

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO ONLINE DE QUALIDADE DA ÁGUA - ESTUDO DE CASO NA BAÍA DA BABITONGA

DEVELOPMENT OF AN ONLINE CONTINUOUS WATER QUALITY MONITORING SYSTEM – A CASE STUDY IN BABITONGA BAY

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO CONTINUO EN LÍNEA DE LA CALIDAD DEL AGUA – ESTUDIO DE CASO EN LA BAHÍA DE BABITONGA

 <https://doi.org/10.56238/arev7n12-072>

Data de submissão: 09/11/2025

Data de publicação: 09/12/2025

Paulo Marcondes Bousfield

Doutor em Saúde e Meio Ambiente

Instituição: Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE)

E-mail: paulo.bousfield@univille.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-4083-9556>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7839106588406173>

Therezinha Maria Novais de Oliveira

Doutora em Engenharia de Produção

Instituição: Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE)

E-mail: therezinha.novais@univille.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2122-6095>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8358410394755408>

Priscila Ferraz Franczak

Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais

Instituição: Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE)

E-mail: priscila.franczak@univille.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9549-7018>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5709807530418638>

RESUMO

A crescente pressão sobre os ambientes aquáticos costeiros, decorrente de atividades antrópicas, exige o aprimoramento dos métodos de monitoramento da qualidade da água. O objetivo deste estudo foi desenvolver um sistema de monitoramento contínuo online, com foco na detecção precoce de alterações ambientais em tempo real, aplicado à Baía da Babitonga (SC) - Brasil. O estudo partiu do diagnóstico das limitações dos métodos tradicionais de coleta pontual e da necessidade de dados em alta frequência para uma gestão ambiental preventiva. A metodologia adotou uma abordagem interdisciplinar, integrando conhecimentos das ciências ambientais, tecnologia da informação e engenharia, e incluiu a definição dos requisitos do sistema e o desenvolvimento da infraestrutura tecnológica. Os resultados indicaram que o sistema é eficaz na identificação de eventos críticos atípicos, como variações de pH, oxigênio dissolvido e temperatura, permitindo respostas rápidas por parte de órgãos fiscalizadores e outros atores interessados. A pesquisa reconhece desafios como a calibração periódica dos sensores e os custos operacionais, mas recomenda a expansão da rede de monitoramento e o uso de algoritmos de aprendizado de máquina. Por fim, a pesquisa reforça a

relevância do monitoramento contínuo online como ferramenta estratégica para a gestão sustentável da água e conservação dos ecossistemas aquáticos.

Palavras-chave: Monitoramento. Contínuo. Qualidade da Água. Sistema.

ABSTRACT

The increasing pressure on coastal aquatic environments resulting from human activities demands improvements in water quality monitoring methods. The aim of this study was to develop an online continuous monitoring system focused on the early detection of real-time environmental changes, applied to Babitonga Bay (SC), Brazil. The study began with an assessment of the limitations of traditional point-sampling methods and the need for high-frequency data to support preventive environmental management. The methodology adopted an interdisciplinary approach, integrating knowledge from environmental sciences, information technology, and engineering, and included defining system requirements and developing the technological infrastructure. The results indicated that the system is effective in identifying atypical critical events, such as variations in pH, dissolved oxygen, and temperature, thereby enabling rapid responses from regulatory agencies and other stakeholders. The study acknowledges challenges such as the need for periodic sensor calibration and operational costs but recommends expanding the monitoring network and incorporating machine learning algorithms. Finally, the research reinforces the relevance of online continuous monitoring as a strategic tool for sustainable water management and the conservation of aquatic ecosystems.

Keywords: Monitoring. Continuous. Water Quality. System.

RESUMEN

La creciente presión sobre los ambientes acuáticos costeros, derivada de actividades antrópicas, exige el perfeccionamiento de los métodos de monitoreo de la calidad del agua. El objetivo de este estudio fue desarrollar un sistema de monitoreo continuo en línea, con énfasis en la detección temprana de alteraciones ambientales en tiempo real, aplicado a la Bahía de Babitonga (SC) – Brasil. El estudio partió del diagnóstico de las limitaciones de los métodos tradicionales de muestreo puntual y de la necesidad de datos de alta frecuencia para una gestión ambiental preventiva. La metodología adoptó un enfoque interdisciplinario, integrando conocimientos de las ciencias ambientales, la tecnología de la información y la ingeniería, e incluyó la definición de los requisitos del sistema y el desarrollo de la infraestructura tecnológica. Los resultados indicaron que el sistema es eficaz para identificar eventos críticos atípicos, como variaciones de pH, oxígeno disuelto y temperatura, lo que permite respuestas rápidas por parte de los organismos fiscalizadores y otros actores interesados. La investigación reconoce desafíos como la calibración periódica de los sensores y los costos operativos, pero recomienda la expansión de la red de monitoreo y el uso de algoritmos de aprendizaje automático. Por último, la investigación refuerza la relevancia del monitoreo continuo en línea como herramienta estratégica para la gestión sostenible del agua y la conservación de los ecosistemas acuáticos.

Palabras clave: Monitoreo. Continuo. Calidad del Agua. Sistema.

1 INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, os ambientes aquáticos enfrentam uma pressão ambiental cada vez maior de diversas fontes, relacionadas principalmente às atividades antropogênicas. Essas atividades incluem, uso de bacias hidrográficas para captação de água, desenvolvimento costeiro, atividades portuárias, e uso para recreação e comercial, como a pesca. Vários se não todos - esses fatores geralmente se combinam e afetam os sistemas aquáticos em termos de biologia, ecologia, características físico-químicas, hidrodinâmica e transporte de sedimentos. Dessa forma, a identificação e remediação de impactos negativos induzidos por essas perturbações requerem monitoramento contínuo dos parâmetros ambientais (Coraggio et al, 2022). Neste sentido, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA 357/2005 – Legislação brasileira para a proteção e gestão do meio ambiente – exige o monitoramento de vários elementos biológicos e químicos para o estabelecimento de condições de referência em termos de qualidade da água.

Embora seja desafiador identificar ou prever os impactos prejudiciais, antropogênicos, nos ambientes aquáticos devido à sua complexidade, observações prolongadas são essenciais para diferenciar entre alterações antropogênicas de longo prazo e variações naturais, como os padrões oscilantes de erosão ou acréscimo causados por mudanças na hidrodinâmica climática. A alta frequência de amostragem é crucial para capturar detalhes dos processos biológicos, químicos e físicos em estuários, incluindo a força das marés, a ciclagem de nutrientes, efeitos das ações antropogênicas, eventos climáticos esporádicos dentre outros. Em situações específicas, como a poluição por descargas accidentais de esgoto residencial ou industrial, a detecção rápida de perturbações exige monitoramento contínuo e a coleta frequente de dados, um desafio que é agravado pela dificuldade de acesso ou pela distância do local de monitoramento. (Garel et al, 2009).

Diante disso, o objetivo do trabalho foi desenvolver um sistema de monitoramento contínuo online de qualidade da água, com sistema de alerta para eventos atípicos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os órgãos ambientais de fiscalização, como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente-IBAMA e os Institutos de Meio Ambiente estaduais ou municipais, têm adotado predominantemente uma abordagem reativa no controle da qualidade das águas. Essa atuação ocorre, em geral, em resposta a denúncias ou no contexto de processos de licenciamento ambiental para novos empreendimentos. A metodologia aplicada consiste na coleta de amostras de água em pontos específico, seguida de análises laboratoriais de parâmetros físicos, químicos e biológicos relacionados a índices de qualidade da água. Contudo, para os monitoramentos solicitados nos licenciamentos ambientais, em

atendimento a Resolução CONAMA 01/86 Artigo 6º Inciso IV os relatórios trazem resultados de análises mensais a partir de amostras coletadas em campo e levadas para laboratório, sendo encaminhadas aos órgãos ambientais, por exemplo IBAMA ou Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina-IMA.

Essa abordagem apresenta limitações significativas quando se considera a complexidade dos ecossistemas aquáticos, em que a manutenção contínua da qualidade da água é um requisito essencial para a preservação e/ou conservação ambiental garantindo a manutenção da vida aquática e a saúde da população. A baixa frequência das amostragens e a dependência de ações reativas podem resultar em atrasos críticos na identificação e mitigação de impactos ambientais, especialmente em ambientes sensíveis como a Baía Babitonga alvo do estudo de caso deste trabalho.

Existem diversas justificativas com base na legislação para fazer o monitoramento de contínuo online de qualidade da água. Dentre as quais ressaltam-se:

Cumprimento da legislação ambiental: Resolução CONAMA 01/86 especificamente no Artigo 6, Inciso IV, que trata dos programas de monitoramento ambiental dos licenciamentos ambientais de empreendimentos, a Lei nº 9.433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, estabelece que a gestão dos recursos hídricos deve ser feita com base em informações atualizadas e precisas sobre a qualidade da água. Além disso, a Resolução Conama nº 357/2005, que estabelece os padrões de qualidade da água, determina que a qualidade da água deve ser monitorada continuamente para garantir a sua conformidade com os padrões estabelecidos.

Além das citadas anteriormente, tem-se legislações que tratam da prevenção de danos ambientais: A Lei nº 6.938/1981, que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente, estabelece que é dever do poder público e da sociedade proteger o meio ambiente, prevenir danos ambientais e controlar as atividades potencialmente poluidoras. Assim, o monitoramento contínuo online de qualidade da água é uma ferramenta importante para prevenir danos ambientais e garantir a saúde pública, permitindo a detecção precoce de alterações na qualidade da água e a adoção de medidas preventivas ou corretivas.

Em relação às questões sociais, o monitoramento ambiental da qualidade da água contínuo, está diretamente ligado à saúde pública das comunidades locais. Águas contaminadas podem ser uma fonte de doenças e problemas de saúde para a população, especialmente em áreas que dependem de determinados ambientes, para abastecimentos, pesca e entretenimento entre outros. Portanto, um sistema de monitoramento eficaz contribui para prevenir riscos à saúde, garantindo a segurança e o bem-estar dos habitantes (Krkjes, 2024).

Como base científica, os dados coletados pelo sistema de monitoramento fornecerão

informações valiosas para pesquisadores, gestores ambientais e formuladores de políticas, permitindo uma tomada de decisões baseada em evidências para o manejo sustentável de ambientes aquáticos e áreas adjacentes. Isso inclui o planejamento de infraestrutura, gestão de recursos hídricos e desenvolvimento de políticas de conservação (Kermovant et al., 2023).

Embora o avanço científico na área de monitoramento resulte de anos de monitoramento usando padrões bem estabelecidos de procedimentos de campo e de laboratório, estudos recentes têm questionado a aplicabilidade desses métodos tradicionais em subsidiar políticas públicas eficientemente, visto às limitações da capacidade de detecção de mudanças na qualidade das águas associada à sua baixa resolução espaço-temporal (McDowell et al., 2024; Rozemeijer et al., 2025). Esses métodos são amplamente utilizados para o monitoramento e revisão de políticas ambientais em diversos países (e.g., Skinner; Langford, 2013; Carvalho et al., 2019; Keiser; Shapiro, 2019), contudo os avanços tecno-científicos no desenvolvimento de sensores têm viabilizado o monitoramento contínuo e demonstrado a sua eficiência e importância em lidar, particularmente, com as limitações de métodos convencionais em explorar a dinâmica físico-química em ambientes aquáticos. Neste contexto, diversos estudos têm explorado essa abordagem na compreensão de processos hidroquímicos em bacias hidrográficas (Bieroza et al., 2023; Burns et al., 2019; Kirchner et al., 2004; Pellerin et al., 2016; Rode et al., 2016), lagos e reservatórios (McBride; Rose, 2018; Meinson et al., 2016).

A maioria dos estudos empregando o monitoramento contínuo tem explorado nutrientes e ambientes naturalmente mais dinâmicos e com potencial para abastecimento de água (Bieroza et al., 2023; Burns et al., 2019; Chen, Menglu et al., 2020; Chen, Y. et al., 2020; Hernandez-Ramirez et al., 2019; Hou et al., 2013; Kirchner et al., 2004; McBride; Rose, 2018; Meinson et al., 2016; Rode et al., 2016; Rozemeijer et al., 2025; Van Geer; Kronvang; Broers, 2016; Zhao et al., 2024). Contudo, ambientes estuarinos são áreas costeiras de dinâmica complexa e vulneráveis aos efeitos cumulativos das pressões antropogênicas em toda extensão das bacias hidrográficas, e geralmente negligenciados. Sendo assim, caracterizam áreas críticas para aplicação de monitoramento ambiental contínuo.

A abordagem desta pesquisa, portanto, se propõe a preencher uma lacuna científica quanto à aplicabilidade desse sistema de monitoramento multiparamétrico da qualidade da água, considerando as vantagens dessa abordagem em comparação com o monitoramento tradicional de baixa frequência e as peculiaridades desse ambiente costeiro.

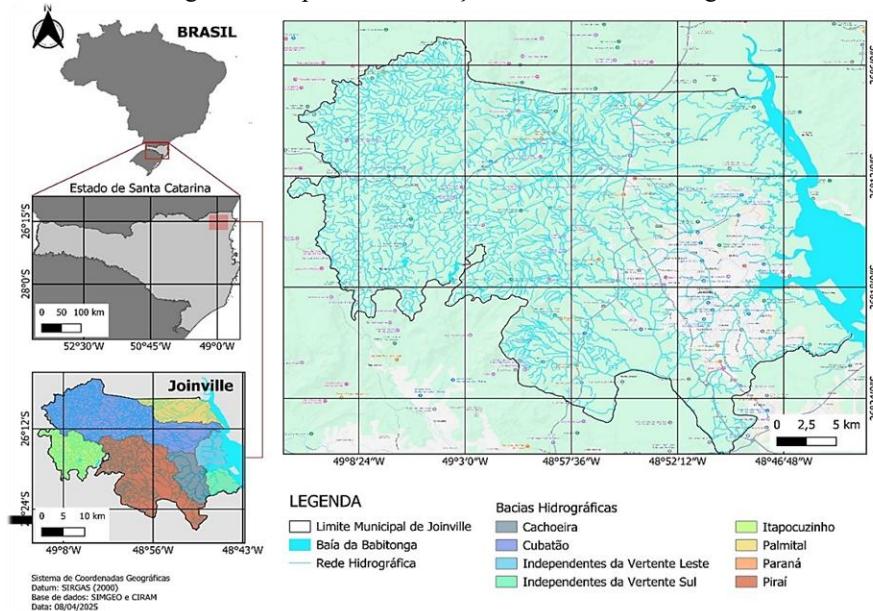
3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO DE CASO

O Complexo Estuarino da Baía da Babitonga localiza-se na porção norte do litoral catarinense (entre 26°02' S e 26°28'S; 48°28'W e 48°50'W), no sul do Brasil conforme pode ser observado na Figura 1. Compreende uma área de aproximadamente 160 km², com 20 km de comprimento e largura máxima de 5 km. Em sua porção nordeste, é conectado com o Oceano Atlântico por um canal profundo de 1,7 km de largura (Cremer, 2006a), e, assim, apresenta um sistema de circulação de cunha salina. A baía é cercada por manguezais, que cobrem uma área de aproximadamente 6200 ha (i.e., 75% dos manguezais do estado), e por margens de bancos de areia e rochas (IBAMA, 1998). Toda a bacia da Babitonga é caracterizada por quatro domínios geológicos: granitos e um complexo embasamento tectônico paleozóico; melaço; vulcanitos associados; e depósitos sedimentares do Quaternário (Barros et al., 2008).

A baía é contornada em sua porção noroeste pela Unidade Geomorfológica da Serra do Mar, segundo o mapa geomorfológico do Atlas de Santa Catarina, e a sudeste pela Ilha de São Francisco. Apresenta, desta forma, um complexo que pode ser dividido em três grandes segmentos: a região do Canal do Linguado, que contorna a Ilha na sua porção sul, a região do rio Palmital ao norte, com características estuarinas em boa parte de sua extensão, e o corpo central da baía propriamente dita (IBAMA, 1998; Fink, 2013). A bacia hidrográfica contribuinte da baía da Babitonga, de acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina, pertence ao Sistema da Vertente Atlântica, e é dividida em quatro bacias hidrográficas: Cachoeira, Palmital, Cubatão e Parati (Barros et al., 2008). A bacia hidrográfica do rio Cubatão Norte, é o principal afluente da baía e possui uma área de 472 km², e uma densidade de drenagem de 1,67 km/km², compreendendo cerca de 792 km de cursos de água (Abreu, 2021).

Figura 1: Mapa de Localização da Baía da Babitonga.



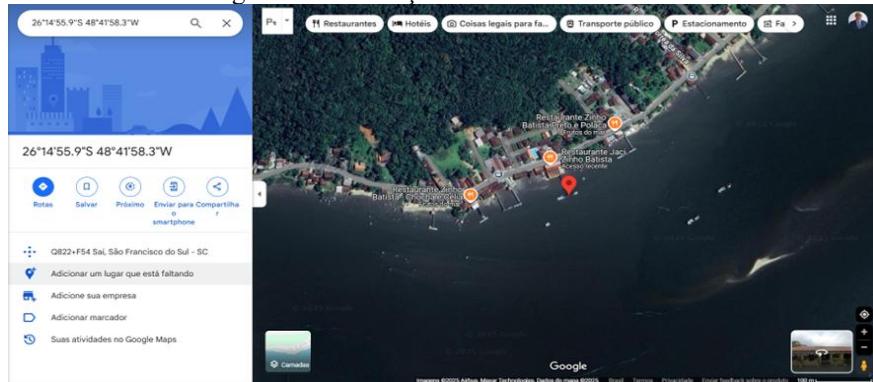
Fonte: o Autor, 2025.

O clima na região é caracterizado como mesotérmico úmido com verão quente (Cfa), de acordo com a classificação de Köppen (1948), com temperatura média anual de 20,3°C. A orografia influencia na variabilidade da precipitação pluviométrica durante todas as estações (Mello, 2020), sendo um fator que cria um gradiente espacial de precipitação na região do município, de forma que os índices médios variam de 2.067 mm na planície costeira, atingindo 2.533 mm próximo aos escarpamentos da Serra do Mar, 2.017 mm nas montanhas e 1.542 mm no planalto (Mello et al., 2015).

3.2 SELEÇÃO DO PONTO DE COLETA

Para este estudo foi selecionado um ponto de fácil acesso, segurança e suscetível a ocupação urbana e comercial. Ponto escolhido foi o trapiche do restaurante Jaci-Zinho Batista. Conforme pode ser observado na Figura 2.

Figura 2: Localização do Ponto 1 de Coleta.



Fonte: Google Earth, 2025

3.3 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS MONITORADOS

Para este estudo os parâmetros de qualidade da água analisados foram: Temperatura (°C), Eletrocondutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH – Potencial Hidrogeniônico, Sólidos Totais Dissolvidos (ppm), Potencial de Óxi-Redução (mV), Salinidade (psu), Pressão (psi), Resistência Ôhmica (KOhm-cm) e Oxigênio Dissolvido (mg/L). Os parâmetros foram assim definidos, considerando parâmetros que dão respostas significativas em relação a alteração de comportamento da qualidade da água tanto para poluição de origem química, quanto biológica sendo importantes para definição de ações específicas de análise e mitigação.

Assim esses parâmetros fornecem um panorama inicial das condições da água, permitindo a identificação de potenciais problemas, como poluição química, contaminação por esgoto, mudanças climáticas locais ou impactos antrópicos. O monitoramento contínuo desses indicadores auxilia na gestão ambiental e na tomada de decisões para preservação dos ecossistemas aquáticos, além de reduzir os custos análises de uma série de parâmetros nem sempre necessários.

3.4 COLETA DE DADOS

Para este estudo de caso, foram realizadas quatro amostragens em um ponto da Baía da Babitonga (Ponto 1). Em três dessas amostragens foi usada a frequência de coleta a cada cinco minutos, em uma das amostragens a frequência foi a cada 1 hora. Para cada uma dessas amostragens foi realizada a estatística descritiva dos dados e matriz de correlação.

3.5 EQUIPAMENTOS E SENsoRES UTILIZADOS PARA A COLETA DE DADOS

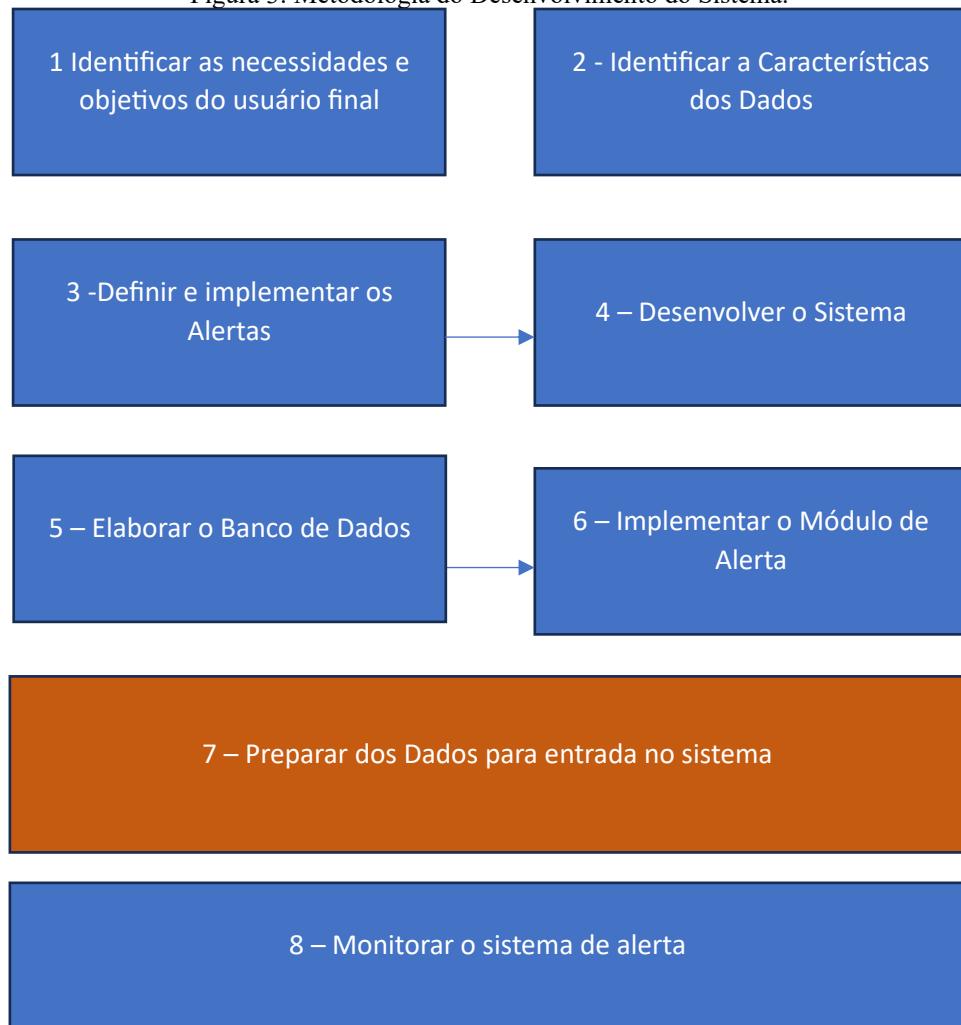
Foi usado o Medidor Portátil (Sonda Multiparâmetro) HI98494 da marca Hanna Instruments, sendo uma tecnologia avançada para monitoramento da qualidade da água, oferecendo medições de

pH, condutividade elétrica (EC) e oxigênio dissolvido (OD) entre ouros, utilizando sensores específicos para cada parâmetro.

3.6 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

Descreve-se a seguir as etapas para o desenvolvimento do Sistema Monitoramento contínuo online de qualidade da água, por meio da geração de alertas (Etapas 1 a 8; conforme a Figura 3), desde a identificação das necessidades do usuário final, tipos de alertas, até o desenvolvimento do sistema.

Figura 3: Metodologia do Desenvolvimento do Sistema.



Fonte: Adaptado de Leigh et al, 2019a

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a primeira amostragem realizada do dia 02 ao dia 11 do mês de outubro de 2023, com frequência de coleta a cada 5 minutos, a estatística descritiva pode ser observada na Figura 4.

Figura 4: Estatística Descritiva da Amostragem 1

02/10 - 11/10 2023	Temp. [°C]	pH	mV [pH]	ORP [mV]	EC [µS/cm]	EC Abs. [µS/cm]	RES [KOhm-cm]	TDS [ppm]	Sal. [psu]	Sigma T [sT]	Press. [psi]	D.O. [%]	D.O. [mg/L]
Média	21.67	7.81	-37.63	256.18	34228.67	32075.05	0.03	17111.81	21.55	14.12	14.77	57.51	4.45
Mediana	21.52	7.82	-38.20	278.20	34545.00	32260.00	0.03	17270.00	21.76	14.34	14.75	58.30	4.48
Moda	21.47	7.82	-38.70	275.70	37620.00	35910.00	0.03	18810.00	23.89	15.64	14.75	59.80	4.62
Desvio padrão	0.39	0.13	7.82	60.57	3028.23	3008.80	0.00	1513.82	2.09	1.51	0.09	4.82	0.40
Variância da amostra	0.15	0.02	61.13	3668.86	9170180.03	9052872.96	0.00	2291646.47	4.36	2.29	0.01	23.21	0.16
Mínimo	21.02	5.98	-43.20	116.80	22720.00	21070.00	0.03	11360.00	13.74	8.18	14.60	42.70	3.20
Máximo	22.71	7.90	70.00	324.50	38990.00	37220.00	0.04	19490.00	24.86	16.37	15.07	69.90	5.62
Coeficiente de Variação	1.79	1.70	-20.78	23.64	8.85	9.38	9.85	8.85	9.69	10.73	0.58	8.38	9.02
Contagem	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00

Fonte: O Autor, 2025.

A partir dessa análise, foi possível destacar diversos aspectos importantes, com ênfase no coeficiente de variação (CV), que mede a dispersão relativa dos dados em relação à média. A temperatura (Temp. [°C]) apresenta uma média de 21,67 °C e um coeficiente de variação (CV) de 1,79%, indicando uma baixa dispersão dos dados ao redor da média, o que reflete estabilidade nos valores de temperatura ao longo das medições conforme pode ser observado na Figura 9. O pH também demonstra uma baixa variação, com uma média de 7,81 e um CV de 1,70%, o que sugere consistência nas medições de acidez. A resistência (RES [KOhm-cm]) apresenta um CV de 9,85%, sugerindo uma variação moderada, que pode estar ligada às mudanças nas condições de salinidade e condutividade do meio.

De maneira geral, as variáveis analisadas mostram consistência nas medições, como temperatura e pH e coeficiente de variação baixo indicando baixa dispersão.

A matriz de correlação apresentada na Figura 5 revela relações significativas entre várias variáveis ambientais. Entre as correlações positivas mais fortes, destacam-se a relação entre TDS (ppm) e EC (µS/cm), com uma correlação quase perfeita (0,9999), indicando que os sólidos totais dissolvidos estão intimamente ligados à condutividade elétrica. Da mesma forma, a salinidade (Sal [psu]) também apresenta uma forte correlação positiva com a condutividade elétrica (0,9999), evidenciando que o aumento na salinidade está diretamente relacionado ao aumento da condutividade. Além disso, EC Abs. [µS/cm] também está fortemente correlacionada com EC [µS/cm] (0,9977), reforçando a relação entre esses dois parâmetros.

Por outro lado, as correlações negativas também fornecem informações importantes. A resistência elétrica (RES [KOhm-cm]) apresenta uma relação inversa muito forte com a condutividade elétrica (-0,9832), mostrando que, à medida que a condutividade aumenta, a resistência diminui.

Figura 5: Matriz de Correção da Amostragem 1

02 - 11 nov/23	Temp.	pH	mV	ORP	EC	RES	TDS	Sal.	Sigma T	Press.	D.O.
Temp.	1.00										
pH	-0.08	1.00									
mV	0.08	-1.00	1.00								
ORP	-0.86	0.03	-0.02	1.00							
EC	0.63	0.04	-0.05	-0.79	1.00						
RES	-0.55	-0.06	0.06	0.72	-0.98	1.00					
TDS	0.63	0.04	-0.05	-0.79	1.00	-0.98	1.00				
Sal.	0.64	0.04	-0.05	-0.79	1.00	-0.98	1.00	1.00			
Sigma T	0.60	0.05	-0.05	-0.77	1.00	-0.99	1.00	1.00	1.00		
Press.	-0.17	0.03	-0.03	0.45	-0.53	0.52	-0.53	-0.53	-0.54	1.00	
D.O.	-0.01	0.07	-0.07	0.11	-0.24	0.27	-0.24	-0.24	-0.25	0.10	1.00

Fonte: O Autor, 2025.

Algumas variáveis apresentam correlações moderadas, como a temperatura (Temp. [°C]) e a condutividade elétrica (0,6344), sugerindo que o aumento da temperatura pode elevar a condutividade elétrica, possivelmente devido à maior mobilidade dos íons em soluções aquosas. Por outro lado, o ORP (potencial de oxirredução) apresenta uma correlação moderada negativa com a temperatura (-0,8611), indicando que temperaturas mais altas podem reduzir o potencial de oxirredução, o que é consistente com mudanças químicas em ambientes aquáticos.

Por fim, algumas correlações fracas ou insignificantes merecem destaque. Por exemplo, o pH tem uma correlação muito fraca com o oxigênio dissolvido em percentual (D.O. [%]) (0,0716), sugerindo pouca relação entre essas variáveis. A relação entre pressão (Press. [psi]) e EC [$\mu\text{S}/\text{cm}$] é moderada, mas não muito expressiva (-0,5277). Uma conexão notável, no entanto, é observada entre D.O. [%] e D.O. [mg/L], com uma correlação muito forte (0,9721), como esperado, uma vez que ambas medem oxigênio dissolvido de formas relacionadas.

Para segunda amostragem realizada do dia 11 de outubro ao dia 08 do mês de novembro de 2023, com frequência de coleta a cada 5 minutos, sendo posteriormente feita uma estatística descritiva. A partir dessa análise foi possível identificar diferentes níveis de variabilidade entre os parâmetros analisados. Algumas variáveis apresentam baixa dispersão, como o pH, que possui uma média de 7,94 e um coeficiente de variação (CV) de 1,86%, refletindo alta estabilidade nas medições.

Entre as variáveis com variabilidade moderada, destacam-se aquelas relacionadas à condutividade elétrica, como EC [$\mu\text{S}/\text{cm}$] e EC Abs. [$\mu\text{S}/\text{cm}$], que possuem CVs de 9,12% e 9,43%, respectivamente. Esses valores sugerem uma dispersão esperada e relativamente controlada, possivelmente influenciada por fatores ambientais, como a composição química da água. De forma similar, o TDS [ppm] e a salinidade (Sal. [psu]) possuem CVs de 9,12% e 9,75%, respectivamente, reforçando a ideia de que essas variáveis apresentam variações moderadas. O Sigma T [sT], com CV de 11,16%, demonstra uma leve tendência a maior variabilidade.

O oxigênio dissolvido, analisado tanto em termos de porcentagem (D.O. [%]) quanto em concentração (D.O. [mg/L]), apresenta coeficientes de variação de 8,79% e 8,83%, respectivamente. Esses valores indicam uma variação moderada que pode ser atribuída a condições ambientais, como temperatura, salinidade e outros fatores químicos que influenciam a solubilidade do oxigênio na água. Apesar disso, os dados de oxigênio são suficientemente consistentes para suportar análises de qualidade ambiental.

Por outro lado, algumas variáveis apresentam alta variabilidade, como mV [ORP], que tem um CV de -19,42%. O sinal negativo deve-se à média negativa e reflete uma alta dispersão nos valores. Outro caso extremo é o de RES [KOhm-cm], cujo CV ultrapassa 2046%, indicando uma dispersão muito elevada. Esse comportamento pode estar relacionado a medições fora do padrão ou à sensibilidade do parâmetro a mudanças bruscas nas condições ambientais, como variações na salinidade e condutividade.

Em suma, a maioria dos parâmetros analisados demonstra boa consistência, com baixa ou moderada variabilidade, sugerindo que os dados são confiáveis para análises ambientais e diagnósticos. Contudo, as variáveis com alta dispersão, como RES [KOhm-cm], merecem maior atenção para identificar possíveis causas de instabilidade, seja por interferências externas ou características intrínsecas do sensor. Essas análises são fundamentais para a compreensão detalhada da qualidade da água e para a identificação de possíveis anomalias nos registros.

Na matriz de correlação destaca-se a forte correlação positiva entre as variáveis relacionadas à condutividade e salinidade: TDS [ppm], EC [μ S/cm], Sal [psu] e Sigma T [sT]. Esses indicadores apresentam coeficientes de correlação próximos a 1, indicando que aumentos em qualquer uma dessas variáveis são acompanhados por aumentos nas demais. Por exemplo, a correlação entre TDS e EC é praticamente perfeita (0,999998), e o mesmo padrão se repete entre TDS e Sal (0,999219), mostrando uma forte interdependência desses parâmetros. Isso sugere que essas variáveis refletem processos similares ou estão diretamente relacionadas à composição química da água.

Outro ponto de destaque são as correlações negativas encontradas. A relação entre pH e mV [ORP] é particularmente evidente, com um coeficiente de correlação de -0,99973, indicando uma relação inversa praticamente perfeita. Quando o pH aumenta, o valor de mV [pH] diminui drasticamente, o que pode ser esperado devido à forma como esses dois parâmetros são calculados em sistemas de medição. Além disso, variáveis como EC Abs [μ S/cm] e RES [KOhm-cm] apresentam uma correlação moderadamente negativa (-0,52), indicando que à medida que a condutividade aumenta, a resistência elétrica diminui, o que também é consistente com as propriedades físicas e químicas da água.

A temperatura (Temp. [°C]) apresenta correlações interessantes com outros parâmetros. Há uma relação positiva moderada entre temperatura e pH (0,6372), bem como entre temperatura e oxigênio dissolvido em percentual (D.O. [%]) com 0,3522. Isso indica que, em geral, um aumento na temperatura pode estar associado a uma ligeira elevação no pH e em níveis percentuais de oxigênio dissolvido. No entanto, a correlação negativa entre temperatura e mV [pH] (-0,6459) mostra que mudanças térmicas também influenciam os potenciais elétricos de forma inversa, destacando a complexidade das interações físico-químicas.

Por fim, destaca-se que os indicadores de oxigênio dissolvido (D.O. [%] e D.O. [mg/L]) apresentam uma forte correlação positiva entre si (0,977632), evidenciando que ambos medem aspectos relacionados à mesma variável ambiental. No entanto, essas variáveis possuem correlações fracas com a maioria dos outros parâmetros, sugerindo que os níveis de oxigênio dissolvido são influenciados por fatores diferentes daqueles que afetam as variáveis químicas principais, como condutividade e salinidade. A pressão (Press. [psi]) se destaca por apresentar correlações fracas com quase todas as variáveis, o que indica uma relativa independência desse parâmetro em relação aos demais analisados. Essas observações contribuem para segmentar os parâmetros em grupos de variáveis inter-relacionadas, auxiliando no entendimento de processos específicos no ambiente aquático avaliado.

Para terceira amostragem realizada do dia 13 ao dia 22 do mês de novembro de 2023, com frequência de coleta a cada 1 hora, sendo posteriormente feita uma estatística descritiva. Os valores médios e medianas das variáveis estão geralmente próximos, indicando que os dados possuem distribuições relativamente simétricas. Por exemplo, a temperatura média é de 24,98°C, enquanto a mediana é 24,89°C, e para o pH, a média é 7,88, com uma mediana de 7,86. Essas pequenas diferenças sugerem que as distribuições são equilibradas, com poucos desvios extremos.

As variáveis relacionadas à condutividade elétrica (EC [$\mu\text{S}/\text{cm}$], EC Abs [$\mu\text{S}/\text{cm}$], RES [$\text{K}\Omega\text{hm}\cdot\text{cm}$]) apresentam desvios padrão elevados, como 63,61 para EC [$\mu\text{S}/\text{cm}$] e 2.460,02 para EC Abs [$\mu\text{S}/\text{cm}$], refletindo uma alta variabilidade nas medições. Isso também se reflete no coeficiente de variação, que é superior a 8% para essas variáveis. Essa variabilidade pode ser esperada em ambientes aquáticos com diferentes condições físico-químicas.

Outra relação importante observada é a correlação negativa quase perfeita entre pH e mV [pH], com coeficiente de -0,99975. Esse comportamento é esperado em sensores eletroquímicos, onde o potencial elétrico (mV) diminui à medida que o pH aumenta. De maneira semelhante, a resistência elétrica (RES [$\text{K}\Omega\text{hm}\cdot\text{cm}$]) apresenta correlação negativa forte com a condutividade elétrica (EC [$\mu\text{S}/\text{cm}$], -0,8328) e a condutividade absoluta (EC Abs [$\mu\text{S}/\text{cm}$], -0,8469). Esse padrão reflete a

relação inversa entre resistência e condutividade, um fenômeno bem documentado na física e química de soluções.

A quarta amostragem realizada do dia 01 ao dia 10 do mês de dezembro de 2023, com frequência de coleta a cada 1 hora, sendo posteriormente feita a estatística descritiva.

A temperatura (Temp. [°C]) apresenta uma média de 26,59°C, com um desvio padrão de 0,65, indicando pouca variação em torno da média. Já o pH possui média de 7,79, com um desvio padrão baixo (0,09), o que sugere que os valores estão concentrados próximos da média. A concentração de oxigênio dissolvido (D.O. [%] e D.O. [mg/L]) apresenta médias de 70,79% e 5,09 mg/L, com coeficientes de variação relativamente altos (14,79% e 15,92%), sugerindo variabilidade significativa entre as medições.

A análise geral mostra que algumas variáveis possuem alta estabilidade, enquanto outras indicam maior variabilidade, o que pode ser útil para identificar padrões ou anomalias em monitoramento ambiental.

4.1 DEFINIÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DOS ALERTAS

O monitoramento de parâmetros fora dos limites estabelecidos pela legislação é uma abordagem amplamente utilizada para avaliar a qualidade da água e garantir a conformidade com normas ambientais. As legislações, como a Resolução CONAMA nº 357/2005 no Brasil, especificam limites máximos e mínimos para parâmetros como pH, turbidez, oxigênio dissolvido, e concentrações de poluentes, estabelecendo critérios para a preservação de corpos d'água em diferentes usos. Os sistemas que realizam análises online para identificar violações desses padrões são cruciais para a gestão ambiental eficiente.

A implementação de alertas baseados em limites legais depende de sensores de alta precisão e algoritmos que façam a comparação direta entre os valores medidos e os valores regulamentados. Destaca-se que sistemas automatizados com esta funcionalidade oferecem respostas rápidas para mitigar danos ambientais, especialmente em áreas sujeitas a influências antropogênicas intensas, como portos e zonas industriais.

A análise de desvios em relação à média móvel é uma técnica estatística que permite identificar mudanças graduais ou tendências anômalas em corpos d'água. Utilizando médias móveis e desvios padrão, é possível detectar flutuações sutis que poderiam indicar deterioração ambiental progressiva ou alterações sazonais não naturais. O algoritmo proposto em relação ao desvio da média móvel pode ser observado na figura 6.

Figura 6: Algoritmo desvio da média móvel

```

1   INICIO
2   DECLARAR lista ULTIMAS_TEMPERATURAS <- [20, 20.2, 19.8, 20.1, 20.3, 20, 20.1, 19.9, 20.2, 20]
3   DECLARAR REAL MEDIA <- MÉDIA(ULTIMAS_TEMPERATURAS)
4   DECLARAR REAL DESVIO_PADRAO <- DESVIO_PADRAO(ULTIMAS_TEMPERATURAS)
5   DECLARAR REAL TEMPERATURA_ATUAL <- 21
6
7   SE ABS(TEMPERATURA_ATUAL - MEDIA) > 2 * DESVIO_PADRAO ENTAO
8       ESCREVER "Alerta: Temperatura significativamente diferente da média recente!"
9   SENÃO
10      ESCREVER "Temperatura dentro da média aceitável."
11  FIM SE
12 FIM
13

```

Fonte: O Autor, 2025

Esse tipo de alerta é particularmente relevante em áreas como a Baía da Babitonga, onde as condições ambientais podem variar rapidamente devido a influências naturais e antrópicas. A identificação rápida de mudanças bruscas permite medidas corretivas imediatas, protegendo tanto os ecossistemas quanto os usos humanos da água.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

O sistema de monitoramento contínuo online consistiu em uma página HMTL, em que os seus principais componentes incluem a estrutura HTML, que organiza e apresenta as informações de forma estruturada. O título da página, "Monitor de Sondas", indica sua finalidade de acompanhamento em tempo real. As seções principais são distribuídas estratégicamente para facilitar a visualização e a interação do usuário. Entre elas, destaca-se o mapa do Google, identificado pelo elemento #google_map, que exibe a localização das sondas monitoradas. Além disso, há uma área dedicada aos alertas e à seleção de sondas, permitindo que o usuário escolha uma sonda específica para análise detalhada. A página também contém gráficos interativos para monitoramento dos parâmetros de pH e temperatura, fornecendo uma representação visual das variações ao longo do tempo. Por fim, há tabelas que organizam e exibem as últimas análises realizadas e os alertas recentes, facilitando o acesso rápido às informações mais relevantes.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS OBTIDOS PELO MÉTODO ONLINE E O MÉTODO TRADICIONAL.

Os parâmetros de temperatura, pH, condutividade e oxigênio dissolvido analisados estão fortemente interligados e refletem as condições ambientais da Baía da Babitonga.

Com base na variação de temperatura obtida pelo método on-line, e nos achados por (Cremer et al., 2006), no estudo Diagnóstico Ambiental da Baía da Babitonga é possível entender que os

valores registrados pela sonda se situam dentro do intervalo documentado no estudo de referência, que variou entre 17,8°C e 32,1°C ao longo das quatro campanhas sazonais.

A mediana e a amplitude interquartil indicam que a maior parte das temperaturas registradas estão entre aproximadamente 21°C e 25°C, com valores extremos chegando a cerca de 29°C e 19°C. Essa distribuição sugere que as temperaturas observadas não atingiram os valores mínimos e máximos registrados por Cremer et al. (2006), mas permanecem dentro da faixa histórica documentada.

Para o pH nos dados do estudo de Cremer et al. (2006) indicam uma variação de pH entre 6,65 e 8,34 na Baía da Babitonga, e é possível observar que os valores seguem um padrão similar, porém com alguns outliers abaixo do intervalo documentado.

A mediana do pH se encontra próxima de 8,0, sugerindo que a maior parte dos valores registrados estão dentro da faixa esperada para águas estuarinas, onde a influência da água do mar contribui para uma leve alcalinidade. Esse achado está em consonância com Cremer et al. (2006), que destaca a influência da mistura entre a água doce dos rios e a água salgada do oceano, resultando em uma variação de pH dependente da sazonalidade e da maré.

Em síntese, os valores apresentados estão dentro da faixa documentada por Cremer et al. (2006), com exceção de alguns pontos anômalos que sugerem possíveis impactos locais ou variações ambientais sazonais.

A presença de valores inferiores ao padrão da CONAMA sugere a necessidade de monitoramento contínuo e de ações voltadas à redução de fontes poluidoras, como lançamento de efluentes domésticos e industriais, além de melhorias na renovação da água em áreas de menor circulação.

5 CONCLUSÃO

Os principais resultados do estudo indicaram que a implementação de sensores, aliados a um sistema de alerta automatizado, contribui para a detecção rápida de eventos críticos atípicos, como variações anômalas de pH, oxigênio dissolvido e temperatura etc. Além disso, o sistema desenvolvido mostrou-se escalável, permitindo sua replicação em outros ambientes costeiros com características semelhantes.

Contudo, a pesquisa também identificou desafios, como a necessidade de calibração periódica dos sensores, a influência de fatores ambientais na precisão das medições e os custos associados à implementação e manutenção da infraestrutura tecnológica.

Diante dos resultados obtidos, recomenda-se a ampliação do escopo do monitoramento, incorporando novas variáveis ambientais e criando uma rede de sondas para cobrir uma área

geográfica maior. Além disso, futuras pesquisas podem explorar o uso de algoritmos de aprendizado de máquina para aprimorar a predição de tendências e melhorar a capacidade de resposta às mudanças ambientais.

REFERÊNCIAS

ABREU, A. C. A. de. Avaliação dos processos de mistura na Baía da Babitonga (SC) em cenários de mudanças climáticas. 2021. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2021.

BARROS, V. G. et al. Hydrological mixing and geochemical processes characterization in an estuarine/mangrove system using environmental tracers in Babitonga Bay (Santa Catarina, Brazil). *Continental Shelf Research*, v. 28, n. 4–5, p. 682–695, mar. 2008.

BIEROZA, Magdalena et al. Advances in Catchment Science, Hydrochemistry, and Aquatic Ecology Enabled by High-Frequency Water Quality Measurements. *Environmental Science & Technology*, [s. l.], v. 57, n. 12, p. 4701–4719, 2023.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 01, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 17 fev. 1986.

BURNS, Douglas A. et al. Monitoring the riverine pulse: Applying high-frequency nitrate data to advance integrative understanding of biogeochemical and hydrological processes. *WIREs Water*, [s. l.], v. 6, n. 4, 2019.

CARVALHO, Laurence et al. Protecting and restoring Europe's waters: An analysis of the future development needs of the Water Framework Directive. *Science of The Total Environment*, [s. l.], v. 658, p. 1228–1238, 2019.

CHEN, Y et al. A review of the artificial neural network models for water quality prediction. *Applied Sciences*, [s. l.], v. 10, p. 5776, 2020.

CHEN, M. et al. Early Warning Method for Regional Water Resources Carrying Capacity Based on the Logical Curve and Aggregate Warning Index. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 7, p. 2206, 25 mar. 2020.

CONAMA. Resolução CONAMA no 357, de 17 de março de 2005. Estabelece a classificação dos corpos d'água e os padrões de qualidade da água. Conselho Nacional do Meio Ambiente, , 2005.

CORAGGIO, E. et al. Water Quality Sampling Frequency Analysis of Surface Freshwater: A Case Study on Bristol Floating Harbour. *Frontiers in Sustainable Cities*, v. 3, 31 jan. 2022.

CREMER, M. J.; PINHEIRO, P. C.; SOUZA, R. M.; SOARES, M. O.; ZANARDI-LAMARDO, E.; PEREIRA, F. R.; SCHWARZ, R. Diagnóstico ambiental da Baía da Babitonga. Joinville: Univille, 2006. 160 p.

FINK, D. Caracterização das colônias de aves aquáticas na Baía da Babitonga e avaliação preliminar de sua contaminação. 2013b. Universidade Regional de Joinville - UNIVILLE, 2013.

GAREL, Erwan; NUNES, Susana; NETO, João Magalhães; FERNANDES, Rodrigo; NEVES, Ramiro; MARQUES, João Carlos; FERREIRA, Óscar. The autonomous Simpatico system for real-time continuous water-quality and current velocity monitoring: examples of application in three Portuguese estuaries. *Geo-Marine Letters*, v. 29, n. 5, p. 331–341, 2009.

HERNANDEZ-RAMIREZ, A. G. et al. Detection, provenance and associated environmental risks of water quality pollutants during anomaly events in River Atoyac, Central Mexico: A real-time monitoring approach. *Science of The Total Environment*, v. 669, p. 1019–1032, jun. 2019.

HOU, D. et al. An early warning and control system for urban, drinking water quality protection: China's experience. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 20, n. 7, p. 4496–4508, 18 jul. 2013.

IBAMA. Proteção e controle de ecossistemas costeiros: manguezal da Baía de Babitonga. Brazil: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 1998.

KEISER, David A; SHAPIRO, Joseph S. Consequences of the Clean Water Act and the Demand for Water Quality. *The Quarterly Journal of Economics*, [s. l.], v. 134, n. 1, p. 349–396, 2019.

KERMORVANT, C. et al. Understanding links between water-quality variables and nitrate concentration in freshwater streams using high frequency sensor data. *PLOS ONE*, v. 18, n. 6, p. e0287640, 30 jun. 2023.

KIRCHNER, J. W. et al. The fine structure of water-quality dynamics: the (high-frequency) wave of the future. *Hydrological Processes*, v. 18, n. 7, p. 1353–1359, 23 maio 2004.

KÖPPEN, W. *Climatologia: com um estúdio de los climas de la tierra*. Climatology, 1948.

KRKLJEŠ, Damir B.; KITIĆ, Goran V.; PETES, Csaba M.; BIRGERMAJER, Slobodan S.; STANOJEV, Jovana D.; BAJAC, Branimir M.; PANIĆ, Marko N.; RADONIĆ, Vasa M.; BRČESKI, Ilija D.; ŠTRAVS, Rok M.; JANKOVIĆ, Nikolina N.; MATOVIĆ, Jovan B. Multiparameter Water Quality Monitoring System for Continuous Monitoring of Fresh Waters. *IEEE Sensors Journal*, v. 24, n. 7, p. 11246-11259, 1 abr. 2024.

LEIGH, C. et al. Predicting sediment and nutrient concentrations from high-frequency water-quality data. *PLOS ONE*, v. 14, n. 8, p. e0215503, 30 ago. 2019b.

MCBRIDE, Chris G.; ROSE, Kevin C. Automated High-frequency Monitoring and Research. In: *LAKE RESTORATION HANDBOOK*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 419–461.

MCDOWELL, R. W. et al. Monitoring to detect changes in water quality to meet policy objectives. *Scientific Reports*, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 1914, 2024.

MEINSON, Pille et al. Continuous and high-frequency measurements in limnology: history, applications, and future challenges. *Environmental Reviews*, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 52–62, 2016.

MELLO, Y. R. Distribuição de precipitação pluviométrica média na região da serra do mar de Santa Catarina e sua relação com a orografia. 2020. Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2020.

MELLO, Y.; ET AL. Distribuição de precipitação pluviométrica na região de Joinville. *Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia*, v. 13, n. 1, p. 78–93, 2015.

PELLERIN, Brian A. et al. Emerging Tools for Continuous Nutrient Monitoring Networks: Sensors Advancing Science and Water Resources Protection. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, [s. l.], v. 52, n. 4, p. 993–1008, 2016.

RODE, Michael et al. Sensors in the Stream: The High-Frequency Wave of the Present. Environmental Science & Technology, [s. l.], v. 50, n. 19, p. 10297–10307, 2016.

ROZEMEIJER, J. et al. Best practice in high-frequency water quality monitoring for improved management and assessment; a novel decision workflow. Environmental Monitoring and Assessment, [s. l.], v. 197, n. 4, p. 353, 2025.

SKINNER, Dominic; LANGFORD, John. Legislating for sustainable basin management: the story of Australia's Water Act (2007). Water Policy, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 871–894, 2013.

VAN GEER, Frans C.; KRONVANG, Brian; BROERS, Hans Peter. High-resolution monitoring of nutrients in groundwater and surface waters: process understanding, quantification of loads and concentrations, and management applications. Hydrology and Earth System Sciences, [s. l.], v. 20, n. 9, p. 3619–3629, 2016.

ZHAO, N. et al. Early Warning of Sudden Water Pollution Accident Risks Based on Water Quality Models in the Three Gorges Dam Area. Water, v. 16, n. 18, p. 2679, 20 set. 2024.