

MIXLAKE

LIMNOLOGIA FÍSICA DE LAGOS E RESERVATÓRIOS

CHAMADA CNPQ N° 49/2024
PÓS-DOCTORADO JÚNIOR - PDJ 2024
PROCESSO: 152147/2025-0



ÍNDICE

1.	INFORMAÇÕES GERAIS DO PROJETO.....	3
1.1.	IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO.....	3
1.2.	EQUIPE EXECUTORA.....	3
2.	OBJETIVOS.....	4
3.	RELEVÂNCIA DO PROJETO E JUSTIFICATIVA.....	5
4.	METAS E PRODUTOS.....	6
4.1.	META 1 - APRIMORAMENTO DE MODELOS PARA PREVISÃO DA MISTURA DE LAGOS.....	7
4.1.1.	INTRODUÇÃO.....	8
4.1.2.	MÉTODOS.....	9
4.1.3.	RESULTADOS.....	11
4.1.4.	DISCUSSÃO.....	15
4.2.	META 2 - MODELO HIDRODINÂMICO EM GRADE NÃO ESTRUTURADA.....	18
4.2.1.	INTRODUÇÃO.....	18
4.2.2.	MÉTODOS.....	20
4.2.3.	RESULTADOS.....	22
4.2.4.	DISCUSSÃO.....	22
4.3.	META 3 - IMPLEMENTAÇÃO DA TEORIA NO SOFTWARE INTERWAVE ANALYZER.....	23
4.3.1.	INTERFACE GRÁFICA.....	23
4.3.2.	PLATAFORMA PARA PARÂMETROS ADICIONAIS.....	25
4.3.3.	IMPLEMENTAÇÃO DE DADOS BATIMÉTRICOS PARA ANÁLISE.....	25
4.3.4.	CÁLCULO DO NÚMERO DE SCHMIDT E DO LAKE NUMBER.....	28
4.3.5.	CÁLCULO DO PARÂMETRO CRÍTICO BATIMÉTRICO.....	29
4.3.6.	DASHBOARD DE VISUALIZAÇÃO E DIAGNÓSTICO.....	30
5.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	31
6.	CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO DO PROJETO.....	32
7.	RESUMO FINANCEIRO.....	33
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

Instituição internacional parceira:

1. INFORMAÇÕES GERAIS DO PROJETO

1.1. IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

Título do projeto:	MixLake - Limnologia Física de Lagos e Reservatórios
Coordenador:	Rafael de Carvalho Bueno
Instituições participantes:	Universidade Federal do Paraná
Currículo Lattes:	http://lattes.cnpq.br/7638962066048654
E-mail:	decarvalhobueno@gmail.com
Telefone:	+55 41 - 99905 3384
Palavras-chave	Reservatórios, Lagos, Monitoramento ambiental, Limnologia, Modelagem Hidrodinâmica
Área de conhecimento predominante:	Ciências Ambientais
Áreas de conhecimento correlatas:	- Mecânica dos Fluidos - Hidráulica

1.2. EQUIPE EXECUTORA

Nome	IES	Titulação	Função no Projeto	Currículo Lattes ou ORCID
Rafael de Carvalho Bueno	UFPR	Doutorado	Bolsista PDJ	http://lattes.cnpq.br/7638962066048654
Tobias Bernward Bleninger	UFPR	Doutorado	Supervisor	http://lattes.cnpq.br/5131189316971564
Colaboradores internacionais				
Andreas Lorke	RPTU*	Doutorado	Colaborador	https://orcid.org/0000-0001-5533-1817

*RPTU = University of Kaiserslautern-Landau (A instituição teve seu nome alterado recentemente, no qual o antigo era, assim como cadastrado no diretório de instituições do CNPq, University of Koblenz-Landau).

Instituição internacional parceira:

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste projeto é aprimorar a previsibilidade da hidrodinâmica e da qualidade da água de reservatórios de abastecimento (Figura 1), fornecendo subsídios científicos para uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos. A compreensão detalhada dos processos de mistura, transporte e dissipação de energia cinética turbulenta desempenham um papel crucial na previsibilidade da qualidade da água e segurança hídrica destes ambientes, auxiliando na quantificação das emissões de gases de efeito estufa, dinâmica de sedimento e equilíbrio ecossistêmico.

Para alcançar esse objetivo, foi desenvolvida uma teoria de mistura e circulação de lagos, permitindo assim, o aperfeiçoamento de modelos simplificados amplamente utilizados para a previsão da dinâmica e qualidade da água. A teoria foi baseada nos resultados de simulações numéricas realizadas por um modelo hidrodinâmico tridimensional. Os resultados obtidos, integrados à base teórica da mecânica de fluidos, servem para aperfeiçoar os modelos preditivos da dinâmica de lagos e reservatórios, e auxiliar na formulação de modelos de qualidade da água, auxiliando a previsão da qualidade da água destes ambientes.

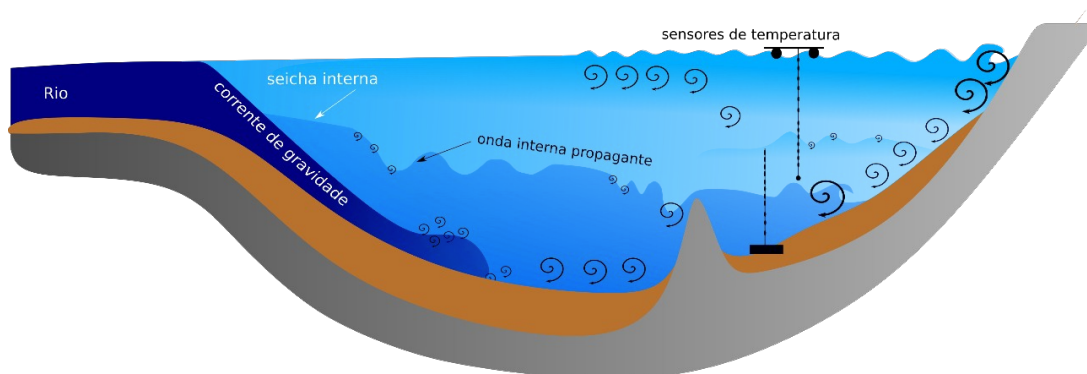


Figura 1. Visão esquemática das correntes e do processo de mistura em lagos e reservatórios. Diferentes tons de azul indicam camadas com diferentes temperaturas. As camadas em cor marrom e prata representam, respectivamente, a camada de sedimento e a batimetria sólida do lago. Seichas internas e ondas propagantes podem ocorrer nas interfaces entre camadas com diferentes temperaturas. As espirais (setas pretas) ilustram a mistura turbulenta.

Para avaliar a aplicabilidade da teoria, foi proposto o desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico do reservatório do Passaúna (Figura 2). A calibração e validação do modelo numérico proposto se baseou em dados coletadores entre março de 2018 e fevereiro de 2019 realizados no Reservatório do Passaúna, provenientes do projeto "Multidisciplinary Data Acquisition as the Key for a Globally Applicable Water Resource Management", conduzido entre 2017 e 2020 em uma colaboração Brasil-Alemanha e financiado pelo BMBF. Além do avanço científico, o modelo desenvolvido está acessível tanto ao poder público quanto à sociedade, contribuindo para a gestão sustentável do reservatório Passaúna e auxiliando projetos futuros na região.

Os objetivos específicos do projeto são:

- Simular a influência da batimetria na formação e geração de ondas internas;

Instituição internacional parceira:

- Simular a influência de ventos periódicos na formação de seichas internas e nos padrões de dissipação de energia cinética turbulenta em reservatórios com diferentes condições batimétricas;
- Aperfeiçoar modelos clássicos de previsão da dinâmica de lagos e reservatórios, tornando-o acessível para o poder público e outros pesquisadores;
- Elaborar, calibrar e validar um modelo hidrodinâmico tridimensional com grade não estruturada para simular a dinâmica do reservatório Passaúna e seus tributários;
- Comparar o modelo hidrodinâmico em grade não estruturada com modelos pretéritos desenvolvido em grade estruturada;
- Testar a teoria batimétrica das seichas internas para o reservatório do Passaúna;
- Incorporar a teoria proposta no software Interwave Analyzer.

3. RELEVÂNCIA DO PROJETO E JUSTIFICATIVA

A crescente exploração dos ecossistemas aquáticos, conciliada à intensificação dos processos pelas mudanças climáticas, tem acelerado a degradação ambiental, comprometendo a qualidade da água e o equilíbrio ecológico de lagos e reservatórios. Esses ambientes desempenham um papel fundamental no abastecimento público, na regulação do ciclo hidrológico e na manutenção da biodiversidade, mas estão cada vez mais vulneráveis a processos de eutrofização, alterações nos regimes de circulação e aumento da frequência de eventos hidrológicos extremos.

A dinâmica desses sistemas aquáticos é governada por processos físicos não axiomáticos, muitas vezes sendo influenciados pela estratificação térmica. Tais processos moldam a circulação de lagos e reservatórios, que por sua vez tem um papel importante no transporte de sedimentos, nutrientes e contaminantes. No entanto, a representação desses fenômenos em modelos preditivos ainda apresenta lacunas significativas, especialmente no que se refere à influência da batimetria na estruturação da hidrodinâmica interna e nas interações entre camadas de diferentes temperaturas.

Nesse contexto, a melhoria na previsibilidade da hidrodinâmica de lagos e reservatórios é essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão da qualidade da água e segurança hídrica. A compreensão detalhada dos mecanismos que governam a circulação interna e a mistura permite avaliar como esses processos modulam a distribuição de calor e substâncias químicas ao longo da coluna d'água (Lemmin et al., 2005), oferecendo subsídios científicos para melhor compreender a disponibilidade de oxigênio dissolvido (Brooks et al., 2022), a proliferação de fitoplanctons e cianobactérias (Hingsamer et al., 2014; Pannard et al., 2011; Plisnier et al., 2023), a formação de zonas de misturas (de Carvalho Bueno, Bleninger, et al., 2023), o transporte e zonas de ressuspensão de sedimentos (Valipour et al., 2017), o impacto na abundância de peixes (Jarić et al., 2022), assim como outros efeitos. Essa compreensão pode auxiliar não apenas na avaliação do ciclo biogeoquímico, mas nos efeitos diretos na qualidade da água, tendo um impacto importante na avaliação de potenciais degradações da qualidade da água que por sua vez pode levar ao comprometimento do abastecimento público e ao aumento da incidência de doenças de veiculação hídrica, representando riscos para a saúde humana e elevando os custos de tratamento e monitoramento.

Dessa forma, aprimorar os modelos simplificados de previsão da dinâmica desses sistemas é fundamental para fortalecer políticas de gestão sustentável dos recursos hídricos. A

Instituição internacional parceira:

integração de simulações possibilitou um refinamento na modelagem da circulação interna e dos processos de dissipação da energia cinética turbulenta, contribuindo para uma visão mais precisa da interação entre forçantes externas e a resposta dinâmica dos reservatórios e lagos. Os avanços científicos proveniente desta proposta podem não apenas melhorar a capacidade de previsão dos impactos ambientais, mas também ser utilizados para favorecerem as tomadas de decisões do poder público em prol da otimização do manejo dos recursos hídricos. Dessa maneira, ao aprofundar a compreensão da hidrodinâmica de lagos e reservatórios, este estudo buscou fornecer um suporte técnico-científico para uma gestão mais eficiente, sustentável e resiliente desses ecossistemas essenciais para a segurança hídrica.

4. METAS E PRODUTOS

Para atingir os objetivos foram propostas as seguintes metas, detalhadas a seguir, após descrição da área de estudo:

- Meta 1: Aprimoramento de modelos simplificados para previsão da hidrodinâmica de lagos;
- Meta 2: Modelagem hidrodinâmica em grade não estruturada;
- Meta 3: Implementação da teoria no software Interwave Analyzer.

Área de estudo

Embora o estudo tenha uma vertente numérica e teórica, os resultados foram aplicados em um reservatório de abastecimento público, o reservatório do Passaúna (Figura 2). O reservatório do Passaúna ($25^{\circ}31'43''$ S; $49^{\circ}23'37''$ W), localizado na bacia Hidrográfica do Rio Passaúna, Paraná (Brasil), foi construído em 1990 e é até hoje uma das principais fontes de abastecimento de água para a região de Curitiba. O reservatório abastece mais de 650.000 habitantes e possui uma área superficial de 9 km², com um volume de 6×10^7 m³, extensão de 11 km e profundidade máxima de 15 metros (Carneiro et al., 2016).

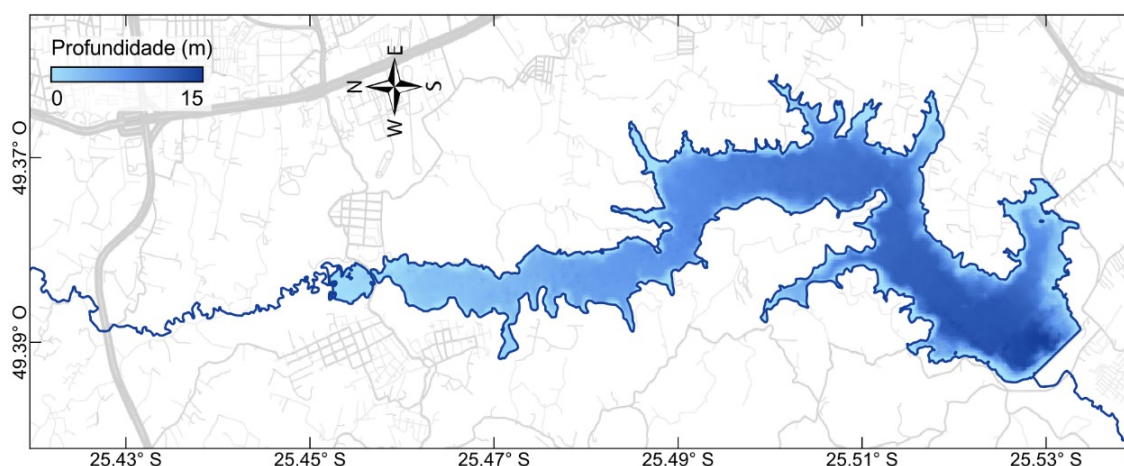


Figura 2. Mapa batimétrico do reservatório Passaúna.

4.1. META 1 - APRIMORAMENTO DE MODELOS PARA PREVISÃO DA MISTURA DE LAGOS

Instituição internacional parceira:

Uma abordagem comum para reduzir os custos e o tempo de monitoramento e simulações numéricas complexas é a utilização de modelos simplificados que buscam fornecer uma previsão da dinâmica de lagos e reservatórios com base em dados meteorológicos locais e nas características do corpo hídrico em estudo. A maioria dessas formulações matemáticas que modelam a dinâmica térmica de lagos e reservatórios baseia-se em condições idealizadas, que consideram a estratificação térmica, o comprimento do lago e a velocidade do vento (Spigel & Imberger, 1980). Embora esse arcabouço teórico seja idealizado, desconsiderando efeitos importantes da produção e dissipação de energia cinética turbulenta (Patterson et al., 1984; Shintani et al., 2010; Spigel & Imberger, 1980), estudos indicam que essas formulações simplificadas são preditores razoáveis da dinâmica de muitos lagos (Antenucci et al., 2000; de Carvalho Bueno & Bleninger, 2017; MacIntyre et al., 2009; Roberts et al., 2021; Valbuena et al., 2022). No entanto, existem casos em que esses modelos simplificados falham em reproduzir a realidade (de Carvalho Bueno, Bleninger, Yao, et al., 2020), como foi recentemente observado no reservatório Passaúna (de Carvalho Bueno, Bleninger, et al., 2023; Ishikawa, Bleninger, et al., 2021).

Em muitos casos, a dinâmica de lagos e reservatórios é controlada pela ocorrência de ondas internas geradas principalmente pela ação do vento (Wüest & Lorke, 2003). Muitos modelos simplificados, predizem a ocorrência de ondas internas principalmente através de números adimensionais que correlacionam a estabilidade térmica do lago, como por exemplo o número de Wedderburn e o número de Richardson. Porém, em algumas situações, esses modelos não conseguem prever com precisão a dinâmica ou dissipação dessas ondas (de Carvalho Bueno, Bleninger, et al., 2023; Ishikawa, Bleninger, et al., 2021). No caso específico do reservatório Passaúna, monitoramentos de campo e simulações numéricas mostraram que o fundo inclinado do reservatório poderia desestabilizar seichas internas, sendo essa a principal razão para sua ausência e consequente modificação da dinâmica prevista pelos modelos simplificados (de Carvalho Bueno, Bleninger, et al., 2023, 2024b).

Dessa forma, nesta meta, foi proposto realização de simulações não-hidrostáticas utilizando o modelo Delft3D, com o objetivo de conduzir uma análise sistemática sobre a influência da batimetria na formação de ondas internas em um sistema hipotético. Além disso, para aproximar as análises das condições reais, uma análise periódica do vento foi realizada para diferentes condições batimétricas. As simulações foram ajustadas para representar as condições gerais de um reservatório, sendo as formulações aplicadas aos dados obtidos no reservatório do Passaúna a fim de validar as análises sistemáticas realizadas com o modelo não-hidrostático. A partir dos resultados dessas simulações, um modelo de parametrização foi proposto para incluir como os efeitos batimétricos podem afetar as dominância de seichas internas em lagos e reservatórios.

Esta seção apresenta uma síntese dos trabalhos desenvolvidos no âmbito da Meta 1, cujos aspectos mais abrangentes e específicos são detalhados nos seguintes produtos (artigos):

Instituição internacional parceira:

Produto Meta 1:

Os produtos abaixo foram elencados como produtos oriundos das investigações decorrentes da Meta 1:

de Carvalho Bueno, R.; Bleninger, T.; Lorke, A. *Internal seiche damping on sloping topography*. Limnology and Oceanography, 2026

de Carvalho Bueno, R.; Bleninger, T.; Lorke, A. *Effects of periodic wind forcing on internal seiches over sloped topography*. XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, Brazil, 2025

4.1.1. INTRODUÇÃO

Ondas internas estacionárias, também conhecidas como seichas internas, são fenômenos frequentes que ocorrem em lagos e reservatórios estratificados, constituindo um importante mecanismo de hidrodinâmico e de mistura destes ecossistemas (Mortimer, 1952). Estas ondas são consideradas como um dos principais fonte de energia cinética turbulenta nas regiões do metalímnio e hipolímnio de lagos e reservatórios (Wüest & Lorke, 2009). Seichas internas representam um elo essencial na transferência de energia desde o trabalho do vento na superfície até a dissipação turbulenta em pequenas escalas (Guseva et al., 2021; Imberger, 2013). A movimentação vertical de massas de água associada a esse fenômeno exerce influência significativa sobre processos ecológicos, incluindo a fotossíntese (Hingsamer et al., 2014; Pannard et al., 2011), a modulação de fluxos de oxigênio e outros compostos entre sedimento e coluna d'água (Lorke et al., 2003) e a dinâmica de gases de efeito estufa em lagos estratificados (D'Ambrosio et al., 2022). Além disso, estas ondas regulam processos de mistura turbulenta em zonas litorâneas e pelágicas (Cossu & Wells, 2013), afetam a penetração de luz (Hingsamer et al., 2014), controlam comunidades de fitoplânctons e cianobactérias (Chowdhury et al., 2016; Plisnier et al., 2023) e podem influenciar a dinâmica de peixes destes ambientes (Jarić et al., 2022).

A geração de seichas internas ocorre em lagos e reservatórios estratificados predominantemente devido a tensão de cisalhamento do vento que age sob a superfície livre destes sistemas aquáticos. Embora a maior parte da energia transferida seja dissipada na camada de mistura superficial de mistura, uma fração é transportada para o interior do metalímnio, sendo responsável por sustentar o campo de ondas internas nestas regiões (Bouffard & Boegman, 2012; de Carvalho Bueno, Bleninger, et al., 2023). Esse processo estabelece oscilações de ressurgências (*upwelling* e *downwelling*) em margens opostas, cuja estrutura nodal pode variar devido à estratificação vertical e geometria da bacia (Münnich et al., 1992; Vidal et al., 2005). O modelo físico-matemático clássico para descrever a mistura de lagos e reservatório, proposto por Spigel & Imberger (1980), é baseado no número de Wedderburn, descrito pelo balanço entre o vento e o gradiente de pressão horizontal associado ao deslocamento da termoclina. Este modelo tem como pressuposto lagos e reservatórios idealizados com estratificação em duas camadas e geometria retangular. Embora amplamente utilizado (Roberts et al., 2021; Valbuena et al., 2022), essa formulação simplificada mostra limitações em algumas situações as quais seichas internas seriam dominantes, mas não foram identificadas através de dados medidos. Estudos recentes demonstraram que a presença da batimetria poderia promover a dissipação precoce das oscilações e constituir uma das principais razões para a ausência de

Instituição internacional parceira:

movimentos persistentes em alguns lagos e reservatórios (de Carvalho Bueno, Bleninger, et al., 2023).

A interação entre ondas internas e a batimetria inclinada tem sido extensivamente estudada em ambientes costeiros e lacustres, bem como em experimentos laboratoriais e simulações numéricas (Boegman & Stastna, 2019; Shintani et al., 2010). A natureza dessa interação depende do ângulo de inclinação em relação à direção de propagação da onda. Apesar disso, a maior parte dos trabalhos permanece focada em ondas propagantes, em contextos específicos, enquanto investigações sistemáticas sobre o papel da inclinação do fundo na dissipação de seichas internas ainda são escassas.

Além disso, em condições naturais, o vento apresenta caráter predominantemente periódico, associado a ciclos diurnos e semi-diurnos. A ressonância entre ventos periódicos e os modos naturais de seichas internas tem sido observada em diversos lagos (Antenucci & Imberger, 2003; Laval et al., 2003), podendo excitar diferentes modos horizontais conforme a relação entre a frequência do vento e o período fundamental da onda interna (Boegman & Ivey, 2012). Entretanto, a forma como ventos periódicos interagem com a topografia inclinada permanece pouco explorada.

Nesta meta foi investigado de forma sistemática como a topografia inclinada do fundo de lagos e reservatórios poderia afetar a geração, a persistência e a dissipação de seichas internas em lagos e reservatórios estratificados, considerando tanto episódios singulares de ventos (pulsos) quanto ventos periódicos. Para montar o modelo investigativo desta meta, partiu-se da hipótese de que a inclinação do fundo exerce papel central na redistribuição da energia cinética induzida pelo vento (de Carvalho Bueno, Bleninger, et al., 2023), controlando a separação da camada de mistura bentônica, a quebra das ondas e o consequente redirecionamento da energia para regiões litorâneas e pelágicas. Para testar essa hipótese, foram conduzidas simulações numéricas tridimensionais não-hidrostáticas em bacias idealizadas, variando-se a inclinação do fundo, o comprimento do lago e a velocidade e periodicidade dos ventos. Os resultados visam fornecer um arcabouço conceitual mais robusto para a previsão da dissipação de seichas internas em lagos e reservatórios reais, que por natureza possuem topografia inclinada. Tal avanço é essencial para compreender os mecanismos de circulação e mistura em sistemas aquáticos estratificados e suas implicações no transporte de nutrientes, gases de efeito estufa e processos ecológicos mediados por ondas internas.

4.1.2. MÉTODOS

Experimento numérico

A influência da batimetria na dinâmica e persistência de ondas internas em lagos e reservatória foi investigada utilizando o modelo hidrodinâmico tridimensional Delft3D na versão não-hidrostática com malha estruturada. As simulações analisaram a resposta das seichas internas, caracterizada pela distribuição de temperatura, velocidades horizontais e taxas de dissipação de energia, ao longo de cinco ou sete dias, dependendo dos experimentos em análise. Para a análise sistemática dos efeitos da inclinação batimétrica na dinâmica de ondas internas foram conduzidos 50 experimentos numéricos, variando sistematicamente a inclinação de fundo ($S > 10^{-3}$), tamanho efetivo do lago ($L_e = 5$ km, 2.5 km e 1.5 km) e número de Wedderburn ($W = 2, 4$ e 20), este último sendo parametrizado pela variação na velocidade do vento. Adicionalmente, para análise do vento periódico foram conduzidos 6 experimentos variando a inclinação do fundo e os padrões de vento, a fim de

Instituição internacional parceira:

avaliar como a forçante periódica pode modular a circulação lacustre em diferentes regimes topográficos, considerando dois exemplos em distintos regimes (subcrítico e supercrítico).

A geometria adotada consistiu em um canal em forma de reservatório com 10 m de profundidade, 500 m de largura e diferentes comprimento efetivo (L_e), apresentando uma estratificação típica em duas camadas com diferença de temperatura de 8 °C entre o epilânio e o hipolânio. A termoclina foi posicionada a 5 m de profundidade, resultando em um período fundamental de seicha interna de aproximadamente 3, 6 e 12 h, dependendo do comprimento do reservatório (L_e). Para a análise periódica do vento, foram utilizadas apenas duas inclinações topográficas, sendo o comprimento efetivo de 5 km escolhido como base para as análises deste efeito.

Em todas as simulações, a água foi inicialmente mantida em repouso e submetida a ventos de no máximo 5 m/s aplicado em direção à extremidade oposta ao fundo inclinado, exceto para experimentos com variações no número de Wedderburn, sendo utilizado adicionalmente ventos de 2.25 e 7.10 m s⁻¹, para alcançar valores de número de Wedderburn (W) de 20 e 2, respectivamente. Para as análises sistemáticas dos efeitos da inclinação do fundo, o vento foi mantido uniforme por 8 horas em todos os casos. Para os testes de ventos periódicos (Figura 3), duas frequências diferentes foram utilizadas ($\sigma_f=5$ h, $\sigma_f \ll T_{V1H1}$; e $\sigma_f=30$ h, $\sigma_f \gg T_{V1H1}$). Esses cenários foram escolhidos para explorar a resposta das seichas internas em dois regimes distintos de vento, uma em que a frequência do vento é superior em relação à frequência fundamental das ondas internas e uma segundo quando a frequência do vento é inferior à frequência fundamental da onda interna.

Modelo numérico

Seichas internos em lagos termicamente estratificados têm sido amplamente simulados com modelos hidrodinâmicos (Hodges et al., 2000; Marti & Imberger, 2006; Vilhena et al., 2013). Neste estudo, utilizamos a versão não-hidrostática do modelo tridimensional Delft3D-FLOW para representar de forma mais realista a degeneração das seichas internas (Wadzuk & Hodges, 2009). O modelo resolve as equações de Navier-Stokes nas médias de Reynolds (modelo RANS, *Reynolds Average Navier-Stokes equation*) sob a aproximação de Boussinesq para escoamentos incompressíveis (Deltares, 2014), desconsiderando efeitos de Coriolis. Para a solução numérica foi adotada uma malha retangular com resolução horizontal de 10 m e vertical de 12,5 cm, atendendo aos requisitos mínimos para a reprodução de efeitos não-hidrostáticos em casos de seichas internas ($\lambda > H$). A turbulência foi representada pelo modelo k- ϵ , com viscosidade e difusividade turbulentas verticais tratadas como coeficientes de calibração. A condição de contorno superficial foi definida por uma série temporal de tensão de cisalhamento do vento, calculada pela formulação aerodinâmica com coeficiente de arrasto de $2,0 \times 10^{-3}$ (Wüest & Lorke, 2003), enquanto a troca de calor na superfície foi negligenciada. O cisalhamento de fundo foi modelado pela formulação de Chezy ($C_d=55$ m^{1/2} s⁻¹) e o passo temporal adotado foi de 0,6 s para garantir estabilidade numérica. Detalhes adicionais sobre os parâmetros físicos e numéricos utilizados podem ser encontrados no produto final desta meta (de Carvalho Bueno et al., 2025).

Instituição internacional parceira:

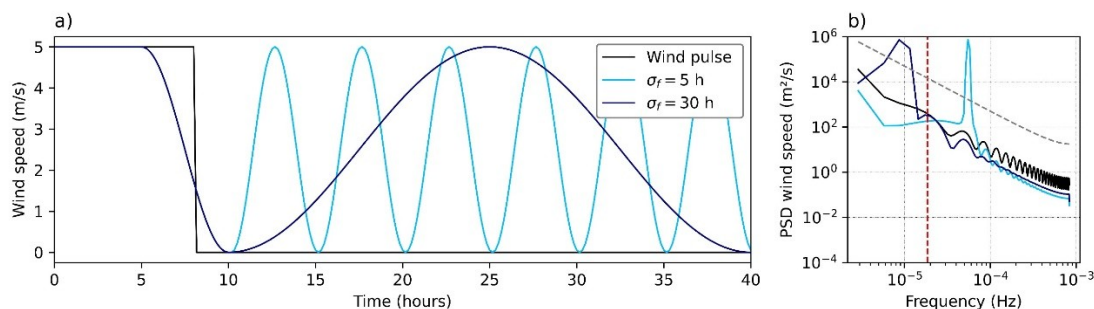


Figura 3. Primeiras 40 horas dos padrões de ventos utilizados nas simulações numéricas. a) Série temporal e b) densidade espectral de potência (PSD) da velocidade do vento aplicada aos experimentos numéricos. As linhas tracejadas indicam o espectro médio de ruído vermelho da série temporal com nível de confiança de 95%. A linha tracejada vermelha vertical mostra o período fundamental da seicha interna (15h) considerado os experimentos com comprimento efetivo do reservatório de $L_e=5$ km.

Análise hidrodinâmica

Os resultados foram analisados a partir das séries temporais da distribuição vertical de temperatura, velocidades horizontais e das taxas de dissipação de energia cinética turbulenta ao longo de um transecto longitudinal no centro da bacia ($y = 250$ m). A oscilação da onda interna foi caracterizada pelo desvio entre a profundidade média temporal da termoclina e sua excursão vertical, avaliada no lado oposto à topografia inclinada. A amplitude da onda foi determinada no ponto de máximo deslocamento, definido pela condição em que a primeira derivada temporal da profundidade da termoclina é nula. Para identificar os períodos dominantes de oscilação das ondas internas, as séries temporais foram submetidas a análise espectral pelo método de Welch (Welch, 1967), utilizando a janela de Hamming. Picos significativos na densidade espectral de potência (PSD) foram identificados pela comparação dos espectros com um espectro de ruído vermelho ao nível de confiança de 95% (de Carvalho Bueno, Bleninger, & Lorke, 2020). Para avaliar o impacto do forçamento periódico do vento e da topografia inclinada na dinâmica de mistura do lago, as taxas de dissipação de energia cinética turbulenta foram integradas vertical e longitudinalmente.

4.1.3. RESULTADOS

Mecanismo físico de dissipação de seichas internas em topografia inclinada

Os pulsos de vento induziram ressurgência na extremidade oposta do reservatório em todas as simulações. A amplitude inicial da seicha interna variou entre 0,25 e 2,11 m, em função do número de Wedderburn (W), do comprimento efetivo (L_e) e da inclinação do fundo (S). Em bacias retangulares, a amplitude estimada foi próxima a observada por modelos simplificados analíticos. Contudo, em bacias com fundo inclinado, uma frente ascendente foi observada avançando na direção ascendente à margem, persistindo após o evento de vento e interagindo com o retorno do hipolímnio (Figura 4).

Durante o primeiro ciclo da seicha, a frente ascendente encontrou o escoamento descendente de água epilimnética, aumentando em até 70 vezes as taxas médias de

Instituição internacional parceira:

dissipação de energia cinética turbulenta em comparação com regiões profundas e planas. A interação gerou também um jato divergente em direção ao interior do reservatório (Figura 4b), transportando água da camada de contorno para o metalímnio como uma intrusão turbulenta, cuja velocidade inicial foi de $0,037 \text{ m s}^{-1}$. O jato persistiu por sete dias, sendo refletido na parede oposta do reservatório. Além disso pode-se observar que inclinações batimétricas mais suaves favoreceram intrusões mais rápidas e duradouras, cobrindo maior área de intrusão

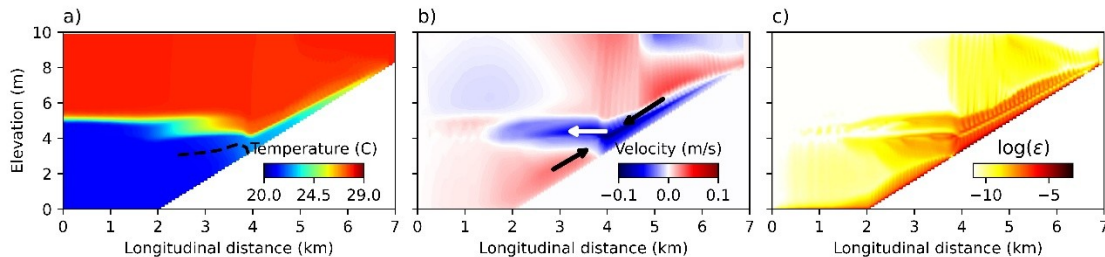


Figura 4. Influência da topografia na dissipação de seichas internas para a simulação com $W=2$ e $L_e=5 \text{ km}$. a) Distribuição de temperatura, b) velocidade horizontal (longitudinal) do escoamento e c) taxas de dissipação de energia cinética turbulenta ao longo de uma seção longitudinal em $t \cong 3T_{V1H1}/4$, para inclinação de fundo $S=0,0017$. As setas em b) ilustram o mecanismo de separação da camada de mistura. A seta para cima representa o evento de ressurgência da seicha, enquanto a seta para baixo indica a frente descendente retornando ao equilíbrio. A interação entre essas duas massas de água resulta na separação da camada de contorno de mistura bentônica, seguida por uma intrusão no metalímnio, representada pela seta branca. A linha tracejada preta em a) mostra a interface do segundo evento de ressurgência da seicha interna.

Em topografias íngremes ($S=0,05$), a energia foi majoritariamente refletida na extremidade da bacia, e a corrente ascendente não se formou. Após um ciclo, a amplitude reduziu-se apenas 36%, com 87% da dissipação de energia cinética turbulenta ocorrendo na camada de contorno bentônica, devido à velocidade horizontal induzida pelas seichas internas. Já em encostas suaves ($S<0,0017$), a formação da corrente ascendente próximo a margem inclinada levou a uma redução de até 80% da amplitude, com aumento da dissipação da energia cinética turbulenta. Neste caso, observasse que a energia dissipada corresponde aproximadamente em dissipação distribuída na zona de mistura bentônica (52%), corrente de propagação decorrente da evolução das ondas internas sob topografia inclinada (27%), jato intrusivo (13%) e o restante ocorrendo como tensão de cisalhamento no metalímnio e turbulência na zona superficial. Para $S=0,00125$, a dissipação foi máxima (82% da amplitude reduzida em um ciclo).

A amplitude das seichas e a energia cinética mostraram dependência logística com a inclinação do fundo (Figura 5a). Para $S \geq 0,01$, os resultados foram semelhantes aos obtidos no reservatório retangular, mas para $S < 0,01$ ocorreu forte atenuação da seicha interna. Inclinações suaves ($S < 0,004$) promoveram a geração de ondas internas de alta frequência (Figura 5b), coincidindo com aumento da energia cinética associada a movimentos de pequena escala próximos as regiões mais rasas da batimetria inclinada. Nessas condições, observou-se que em taludes suaves, a dissipação de energia cinética turbulenta apresentou maiores taxas nas regiões com proximidade da margem, enquanto em taludes íngremes, a dissipação ocorreu no centro da bacia, junto ao nó central da onda interna.

Para $S < 0,004$, a dissipação atingiu um platô (Figura 5b), com valores quase constantes até $S = 0,002$, representando o limite inferior de energia das seichas internas. Nessa faixa, a energia residual parece ser transferida para modos verticais superiores ou para ondas

Instituição internacional parceira:

internas não-lineares. Apesar de pequenas oscilações artificiais no campo de velocidades e dissipação (Figura 4b-c), associadas à discretização do modelo numérico no eixo vertical, a comparação com simulações com coordenadas sigma indicou balanços de energia consistentes ao observados nestas simulações, indicando pouca influência da forma de discretização nos resultados das simulações. Para mais detalhes ver de Carvalho Bueno et al. (2025).

Mecanismo físico de dissipação de seichas internas em topografia inclinada

A dependência sigmoideal da amplitude das ondas internas em relação à inclinação do fundo foi observada em todas as simulações, embora o grau de redução da amplitude e a faixa de inclinações mais influentes variassem conforme o tamanho da bacia (L_e) e o número de Wedderburn (W).

Para generalizar o efeito da topografia inclinada no decaimento das seichas internas, a amplitude normalizada foi comparada com dois números adimensionais que descrevem a interação entre ondas internas e a topografia: o número de Iribarren interno (I) e o parâmetro crítico batimétrico (A_t), advindos do número de atratores de onda, frequentemente utilizado para ondas internas propagantes:

(1)

onde f é a frequência da seicha interna ($f=1/T$ com T representa o período fundamental da seicha interna) e $\bar{f}$ é a média temporal e vertical da frequência de empuxo, estimada através da frequência de empuxo calculado a partir da distribuição vertical da temperatura na margem oposta à declividade inclinada.

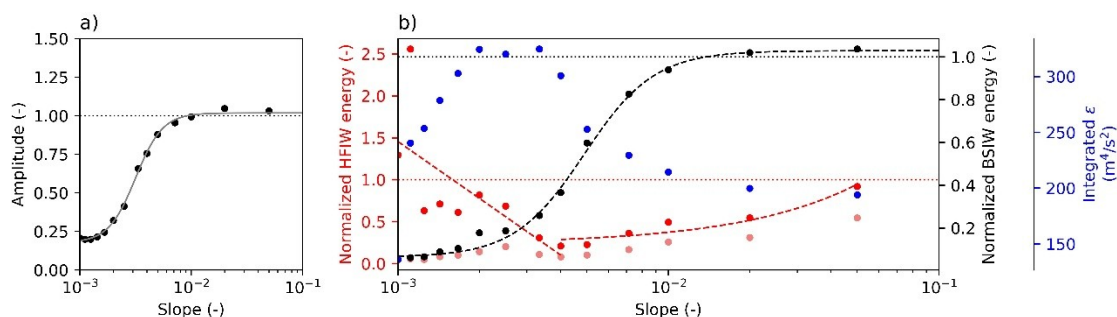


Figura 5. Amplitude da seicha interna após a separação da camada de contorno ($t_2 = 3T/4$) e distribuição longitudinal da energia de ondas internas para diferentes inclinações de fundo, a partir de simulações com número de Wedderburn constante ($W = 2$) e comprimento efetivo ($L_e = 5$ km). a) Amplitude da onda após a separação da camada de contorno ($t_2 = 3T/4$) em função da inclinação do fundo. A linha cinza representa uma regressão logística de quatro parâmetros, e a linha tracejada preta horizontal indica a amplitude obtida na simulação com bacia retangular. b) Energia cinética específica associada a seichas internas (preto) e a ondas internas não-lineares (vermelho). Os marcadores em cruz vermelho-claros referem-se ao eixo y da esquerda e representam a energia cinética normalizada associada a ondas internas não-lineares ($1/3 \text{ h}^{-1}$ a 1 h^{-1}). Os símbolos azuis indicam as taxas integradas de dissipação de energia. As linhas pontilhadas horizontais mostram os valores da simulação para o reservatório retangular, enquanto as linhas tracejadas representam o melhor ajuste dos dados. A curva preta foi obtida por regressão logística de quatro parâmetros; já a curva vermelha segue uma regressão exponencial para pequenas inclinações e uma regressão linear para inclinações maiores.

Instituição internacional parceira:

Em grande parte das simulações, a amplitude normalizada após o primeiro ciclo seguiu uma relação sigmoidal com A_t (Figura 5a). Para condições supercríticas ($A_t > 1$), o efeito da inclinação é desprezível, com amplitudes próximas ao caso de reservatórios retangulares. Já para condições subcríticas ($A_t < 1$), as seichas internas foram progressivamente amortecidas com a redução de A_t , atingindo valores mínimos ($\sim 0,19$) para $A_t < 0,4$.

Alguns casos com menor comprimento efetivo ($L_e = 1,5$ km), foi observado um aumento anômalo de energia para $A_t < 2$. No entanto considerando o coeficiente de decaimento da onda, estimado por um modelo de primeira ordem, observa-se consistência com o decaimento dos demais cenários (Figura 6b). Esses desvios na relação amplitude x A_t provavelmente resultam de incertezas na estimativa da amplitude em reservatórios com comprimentos menores, já que os valores da amplitude ficam muito próximos e na ordem de poucos centímetros. A relação entre amplitudes normalizadas e o número de Iribarren exibiu tendências semelhantes às do parâmetro crítico batimétrico A_t , mas com maior dispersão entre cenários com diferenças entre Wedderburn e dimensões da bacia.

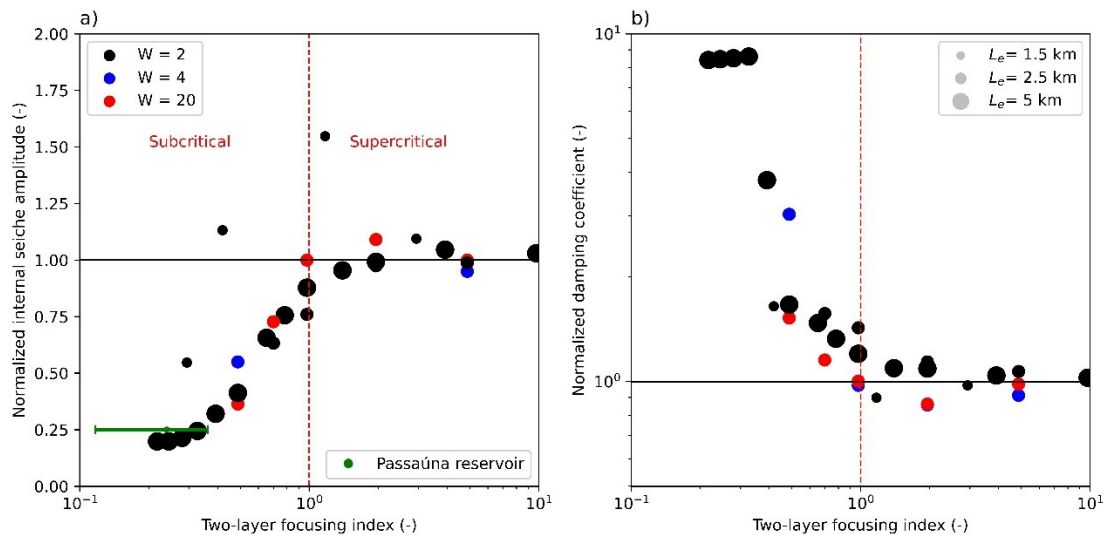


Figura 6. a) Amplitude normalizada da seicha interna no momento do primeiro evento de ressurgência na margem oposta à topografia inclinada ($t_2 = 3T/4$), em função do parâmetro crítico batimétrico. b) Coeficiente de decaimento normalizado pela amplitude da seicha interna em relação ao parâmetro crítico batimétrico. O decaimento normalizado foi calculado como a razão entre o coeficiente de decaimento da seicha interna e os valores correspondentes (com mesmo W e L_e) em um reservatório retangular. As cores e tamanhos dos símbolos diferenciam simulações com distintos números de Wedderburn e comprimentos efetivos de reservatório (legendas válidas para ambos os gráficos). A linha tracejada vermelha vertical indica o parâmetro crítico batimétrico ($A_t = 1$), que separa os regimes subcrítico e supercrítico. O símbolo verde com barras de erro representa a média e o desvio padrão de observações realizadas entre maio e dezembro de 2018 no Reservatório Passaúna, Brasil.

A análise da classificação proposta neste projeto com dados obtidos do reservatório Passaúna (Curitiba, Brasil), que possui S aproximadamente de 0,0017 e número de Wedderburn relativamente baixos (~ 1), indicam que a falta de ondas internas no reservatório do Passaúna pode ser adequadamente explicada pela batimetria e condições de estabilidade da estratificação. Apesar da previsão de atividade de seichas internos a partir do número de Wedderburn, as observações de campo confirmaram sua ausência devido ao baixo parâmetro crítico batimétrico ($A_t < 0,4$), resultando em amplitudes inferiores a 10 cm. Esse valor é até 85% menor que se considerarmos o reservatório do

Instituição internacional parceira:

Passaúna como um reservatório retangular. A topografia inclinada aumenta o coeficiente de amortecimento em cinco vezes, reduzindo o tempo de retenção de energia para 7–24 h, contra mais de 4 dias se considerássemos o Passaúna como um reservatório retangular.

Experimentos com ventos periódicos

Para a análise da influência de topografia inclinada na dissipação de energia de seichas internas sob influência de ventos periódicos, foram realizadas simulações sob condições supercríticas ($A_t > 1$) e subcríticas ($A_t < 1$). Simulações numéricas sob condições supercríticas revelaram dois regimes hidrodinâmicos distintos, controlados pela razão entre o período do vento (σ_f) e o período da seicha interna fundamental (T_{V1H1}). Para simulações com $\sigma_f < T_{V1H1}$ (5 h), seichas internas de modo horizontal superiores foram geradas (Figura 7a), enquanto períodos longos ($\sigma_f > T_{V1H1}$, 30 h) geraram a formação de seichas internas forçadas pelas oscilações do vento, com período igual ao do vento, ambos modulados por uma seicha interna de modo fundamental de baixa amplitude. A dissipação de energia cinética turbulenta foi dominada pelo cisalhamento do vento na camada superficial (98%), com contribuição mínima do fundo (2%). No entanto, em condições calmas a dissipação máxima ocorreu próxima aos nós das seichas internas.

Em regimes subcríticos, períodos longos de vento ($\sigma_f = 30 \text{ h} > T_{V1H1}$) geraram seichas forçadas não ressonantes e suprimiram a seicha fundamental, com dinâmica dominada por separações cíclicas da camada de contorno de fundo, resultando em jatos turbulentos e aumento de da dissipação de energia cinética turbulenta. Mais de 15% da dissipação total ocorreu durante períodos calmos, principalmente pelo mecanismo de mistura que ocorrem nas regiões de topografia inclinada.

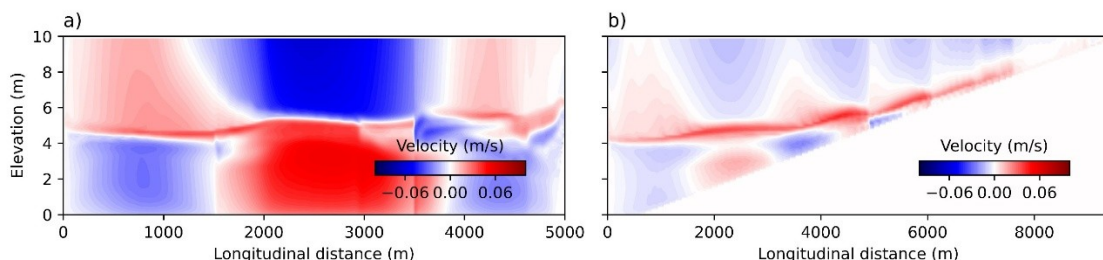


Figura 7. Componente de velocidade norte-sul ao longo do transecto longitudinal da simulação numérica forçada com vento periódico de 5 horas ($\sigma_f = 5 \text{ h}$) para a) condições supercríticas e b) condições subcríticas.

Para regimes subcríticos com $\sigma_f = 5 \text{ h}$, ondas internas não-lineares foram geradas, suprimindo a formação de seichas internas e a separação da zona de mistura bentônica típicas de eventos de pulso único. Embora essas ondas elevassem localmente a dissipação próxima à margem, a taxa geral de dissipação permaneceu comparável aos casos supercríticos, com variação inferior a 10%.

4.1.4. DISCUSSÃO

Amortecimento de seichas internas em topografia inclinada

As simulações numéricas em reservatório idealizados mostraram que a dissipação de seichas internas é influenciada pela inclinação do fundo do reservatório, que por sua vez pode modular a dissipação de energia cinética turbulenta após deslocamentos da

Instituição internacional parceira:

termoclina induzidos pelo vento. Foi observado que correntes ascendentes, que se propagam sobre a topografia inclinada interagem com fluxos descendentes originados em ciclos anteriores, promovendo separação da camada limite bentônica e intrusões laterais no hipolímnio, aumentando significativamente a dissipação de energia e a geração de ondas internas não-lineares, especialmente em declives com $S < 0,04$ (Figura 8).

As análises demonstram que a magnitude do decaimento da onda é bem descrita pelo parâmetro crítico batimétrico (A_t), índice adimensional que relaciona inclinação, comprimento efetivo e estratificação. Para $A_t < 1$, as seichas foram rapidamente amortecidas, com reduções superiores a 50% na amplitude em relação a reservatórios retangulares, enquanto para $A_t > 5$ a resposta permaneceu semelhante à de fundo plano. Valores intermediários ($1 < A_t < 5$), os resultados mostram leve aumento da amplitude ($< 10\%$), dependente do número de Wedderburn e do comprimento efetivo da bacia.

Resultados de campo no Reservatório Passaúna confirmam que a topografia inclinada pode reduzir em até 40% a energia associada a seichas internas. Embora processos adicionais como instabilidades não lineares, duração do vento e efeitos de Coriolis também influenciem a dissipação (Mortimer, 1952; Thorpe, 1974), nossos resultados destacam que A_t é um parâmetro-chave para prever a persistência de seichas internas em reservatórios e lagos estratificados.

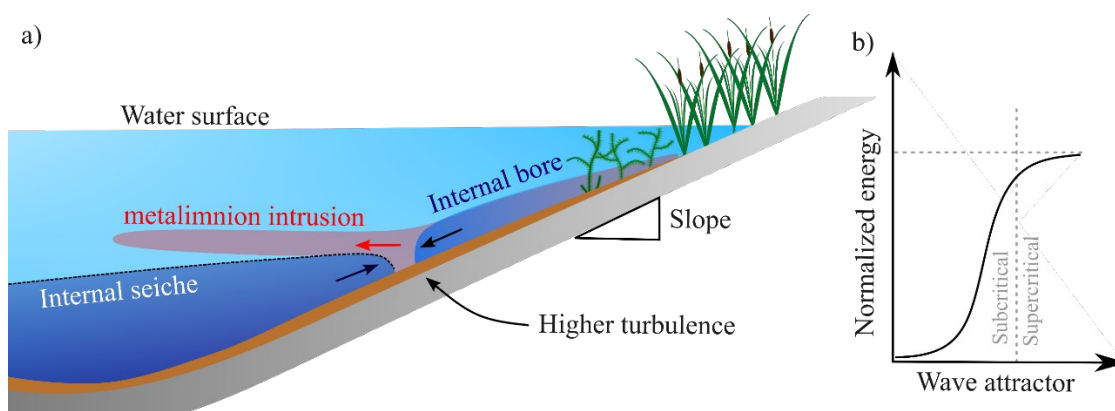


Figura 8. Representação esquemática dos efeitos topográficos nas seichas internas para condições subcríticas. a) Corte longitudinal do lago mostrando a dinâmica da separação da camada limite bentônica. A seta para cima representa a corrente ascendente induzida pela seicha interna, e a seta para baixo ilustra a corrente descendente que se propaga em direção ao declive retornando ao equilíbrio, originado pelos ciclos anteriores das seichas internas. Sua interação desencadeia a separação da zona de mistura bentônica, gerando uma intrusão no metalímnio (seta vermelha). b) Relação entre o parâmetro crítico batimétrico (A_t) e a amplitude da onda interna.

Relevância para o ciclo energético em lagos e reservatórios

A presença da declividade topográfica suave pode influenciar fortemente os fluxos de energia em reservatórios e lagos estratificados, promovendo rápida dissipação da energia cinética induzida pelo vento e consequente amortecimento acentuado das seichas internas. Além de favorecer o aumento da dissipação de energia nas regiões próximas à topografia inclinada, o fundo inclinado favorece a formação de seichas internas de modo vertical superior para a energia da onda remanescente, modificando a circulação lacustre destes ambientes.

Instituição internacional parceira:

As simulações deste trabalho indicam que o coeficiente de decaimento da onda pode ser previsto pelo parâmetro crítico batimétrico A_t . O coeficiente cresce exponencialmente para $A_t < 1$. Por exemplo, para um sistema com $A_t = 0,4$, a classificação indica um decaimento da onda 188% maior em relação a um reservatório retangular. No Reservatório Passaúna, o fundo inclinado reduz o tempo de retenção de energia das seichas internas de 4 dias para 7 h durante o período de estratificação ($A_t \cong 0,3$). Neste período, o tempo de retenção torna-se comparável ao período do vento. Apesar do forte amortecimento da onda, a separação da camada limite bentônica favorece o surgimento persistente de zonas de mistura e intrusões que promovem o transporte lateral.

As taxas de dissipações da energia cinética turbulenta atingem máximos valores entre $0,3 < A_t < 0,5$ e diminuem para valores menores, possivelmente por transferência de energia para ondas não-lineares, não totalmente resolvidas pelo modelo utilizado (Aghsaei et al., 2010; Boegman et al., 2005). Essas ondas, ao propagarem em direção à margem, dissipam-se em águas rasas, promovendo mistura intensa próxima ao litoral.

Para os efeitos periódico do vento na circulação e mistura em lagos, foi observado que além do A_t , a eficiência da separação da camada limite bentônica e dissipação das seichas internas são influenciadas pela razão entre o período do vento (σ_f) e o período fundamental do seiche interno (T_{V1H1}). Para $\sigma_f/T_{V1H1} > 1$, onda forçada não ressonante são geradas, normalmente moduladas por seichas fundamentais em regime supercrítico, mas suprimida em regime subcrítico, com dissipação de energia até três vezes maior do que casos retangulares (Boegman & Ivey, 2012). Já para $\sigma_f/T_{V1H1} < 1$, a separação completa da zona de mistura bentônica é inibida, ocorrendo seichas de modos horizontais superiores em condições supercríticas e pacotes de ondas internas não-lineares em condições subcríticas, que ao se propagarem em direção à topografia inclinada tendem a gerarem aumento da dissipação por arrebenção (Nakayama et al., 2019).

Implicações para ecossistemas lênticos

A topografia inclinada modula a formação, dissipação e persistência de seichas internas, alterando fluxos de energia e, consequentemente, processos ecológicos e biogeoquímicos em lagos e reservatórios. Para baixos valores do parâmetro crítico batimétrico, típicos de reservatórios e longos períodos de seichas internas, a energia do vento é rapidamente dissipada nas margens, intensificando a mistura vertical em águas rasas e favorecendo intrusões que transportam nutrientes, sedimentos e organismos da zona litorânea para o interior (Nielson & Henderson, 2023). Esse mecanismo pode explicar o transporte acelerado de metano de sedimentos litorâneos para o hipolímnio (Doda et al., 2024; Peeters et al., 2019). Nessas regiões, a colisão de frentes ascendentes e a quebra de ondas internas não-lineares ampliam a mistura epilímnio-hipolímnio, afetando o ciclo de nutrientes (Ostrovsky et al., 1996), a reaeração do hipolímnio (Tian et al., 2017) e, potencialmente, a proliferação de algas na zona litorânea (Vadeboncoeur et al., 2021). Em conjunto, a turbulência de contorno e as intrusões laterais favorecem o transporte de oxigênio, reduzindo o risco de hipóxia (Rao et al., 2008). Assim, reservatórios e lagos com A_t mais baixo apresentam dissipação mais rápida e mistura reduzida após o primeiro ciclo da seicha interna, enquanto lagos e reservatórios com A_t elevado, podem manter o transporte e a mistura por períodos mais longos, mitigando impactos negativos na qualidade da água.

Instituição internacional parceira:

Produto Final em Linguagem
Simples

O produto desta meta foi o desenvolvimento de um índice não paramétrico para prever como ondas internas se comportam em lagos e reservatórios com fundo inclinado. O índice é uma função simples da topografia da margem com as características de estratificação do lago. Com essa análise é possível avaliar a presença e persistência dessas ondas e ajudar a entender a mistura da água e o transporte de nutrientes, compostos químicos e organismos.

Dois artigos foram desenvolvidos para detalhar esse achado, sendo eles:

de Carvalho Bueno, R.; Bleninger, T.; Lorke, A. *Effects of periodic wind forcing on internal seiches over sloped topography.* XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, Brazil, 2025

de Carvalho Bueno, R.; Bleninger, T.; Lorke, A. *Internal seiche damping on sloping topography.* Limnology and Oceanography, 2026

4.2. META 2 - MODELO HIDRODINÂMICO EM GRADE NÃO ESTRUTURADA

Com a finalidade de testar a teoria de mistura de lagos proposta na Meta 1 deste projeto de pesquisa, um modelo numérico tridimensional no software Delft3D Flexible Mesh foi desenvolvido com o intuito de representar a dinâmica do reservatório Passaúna. Modelos numéricos são ferramenta eficazes para o monitoramento e previsão da dinâmica de ambientes limnológicos, sendo este desenvolvimento não apenas útil para testar a teoria proposta, mas também auxiliar no monitoramento do reservatório do Passaúna, aprimorando modelos já existentes do local, principalmente para análises específicas onde se quer obter uma avaliação mais detalhada em uma determinada área do sistema.

Em projetos anteriores, um modelo hidrodinâmico do reservatório Passaúna foi implementado e calibrado utilizando o software Delft3D FLOW (Ishikawa, Gonzalez, et al., 2021). No entanto, esse modelo empregou uma grade estruturada, o que pode limitar análises detalhadas em regiões específicas. Essa limitação foi observada em simulações recentes que buscaram avaliar os impactos de um sistema fotovoltaico flutuante em escala piloto instalado no reservatório Passaúna (Projeto FotoÁgua; PPPSA - Protocolo: 189/2022 PDI). O uso de uma grade não estruturada oferece maior flexibilidade na representação de áreas complexas, permitindo a geração de malhas com resolução variável, adaptadas a zonas de interesse e garantindo uma modelagem mais precisa em regiões de geometria irregular.

Dessa forma, nesta meta, foi proposto a calibração e validação de um modelo hidrodinâmico com grade não estruturada do Reservatório Passaúna (Figura 2). O modelo foi feito utilizando o software Delft3D Flexible Mesh (Delft3D FM) Suite e calibrado com dados de 1 ano de monitoramento do reservatório Passaúna realizados em 2018 (Ishikawa, Gonzalez, et al., 2021). O resultado foi comparado ao modelo nas versões anteriores, que realizaram simulações em grade estruturada utilizando o modelo Delft3D-FLOW.

Esta seção apresenta uma síntese do trabalho desenvolvido no âmbito da Meta 2, cujos aspectos mais abrangentes e específicos são detalhados no seguinte produto (artigo):

Instituição internacional parceira:

Produto

Os produtos abaixo foram elencados como produtos oriundos das investigações decorrentes da Meta 2:

de Carvalho Bueno, R.; Bleninger, T. Influence of grid representation on three-dimensional hydrodynamic modeling of lakes and reservoirs. Submetido para XXVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, Brasil, 2027

4.2.1. INTRODUÇÃO

Os processos hidrodinâmicos exercem papel fundamental na regulação das dinâmicas ecológicas em lagos e reservatórios, sendo centrais para compreender os ciclos biogeoquímicos que governam esses sistemas aquáticos. A hidrodinâmica desses corpos d'água depende de uma variedade de processos físicos, como a estratificação térmica, a batimetria e morfologia da bacia (de Carvalho Bueno, Bleninger, et al., 2023), a circulação induzida pelo vento (Hlevca et al., 2025), a dinâmica de entradas e saídas de água (Ishikawa, Bleninger, et al., 2021) e a variabilidade sazonal do forçante meteorológico (Bernhardt & Kirillin, 2013). Avaliar como esses fatores interagem para controlar o transporte de calor e o comportamento hidrodinâmico é um desafio quando se baseia apenas em observações de campo, limitadas por baixa resolução espacial e temporal e pela dificuldade de isolar e controlar múltiplas variáveis. Além disso, análises observacionais têm capacidade restrita para projetar condições futuras sob diferentes pressões antrópicas.

Dada a relevância dos processos hidrodinâmicos e de transporte de calor para a qualidade da água e funcionamento ecológico, diversos modelos numéricos têm sido desenvolvidos para simular as respostas térmicas e hidrodinâmicas desses ecossistemas (Brenner & Laval, 2018; Hodges et al., 2000; Horn et al., 1986; Laval et al., 2003; Münnich et al., 1992; Tian et al., 2017; Tsydenov, 2022). Embora os princípios físicos representados sejam similares, a dimensionalidade dos modelos influencia fortemente a precisão das previsões. Modelos unidimensionais são adequados para simular a estratificação térmica vertical e a dinâmica sazonal do calor em lagos pequenos ou morfometricamente simples, mas ignoram gradientes horizontais e padrões de circulação lateral (Rueda et al., 2025), cruciais em sistemas com batimetria complexa, vento heterogêneo ou assimetria entre entrada e saída de água. Nesses casos, modelos bi ou tridimensionais oferecem representações mais realistas da variabilidade espacial, dos processos de mistura e do funcionamento do ecossistema.

Simulações realizadas do Lago Überlingen compararam o desempenho dos modelos Delft3D e ELCOM sob configuração de grade idêntica (Dissanayake et al., 2019). Ambos empregaram uma malha cartesiana com resolução horizontal de 200 m em uma estrutura Arakawa C. Os resultados mostraram alta concordância na reprodução das principais feições de circulação, incluindo ondas internas e correntes superficiais, sem discrepâncias significativas. O modelo ELCOM também foi aplicado para simular ondas internas de larga escala no Lago Kinneret (ref), obtendo resultados semelhantes entre diferentes resoluções de grade (até 500 m). De modo análogo, simulações do Lago Genebra com o modelo MITgcm, utilizando grade ortogonal curvilínea de 113 m, revelaram que as interações entre seichas internas e a topografia costeira intensificam movimentos advectivos não lineares nas regiões litorâneas, destacando a importância de representar adequadamente a complexidade batimétrica. Estudos com o Delft3D em grade curvilínea (resolução média de

Instituição internacional parceira:

79 m) também evidenciaram como a morfologia, a batimetria e a estratificação térmica podem modular a distribuição espacial e a dinâmica de energia associada a seichas internas em lagos e reservatórios (ref).

Por outro lado, simulações no Lago Ontário com o modelo MIKE 3 utilizaram uma grade triangular não estruturada com resolução mínima de 50 m (ref). Essa configuração flexível permitiu representar com precisão a batimetria e o contorno irregular do lago, reproduzindo padrões de circulação observados, estrutura térmica, eventos de ressurgência, oscilações quase inerciais e ondas internas e superficiais. Testes de sensibilidade entre discretizações verticais em coordenadas z e σ indicaram que uma grade híbrida σ - z proporcionou melhor desempenho, reduzindo a difusão numérica e melhorando a representação da mistura vertical.

Apesar do grande número de estudos com modelos tridimensionais em lagos e reservatórios, a maioria se concentrou em reproduzir a circulação local ou em validar o desempenho do modelo, sem avaliar explicitamente como diferentes representações de grade influenciam a simulação hidrodinâmica e térmica. A comparação direta entre estudos é dificultada por diferenças em resolução, arquitetura de modelo (por exemplo, Delft3D, ELCOM, POM) e condições específicas de cada sistema.

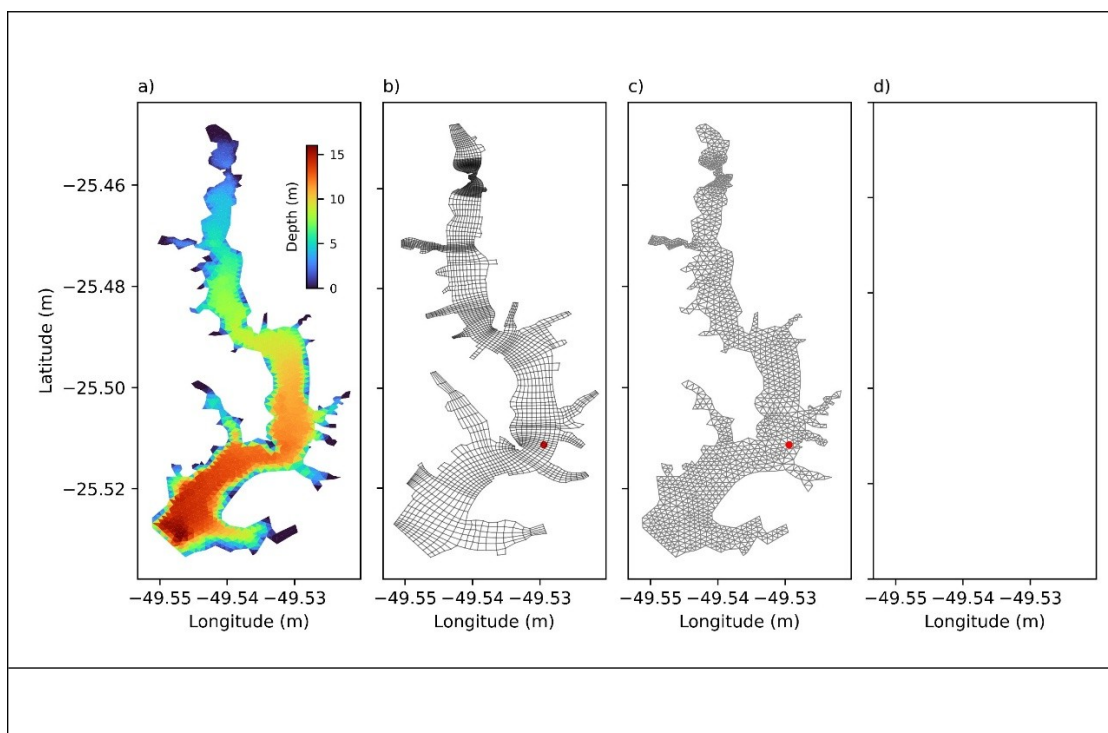
Assim, este estudo tem como objetivo avaliar sistematicamente a influência da estrutura de grade sobre as simulações hidrodinâmicas e térmicas em lagos e reservatórios. O Reservatório do Passaúna é adotado como estudo de caso, ampliando trabalhos anteriores realizados com o Delft3D em grade curvilínea ortogonal (ref). A presente pesquisa introduz e avalia uma nova configuração baseada em uma grade hexagonal não estruturada implementada no Delft3D Flexible Mesh, permitindo comparação direta entre os dois esquemas de grade sob condições de forçamento e parametrização semelhantes. O modelo também estará disponível para ser utilizado para projetos futuros

4.2.2. MÉTODOS

Monitoramento

Para a implementação, calibração e validação do modelo proposto foram utilizados dados do monitoramento contínuo do Reservatório do Passaúna (xxxx) realizado entre março de 2018 e fevereiro de 2019, provenientes do projeto "Multidisciplinary Data Acquisition as the Key for a Globally Applicable Water Resource Management", conduzido entre 2017 e 2020 em uma colaboração Brasil-Alemanha e financiado pelo BMBF.

A batimetria do reservatório (xxxa) foi obtida por meio de um levantamento hidrográfico com ecossonda de alta resolução (ref). As variáveis meteorológicas, velocidade e direção do vento, umidade relativa do ar, radiação solar de onda curta e temperatura de ponto de orvalho, foram medidas a cada minuto em uma estação meteorológica localizada a cerca de 4 km do reservatório. Dados de cobertura de nuvens foram obtidos da base de reanálise ERA5 (Copernicus), com resolução temporal horária (ref).



A precipitação diária foi registrada por quatro pluviômetros. Esses dados foram utilizados na calibração do modelo hidrológico LARSIM utilizado para a estimativa da vazão média diária e a temperatura dos afluentes do reservatório do Passaúna. Os coeficientes de descarga foram ajustados com base em medições anteriores e no balanço hídrico geral do reservatório. As descargas pelos extravasores e descarga de fundo foram calculadas a partir da geometria estrutural, enquanto as vazões de captação e os níveis d'água foram fornecidos pela SANEPAR (Companhia de Saneamento do Paraná), com dados horários.

No ponto central do reservatório (Figura 1a), foram instalados um perfilador térmico e um **ADCP** (Acoustic Doppler Current Profiler), para monitoramento da temperatura da água e das velocidades de corrente em diferentes profundidades. O perfilador era composto por 11 sensores de temperatura (Minilog-II-T, Vemco) com precisão de $\pm 0,1$ °C e resolução de 0,001 °C, registrando dados a cada minuto. O ADCP foi instalado próximo ao perfilador térmico, no fundo do reservatório, medindo perfis verticais de velocidade desde cerca de 0,7 m acima do leito até 1,5 m abaixo da superfície, com resolução vertical de 0,5 m e intervalos de amostragem de 5 a 10 minutos.

Medições complementares in situ de temperatura e parâmetros de qualidade da água, como oxigênio dissolvido, fosforo, nitrogênio, DBO e DQO, também foram realizadas em diferentes pontos do reservatório durante o projeto pretérito, mas não são mencionados neste relatório por não terem sido utilizadas para a calibração do modelo numérico. O arcabouço teórico do pre-processamento dos dados não é mencionado neste relatório pois foram realizados no projeto em questão, estando disponíveis em sua totalidade nos produtos provenientes do MuDak (ref).

Modelagem numérica e comparação

A hidrodinâmica de lagos e reservatórios tem sido amplamente representada por modelos numéricos tridimensionais (Hodges et al., 2000; Marti & Imberger, 2006; Vilhena et al., 2013). No Reservatório do Passaúna, simulações anteriores com o Delft3D-FLOW, utilizando

Instituição internacional parceira:

uma grade curvilínea ortogonal, reproduziram satisfatoriamente a evolução temporal da estratificação térmica, com erro quadrático médio centrado (cRMSE) de $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ para temperatura. Para velocidades de escoamento, o cRMSE foi de $1,7\text{ cm s}^{-1}$, embora tenham sido observadas discrepâncias pontuais entre valores simulados e medidos. As taxas simuladas de dissipação turbulenta também apresentaram desvios em relação às observadas, indicando limitações na representação de processos de dissipação de energia em reservatórios de médio porte.

No presente estudo, empregou-se o modelo tridimensional Delft3D Flexible Mesh (Delft3D-FM) para simular a hidrodinâmica do Passaúna, utilizando uma grade não estruturada. Embora essa versão difira do módulo Delft3D-FLOW, ambos compartilham o mesmo arcabouço numérico e submodelos teóricos, variando principalmente na flexibilidade da malha. O modelo resolve as equações de Navier-Stokes médias de Reynolds sob a aproximação de Boussinesq para escoamento incompressível (Deltares, 2014), considerando as equações tridimensionais de conservação de massa, momento e calor. A turbulência foi representada pelo modelo de fechamento k- ϵ , e os coeficientes de viscosidade e difusividade verticais de fundo foram ajustados como parâmetros de calibração para representar processos sub-malhas de mistura e dissipação.

O fluxo de momento superficial foi imposto a partir de séries temporais de ventos, sendo internamente convertido para a tensão de cisalhamento do vento a partir da formulação aerodinâmica de *bulk*. As trocas de calor na superfície foram determinadas pelo modelo Ocean (ref). O atrito de fundo foi representado pela equação de Manning, com coeficiente de rugosidade constante de 0,035. O passo de tempo numérico adotado foi de 0,6 s, garantindo estabilidade nas simulações. Os parâmetros físicos e de configuração seguiram os mesmos valores empregados nas simulações anteriores com o Delft3D-FLOW no Passaúna (ref).

Foram testadas duas configurações de grade não estruturada, ambas compostas por elementos triangulares gerados no RGFGRID (Delft3D). A primeira apresentou resolução horizontal média semelhante à da grade curvilínea previamente utilizada ($\sim x\text{ m}$), assegurando consistência para comparação. A segunda foi refinada localmente nas proximidades da estação de monitoramento, alcançando resolução média de $\sim x\text{ m}$, representando um aumento expressivo de detalhamento espacial. Essa configuração demonstrou a flexibilidade do uso de malhas não estruturadas para otimizar a resolução em áreas de maior interesse hidrodinâmico.

O desempenho do modelo foi avaliado com base em séries temporais de perfis verticais de temperatura, velocidade horizontal e taxa de dissipação da energia cinética turbulenta na estação de monitoramento (Figura 1). As simulações foram comparadas quantitativamente com observações in situ por meio de dois indicadores estatísticos: o coeficiente de correlação (R), para medir a concordância linear entre dados simulados e observados, e o erro quadrático médio centrado (cRMSE), para quantificar desvios entre ambos os conjuntos de dados.

4.2.3. RESULTADOS

Para os efeitos periódico do vento na circulação e mistura em lagos, foi observado que além do A_t , a eficiência da separação da camada limite bentônica e dissipação das seichas

Instituição internacional parceira:

internas são influenciadas pela razão entre o período do vento (σ_f) e o período fundamental do seiche

4.2.4. DISCUSSÃO

Para os efeitos periódico do vento na circulação e mistura em lagos, foi observado que além do A_t , a eficiência da separação da camada limite bentônica e dissipação das seichas internas são influenciadas pela razão entre o período do vento (σ_f) e o período fundamental do seiche

Produto Final em Linguagem Simples	<i>O produto desta meta foi o desenvolvimento de um índice não paramétrico para prever como ondas internas se comportam em lagos e reservatórios com fundo inclinado. O índice proposto pode indicar a presença e persistência dessas ondas e ajudar a entender a mistura da água e o transporte de nutrientes, compostos químicos e organismos, servindo como base para melhorar classificações de regimes de mistura em diferentes tipos de lago.</i> <i>Dois artigos foram desenvolvidos para detalhar esse achado.</i>
---	--

4.3. META 3 - IMPLEMENTAÇÃO DA TEORIA NO SOFTWARE INTERWAVE ANALYZER

Para ampliar o alcance e a aplicabilidade das teorias desenvolvidas neste projeto, os fundamentos teóricos apresentados na Meta 1 foram incorporados ao software *Interwave Analyzer* (de Carvalho Bueno, Bleninger & Lorke, 2020), ferramenta de código aberto previamente desenvolvida pelo proponente e já aplicada na análise da dinâmica térmica de lagos e reservatórios em diferentes regiões do mundo (ref). O Interwave Analyzer estabelece uma metodologia padronizada para a análise de dados provenientes de estações de monitoramento e de modelos numéricos. A identificação e caracterização de ondas internas são realizadas por meio de transformadas de Fourier e de ondaletas, técnicas amplamente empregadas em estudos sobre a dinâmica interna de lagos e reservatórios (de Carvalho Bueno et al., 2020a; Hutter, 2011; Münnich et al., 1992).

O software também fornece uma classificação geral do regime de mistura de lagos (de Carvalho Bueno et al., 2020a; Spigel & Imberger, 1980), permitindo sua utilização por pesquisadores sem formação específica em mecânica dos fluidos, inclusive em estudos interdisciplinares que relacionem ondas internas à qualidade da água e a processos biogeoquímicos. Para usuários com formação em dinâmica dos fluidos, o programa possibilita análises avançadas da resposta hidrodinâmica do sistema, incluindo avaliação de ressonância com o vento, desenvolvimento e degeneração de seichas internas, distribuição espectral de energia, ativação de modos verticais superiores e identificação de padrões de

Instituição internacional parceira:

mistura (Münnich et al., 1992; Vidal & Casamitjana, 2008; Horn et al., 2001; Boegman et al., 2005).

Como a implementação dos conceitos apresentados na Meta 1 requer a incorporação da batimetria, o software foi expandido para permitir a leitura de geometrias bidimensionais e tridimensionais, por meio de um ou dois transectos longitudinais ao longo do lago. A integração batimétrica também possibilitou o cálculo automático de parâmetros clássicos da limnologia física, como o Lake Number e a estabilidade de Schmidt.

Paralelamente, a arquitetura da interface gráfica foi modernizada, migrando do framework Tkinter para uma implementação baseada em Qt. O sistema passou a oferecer suporte dinâmico aos backends PyQt5 e PySide6, com detecção automática do módulo disponível em tempo de execução. Além disso, foi implementado um sistema modular baseado em "Additional Parameters", que permite a incorporação de novos cálculos e diagnósticos sem a necessidade de alterações estruturais na interface gráfica. Os resultados também foram reformulados, substituindo-se o relatório estático em PDF por um dashboard interativo desenvolvido com Plotly, que apresenta de forma visual e exploratória os principais produtos da análise.

Nesta seção, são descritos detalhadamente os aperfeiçoamentos técnicos implementados no software

4.3.1. INTERFACE GRÁFICA

A interface gráfica do *Interwave Analyzer* foi reformulada (Figure X) com o objetivo de aumentar a robustez e organização do fluxo de trabalho. A versão anterior era baseada na biblioteca Tkinter, nativa do Python adequada para aplicações simples e de menor complexidade. Entretanto, à medida que o sistema evoluiu e novas funcionalidades foram incorporadas, tornaram-se evidentes limitações relacionadas à modularidade, gerenciamento avançado de layouts e integração com componentes gráficos mais sofisticados.

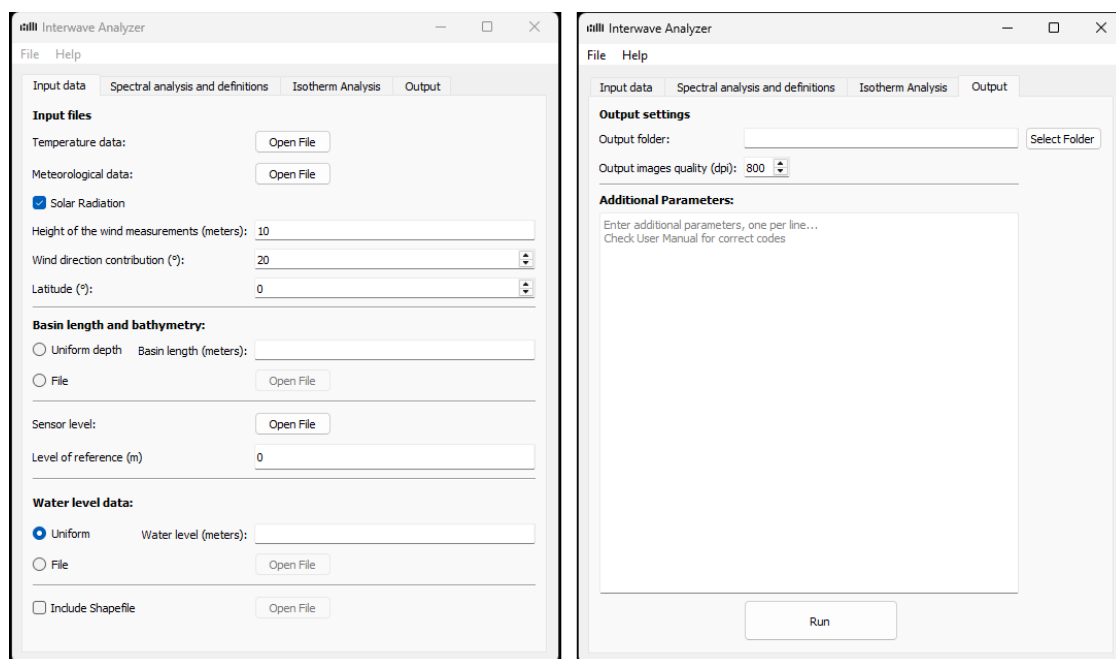
Diante disso, a GUI foi reestruturada utilizando o framework Qt, com suporte dinâmico para PyQt5 ou PySide6. Esse novo sistema garante maior portabilidade e flexibilidade, permitindo que o software funcione com diferentes *bindings* do Qt sem necessidade de modificações estruturais no código-fonte.

A nova GUI foi organizada exatamente como a anterior, através de abas temáticas, estruturando o fluxo de uso de forma sequencial e intuitiva. Entre as principais melhorias implementadas destacam-se:

- Inclusão da seção de batimetria, permitindo entrada estruturada e dedicada para dados morfométricos;
- Criação da caixa texto de parâmetros adicionais (*Additional Parameters*), permitindo que o usuário defina *keywords* preestabelecidas para análises específicas;
- Melhor alinhamento visual.

Instituição internacional parceira:

É importante destacar que os detalhes matemáticos e físicos associados à batimetria e aos parâmetros adicionais são discutidos nos itens posteriores deste relatório. De forma geral, a reformulação da GUI representa um avanço significativo na usabilidade do *Interwave Analyzer*, tornando o ambiente mais amigável e aumentando a compatibilidade com diferentes computadores.



. Interface final da nova GUI dedicada à configuração de parâmetros adicionais e controle de execução do analisador.

Apesar das melhorias estruturais da interface, o novo módulo foi inicialmente desenvolvido e disponibilizado na forma de script, ou seja, o usuário trabalha normalmente por meio da interface gráfica, porém deve executar o script principal para que a GUI seja iniciada. Diferentemente das versões anteriores, que eram distribuídas também como executáveis compilados, essa abordagem foi adotada temporariamente para contornar limitações observadas na geração de executáveis, especialmente relacionadas à compatibilidade com diferentes sistemas operacionais, arquiteturas e ambientes Python. Foram observados casos de dificuldade na execução do software via arquivo executável devido a incompatibilidades com sistemas operacionais, dependências específicas e variações de configuração das máquinas. Ressalta-se, contudo, que permanece como objetivo futuro a consolidação de uma nova versão executável mais robusta e amplamente compatível, após ajustes adicionais e testes em múltiplas plataformas.

4.3.2. PLATAFORMA PARA PARÂMETROS ADICIONAIS

A seção Additional Parameters (Figure x, imagem à direita) foi desenvolvida com o objetivo de ampliar a flexibilidade estrutural do Interwave Analyzer sem comprometer a estabilidade da interface gráfica ou a compatibilidade com arquivos de configuração previamente utilizados pelos usuários. Conceitualmente, essa seção representa funcionalidades adicionais que podem ser incorporadas ao modelo de forma modular, preservando a

Instituição internacional parceira:

organização da GUI e evitando a necessidade de constantes modificações estruturais na interface. Do ponto de vista de implementação, os Additional Parameters foram concebidos como um sistema baseado em palavras-chave com valores opcionais. Essa estratégia deve garantir que o modelo permaneça totalmente funcional mesmo na ausência de parâmetros adicionais e que a inclusão de novos recursos não exija alterações na interface gráfica, mantendo arquivos de configuração (settings files) continuamente compatíveis com versões atualizadas do software. Além disso a nova funcionalidade deve fomentar novas implementações no software.

Os parâmetros adicionais que estão disponíveis atualmente são apresentados na **tabela 1** e discutidos nos itens a seguir (4.3.3, 4.3.4 e 4.3.5). Detalhes em relação as implementações estão disponíveis no manual dos usuários, disponível através deste link: **link manual**

Tabela 1. Parâmetros adicionais disponíveis no Interwave Analyzer

Keyword	Valor esperado	Descrição resumida	Valor default
nameBasin	#nome#	Nome do lago ou reservatório analisado. Utilizado apenas para identificação em painéis e saídas gráficas; não afeta os cálculos.	"No name"
pathBathy	#arquivo.len#	Transecto batimétrico secundário (orientado a 90° do principal), permitindo representação geométrica assimétrica da bacia.	None
changeBasin	#ângulo#	Ângulo de rotação do eixo principal da bacia (graus), controlando o alinhamento geométrico com a direção do vento.	270°

4.3.3. IMPLEMENTAÇÃO DE DADOS BATIMÉTRICOS PARA ANÁLISE

A representação batimétrica de lagos e reservatórios no *Interwave Analyzer* foi estruturada de forma a permitir diferentes níveis de detalhamento batimétrico. A implementação considera duas abordagens principais para definição da geometria longitudinal: (i) profundidade uniforme e (ii) entrada de dados batimétricos a partir de arquivo externo.

Na abordagem simplificada, o usuário pode definir uma profundidade constante diretamente na interface gráfica (**Figura x, caixa de diálogo Basin length**), similar ao procedimento anteriormente adotado **ref**. Nesse caso, o lago é tratado como geometricamente uniforme ao longo do eixo vertical, assumindo comprimento horizontal constante em todas as camadas. Para o cálculo do número de lago e estabilidade de Schmidt, o lago é considerado preferencialmente circular, possuindo diâmetro condizente ao valor especificado pelo usuário na interface gráfica.

Para representações mais realistas, o modelo permite a leitura de um arquivo batimétrico com extensão *.len*, no qual a variação vertical do comprimento do lago é explicitamente descrita. O arquivo consiste em um conjunto de camadas discretas ordenadas da superfície ao fundo, contendo, para cada nível: (i) a profundidade da camada, (ii) o comprimento horizontal correspondente e (iii) a distância do início da batimetria em relação a camada

Instituição internacional parceira:

superficial utilizada como referência (Figura X). Essa estrutura possibilita reconstruir a variação longitudinal do lago ao longo da coluna d'água, representando a declividade de cada margem do lago (direita e esquerda).

Internamente, o modelo interpreta cada linha do arquivo como um estrato geométrico independente. A discretização vertical permite calcular volumes parciais, distribuição espacial e parâmetros integrados dependentes da geometria. Os dados batimétricos fornecidos são utilizados diretamente em cálculos centrais do modelo, incluindo na determinação do Número de Lago (Lake Number), no cálculo da estabilidade de Schmidt, na estimativa de inclinação efetiva de cada margem do lago, servindo para o cálculo do parâmetro crítico batimétrico (Eq. 1).

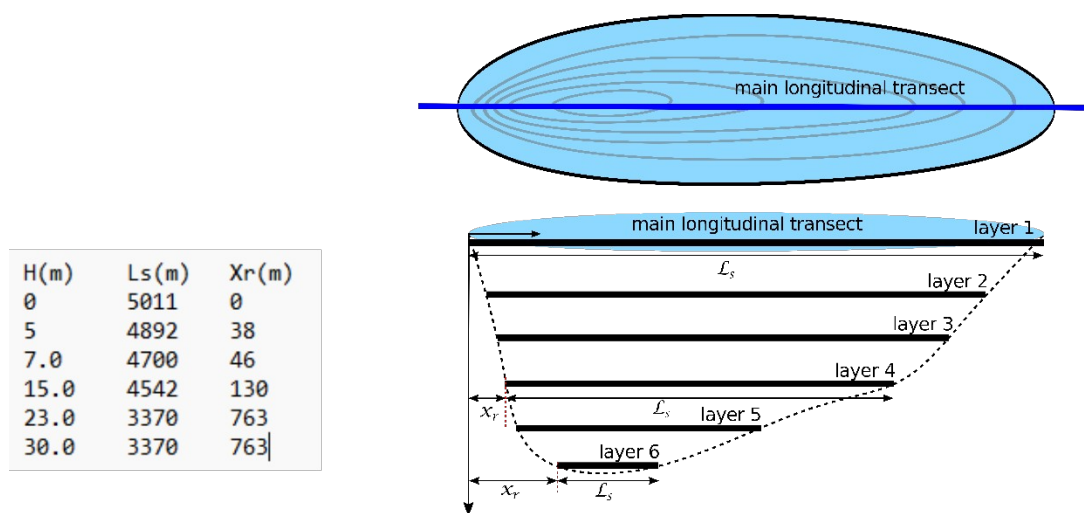


Figura X. Exemplo ilustrativo da representação da batimetria no *Interwave Analyzer*.

Diferentemente de abordagens baseadas exclusivamente em camadas com áreas simétricas (ref), o software considera a variação do ponto inicial da camada (Figura X) e a assimetria transversal do lago (Figura X), permitindo uma análise mais representativa da realidade e uma análise mais detalhada do declive batimétrico de cada margem. A partir desses comprimentos, o software converte internamente cada estrato em áreas equivalentes, considerando as assimetrias bi- e tridimensionais, quando consideradas.

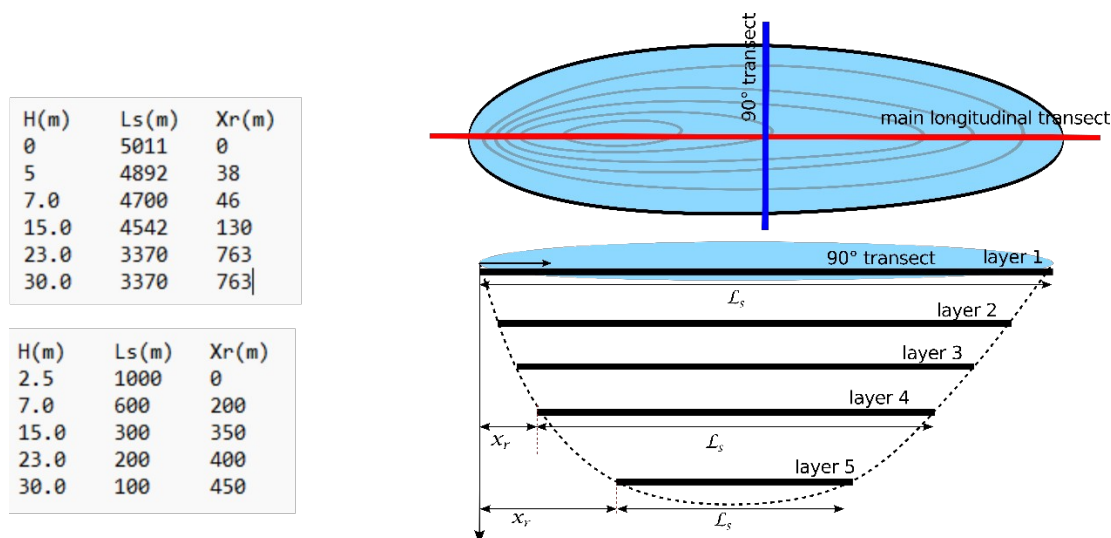


Figura Y. Exemplo ilustrativo da representação do segundo transecto batimétrico no *Interwave*

Instituição internacional parceira:

Analyzer.

Segundo Transecto Batimétrico

Além do perfil longitudinal principal, foi implementado a inclusão de um segundo transecto ortogonal ao transecto principal por meio do parâmetro *pathBathy*, disponível nos *Additional Parameters*. Esse segundo arquivo *.len*, orientado a 90° em relação ao eixo principal (Figura Y), possibilita incorporar assimetria no lago, influenciando diretamente os cálculos de dissipação de seichas internas em topografias inclinadas e o período das ondas internas.

Quando apenas um transecto é fornecido, a bacia é tratada como verticalmente variável, porém horizontalmente simétrica. Nesse caso, cada camada é representada internamente como uma seção circular equivalente, e as propriedades geométricas derivadas assumem simetria radial. No entanto, com a inclusão de um segundo transecto, o modelo combina os perfis longitudinal e transversal para cada camada vertical, passando a representar os estratos como seções elípticas equivalentes. Essa modificação altera a distribuição espacial de área e volume, produzindo uma aproximação tridimensional mais realista da morfologia da bacia.

Sob essa configuração, o comprimento efetivo da bacia deixa de ser constante e passa a depender da orientação do vento em relação aos eixos principais, permitindo inclusive a ocorrência de modos transversais de oscilação interna, potencialmente com períodos distintos daqueles associados ao eixo longitudinal dominante.

Rotação Batimétrica

A implementação geométrica inclui ainda um parâmetro de rotação do eixo principal da bacia (definido como parâmetro adicional: *changeBasin*), que permite ajustar o alinhamento entre a geometria interna do modelo e a orientação geográfica real do sistema (Figura Z). Esse procedimento consiste na aplicação de uma transformação angular ao sistema de referência interno, redefinindo a projeção do vento sobre o eixo dominante do lago. Tal ajuste é particularmente relevante quando a orientação real do lago ou reservatório não coincide com convenções cartesianas simplificadas, sendo válida apenas quando é utilizado o segundo transecto batimétrico, visto que em configurações simétricas, a rotação não altera os resultados devido à invariância geométrica radial.

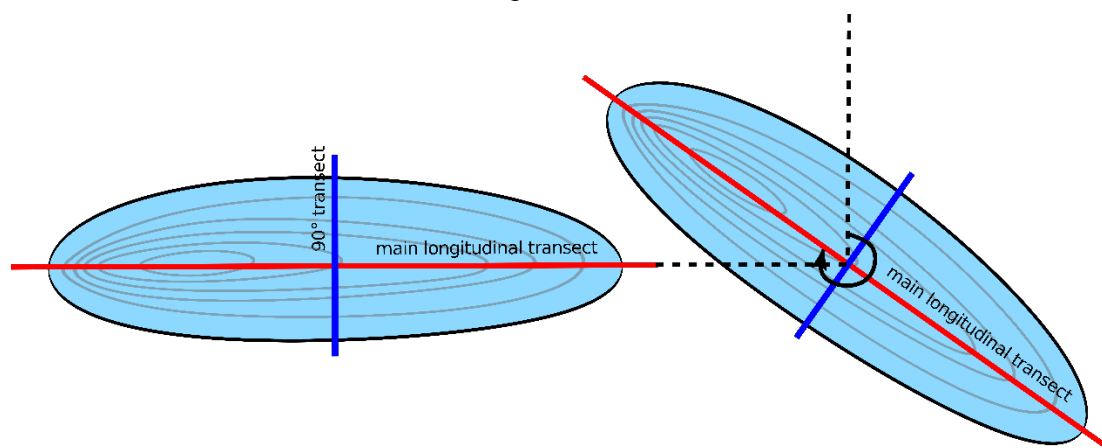


Figura Z. Exemplo ilustrativo da representação do segundo transecto batimétrico no *Interwave*

Instituição internacional parceira:

Analyzer.

4.3.4. CÁLCULO DO NÚMERO DE SCHMIDT E DO LAKE NUMBER

A estimativa da estabilidade de Schmidt (St) e do Número de Lago (Ln) no *Interwave Analyzer* é realizada a partir de uma formulação integrada que combina o perfil térmico vertical com a reconstrução geométrica da bacia baseada nos dados batimétricos fornecidos.

Estabilidade de Schmidt (St)

A estabilidade de Schmidt quantifica o trabalho mecânico por unidade de área necessário para misturar completamente a coluna d'água até uma massa específica uniforme. O cálculo baseia-se na distribuição vertical de massa específica derivada do perfil de temperatura.

O perfil de temperatura medido é interpolado na malha vertical, conforme o número de camadas disponíveis no arquivo batimétrico (.len). Em seguida, a massa específica da água é estimada pela equação de estado, disponível anteriormente no software (ref).

O centroide é determinado por:

(2)

enquanto a estabilidade de Schmidt é calculada por:

(3)

onde g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), A é a área superficial do lago (definida como a primeira camada especificada no arquivo batimétrico), A_h é a área horizontal da camada (estimada através do diâmetro de cada camada definido no arquivo batimétrico), ρ é a densidade.

Número de Lago (Ln)

O Lake Number (L_n) expressa a razão entre a resistência do empuxo ao deslocamento das isotermas e a força eólica. Ele fornece um indicador adimensional da caracterização de inclinação da termoclina (ref).

O Número de Lago (L_n) é então calculado como:

(3)

sendo que H é a profundidade total do lago, ρ_m é a massa específica média do hipolímnio, U é a velocidade de atrito do vento na superfície e St é a estabilidade de Schmidt na forma volumétrica:

(4)

Instituição internacional parceira:

4.3.5. CÁLCULO DO PARÂMETRO CRÍTICO BATIMÉTRICO

O parâmetro crítico batimétrico (θ_c), obtido na Meta 1 (Eq. 1) foi implementado no *Interwave Analyzer* com o objetivo de avaliar a interação entre as seichas internas e a inclinação geométrica do fundo na altura da termoclina. Esse diagnóstico permite identificar condições favoráveis à intensificação de processos de mistura (ref), restringindo a dominância ou inibindo a geração de seichas internas.

O procedimento é dividido em duas etapas principais: (i) cálculo da inclinação teórica da onda interna e (ii) a comparação com as inclinações batimétricas locais na profundidade da termoclina.

A inclinação característica da onda interna é estimada a partir da relação de dispersão simplificada para ondas internas em regime estratificado. A inclinação é calculada como:

(5)

onde T é o período teórico da seicha interna obtido através do modelo de decomposição e $\bar{f}$ é a média vertical da frequência de empuxo, calculada considerando a diferença de massa específica entre as camadas inferior (último sensor de temperatura) e superior (primeiro sensor de temperatura) e a profundidade total do lago (ref). Essa técnica para o cálculo da frequência de empuxo foi classificada como a mais recomendada para evitar que o valor final fosse influenciado pela quantidade de sensores utilizada para a análise.

O parâmetro crítico batimétrico (θ_c), conforme demonstrado na Meta 1, é definido como a razão entre a inclinação do fundo e a inclinação característica da seicha interna (Eq. 5):

(6)

onde α é o ângulo da inclinação das margens do lago para a altura da termoclina. É importante evidenciar que todos os parâmetros foram implementados sem o uso de médias, sendo estes disponíveis como séries temporais e calculados individualmente a cada passo de tempo, incluindo a posição da termoclina para a definição do ângulo de inclinação da margem. Os resultados são plotados para as duas margens quando as análises buscam avaliar apenas um único transecto. Para análises com dois trasectos, os resultados são plotados a cada passo de tempo para cada margem do sistema (norte, sul, leste e oeste), conforme mostrado na figura abaixo (Figura Z).

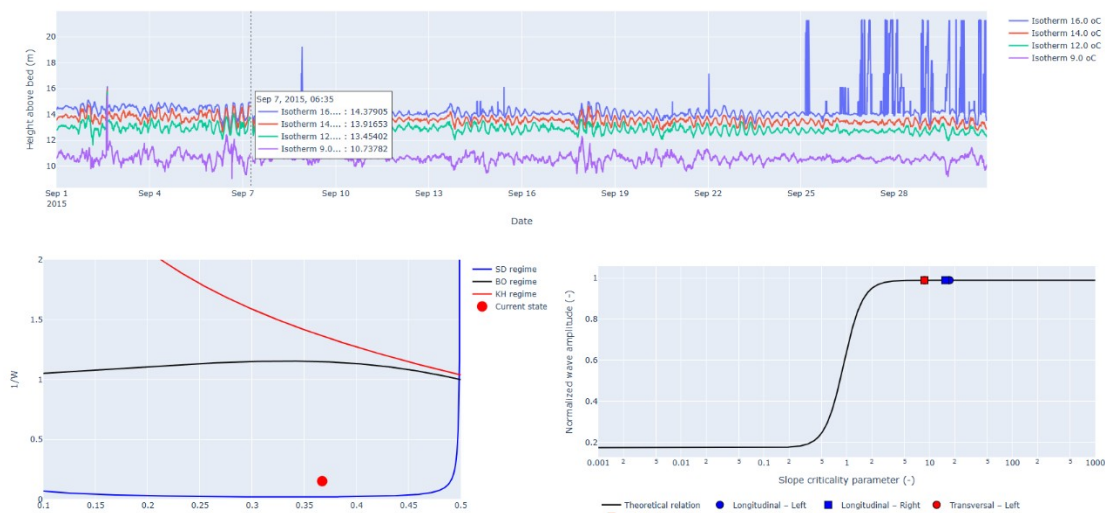


Figura Z. Resultados da degeneração e efeitos batimétricos na persistência das seichas internas de acordo com os períodos seleccionados na série temporal das isotermas. Para mais detalhes confira o manual dos usuários através do [link](#).

4.3.6. DASHBOARD DE VISUALIZAÇÃO E DIAGNÓSTICO

O *Dashboard* desenvolvido para o **Interwave Analyzer** apresenta um painel integrado de visualização e síntese diagnóstica dos principais resultados do modelo (Figura D). Seu objetivo é permitir a interpretação rápida do estado hidrodinâmico do sistema, reunindo em uma única interface os indicadores físicos mais relevantes associados à estratificação, forçamento e dinâmica de ondas internas.

Interwave Analyzer Dashboard Analyzing hydrodynamics and mixing in lakes and reservoirs

General information

Basin name: Milada Lake
Period analysis: 1/9/2015 at 0h to 30/9/2015 at 23h

Basin characteristics

Q Search

Basin characteristics

Thermal stratification

Thermal mixing

Internal waves

Figura D. Menu principal do dashboard interativo incorporado ao *Interwave Analyzer*:

Os resultados são apresentados de forma sincronizada no tempo, permitindo análise comparativa entre forças meteorológicas e resposta internas do lago. Indicadores adimensionais, como o Número de Lago, Número de Wedderburn e Número de Richardson são destacados para facilitar a identificação de períodos potencialmente dominados mistura, dinâmica e estabilidade.

Instituição internacional parceira:

Assim, o *Dashboard* funciona como uma camada interpretativa do modelo, conectando os cálculos hidrodinâmicos à análise prática do comportamento do sistema lacustre ou reservatório.

Produto Meta 3:	<i>O principal resultado desta meta consiste na atualização do software <i>Interwave Analyzer</i>, incorporando a formulação teórica desenvolvida na Meta 1. A estrutura do sistema foi integralmente reformulada, incluindo a modernização da interface gráfica, aprimoramento dos modos de visualização e reorganização da arquitetura interna do código. Foram incorporadas novas funcionalidades, como a análise batimétrica com um ou dois transectos, além da inclusão de variáveis limnológicas de maior robustez diagnóstica, como a estabilidade de Schmidt e o número de Lagos.</i> <i>O software atualizado e os recursos adicionais estão disponível no link:</i> https://buenorc.github.io/pages/interwave.html
------------------------	--

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O coordenador desta

6. CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO DO PROJETO

Para a entrega dos produtos e resultados propostos no início deste projeto, o cronograma estabelecido na submissão foi rigorosamente cumprido, não sendo registrados atrasos em nenhuma das atividades previstas.

Além das metas inicialmente definidas, foram incorporados ao software recursos adicionais não contemplados na proposta original, incluindo: (i) a implementação do sistema *Additional Parameters* (Seção 4.3.2); (ii) a integração de ferramentas de visualização gráfica por meio de um dashboard interativo (Seção 4.3.6); e (iii) a inclusão de novos índices e variáveis limnológicas, como a estabilidade de Schmidt e o Número de Lagos (Seção 4.3.4). Adicionalmente, o proponente ministrou a disciplina Dinâmica de Lagos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná (PPGEA-UFPR), no qual obteve credenciamento docente. A disciplina também foi utilizada como ambiente de validação e teste da nova versão do software desenvolvida no âmbito deste projeto.

Metas	Descrição da atividade	Ano 1					
		1	2	3	4	5	6
1	Desenvolvimento do modelo não-hidrostático e simulações						
1	Desenvolvimento da teoria						
1	Testes em lagos e reservatórios reais						
2	Modelagem tridimensional do reservatório do Passaúna						
2	Calibração do modelo tridimensional para período antigo						
2	Validação e comparação com modelos antigos						
3	Integração da teoria desenvolvido no software <i>Interwave Analyzer</i>						

Instituição internacional parceira:

3	Reformulação da GUI						
3*	Testes e ajustes do software em disciplina ministrada						
3*	Implementação de um sistema de <i>Additional Parameters</i>						
3*	Implementação do cálculo de outros parâmetros limnológicos						
3*	Implementação do dashboard para visualização dos resultados						
1,2,3	Relatório Final e prestação de contas						

Legenda	Descrição
*	Atividades adicionais, não prevista na submissão da proposta
	Período de execução de cada atividade
	Preparação e submissão de artigo científico em revista
	Preparação e submissão de artigo científico em evento

7. RESUMO FINANCEIRO

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aghsaee, P., Boegman, L., & Lamb, K. G. (2010). Breaking of shoaling internal solitary waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 659, 289–317. <https://doi.org/10.1017/S002211201000248X>
- Antenucci, J. P., & Imberger, J. (2003). The seasonal evolution of wind/internal wave resonance in Lake Kinneret. *Limnology and Oceanography*, 48(5), 2055–2061. <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.5.2055>
- Antenucci, J. P., Imberger, J., & Saggio, A. (2000). Seasonal evolution of the basin-scale internal wave field in a large stratified lake. *Limnology and Oceanography*, 45(7), 1621–1638. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.7.1621>
- Bernhardt, J., & Kirillin, G. (2013). Seasonal pattern of rotation-affected internal seiches in a small temperate lake. *Limnology and Oceanography*, 58(4), 1344–1360. <https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.4.1344>
- Boegman, L., & Ivey, G. N. (2012). The dynamics of internal wave resonance in periodically forced narrow basins. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C11). <https://doi.org/10.1029/2012JC008134>
- Boegman, L., Ivey, G. N., & Imberger, J. (2005). The degeneration of internal waves in lakes with sloping topography. *Limnology and Oceanography*, 50(5), 1620–1637. <https://doi.org/10.4319/lo.2005.50.5.1620>
- Boegman, L., & Stastna, M. (2019). Sediment resuspension and transport by internal solitary waves. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 51, 129–154. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045049>
- Bouffard, D., & Boegman, L. (2012). Basin-scale internal waves. In *Encyclopedia of lakes and Reservoirs* (pp. 102–107). Springer.
- Brenner, S. D., & Laval, B. E. (2018). Seiche modes in multi-armed lakes. *Limnology and Oceanography*, 63(6), 2717–2726. <https://doi.org/10.1002/lno.11001>
- Brooks, J. L., Midwood, J. D., Smith, A., Cooke, S. J., Flood, B., Boston, C. M., Semecsen, P., Doka, S. E., & Wells, M. G. (2022). Internal seiches as drivers of fish depth use in lakes. *Limnology and Oceanography*, 67(5), 1040–1051. <https://doi.org/10.1002/lno.12055>
- Carneiro, C., Kelderman, P., & Irvine, K. (2016). Assessment of phosphorus sediment–water exchange through water and mass budget in Passaúna Reservoir (Paraná State, Brazil). *Environmental Earth Sciences*, 75(7), 564. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5349-3>

Instituição internacional parceira:

- Chowdhury, M. R., Wells, M. G., & Howell, T. (2016). Movements of the thermocline lead to high variability in benthic mixing in the nearshore of a large lake. *Water Resources Research*, 52(4), 3019–3039. <https://doi.org/10.1002/2015WR017725>
- Cossu, R., & Wells, M. G. (2013). The interaction of large amplitude internal seiches with a shallow sloping lakebed: observations of benthic turbulence in Lake Simcoe, Ontario, Canada. *PloS One*, 8(3), e57444. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057444>
- D'Ambrosio, S. L., Henderson, S. M., Nielson, J. R., & Harrison, J. A. (2022). In situ flux estimates reveal large variations in methane flux across the bottom boundary layer of a eutrophic lake. *Limnology and Oceanography*, 67(10), 2119–2139. <https://doi.org/10.1002/lno.12193>
- de Carvalho Bueno, R., & Bleninger, T. (2017). Verificação da ocorrência de ondas internas no reservatório do Vossoroca. *XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- de Carvalho Bueno, R., Bleninger, T., Boehrer, B., & Lorke, A. (2023). Physical mechanisms of internal seiche attenuation for non-ideal stratification and basin topography. *Environmental Fluid Mechanics*. <https://doi.org/10.1007/s10652-023-09928-y>
- de Carvalho Bueno, R., Bleninger, T., & Lorke, A. (2020). Internal wave analyzer for thermally stratified lakes. *Environmental Modelling & Software*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104950>
- de Carvalho Bueno, R., Bleninger, T., & Lorke, A. (2024a). The effect of bottom slope on the generation of basin-scale internal waves in stratified reservoirs. *26th Annual International Workshop on Physical Processes in Natural Waters - PPNW2024*.
- de Carvalho Bueno, R., Bleninger, T., & Lorke, A. (2024b). Transport and mixing induced by internal seiche destabilization on sloping bathymetry. *37th SIL International Congress on Limnology*.
- de Carvalho Bueno, R., Bleninger, T., & Lorke, A. (2025). Internal seiche damping on sloping topography. *Submitted*.
- de Carvalho Bueno, R., Bleninger, T., Yao, H., & Rusak, J. A. (2020). An empirical parametrization of internal seiche amplitude including secondary effects. *Environmental Fluid Mechanics*. <https://doi.org/10.1007/s10652-020-09767-1>
- de Carvalho Bueno, R., da Silva, N. S., Santos, A. D. dos, & Bleninger, T. B. (2024). Gravity current analyzer for lock-release experiments. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/23249676.2024.2340972>
- de Carvalho Bueno, R., Marcon, L., Wosiacki, L., Romero, M., Mannich, M., & Bleninger, T. (2017). Correntes de gravidade e de intrusão produzidas pelo experimento lock-exchange. *XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- de Carvalho Bueno, R., Riha, M., Bleninger, T., & Lorke, A. (2023). Interwave Analyzer - Investigating the hydrodynamic of lakes from temperature data. *XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Deltares. (2014). *Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*.
- Dissanayake, P., Hofmann, H., & Peeters, F. (2019). Comparison of results from two 3D hydrodynamic models with field data: Internal seiches and horizontal currents. *Inland Waters*, 9(2), 239–260. <https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1580079>
- Doda, T., Ramón, C. L., Ulloa, H. N., Brennwald, M. S., Kipfer, R., Perga, M.-E., Wüest, A., Schubert, C. J., & Bouffard, D. (2024). Lake surface cooling drives littoral-pelagic exchange of dissolved gases. *Science Advances*, 10(4). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adi0617>
- Guseva, S., Casper, P., Sachs, T., Spank, U., & Lorke, A. (2021). Energy Flux Paths in Lakes and Reservoirs. *Water*, 13(22), 3270. <https://doi.org/10.3390/w13223270>
- Hingsamer, P., Peeters, F., & Hofmann, H. (2014). The consequences of internal waves for phytoplankton focusing on the distribution and production of *Planktothrix rubescens*. *PloS One*, 9(8), e104359. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104359>
- Hlevca, B., Howell, T., Madani, M., & Benoit, N. (2025). Fine-Scale Hydrodynamic Modeling of Lake Ontario: Has Climate Change Affected Circulation Patterns? *Environmental Modeling & Assessment*, 30(2), 219–239. <https://doi.org/10.1007/s10666-024-10003-z>

Instituição internacional parceira:

- Hodges, B. R., Imberger, J., Saggio, A., & Winters, K. B. (2000). Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake. *Limnology and Oceanography*, 45(7), 1603–1620.
<https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.7.1603>
- Horn, W., Mortimer, C. H., & Schwab, D. J. (1986). Wind-induced internal seiches in Lake Zurich observed and modeled. *Limnol. Oceanogr.*, 31(6), 1232–1254.
- Imberger, J. (2013). Flux Paths in a Stratified Lake. In *Physical Processes in Lakes and Oceans* (1). American Geophysical Union (AGU). <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/CE054p0001>
- Ishikawa, M., Bleninger, T., & Lorke, A. (2021). Hydrodynamics and mixing mechanisms in a subtropical reservoir. *Inland Waters*. <https://doi.org/10.1080/20442041.2021.1932391>
- Ishikawa, M., Gonzalez, W., Golyjeswski, O., Sales, G., Rigotti, J. A., Bleninger, T., Mannich, M., & Lorke, A. (2021). Effects of dimensionality on the performance of hydrodynamic models. In *Geoscientific Model Development Discussions* (pp. 1–34). Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/gmd-2021-250>
- Jarić, I., Říha, M., Souza, A. T., Rabaneda-Bueno, R., Děd, V., Gjelland, K. Ø., Baktoft, H., Čech, M., Blabolil, P., Holubová, M., Jůza, T., Muška, M., Sajdlová, Z., Šmejkal, M., Vejřík, L., Vejříková, I., & Peterka, J. (2022). Influence of internal seiche dynamics on vertical movement of fish. *Freshwater Biology*, 67(9), 1543–1558. <https://doi.org/10.1111/fwb.13959>
- Laval, B., Imberger, J., Hodges, B. R., & Stocker, R. (2003). Modeling circulation in lakes: Spatial and temporal variations. *Limnology and Oceanography*, 48(3), 983–994.
<https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.3.0983>
- Lemmin, U., Mortimer, C. H., & Bäuerle, E. (2005). Internal seiche dynamics in Lake Geneva. *Limnology and Oceanography*, 50(1), 207–216. <https://doi.org/10.4319/lo.2005.50.1.0207>
- Lorke, A., Müller, B., Maerki, M., & Wüest, A. (2003). Breathing sediments: The control of diffusive transport across the sediment–water interface by periodic boundary-layer turbulence. *Limnology and Oceanography*, 48(6), 2077–2085. <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.6.2077>
- MacIntyre, S., Clark, J. F., Jellison, R., & Fram, J. P. (2009). Turbulent mixing induced by nonlinear internal waves in Mono Lake, California. *Limnology and Oceanography*, 54(6), 2255–2272.
<https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6.2255>
- Marti, C. L., & Imberger, J. (2006). Dynamics of the benthic boundary layer in a strongly forced stratified lake. *Hydrobiologia*, 568(1), 217–233. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0111-6>
- Mortimer, C. H. (1952). Water movements in lakes during summer stratification; evidence from the distribution of temperature in Windermere. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 236(635), 355–398. <https://doi.org/10.1098/rstb.1952.0005>
- Münnich, M., Wüest, A., & Imboden, D. M. (1992). Observations of the second vertical mode of the internal seiche in an alpine lake. *Limnology and Oceanography*, 37(8), 1705–1719.
<https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.8.1705>
- Nakayama, K., Sato, T., Shimizu, K., & Boegman, L. (2019). Classification of internal solitary wave breaking over a slope. *Physical Review Fluids*, 4(1), 014801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.4.014801>
- Nielson, J. R., & Henderson, S. M. (2023). Periodic boundary layer separation and lateral intrusions observed above a sloping lakebed. *Limnology and Oceanography*, 68(1), 26–39.
<https://doi.org/10.1002/lno.12246>
- Ostrovsky, I., Yacobi, Y. Z., Walline, P., & Kalikhman, I. (1996). Seiche-induced mixing: Its impact on lake productivity. *Limnology and Oceanography*, 41(2), 323–332.
<https://doi.org/10.4319/lo.1996.41.2.0323>
- Pannard, A., Beisner, B. E., Bird, D. F., Braun, J., Planas, D., & Bormans, M. (2011). Recurrent internal waves in a small lake: Potential ecological consequences for metalimnetic phytoplankton populations. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, 1(1), 91–109.
<https://doi.org/10.1215/21573698-1303296>
- Patterson, J. C., Hamblin, P. F., & Imberger, J. (1984). Classification and dynamic simulation of the vertical density structure of lakes 1. *Limnology and Oceanography*, 29(4), 845–861.
<https://doi.org/10.4319/lo.1984.29.4.0845>

Instituição internacional parceira:

- Peeters, F., Encinas Fernandez, J., & Hofmann, H. (2019). Sediment fluxes rather than oxic methanogenesis explain diffusive CH₄ emissions from lakes and reservoirs. *Scientific Reports*, 9(1), 243. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36530-w>
- Plisnier, P.-D., Cocquyt, C., Cornet, Y., Poncelet, N., Nshombo, M., Ntakimazi, G., Nahimana, D., Makasa, L., & MacIntyre, S. (2023). Phytoplankton blooms and fish kills in Lake Tanganyika related to upwelling and the limnological cycle. *Journal of Great Lakes Research*, 49(6), 102247. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2023.102247>
- Rao, Y. R., Hawley, N., Charlton, M. N., & Schertzer, W. M. (2008). Physical processes and hypoxia in the central basin of Lake Erie. *Limnology and Oceanography*, 53(5), 2007–2020. <https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.5.2007>
- Roberts, D. C., Egan, G. C., Forrest, A. L., Largier, J. L., Bombardelli, F. A., Laval, B. E., Monismith, S. G., & Schladow, G. (2021). The setup and relaxation of spring upwelling in a deep, rotationally influenced lake. *Limnology and Oceanography*, 66(4), 1168–1189. <https://doi.org/10.1002/lno.11673>
- Rueda, F. J., Ramón, C. L., & Schladow, S. G. (2025). The Hydrodynamic, Thermodynamic, and Mixing Impacts of Floating Photovoltaics on the Surface of a Lake. *Water Resources Research*, 61(9). <https://doi.org/10.1029/2025WR039917>
- Shi, L., Sun, J., Lin, B., Morovati, K., Liu, Z., & Zuo, X. (2023). Macroscopic hydro-thermal processes in a large channel-type reservoir. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47, 101367. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101367>
- Shintani, T., De La Fuente, A., Niño, Y., & Imberger, J. (2010). Generalizations of the wedderburn number: Parameterizing upwelling in stratified lakes. *Limnology and Oceanography*, 55(3), 1377–1389. <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.3.1377>
- Spigel, R. H., & Imberger, J. (1980). The classification of mixed-layer dynamics of lakes of small to medium size. *Journal of Physical Oceanography*, 10(7), 1104–1121. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010%3C1104:TCOMLD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010%3C1104:TCOMLD%3E2.0.CO;2)
- Thorpe, S. A. (1974). Near-resonant forcing in a shallow two-layer fluid: a model for the internal surge in Loch New? *Journal of Fluid Mechanics*, 63(3), 509–527. <https://doi.org/10.1017/S00222112074001753>
- Tian, X., Pan, H., Köngäs, P., & Horppila, J. (2017). 3D-modelling of the thermal circumstances of a lake under artificial aeration. *Applied Water Science*, 7(8), 4169–4176. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0577-6>
- Tsydenov, B. O. (2022). Modeling biogeochemical processes in a freshwater lake during the spring thermal bar. *Ecological Modelling*, 465, 109877. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109877>
- Vadeboncoeur, Y., Moore, M. V., Stewart, S. D., Chandra, S., Atkins, K. S., Baron, J. S., Bouma-Gregson, K., Brothers, S., Francoeur, S. N., Genzoli, L., Higgins, S. N., Hilt, S., Katona, L. R., Kelly, D., Oleksy, I. A., Ozersky, T., Power, M. E., Roberts, D., Smits, A. P., ... Yamamuro, M. (2021). Blue Waters, Green Bottoms: Benthic Filamentous Algal Blooms Are an Emerging Threat to Clear Lakes Worldwide. *BioScience*, 71(10), 1011–1027. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab049>
- Valbuena, S. A., Bombardelli, F. A., Cortés, A., Largier, J. L., Roberts, D. C., Forrest, A. L., & Schladow, S. G. (2022). 3D Flow Structures During Upwelling Events in Lakes of Moderate Size. *Water Resources Research*, 58(3). <https://doi.org/10.1029/2021WR030666>
- Valipour, R., Boegman, L., Bouffard, D., & Rao, Y. R. (2017). Sediment resuspension mechanisms and their contributions to high-turbidity events in a large lake. *Limnology and Oceanography*, 62(3), 1045–1065.
- Vidal, J., Casamitjana, X., Colomer, J., & Serra, T. (2005). The internal wave field in Sau reservoir: Observation and modeling of a third vertical mode. *Limnol. Oceanogr.*, 50(4), 1326–1333. <https://doi.org/10.4319/lo.2005.50.4.1326>
- Vilhena, L. C., Marti, C. L., & Imberger, J. (2013). The importance of nonlinear internal waves in a deep subalpine lake: Lake Iseo, Italy. *Limnology and Oceanography*, 58(5), 1871–1891. <https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.5.1871>

Instituição internacional parceira:

- Wadzuk, B. M., & Hodges, B. R. (2009). Hydrostatic versus nonhydrostatic Euler-equation modeling of nonlinear internal waves. *Journal of Engineering Mechanics*, 135(10), 1069–1080. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2009\)135:10\(1069\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:10(1069))
- Welch, P. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), 70–73. <https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>
- Wüest, A., & Lorke, A. (2003). Small-scale hydrodynamics in lakes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35(1), 373–412. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161220>
- Wüest, A., & Lorke, A. (2009). Small-scale turbulence and mixing: Energy fluxes in stratified lakes. *Encyclopedia of Inland Waters*, 1(BOOK_CHAP), 628–635. <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00084-3>

Instituição internacional parceira: