IV-749 - ESTUDO DO DESVIO PADRÃO MÁXIMO PERMISSÍVEL PARA CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DE QUALIDADE DE ÁGUA- ESTUDO DE CASO NA BACIA DO RIO DOCE

Leonardo Klein Manera[(1)]
Engenheiro Hídrico pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Consultor na empresa Rhama-Analysis de Consultoria Ambiental, com foco em gestão de recursos hídricos, gestão de águas urbanas, modelos hidrológicos, avaliação ambiental, clima e hidrologia.
Maria Eduarda Pereira Alves[(2)]
Engenheira Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo PPGRHSA- IPH/ UFRGS. Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo PPGRHSA- IPH/UFRGS. Consultora na empresa Rhama-Analysis de Consultoria Ambiental, com foco em gestão de recursos hídricos, gestão de águas urbanas, modelos hidrológicos, avaliação ambiental, clima e hidrologia.
Vinicius Nascimento Oliveira[(3)]
Graduado em Engenharia Ambiental e Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Espírito Santo. Brasil.
Daniele Feitoza Silva[(4)]
Engenheira Civil pela Universidade Federal de Alagoas – UFAL. Mestre pela Escola de Engenharia de São Carlos - USP. Doutora pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS. Consultora na empresa Rhama-Analysis de Consultoria Ambiental, com foco em gestão de recursos hídricos, gestão de águas urbanas, modelos hidrológicos, avaliação ambiental, clima e hidrologia.
Carlos Eduardo Morelli Tucci[(5)]
Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFRGS. Doutor em Recursos Hídricos pela Colorado State University. Sócio proprietário e diretor na empresa Rhama-Analysis de Consultoria Ambiental, com foco em gestão de recursos hídricos, gestão de águas urbanas, modelos hidrológicos, avaliação ambiental, clima e hidrologia.

Endereço[(1)]**:** Rua República, 193 - 604 – Cidade Baixa – Porto Alegre - RS - CEP: 90050-321 - Brasil - Tel: +55 (51) 99564-1900 - e-mail: leonardo.manera@rhama-analysis.com

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a calibração de sensores de qualidade de água utilizados no Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático (PMQQS) da bacia do Rio Doce, implantado após o desastre da Barragem de Fundão em 2015. O estudo tem como objetivo avaliar os atuais limites de erros máximos aceitáveis e definir novos limites entre diferentes instrumentos utilizados para medir parâmetros de qualidade da água. Destaca-se a importância do monitoramento da qualidade da água para a construção de indicadores e tomada de decisões, bem como a influência das condições ambientais na qualidade da água. A metodologia utilizada envolve a análise dos dados do programa de monitoramento e a comparação das medições feitas pelos sensores padrão e de campo. O estudo propõe novos limites para erros máximos permissíveis, que levam em consideração a magnitude do parâmetro medido e devem auxiliar a evitar recalibrações frequentes e substituições de sensores, levando a economia de custos e evitando a interrupção no monitoramento.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade da água, Monitoramento, Rio Doce, Calibração de Equipamentos, Limites de Erro.

INTRODUÇÃO

Os rios são a principal fonte de água para diferentes finalidades, e sua qualidade geralmente é reflexo das condições ambientais da bacia hidrográfica em que se insere. Avaliar a qualidade da água, através de monitoramento de parâmetros, permite construir indicadores e contribui para a tomada de decisões (BASSO; CARVALHO, 2007; QUEIROZ *et al.*, 2010). Atualmente, na bacia do rio Doce há o Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático (PMQQS) realizado pela Fundação Renova. Este programa foi implementado em 2017 para monitoramento ao longo do trecho impactado pelo rompimento da barragem de

Fundão em Mariana-MG (2015) e contempla, além da bacia, a zona costeira e estuarina da porção centro-norte capixaba.

No âmbito do PMQQS, são 22 estações telemétricas, que monitoram parâmetros hidrometeorológicos e de qualidade da água. A validade dos dados monitorados, no entanto, é altamente dependente das propriedades metrológicas do instrumento (INMETRO, 2012). A calibração dos instrumentos de medição consiste em uma das etapas que garantem a comprovação metrológica dos dados observados.

Incertezas sempre estarão associadas às medições, sujeitas a efeitos aleatórios e sistemáticos, tendo como resultado observado uma estimativa ou aproximação do valor real. Portanto, faz-se necessária a análise e validação de critérios de dados medidos, para que estes possam representar medições válidas em relação à realidade.

OBJETIVOS

O objetivo do presente estudo consistiu na avaliação dos limites aplicados atualmente e definição de novos limites de erro máximo permissíveis na comparação de resultados entre equipamentos distintos (de campo e padrão) utilizados para medição dos dados na bacia do Rio Doce. Essa definição visa auxiliar a equipe de técnicos na avaliação de calibração dos equipamentos em campo e na verificação da necessidade ou não de troca da sonda de medição de qualidade da água, buscando evitar a interrupção de medição de dados e trocas frequentes dos sensores.

METODOLOGIA

Para avaliar a necessidade de calibração dos equipamentos de campo, verifica-se a representatividade do dado medido pelo sensor localizado no interior do curso d'água em relação à medição de dados com um equipamento calibrado com soluções padrões. A verificação e ajustes das estações é realizada através de uma sonda padrão calibrada em laboratório, utilizando soluções padrão (WOSIACK *et al.*, 2020). Compara-se a sonda de campo (submetida a condições de intempéries no rio) com a sonda padrão, e avalia-se a necessidade de calibração ou troca dos equipamentos, caso estejam acima do limite de erro máximo permissível definido (WAGNER *et al.*, 2006). Caso o valor medido não seja o correto deve-se verificar se esse valor está compreendido no limite máximo aceito para desvio do dado. Caso não, é necessária uma recalibração ou ajuste do equipamento.

Para o desenvolvimento deste estudo foram utilizados os dados das variáveis de qualidade da água monitoradas pelo PMQQS. A Tabela 1 apresenta um resumo das variáveis medidas e as principais características do sistema de monitoramento.

Tabela 1. Características do monitoramento (YSI, 2019).

Variável	Frequência de obtenção	Unidade	Equipamento de medição
Temperatura da água	60 minutos	°C	Sonda multiparâmetro
Turbidez	60 minutos	UNT	Turbidímetro ou sonda multiparâmetro
Condutividade Elétrica	60 minutos	µS/cm a 25 °C	Sonda multiparâmetro
pH	60 minutos	Adimensional	Sonda multiparâmetro
Oxigênio Dissolvido	60 minutos	mg/L	Sonda multiparâmetro
Cianobactérias	60 minutos	µg/L	Sonda multiparâmetro
Clorofila-a	60 minutos	µg/L	Sonda multiparâmetro

Existem critérios de calibração para sensores de qualidade da água na literatura, como exemplo os especificados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), apresentados na Tabela 2 bem como os limites de acurácia definidos pelos próprios fabricantes dos instrumentos de monitoramento. A Fundação Renova tem adotado como critério de calibração um erro admissível de 5% (exceto a turbidez, com erro admissível de 10%), por recomendação do próprio PMQQS (WOSIACK *et al.*, 2020). Entretanto, ao avaliar percentualmente os erros observados, sem considerar a magnitude do dado medido, podem ocorrer avaliações equivocadas em relação a

recalibração ou troca de equipamentos. Isto pode ocorrer pois, em magnitudes baixas, o erro percentual pode resultar em valores até mesmo inferiores a sensibilidade dos equipamentos, podendo representar recalibrações e trocas de sondas de forma frequente, ocasionando custos elevados. Portanto, faz-se necessária a definição de novos limites permissíveis de erros de calibração, variando de acordo com a magnitude do dado, dos seus limites de interesse e do parâmetro avaliado, para as estações automáticas do PMQQS, a partir de dados medidos.

Tabela 2. Critérios de calibração para sensores contínuos de qualidade da água (Fonte: WAGNER*, et al.*, 2006).

Medição	Critérios de calibração
Temperatura	± 0,2 °C
Condutância Específica	± 5 µS/cm ou ± 3% do valor medido, o que for maior
Oxigênio Dissolvido	± 0,3 mg/L
pH	± 0,2 unidades de pH
Turbidez	± 0,5 unidade de turbidez ou ± 5% do valor medido, o que for maior

Para a definição dos limites de desvio máximo permissíveis, foram utilizados valores medidos pela sonda padrão, sonda de campo e verificação de calibração dos sensores. Isto foi aplicado às 22 estações telemétricas da Fundação Renova.

Os procedimentos de estimativa de erros admissíveis aplicados para definição de critérios de calibração são apresentados a seguir (TRIOLA, 2008):

i. Avalição das faixas de magnitudes dos dados medidos nas estações para os diversos parâmetros de medição. As faixas de magnitudes foram definidas de acordo aos valores medidos para cada parâmetro;
ii. Cálculo do erro absoluto ou diferença absoluta entre os valores obtidos pela sonda de campo e sonda padrão;
iii. Entre as faixas de valores, identificou-se as que apresentavam maior magnitude e frequência de erros absolutos;
iv. Para as diferentes faixas de valores, calculou-se a média e o desvio padrão dos erros absolutos;
v. Conhecidas a média e desvio padrão dos erros absolutos para as diferentes faixas de valores, calculou-se valores que representassem a média somada a um desvio padrão. Esta estimativa é considerada razoável e significa um nível de confiança de cerca de 68%, que indica que 68% dos dados se encontram em valores próximos a média (média ± 1 desvio padrão);
vi. De modo a definir um valor percentual que representasse toda a faixa de valores, dividiu-se o valor obtido na etapa anterior (v) pelo maior valor da faixa de valores. Este resultado representa o maior erro médio esperado dentro da faixa de valores em avaliação;
vii. Reaplicação das etapas (i) a (vi) a todos os parâmetros.

Para definição das faixas de valores e dos limites permissíveis, foi avaliado em conjunto o limite estabelecido no CONAMA 357/2005 para rios de classe 2, como é o caso do Rio Doce.

RESULTADOS OBTIDOS

Avaliando os resultados, verificou-se um comportamento similar entre as estações e, a partir de uma análise em conjunto, foram definidos valores de erros admissíveis, em percentagem, para os diferentes parâmetros e faixas de valores avaliadas. Essa análise baseou-se em uma avaliação manual dos resultados para cada faixa de valor dos parâmetros, e identificação de comportamento similar.

De modo a apresentar, na prática, a representatividade da metodologia sugerida, apresenta-se um exemplo aplicado aos dados obtidos a partir das visitas semanais às estações da Fundação Renova para manutenção e verificação de calibração dos sensores. A Tabela 3 apresenta exemplo de medições associadas aos valores de erro absoluto calculados para estação com medição de turbidez. A aplicação da metodologia proposta foi realizada ao parâmetro de turbidez, como segue (TRIOLA, 2008):

i. Definição de faixas de valores. Para fins deste exemplo prático, apresentou-se a faixa de valores de 0 a 25 UNT;
ii. Calcularam-se os erros absolutos entre os valores medidos pela sonda padrão e sonda de campo;
iii. Estimou-se a média (m) e o desvio padrão (dp) dos erros absolutos (diferença absoluta);
iv. Calculou-se o valor de média mais desvio padrão dos erros absolutos (m+dp);
v. Calculou-se o erro percentual, dividindo-se o valor estimado em (m+dp) pelo valor máximo da faixa de valores avaliada.

Tabela 3. Erro absoluto calculado de turbidez para uma estação exemplo.

Série de valores da faixa 0 a 25 NTU – Parâmetro de turbidez				
Sonda Padrão	**Sonda de Campo**	**%**	**Resultado**	**Diferença absoluta**
18,72	19,31	3%	Ok	0,59
12,66	12,7	0%	Ok	0,04
10,15	10,93	8%	Ok	0,78
11,35	11,7	3%	Ok	0,35
13,61	12,99	5%	Ok	0,62
24,12	23,24	4%	Ok	0,88
17,85	10,32	42%	Reprovado	7,53
17,53	18,78	7%	Ok	1,25
19,92	16,11	19%	Reprovado	3,81
21	22	5%	Ok	1,00
13,2	11,22	15%	Reprovado	1,98
8,04	15,42	92%	Reprovado	7,38
15	12	20%	Reprovado	3,00
12,25	11,11	9%	Ok	1,14
13,03	13,45	3%	Ok	0,42
13,67	9,84	28%	Reprovado	3,83
9,01	8,37	7%	Ok	0,64
Média (m)				2,07
Desvio padrão (dp)				2,33
m+dp				4,40
(m+dp)/Valor máximo da faixa				18%

Após a obtenção dos erros (%) para cada faixa de valor de cada parâmetro, foram analisadas as estações em conjunto. Essa análise baseou-se em uma avaliação manual dos resultados para cada faixa de valor dos parâmetros, e identificação de comportamento similar. A análise verificou os valores de erro e desvio padrão apresentados para cada parâmetro, em cada uma das estações estudadas. Pôde-se, portanto, verificar valores médios de erro apresentados entre todas as estações, para as diferentes faixas de valores dos parâmetros. Após análise de todas as estações em conjunto, definiu-se os desvios de calibração permissíveis para cada faixa de valor. Os desvios permissíveis calculados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Desvios máximos permissíveis.

Desvio máximo permissível			
Parâmetro	**Faixas**	**Limite CONAMA**	**Erro permitido (%)**
Turbidez (NTU)	0-50	100	30%
	50-100		15%
	>100		5%
Clorofila (µg/L)	0-5	30	50%
	5-10		25%
	10-20		15%
	20-30		5%
	>30		5%
Oxigênio Dissolvido (%)	0-100	~75%[1]	5%
Condutividade (µS/cm)	0-50	-[2]	10%
	50-100		10%
	>100		5%
pH	0-6	6 a 9	5%
	6-9		10%
	9-14		5%

[1]: Na resolução CONAMA 357/2005 é apresentado limite de 5 mg/L. Como os dados medidos pela Fundação Renova são apresentados em porcentagem, fez-se a transformação do valor considerando as características do local.
[2]: Não há limites estabelecidos na CONAMA, porém valores superiores a 100 µS/cm indicam ambientes impactados (OKANO, *et al.*, 2015).

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos por este estudo apresentam faixas de valores que, considerando suas magnitudes, possam ser mais assertivas em relação à necessidade de calibração dos equipamentos, em comparação a valores padrões encontrados na literatura. Observa-se, na Tabela 4, que os limites permissíveis para valores de magnitudes são maiores percentualmente, e que se respeitou os limites definidos na CONAMA 357/2005 para os parâmetros de qualidade da água.

Através dos resultados apresentados na Tabela 3, observa-se, por exemplo, que em magnitudes de turbidez de 0 a 25 NTU, os valores reprovados foram medições que apresentam maiores diferenças absolutas em relação aos valores obtidos pela sonda padrão. Casos como este podem ser ocasionados por uma sonda descalibrada ou a ocorrência de alguma sujeira e/ou incrustação.

Portanto, a aplicação das faixas definidas na Tabela 4 poderá auxiliar na assertividade de definir a necessidade de correção nos instrumentos de medição, podendo resultar em um menor número de calibrações desnecessárias, maior clareza na decisão de troca de equipamentos e menor interrupção na série de dados observados, sem prejuízo na qualidade dos dados coletados. Isto ocorre pelo fato de medições que apresentam maior diferença percentual (entre sonda padrão e de campo), mas com baixa diferença absoluta, poderiam estar aprovadas, sem necessidade de trocas ou manutenções.

CONCLUSÕES

Entidades conhecidas mundialmente como a USGS definem e sugerem padrões e limites para calibração e ajuste dos equipamentos, além de procedimentos que devem ser seguidos. Em adição, podem ser utilizados como critérios de calibração os limites de exatidão designados pelo fabricante das sondas de medição, valores comumente fixos. A análise destes limites indica restrição aos erros admissíveis, principalmente considerando baixas faixas de valores, promovendo uma frequente necessidade de calibração dos equipamentos. Isso acontece porque:

- Para magnitudes baixas é comum o valor estar inserido na faixa de sensibilidade do equipamento;
- Para altas magnitudes, um limite fixo pode incorrer em avaliações equivocadas em relação a recalibração ou troca de equipamentos;

- Variabilidade do comportamento das variáveis no rio, de acordo com o escoamento.

Baseando-se em dados medidos pelas estações automáticas da Fundação Renova, este artigo propôs uma metodologia de estimativa de erro máximo admissível para diferentes faixas de valores.

A metodologia proposta consistiu em um material que auxilie a equipe de técnicos da Fundação Renova na avaliação de calibração dos equipamentos e da verificação da necessidade de troca do equipamento de medição em campo. A avaliação através de faixas de magnitude permite a análise de desvio entre os dados (padrão e observado) de forma mais assertiva. Isso é importante para evitar a interrupção da obtenção dos dados por falha no equipamento ou por medições errôneas.

Estes limites foram definidos nesse estudo levando em consideração diferentes faixas de magnitude para os diferentes parâmetros de qualidade medidos. Para isso, foram utilizados dados medidos pelas próprias estações nos cursos d'água da bacia do rio Doce. Recomenda-se que, para a aplicação da metodologia descrita neste estudo em outras regiões, sejam avaliadas as condições locais, particularidades e influências referentes à área de interesse.

Ressalta-se que, embora estabelecidos os critérios de calibração de equipamentos de medição, seu desempenho será favorável desde que diversas outras fontes de incertezas sejam reduzidas, dentre as quais se incluem: a limpeza adequada e manutenção dos equipamentos e sensores; uso de soluções padrão para calibração e transporte; além do manuseio, posicionamento e instalação correta dos equipamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BASSO, E. R.; CARVALHO, S. L. Avaliação da qualidade da água em duas represas e uma lagoa no município de Ilha Solteira - SP. Holos Environment, v.7, n.1, p.16-29, 2007.
2. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). 3ª edição. Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012. 94 p. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2022.
3. OKANO, O., BUGALHO, N. R., FILHO, E. T., SANTOS, C. R., NETO, A. S., & COSTA., A. C. (2015). *Qualidade das Águas Superficiais no Estado de São Paulo - Parte 1 Águas Doces, Apêndice D, CETESB*. São Paulo.
4. QUEIROZ, M. M. F. et al. Influência do uso do solo na qualidade da água de uma microbacia hidrográfica rural. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v.5, n.4, p. 200-210, 2010.
5. TRIOLA, M. F. (2008). Introdução à Estatística - Décima edição. Rio de Janeiro: LTC.
6. WAGNER, R., BOULGER, R., Jr., OBLINGER, C., & SMITH, B. (2006). *Guidelines and Standard Procedures for Continuous Water-Quality Monitors: Station Operation*. Reston, Virginia.
7. WOSIACK, A. C., GUIMARÃES, T. S., FERNANDEZ, A. P., HASTENREITER, F. S., BRITO, E., SARTORI, G., . . . SORRANA, M. (2020). *PROGRAMA DE MONITORAMENTO QUALI-QUANTITATIVO SISTEMÁTICO DE ÁGUA E SEDIMENTOS - PMQQS. Revisão Bi-anual do PMQQS.*
8. YSI. (2019). Manual de usuario de EXO. *PLATAFORMA AVANZADA DE ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE AGUA.*