

RISK ASSESSMENT ON TRIHALOMETHANES IN THE URBAN WATER SUPPLY SYSTEM IN NATAL/RN/BRAZIL

L. C. MEDEIROS*, J. A. NAVONI, A. L. C. ARAUJO, A. S. D. dos ANJOS, V. S. do AMARAL
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Departamento de Recursos Naturais, Natal, RN, Brasil.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4450-1136>
luciana.castrom@gmail.com*

Submetido 30/10/2024 - Aceito 23/12/2024

DOI: 10.15628/holos.2024.17958

ABSTRACT

Water intended for human consumption must not pose health risks. Therefore, quantitative risk assessments are essential tools for analyzing contamination risks in public water supply systems. This study aims to evaluate the carcinogenic and non-carcinogenic risks associated with exposure to contaminants present in the treated water distributed by the Extremoz Lagoon Water Treatment Plant. The results showed the formation of trihalomethanes (THMs)—carcinogenic compounds—in concentrations

above regulatory limits during the water treatment process. Quantitative risk assessments indicated that the distributed water poses a potential health hazard, both for non-carcinogenic and carcinogenic risks, due to exposure to THMs. Accordingly, there is an urgent need to mitigate exposure and conduct epidemiological studies to better understand the health impacts of these substances.

KEYWORDS: non-carcinogenic risk, carcinogenic risk, trihalomethanes, safe water.

AVALIAÇÃO DE RISCO DE TRIHALOMETANOS NO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA URBANA EM NATAL/RN/BRAZIL

RESUMO

A água destinada ao consumo humano não deve representar riscos à saúde. Assim, as avaliações quantitativas de risco são ferramentas essenciais para analisar os riscos de contaminação em sistemas públicos de abastecimento de água. Este estudo tem como objetivo avaliar os riscos carcinogênico e não carcinogênico decorrentes da exposição a contaminantes presentes na água tratada distribuída pela Estação de Tratamento da Lagoa de Extremoz. Os resultados demonstraram a formação de trihalometanos (THM) — compostos carcinogênicos —

em concentrações superiores aos limites estabelecidos pela legislação durante o processo de tratamento da água. As avaliações quantitativas de risco indicaram que a água distribuída representa um potencial risco à saúde, tanto do ponto de vista carcinogênico quanto não carcinogênico, devido à exposição aos THM. Diante disso, há uma necessidade urgente de mitigar a exposição e realizar estudos epidemiológicos para aprofundar o conhecimento sobre os impactos dessas substâncias na saúde pública.

PALAVRAS-CHAVE: risco não carcinogênico, risco carcinogênico, trihalometanos, água potável.

1. INTRODUÇÃO

Um sistema de tratamento de água eficaz, seguro e confiável é fundamental para a saúde pública, bem como para o desenvolvimento sustentável (Lindhe et al, 2011). Nesse contexto, a gestão e o gerenciamento de riscos associados ao consumo da água potável estão se tornando cada vez mais importantes em todo o mundo. A análise de risco em sistemas de abastecimento de água potável deve ser abrangente, incluindo as etapas de tratamento e distribuição, e capaz de detectar as interações complexas entre componentes e os eventos bem como a natureza dos riscos (Burgman, 2005; Hrudehy et al., 2006; Cox, 2008; Bartram, et al., 2009; Lindhe et al., 2009; Lindhe et al., 2011; Nascimento et al., 2016; Sorlini et al., 2017).

Portanto, a segurança da água para o consumo humano deve garantir que a presença de patógenos e substâncias químicas tóxicas não represente riscos à saúde pública, impactos ambientais ou à qualidade de vida dos consumidores. A água é um dos principais vetores de disseminação de microrganismos e compostos carcinogênicos, como metais pesados, toxinas e subprodutos da desinfecção (WHO, 2011; Brasil, 2013; Jalba et al., 2010; Sanches et al., 2015; Sorlini et al., 2017). Essa situação pode se agravar em regiões de escassez hídrica, onde a distribuição territorial da água é desigual e a demanda é crescente, especialmente em sistemas produtivos, gerando cenários críticos de disponibilidade hídrica (Pinheiro et al., 2018).

Contudo, no tratamento de água, o processo de desinfecção pode gerar riscos potenciais à saúde. Isso ocorre porque desinfetantes químicos, como o cloro, ao reagirem com íons naturalmente presentes na água (especialmente brometo e iodeto), formam subprodutos da desinfecção (SPD), notadamente os trihalometanos (THM), os quais são potencialmente tóxicos e carcinogênicos (Richardson et al., 2007; Medeiros et al., 2019). Os THM são compostos voláteis, permitindo a exposição humana não apenas por ingestão, mas também por inalação e absorção dérmica (Nieuwenhuijsen et al., 2009). Entretanto, avaliações de risco dos trihalometanos na água de consumo humano mostraram que a exposição oral é a via que mais contribui para a absorção e aumento do risco associado aos THM (Kumari et al., 2015; Pan et al., 2014; Caylak, 2012).

Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar os riscos carcinogênico e não carcinogênico decorrentes da exposição aos trihalometanos formados após o tratamento de potabilização da água distribuída para consumo público.

2. METODOLOGIA

2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na rede de distribuição de água tratada da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Lagoa de Extremoz, localizada no município de Extremoz, na região metropolitana de Natal, estado do Rio Grande do Norte, no semiárido nordestino do Brasil (Martins, 2015; Marengo et al., 2011; Marengo; Cunha; Alves, 2016). (Figura 1).

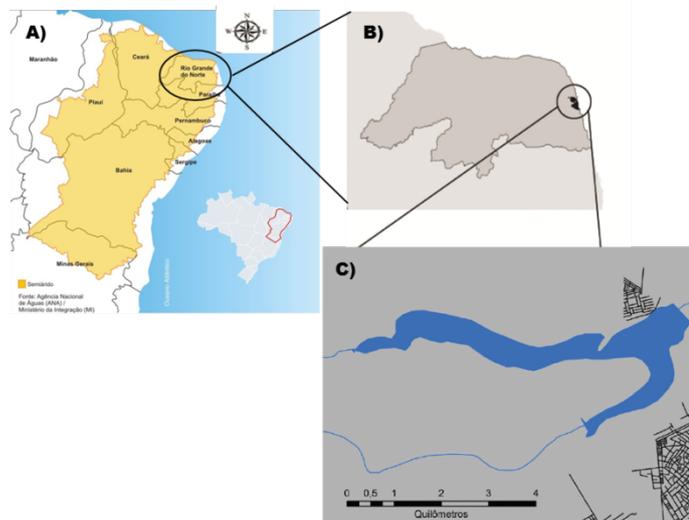


Figura 1 – Mapa de Localização da Lagoa de Extremoz/RN – A) Delimitação do Semiárido brasileiro; B) Localização do Município de Extremoz/RN; C) Lagoa de Extremoz. (Fonte: adaptação de Brasil, 2005; Pinto e Becker, 2014)

A ETA Extremoz trata uma vazão de aproximadamente 650 L/s funcionando por filtração direta e abastece 60% da população da zona norte de Natal (Oliveira et al, 2020). O tratamento da água é realizado pelas etapas de pré oxidação (adição de cloro), coagulação (adição de hidroxocloreto de alumínio), filtração direta rápida e desinfecção (adição de cloro).

As coletas foram realizadas mensalmente de abril/2017 a março/2018, em dois pontos da rede de distribuição: água tratada no início da rede (IR) – próximo ao reservatório de distribuição no Bairro Lagoa Azul; e água tratada no fim de rede (FR) - um dos últimos pontos de coleta da rede no Bairro da Redinha. Esses pontos de coleta não têm inferência de mistura com água subterrânea.

2.2. ANÁLISE DA ÁGUA

Os procedimentos de coleta, preservação, armazenamento e as metodologias de análises físico-químicas e biológicas das amostras foram realizados de acordo com as recomendações da APHA et al (2012).

Foram realizadas análises físico-químicas em duplicata (cor, turbidez, temperatura, pH, cloro residual livre, THM e seus componentes, carbono orgânico total, UV 254nm, matéria orgânica natural/oxigênio consumido (MON); e microbiológicas (coliformes totais e *Escherichia coli*).

A temperatura foi mensurada in situ com termômetro digital. O pH foi determinado por potenciometria com peagâmetro; a turbidez, por método nefelométrico com turbidímetro. Cor aparente e verdadeira, cloro residual livre e absorvância em 254 nm foram determinados por espectrofotometria UV-visível. O carbono orgânico total (COT) foi analisado por combustão a alta temperatura com detecção por infravermelho não dispersivo (NDIR).

As análises microbiológicas seguiram o método dos tubos múltiplos para quantificação de coliformes totais e *E. coli*.

As análises de COT e absorvância UV254nm são utilizadas como indicadoras da presença de matéria orgânica. A determinação de MON, conforme a ABNT (1989), baseia-se na oxidação da matéria orgânica por permanganato em meio ácido a quente, usando método titulométrico.

A análise de THM e seus componentes seguiu a metodologia de cromatografia em fase gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC/MS), segundo a norma USEPA 8260B (USEPA, 1996), com limites de detecção inferiores a 1,5 µg/L para todos os compostos analisados.

2.3. AVALIAÇÃO DE RISCO PARA A SAÚDE HUMANA

A distribuição de água pela ETA Extremoz é heterogênea. Por isso, as concentrações das substâncias tóxicas foram ponderadas considerando o volume distribuído em dois pontos distintos da rede. Em seguida, os dados foram comparados aos limites estabelecidos por legislações nacionais e internacionais.

Os parâmetros toxicológicos que excederam os limiares estabelecidos foram incluídos na avaliação de risco. Inicialmente, foi determinado o nível de exposição para cada substância, considerando diferentes vias de exposição. Os riscos carcinogênicos e não carcinogênicos das substâncias acima dos limites permitidos foram estimados com base na via de exposição, população potencialmente exposta, magnitude, duração e frequência de exposição, considerando o perfil dos compostos químicos e da população local (USEPA, 2002; IBGE, 2017).

Como os THM são compostos orgânicos voláteis, as exposições por inalação e via dérmica durante atividades domésticas são relevantes. Assim, ingestão, inalação e contato dérmico foram consideradas.

As doses diárias crônicas (CDI) para as diferentes vias foram calculadas conforme fórmulas descritas por Pan et al. (2014), Caylak (2012) e USEPA (2002).

$$CDI_{\text{ingestão}} = \frac{C_w \times IR \times EF \times CF1}{BW \times AT} \quad (1)$$

Onde, $CDI_{\text{ingestão}}$ = dose diária crônica por ingestão (mg/kg dia); C_w = concentração do químico na água potável ($\mu\text{g/L}$); IR = taxa de ingestão de água (L/dia); EF = frequência de exposição (dias/ano); ED = duração da exposição (anos); BW = peso corporal (kg); AT = tempo médio; e $CF1$ = fator de conversão de μg para mg (0,001).

Pela via dérmica o CDI para água potável pode ser estimado através da equação:

$$CDI_{\text{dérmica}} = \frac{C_w \times SA \times K_p \times EB \times EF \times ED \times CF1 \times CF2}{BW \times AT} \quad (2)$$

Onde, $CDI_{\text{dérmica}}$ = dose diária crônica por contato dérmico (mg/kg dia); C_w = concentração do químico na água potável ($\mu\text{g/L}$); SA = área da pele exposta a água (cm^2); K_p = coeficiente de permeabilidade dérmica (cm/hr); EB = tempo de duração de exposição durante o banho (hora/banho); EF = frequência de exposição (dias/ano); ED = duração da exposição (anos); BW = peso corporal (kg); AT = tempo médio; $CF1$ = fator de conversão de μg para mg (0,001); $CF2$ = fator de conversão de unidade ($\text{L}/1.000 \text{ cm}^3$) (0,001).

$$CDI_{\text{inalatória}} = \frac{C_{ar} \times R \times t \times F \times EF \times ED \times CF1}{BW \times AT} \quad (3)$$

Onde, $CDI_{\text{inalatória}}$ = dose diária crônica por contato inalatório (mg/kg dia); C_{ar} = concentração do químico no ar atmosférico de contato ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$); R = quantidade de ar inalado (cm^3/min); t = tempo do banho (min); F = frequência de banho (dias); EF = frequência de exposição (dias/ano); ED = duração da exposição (anos); BW = peso corporal (kg); AT = tempo médio; e $CF1$ = fator de conversão de μg para mg (0,001).

Após essas determinações, o Quociente de Risco (HQ) foi calculado para cada via de exposição, dividindo-se o CDI pela dose de referência (RfD) para ingestão, contato dérmico e/ou inalação, conforme apropriado. Os valores de RfD foram obtidos da USEPA (2002) ou do banco de dados Risk Assessment Information System (RAIS).

$$HQ(1,2,3) = \frac{CDI}{RfD}$$

Se $HQ > 1$, há preocupação com efeitos não carcinogênicos. Para múltiplas exposições, o Índice de Perigo (HI) é a soma dos HQs. Se $HI > 1$, há risco potencial à saúde (Caylak, 2012).

O risco carcinogênico (CR) é calculado multiplicando-se o CDI pelo fator de inclinação carcinogênico (SF). Valores de $CR > 1 \times 10^{-5}$ indicam risco significativo à saúde.

Os seguintes valores foram utilizados: IR = 2 L/dia; EF = 350 dias/ano; ED = 26 anos; BW = 80 kg; AT = 26.600 dias; SA = 19.652 cm²; EB = 0,67077 h; R = 20 m³/dia; t = 0,67077 h.

2.4. ANÁLISE DOS DADOS

Para avaliar a variação dos contaminantes ao longo do sistema de distribuição, foi aplicada ANOVA de medidas repetidas. Além disso, foi utilizada ANOVA *one-way* para verificar a influência da sazonalidade, categorizando os períodos como chuvoso ou seco, com base na taxa pluviométrica. Os estimadores de risco foram calculados utilizando o software RAIS.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA

Os resultados das análises físico-químicas da água distribuída na zona norte de Natal indicaram que não há diferença estatisticamente significativa entre os pontos de início e final da rede de distribuição. A água apresenta pH neutro, turbidez ligeiramente acima do limite permitido e cor aparente entre duas e três vezes superior ao valor máximo estabelecido pela legislação. Observou-se também concentração de cloro residual livre inferior ao valor mínimo recomendado (0,2 mg/L) no início da rede. Por outro lado, as análises de COT e MON evidenciaram a presença de matéria orgânica acima do recomendado (Tabela 1).

Tabela 1 - Média e desvio padrão dos parâmetros físico-químicos nas amostras do início e do final da rede de distribuição da Rota 2 da ETA Extremoz durante os dez meses de coleta.

Parâmetros	VR*	AMOSTRAS				valor <i>p</i>
		IR	±DP	FR	±DP	
pH	-	6,89	0,33	6,95	0,17	N.S.

Temp (Cº)	-	28,78	0,44	28,89	0,33	N.S.
Turb (NTU)	5	5,76	2,85	4,69	2,00	N.S.
Cor Apar (Pt-Co)	15	44,48	21,83	35,67	15,55	N.S.
Cor Verd (Pt-Co)	-	9,52	6,42	10,63	4,61	N.S.
Cloro (mg.L ⁻¹)	0,2 a 5	0,09	0,11	0,45	0,59	N.S.
COT (mg.L ⁻¹ C)	2**	7,68	1,73	7,83	1,28	N.S.
MON (mg.L ⁻¹ OC)	-	4,31	1,70	5,08	1,14	N.S.
UV _{254nm}	-	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	N.S.

IR = amostra coletada no início da rede de distribuição; FR = amostra coleta no final da rede de distribuição; pH = potencial hidrogênico; Temp. = temperatura; Turb = turbidez; Cor Apar = cor aparente; Cor Verd = cor verdadeira; Cloro = cloro residual livre; COT = carbono orgânico total; MON = matéria orgânica natural; UV254nm = absorvância a 254 nm.

<LOD = menor que o limite de detecção.

*Valores de referência de acordo com Brasil (2021).

** Valor de referência de acordo com USEPA (2009).

Nascimento et al. (2016) observaram que o decaimento do cloro residual livre ao longo da rede está relacionado à elevada taxa de reação com a matéria orgânica presente na água e nos sedimentos das tubulações, além da operação intermitente, que favorece a estagnação da água na adutora e no reservatório de distribuição. Esse comportamento foi confirmado na rede da ETA Extremoz, onde o cloro reagiu significativamente com a matéria orgânica, resultando em concentrações abaixo do recomendado. A elevada temperatura da água também contribui para acelerar esta reação e o decaimento das concentrações de cloro (Rodriguez; Serodes, 2001).

Desta forma, percebe-se que a presença de matéria orgânica é um fator importante no decaimento da concentração de cloro residual livre na água da rede de distribuição. Contudo, a diferença de teor de cloro no início da rede é explicada pela ocorrência de reforço da cloração ao longo da tubulação, a fim de elevar a concentração de CRL para teores exigidos e garantir a desinfecção da água até o consumidor final.

No entanto, as análises microbiológicas demonstraram que a água distribuída não apresenta indícios de contaminação fecal, pois todas as amostras apresentaram ausência de coliformes totais e *Escherichia coli* (Tabela 2). Esses dados mostram que, apesar da concentração de cloro residual livre estar abaixo do limite mínimo exigido, a desinfecção da água foi eficiente no controle microbiológico, corroborando os achados de Guzzella et al. (2004) e da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011).

Tabela 2 - Detecção dos parâmetros micro e hidrobiológicos nas amostras do início e do final da rede de distribuição da Rota 2 da ETA Extremoz durante os dez meses de coleta.

Parâmetro	AMOSTRAS					valor <i>p</i>
	VR*	IR	±DP	FR	±DP	
CT (NMP/100ml)	Ausente	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	N.S.
EC (NMP/100ml)	Ausente	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	N.S.

CT = coliformes totais; EC = Escherichia coli.

<LOD = menor que o limite de detecção.

*Valores de referência de acordo com Brasil (2021).

Os resultados dos trihalometanos na rede de distribuição da ETA Extremoz mostram elevados níveis de THM total, 10 vezes acima do permitido em legislação, principalmente, o clorofórmio. Em vários estudos, esta é a espécie de THM mais predominante em água tratada (Fujie et al, 1990; Baytak et al, 2008; Kumari et al, 2015). O bromodiclorometano ficou um pouco acima do permitido pela WHO (2011) e o dibromoclorometano ficou abaixo do limite permitido. O estudo de Oliveira et al (2020) na rede de distribuição da ETA Extremoz também detectou concentrações de THM total 7 vezes acima do permitido. Essa autora também detectou as maiores concentrações de clorofórmio (80% dos THMt), seguido do diclorobromometano, dibromoclorometano e bromofórmio. Esta última espécie não foi detectada no presente estudo, provavelmente pela diferença do limite de quantificação da metodologia utilizada (Tabela 3).

Tabela 3 – Detecção de substâncias tóxicas nas amostras do início e do final da rede de distribuição da Rota 2 da ETA Extremoz durante os dez meses de coleta.

Parâmetros	VR	AMOSTRAS				valor <i>p</i>
		IR	DP	FR	DP	
TCM ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	300*	959,67	1273,78	1082,14	1287,15	N.S.
BDCM ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	60*	58,94	20,16	68,80	28,83	N.S.
DBCM ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	100*	15,52	6,53	16,30	8,26	N.S.
TBM ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	100*	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	N.S.
THMt ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	100**	1034,12	1280,47	1167,24	1284,66	N.S.

<LOD = menor que o limite de detecção.

* Valor de referência de acordo com WHO (2011).

** Valores de referência de acordo com Brasil (2021).

Ao avaliar a formação de trihalometanos sob a influência climática em região tropical, os resultados mostraram que os valores de clorofórmio e THM totais foram diferentes conforme as estações seca e chuvosa, apresentando valores significativamente maiores em época de alta pluviosidade: (TCM: 185,6 vs 1689,1 ANOVA <0,010; THMt:257,1 vs 1775,5 ANOVA p <0,010). Esses resultados, quando comparados aos encontrados por OLIVEIRA et al (2020) no mesmo local, mostram que no período chuvoso a concentração de THM aumenta, podendo estar relacionado ao aumento da turbidez orgânica dissolvida na água bruta. Neste mesmo sentido, em regiões temperadas, os maiores valores de THM encontrados foram nas estações da primavera e inverno devido ao aumento da concentração de carbono orgânico não-purgável, enquanto que foram observados valores abaixo do limite permitido ($100 \mu\text{g.L}^{-1}$) no verão e no outono, mesmo com temperatura mais constantes (Baytak et al, 2008).

Fica evidente que as elevadas concentrações de THM detectadas na rede de distribuição de uma região tropical, além de estarem associadas à qualidade da água bruta, podem estar associadas à presença de biofilmes ao longo das tubulações e às elevadas temperaturas da água. De acordo com Wang et al. (2013), o carbono microbiano presente no biofilme contribui para a formação de SPD, sendo os THM detectados em maiores concentrações quando comparados aos demais subprodutos. Os autores ainda associam a formação de maiores quantidades de THM em detrimento dos demais SPD, em função da composição bioquímica do biofilme quando este está presente em tubulações de policloreto de vinila (PVC). Dessa forma, o fato de o material da tubulação, dos pontos da rede de distribuição em que as amostras foram coletadas, possivelmente ser de PVC, pode contribuir para a alteração das características do biofilme que venham a existir e consequentemente contribuir para a formação de THM, além de outras classes de SPD.

3.2 AVALIAÇÃO DE RISCO QUANTITATIVO

Diante dos resultados obtidos, verificou-se que os parâmetros de interesse toxicológico que excederam os limiares de segurança foram os trihalometanos (THM), especialmente o clorofórmio. A avaliação de risco quantitativa considerou as vias de exposição oral, dérmica e inalatória, permitindo estimar os níveis de risco à saúde da população. Tais avaliações são ferramentas necessárias a fim de complementar e/ou suportar análises de risco em sistema de abastecimento público (Lindhe et al, 2009; Burgman, 2005; Cox, 2008).

A Tabela 4 mostra os resultados encontrados nos índices multiexposição no início e no final da rede de distribuição da água tratada na ETA Extremoz, considerando cada composto de trihalometanos e, a soma deles, os totais.

Tabela 4 - Quociente de Perigo (HQ) em cada via de exposição, Índice de Perigo (HI) e Risco Carcinogênico (RC) de cada espécie de THM e os THMt nos dois pontos amostrais da rede de distribuição da água tratada da Lagoa de Extremoz.

	Amostras							
	IR				FR			
	HQ _{ig}	HQ _d	HQ _{in}	HI	HQ _{ig}	HQ _d	HQ _{in}	HI
TCM	3,32	0,286	4,71	8,31	3,74	0,322	5,31	9,37
BDCM	0,102	0,00688	-	0,109	0,119	0,00803	-	0,127
DCBM	0,0268	0,00173	-	0,0286	0,0282	0,00182	-	0,03
THMt	3,45	0,294	4,71	8,45	3,89	0,332	5,31	9,53
RC total	0,00442				0,005			

TCM = clorofórmio; BDCM = bromodictlorometano; DCBM = dibromoclorometano; THMt = trihalometanos totais; HI = índice de perigo; RC = risco carcinogênico; HQ_{ig} = quociente de perigo da ingestão; HQ_d = quociente de perigo do contato dérmico; HQ_{in} = quociente de perigo da inalação.

Os resultados apontaram que o Índice de Perigo (HI) relacionado aos THM esteve de 8 a 9 vezes acima do limite de segurança em ambos os pontos de amostragem (início e final da rede), indicando elevado risco não carcinogênico. Entre os compostos analisados, o clorofórmio foi o que mais contribuiu para esse risco, tanto por sua alta concentração quanto por sua volatilidade, que intensifica a exposição inalatória (RAIS, 2018).

O risco carcinogênico pode ser definido como a probabilidade de um indivíduo desenvolver câncer em sua vida útil pela exposição a um potencial carcinógeno. Desta forma, o RC dos THMs está diretamente ligado a forma de exposição, a quantidade e a frequência de exposição de cada composto. Villanueva et al. (2017) associaram a exposição prolongada aos THM a incidências de câncer de bexiga e colorretal, além de outros efeitos adversos à saúde.

O risco carcinogênico (RC) estimado também foi alarmante, apresentando valores entre 400 e 500 vezes acima do limite aceitável ($<1 \times 10^{-5}$) (RAIS, 2018; Caylak, 2012), o que sugere uma probabilidade elevada de desenvolvimento de câncer devido à exposição contínua aos THM, especialmente pelo clorofórmio. Esses achados estão em concordância com o estudo de Kumari et

al. (2015) que também apresentou o clorofórmio como o composto com maior risco carcinogênico, porém pela rota oral. Por outro lado, estudos que não consideraram os valores das concentrações de clorofórmio obtiveram baixo risco carcinogênico de THMs em água tratada (Pan et al, 2014).

A avaliação dos riscos demonstra que a via inalatória, muitas vezes negligenciada em outros estudos (López-Roldán et al, 2016; Caylak, 2012), teve contribuição significativa para o aumento do risco, especialmente considerando as condições locais de alta temperatura, que favorecem a volatilização dos compostos. Esse aspecto reforça a necessidade de estratégias de mitigação, como o controle rigoroso da formação de subprodutos da desinfecção e a melhoria dos processos de tratamento da água.

Diante do exposto, a avaliação quantitativa dos riscos carcinogênicos para os THMs reflete um cenário toxicológico mais realista, pois considera a concentração real, a forma de exposição e o modo de ação de cada composto halogenado na saúde humana. Assim, há uma melhor compreensão sanitária dos THMs relacionados às incertezas remanescentes em relação aos seus potenciais riscos à saúde quando comparados as análises com modelos experimentais laboratoriais (Medeiros et al, 2019).

4. CONCLUSÃO

As análises realizadas demonstraram que a água distribuída pela ETA Extremoz apresenta riscos significativos à saúde da população, tanto do ponto de vista não carcinogênico quanto carcinogênico, devido às elevadas concentrações de trihalometanos, sobretudo o clorofórmio. A volatilidade desse composto implica que, além da ingestão, a inalação é uma via de exposição relevante e que deve ser considerada nas avaliações de risco.

Diante desse cenário, é imperativo que sejam adotadas medidas de mitigação para reduzir a formação de THM no processo de tratamento, bem como estratégias de monitoramento contínuo da qualidade da água distribuída. Além disso, recomenda-se a realização de estudos epidemiológicos complementares, que possibilitem avaliar com maior precisão os impactos desses compostos na saúde da população exposta.

Por fim, a implementação de planos de segurança da água e a modernização dos sistemas de tratamento, aliadas a uma gestão eficiente, são fundamentais para garantir a proteção da saúde pública e a melhoria da qualidade da água ofertada.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10739:1989. Água – Determinação de oxigênio consumido. Método do permanganato de potássio. Rio de Janeiro, 1989.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22. ed. Washington, D.C.: APHA, 2012.
- BARTRAM, J. et al. Water safety plan manual: step-by-step risk management for drinking-water suppliers. Geneva: World Health Organization, 2009.
- BURGAMN, M. A. Risks and decisions for conservation and environmental management. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe 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, 5 maio 2021.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Plano de segurança da água: garantindo a qualidade e promovendo a saúde: um olhar do SUS. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2013.
- CAYLAK, E. Health risk assessment for trace metals, polycyclic aromatic hydrocarbons and trihalomethanes in drinking water of Cankiri, Turkey. E-Journal of Chemistry, v. 9, n. 4, p. 1976-1991, 2012.
- COX, A. L. What's wrong with risk matrices? Risk Analysis, v. 28, n. 2, p. 497-512, 2008.
- GUZZELLA, L. et al. In vitro potential genotoxic effects of surface drinking water treated with chlorine and alternative disinfectants. Mutation Research, v. 564, p. 179–193, 2004.
- HRUDEY, S. E.; HRUDEY, E. J.; POLLARD, S. J. T. Risk management for assuring safe drinking water. Environment International, v. 32, p. 948–957, 2006.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Tábuas completas de mortalidade para o Brasil – 2016: breve análise da evolução da mortalidade no Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: ftp://ftp.ibge.gov.br/Tabuas_Completas_de_Mortalidade/Tabuas_Completas_de_Mortalidade_2016/tabua_de_mortalidade_2016_analise.pdf. Acesso em: 15 maio 2024.
- JALBA, D. I. et al. Safe drinking water: critical components of effective inter-agency relationships. Environment International, v. 36, n. 1, p. 51-59, 2010.
- KUMARI, M.; GUPTA, S. K.; MISHRA, B. K. Multi-exposure cancer and non-cancer risk assessment of trihalomethanes in drinking water supplies – a case study of Eastern region of India. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 113, p. 433–438, 2015.
- LINDHE, A. et al. Fault tree analysis for integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems. Water Research, v. 43, n. 6, p. 1641–1653, 2009.

- LINDHE, A. et al. Cost-effectiveness analysis of risk-reduction measures to reach water safety targets. *Water Research*, v. 45, p. 241–253, 2011.
- LÓPEZ-ROLDÁN, R. et al. Assessment of the water chemical quality improvement based on human health risk indexes: application to a drinking water treatment plant incorporating membrane technologies. *Science of the Total Environment*, v. 540, p. 334–343, 2016.
- MARENGO, J. A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In: INSA – Instituto Nacional do Semiárido. *Semiárido brasileiro: pesquisas e desenvolvimento*. Campina Grande: INSA, 2011. p. 383–422.
- MEDEIROS, L. C. et al. Toxicological aspects of trihalomethanes: a systematic review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 6, p. 5316–5332, 2019.
- NASCIMENTO, R. S. et al. Changes simulation in a conventional ETA midsize to safe water production. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 2, p. 439–450, 2016.
- NIEUWENHUIJSEN, M. et al. The epidemiology and possible mechanisms of disinfection by-products in drinking water. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, v. 367, p. 4043–4076, 2009.
- OLIVEIRA, R. R.; ARAÚJO, A. L. C.; DUARTE, M. A. C. Estudo do potencial de formação de trihalometanos na água da Lagoa de Extremoz-RN. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 2, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020181889>.
- PAN, S. et al. Cancer risk assessment on trihalomethanes and haloacetic acids in drinking water of China using disability-adjusted life years. *Journal of Hazardous Materials*, v. 280, p. 288–294, 2014.
- PINHEIRO, L. G. et al. Avaliação da sustentabilidade do processo de dessalinização de água no semiárido potiguar: estudo da comunidade Caatinga Grande. *Sociedade e Natureza*, v. 30, n. 1, p. 132–157, 2018.
- Pinto, T. S.; Becker, V. Diel dynamic of phytoplankton functional groups in a tropical water supply, Extremoz Lake, northeastern Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 26, n. 4, p. 356-366, 2014.
- RAIS - The Risk Assessment Information System. Disponível em: <http://rais.ornl.gov/index.shtml>. Acesso em: 10 maio 2024.
- RODRIGUEZ, M. J.; SÉRODES, J.-B. Spatial and temporal evolution of trihalomethanes in three water distribution systems. *Water Research*, v. 35, n. 6, p. 1572–1586, 2001.
- SORLINI, S. et al. Water Safety Plan for drinking water risk management: the case study of Mortara (Pavia, Italy). *Revista Ambiente & Água*, v. 12, n. 4, 2017.
- SANCHES, S. M. et al. Chemical and microbiological analysis of public school water in Uberaba Municipality. *Revista Ambiente & Água*, v. 10, n. 3, 2015.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. EPA 8260B: Volatile Organic Compounds by Gas Chromatography/ Mass Spectrometry (GC/MS). Washington, D.C., 1996.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. National Primary Drinking Water Regulation. Stage 1 and 2 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rules. Washington, D.C., 2009.



UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part A). Washington, D.C., 2002. Disponível em: <https://www.epa.gov/risk/risk-assessment-guidance-superfund-volume-i-human-health-evaluation-manual-supplemental>. Acesso em: 15 maio 2024.

VILLANUEVA, C. M. et al. Colorectal cancer and long-term exposure to trihalomethanes in drinking water: a multicenter case-control study in Spain and Italy. *Environmental Health Perspectives*, v. 125, n. 1, 2017.

WANG, Z.; CHOI, O.; SEO, Y. Relative contribution of biomolecules in bacterial extracellular polymeric substances to disinfection byproduct formation. *Environmental Science and Technology*, v. 47, n. 17, p. 9764-9773, 2013.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Guidelines for drinking-water quality. 4. ed. Geneva: WHO, 2011. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>. Acesso em: 15 maio 2024.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Castro Medeiros, L., Navoni, J., Araújo, A. L., dos Anjos, A., & Amaral, V. (2025). AVALIAÇÃO DOS RISCOS À SAÚDE EM ABASTECIMENTO PÚBLICO ASSOCIADOS AO TRATAMENTO DE ÁGUA. *HOLOS*, 7(40). Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/17958>

ABOUT THE AUTHORS

Luciana de Castro MEDEIROS

Visiting Professor in the Graduate Program in Sustainable Use of Natural Resources (PPgUSRN) at the Academic Directorate of Natural Resources at the Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Norte (IFRN) – Natal Central Campus. PhD in Development and Environment (PRODEMA/UFRN). Master's degree in Sanitary Engineering (UFRN). Her main research interests are in the fields of Limnology, Microbiology, and Environmental Ecology, with an emphasis on water and wastewater analysis.

E-mail: luciana.castrom@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4450-1136>

Julio Alejandro NAVONI

Permanent Professor in the Graduate Program in Development and Environment (PRODEMA/UFRN) and in the Doctoral Program in Development and Environment, a Full Network Association (DDMA/UFRN). PhD in Pharmacy and Biochemistry – Toxicology from the University of Buenos Aires. He is a member of the Asociación Toxicológica Argentina and a Founding Member of the Sociedad Iberoamericana de Salud Ambiental (SIBSA). His research interests are in the fields of Biochemistry, Toxicology, and Analytical Chemistry, with an emphasis on environmental contamination and risk assessment.

E-mail: navoni.julio@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8715-0527>

André Luis Calado ARAUJO

Professor at the Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Norte (IFRN). Master's degree in Sanitary Engineering from the Federal University of Campina Grande (UFCG) and PhD in Civil Engineering from the University of Leeds. His research interests are focused



on Sanitary Engineering, with an emphasis on Wastewater Treatment, working mainly on topics such as sewage treatment, environmental monitoring, environmental quality, and environmental management.

E-mail: andre.calado@ifrn.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5050-992X>

Aecia Seleide Dantas dos ANJOS

Guest Researcher at NUPPRAR/UFRN. Master's and PhD degrees in Chemistry (UFRN). Her research interests include Analytical Chemistry and the analysis of compounds in fuels and biofuels.

E-mail: aeciadantas@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7796-1721>

Viviane S. do AMARAL

Associate Professor at UFRN and General Coordinator of the Doctoral Network Program in Development and Environment (DDMA). Master's and PhD degrees in Genetics and Molecular Biology (UFRGS). Her research focuses on Genetics, with an emphasis on Toxicological Genetics. e-mail: vi.amaral@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9326-9054>

Editora Responsável: Francinaide de Lima Silva Nascimento

Pareceristas Ad Hoc: Abílio José Procópio Queiroz e Marcos Vinicius Agapito Mendes



Submetido 30/10/2024

Aceito 23/12/2024

Publicado 7/6/2025