENTES LÊNTICOS NA DEGRADAÇÃO DE NAUFRÁGIOS METÁLICOS

Nos ambientes lênticos, a água estagnada ou de movimento muito lento contribui para uma série de processos que podem tanto acelerar quanto retardar a degradação de naufrágios metálicos. Uma característica marcante desses ambientes é a estratificação da água, que pode criar condições anóxicas (baixas em oxigênio) nas camadas inferiores. Como indicado por Hamilton (1975), em condições anóxicas, a taxa de corrosão metálica pode ser significativamente reduzida, já que o oxigênio é um importante reagente no processo de oxidação.

Entretanto, os ambientes lênticos frequentemente apresentam altas taxas de sedimentação. A acumulação de sedimentos sobre naufrágios pode tanto proteger o metal da exposição ao oxigênio e outros agentes corrosivos, quanto induzir processos biológicos e químicos que aceleram a deterioração. Por exemplo, a sedimentação pode facilitar a formação de biofilmes e a atividade de bactérias redutoras de sulfato, que podem aumentar a corrosão em ambientes anóxicos (HAMILTON, 1975).

Além disso, a estagnação da água em ambientes lênticos pode levar à concentração de poluentes e nutrientes, resultando em processos como a eutrofização. Este enriquecimento por nutrientes pode estimular o crescimento de microorganismos que afetam o estado de conservação dos naufrágios, como destacado (HAMILTON, 1975).

## INFLUÊNCIA DOS AMBIENTES LÓTICOS NA DEGRADAÇÃO DE NAUFRÁGIOS METÁLICOS

Em contraste, os ambientes lóticos, caracterizados por águas correntes, apresentam um cenário diferente para naufrágios metálicos. A principal característica desses ambientes é o fluxo contínuo de água, que influencia a taxa de corrosão e os processos de degradação de diversas maneiras (FIA, et. Al, 2015).

Conforme Esteves (1998) observam, a renovação constante de água em ambientes lóticos pode impedir a formação de ambientes anóxicos, resultando em uma maior disponibilidade de oxigênio e, conseqüentemente, potencialmente acelerando a corrosão dos materiais metálicos. Além disso, a constante movimentação de água pode erodir e remover camadas protetoras que se formam sobre os metais, expondo-os a novos ciclos de oxidação.

A dinâmica de sedimentos em ambientes lóticos também é fundamental nos estudos de preservação de naufrágios históricos. Enquanto a sedimentação pode ocorrer, a natureza dinâmica desses ambientes frequentemente resulta na ressuspensão de sedimentos. Esta ressuspensão pode expor naufrágios a ciclos alternados de cobertura e exposição de sedimentos, influenciando a taxa de deterioração (HAMILTON, 1975).

Além disso, a água em movimento pode causar abrasão mecânica nos naufrágios, através do transporte de partículas e detritos, que podem desgastar fisicamente as estruturas metálicas ao longo do tempo.

## APORTES DA HIDROQUÍMICA COMO COMPONENTE DE ANÁLISE NO ESTUDO DE NAUFRÁGIOS METÁLICOS

A Hidroquímica, um ramo vital da hidrogeologia, foca no estudo da composição química da água em ambientes subterrâneos e superficiais. Ela explora como as interações químicas entre a água e o ambiente geológico influenciam a qualidade e as propriedades da água.

A conexão entre a hidroquímica e a limnologia é relevante no contexto dos estudos sobre naufrágios em ambientes aquáticos. Por exemplo, em naufrágios situados em ambientes lênticos e lóticos, a análise hidroquímica pode informar como variações na composição química da água, como o teor de oxigênio dissolvido, pH e presença de certos íons, podem influenciar a corrosão do metal (HAMILTON, 1975).

Dessa forma, a hidroquímica, como parte integrante da hidrogeologia, é importante, tanto para a conservação de sítios arqueológicos subaquáticos quanto para entender os impactos ambientais de naufrágios, complementando os estudos limnológicos em ambientes de transição fluvial-estuarino-oceano.

Com base na revisão bibliográfica realizada, identificou-se alguns aspectos mais relevantes que a Limnologia e a Hidroquímica, como disciplinas focadas no estudo dos ambientes aquáticos continentais, podem proporcionar para a análise de naufrágios históricos nesses ambientes, sendo estes:

- **Monitoramento de Poluentes:** Limnologia e hidroquímica auxiliam no monitoramento de poluentes provenientes de naufrágios, avaliando riscos ambientais.
- **Análise de Corrosão Metálica:** Oferecem compreensão detalhada dos processos de corrosão metálica em naufrágios, influenciados pela química da água.
- **Estudo de Microorganismos:** Ambas as ciências ajudam a estudar o impacto de microorganismos na deterioração dos naufrágios e na formação de biofilmes.
- **Avaliação da Qualidade da Água:** Fornecem dados sobre a qualidade da água ao redor dos naufrágios, incluindo pH, oxigênio dissolvido e salinidade.
- **Impacto de Nutrientes e Contaminantes:** Analisam como nutrientes e contaminantes afetam a preservação e a deterioração de naufrágios.
- **Modelagem Ambiental:** Permitem a modelagem de impactos ambientais dos naufrágios, simulando a dispersão de substâncias químicas.
- **Estudos de Sedimentação:** Investigam como a sedimentação influencia a conservação de naufrágios, afetando a cobertura e exposição de sedimentos.
- **Compreensão das Inter-relações Ecológicas:** Elucidam as interações entre naufrágios e ecossistemas aquáticos, impactando a biodiversidade local.
- **Desenvolvimento de Estratégias de Conservação:** Auxiliam na criação de estratégias efetivas para a conservação de sítios arqueológicos subaquáticos.
- **Análise de Alterações Hidrológicas:** Avaliam como mudanças nos padrões hidrológicos de ambientes costeiros afetam a integridade dos naufrágios

Os aspectos identificados na revisão bibliográfica demonstram como estas disciplinas contribuem significativamente para um entendimento dos impactos e das interações entre naufrágios e em ambientes transicionais aquáticos em contextos de fluxos

hidrológicos continentais. Embora este conteúdo seja de natureza introdutória, é fundamental que os pesquisadores dedicados a este campo busquem um entendimento mais profundo. A complexidade e variabilidade dos aspectos químicos, físicos, biológicos, e demais condições ambientais afetam significativamente a preservação dos naufrágios, exigindo uma análise detalhada e específica de cada fator.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na revisão da literatura e nas discussões apresentadas, evidencia-se a notável contribuição das ciências que investigam os ambientes costeiros de transição fluvial-estuarino-oceano para o estudo de naufrágios históricos. A fundamentação teórica incorpora aspectos da Oceanografia Física de Estuários, bem como perspectivas da Limnologia e da Hidroquímica enquanto método de análise da água, essenciais na análise das alterações químicas hidrológicas em áreas onde se localizam naufrágios históricos que são objetos de estudos pela Arqueologia.

O propósito deste artigo foi destacar para pesquisadores e arqueólogos a aplicabilidade e relevância dessas disciplinas científicas na análise de naufrágios históricos em ambientes aquáticos de transição fluvial-oceano. Esta abordagem interdisciplinar é importante para compreender a interação bidirecional entre naufrágios e seu ambiente aquático circundante. Por um lado, analisa-se como o naufrágio afeta o ecossistema aquático, incluindo impactos sobre a biodiversidade e a dinâmica sedimentar. Por outro, é possível que se investigue como as características ambientais - como salinidade, correntes, e processos hidroquímicos - influenciam a degradação e conservação dos naufrágios.

## REFERÊNCIAS

ESTEVES, F. de A. Fundamentos de limnologia. FINEP. **Interciência, Rio de Janeiro. 602p**, 1998.

FIA, Ronaldo et al. Qualidade da água de um ecossistema lótico urbano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 1, p. 267-275, 2015.

HAMILTON, Donny Leon. Conservation of metal objects from underwater sites: a study in methods. 1975.

JONES, Allan E. et al. Residence-time-based classification of surface water systems. **Water Resources Research**, v. 53, n. 7, p. 5567-5584, 2017.

LOPES, Paloma Marinho; CALIMAN, Adriano. A contribuição de ecossistemas lênticos para o entendimento da importância de processos regionais e locais sobre padrões geográficos de biodiversidade. **Publicação Da Sociedade Brasileira De Limnologia**, 2008.

PINHEIRO, Mariana Rodrigues Carvalhaes de; KURY, Karla Aguiar. 1-Conservação ambiental e conceitos básicos de ecologia. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 2, n. 2, p. 15-28, 2008.

VINCENT, Warwick F. **Lakes: A very short introduction**. Oxford University Press, 2018.

XENOPOULOS, Marguerite A. et al. Headwaters to oceans: Ecological and biogeochemical contrasts across the aquatic continuum. **Limnology and Oceanography**, v. 62, n. S1, p. S3-S14, 2017.