

ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL:

RECURSOS HÍDRICOS & TRATAMENTO DE ÁGUA

3

CLEISEANO EMANUEL DA SILVA PANIAGUA
(ORGANIZADOR)

ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL:

RECURSOS HÍDRICOS & TRATAMENTO DE ÁGUA

3

CLEISEANO EMANUEL DA SILVA PANIAGUA
(ORGANIZADOR)

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de
Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena

Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof^o Dr^a Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Prof^o Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Prof^o Dr^a Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof^o Dr^a Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof^o Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof^o Dr^a Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Engenharia sanitária e ambiental: recursos hídricos e tratamento de água 3

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Flávia Roberta Barão
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia sanitária e ambiental: recursos hídricos e tratamento de água 3 / Organizador Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0728-7

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.287220911>

1. Engenharia sanitária e ambiental. I. Paniagua, Cleiseano Emanuel da Silva (Organizador). II. Título.

CDD 628

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

O e-book: “Engenharia sanitária e ambiental: Recursos hídricos e tratamento de água 3” é constituído por cinco capítulos de livro que tratam da disponibilidade, qualidade e principais uso de recursos hídricos para fins potáveis ou não por todos os segmentos da sociedade.

O primeiro capítulo apresenta um estudo no qual se discute a importância do monitoramento constante em relação à segurança de barragens para armazenamento de rejeitos provenientes de atividades de mineração e/ou recursos hídricos, bem como a descrição de todas as legislações nacionais existentes e vigentes no território brasileiro. O capítulo 2 se propôs a apresentar um estudo de comparação de cálculos de vazões por meio do uso do Perfilador Acústico de Corrente por efeito Doppler (ADCP) em modo estático e o método de máxima entropia M em rios brasileiros monitorados pela Rede Hidrometeorológica Nacional – RHN presentes no estado da Bahia e Sergipe.

O terceiro capítulo avaliou a importância da captação de água de chuva, bem como a sua utilização para reduzir à necessidade básica de populações que não possuem acesso a água para fins potáveis ou não, bem como a redução de etapas de tratamento de água que geraria economia para a população beneficiada. O capítulo 4 analisou os diferentes impactos provenientes do Projeto de Integração do rio São Francisco (PISF) em relação ao canal Acauã-Araçagi, bem como estimar as tarifas de água a ser cobrada pela população beneficiária deste adutor com vazão máxima de 10 m³/s e uma extensão de 112 km, utilizando-se testes simulatórios com o ModSIM P32.

Por fim, o quinto capítulo apresenta uma proposta de utilização da argila como adsorvente para a forma mais tóxica do arsênio presente em concentrações traços e/ou ultra-traços em diferentes compartimentos aquáticos a partir da aplicação de um dispositivo de extração miniaturizado em ponteira descartável.

Nesta perspectiva, a Atena Editora vem trabalhando de forma a estimular e incentivar cada vez mais pesquisadores do Brasil e de outros países a publicarem seus trabalhos com garantia de qualidade e excelência em forma de livros, capítulos de livros e artigos científicos.

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

CAPÍTULO 1	1
ÍNDICE SUSTENTÁVEL AMBIENTAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS - ISASB	
Maria Bernardete Guimarães	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2872209111	
CAPÍTULO 2	13
PARÂMETRO M DE ENTROPIA PARA DISTRIBUIÇÕES DE VELOCIDADES EM RIOS DO NORDESTE BRASILEIRO	
George Rodrigues de Sousa Araújo	
André Luiz Andrade Simões	
Rodrigo de Melo Porto	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2872209112	
CAPÍTULO 3	31
APROVEITAMENTO DAS ÁGUAS METEÓRICAS COMO CONTRIBUIÇÃO PARA A UNIVERSALIZAÇÃO DO ACESSO À ÁGUA POTÁVEL E A RESILIÊNCIA AOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	
Gabriela Cadete Souza	
Herlane Costa Calheiros	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2872209113	
CAPÍTULO 4	38
GESTÃO DAS ÁGUAS TRANSPOSTAS PELO PROJETO SÃO FRANCISCO - PISF/ EIXO LESTE: IMPACTOS SOBRE A DISPONIBILIDADE HÍDRICA E ESTIMATIVAS DAS TARIFAS DE ÁGUA PARA O CANAL ACAUÃ-ARAÇAGI, LOCALIZADO NO BAIXO CURSO DO RIO PARAÍBA	
Cícero Aurélio Grangeiro Lima	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2872209114	
CAPÍTULO 5	51
USO DE UM DISPOSITIVO MINIATURIZADO PARA REMOÇÃO DE ARSÊNIO EM MEIO AQUOSO EMPREGANDO ARGILA EXPANDIDA COMO ADSORVENTE DE EXTRAÇÃO	
Luciano Alves da Silva	
Bruno Elias dos Santos Costa	
Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua	
Nivia Maria Melo Coelho	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2872209115	
SOBRE O ORGANIZADOR	65
ÍNDICE REMISSIVO	66

ÍNDICE SUSTENTÁVEL AMBIENTAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS - ISASB

Data de aceite: 01/11/2022

Maria Bernardete Guimarães

Analista de Meio Ambiente e Recursos
hídricos do IEMA-ES-Brasil; Engenheira
Ambiental, M.Sc. Eng.^a Ambiental

PALAVRAS-CHAVE: Índice Segurança
Barragens; Acidentes com Barragens;
Índice Sustentável.

INTRODUÇÃO

A lei 12.334 de 2010 estabeleceu que a Política Nacional de Segurança de Barragens, alterada pela Lei nº 14.066 de 2020, aplica-se a barragens destinadas a: acumulação de água para quaisquer usos; à disposição temporária de rejeitos; à acumulação de resíduos industriais, que apresentem pelo menos uma das seguintes características: altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros (redação da lei 14.066 de 2020); capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000

metros cúbicos; reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis (ABNT NBR 10004 de 2004-Classificação de Resíduos Sólidos); categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 7º desta Lei (redação dada pela Lei nº 14.066 de 2020); categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador, conforme definido no art. 7º desta Lei (incluído na Lei 14.066 de 2020). NEVES (2018) mostra as legislações comentadas sobre Segurança de Barragens.

Barragem é qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso de água permanente ou temporário, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas (BRASIL, 2020). São instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens-PNSB o sistema de classificação

de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado; o plano de segurança de barragens; o sistema nacional de informações sobre segurança de barragens- SNISB; o sistema nacional de informação sobre Meio Ambiente- SINIMA; o cadastro técnico federal de atividades e instrumentos de defesa ambiental; o cadastro técnico federal de atividades potencialmente poluidoras ou utilizadoras de recursos ambientais; o relatório de segurança de barragens (BRASIL, 2010). O dano potencial associado à barragem é o dano que pode ocorrer devido a rompimentos, vazamentos, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independente da sua probabilidade de ocorrência a ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e os impactos sociais, econômicos e ambientais (BRASIL, 2020). O Plano de Segurança de Barragens-PSB é um instrumento da PNSB- Política Nacional de Segurança de Barragens, cujo objetivo principal é auxiliar o empreendedor na garantia de padrões de segurança da Barragem reduzindo os riscos de acidentes e suas consequências, incluindo, quando aplicável, o Plano de Ação de Emergência-PAE.

O Plano também auxilia as entidades fiscalizadoras de segurança de barragem na verificação do cumprimento das normas concernentes ao tema. Deve conter dados técnicos da barragem, de construção, operação, manutenção e panorama do estado atual da segurança por meio das inspeções realizadas, devendo principalmente, servir como uma ferramenta de planejamento de gestão da segurança da Barragem.

A nova legislação, Lei nº 14.006 de 2020 traz como alterações à lei 12,334 de 2010 os seguintes itens: A PNSB deverá estabelecer programa de educação ambiental e de comunicação sobre segurança de barragem, com o objetivo de conscientizar a sociedade da importância da segurança de barragens e de desenvolver a cultura de prevenção a acidentes e desastres, que deverá contemplar as seguintes medidas: fica proibida a construção ou o alteamento de barragem de mineração pelo método a montante (entende-se por alteamento a montante a metodologia construtiva de barragem em que os diques de contenção se apoiam sobre seu próprio rejeito ou sedimento previamente lançado depositado; o empreendedor deve concluir a descaracterização da barragem construída ou alterada pelo método a montante até 25 de fevereiro de 2022, considerada a solução técnica exigida pela entidade que regula e fiscaliza a atividade minerária e pela autoridade licenciadora do sistema nacional do meio ambiente (SISNAMA). O artigo 18 veta a implantação de barragem de mineração cujos estudos de cenários de ruptura identificaram a existência de comunidade na ZAS. Na figura 1 a Gestão de Riscos, de acordo com a ISO 31.000 (ABNT,2011).

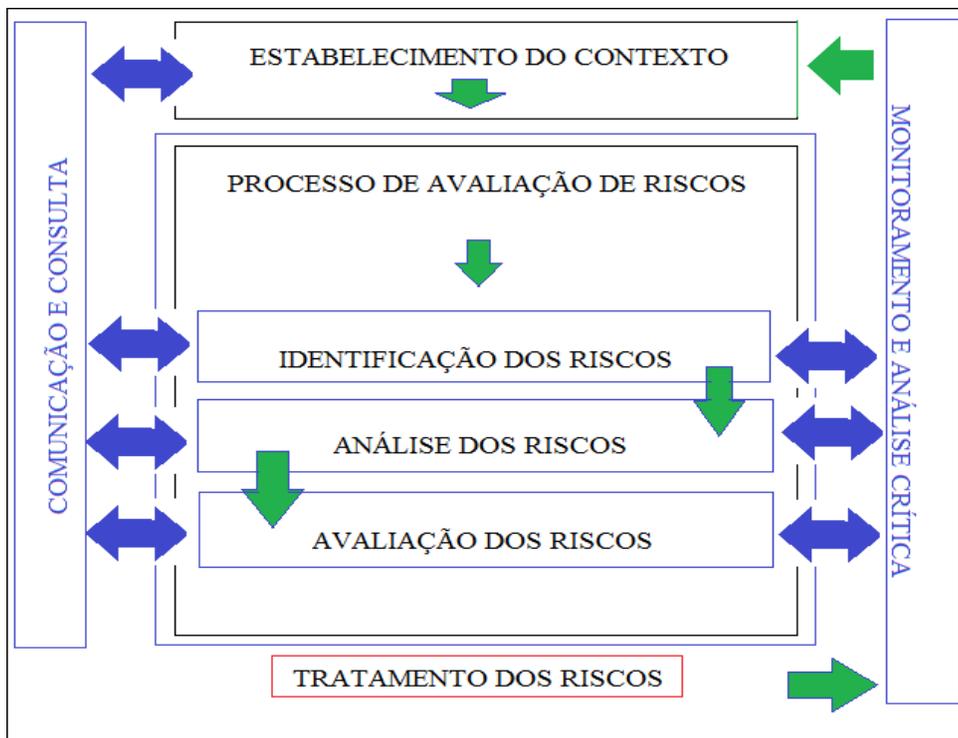


Figura 1- ABNT (2011)- ISO 31.000 Gestão de Riscos
 FONTE: ABNT (2011) EDITADO PELA AUTORA

Quanto à fiscalização a Lei 14.006 de 2020 diz que os órgãos fiscalizadores devem criar sistema de credenciamento de pessoas físicas e jurídicas habilitadas a atestar a segurança da barragem, incluída a certificação, na forma do regulamento. O laudo técnico referente às causas do rompimento de barragem deve ser elaborado por peritos independentes, às expensas do empreendedor, em coordenação do órgão fiscalizador. Também diz que o poder público municipal deve adotar as medidas necessárias para impedir o parcelamento, o uso e a ocupação do solo urbano na ZAS- Zona de Altosalvamento. No caso de barragem ou instalação em operação em que seja identificada comunidade na ZAS, deverá ser feita a descaracterização da estrutura, ou reassentamento da população e o resgate do patrimônio cultural, ou obras de reforço que garantam a estabilidade efetiva da estrutura, em decisão do poder público, ouvido o empreendedor e consideradas a anterioridade da barragem em relação à ocupação e a viabilidade técnico-financeira das alternativas.

Na análise da segurança de barragens deve-se considerar, em atendimento a resolução nº 143/2012 do CNRH- conselho nacional de recursos hídricos: existência de documentação de projeto, incluindo o projeto “*as-built*”; estrutura organizacional e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança da barragem; existência de planos de ações de emergência; procedimentos de inspeções de segurança e

monitoramento; relatórios de inspeção de segurança com análises e interpretação e regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem; existência de população à jusante e potencial de perda de vidas humanas; existência de instalações de infraestrutura ou serviços e de equipamentos de serviços públicos essenciais. O tipo de barramento também é considerado importante, pois cada tipo de barragem possui sua susceptibilidade particular a determinadas falhas; em barragens de terra o maior problema concentra-se na possibilidade de ocorrência de erosão interna por *piping*, descrito por Ladeira (2007) como uma erosão interna regressiva (de jusante para montante). Nas barragens de concreto o mecanismo de falha pode se dar por meio de fissuras no concreto, na grande maioria das vezes resultado da má cura do concreto. Em obras que utilizam grandes volumes de concreto podem ocorrer fissurações ou trincas na estrutura devido a tensões no concreto geradas pelo gradiente de temperatura durante o processo de cura.

O ISB- Índice de Segurança de Barragens considera 29 critérios para seu cálculo, segundo Zuffo (2005) os parâmetros considerados no seu cálculo são: altura da barragem, comprimento, tipo de barragem (material), tipo de vertedor, período de retorno da vazão de projeto dos vertedores, idade da barragem, presença de percolação/vazamento, presença de deformações e recalques, deterioração dos taludes, conservação das estruturas vertedoras, evidências de erosão a jusante.

A proposta desse trabalho é propor o ISASB, Índice de Sustentabilidade Ambiental de Segurança de Barragens, um índice que seja analisado ao lado do ISB. E com a análise do ISB e do ISASB tem-se um critério para analisar a estabilidade do barramento, considerando também a questão ambiental e a bacia onde o barramento está incluído. Considerando os desastres ocorridos no Brasil e no mundo vários episódios e problemas são devidos a aspectos ambientais, como fortes chuvas, chuvas longas à montante do barramento. Assim um índice que considere tais parâmetros é importante.

METODOLOGIA

O ISB- Índice de Segurança de Barragens é dado pela fórmula dada na equação 1:

$$ISB = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

Onde: q_i : nota do i -ésimo critério, um número entre 1 e 100, obtido na respectiva curva da função de valor, em função do conceito obtido no critério; w_i : peso correspondente ao i -ésimo critério, um número entre 0 e 1, atribuído em função da sua importância para a conformação global de segurança. Os pesos (w_i) padronizados foram estabelecidos a partir de opiniões técnicas de diversos profissionais da área, obtidas a partir da resposta do questionário Aguiar et al. (2015),

O índice de Sustentabilidade Ambiental de Segurança de Barragem- ISASB, proposto neste trabalho, considera critérios ambientais para seu cálculo e a utilização deste

índice leva em consideração fatores ambientais da bacia onde a barragem está incluída.

A segurança de barragens é importante considerando os imensos desastres que já ocorreram no mundo e no Brasil. Entre estes desastres temos os abaixo relacionados, a maioria dos pesquisados com perdas materiais e humanas, tabela 1 e figura 2:

ANO	LOCAL	NOME	MORTOS/DESABRIGADOS/ CONSEQUÊNCIAS	CAUSA
1864	Inglaterra	Barragem DaleDyke	250 mortos	Fissura-percolação
1889	USA- Pensilvânia- Johnstown	Barragem SouthFork Rio Little Conemaugh	2.209 mortos. ondas de 12 metros chegaram aJohnstown, situada a 50 km da barragem, em 10minutos.	Após chuvas intensasFoi o maior desastre da história. 20 milhões toneladas de água atingiram a cidade. (= toda a água do rio mississipi)
1923	Itália- Bérgamo	Barragem de Gleno	4,5 milhões de lama atingiram as cidades	Físicas-Pressão Alterações feitas na Barragem
1928	USA- Califónia	Barragem SaintFrancis	450 mortos 47 milhões litros de água inundouo Vale de Santa Clarita	Instabilidade Geológica do Cânion. Estrutura “gravidade arqueada”. Modificou-se a altura (mais 3 metros) para aumentar a capacidade., sem compensação na largura.
1959	França- Frejus	Barragem Malpasset	423 mortos 50 milhões de metros cúbicos de água a70 km/ hora.	Separação da rocha da sua fundação, pela elevação da água na rocha de fundação.
1960	BRASIL- Ceará	Barragem de Orós	1.000 mortos.	Durante a construção. 620 de comprimento e 54metros de altura. Fortes chuvas causaram o rompimento antes da conclusão.
1975	China	Bangiro e Shimantan	26 mil mortos 6 milhões casas destruídas 145 mortos fome e epidemias 1,7 bilhões de metros cúbicos de água perdidos.	Período chuvoso de 24 hs e má construção
1976	USA-Idah- Teton	Barragem de Teton	Barragem de Terra, com 123 m e 356km ³ , gerou onda com 66.000 m ³ /s. 11 vítimas e várias cidades.	Ruptura por erosão laminar regressiva (piping).
1979	Índia-Morbi	Machchu-2	25 mil mortos atingiu a cidade de Morbi, a 5 km darepresa.	Desmanchou-se após tempestade de 20 min com 9 metros de altura

1980	Espanha-Andaluzia	Aznalcollar	Avalanche de zinco, cobre, cádmio, sulfetos chegou aos rios Agro e Guadiamar. 40 km de material tóxico atingiu o Parque Nacional de Doñana, Patrimônio da humanidade da UNESCO. Contaminação do ambiente.	-
1985	Itália-Stava	Barragem Rio Stava	268 mortos 180 mil metros cúbicos de areia, água e lama varreram a cidade de Stava.	Entupimento dos dutos de drenagem, com sedimentos, a água infiltrou-se no solo da represa.
1992	Srilanka	Barragem de Kantale	180 mortos 8 mil afetados	Ruptura da parede de contenção pelo excesso de tráfego pesado.
2000	USA	Martin County Barragem da Mineradora de Carvão Vegetal do sul dos USA	2 bilhões de lama de arsênico e mercúrio atingem os rios Tug Fork, Big Sandy e Ohio. Dissimulou toda a vida aquática em poucos minutos.	.
2008	Índia-Nepal-fronteira	Barragem Koshi-Nepal	3 milhões desabrigados Centenas de mortos nos dois países. Áreas de agricultura soterradas	Falta manutenção
2010	Hungria-Kolontar	Barragem de Resíduos da Bauxita-Mineradora Mal, lama vermelha.	1 milhão de metros cúbicos atingem as cidades de Kolontar e Devecser. 4 mortos. Vários danos ambientais. Ondas de 3,5 metros, barragem de 300 metros de altura.	-
2015	BRASIL-MG-Mariana	Barragem de Fundão-Mineradora Samarco, Vale e BHP Biliton	62 milhões metros cúbicos de lama tóxica, atingem Bento Rodrigues em Minas Gerais. 19 mortes. Várias perdas materiais. Perdas com Economia.	Processo Construtivo da Barragem.
2019	BRASIL-MG-Brumadinho	Barragem de rejeitos de mineração da Vale. Barragem B1- córrego do feijão.	12 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério. 270 mortos e 11 desaparecidos após 1 ano do desastre.	A Barragem rompeu.

Tabela 1- Desastres com Barragens

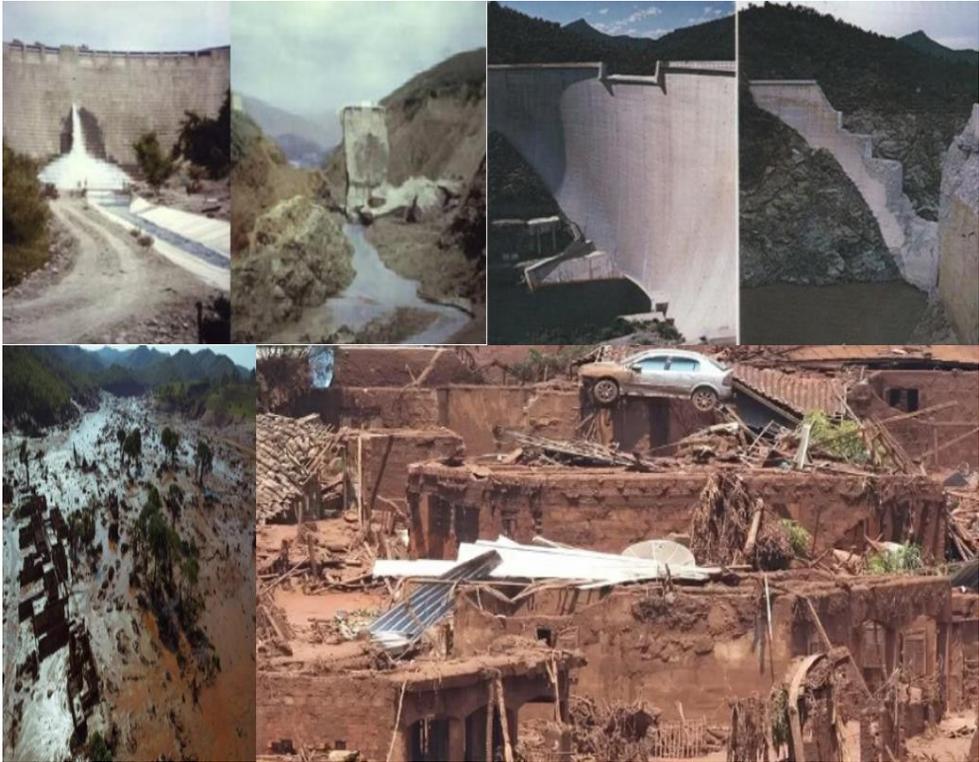


Figura 2-Barragem de Saint Francis-USA. Antes e após a ruptura, em 1928; Barragem de Malpasset-França, antes e após a ruptura, 1959; e Distrito de Bento Rodrigues- Mariana, em Minas Gerais- Rompimento da Barragem de Fundão, em 2015. Fotos: Google(2021).

As barragens são classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) (BRASIL, 2020).

A classificação por categoria de risco em alto risco, médio e baixo risco será feita em função das características técnicas, dos métodos construtivos, do estado de conservação e da idade do empreendimento e do atendimento ao plano de segurança de barragens, bem como de outros critérios definidos pelo órgão fiscalizador (BRASIL, 2020).

A classificação por dano potencial associado à barragem em alto, médio e baixo risco será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem. O órgão fiscalizador deverá exigir do empreendedor a adoção de medidas que levem à redução da categoria de risco do barramento.

São instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens (BRASIL, 2010): O sistema de Classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado; O Plano de Segurança de Barragem, incluindo o PAE; o Sistema nacional de Informações sobre segurança de barragens (SNISB); o sistema nacional de informações

em meio ambiente (SINIMA); o cadastro técnico federal de atividades e instrumentos de defesa ambiental; o cadastro técnico federal de atividades potencialmente poluidoras ou utilizadoras de recursos ambientais; o relatório de segurança de barragens; o sistema nacional de informações sobre recursos hídricos (SNIRH); o monitoramento das barragens e dos recursos hídricos em sua área de influência e os guias de boas práticas em segurança de barragens, estes três últimos foram acrescentados pela Lei 14.006 de 2020 (BRASIL, 2020).

A elaboração do PAE é obrigatória para todas as barragens classificadas como médio e alto dano potencial associado alto risco, a critério do órgão fiscalizador (BRASIL,2020). Mas independentemente da classificação quanto ao dano potencial ou ao risco, a elaboração do PAE é obrigatório para todas as barragens destinadas à acumulação ou a disposição de rejeitos de mineração (incluído na Lei 14.006 de 2020) BRASIL (2020).

RESULTADOS

A Matriz de categoria de risco e dano potencial associado para barragens, está na tabela 2:

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	A	C	D
BAIXO	A	C	E

Tabela 2- Matriz risco e dano potencial associado (ANA, 2012)

O relatório de segurança de barragens da ANA (2017) mostra que são mais de 7 acidentes com barragens por ano no Brasil. Em 7 anos foram 52 acidentes registrados pela ANA- Agência Nacional de Águas. A tabela 3 mostra o registro anual desde 2011:

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
ACIDENTE	4	1	-	5	4	6	4
INCIDENTE	4	6	4	6	5	17	10

Tabela 3- Acidentes e Incidentes com Barragens de 2011 a 2017 (ANA,2017)

Brunner (2014) apresenta uma lista de eventos ligados diretamente ao rompimento de Barragens: cheias, falhas de fundação, *piping*, falha na operação das comportas, problemas estruturais, escorregamento, abalos sísmicos, ruptura de uma barragem a montante, esvaziamento rápido do reservatório, sabotagem e remoção planejada do barramento.

Para evitar que eventos como estes ocorram o PAE- Plano de Ação de Emergência estabelecerá as ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem em caso

de situação de emergência, bem como identificará os agentes a serem notificados dessa ocorrência.

Aguiar et al.(2015) adicionou os seguintes parâmetros ao cálculo do ISB: o volume do reservatório, a vazão de projetos dos vertedores; a conservação das estruturas de captação, a instrumentação e monitoramento dos registros; a existência de barragens em série no mesmo curso, de água (efeito cascata), tipo de turbina hidráulica, tipo de comporta do vertedor, maquinário de, operação das comportas, nível de automação e capacidade instalada ou em operação.

Aguiar et al. (2015) sugeriu a inclusão de outros parâmetros ao ISB : tipo de fundação, tipo de uso do barramento, alterações na bacia hidrográfica à frente às ações antrópicas, taxa de assoreamento do lago, existência de eclusas e onda de cheia a jusante. Todos estes não consideram a variável ambiental, que influencia muito a segurança das barragens, como parâmetros que consideram as áreas verdes ao redor dos reservatórios e a intensidade das chuvas à montante do barramento, que causam alterações na vazão do rio e carreamento de sedimentos que influenciam a qualidade das águas que chegam aos reservatórios, assim como o assoreamento existente no reservatório e que diminui a área útil deste.

Assim este trabalho propõe a consideração dos seguintes parâmetros no cálculo deste novo índice, Índice de Sustentabilidade Ambiental de Segurança da Barragem- ISASB:

Kas=O assoreamento existente na área do barramento: volume assoreado/volume morto da barragem, km³/km³;

Kav=A quantidade de área verde ao redor do barramento: km/km²;

Kum=O uso múltiplo da barragem: quantidade de usuários/km²;

Kabd=Área degradada da Bacia de Drenagem: km²/km²;

Kacvb= área de cobertura vegetal na bacia de drenagem: km²/km²;

Kic= intensidade das chuvas na área da bacia, à montante da barragem: mm/hora.

$$\mathbf{ISASB} = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (2)$$

Onde: qi: nota do i-ésimo critério, um número entre 1 e 100, obtido na respectiva curva da função de valor, em função do conceito obtido no critério; wi: peso correspondente ao i-ésimo critério, um número entre 0 e 1, atribuído em função da sua importância para a conformação global de segurança. Os pesos (wi) padronizados serão estabelecidos a partir de opiniões técnicas de diversos profissionais da área. Os qi são critérios de 1 a 100, relacionados aos parâmetros: Kas, Kav, Kum, Kabd, Kacvb e Kic. Wi são os pesos atribuídos a estes critérios.

O Kas=O assoreamento existente na área do barramento: volume assoreado/volume morto da barragem, km³/km³ é um parâmetro que permitirá avaliar a situação da barragem quanto ao assoreamento existente e como compromete a estrutura física da barragem; o

parâmetro K_{av} =a quantidade de área verde ao redor do barramento: km^2/km^2 permiti avaliar como a barragem está sujeita a desmoronamentos de áreas próximas a ela, sendo que as áreas verdes permitem proteção do solo da área do entorno e evitam assoreamento do reservatório; o K_{um} =O uso múltiplo da barragem: quantidade de usuários/ km^2 permite que seja analisada como é o aproveitamento e quantos dependem da barragem e contribuem para diminuir o seu nível, diminuindo os riscos de inundações; o K_{abd} =Área degradada da Bacia de Drenagem: km^2/km^2 permite avaliar como está a área da bacia de drenagem e a situação de erosão e transporte para o reservatório provocando assoreamento; o parâmetro K_{acvb} = área de cobertura vegetal na bacia de drenagem: km^2/km^2 permite avaliar como está a proteção de toda a bacia, onde a barragem está incluída e não apenas ao redor desta, como prevê a legislação; o K_{ic} = intensidade das chuvas em 24 horas, na área da bacia, à montante da barragem: mm/hora , permite avaliar se a quantidade de água provoca inundações no reservatório, devido às variações do El Niño e da La Niña e outros fenômenos climáticos.

Assim a proposta é que o Índice de Segurança de Barragens Global seja a soma: ISB + ISASB. Considerando tanto os parâmetros físicos, estruturais da barragem (ISB) quanto os ambientais da bacia (ISASB), onde o barramento está inserido. Na figura 3 tem-se um exemplo de Barragem de abastecimento de água com cobertura vegetal protegida e com margens preservadas. A Água infiltra no solo devido a preservação da cobertura vegetal e florestal na Bacia e não provoca erosão e carregamento de partículas para a barragem, também tem-se a preservação da mata ciliar ao longo do rio e da barragem, ambos evitam o assoreamento desta. Existe um controle do uso e ocupação do solo próximo ao barramento o que reduz a interferência antrópica. A primeira barragem teve início em 1894, e foi concluída em 1918. Entre 1945 e 1950 outra barragem foi construída, com 30 a 50 metros de profundidade e fornece 20 milhões litros de água, sendo administrada pela CESAN, considerada em situação de estabilidade pela AGERH, Agência de Águas do ES (FRANÇA e COSTALONGA, 2013). Em 1965 virou reserva florestal e em 1991 Reserva Biológica, sendo as áreas ao redor desapropriadas em 1912, para a preservação da floresta. Assim o ISASB resulta em um bom índice.



Figura 3- Barragem Duas Bocas em Cariacica- Reserva Biológica Duas Bocas. (IEMA, 2021)

CONCLUSÕES

O Índice de Sustentabilidade Ambiental permite que os parâmetros ambientais sejam levados em consideração quando da análise dos riscos a desastres com barramentos, principalmente com núcleos urbanos situados à jusante destes.

Ações de reflorestamento e recuperação da cobertura vegetal ao redor destes barramentos possibilita ampliar a capacidade de armazenamento e resulta em índices de segurança melhores, pois contribuem para a infiltração de água no solo, a proteção do solo contra a erosão e o assoreamento do barramento.

Um desafio é criar critérios que considerem estes parâmetros no cálculo do ISASB (q_i e w_i), o que necessita da experiência dos especialistas da área e de pesquisas. Outro grande desafio é a Educação Ambiental das comunidades ao redor do Barramento e a Gestão Ambiental da bacia Hidrográfica onde ele está inserido. Uma sugestão é o trabalho com os Comitês de Bacia Hidrográfica e a ampliação da participação de usuários, poder público e sociedade civil. Outra sugestão é investir num moderno Sistema de Informações Georreferenciadas e disponíveis e numa rede de monitoramento eficiente.

REFERÊNCIAS

- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2011) ISO 31.000-*gestão de riscos*. Disponível:<<https://gestravp.files.wordpress.com/2013/06/iso31000-gestc3a3o-de-riscos.pdf>>. Acesso: janeiro de 2021.
- AGUIAR, D.P. de O.; FERREIRA, L.M. do C. F. Fais; GENOVEZ, A.I. B.; DALFRÉ, J. G. F. (2015) *Contribuição ao estudo do Índice de Segurança de Barragens- ISB* Revista Brasileira de Recursos Hídricos online ISSN 2318-0331, vol 20, nº 2, P. Alegre, abr./jun p.300-368. Disp.:<<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=157&SUMARIO=5061>> Acesso: janeiro de 2021.
- ANA-AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2011) *Resolução nº 742. Inspeções Regulares em Barragens*. Disp. em :<www.ana.gov.br>. Acesso: janeiro de 2021.
- ANA- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2012) *Resolução nº 091. Plano de Segurança de Barragens. PAFSB-Planos anuais de fiscalização segurança de barragens*. D.< www.ana.gov.br>. Acesso: janeiro de 2021.
- ANA- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2017) *Relatório de Segurança de Barragens*. Disp.: < www.ana.gov.br> Acesso: janeiro de 2021.
- BRASIL(2010) Lei Federal nº 12.334 *Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei n o 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4 o da Lei n o 9.984, de 17 de julho de 2000*. Disp. :<<https://www.ceivap.org.br/barragem/lei-12334-2010.pdf>> Acesso: janeiro de 2021.

BRASIL (2020) Lei Federal 14.066. *Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (código. mineração).*Disp.:<<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=402126>> Acesso: janeiro de 2021.

BRUNNER, G. (2014) *Using HEC-RAS for Dam Break Studies*, TD-39-U.S. Army Corps of Engineers. Davis, CA. Disponível: <<https://pdf4pro.com/view/using-hec-ras-for-dam-break-studies-5bb280.html>> Acesso: janeiro de 2021.

IEMA – INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS (2021) *Reserva Biológica de Duas Bocas e Reservatório de Água para Abastecimento Público da CESAN- Cariacica*. Disp.:www.meioambiente.es.gov.br. Acesso: janeiro de 2021.

FRANÇA, B.; COSTALONGA, E. (2013) *Reserva Biológica de Duas Bocas preserva ecossistema de Mata Atlântica*. Disponível em: <https://www.cariacica.es.gov.br/noticias/13882/reserva-biologica-duas-bocas-preserva-ecossistema-de-mata-atlantica>. Acesso: janeiro de 2021.

NEVES, LUIZ P. (2018) *Segurança de Barragens. Legislação Fed. Brasileira em Segurança de Barragens*. Disp.: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/e-book-livre-legislacao-federal-brasileira-em-seguranca-de-barragens-autor-luiz-paniago-neves>> Acesso: janeiro de 2021.

PARÂMETRO M DE ENTROPIA PARA DISTRIBUIÇÕES DE VELOCIDADES EM RIOS DO NORDESTE BRASILEIRO

Data de aceite: 01/11/2022

George Rodrigues de Sousa Araújo

Serviço Geológico do Brasil, Recife, PE,
Brasil

André Luiz Andrade Simões

Universidade Federal da Bahia, Salvador,
BA, Brasil

Rodrigo de Melo Porto

Escola de Engenharia de São Carlos –
Universidade de São Paulo, São Carlos,
SP, Brasil

RESUMO: A Rede Hidrometeorológica Nacional - RHN monitora as vazões dos principais rios brasileiros para subsidiar o planejamento da utilização dos recursos hídricos em todo território nacional e utiliza muito frequentemente o equipamento denominado “Perfilador Acústico de Corrente por efeito Doppler” – ADCP em suas operações hidrométricas. O principal objetivo deste trabalho foi comparar as vazões calculadas empregando o ADCP em modo estático e o princípio da máxima entropia, com as vazões medidas pelo ADCP em modo dinâmico. foram realizadas medições de vazão em vinte estações

situadas no estado da Bahia em Sergipe. O intervalo de confiança do parâmetro de entropia M foi estimado valendo-se dos registros históricos de velocidades pontuais medidas com molinete hidrométrico e os demais parâmetros da metodologia alternativa proposta foram ajustados ao perfil de máxima velocidade pontual por regressão não linear. Os resultados evidenciaram que em 79,4% das medições, os valores calculados de vazão divergiram em até $\pm 10\%$ em relação aos medidos com o ADCP em modo dinâmico; o tempo médio de medição, em campo, decresceu 46,34%; ausência de limite físico na magnitude da vazão para aplicação da metodologia da máxima entropia no cálculo da descarga líquida em canais naturais.

PALAVRAS-CHAVE: Medição de vazão; Entropia; ADCP.

ABSTRACT: The National Hydrometeorological Network - RHN monitors the discharge of the main Brazilian rivers to subsidize the planning of the use of water resources throughout the national territory and very often uses the equipment called “Acoustic Doppler Current Profile” -

ADCP in its hydrometric operations. The main objective of this work was to compare the calculated discharge rates using ADCP in static mode and the principle of maximum entropy with the discharge measured by ADCP in dynamic mode. 34 discharges were measured in the interval 6.138 m³/s - 1,326.8 m³/s, distributed in 20 RHN stations in the state of Bahia and 1 in Sergipe. The confidence interval of the entropy parameter M was estimated using the historical records of point velocities measured with an analog current meter, the other parameters of the proposed alternative methodology were adjusted to the profile of maximum point velocity by non-linear regression. The results showed that: in 79.4% of the measurements, the calculated values of flow diverged up to $\pm 10\%$ in relation to those measured with ADCP in dynamic mode; the mean measurement time, in the field, decreased by 46.34%; absence of physical limit on flow magnitude for application of the maximum entropy methodology in the calculation of discharge in rivers.

KEYWORDS: Discharge Measurement, Entropy, ADCP.

INTRODUCTION

Escoamentos turbulentos de fluidos newtonianos são tridimensionais, dependentes do tempo e formados por estruturas internas que compõem uma variedade de escalas, desde as grandes escalas até as microescalas de Kolmogorov. A sua representação física – matemática está consolidada desde 1845, quando Stokes publicou o seu artigo com a versão final das equações hoje conhecidas como equações de Navier-Stokes. Para a turbulência, essas equações em conjunto com a equação de conservação de massa não possuem solução analítica conhecida, condição que estimulou a proposição de modelos para a turbulência, cujos níveis vão desde a modelagem direta das covariâncias que compõem o tensor de Reynolds às representações mais restritas apenas às distribuições de velocidades.

Os modelos de distribuição de velocidades em escoamentos em condutos forçados e condutos livres têm origem em análise estatística de dados experimentais, considerações fenomenológicas e análise dimensional, a exemplo das equações logarítmicas e leis de potência. A formulação logarítmica, amplamente utilizada nos estudos de Prandtl, von Kàrmàn e Nikuradse representa uma importante contribuição ao tema, mas não descreve a distribuição próxima a parede. Nesse contexto, Chiu (1987) propôs uma distribuição sem esta restrição, tendo como base a teoria da informação de Shannon (1948). O emprego da formulação proposta por Chiu (1987, 1988), assim como ocorre com os outros modelos, requer a determinação de um parâmetro de ajuste. O conhecimento desse parâmetro para uma determinada estação fluviométrica proporciona mais uma alternativa à determinação da vazão, além de conduzir a uma metodologia cujo tempo de medição é relativamente reduzido. O presente estudo teve como objetivo a determinação do referido parâmetro da formulação baseada na entropia da informação, para dados experimentais obtidos em 21 estações fluviométricas pertencentes à Rede Hidrometeorológica Nacional - RHN: 20 localizadas no estado da Bahia e 1 em Sergipe. Também foi objetivo deste trabalho o

cálculo da vazão com a formulação baseada na entropia e sua comparação com vazões medidas utilizando ADCP e a análise do tempo de execução de cada método, tendo em vista a proposição de um método alternativo de medição de vazão com tempo reduzido em relação ao convencional, baseado no uso do ADCP.

MATERIAL AND METHOD

A formulação empregada neste trabalho para determinação modelagem da distribuição de velocidades e cálculo de grandezas relacionadas foi apresentada por Chiu (1988). Sua dedução e aspectos conceituais podem também são discutidos em Moraes (2010), Araújo (2017) e Martins e Poletto (2017).

Em conformidade com Chiu (1991), sendo o eixo y a vertical onde se encontra o ponto de máxima velocidade de escoamento na seção, u_{\max} , a distribuição de velocidades é expressa por:

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left(1 + (e^M - 1) \frac{y}{D-h} e^{\left(1 - \frac{y}{D-h}\right)} \right) \quad (1)$$

em que, D é a altura de escoamento na seção transversal, h é a distância vertical desde a superfície livre até o ponto de máxima velocidade e M é o parâmetro de ajuste, cuja definição está trelada à velocidade máxima e a um multiplicador de Lagrange empregado na dedução.

Uma segunda formulação resultante do trabalho de Chiu (1988) empregada neste trabalho é a equação 2, que relaciona a velocidade média, a máxima e M. Esta equação é especialmente útil para determinação da vazão com o uso da velocidade média.

$$\frac{\bar{u}}{u_{\max}} = \frac{e^M}{(e^M - 1)} - \frac{1}{M} = \emptyset \quad (2)$$

Seleção das estações fluviométricas

Foram selecionadas para esta pesquisa 21 estações fluviométricas pertencentes à RHN: 20 localizadas no estado da Bahia e 1 em Sergipe. Estes postos fluviométricos foram selecionados por possuírem profundidade média compatível com a utilização do Perfilador Acústico de Corrente por efeito Doppler – ADCP nos períodos de vazões máximas e mínimas. As estações selecionadas estão elencadas na Figura 1 e na Tabela 1.

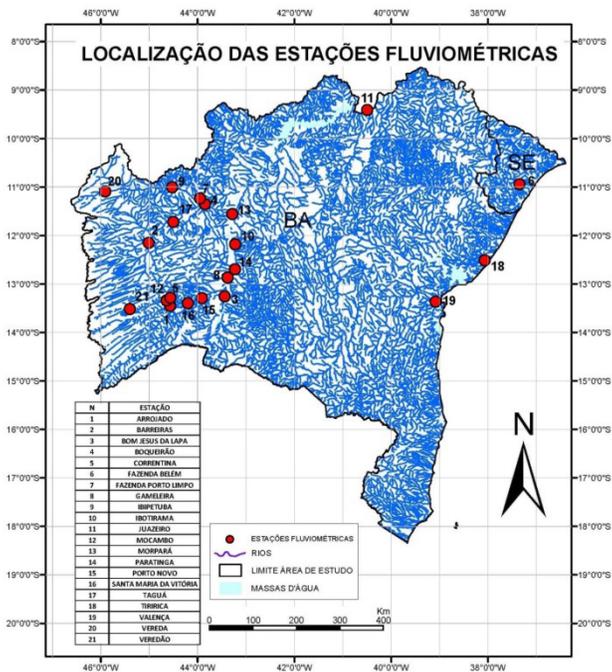


Figura 1. Localização das estações fluviométricas selecionadas para medição de vazão com ADCP, adaptado de Araújo (2017).

Estação	Nome	Rio	Drenagem (km ²)
45770000	Arrojado	Arrojado	5540
46550000	Barreiras	Grande	24400
45480000	Bom Jesus da Lapa	São Francisco	271000
46902000	Boqueirão	Grande	65900
45590000	Correntina	Correntina	3900
50191000	Fazenda Belém	Vaza Barris	15740
46870000	Fazenda Porto Limpo	Preto	22000
46035000	Gameleira	São Francisco	309000
46830000	Ibipetuba	Preto	17900
46150000	Ibotirama	São Francisco	323000
48020000	Juazeiro	São Francisco	510800
45740001	Mocambo	Do Meio	7950
46360000	Morpará	São Francisco	345000
46105000	Paratinga	São Francisco	314000
45960001	Porto Novo	Corrente	29700
45910001	Santa Maria da Vitória	Corrente	28200

46650000	Taguá	Grande	36000
50795000	Tiririca	Pojuca	4860
51795000	Valença	Una	1110
46780000	Vereda	Preto	1900
45580000	Veredão	Corrente	1472

Tabela 1. Estações selecionadas para pesquisa.

Intervalo de confiança de $\bar{\sigma}$ e M

Nas estações da RHN selecionadas para esta pesquisa, foram analisadas as velocidades pontuais, medidas com molinete hidrométrico, em formulários originais de medição de vazão a partir do ano 2001, digitalizados e disponíveis no Sistema de Visualização de Ficha de Campo da ANA, disponíveis em ANA (2016).

As etapas de cálculo para estimativa de M foram:

- Registro das velocidades média e máxima em todos os formulários de uma mesma estação, computando-se o valor de σ em cada medição de acordo com a Equação 2;
- Admitindo-se que os valores de σ tendem a seguir uma distribuição normal de probabilidades, determinou-se o intervalo de variação de σ com base no Intervalo de Confiança-IC (95%) sobre a média ($\bar{\sigma}$) em cada estação, de acordo com a expressão:

$$M(\bar{\sigma} - 1,96 * \frac{\sigma_{\sigma}}{\sqrt{n_{\sigma}}}) \leq M \leq M(\bar{\sigma} + 1,96 * \frac{\sigma_{\sigma}}{\sqrt{n_{\sigma}}}), \quad (3)$$

em que, para cada estação: $\bar{\sigma}$ =média amostral dos valores de σ , σ_{σ} =Desvio padrão amostral de σ e n_{σ} =tamanho da amostra de σ .

- Foram calculados os valores de M(σ) com o método de Newton-Raphson.

Medição de vazão

Para medir a vazão e caracterizar o perfil vertical de máxima velocidade das estações fluviométricas selecionadas, foi empregado um equipamento ADCP com quatro feixes e de dupla frequência M9 (1 e 3 MHz).

A vazão média e a área da seção foram obtidas empregando o ADCP em modo dinâmico e seguindo as recomendações de ANA (2014):

- Travessias aos pares, com igual número de travessias em ambos os sentidos da seção;
- Tempo de medição de no mínimo 720 segundos;
- Velocidade do barco não superior ao dobro da água;
- Coleta de 10 verticais nas margens iniciais;

- Trajeto de medição perpendicular à seção e alinhado;
- Verificação da ocorrência do efeito de fundo móvel.

Considerando a necessidade de identificar a vertical de máxima velocidade e questões de ordem prática e econômica, dividiu-se a seção transversal em subseções, semelhante à medição com molinete, para execução do perfilamento vertical de velocidades com o ADCP em modo estacionário, de acordo com as sugestões de Collischonn & Dornelles (2013) contidas na Tabela 2.

Largura do rio (m)	Número de Verticais
<=30.00	8
30.00-50.00	10
50.00-80.00	13
80.00-150.00	14
150.00-250.00	18
>= 250.00	20

Tabela 2. Distância de perfilamento entre as verticais, adaptado de Collischonn & Dornelles (2013).

O tempo de perfilamento por vertical foi de 60 segundos. Tanto o tempo necessário para executar as travessias da medição em modo dinâmico quanto o tempo total de perfilamento em modo estacionário foram registrados pelo ADCP.

Ajuste numérico

Selecionou-se a vertical cuja velocidade média temporal é máxima durante a medição com ADCP em modo estacionário. A Equação 4 expressa, matematicamente, o ajuste da Equação 1 ao conjunto de pontos (u_i, y_i) da vertical de máxima velocidade média temporal na seção:

$$\text{minimizar } \left(\sum_{i=1}^n (u_i - u)^2 \right), \quad (4)$$

em que,

$$u = u(y_i) = \frac{u_{\text{máx}}}{M} \ln \left(1 + (e^M - 1) \frac{y_i}{D-h} e^{\left(1 - \frac{y_j}{D-h}\right)} \right), \quad (5)$$

e sujeito à restrição da Equação 3.

Não houve restrições de variação em relação à $u_{\text{máx}}$ e h .

Foram calculados também os coeficientes de determinação (R^2) entre as velocidades medidas (ADCP em modo estacionário) e as calculadas com a Equação 1.

Após o ajuste de mínimos quadrados obteve-se o valor de M que melhor descreve o comportamento da distribuição de velocidades na seção; a Equação 2 foi então utilizada para calcular $\phi(M)$, possibilitando o cálculo da vazão com

$$Q_{\text{Calc}} = A * \bar{u} = u_{\text{máx}} * \phi , \quad (6)$$

em que: Q_{Calc} = Vazão na seção calculada pelo método da máxima entropia e A = área da seção transversal.

Análises estatísticas

Calcularam-se erros relativos percentuais entre as vazões medidas com ADCP e as calculadas com a Equação 6.

$$\text{Dif}_Q = \frac{(Q_{\text{Calc}} - Q_{\text{Med}})}{Q_{\text{Med}}} * 100, \quad (7)$$

em que: Dif_Q = erro relativo entre as vazões, Q_{Calc} = vazão calculada pela metodologia da entropia, Q_{Med} = vazão medida com o ADCP em modo dinâmico.

A divergência entre os tempos de medição está de acordo com a Equação 8.

$$\text{Dif}_T = \frac{(T_{\text{Ent}} - T_{\text{Din}})}{T_{\text{Din}}} * 100, \quad (8)$$

em que: Dif_T = divergência relativa entre os tempos de medição em campo, T_{Ent} = tempo de medição empregando a metodologia da entropia com ADCP em modo estacionário, T_{Din} = tempo de medição da vazão com ADCP em modo dinâmico.

Com propósito de verificar uma potencial diferença significativa entre: a média (μ) e a variância (σ^2) das vazões de amostras distintas (ADCP estacionário/entropia e ADCP dinâmico), e o tempo de medição obtido por diferentes metodologias, aplicaram-se análises estatísticas:

- Regressão linear entre as vazões medidas (Q_{Med}) e calculadas (Q_{Calc});
- Correlação linear entre a diferença relativa percentual de vazões (Dif_Q) e as variáveis Q_{Med} e Dif_T ;
- Teste de significância *t-student*, com dados pareados, para igualdade da média das vazões das variáveis Q_{Calc} e Q_{Med} ;
- Teste de significância *F-Snedecor*, com dados pareados, para igualdade da variância das vazões das variáveis Q_{Calc} e Q_{Med} ;
- Teste de significância *t-student* (pareado) para igualdade do tempo médio de execução das medições, T_{Din} e T_{Ent} .

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Tabelas 3 e 4 resumem os resultados da análise da série de velocidades máximas e médias medidas com molinete nas estações com propósito de determinar o intervalo para o parâmetro M no ajuste numérico.

Estação	Série histórica	n	μ (σ)	σ (σ)	$\frac{\mu}{\sigma}$ (%)
45770000	2001-2013	35	0,6449	0,0481	7,46
46550000	2001-2013	34	0,7121	0,0252	3,53
45480000	2001-2013	34	0,6643	0,0767	7,67
46902000	2001-2013	31	0,7378	0,0443	6,00
45590000	2001-2013	31	0,5740	0,0380	6,63
50191000	2001-2013	50	0,6755	0,0914	13,54
46870000	2001-2013	40	0,6297	0,0560	8,89
46035000	2001-2013	35	0,7165	0,0537	5,37
46830000	2001-2016	47	0,6844	0,0439	6,41
46150000	2001-2013	36	0,7458	0,0482	4,82
48020000	2002-2013	25	0,7209	0,0363	5,03
45740001	2001-2013	34	0,5899	0,0612	10,38
46360000	2001-2013	28	0,6719	0,0643	9,57
46105000	2001-2013	33	0,7340	0,0471	6,41
45960001	2001-2013	37	0,7918	0,0338	4,26
45910001	2001-2013	30	0,7068	0,0212	3,00
46650000	2001-2013	33	0,7924	0,0216	2,73
50795000	2001-2012	33	0,5919	0,1044	17,63
51795000	2001-2015	48	0,6092	0,0996	16,35
46780000	2002-2016	38	0,6497	0,0264	4,06
45580000	2001-2013	37	0,6331	0,0331	5,23

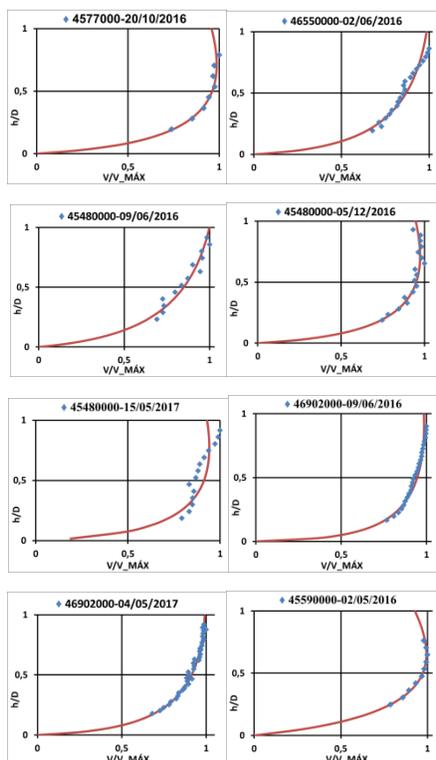
Tabela 3. Estatística descritiva dos valores de σ por estação, elaborado com dados da ANA (2016).

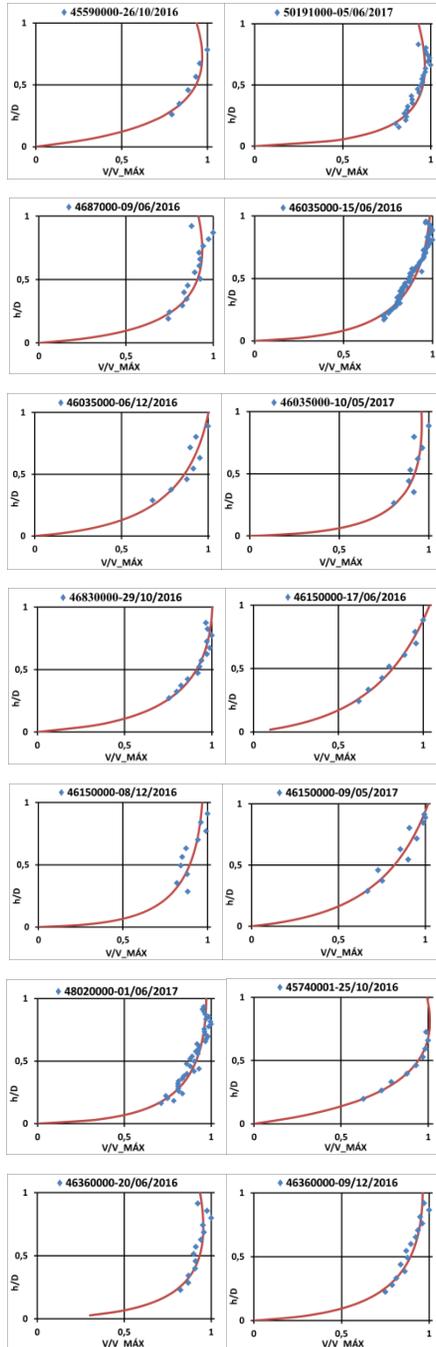
Estação	$\bar{\sigma}/IC-95\%$	IC-M($\bar{\sigma}$)
45770000	0,628-0,661	1,608-2,067
46550000	0,703-0,720	2,730-3,030
45480000	0,638-0,690	1,737-2,520
46902000	0,721-0,753	1,737-2,520
45590000	0,560-0,587	1,737-2,520
50191000	0,650-0,700	3,052-3,672
46870000	0,611-0,647	3,052-3,672
46035000	0,698-0,734	0,730-1,071
46830000	0,671-0,697	0,730-1,075
46150000	0,729-0,761	-0,684-5,234
48020000	0,706-0,735	1,386-1,870
45740001	0,568-0,610	2,644-3,287
46360000	0,647-0,696	2,640-3,287
46105000	0,701-0,750	2,644-3,287
45960001	0,780-0,802	2,222-2,627

45910001	0,699-0,714	3,195-3,847
46650000	0,784-0,799	3,195-3,847
50795000	0,556-0,627	3,195-3,847
51795000	0,580-0,637	1,618-4,636
46780000	0,641-0,658	0,836-1,372
45580000	0,622-0,644	1,871-2,609

Tabela 4. Intervalo de variação de M para o ajuste numérico, elaborado com dados da ANA (2016).

Comparando o valor da razão (ϕ) média entre a velocidade média e a máxima em cada estação nota-se que esse número varia entre 0,5740-0,7924 e o desvio padrão entre 0,0212-0,0996. Em 33% das estações o Coeficiente de Variação ($\frac{\sigma}{\mu}$), CV, foi inferior a 5%, em 52% das amostras esse mesmo coeficiente oscilou entre 5%-11% e nas 15% estações remanescentes o CV oscilou no intervalo 11%-18%. Esses valores podem ser considerados de baixa dispersão, pois em 90,47% as amostras apresentam valores de CV inferior a 15%. Após o cálculo do intervalo de variação de M empregando-se a Equação 3, os resultados dos ajustes numéricos da Equação 1 aos perfis de máxima velocidade pontual em cada estação podem ser visualizados na Figura 2 e na Tabela 5.





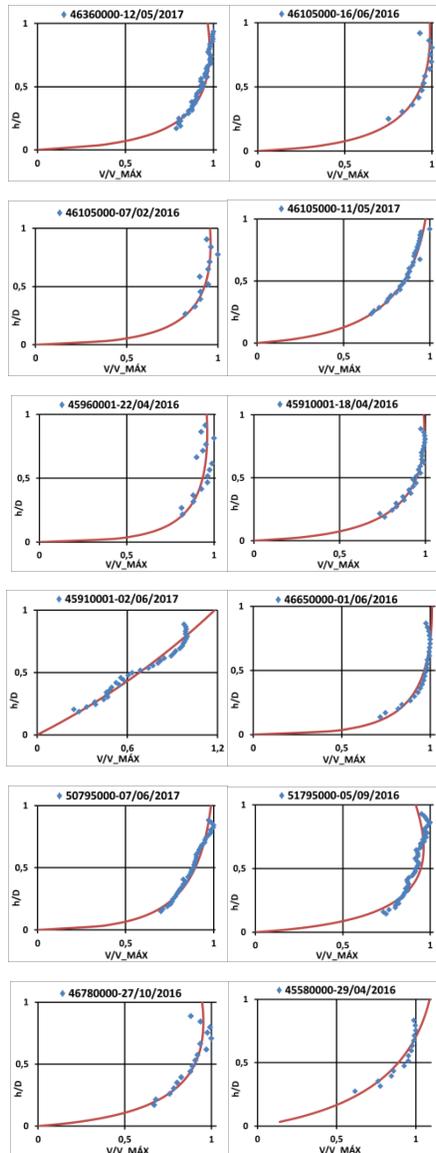


Figura 2. h = distância ao leito, D = profundidade da vertical de máxima velocidade pontual, V = velocidade calculada pela Equação 1, $V_MÁX$ = velocidade máxima pontual medida com ADCP em modo estacionário.

Observando a Figura 2, nota-se há diferentes quantidades de pontos medidos por estação, isso ocorre em função do ADCP discretizar as verticais em número de pontos distintos em cada uma delas, em função de diferentes profundidades médias, velocidades e sedimentos em suspensão. Perfis naturais aproximadamente monotônicos só foram encontrados na estação de 46902000-09/06/2016 e em 4559000-(26/10/2016), evidenciando a pequena probabilidade da ocorrência deste perfil naturalmente. Em 13 perfis analíticos,

a Equação 1 calculou a posição da velocidade máxima na superfície livre (nas estações 46550000-02/06/2016, 45480000-14/06/2016, 46902000-04/05/2017). Nestes cenários, nota-se: o valor da variável h melhor ajustado aos dados é negativo; o valor da velocidade máxima (melhor ajustada) é superior ao valor da velocidade máxima real na seção; a velocidade máxima real é aquela calculada aplicando a Equação 1 à superfície livre no eixo y . A Equação 1 também foi matematicamente convergente ao valor nulo de velocidade nas regiões próximas ao leito. Ainda que a estação 51795000 (Valença) esteja localizada em região costeira, não foram encontrados valores negativos de velocidades medidas nas estações, ou seja, velocidades escoando no sentido de jusante para montante da seção. Analisando conjuntamente todos os perfis adimensionalizados de velocidades máximas medidas e calculadas da Figura 2, percebe-se que a Equação 1 pode ser considerada uma ótima ferramenta para descrever os perfis de velocidade verticais nas seções estudadas.

Estação	Data	Q _{med} m ³ /s	Q _{calc} m ³ /s	Dif _Q (%)	A (m ²)	B (m)	D m	T _{Des} min	T _{Ent} min	Dif _T (%)	V MÁX m/s	V _{Mcalc} m/s	R ²	Melhor ajuste		
														V _{Max} m/s	M	h m
45770000	20/10/2016	32,54	33,78	+3,8	33,8	38	1,18	23	16	-30,4	1,557	1,536	0,983	1,563	1,903	0,339
46550000	02/06/2016	38,81	40,00	+3,1	57,2	38	1,80	22	17	-22,7	0,984	0,969	0,940	0,996	3,030	-1,010
45480000	14/06/2016	411,00	448,68	+9,2	898,0	301	3,51	57	27	-52,6	0,725	0,723	0,913	0,759	2,520	-2,586
45480000	05/12/2016	1239,30	1147,34	-7,4	1768,2	524	4,31	39	27	-30,8	1,008	0,981	0,948	0,981	2,068	1,238
45480000	15/05/2017	417,41	392,82	-5,9	777,6	314	3,56	26	26	0,0	0,7767	0,731	0,559	0,7314	2,520	0,798
46902000	09/06/2016	136,00	126,68	-6,9	201,0	132	2,04	32	19	-40,6	0,848	0,836	0,970	0,836	3,672	0,166
46902000	04/05/2017	172,08	171,15	-0,5	245,1	136	2,43	15	15	0,0	0,973	0,965	0,985	0,967	3,073	-0,346
45590000	02/05/2016	20,77	17,38	-16,3	25,3	27	1,05	25	11	-56,0	1,195	1,187	0,994	1,187	0,946	0,364
45590000	26/10/2016	21,01	19,49	-7,3	25,6	31	0,92	35	13	-62,9	1,334	1,294	0,901	1,294	1,075	0,250
50191000	05/06/2017	6,13	6,07	-1,1	9,8	19	0,71	17	20	+17,6	0,907	0,877	0,817	0,877	2,687	0,249
46870000	09/06/2016	62,40	53,10	-14,9	141,0	49	3,83	35	13	-62,9	0,621	0,582	0,803	0,582	1,870	1,008
46035000	15/06/2016	507,58	499,47	-1,7	1439,0	394	4,72	112	33	-70,5	0,481	0,473	0,936	0,477	3,280	-1,326
46035000	06/12/2016	1326,80	1381,41	+4,1	2068,0	405	5,83	35	24	-31,4	0,955	0,957	0,881	0,994	2,640	-3,753
46035000	10/05/2017	562,97	548,97	-2,5	1078,0	358	5,63	27	27	0,0	0,722	0,693	0,703	0,693	3,280	0,585
46830000	29/10/2016	69,97	72,73	+3,9	83,0	50	1,99	13	19	+46,2	1,301	1,305	0,958	1,306	2,222	-0,150
46150000	17/06/2016	507,60	526,55	+3,7	1207,0	335	5,47	99	34	-65,7	0,556	0,577	0,977	0,800	3,735	-32,851
46150000	08/12/2016	1244,28	1269,60	+2,0	1870,2	527	7,20	36	27	-25,0	0,920	0,891	0,494	0,897	3,840	-1,938
46150000	09/05/2017	549,63	543,20	-1,2	1221,4	332	5,81	27	28	+3,7	0,599	0,609	0,904	0,736	3,201	-15,843
48020000	01/06/2017	684,91	706,88	+3,2	2127,0	685	3,03	50	27	-46,0	0,465	0,4520	0,890	0,4521	3,299	-0,100
45740001	25/10/2016	19,22	18,83	-2,0	34,6	40	0,91	30	14	-53,3	0,944	0,954	0,991	0,954	0,837	0,171
46360000	20/06/2016	525,00	455,14	-13,3	878,0	366	3,50	87	33	-62,1	0,780	0,745	0,757	0,745	2,609	0,947
46360000	09/12/2016	1242,12	1122,00	-9,7	1516,2	428	3,74	30	24	-20,0	1,104	1,063	0,906	1,063	2,609	-0,094
46360000	12/05/2017	544,88	488,70	-10,3	911,4	393	3,06	30	22	-26,7	0,787	0,770	0,918	0,770	2,609	0,645
46105000	16/06/2016	511,00	716,38	+40,2	992,0	596	3,60	142	47	-66,9	1,041	1,030	0,898	1,030	2,690	0,295
46105000	07/12/2016	1263,14	1268,11	+0,4	1879,7	610	3,12	45	38	-15,6	0,945	0,908	0,815	0,908	3,458	0,429

46105000	11/05/2017	555,59	596,98	+7,4	1141,9	605	2,46	49	31	-36,7	0,765	0,7457	0,981	0,7673	2,690	-1,333
45960001	22/04/2016	105,83	111,82	+5,7	234,9	66	4,02	36	16	-55,6	0,635	0,610	0,719	0,610	4,287	0,603
45910001	18/04/2016	110,86	111,46	+0,5	179,9	99	2,23	39	18	-53,8	0,892	0,886	0,970	0,886	2,650	0,268
45910001	02/06/2017	115,60	129,41	+11,9	167,5	88	3,08	30	19	-36,7	0,936	1,105	0,968	5,091	2,650	-135,41
46650000	01/06/2016	85,85	90,57	+5,5	109,6	87	1,89	46	17	-63,0	1,042	1,053	0,949	1,053	4,390	-0,001
50795000	07/06/2017	115,60	129,41	+3,1	34,6	44	1,01	13	17	+30,8	0,318	0,313	0,958	0,3201	4,130	-0,580
51795000	05/09/2016	24,31	25,50	+4,9	110,5	36	3,58	44	14	-68,2	0,376	0,362	0,827	0,362	1,730	1,214
46780000	27/10/2016	22,98	26,96	+17,3	40,7	29	2,23	14	12	-14,3	1,077	1,026	0,909	1,026	1,831	0,357
45580000	29/04/2016	13,24	13,76	+3,9	16,2	13	1,50	30	11	-63,3	1,251	1,361	0,927	1,416	1,522	-0,777
n		34	34					34	34							
μ		401,027	402,320					40,8	22,2							
σ		428,778	425,018					28,6	8,5							

B= largura superficial, **V_{Mcalc}** = Velocidade máxima calculada pela Equação 17 na seção, **V_{Máx}** = velocidade máxima resultante do ajuste numérico, **R²**= Coeficiente de determinação entre velocidades medidas e as calculadas pela equação 1.

Tabela 5. Resumo dos principais parâmetros do ajuste da Equação 1 aos perfis de máxima velocidade.

De acordo com a variável V_MÁX da Tabela 5, percebe-se uma distribuição das velocidades máximas medidas no intervalo 0,318-1,557 m/s com prevalência de velocidades de magnitude 0,5-1,0 m/s representando mais de 55% da amostra; considerando o intervalo 0,5-1,5 m/s, têm-se 83% da amostra. Estes números estão consoantes com os intervalos de dados de velocidades máximas obtidas nos experimentos de Minei (1999), Chen et al. (2013) e Corato et al. (2014).

Os valores de M melhor ajustados aos dados reais estão no intervalo [0,837-4,39]. Comparando-se os valores de M calculados neste trabalho com os obtidos por diferentes pesquisadores percebe-se que aqueles valores são compatíveis com estes, como demonstrado por Minei (1999), Chen (2013), Choo et al. (2013), Farina et al. (2014), cujos valores de M calculados estão no intervalo [1,4-73,63], [0,139-0,206], [4,558-7,71], [1,26-4,03], respectivamente.

Considerando as dezesseis medições realizadas no rio São Francisco como uma só amostra, nota-se que o valor do parâmetro da entropia (M) melhor ajustado aos perfis de velocidade permaneceu no intervalo [2,609-3,840]. Esses dados sugerem que para estações de mesma bacia hidrográfica os valores do parâmetro M podem variar em um espectro específico e característico da própria região hidrográfica.

Os coeficientes de determinação (R²), resultantes do ajuste entre os dados de velocidade medidas (ADCP estacionado) e as calculadas pela Equação 1, variaram no intervalo [0,494-0,994]. Analisando a Figura 2 e a Tabela 5, percebe-se que em 64% (22) das estações analisadas o valor de R² superou 0,9, resultando em um ótimo ajuste entre as velocidades medidas e calculadas; em 20,5% (7) das medições o valor de R² permaneceu no intervalo [0,7-0,8], consideradas de razoável ajuste; e nas estações restantes (5, ou 14,7%) os ajustes foram considerados ruins.

Conforme a Figura 3, as vazões medidas e calculadas estão fortemente alinhadas e correlacionadas ($R^2=0,9864$), principalmente para vazões inferiores a 200 m³/s. A Figura 3 sinaliza que as vazões calculadas pela metodologia alternativa da entropia podem computar vazões em substituição à metodologia do ADCP dinâmico.

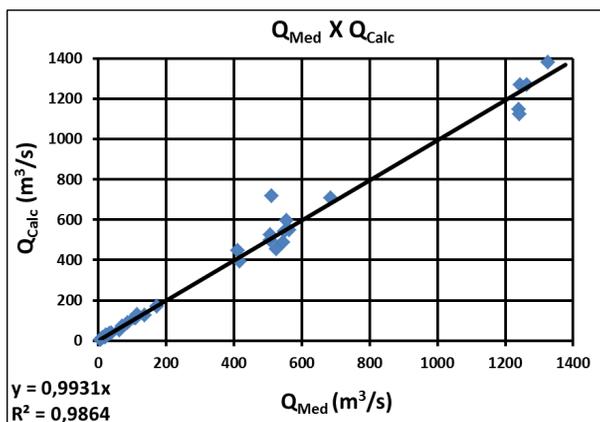


Figura 3. Regressão linear entre vazões medidas e calculadas.

Analisando a Figura 4, percebe-se que essas diferenças relativas entre as vazões se distribuem aleatoriamente no intervalo $\pm 20\%$, sendo a única exceção a estação 46105000 em 16/06/2016, cuja diferença atingiu 40,2%. Analisando a distribuição das diferenças relativas das vazões em função das vazões medidas, percebe-se que não houve correlação ($R^2=0,004$) entre essas variáveis. Portanto, para as vazões pesquisadas (6,138-1326,800 m³/s), nota-se concordância com Diniz (2013), que também não detectou limitações para vazão em relação ao uso da metodologia da entropia para determinação da vazão.

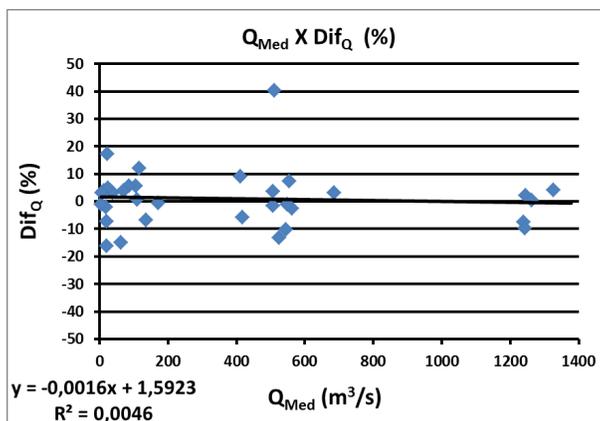


Figura 4. Correlação linear entre as variáveis Q_{Med} e Dif_Q .

De acordo com a Figura 5, a metodologia alternativa proposta reduziu o tempo de execução em 88,3% das medições, mas em 11,7% da amostra acarretou aumento neste tempo. Nota-se na Figura 5 que houve fraca correlação linear ($R^2=0,002$) entre as variáveis Dif_Q e Dif_T , sugerindo que a metodologia da entropia fornece dados de vazão com divergência aceitável ($\pm 10\%$) em relação à metodologia tradicional em 79,41% das estações amostradas independente da redução proporcional do tempo de medição, indicando um ganho de eficiência em quaisquer magnitudes de vazões a serem medidas.

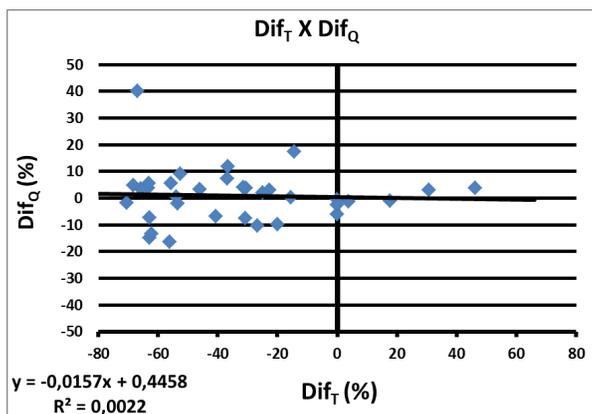


Figura 5. Correlação linear entre as variáveis Dif_T e Dif_Q .

Considerando uma amostra com 33 graus de liberdade (gl), a Tabela 6 indicou uma estatística do teste ($t\text{-calc}=0,101$) com probabilidade de significância ($p\text{-valor}=0,918$) muito superior ao nível de significância ($\alpha =0,05$) adotado. Assim, a hipótese nula não deve ser rejeitada, e conclui-se que não há diferença significativa entre as médias das vazões medidas e calculadas.

Hipótese nula (H0)						
Vazão média medida = Vazão média calculada						
Hipótese alternativa (H1)						
Vazão média medida \neq Vazão média calculada						
μ (Dif_Q)	σ (Dif_Q)	n	gl	t-calc	α	p-valor
0,868	49,868	34	33	0,101	0,05	0,918

Tabela 6. Teste de significância *t-student* (média das vazões)

A estatística do teste F, $F\text{-calc}=1,015$, conduz a um p-valor (0,965) superior ao valor de $\alpha=0,05$, indicando que a hipótese nula (igualdade de variâncias nas amostras) não pode ser rejeitada. Este teste sinaliza que, na amostra pesquisada, não há evidência suficiente para concluir que a metodologia alternativa da entropia estime vazões com variância diferente em relação ao ADCP dinâmico.

Os resultados apresentados na Tabela 8 mostram que ao valor da estatística do teste, $t\text{-calc}=-4,704$, está associado um p-valor muito próximo à nulidade (0,000022) e inferior ao nível de significância. Assim, conclui-se que a hipótese nula deve ser rejeitada em favor da hipótese alternativa. Há evidência estatística suficiente para concluir que o tempo médio de execução de uma medição de vazão utilizando o ADCP em modo estacionário (associado à metodologia da entropia) é menor em relação ao tempo dispendido com o ADCP em modo dinâmico.

Hipótese nula (H0)						
Tempo-medição entropia = Tempo-medição dinâmica						
Hipótese alternativa (H1)						
Tempo-medição entropia < Tempo-medição dinâmica						
μ (Dif.)	σ (Dif.)	n	gl	t-calc	α	p-valor
-18,647	23,110	34	33	-4,704	0,05	0,000022

Tabela 8. Teste de significância *t-student* (tempo de medição)

CONCLUSÕES

Os valores do parâmetro M da distribuição de velocidades foram ajustados com excelentes coeficientes de correlação e boa aderência entre teoria e experimentação. A aplicação da formulação demonstrou haver concordância com as vazões medidas empregando o ADCP. O uso da metodologia alternativa proposta para a determinação da vazão foi capaz de calcular a vazão em 79,4% dos casos, com divergência máxima de $\pm 10\%$ em relação à metodologia convencional, e com redução média de 46,34% do tempo de medição.

A metodologia da entropia com ADCP estacionário pode ser considerada uma alternativa para execução de medições regulares de vazão em redes hidrométricas, principalmente pela potencial redução do tempo de execução das medições em relação à metodologia com ADCP empregado em modo dinâmico.

AGRADECIMENTOS

À Agência Nacional de Águas, entidade que custeia a operação da Rede Hidrometeorológica Nacional. Ao Serviço Geológico do Brasil pelo apoio durante as medições de vazão e demais as atividades de campo. À Universidade Federal da Bahia pela contribuição no planejamento e desenvolvimento desta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Medição de descarga líquida em grandes rios. 2 ed. Brasília: ANA, 2014. 94 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Sistema de Visualização de Ficha de Campo, (2016). Disponível em: < [http://www.snirh.gov.br/VisualizadorWebLogic/ VisualizadorWeb.html](http://www.snirh.gov.br/VisualizadorWebLogic/VisualizadorWeb.html)>. Acesso em 10 de dezembro de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Hidroweb - Sistema de Informações Hidrológicas: Séries Históricas, (2017). Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>>. Acesso em 19 de agosto de 2017.

ARAÚJO, G. R. S. Cálculo da vazão em canais naturais utilizando o princípio da máxima entropia: aplicação a estações da rede hidrometeorológica nacional nos estados da bahia e Sergipe. 2017. 201 p. Dissertação Mestrado – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

CHEN, Y. C. Flood discharge measurement of a mountain river – Nanshih River in Taiwan. *Hydrology and Earth System Sciences*. v. 17, p. 1951-1962, 2013. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-1951-2013>

CHEN, Y. C.; KUO, J. J.; YU, S. R.; LIAO, Y. J.; YANG, H. C. Discharge Estimation in a Lined Canal Using Information Entropy. *Entropy Journal*. v. 16, i. 3, p. 1728-1742. 2014. <http://dx.doi.org/10.3390/e16031728>

CHIU, C. L. Entropy and Probability Concepts in Hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*. v. 113, nº 5, p. 583–599. 1987. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1987\)113:5\(583\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:5(583))

CHIU, C. L. Entropy and 2-D Velocity Distribution in Open Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. v.114, nº 7, p. 738-756. 1988. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:7\(738\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:7(738))

CHIU, C. L. Application of Entropy Concept in Open-Channel Flow Study. *Journal of Hydraulic Engineering*. v. 117, nº 5, p. 615-628. 1991. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1991\)117:5\(615\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:5(615))

CHOO, T. H.; YOON, H. C.; LEE, S. J. An estimation of discharge using mean velocity derived through Chiu's velocity equation. *Environmental Earth Sciences*. v. 69, i. 1, p. 247-256. 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-012-1952-0>

CHOO, T. H.; YUN, G. S.; YOON, H. C.; NOH, H. S.; BAE, C. Y. Estimation of the maximum velocity using the entropy concept in an open channel. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, nº 115, p. 1-8, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-015-4925-2>

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013. 336 p.

CORATO, G.; MELONE, F.; MORAMARCO, T.; SINGH, V. P. Uncertainty analysis of flow velocity estimation by a simplified entropy model. *Hydrol. Process*. v. 28, p. 581–590. 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9590>

DINIZ, V. E. M. G.; PEREIRA, V. O. C.; BISPO, L. P.; SOUZA, P. A. Using Maximum Entropy For Discharge Calculation In Open Channel Flow. *Water Resources Management VII-WIT Transactions on Ecology and the Environment*. v. 171, p. 301-311. 2013. <http://dx.doi.org/10.2495/WRM130271>

FARINA, G.; ALVISI, S.; FRANCHINI, M.; MORAMARCO, T. Three Methods for Estimating the Entropy Parameter M Based on a Decreasing Number of Velocity Measurements in a River Cross-Section. *Entropy Journal*. v. 16, i. 5, p. 2512-2529. 2014. <http://dx.doi.org/10.3390/e16052512>

GRECO, M.; Mirauda, D. Entropy Parameter Estimation in Large-Scale Roughness Open Channel. *J. Hydrol. Eng.* v. 20, i. 2, p.1943-5584. 2015. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001009](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001009)

MARTINS, P. D.; POLETO, C. Principle of maximum entropy in the estimation of suspended sediment concentration. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 22, e. 23, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011716058>

MINEI, N. Um método expedito para a medição de vazão em rios e canais abertos. 1999. 138 p. Tese de Doutorado em Engenharia - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MORAMARCO, T.; CORATO, G.; MELONE, F.; SINGH, V. P. An entropy-based method for determining the flow depth distribution in natural channels. *Journal of Hydrology*, v. 497, p. 176-188. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.002>.

MORAMARCO, T.; BARBETTA, S.; TARPANELLI, A. From surface flow velocity measurements to discharge assessment by the entropy theory. *Water*, v. 9, nº 2, p. 120-134, 2017. <http://dx.doi.org/10.3390/w9020120>

SHANNON, C. E. A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*, V. 27, p. 379–423, 1948. <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x>.

SINGH, V. P. *Entropy Theory in Hydrologic Science and Engineering*. McGraw-Hill, 2015. 824 p.

SONG, T. Velocity and turbulence distribution in non-uniform and unsteady open-channel flow. 1994. 127 p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Federal Institute of Technology Lausanne, Lausanne.

SONTEK. RIVERSURVEYOR S5 AND M9. Disponível em: <<http://www.sontek.com/productsdetail.php?RiverSurveyor-S5-and-M9-14>>. Acesso em 14/09/2017.

TAZIOLI, A. Experimental methods for river discharge measurements: comparison among tracers and current meter. *Hydrological Sciences Journal*, v. 56, i. 7, p. 1314-1324, 2011. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.607822>.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). How Streamflow is Measured Part 2: The discharge measurement. 2016. Disponível em: <<http://water.usgs.gov/edu/streamflow2.html>>. Acesso em: 15/08/2016.

APROVEITAMENTO DAS ÁGUAS METEÓRICAS COMO CONTRIBUIÇÃO PARA A UNIVERSALIZAÇÃO DO ACESSO À ÁGUA POTÁVEL E A RESILIÊNCIA AOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Data de aceite: 01/11/2022

Gabriela Cadete Souza

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI
Itajubá – Minas Gerais – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0253041850001731>
<https://orcid.org/0000-0002-8231-6791>

Herlane Costa Calheiros

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI
Itajubá – Minas Gerais – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7722549235745590>
<https://orcid.org/0000-0001-6535-8079>

RESUMO: Este artigo tem como principal objetivo apresentar as taxas de acesso à água tratada no mundo e no continente americano, assim como mostrar a importância da captação das águas meteóricas e incentivar seu aproveitamento a fim de sanar necessidades básicas de grande parte da população que não têm acesso à água de qualidade. Para isso, foi utilizado o método de estudo teórico documental com base no levantamento de dados disponibilizados por grandes organizações mundiais. Os resultados apresentaram concordância do uso de águas meteóricas, e em especial as águas pluviais, para fins potáveis e não potáveis

dependendo do uso, após tratamento físico-químico. Por fim, conclui-se que o investimento no aproveitamento de águas meteóricas pode auxiliar no acesso à água tratada para pessoas que não têm acesso à água de qualidade, bem como aliviar a demanda de água dos sistemas públicos de abastecimento de água trazendo economia de custo para a população beneficiada.

PALAVRAS-CHAVE: Captação de água de chuva. Qualidade de água. Potencial de economia de água.

METEORIC WATER AS A CONTRIBUTION TOWARD THE UNIVERSALIZATION OF ACCESS TO DRINKING WATER AND THE RESILIENCE TO THE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE

ABSTRACT: The main objective of this article is to present the rates of access to treated water in the world and on the American continent, as well as to show the importance of meteoric water harvesting and encourage its use in order to meet the basic needs of a large part of the population that does not have access to quality water. For this, the method of theoretical documental study was

used based on the collection of data made available by large organizations worldwide. The results showed agreement on the use of meteoric water, and especially rainwater, for potable and non-potable purposes, depending on the use, after physical-chemical treatment. Finally, it is concluded that investment in the use of meteoric water can help access to treated water for people who do not have access to quality water, as well as alleviate the demand for water from public water supply systems, bringing cost savings. for the benefited population.

KEYWORDS: Rainwater harvesting. Water quality. Water saving potential.

1 | INTRODUÇÃO

A pandemia da COVID-19 ultrapassou a marca de 600 milhões de casos positivos no mundo e já causou quase 6,5 milhões de mortes (WHO, 2022). Ao final do ano de 2019 e início de 2020 a Organização Mundial da Saúde (OMS) estipulou medidas preventivas que evitam a disseminação rápida da doença e constatou-se que uma das principais medidas de contenção do vírus está vinculada à higiene, que é a lavagem das mãos sempre que possível. Ou seja, uma das medidas de suma importância para controlar a propagação do vírus só poderia ser realizada por aqueles que tivessem o privilégio do acesso à água tratada em suas residências e locais de convívio.

O acesso da população à água potável é um direito básico garantido por lei e esse acesso poderia evitar mortes não só por COVID-19, mas também por outras doenças. No entanto, de acordo com a UNICEF e a OMS, em 2019 cerca de 3 bilhões de pessoas não tinham acesso às instalações básicas de higiene das mãos e cerca de 2,2 bilhões nem sequer tinham acesso à água tratada. O saneamento inseguro é um dos maiores problemas de saúde pública do mundo.

A água usada em instalações básicas de higiene deve ser doce e tratada. Essa água é captada em mananciais e passa por tratamento para que se torne adequada ao uso da população. Porém, existem fontes alternativas de água que podem ser usadas em alguns tipos de instalações sanitárias desde que a água seja tratada e se adeque ao uso, como é o caso das águas meteóricas.

As águas atmosféricas são classificadas como águas meteóricas (neblina, névoa e precipitação: chuva, neve e granizo) e deposições (orvalho, geada etc.), conforme Möller (2008). Dentre as águas meteóricas, a precipitação, sobretudo a água de chuva, se destaca por ser de fácil observação, captação e armazenamento. Essa classe de água já é aproveitada em diversos países do mundo e aplicada para usos não-potáveis, mas demanda certo cuidado em seu manejo e uso. Sendo assim, realizando captação e tratamento corretos que ajustem a qualidade da água meteórica para uso em instalações sanitárias, é possível ampliar o acesso à água tratada no mundo.

2 | OBJETIVOS

Este artigo tem como objetivos ressaltar a importância do uso das águas meteóricas

e mostrar como o aproveitamento dessa classe de águas pode ampliar o acesso à água tratada contribuindo para a adaptação e o enfrentamento do ser humano a um novo ambiente imposto pelas mudanças climáticas.

3 | METODOLOGIA

Foram utilizados os métodos de pesquisa exploratória e explicativa, com base em dados recentes disponibilizados em plataformas de grandes organizações mundiais, como: Organização Mundial da Saúde (OMS), Organização das Nações Unidas (ONU), Our World in Data e Fundo de Emergência Internacional das Nações Unidas para a Infância (UNICEF). Essas plataformas auxiliaram no levantamento de dados antes e durante a pandemia, como: taxa de acesso à água potável no mundo, índices pluviométricos na América do Sul, taxa mundial de mortes associadas ao consumo de água não-potável, taxa mundial de pessoas sem instalações seguras de saneamento, região da América com menor Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e acesso a instalações seguras de água tratada. Buscou-se, também, conhecer experiências reais existentes no Brasil do uso de água meteoricas, com ênfase na água de chuva para o consumo humano, o tipo de tratamento aplicado para o seu aproveitamento e seus efeitos econômicos na sociedade local.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o Fundo de Emergência Internacional das Nações Unidas (UNICEF, 2019) e a Organização Mundial da Saúde (OMS), em 2019 uma a cada três pessoas não tinham acesso à água potável do mundo e cerca de 75% da população dos países menos desenvolvidos não tinham instalações básicas para higiene e lavagem das mãos. Segundo o estudo Global Burden of Disease e a plataforma Our World in Data, as mortes relacionadas ao saneamento ocupam 13º lugar em 28 posições e chegaram a alcançar mais de 1.2 milhões de mortes no mundo em 2019. A região do continente africano se destaca negativamente apresentando os maiores números de mortes (acima de 50 a 100 por 100 000 pessoas), enquanto os países do continente americano apresentaram entre 0 a 25 mortes por 100 000 pessoas. Em 6 dos 10 países menos desenvolvidos do continente americano mais de 40% da população não tem acesso a água tratada, sendo eles Belize, Guiana, Guatemala, Nicarágua, Honduras e Haiti. WHO (2020). Dentre os 6 países com menores taxas de acesso, a Guiana se destaca negativamente com apenas 27% da população com acesso à água tratada, localizada na América do Sul. Em contrapartida, apesar de apresentar baixa quantidade de acesso à água de qualidade, a América do Sul apresenta altos índices pluviométricos e grande disponibilidade hídrica, como mostra a Figura 1.

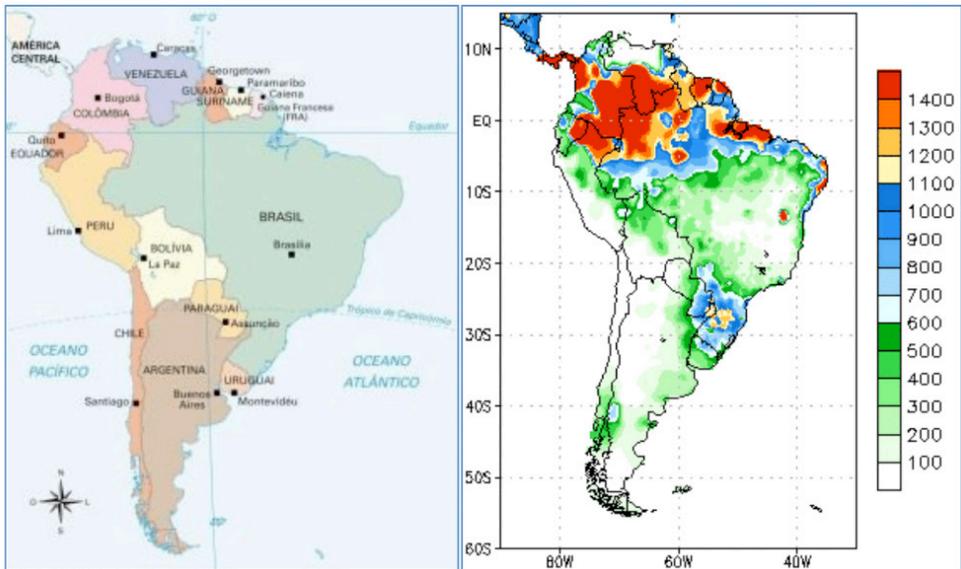


Figura 1. Mapa geográfico e precipitação acumulada na América do Sul em 2022 (março-setembro).
Fonte: NOAA (2022).

De acordo com a Figura 1, os índices de precipitação acumulada são maiores na região norte da América do Sul, onde está localizado parte ou inteiramente os países Brasil, Peru, Colômbia, Venezuela, Guiana, Suriname e Guiana Francesa. Sendo assim, é possível que o baixo acesso a instalações de saneamento seguras para higiene nessa região possa ser suprido por fontes alternativas de água tratada, como é o caso da captação das águas meteóricas. Tornando, particularmente as águas de chuva, uma importante fonte de água para a prevenção da COVID-19 (Kanno et al., 2021).

De acordo com Pizzo et al. (2021), as águas pluviais devem ser captadas, tratadas e armazenadas antes de seu uso. A captação é feita através de um sistema de calhas instaladas no telhado de residências e edifícios, tubulações, filtros e reservatórios, assim quando ocorre uma precipitação a água escoar por todo o sistema e fica reservada aguardando tratamento para ser utilizada, pois apresenta impurezas advindas das telhas que teve contato. A qualidade da água é determinada pela análise de alguns parâmetros que devem seguir um padrão para cada finalidade de uso, sendo eles principalmente pH, cor, turbidez e coliformes. Além disso, fatores naturais também influenciam na qualidade da água captada, como tipo, duração e intensidade de chuva, vegetação do local, poluição do ar e estação do ano. Para que a água seja usada em fins potáveis, ela deve seguir os padrões de potabilidade estabelecido por lei, como é o caso da Portaria GM/MS nº 888/ no Brasil (Brasil, 2021).

Segundo Calheiros et al. (2014), O tratamento de águas pluviais deve prever pelo menos a remoção de sólidos, o ajuste do pH e a desinfecção. Geralmente, o tratamento é composto por filtração e desinfecção. A filtração tem como objetivo principal a remoção de partículas em suspensão na água coletada. A primeira água coletada chamada de *first*

flush é a água que carrega a maior quantidade de impurezas, e por isso comumente é descartada. Os filtros são constituídos de camadas de areia e cascalho, e conforme a água passa por eles os poluentes ficam retidos. Alguns tipos de material filtrante podem ser empregados para complementar o tratamento, como é o caso do carvão ativado que consegue agir removendo pequenas partículas orgânicas que influenciam no sabor, odor e cor da água. A desinfecção é fundamental para conferir segurança no uso da água. Para isso, pode-se utilizar o tratamento por radiação ultravioleta que atua em comprimento de onda específico inativando os micro-organismos potencialmente patogênicos (Tran et al., 2021). Outra opção é a desinfecção por cloração e basicamente se resume à adição de produtos químicos a base de cloro que agem inativando organismos que podem causar riscos à saúde humana. Sendo assim, garantindo que a água passe por todos esses processos com os devidos cuidados, é possível que seja aplicada para fins potáveis e não potáveis de acordo com a demanda.

No Brasil, têm-se verificado a implantação de vários sistemas de aproveitamento das águas de chuva em áreas isoladas, centros urbanos, indústrias e instituições de ensino, ações incentivadas por políticas públicas governamentais para diminuir as desigualdades na disponibilidade hídrica e no acesso ao sistema público de abastecimento de água. Por exemplo, no município brasileiro de Itapemirim no Espírito Santo, um sistema de captação de água de chuva foi implantado em diversos pontos da cidade e apresentou retorno positivo para a população, conferindo uma economia de 50% da água cedida pelo sistema público de abastecimento de água potável (Bandeira e Stradiotti, 2016). Tornando o sistema público mais resiliente frente aos efeitos das mudanças climáticas (Imteaz et al., 2021). O que foi constatado por Tavares et al. (2022) que há potencial socioeconômico para captação de água de chuva em vários municípios brasileiros, sendo influenciado pela tarifa e consumo de água.

A ação de maior destaque é o programa um milhão de cisternas (P1MC) cujo objetivo é fornecer água a população rural do semiárido brasileiro (Doss-Gollin et al., 2016). Nesta região marcada por fenômenos de seca, Silva et al. (2022) acreditam que o potencial do uso de águas de chuva deve ser analisado localmente, pelo tipo de edificação, regime de chuvas e custo do serviço público de água. Dentro desta perspectiva, surge no estado brasileiro do Pará, o Projeto Amana Katu da Enactus Brasil que disponibiliza sistemas de coleta de água de chuva para comunidades quilombolas vulneráveis da Amazônia, e também em comunidades rurais de Vazante e Paracatu em Minas Gerais, com o objetivo de proporcionar melhores condições de vida e acesso à água potável para a população, visto que nessas regiões o acesso à água de qualidade é quase nulo. No sistema desenvolvido, a água passa por um filtro que retém sólidos, em seguida passa por um separador que faz o descarte da primeira água e a água restante pode ter duas finalidades: a) Fins não-potáveis como limpeza; e b) fins potáveis como consumo humano, neste caso a água passa por cloração e filtro de carvão ativado, a fim de respeitar aos padrões ambientais (Neiva, 2019).

5 | CONCLUSÃO

Por fim, após análise dos dados e exemplos de programas colocados em prática no Brasil com o objetivo de levar água potável àqueles que não têm acesso e reduzir a demanda de água tratada das concessionárias, conclui-se que a expansão do aproveitamento das águas meteóricas poderia auxiliar com grande impacto positivo no acesso à água tratada em diversas regiões do mundo onde a população não tem acesso à água de qualidade, pois ter água disponível não é sinônimo de qualidade. Portanto, medidas que auxiliem na redução da taxa de pessoas sem acesso a instalações seguras de água são necessárias, visto que este é um dos maiores problemas sanitários do mundo, e captação de águas meteóricas, principalmente águas pluviais, tem grande potencial de resolução em parte deste desafio. Além de diminuir a pressão pela demanda de água sobre sistemas públicos de água proporcionando economia de custo.

REFERÊNCIAS

- BANDEIRA, J.; STRADIOTTI, C. (2016). *Aproveitamento de Água Pluvial Para Fins Potáveis*. Itapemirim. Disponível em: <https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2018/08/aproveitamento-de-agua-pluvial-para-fins-potaveis.pdf>
- BRASIL (2021). Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. *Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021*. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 mai. 2021, seção 1, ed.58, p. 127.
- CALHEIROS, H. C.; GOMES, M. R.; ANCO ESTRELLA, P. M. (2014). Calidad de las aguas meteóricas en la ciudad de Itajubá, Minas Gerais, Brasil. *Revista Ambient. Água*, 9(2), 336-346. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1329>
- DOSS-GOLLIN, J.; SOUZA FILHO, F. A.; SILVA, F. O. E. (2016). Analytic modeling of rainwater harvesting in the brazilian semiarid northeast. *Journal of the American Water Resources Association*, 52(1), 129-137.
- IMTEAZ, M. A.; PAUDEL, U.; SANTOS, C. (2021). Impacts of climate change on weather and spatial variabilities of potential water savings from rainwater tanks. *Journal of Cleaner Production*, 311, 127491. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127491>
- KANNO, G. G.; LAGISO, Z. A.; ABATE, Z. G.; AREBA, A. S.; GONDOL, B. N.; TEMESGEN, H.; VAN WYK, R.; AREGU, M. B. (2021). Estimation of rainwater harvesting potential for emergency water demand in the era of COVID-19. The case of Dilla town, Southern Ethiopia. *Environmental Challenges*, 3, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100077>
- MÖLLER, D. (2008). On the History of the Scientific Exploration of Fog, Dew, Rain and Other Atmospheric Water. *Die Erde, Special Issue: Fog Research*, 139 (1-2), 11-44. <http://homepage.usys.ethz.ch/eugsterw/publications/fog/02-Moeller-011-044.pdf> (Acesso em 29 de setembro de 2022).

NEIVA, L. M. (2019). PROJETO DRAFT. *Falta água potável na região amazônica*. A solução da Amana Katu: um sistema de filtragem da água da chuva de baixo custo. <https://www.projetodraft.com/falta-agua-potavel-na-regiao-amazonica-a-solucao-da-amana-katu-um-sistema-de-filtragem-da-agua-da-chuva-de-baixo-custo/#:~:text=Um%20primeiro%20filtro%20elimina%20impurezas,n%C3%A3o%2Dpot%C3%A1veis%2C%20como%20limpeza> (Acesso em 03 de setembro de 2022).

NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. U.S. Department of Commerce. *Precipitation Monitoring*. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/Global_Monsoons/American_Monsoons/SAMS_precip_monitoring.shtml (Acesso em 03 de setembro de 2022).

OUR WORLD IN DATA. *Unsafe water is a leading risk factor for death*. <https://ourworldindata.org/water-access> (Acesso em 01 de setembro de 2022).

OUR WORLD IN DATA. *Water and Sanitation*. https://ourworldindata.org/explorers/water-and-sanitation?time=latest&facet=none&Resource=Drinking+water&Level+of+Access=Safely+managed&Residence=Total&Relative+to+population=Number+of+people&country=IND~USA~KEN~OWID_WRL~BGD~ZAF~CHN (Acesso em 01 de setembro de 2022).

PIZZO, H. S.; FERRARI, J. G.; MAURICIO, L. S.; ARBEX, T. B. O. (2021). Aproveitamento De Água Pluvial: Captação e Utilização Para Fins Não Potáveis Em Uma Residência De Alto Padrão Na Cidade De Juiz De Fora – MG *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*. São Paulo, 7(6). <https://doi.org/10.51891/rease.v7i6.1428>

SILVA, M. B. M.; BRANDÃO, I. A. P.; RIBEIRO, M. M. R. (2022). Feasibility, seasonality and reliability of rainwater harvesting in buildings of a university in Campina Grande, Paraíba. *Revista brasileira de recursos hídricos*, 27. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220210127>

TAVARES, L. C.; BRAVO, J. M.; TASSI, R.; ALMEIDA, I. R.; WARTCHOW, D. (2022). Socioeconomic potential for rainwater harvesting systems in southern Brazilian municipalities. *Water Supply*, 22(1), 14–30. doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2021.291>

TRAN, S.H.; DANG, H.T.; DAO, D.A. et al. (2021). On-site rainwater harvesting and treatment for drinking water supply: assessment of cost and technical issues. *Environ Sci Pollut Res*, 28, 11928–11941. <https://doi.org.ez38.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11356-020-07977-0>

UNICEF - UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND. (2019). *1 em cada 3 pessoas no mundo não tem acesso a água potável*. <https://www.unicef.org/brazil/comunicados-de-imprensa/1-em-cada-3-pessoas-no-mundo-nao-tem-acesso-agua-potavel-dizem-unicef-oms> (Acesso em 29 de agosto de 2022).

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION (2020). *Coronavirus* (COVID-19) Dashboard. <https://covid19.who.int/> (Acesso em 29 de agosto de 2022).

GESTÃO DAS ÁGUAS TRANSPOSTAS PELO PROJETO SÃO FRANCISCO - PISF/ EIXO LESTE: IMPACTOS SOBRE A DISPONIBILIDADE HÍDRICA E ESTIMATIVAS DAS TARIFAS DE ÁGUA PARA O CANAL ACAUÃ-ARAÇAGI, LOCALIZADO NO BAIXO CURSO DO RIO PARAÍBA

Data de aceite: 01/11/2022

Cícero Aurélio Grangeiro Lima

Doutor em Recursos Naturais,
Especialista em Infraestrutura Sênior do
Ministério do Desenvolvimento Regional
Cabedelo-PB/Brasil

RESUMO: Trata-se de análises dos impactos decorrentes do aporte da vazão do Eixo Leste do Projeto de Integração do rio São Francisco (PISF) sobre as disponibilidades do canal Acauã-Araçagi e, estimativas das tarifas de água a ser cobrada aos usuários deste sistema adutor. Principal obra hídrica da Paraíba, o canal, concebido em concreto, seção trapezoidal e capacidade para vazão máxima de 10 m³/s, inicia-se no reservatório Acauã, no baixo curso do rio Paraíba, estendendo-se por 112 km até alcançar o leito do rio Araçagi, na bacia de mesmo nome. Neste estudo foram realizadas simulações utilizando-se o modelo ModSIM P32 para avaliações das disponibilidades hídricas para o canal, nos cenários sem e com a transposição das águas do São Francisco. No cenário com transposição considerou-se um aporte hídrico inicial do projeto de 0,5 m³/s, com

acréscimo anual de mesmo valor, até o limite da vazão firme de 4,2 m³/s estabelecido para o referido eixo. Os impactos sobre os valores dos Custos Médios da Água e das Tarifas de Água foram analisados para as situações demandas para o canal de 0,2 m³/s e de 0,5 m³/s, por meio de cálculos do Valor Presente Líquido (VPL) aplicado para taxa de retorno de 12% a.a. e horizonte de projeto de 30 anos. A variação dos custos operacionais e das Tarifas de Água, em função das vazões aduzidas, mostrou a importância de um planejamento prévio das demandas que serão requeridas por parte dos estados beneficiados pelo PISF. Estes estados devem estar, até a entrada em operação do sistema, com suas entidades operadoras de suas infraestruturas hídricas instaladas e operantes, com seus sistemas de cobrança implantados e os valores tarifários definidos, de forma a garantir ressarcimento à Operadora Federal, os custos operacionais relativos ao atendimento das vazões demandadas.

PALAVRAS-CHAVE: Transposição, outorga de uso da água, custos operacionais.

ABSTRACT: These are analyses of the impacts resulting from the contribution of the flow of the Eastern Axis of the São Francisco river basin and Northern Northeast river basins Integration Project (PISF) on the availability of the Acauã-Araçagi channel and estimates of the water tariffs to be charged to users of this adductor system. The channel is designed in concrete, trapezoidal section and capacity for maximum flow of 10 m³/s. It starts in the Acauã reservoir, on the low course of the Paraíba River, extending for 112 km to the Araçagi River. In this paper, simulations were performed using the ModSIM P32 model to evaluate the water availability for the canal, in the scenarios without and with of the water of the São Francisco river. In the scenario with transposition, an initial water contribution of the project of 0.5 m³/s was considered, with an annual increase of the same value, up to the limit of the firm flow rate of 4.2 m³/s established for the said axis. The impacts on the values of the Average Water Costs and Water Tariffs were analyzed for the situations demands for the channel of 0.2 m³/s and 0.5 m³/s, through calculations of the Valor Presente Líquido (LPV) applied for a return rate of 12% a.a. and project horizon of 30 years. The variation in operating costs and water tariffs, due to the flows inducted, showed the importance of prior planning of the demands that will be required by the states benefited by the PISF. These states must be, until the system has come into operation, with their operating entities of their installed and operating water infrastructures, with their collection systems deployed and the tariff values defined, in order to guarantee reimbursement to the Federal Operator, the operational costs related to meeting the required flows.

KEYWORDS: Transposition, granting water use, operating costs.

INTRODUÇÃO

O Projeto de Integração de Águas do Rio São Francisco com Bacias do Nordeste Setentrional (PISF) prevê uma entrada de água, via leito natural do rio Paraíba até atingir o açude Poções no município de Monteiro. A adução terá uma parcela de 4,2 m³/s de vazão firme e 5,8 m³/s de vazão flutuante a ser disponibilizada, dependendo das condições hídricas do reservatório de Sobradinho. Dentre as regiões que serão beneficiadas pelo referido eixo, situam-se: o Cariri, o Curimataú e o Seridó, nas quais é observado o maior problema concernente ao abastecimento de água do Estado da Paraíba, e onde está inserido o município com menor índice pluviométrico do Brasil: Cabaceira, com uma média anual em torno de 300 mm.

A escassez de água é agravada pelo déficit crônico do balanço hídrico regional, que envolve a pluviometria e a evaporação. O clima tropical, com elevada temperatura e alta insolação, ocasiona taxa de evaporação de até 2.500 mm ao longo do ano, estabelecendo sempre a uma situação de escassez hídrica na região. O manejo das reservas hídricas é refém da incerteza quanto à afluência hídrica para o próximo período de chuva. Dessa maneira, a operação dos reservatórios é limitada em função da necessidade de se armazenar água como garantia para anos vindouros, quando poderá ou não haver uma

recarga hídrica.

No contexto de distribuição das águas transpostas pelo Eixo Leste do PISF no rio Paraíba, foi projetado o canal Acauã-Araçagi, partindo do reservatório Acauã, no baixo Curso do rio Paraíba, estendendo-se por 112 km estendendo-se até alcançar o reservatório Araçagi, na bacia do rio Mamanguape. Com capacidade para transportar até 10 m³/s tem por finalidades: abastecimento humano de 33 municípios situados na Zona da Mata e no Agreste paraibano, com população estimada em 590 mil habitantes e demanda de 0,938 m³/s estimada para 2035), dessedentação animal e irrigação de uma área potencial de 16 mil hectares.

Com objetivos de avaliar a sustentabilidade hídrica e de estimar as respectivas tarifas de água a serem cobradas aos usuários do canal adutor, com vista ao ressarcimento dos custos à Operadora Federal, foram realizadas simulações do sistema hídrico do rio Paraíba para os cenários sem e com incremento das vazões aduzidas pelo Eixo Leste/PISF, considerando duas situação de demandas hídricas a serem atendidas pelo referido canal.

O EIXO LESTE DO PISF

O Eixo Leste do Projeto de Integração do rio São Francisco com bacias do Nordeste Setentrional (PISF) inicia-se com a captação no reservatório de Itaparica, em Floresta, no estado de Pernambuco até desaguar no açude Poções, em Monteiro, no estado da Paraíba. A interligação do Eixo Leste do PISF com a Paraíba se dará através de uma derivação do reservatório Barro Branco (trecho V), passando pelo portal de entrega de água (PB01L), na divisa dos estados da Paraíba e Pernambuco, até desaguar no açude Poções, na bacia hidrográfica do rio Paraíba (Lima, 2011). Com extensão aproximada de 290 km, desnível geométrico de 304 m e capacidade para transportar a vazão máxima de 28 m³/s, tem como objetivo principal atendimento às demandas hídricas das bacias do rio Paraíba e dos rios Moxotó e Ipojuca, no estado de Pernambuco (FUNCATE, 2001). O eixo é composto por: 13 barragens, 211 km de segmentos de canal em concreto, seção trapezoidal, 2,5 km de aquedutos e 22,5 km de túnel (figura 1).

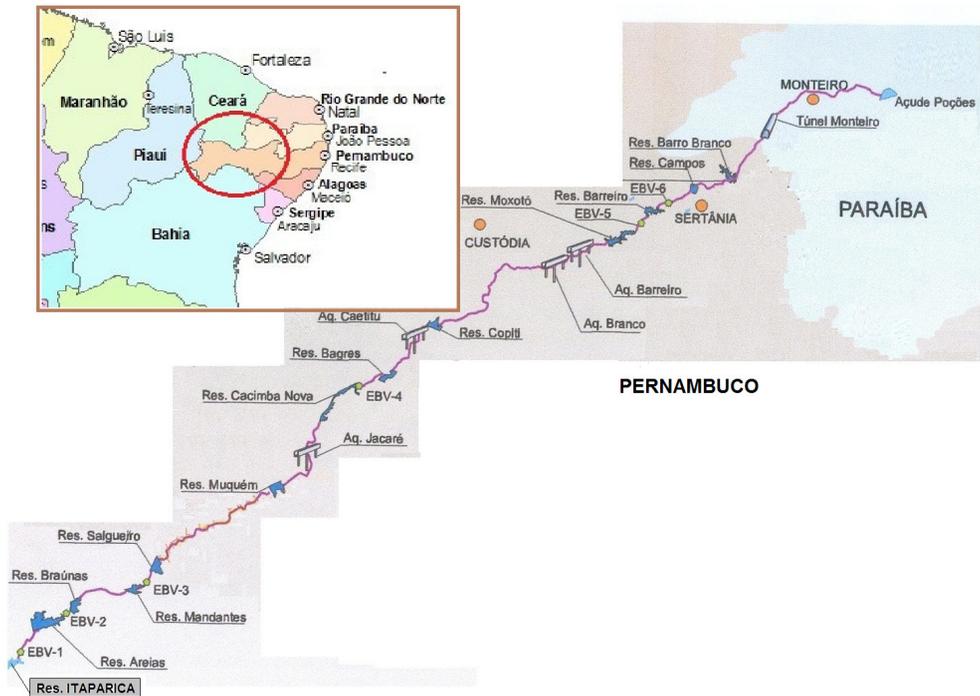


Figura 1 – Integração do Eixo Leste/PISF com o rio Paraíba

O SISTEMA HÍDRICO ESTUDADO

A Bacia do Rio Paraíba

A bacia hidrográfica do Rio Paraíba, localizada ente as latitudes $6^{\circ}51'31''$ e $8^{\circ}26'21''$ Sul e as longitudes $34^{\circ}48'35''$ e $37^{\circ}2'15''$ a Oeste de Greenwich é a segunda maior do Estado da Paraíba, abrangendo uma área de 20.071,82 Km², que representa 38% do território e uma população de 1.828.178 habitantes, correspondente a 52% da população total. Considerada uma das bacias mais importantes do semi-árido nordestino, ela é composta pela sub-bacia: Taperoá, Alto Paraíba, Médio Paraíba e Baixo Paraíba, a jusante do reservatório Acauá até sua foz no oceano Atlântico.

Em termos de climatologia, de acordo com a classificação de Köppen, a região do Alto Curso do Rio Paraíba possui clima do tipo BSw^h (semi-árido quente) e do Baixo Curso do Rio Paraíba vigora o clima do tipo Aw (úmido). A vegetação natural predominante é caatinga hiperxerófila, hipoxerófila, floresta caducifólia e subcaducifólia na região do Alto e Médio cursos. Na região do Baixo Curso existem algumas áreas com a vegetação nativa da Mata Atlântica e ecossistemas associados. As precipitações médias anuais variam de 400 mm, na região do Alto Paraíba até 1700 mm na região do Baixo Paraíba. A evaporação média anual varia entre 1.300 mm e 2.500 mm. Os solos mais representativos são: Bruno não Cálcico, Litólico, Solonetz Solodizado, Regossolo e Cambissolo.

canal, por meio de entrega da vazão firme de 4,2 m³/s no reservatório Poções. A modelagem deste sistema hídrico está mostrado na Figura 3.

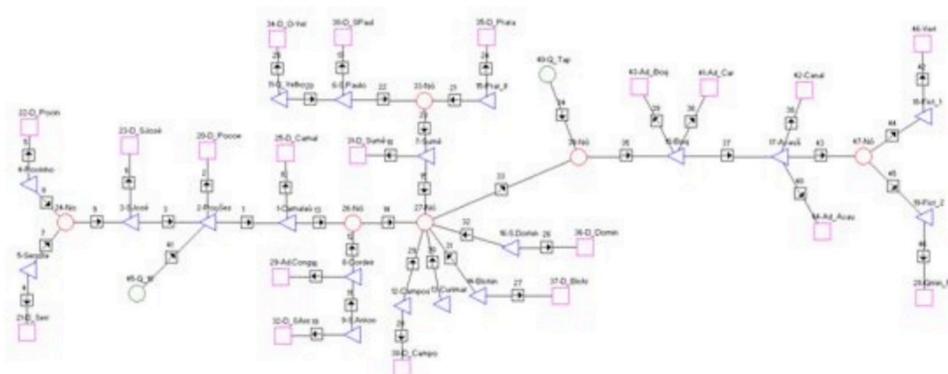


Figura 3 – Esquema para simulação do sistema hídrico do rio Paraíba

As estimativas dos custos da água decorrentes dos aportes hídricos para o canal adutor tiveram como referência os custos operacionais relativos à formulação do sistema tarifário do PISF (FGV, 2005), base para as emissões da Outorga de uso da água (ANA, 2005a) e do CERTOH do empreendimento (ANA, 2005b). As estimativas e suas implicações sobre as tarifas de água, a serem cobradas dos usuários do canal adutor, contemplaram os três conjuntos de valores dos custos operacionais: custos fixos, custos variáveis e BDI da Operadora Federal (Lima, 2013). As mesmas foram obtidos por meio do cálculo do Valor Presente Líquido (VPL).

$$\text{VPL} = \sum [(\text{REC} - \text{CO}) / (1 + i)^n] \quad (1)$$

Em que:

VPL – Valor Presente Líquido (US\$);

REC – Receitas auferidas da cobrança pelo uso da água (US\$);

CO – Custos operacionais envolvidos nos sistemas hídricos (US\$);

i – Taxa de retorno (%); e

n - Horizonte de projeto (anos)

Os Custos Médios da Água (CMA) foram definidos como a relação ente os custos totais operacionais do sistema hídrico estudado (PISF, sistema hídrico do rio Paraíba e canal Acauã/Araçagi) e as vazões disponibilizadas ao sistema hídrico estudado, mostrado na Figura 2. A Tarifa de Água (TA) foi definida como o menor valor para obtenção do VPL positivo, considerando o horizonte de projeto igual a 30 anos e taxa de retorno de 12% a.a.

Cenário sem a transposição (C1)

No cenário sem aporte hídrico, as simulações do sistema hídrico do rio Paraíba foram realizadas priorizando as demandas de abastecimento dos reservatórios integrantes do mesmo, inclusive, a vazão ecológica à jusante do reservatório Acauã, estabelecida em 0,5 m³/s. As vazões máximas disponibilizadas para o canal adutor foram obtidas por meio de simulações com a série de 56 anos de vazão pseudo-histórica. Não foram considerados aportes hídricos de outras sistemas para o canal. Para as estimativas das tarifas de água somente os custos de operação e de manutenção do canal foram analisadas, considerando uma taxa de incremento anual de 5%. O custo relativo à gestão a Operadora Estadual não foi considerado, pois a mesma não havia sido definida oficialmente.

Cenário com a transposição (C2)

No cenário com a transposição, as simulações do sistema hídrico estudado foram realizadas com periodicidade anual, considerando aportes hídricos do PISF, iniciando com a vazão de 0,5 m³/s e incremento anual de mesmo valor, até atingir a vazão firme a ser fornecida pelo Eixo Leste para a bacia do rio Paraíba, igual a 4,2 m³/s. Os valores das tarifas a serem praticados, para o ressarcimento dos custos à operadoras Federal, foram obtidos por meio do cálculo do Valor Presente Líquido (VPL). Sobre os custos operacionais do canal adutor foram adicionados: os custos de operação e manutenção, gestão, outorga e energia, relativos as disponibilizações das vazões requeridas.

Para cada vazão disponibilizada pelo PISF ao sistema hídrico estudado foram obtidas as vazões máximas disponibilizadas pelo reservatório Acauã para o atendimento as demandas do canal Acauã-Araçagi. Nas simulações foram consideradas as perdas hídricas em trânsito, entre os reservatórios Poções (entrada da vazão transposta) e Acauã (tomada d'água do canal adutor), para obtenção das respectivas vazões a serem bombeadas pelo projeto.

Os custos relativos a demanda e ao consumo de energia foram obtidos considerando o bombeamento de 21 horas, em dias úteis, e de 24 horas nos finais de semana e feriados, utilizando-se as tarifas “fora de ponta”. Os valores praticados neste estudo foram: 3.25 US\$/Kw e 73.63 US\$/Mwh, para as tarifas de demanda e consumo, respectivamente.

Os custos relativos ao processo de disponibilização das vazões do Eixo Leste para o sistema estudado foram repassados para o cálculo das tarifas de água para o canal adutor, proporcionalmente ao ganho de vazão, conforme apresentado na Equação 2.

$$CEC = (GCQ_{disp} / QP_{disp}) \times CTE \quad (2)$$

Em que:

CEC – Custo relativo ao consumo de energia para o canal;

GCQ_{disp} – Ganho de vazão para o canal, com e sem o aporte hídrico da transposição;

QP_{disp} – Vazão disponibilizada pelo PISF para o sistema hídrico do rio Paraíba; e
CTE – Custo total de energia para bombeamento da Q_{firme} do PISF para o sistema

PB.

Neste estudo, o custo relativo à outorga foi obtido proporcionalmente à vazão firme máxima a ser disponibilizada para o estado da Paraíba, cujo valor definido para o Eixo Leste/PISF foi de US\$ 1,107.87 por ano. Para ambos os cenários, também foram realizadas simulações considerando a situação de aumento da demanda de 0,2 m³/s (S1) para 0,5 m³/s (S2), com incrementos anuais de mesmos valores. Foram realizadas análises dos impactos sobre os custos médios da água e sobre a tarifa de água a ser praticada aos usuários do canal adutor para as duas situações de demanda.

ANÁLISES DOS RESULTADOS

No cenário sem a transposição (C1), a vazão máxima disponibilizada pelo reservatório Acauã para o canal adutor foi de 0,95 m³/s, que corresponde à vazão regularizada com 100% de garantia. No Quadro 1 estão os valores obtidos dos Custos Médios da Água (CMA), das Tarifas de Água (TA) e os horizontes de atendimento das demandas pelo canal, nas duas situações estudadas. Na situação de demanda S1, o horizonte de atendimento foi de 2 anos e a tarifa de água foi inferior em 0.007 US\$/m³ (18,5%), em relação a situação S2, cujo horizonte obtido foi de 5 anos. Este resultado mostra que, neste cenário, quanto mais rápida for utilizada a vazão disponibilizada pelo reservatório Acauã para o canal adutor, menor será o valor da tarifa de água. Este fato é decorrente das maiores receitas auferidas com a cobrança da água, devido a vazão ser consumida no menor horizonte de atendimento a demanda.

Demanda (canal)	Vazão (m ³ /s)	Valores (US\$/m ³)		Horizonte (Ano)
		CMA	TA	
S1	0,20	0.0385	0.0376	5
S2	0,50	0.0385	0.0306	2

Quadro 1. Custo Média da Água e Tarifas de Água para as situações de demandas S1 e S2

No Quadro 2 estão mostrados os custos operacionais envolvidos na disponibilização dos aportes hídricos do PISF ao sistema estudado, envolvidos nas análises dos impactos sobre os valores dos custos médios da água e da tarifa de água, para as duas situações de demanda no cenário com a transposição (C2).

Item dos custos	Custos operacionais médios anuais			
	S1 (mi US\$)	S1 (%)	S2 (mi US\$)	S2 (%)
Operação e manutenção (canal Acauã-Araçagi)	1.153	15,7%	1.153	9,6%
Operação e manutenção (reservatórios-PB)	0.045	0,6%	0.064	0,5%
Operação e manutenção (infraestrutura-PISF)	1.967	26,7%	2.802	23,2%
Gestão (PISF)	0.047	0,6%	0.080	0,7%
Demanda de energia	0.218	3,0%	0.369	3,1%
BDI da Operadora Federal	0.335	4,5%	0.487	4,0%
Outorga de uso da água	0.206	2,8%	0.350	2,9%
Consumo de energia	3.032	41,2%	6.028	50,0%
Taxa da Operadora Federal	0.364	4,9%	0.723	6,0%
Total	7.367	100,0%	12,057	100,0%

Quadro 2. Custos operacionais anuais da infraestrutura do sistema hídrico para as situações de demandas S1 e S2.

Os dados mostram que os maiores custos operacionais da infraestrutura dos sistemas hídricos envolvidos no estudo estão relacionados ao consumo de energia, com valores anuais de 3.032 milhões de dólares e de 6.028 milhões de dólares, correspondente aos percentuais 41,2% e de 50% dos custos totais, para as situações de demandas S1 e S2, respectivamente.

Para as vazões disponibilizadas pelo PISF, variando de 0,5 m³/s, com incremento anual de mesmo valor até a vazão firme de 4,2 m³/s, foram obtidos os valores dos Custos Médios da Água (CMA) e das Tarifas de Água (TA) correspondentes a situação de demanda do canal S1 (0,20 m³/s). Os valores estão apresentados no Quadro 3.

Os custos médios da água diminuíram e as tarifas de água aumentaram com os acréscimos das vazões disponibilizadas pelo PISF. Até a vazão disponibilizada pelo projeto de 1,5 m³/s, os valores das tarifas de água foram inferiores aos custos médios da água. Para a vazão disponibilizada igual a 2,0 m³/s, o custo médio da água e da tarifa de água apresentaram a menor diferença de valores, igual a US\$ 0.003. Também se observa que, para a referida vazão, os valores CMA e TA, bem como a relação entre custo de bombeamento e os custos operacionais, foram os que mais se aproximaram dos valores médios da série de vazão disponibilizada pelo projeto. Este fato pode ser indicativo de que a partir desta vazão, os custos relacionados ao consumo de energia (Quadro 2) passaram a ser preponderantes sobre os demais custos operacionais do sistema hídrico estudado.

Vazão disponibil. (m³/s)		Ganho Q _{disp} (m³/s)		Volume disponibil.	Custo total	CMA	Tarifa	(C.bomb. / C.total)
PISF	Canal	(Canal – PISF)	Canal	(Hm³)	(mi US\$/ano)	(US\$/m³)	(US\$/m³)	(%)
0,50	1,31	0,36	---	14,418	2.826	0.196	0.064	22,4
1,00	1,45	0,50	0,14	28,836	3.779	0.131	0.078	31,9
1,50	1,61	0,66	0,16	43,254	4.927	0.114	0.094	39,0
2,00	1,78	0,83	0,17	57,672	6.201	0.108	0.111	44,1
2,50	1,92	0,97	0,14	72,090	7.395	0.103	0.125	48,2
3,00	2,01	1,06	0,09	86,508	8.396	0.097	0.140	51,8
3,50	2,14	1,19	0,13	100,926	9.624	0.095	0.156	54,5
4,20	2,42	1,47	0,28	121,111	11.861	0.098	0.181	56,8
Média						0.118	0.119	43,6

Quadro 3. Vazões disponibilizadas pelo PISF e respectivos CMA e TA para situação (S1)

Neste cenário foram também analisados, para cada aporte hídrico do PISF, os aumentos dos valores das tarifas de água e dos custos relativos aos ganhos de vazão disponibilizada pelo canal adutor, na situação de demanda S1. Os resultados no quadro 4 mostram que, para o incremento de 1 m³/s na vazão disponibilizada do canal adutor custará aproximadamente 7.920 mi US\$ por ano. Para o bombeamento da vazão firme estabelecida para o Eixo Leste (4,2 m³/s), que proporcionará ao referido canal adutor um ganho de vazão de 1,47 m³/s, custará anualmente o valor de 11.861 mi US\$, não incluídos os custos relativos aos serviços da Operadora Estadual. Observa-se ainda que, para a vazão disponibilizada pelo PISF de 2,5 m³/s, a relação custos operacionais totais e ganho de vazão disponibilizada apresentou o valor mais próximo da média da série de vazão, igual a 7.623 mi US\$ por ano.

Q _{disp} PISF	Ganho Q _{disp}	Custos Totais	Custos/Ganho (Q _{disp})	Valor da tarifa (S1)	Aumento da tarifa		Tarifa (C2-C1)
(m³/s)	(m³/s)	(mi US\$/m³/s)	(mi US\$ ano / m³/s)	(US\$/m³)	(US\$/m³)	(%)	(US\$/m³)
0,5	0,36	2.826	7.850	0.064	---	---	0.026
1,0	0,50	3.779	7.559	0.078	0.015	22,8	0.041
1,5	0,66	4.927	7.465	0.094	0.016	20,6	0.057
2,0	0,83	6.201	7.471	0.111	0.017	17,8	0.074
2,5	0,97	7.395	7.623	0.125	0.014	12,4	0.087
3,0	1,06	8.396	7.921	0.140	0.015	12,3	0.103
3,5	1,19	9.624	8.087	0.156	0.015	10,8	0.118
4,2	1,47	11.861	8.068	0.181	0.025	16,1	0.143

Média	6.876	7.755	0.119	0.017	16,1	0.081
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	-------------	--------------

Quadro 4. Valores das tarifas e dos custos unitários da vazão disponibilizada pelo canal

O menor aumento do valor da tarifa, em termos absolutos, foi observado quando se aumentou a vazão disponibilizada de 2,0 m³/s para 2,5 m³/s, com o valor igual a 0.014 US\$/m³. Entretanto, em termos percentuais, a menor variação foi observada entre as vazões disponibilizadas: 3,0 m³/s e 3,5 m³/s, com valor igual a 10,8%. Em termos de valores médios, correspondentes ao aumento da tarifa de água para o canal, observa-se que o valor absoluto obtido para a vazão disponibilizada de 2,0 m³/s se aproxima da média e, o valor médio percentual de aumento da tarifa (16,1%) foi observado para a vazão 4,2 m³/s, que corresponde a máxima disponibilizada pelo Eixo Leste do PISF.

No Quadro 5 estão apresentados os valores obtidos para os Custo Média da Água (CMA), para as Tarifas de Água (TA), os respectivos horizontes de atendimento para as duas situações de demandas do canal Acauã-Araçagi, no cenário com a transposição (C2).

Demanda (canal)	Vazão (m ³ /s)	Valores (US\$/m ³)		Horizonte (Ano)
		CMA	TA	
S1	0,20	0.0979	0.1806	13
S2	0,50	0.0995	0.1152	5

Quadro 5. Custo Média da Água e Tarifas de Água para as situações de demandas S1 e S2

Os resultados mostram que o aumento da vazão do canal em 0,30 m³/s, na situação de demanda S2, causou um acréscimo de 1,6% no valor dos Custos Médios da Água, e um decréscimo de US\$ 0.0655 (36%) no valor da Tarifa de Água, em relação a situação de demanda S1. Outra observação importante, refere-se a diferença significativa entre os valores da TA e dos CMA, na medida em que maiores vazões foram disponibilizadas pelo PISF para o canal adutor. Este fato é decorrente das próprias definições destes parâmetros. Enquanto o valor dos CMA está associado aos custos operacionais e aos volumes a serem disponibilizados pelo projeto, a TA está relacionada aos custos operacionais do projeto e das infraestruturas hídricas internas dos estados beneficiados pelo projeto, no caso, o Estado da Paraíba. Neste cenário, assim como observado no cenário sem a transposição (C1), os resultados mostraram que menores valores da Tarifa de Água (TA) foram obtidos para menor horizonte de atendimento as demandas do canal Acauã-Araçagi. No sistema estudado, redução do horizonte de 13 anos para 5 anos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No cenário sem transposição (C1), as disponibilidades hídricas do canal, a partir

da vazão regularizada do açude Acauã, não teve grandes impactos sobre os valores dos CMA e das TA, os quais se mantiveram muito próximos. Este fato está associado aos menores horizontes de atendimento as demandas do canal adutor e, principalmente, por não incluírem os custos de energia para o bombeamento das vazões do PISF. No cenário com aporte hídrico do PISF (C2), os resultados mostram que, para o incremento de 1 m³/s na vazão disponibilizada pelo canal adutor custará aproximadamente 7.920 mi US\$ por ano. A vazão firme estabelecida para o Eixo Leste (4,2 m³/s), que proporcionará ao canal adutor um ganho de vazão de 1,47 m³/s, custará anualmente o valor de 11.861 mi US\$, não incluídos os custos relativos à gestão da infraestrutura hídrica pela Operadora Estadual. Neste cenário, os valores dos CMA e da TA foram próximos na média da série de vazões disponibilizadas pelo Eixo Leste do PISF. Nos dois cenários estudados, os resultados mostraram que quanto mais rápida for utilizada a vazão disponibilizada pelo projeto ao canal adutor, menor será o valor da Tarifa de Água. Este fato é decorrente das maiores receitas auferidas com a cobrança da água, devido a vazão ser consumida no menor horizonte de atendimento à demanda. A variação dos valores das Tarifas de Água, em função das vazões aduzidas do PISF, mostrou a importância de um planejamento prévio das demandas que serão requeridas por parte dos estados beneficiados pelo projeto. Neste estudo, ressalta-se a importância de que, até a entrada em operação do canal adutor, o Estado da Paraíba deve estar com suas entidades operadoras de suas infraestruturas hídricas instaladas e operantes, com seus sistemas de cobrança implantados e com os valores tarifários definidos, de forma a garantir o ressarcimento à Operadora Federal, os custos operacionais relativos ao atendimento das vazões demandadas do projeto.

REFERÊNCIAS

ANA (2005a). Agência Nacional de Águas. Resolução nº 411, de 22 de setembro de 2005. Brasília – DF. Brasil.

ANA (2005b). Agência Nacional de Águas. Resolução nº 412, de 22 de setembro de 2005. Brasília – DF. Brasil.

LABADIE, J. W. et al. (1989). MODSIM: *Modelo de Rede de Fluxo para Simulação de Bacias Hidrográficas*. São Paulo, LabSid – EP-USP, São Paulo-SP.

LIMA, C. A. G (2011). “Plano para a integração do Eixo Leste do Projeto São Francisco com Bacias do Estado da Paraíba”, Maceió - AL, Nov. 2011.

Lima, C.A.G (2013). “Modelo de Gestão para o Projeto de Integração do Rio São Francisco e os Custos Médios da Água. Estudo de Caso: Eixo Leste”, Bento Gonçalves - RS, Nov. 2013.

FGV (2005). Fundação Getúlio Vargas. Revisão e Atualização dos Estudos de Rateio dos Custos Operacionais do Projeto de integração da Bacia do Rio São Francisco (PISF) entre os Estados Receptores. Relatório 2, Versão Final. Brasília, DF. Brasil.

FUNCATE (2001). Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais. Projeto de Transposição de Águas do rio São Francisco Para o Nordeste Setentrional; Trecho V – Eixo Leste. R1 - Descrição do Projeto. São José dos Campos – SP, 53p.

USO DE UM DISPOSITIVO MINIATURIZADO PARA REMOÇÃO DE ARSÊNIO EM MEIO AQUOSO EMPREGANDO ARGILA EXPANDIDA COMO ADSORVENTE DE EXTRAÇÃO

Data de aceite: 01/11/2022

Luciano Alves da Silva

Mestre em Química pela Universidade Federal de Uberlândia, MG-Brasil
Doutorando em Química pela Universidade Federal de Uberlândia
<http://lattes.cnpq.br/5341720851752925>

Bruno Elias dos Santos Costa

Doutor em Química pela Universidade Federal de Uberlândia, MG-Brasil.
Pós-Doutorando em Química pela Universidade Federal de Catalão, GO-Brasil
<http://lattes.cnpq.br/9995122149910490>
<https://orcid.org/0000-0002-9306-0939>

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

Doutor em Química pela Universidade Federal de Uberlândia, MG-Brasil
Pós-Doutorando em Química pela Universidade Federal de Uberlândia
<http://lattes.cnpq.br/12970002659897780>
<https://orcid.org/0000-0003-3587-486X>

Nívia Maria Melo Coelho

Doutora em Química pela Universidade Estadual de Campinas, SP-Brasil.
Professora Titular do Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia, MG-Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0055547328584046>
<https://orcid.org/0000-0003-3822-4205>

RESUMO: O arsênio é um elemento tóxico, sendo o ecossistema aquático vulnerável as fontes de contaminação antrópicas e de biodisponibilidade natural. O monitoramento de arsênio em baixas concentrações aliado aos procedimentos de remediação de águas se faz cada vez mais necessário para promover um controle eficiente junto às normatizações ambientais. Neste trabalho foi proposto o uso da argila expandida como um adsorvente para remover arsênio do meio aquoso, aplicado em um dispositivo de extração miniaturizado em ponteira descartável. A extração ocorre de forma reversível com a dessorção, sendo obtidas condições ótimas para detecção do arsênio em sistema de geração de hidretos. A proposta pode ser considerada uma alternativa viável, que permite recuperar e enriquecer a quantidade de arsênio extraído, abrindo novas possibilidades para ser usado como reagente de segunda geração.

PALAVRAS-CHAVE: Arsênio, remediação, argila, adsorvente.

USE OF A MINIATURIZED DEVICE FOR REMOVING ARSENIC IN AQUEOUS ENVIRONMENTAL USING EXPANDED CLAY AS EXTRACTION ADSORBENT

ABSTRACT: Arsenic is a toxic element, and the aquatic ecosystem is vulnerable to human sources of contamination and natural bioavailability. The monitoring of arsenic in low concentrations combined with water remediation procedures is increasingly necessary to promote an efficient control along with environmental regulations. In this work it was proposed the use of expanded clay as an adsorbent to remove arsenic from the aqueous medium, applied in a miniaturized extraction device in a disposable tip. The extraction occurs reversibly with desorption, obtaining optimal conditions for the detection of arsenic in a hydride generation system. The proposal can be considered a viable alternative, which allows recovering and enriching the amount of extracted arsenic, opening new possibilities to be used as a second-generation reagent.

KEYWORDS: Arsenic, remediation, clay, adsorbent.

1 | INTRODUÇÃO

O arsênio é um elemento reconhecido por apresentar alta toxicidade mesmo presente em baixas concentrações em amostras provindas de matrizes ambientais e alimentícias. Essas amostras, uma vez contaminadas podem integrar as vias de absorção no organismo animal, e acumular espécies tóxicas de arsênio nos tecidos fisiológicos, comprometendo a regulação metabólica (MIHUCZ, 2022).

O arsênio se manifesta na natureza em suas formas inorgânicas, principalmente nas espécies trivalente, como arsenito (As^{3+}) e pentavalente, como arsenato (As^{5+}). Em menor proporção o arsênio se manifesta em formas orgânicas, como espécies metiladas (MMA e DMA), e associadas em açúcares e derivados metabólitos oriundos de vitaminas e aminoácidos, tais como arsenocolina (AsC) e arsenobetaina (AsB). Esses últimos são denominados compostos organoarsenicais, e são mais abundantes no ecossistema marinho. Compostos orgânicos de arsênio também são utilizados como aditivos em defensivos agrícolas, com por exemplo o Roxarsone^o e Daconate^o (BJØRKLUND et al., 2020).

As formas inorgânicas de arsênio são cerca de 100 vezes mais tóxicas em relação aos compostos orgânicos, sendo que a espécie trivalente é considerada a mais crítica, sendo 60 vezes mais tóxica em comparação com a sua forma mais oxidada (CHATTERJEE et al., 1995). Compostos organoarsenicais, não apresentam toxicidade significativa para a biota aquática.

O ambiente aquático é mais eficiente em acumular e biodisponibilizar espécies de arsênio do que no solo (LITER; MORGADA, 2009). Recursos hídricos minerais e águas oceânicas próximas a regiões de depósitos auríferos, de ferro, manganês, e que sofrem influência de atividade vulcânica são mais vulneráveis a contaminação por arsênio. Essa contaminação pode acarretar na acumulação nociva de arsênio em alguns alimentos cultivados sob a forma de irrigação, como o arroz (PAULELLI et al., 2019; SANTOS et al., 2021).

No Brasil, é relatado um histórico de contaminação de arsênio na região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, devido a atividades de exploração de jazidas de ouro, dos quais depósitos de pirita (FeS), são comumente encontradas (BORBA; FIGUEIREDO; CAVALCANTI, 2004). Relatos críticos de contaminação em águas influenciadas pela atividade de mineração, também foram reportados na cidade mineira de Paracatu (REZENDE et al., 2015).

A exposição humana a elevados níveis de arsênio ocorre principalmente pelo consumo de água contaminada e por alimentos preparados com essas águas. A Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA-US), em conformidade com a Organização Mundial da Saúde (OMS), revisou o limite tolerado de arsênio de 50 para 10 mg L⁻¹, em finalidades de classificação da potabilidade de água (WHO, 2010). O CONAMA também atendeu a essa nova deliberação, reforçando os valores orientadores de qualidade da água através da Resolução 357, de 17 de março de 2005, e pela Portaria 2914, de 12 de dezembro de 2011 do Ministério da Saúde.

Diante dessa problemática, torna-se necessário o investimento em tecnologias de monitoramento do teor de arsênio em águas naturais, e quando constatado o grau de contaminação, disseminar procedimentos que visem a remediação ou mitigação dos níveis tóxicos das espécies de arsênio disponíveis no meio aquático. Procedimentos de redução da concentração de arsênio através da sua remoção por adsorção tem recebido grande destaque, devido as vantagens de simplicidade de operação, eficiência e baixo custo. Além disso, pode ser enquadrado como uma alternativa ecologicamente viável, quando se usam adsorventes provindos do reuso adequado de materiais naturais, como os de constituição lignocelulósica (PANIAGUA; COSTA; COELHO, 2021)

A adsorção de arsênio foi satisfatoriamente investigada através do uso da farinha da casca de banana (PANIAGUA et al., 2021) e da casca de maracujá (SANTOS et al., 2021), visando aplicação no tratamento de águas contaminadas. Tratando-se de materiais de constituição mineral, o uso de argilas apresenta características físico-químicas compatíveis para serem agregadas às vantagens da classe de adsorventes naturais, possibilitando seu estudo nos procedimentos de remoção de arsênio em água.

A grande maioria dos procedimentos experimentais baseados em adsorção, são realizados através de testes em batelada. Se tratando de resíduos aquosos contaminados, e da expectativa de concentração de arsênio a níveis traço, ainda são poucos os trabalhos que podem ser efetivamente aplicados em uma escala menor. Nessas condições, normalmente se empregam pequenos volumes de amostra, logo o uso de dispositivos miniaturizados para procedimentos de adsorção se torna mais adequada, uma vez que podem ser menos dispendiosas e menos onerosas do que as são executadas em batelada. A extração em ponteira descartável conhecida como procedimento DPX é uma alternativa que tem se destacado ultimamente para o desenvolvimento de procedimentos de adsorção em fase sólida, que pode ser adequada em escala miniaturizada (BORDIN et al., 2016; PINTO; QUEIROZ, 2015).

No procedimento DPX, uma pequena quantidade da fase sólida adsorvente é

aconditionada no interior de uma ponteira de pipeta descartável, do qual é acoplada em uma seringa para promover uma rápida dispersão de ar, no momento em que se aspira a amostra. A extração do analito é prontamente realizada pela dispersão eficiente da amostra nas partículas do adsorvente, promovendo um contato dinâmico e instantâneo. O procedimento DPX pode ser facilmente adaptado a condições de infraestrutura laboratorial disponível, e compatível para determinações moleculares e elementares (FERNANDES et al., 2014; SILVA et al., 2022; TOMASIN *et al.*, 2021).

Neste trabalho, é proposto o uso da argila expandida como uma fase sólida adsorvente a ser empregada em um dispositivo de extração de arsênio através dos mecanismos de adsorção, utilizando uma adaptação do procedimento DPX, com o objetivo de ser aplicado a remoção de arsênio em amostras aquosas que podem estar contaminadas.

2 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais e Reagentes

Soluções de trabalho de As^{3+} na concentração de $20,0 \mu g L^{-1}$ foram preparadas por diluição adequada da solução estoque ($1000 mg L^{-1}$) em água deionizada. A solução estoque foi obtida pela dissolução de $NaAsO_2$ em meio de $HCl 0,3 mol L^{-1}$.

Para o sistema de extração, bem como na etapa de análise e determinação de arsênio, foram preparadas soluções aquosas de HCl partindodo reagente concentrado de grau P.A. Soluções do redutor $NaBH_4$ foram estabilizadas em meio de $NaOH 0,5\%$ (m/v).

Soluções de $NaOH$ e $HCl 0,1 mol/L$ foram utilizadas para ajustar o pH do meio aquoso das amostras. O ajuste foi feito através de um pHmetro de bancada com eletrodo de membrana de vidro combinado com eletrodo de referência $Ag/AgCl$.

2.2 Dispositivo de extração em ponteira descartável

Para montagem do sistema DPX adaptado para uma escala miniaturizada, foram utilizadas ponteiras plásticas descartáveis de micropipetas automáticas de 5 a 10 mL (tipo Gilson). Para promover a aspiração e a dispersão da amostra, foram utilizadas seringas plásticas com a abertura injetável ajustada ao encaixe com a base superior da ponteira. Na extremidade inferior da ponteira, foi introduzida uma pequena porção de lã de vidro, afim de promover filtragem e limpeza durante a aspiração da amostra.

A argila expandida, utilizada como adsorvente extrator foi obtida em casas de jardinagem comerciais. Partes maiores do sólido foram primeiramente quebradas com auxílio de um martelo e em seguida trituradas em moinho e peneiradas. As partículas de argila trituradas foram lavadas com água deionizada e secas em estufa. Foram pesadas $40,0 mg$ do pó da argila expandida e introduzidas manualmente para dentro da ponteira. Em seguida, foi feita uma lavagem com $1,0 mL$ de água deionizada para condicionamento do sólido e posterior inserção do filtro superior com lã de vidro para apoio no encaixe com a seringa.

As etapas de extração de arsênio consistiram na aspiração de uma alíquota de $4,0$

mL da solução amostra ou solução teste de $\text{As}^{\text{III}} 20,0 \text{ mg L}^{-1}$, seguida da aspiração de ar para promover a dispersão com o adsorvente durante 40 s. Após esse tempo de contato, a solução aspirada foi descartada. O conjunto dessas etapas foi denominada como um ciclo de extração, do qual ocorre-se a remoção de arsênio da matriz aquosa.

A fim de se obter a recuperação da quantidade de arsênio adsorvida na argila, realizou-se uma etapa de eluição. Essa etapa consistiu na aspiração de uma alíquota de 0,5 mL da solução eluente de HCl para dessorver o arsênio da fase sólida, seguida da aspiração de ar (aproximadamente 3,0 mL). Posteriormente, a solução foi dispensada em frasco de leitura da amostra para análise.

As etapas do procedimento foram ilustradas na Figura 1, representando o ciclo de extração e eluição, executados no dispositivo de DPX adaptado:

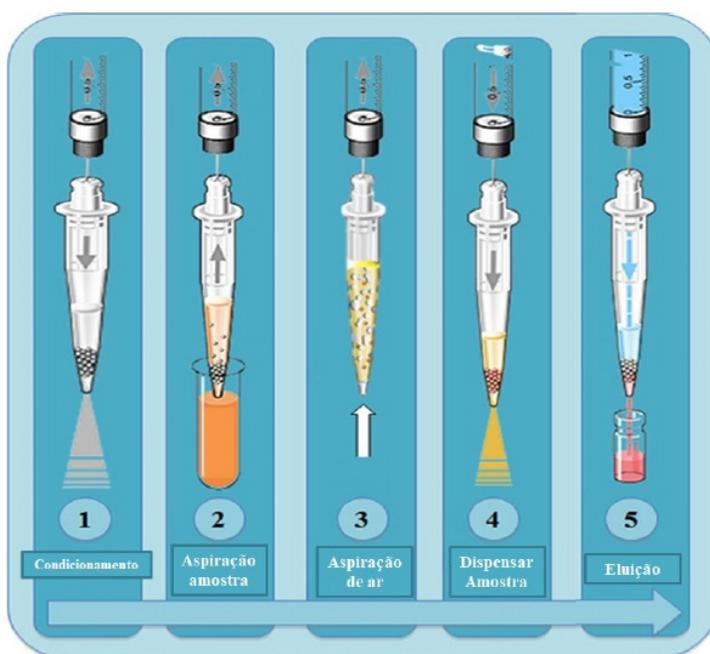


Figura 1: Ilustração das etapas experimentais da extração de arsênio por DPX.

Fonte:: Adaptado de BORDIN et al., 2016

2.3 Sistema analítico de determinação de arsênio e otimização

O arsênio foi detectado e determinado nas amostras aquosas por Espectrometria de Absorção Atômica por Chama com Geração de Hidretos (HG-AAS). Um sistema comercial de Geração de Hidretos VGA 77 (Varian®, Victoria, Austrália), foi acoplado ao espectrômetro, equipado com atomizador de cela de quartzo posicionada sobre o queimador e alinhado ao feixe óptico emitido da lâmpada de cátodo oco de arsênio, operando nas especificações do fabricante. A representação esquemática do sistema VGA 77, com *desing* de funcionamento

em sistema de fluxo contínuo, está representada pela Figura 2.

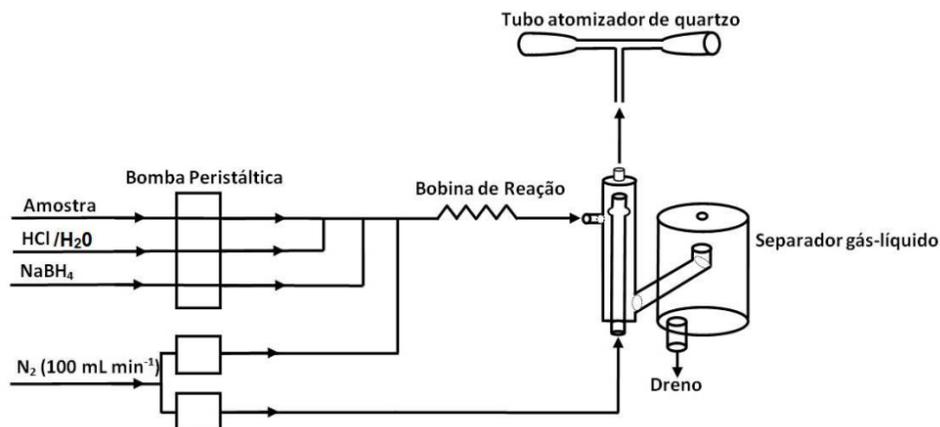


Figura 2. Representação esquemática do sistema comercial de geração de hidretos VGA77.

Fonte: Manual do usuário (VGA 77)

A absorvância foi tomada como sinal analítico, da qual foi otimizada em função da recuperação de arsênio obtida após eluição da quantidade adsorvida na fase sólida do dispositivo. A otimização foi realizada de modo multivariado, através da construção da matriz de planejamento fatorial 2^5 , das quais foram avaliadas as seguintes variáveis: *i*) concentração de HCl; *ii*) concentração do redutor NaBH_4 ; *iii*) vazão da amostra; *iv*) vazão do redutor NaBH_4 e *v*) vazão do HCl. Para um refinamento da triagem realizada pelo planejamento fatorial, um modelo de superfície de resposta foi desenvolvido por meio do Planejamento Composto com Ponto Central (CCD). O tratamento estatístico da otimização dos dados analíticos foi executado com auxílio do software *Statistica 7.0* (StatSoft).

Os níveis estudados para cada variável referente aos planejamentos fatorial e CCD estão representados na Tabela 1.

Nível	Variáveis				
	HCl (mol L ⁻¹)	NaBH ₄ %(m/v)	Vazão amostra (mL min ⁻¹)	Vazão HCl (mL min ⁻¹)	Vazão NaBH ₄ (mL min ⁻¹)
Planejamento Fatorial					
-1	1,0	0,10	0,8	0,8	0,8
0	5,5	0,45	1,1	2,3	2,3
+1	10,0	0,80	1,4	4,5	4,5
Planejamento Composto Central (CCD)					
-1,68	5,0	0,1	---	---	1,5
-1	6,0	0,5	---	---	2,3
0	7,0	0,8	---	---	4,5
+1	8,0	1,2	---	---	5,5

+1,68	9,0	1,5	---	---	6,7
-------	-----	-----	-----	-----	-----

Tabela 1. Níveis das variáveis investigadas na otimização multivariada para construção das matrizes dos planejamentos fatorial 2⁵ e CCD.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foi investigada o efeito da variação do pH do meio aquoso da amostra sobre a adsorção de As^{3+} na argila expandida. Os valores de pH testados, variaram na faixa de 2,0-10,0. Nesse ensaio, a solução amostra que foi aspirada, deixada em contato com o adsorvente e posteriormente dispensada pelo dispositivo DPX (sobrenadante), foi levada para análise no sistema HG-AAS. A absorbância foi usada como sinal analítico para determinação qualitativo teor de arsênio remanescente. A remoção foi calculada mediante a diferença relativa da absorbância da solução inicial (As^{III} 20,0 $\mu g L^{-1}$), pela absorbância do sobrenadante. Os resultados são apresentados na Figura 3A.

Uma vez avaliada a influência do pH sobre a extração, foi realizado um estudo da capacidade de recuperação do arsênio removido. O ensaio foi baseada na desorção do arsênio provindo das mesmas soluções empregadas no ciclo de extração, em relação aos seus respectivos valores de pH. O As^{3+} foi desorvido da argila expandida por eluição com solução de HCl 0,1 mol L^{-1} . A recuperação foi expressa a partir do ganho de sinal obtido pela etapa de eluição, a fim de que o procedimento seja promissor para efeito de pré-concentração em amostras contaminadas a níveis traço de arsênio. O ganho de sinal foi calculado pela razão entre as absorbâncias da solução eluída em relação ao sinal da solução de As^{III} 20,0 $\mu g L^{-1}$, tomada como controle. A Figura 3B apresenta os resultados obtidos da recuperação de arsênio.

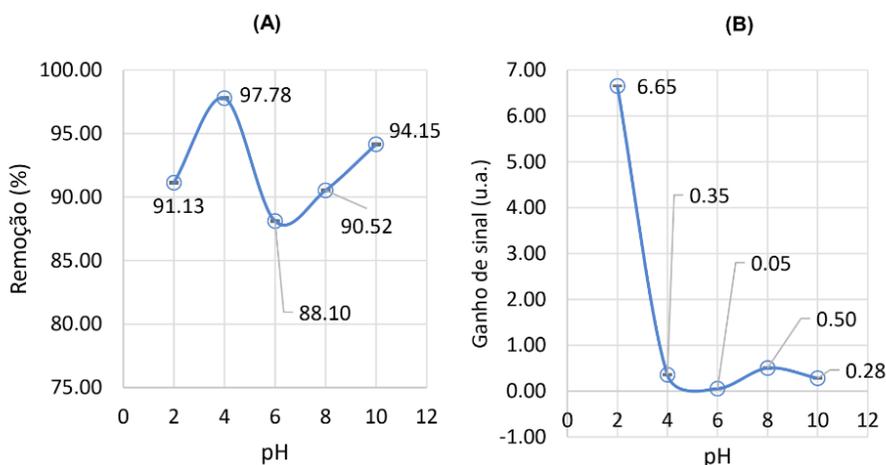


Figura 3. (A) Efeito da variação do pH sobre a remoção de As^{3+} em meio aquoso por adsorção na argila expandida. (B) Estudo da influência do pH sobre a recuperação de As^{3+} mediante etapa de eluição (Controle: 0,0496 de absorbância para As^{3+} 20,0 $\mu g L^{-1}$).

Fonte: Os autores (2022)

Os resultados indicam que a argila expandida apresenta boa capacidade de adsorção de As^{3+} do meio aquoso, com remoção média de 92,34%. Esse valor representa um desempenho satisfatório das condições de extração empregadas no sistema DPX. Melhor resultado de remoção pôde ser alcançado em pH 4,0. Nesse pH, a superfície da argila se encontra carregada positivamente, uma vez que a partir desse estudo, foi verificado um valor de pH de carga zero próximo a neutralidade ($\text{pH}_{\text{PCZ}} = 7,2$). Nessa condição de acidez, o As^{III} , se manifesta na forma do ácido arsenioso (H_3AsO_3 ; $\text{pK}_{\text{a}_1} = 9,2$; $\text{pK}_{\text{a}_2} = 12,1$), como uma espécie eletricamente neutra, uma vez que se encontra completamente protonada.

O favorecimento da remoção de arsênio nessas condições, dão indícios de que o mecanismo de adsorção pela argila não ocorre de forma específica, por interações químicas eletrostáticas. A retenção pode ser razoavelmente explicada através da formação da membrana de Donnan, como acontece nos processos de troca iônica por exclusão. Em amostras aquosas, os grupos funcionais da argila se tornam hidratados, sendo permeada por uma camada negativamente carregada (membrana de Donnan), que permite que somente moléculas não dissociadas possam atravessá-la (EITH et al., 2006). Nesse caso, como o H_3AsO_3 é uma molécula neutra, esta consegue atravessar a membrana de Donnan e ser adsorvida pela argila através do estabelecimento de ligações de hidrogênio.

A eficiência do ciclo de extração em pH 4,0 se deve ao fato de que a espessura da camada de hidratação delimitada pela membrana de Donnan se torna maior em comparação com o que ocorre em pH 2,0 e 6,0. Esse fenômeno permite que um ligeiro excesso de H_3AsO_3 seja adsorvido pela argila.

O aumento da adsorção observado em pH 10,0 ($>\text{pH}_{\text{PCZ}}$; $>\text{pK}_{\text{a}_1}$), pode ser justificado em função da contra-carga (positiva) da atmosfera iônica que circunda a espécie aniônica H_2AsO_3^- . Devido ao aumento da força iônica do meio provocada pela adição de NaOH, pode-se promover interações de natureza eletrostática favoráveis na superfície do adsorvente, que nessa condição encontra-se com sítios ativos carregados negativamente.

Já com relação a recuperação de arsênio, os resultados indicam de forma geral, que a solução de HCl na concentração de $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ não foi suficiente para promover uma eluição significativa. Observa-se um maior ganho de sinal para arsênio recuperado na solução amostra com pH 2,0. Sugere-se que nessa condição fortemente ácida, a superfície da argila pode estar saturada em sítios de carga positiva, ocorrendo o pareamento iônico direto com ânions cloreto. Dessa forma, a membrana de Donnan pode não ser eficientemente estabelecida durante a extração, o que facilita a dessorção de arsênio.

Diante do que foi exposto, no intuito de melhorar a eficiência da etapa de eluição e recuperação do arsênio, foi realizado um estudo variando a concentração da solução de HCl na faixa de $0,10$ - $1,25 \text{ mol L}^{-1}$. Para esse estudo, foi fixado o valor de pH 4,0 durante o ciclo de extração. Os resultados são mostrados na Figura 4 a seguir.

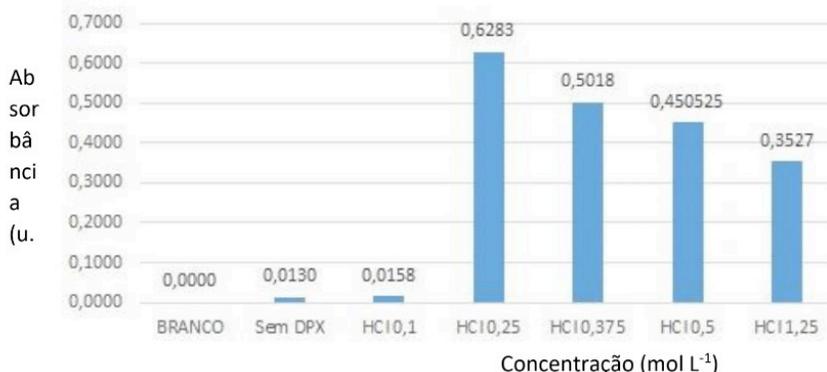


Figura 4. Estudo da variação da concentração da solução de HCl como eluente para recuperação de arsênio por dessorção (Obs.: Água deionizada foi tomada como amostra em branco. O teste sem DPX representa a leitura da solução controle de As³⁺ 20,0 µg L⁻¹).

Fonte: Os autores (2022).

A concentração de HCl 0,25 mol L⁻¹ foi escolhida como a melhor condição para aprimorar a recuperação do arsênio durante a eluição. Essa concentração representa um ganho de sinal de 48,33 vezes em relação ao sinal obtido da solução controle, que não passou pelo procedimento de extração DPX. Concentrações maiores do eluente HCl passam a contribuir mais para a degradação da rede cristalina mineral da sílica, reduzindo a dimensão das partículas de argila dispersas, e aumentando conseqüentemente a superfície de contato do adsorvente. Isso faz com que a dessorção do arsênio seja dificultada, resultando numa queda na capacidade de recuperação do arsênio.

A melhora do sinal alcançado para o arsênio recuperado na etapa de eluição se torna primordial para promover boa sensibilidade de detecção no sistema HG-AAS. Visando a aplicação em amostras de águas naturais, espera-se que os prováveis níveis de arsênio oriundos por fontes de contaminação se enquadrem em uma ordem de grandeza muito baixa. Para tanto, é fundamental certificar que a técnica analítica escolhida para detecção, apresente capacidade para quantificar concentrações a níveis por partes por bilhão (ppb, equivalente a µg L⁻¹) com precisão e exatidão aceitáveis.

A sensibilidade de detecção de As^{III} pelo sistema HG-AAS foi checada através da construção de uma curva de calibração (Figura 5), do qual pôde-se verificar que os limites de detecção e quantificação obtidos pelo equipamento foram respectivamente 2,52 e 8,42 µg L⁻¹ respectivamente.

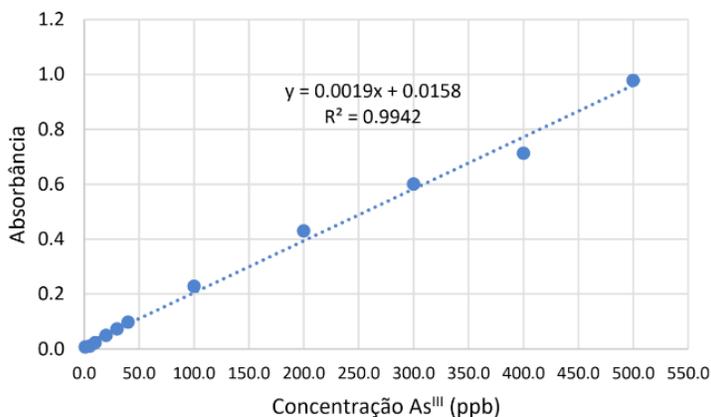


Figura 5. Curva de calibração obtida para padrões aquosos de As³⁺ no sistema HG-AAS.

Fonte: Os autores (2022).

A fim de garantir o comprometimento da detectabilidade de As³⁺ a níveis traço, frente a possibilidade de pré-concentração no momento em que se proporciona a recuperação do arsênio extraído pela argila, foram feitos ensaios de otimização multivariada das variáveis que influenciam o sistema HG-AAS. Os efeitos de cada variável estudada, bem como os efeitos de interação conjunta (de segunda ordem) entre as variáveis estão apresentadas no gráfico de Pareto (Figura 6). Os resultados foram tratados ao nível de 95% de confiança, dos quais podem ser considerados significativas as variáveis que apresentaram valor de efeito que ultrapassaram a linha de corte em $p=0,05$.

De acordo com o Gráfico de Pareto, a concentração do redutor NaBH₄ foi a variável que apresentou maior efeito significativo, sendo a de maior importância no sistema HG-AAS, seguido da concentração do HCl. Os efeitos positivos dessas variáveis indicam que maiores concentrações do redutor e do ácido favorecem o sinal analítico. A reação de geração do hidreto volátil de arsênio (AsH₃) é promovida pela ação do redutor em meio suficientemente ácido, para que haja a evolução de hidrogênio nascente, reativo com a espécie trivalente de arsênio.

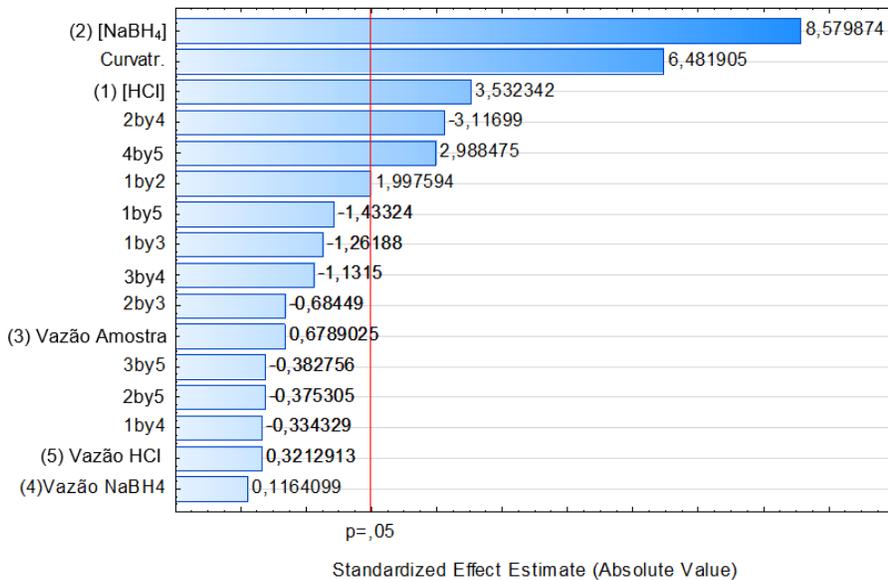


Figura 6. Gráfico de Pareto dos efeitos das variáveis obtidas pelo planejamento fatorial 2⁵.

Fonte: Os autores (2022).

Uma das principais vantagens da otimização multivariada em relação ao modo univariado, é a possibilidade de investigar a interação entre as variáveis, além do número reduzido de experimentos (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 1995). Tal fato pode ser observado pela importância da interação entre os efeitos das vazões do ácido e redutor, que isoladamente não apresentem qualquer efeito significativo sobre o sinal. O efeito positivo dessa interação (4'5) indica um comportamento sinérgico, com favorecimento da absorbância, quando as soluções do ácido e do redutor são introduzidas no sistema de fluxo do HG-AAS nos respectivos níveis maiores de vazão simultaneamente. A vazão da amostra não apresentou influência sobre o sinal de detecção, bem como sua interação com outras variáveis também não resultou em efeitos significativos.

Um outro aspecto importante que deve ser levado em consideração, é a contribuição da curvatura sobre o modelo matemático linear fornecido pelo planejamento fatorial. O experimento realizado nas condições do ponto central (nível 0), é importante para estimar o efeito da concavidade sobre o plano do domínio experimental. O gráfico de Pareto indica que o efeito da curvatura foi significativo, e que um modelo linear não se mostra adequado para uma estimativa das condições ótimas de detecção. Para tanto, um modelo matemático quadrático foi desenvolvido a partir da construção de uma matriz CCD (*Central Composite Desing*).

Para a construção do CCD foram tomadas as variáveis de maior importância indicadas pelo gráfico de Pareto, como a concentração do HCl, bem como a concentração e vazão do NaBH₄. Os novos níveis estudados para essas variáveis no Planejamento Composto Central partiram da indicação de triagem revelados pelo planejamento fatorial.

A vazão do HCl foi fixada em $4,5 \text{ mL min}^{-1}$ e não foi incluída na matriz CCD, uma vez que experimentos realizados em vazões maiores poderiam ocasionar a formação em excesso do gás H_2 que podem provocar diluição do hidreto volátil de ceta atomização de quartzo, comprometendo a sensibilidade de detecção, além do risco de ignição.

O tratamento dos resultados obtidos pela execução da matriz CCD, possibilitou a construção das superfícies de respostas quadráticas, dos quais são ilustradas nas Figuras 7A, 7B e 7C a seguir:

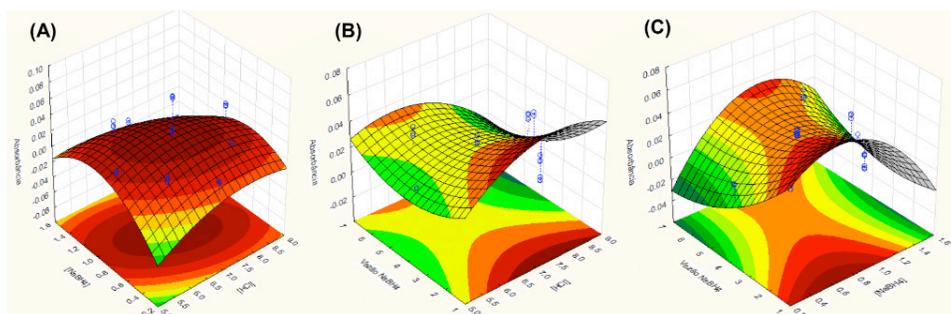


Figura 7. Superfícies de resposta obtidas por CCD. (A) $[\text{HCl}]$ e $[\text{NaBH}_4]$; (B) $[\text{HCl}]$ e vazão NaBH_4 ; (C) $[\text{NaBH}_4]$ e vazão NaBH_4 .

Fonte: Os autores

A Análise de Variância (ANOVA) indicou a razoabilidade do modelo quadrática, com uma variação explicada de 66,27% dos dados, com uma média de erro puro de $6,0 \cdot 10^{-6}$. As superfícies acusaram um ponto crítico que pode ser considerada representativa das condições ótimas de detecção pelo sistema HG-AAS, sendo elas: HCl $6,6 \text{ mol L}^{-1}$ e NaBH_4 0,9% (m/v), operando em uma vazão de $4,7 \text{ mL min}^{-1}$.

4 | CONCLUSÃO

A argila expandida se mostrou eficiente para adsorção de As^{3+} em meio aquoso, com remoção superior a 90%. O dispositivo de extração por DPX se mostrou uma alternativa viável para miniaturização, possibilitando a recuperação de arsênio e seu enriquecimento durante a eluição com HCl. Condições ótimas de detecção pelo sistema HG-AAS puderam ser estimadas por meio de ferramentas de otimização multivariada. A proposta deste trabalho se mostra promissora para remediar recursos hídricos contaminados com arsênio, além de abrir novas possibilidades para ser recuperado e usado como reagente de segunda geração.

REFERÊNCIAS

BJØRKLUND, G. et al. Arsenic intoxication: general aspects and chelating agents. *Archives of Toxicology*, v. 94, p. 1879-1897, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02739-w>

- BORBA, R. P.; FIGUEIREDO, B. R.; CAVALCANTI, J. A. Arsênio na água subterrânea em Ouro Preto e Mariana, Quadrilátero Ferrífero (MG). **Revista Escola de Minas**, v. 57, n. 1, p. 45-51, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672004000100009>
- BORDIN, D. C. M. *et al.* Disposable pipette tips extraction: Fundamentals, applications and state of the art. **Journal of Separation Science**, v. 39, p. 1168-1172, 2016. <https://doi.org/10.1002/jssc.201500932>
- CHATTERJEE, A. *et al.* Arsenic in ground water in six districts of West Bengal, India: the biggest arsenic calamity in the world. Part I. Arsenic species in drinking water and urine of the affected people. **Analyst**, v. 120, p. 643-350, 1995. <https://doi.org/10.1039/AN9952000643>
- CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 357, de 17 de março de 2005.
- EITH, C. *et al.* **Práticas em cromatografia de íons – Uma introdução**. Metrohm (monografia), 2ª ed., p. 142, 2006.
- FERNANDES, V. C. *et al.* Comparison of Disposable Pipette Extraction and Dispersive Solid-Phase Extraction in the QuEChERS Method for Analysis of Pesticides in Strawberries. **Journal of Chromatographic Science**, v. 52, p. 1339–1345, 2014. <https://doi.org/10.1093/chromsci/bmu003>
- LITTER, M.; MORGADA, M. E. Formas arsenicales en agua y suelos. In: Litter, M. I.; Armienta, M. A.; Farías, S. S. (Eds.). **Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos**. CYTED, Buenos Aires, AR, Chapter 1, p. 19-28, 2009.
- MIHUCZ, V. G. Regional and Global Scale Challenges for Controlling Arsenic Contamination in Agricultural Soil, Water Supplies, Foods and Ayurvedic Medicines. **Brazilian Journal of Analytical Chemistry**, v. 9, n.36, p. 14-51, 2022. <http://dx.doi.org/10.30744/bjrj.ac.2179-3425.RV119-2021>
- NETO, B. D. B. SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e Otimização de Experimentos**. 2ª ed., p. 299, 1995.
- PANIAGUA, C. E. S.; COSTA, B. E. S. ; COELHO, N. M. M. Procedimentos alternativos de adsorção no tratamento de efluentes: Uma triagem experimental. **Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia na Engenharia Química 2**, In: Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua. (Org.). 1ª ed. Ponta Grossa: Atena Editora, v. 1, p. 80-91, 2021. <https://doi.org/10.22533/at.ed.2552130067>
- PANIAGUA, C. E. S. *et al.*, Evaluation of Banana Peel Flour in natura and Modified with Thiosemicarbazide in the Adsorption of As(III) in Different Aqueous Matrices. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 2, p. 551-567, 2021. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20210008>
- PAULELLI, A. C. C. *et al.* Evaluation of uptake, translocation and accumulation of arsenic species by six different Brazilian rice (*Oryza sativa*) cultivars. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 169, p. 376-382, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.025>
- PINTO, M. A. L. *et al.* Disposable Pipette Extraction (DPX): Fundamental principles and applications. **Scientia Chromatographica**, v. 7, n. 2, p. 101-108, 2015. <https://doi.org/10.4322/sc.2015.019>
- REZENDE, P. S. *et al.* Arsenic Mobility in Sediments from Paracatu River Basin, MG, Brazil. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 68, p. 588-602, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00244-015-0134-y>

SANTOS, E. E. et al. Passion fruit peel flour as arsenic biosorbent for water treatment. **Práticas pedagógicas inovadoras e metodologias ativas no ensino de química nos períodos iniciais da graduação**. In: Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua. (Org.). 1ª ed. Ponta Grossa: Atena Editora, v. 1, p. 156-175, 2021. <https://doi.org/10.22533/at.ed.28021260815>

SANTOS, M. L. G. et al. Analysis and risk assessment of arsenic in rice from different regions of Brazil. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 99, n. 103853, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103853>

SILVA, W. R. et al. Development of a Disposable Pipette Extraction Method Using Coffee Silverskin as an adsorbent for chromium determination in wastewater samples by Solid Phase Extraction. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 33, n. 5, p. 498-507, 2022. <https://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20210171>

TOMASIN, G. S. et al. Highly sensitive determination of Cu(II) ions in hemodialysis water by F AAS after disposable pipette extraction (DPX) using Moringa oleifera as solid phase. **Microchemical Journal**, v. 161, n. 105749, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105749>

WHO, **Exposure to arsenic: A major public health concern**, 2010. Disponível em: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs210/en/print.html>. Acesso em: 21 nov. 2017.

CLEISEANO EMANUEL DA SILVA PANIAGUA - Técnico em Química pelo Colégio Profissional de Uberlândia (2008), Bacharel em Química pela Universidade Federal de Uberlândia (2010), Bacharel em Química pela Universidade de Uberaba (2011), em Ciências Biológicas (2021) e em Física (2022) pela Faculdade Única. Especialista em Metodologia do Ensino de Química e em Ensino Superior pela Faculdade JK Serrana em Brasília (2012), especialista em Ensino de Ciências e Matemática pelo Instituto Federal do Triângulo Mineiro (2021), especialista em Ciências Naturais e Mercado de Trabalho (2022) pela Universidade Federal do Piauí (UFPI). Mestre em Química pela Universidade Federal de Uberlândia (2015), com ênfase no desenvolvimento de um bioadsorvente para remoção de íons As(V), Sb(III) e Se(IV) em diferentes matrizes aquáticas. Doutorado em Química pela Universidade Federal de Uberlândia (2018), com ênfase em Processos Oxidativos Avançados [fotocatálise heterogênea ($\text{TiO}_2/\text{UV-A}$ e $\text{TiO}_2/\text{Solar}$, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV-C}$) para remoção de contaminantes de preocupação emergente (CPE) em diferentes matrizes aquáticas. Realizou o primeiro estágio de Pós-Doutorado (de maio de 2019 a junho de 2021) na Universidade Federal de Uberlândia com ênfase na aplicação de novos agentes oxidantes utilizando radiação solar para remoção de CPE em efluentes de uma estação de tratamento de esgoto. Atualmente está realizando sua segunda Prática de Pós-Doutorado (julho de 2021 - atual) na UFU na mesma linha de pesquisa. Atuei durante 11 anos como técnico químico no Instituto Federal de Goiás, tendo sido responsável pela análise de parâmetros físico-químicos e biológicos de água e efluentes de estação de tratamento de efluentes. Atualmente, vem atuando nas seguintes linhas de pesquisa: (i) Desenvolvimento de novas metodologias para tratamento e recuperação de resíduos químicos gerados em laboratórios de instituições de ensino e pesquisa; (ii) estudos de acompanhamento do CPE; (iii) Desenvolvimento de novas tecnologias avançadas para remoção de CPE em diferentes matrizes aquáticas; (iv) Aplicação de processos oxidativos avançados ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV C}$, $\text{TiO}_2/\text{UV-A}$ e foto-Fenton e outros) para remoção de CPE em efluentes de estação de tratamento de efluentes para reuso; (v) Estudo e desenvolvimento de novos bioadsorventes para remediação ambiental de CPE em diferentes matrizes aquáticas; (vi) Educação Ambiental e; (vii) alfabetização científica e processos de alfabetização na área de Ciências Naturais, especialmente biologia e química.

A

- Absorbância 56, 57, 61
Adsorção 53, 54, 57, 58, 62, 63
Adsorvente 2, 51, 53, 54, 55, 57, 58, 59
Afluência hídrica 39
Água potável 31, 32, 33, 35, 36, 37
Águas atmosféricas 32
Águas meteóricas 31, 32, 34, 36
Águas pluviais 31, 34, 36
Água tratada 31, 32, 33, 34, 36
Analito 54
Argila 2, 51, 54, 55, 57, 58, 59, 60, 62
Arsênio 2, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 62, 63

B

- Bacia do Rio Paraíba 41
Barragens 2, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 40

C

- Cloração 35
Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) 3, 7

D

- Desinfecção 34, 35
Dessorção 51, 57, 58, 59

E

- Ecosistema aquático 51
Entropia M 2, 13
Escassez hídrica 39
Espectrometria de Absorção Atômica por Chama com Geração de Hidretos (HG-AAS) 55
Estações fluviométricas 14, 15, 16, 17

F

- Fundo de Emergência Internacional das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) 33

I

Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) 33

Índice de Segurança de Barragens (ISB) 4, 10, 11

Índice de Sustentabilidade Ambiental de Segurança de Barragens (ISASB) 4

J

Jusante 1, 4, 9, 11, 24, 41, 44

L

Lâmpada de catodo oco 55

M

Mananciais 32

Medição de vazão 13, 15, 16, 17, 28, 30

Micro-organismos 35

Montante 2, 4, 8, 9, 10, 24

O

Organização das Nações Unidas (ONU) 33

Organização Mundial da Saúde (OMS) 32, 33, 53

P

Perfilador Acústico de Corrente por efeito Doppler (ADCP) 2

Plano de Ação de Emergência 2, 8

Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) 1, 2, 7, 11

Projeto de Integração do rio São Francisco 2, 38

R

Recursos hídricos 1, 2, 1, 3, 7, 8, 11, 12, 13, 29, 30, 42, 52, 62

Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) 2, 13, 14

Remediação 51, 53, 65

S

Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) 2

Sistema público de abastecimento de água 35

ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL:

RECURSOS HÍDRICOS & TRATAMENTO DE ÁGUA

3

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL:

RECURSOS HÍDRICOS & TRATAMENTO DE ÁGUA

3



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



www.facebook.com/atenaeditora.com.br