

ÁCIDOS HALOACÉTICOS COMO SUBPRODUTOS DA CLORAÇÃO: IMPACTOS NA SAÚDE E PADRÕES REGULATÓRIOS

Marcus Chrystian Pimentel Alves

Leonardo Santos Andrade

Resumo: Os ácidos haloacéticos são um dos subprodutos formados durante a desinfecção da água a partir de reações entre agentes desinfetantes à base de cloro e moléculas orgânicas presentes originalmente na água (como o ácido húmico). A exposição de seres humanos em águas contendo ácidos haloacéticos tem sido relatada ser bastante prejudicial à saúde, inclusive, com potencial carcinogênico, genotóxico e reprodutivo. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica das evidências científicas disponíveis sobre a formação, riscos à saúde e regulamentação desses subprodutos, com foco nos principais padrões regulatórios, como a Portaria GM/MS nº 888/2021, e sua eficácia no controle da qualidade da água potável. A relevância ambiental deste estudo reside na identificação dos riscos associados à cloração da água, fornecendo subsídios para ações regulatórias mais eficazes e políticas públicas voltadas à saúde pública e à proteção dos ecossistemas aquáticos, além de contribuir para o desenvolvimento de estratégias de tratamento da água mais seguras.

Palavras-chave: ácidos haloacéticos; água potável; padrões regulatórios

INTRODUÇÃO

A qualidade da água potável é um dos pilares fundamentais para a saúde pública global. A necessidade de garantir água segura para consumo humano levou ao desenvolvimento de diversos processos de tratamento, com o objetivo de eliminar agentes patogênicos presentes na água bruta e, assim, prevenir surtos de doenças transmissíveis pela água. Dentre os métodos utilizados, a cloração se destaca como a principal técnica de desinfecção, devido à sua eficácia comprovada, baixo custo e facilidade de aplicação em grande escala. No entanto, o uso do cloro na desinfecção de águas pode resultar na formação de subprodutos, que, embora desempenhem um papel importante na eliminação de microrganismos, apresentam riscos significativos para a saúde humana.

Um dos subprodutos mais preocupantes gerados pela cloração da água é o grupo dos ácidos haloacéticos (AHA), que se formam quando o cloro reage com compostos orgânicos presentes na água, como os ácidos húmicos e fúlvicos. Esses

compostos, apesar de ocorrerem em concentrações baixas, têm sido associados a diversos efeitos adversos à saúde, incluindo carcinogenicidade, genotoxicidade e toxicidade reprodutiva. A exposição humana a esses subprodutos ocorre principalmente pela ingestão de água tratada com cloro, embora a absorção dérmica e a inalação durante banhos e outras atividades também possam representar vias de exposição. A toxicidade dos AHA é uma preocupação crescente, especialmente considerando os potenciais efeitos a longo prazo da exposição crônica a essas substâncias.

Além dos riscos à saúde, os ácidos haloacéticos também apresentam desafios em termos de monitoramento e controle, uma vez que sua formação é influenciada por uma série de fatores, como o pH da água, a presença de matéria orgânica e a quantidade de cloro utilizada. A detecção precisa desses compostos é fundamental para garantir que a água potável atenda aos padrões de qualidade estabelecidos por órgãos regulatórios. No entanto, os métodos analíticos para a quantificação de AHA exigem técnicas sofisticadas, como cromatografia gasosa e derivatização química, que, embora precisos, podem ser dispendiosas e de difícil implementação em larga escala, especialmente em países em desenvolvimento.

A legislação vigente desempenha um papel crucial ao estabelecer limites aceitáveis para os subprodutos da cloração, incluindo os AHA. A Portaria GM/MS nº 888/2021, por exemplo, estabelece diretrizes sobre os limites máximos permitidos para os AHA em água potável no Brasil, alinhando-se a padrões internacionais de qualidade da água. No entanto, a eficácia desses regulamentos na proteção da saúde pública tem sido alvo de discussões, especialmente considerando que a maioria dos padrões regulatórios foi estabelecida com base em dados limitados sobre os riscos à saúde dos subprodutos da cloração.

Nesse contexto, este estudo se propõe a realizar uma revisão bibliográfica aprofundada sobre os ácidos haloacéticos como subprodutos da cloração, discutindo sua formação, os riscos à saúde associados à sua presença na água potável e os padrões regulatórios em vigor para o controle desses compostos. Serão abordados os mecanismos químicos que levam à formação de AHA, os principais métodos analíticos utilizados para sua detecção e os riscos tóxicos a curto e longo prazo decorrentes da exposição a esses compostos. Além disso, será feita uma análise

crítica sobre a eficácia da legislação vigente, com foco na Portaria GM/MS nº 888/2021, e discutidos os desafios para garantir que a água consumida pela população esteja dentro dos padrões de segurança.

A relevância deste estudo reside na análise dos riscos à saúde associados aos subprodutos da cloração, em particular os ácidos haloacéticos, que têm implicações diretas na segurança da água potável. A análise dos riscos à saúde e a eficácia da regulamentação são essenciais para o desenvolvimento de políticas públicas que assegurem não apenas a eliminação de patógenos, mas também a proteção contra compostos tóxicos que possam comprometer a saúde da população no curto, médio e longo prazo. Além disso, o trabalho contribui para a discussão sobre alternativas de tratamento da água que minimizem a formação de subprodutos indesejáveis e ofereçam soluções mais seguras e sustentáveis para o abastecimento de água potável.

CLORAÇÃO DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO

A cloração da água é o processo mais amplamente utilizado em sistemas de abastecimento público para garantir a desinfecção microbiológica e evitar a propagação de doenças transmitidas por água. A cloração integra um conjunto de objetivos sanitizantes, estéticos e econômicos no tratamento de água, não se restringindo apenas à desinfecção (RICHTER; NETTO, 1991). A adição de cloro à água tem como objetivo a eliminação de agentes causadores de doenças, mas também pode resultar na formação de subprodutos indesejáveis, que representam um risco à saúde pública.

A cloração ocorre por meio da reação do cloro livre com a água. O cloro, geralmente na forma de cloro gasoso (Cl_2) ou hipoclorito de sódio ($NaOCl$), sofre hidrólise ao ser adicionado à água, resultando na formação de ácido hipocloroso ($HOCl$) e íon hipoclorito (OCl^-). A reação fundamental é representada pela seguinte equação química (BROWN; LEMAY JR.; BURSTEN, 2005):



A desinfecção primária ocorre predominantemente pela formação de ácido hipocloroso a partir da hidrólise do gás cloro em água, sendo a eficiência fortemente

dependente do pH, que controla o equilíbrio entre HOCl e OCl^- (BROWN; LEMAY JR.; BURSTEN, 2005).

A eficácia do cloro como desinfetante depende diretamente do pH da água. Em pH mais baixo, o ácido hipocloroso (HOCl) predomina, sendo uma espécie muito mais potente na destruição de microrganismos. Em pH mais elevado, no entanto, o íon hipoclorito (OCl^-) se torna predominante, e sua capacidade de desinfecção é significativamente reduzida. Essa variação na eficácia do cloro em diferentes pH torna essencial o monitoramento constante do equilíbrio ácido-base da água tratada, especialmente em sistemas de abastecimento com águas que apresentam pH variável.

Embora o cloro seja extremamente eficaz na desinfecção, ele pode reagir com substâncias orgânicas presentes na água, como os ácidos húmicos e fúlvicos, que são derivados da decomposição da matéria orgânica. Essas reações de substituição levam à formação de diversos subprodutos da cloração, incluindo os ácidos haloacéticos (AHA) e os trihalometanos (THM), que contêm alto potencial de toxicidade. A formação desses subprodutos é um fenômeno inevitável em sistemas de abastecimento onde há uma alta carga orgânica dissolvida (RICHTER; NETTO, 1991).

A formação de AHA ocorre quando o cloro reage com os grupos carboxílicos presentes na matéria orgânica. O tipo específico de ácido haloacético formado depende das condições da água, como o tipo de matéria orgânica, a quantidade de cloro adicionado e a temperatura. Em geral, os ácidos haloacéticos mais comuns incluem o ácido dicloroacético (DCAA), ácido tricloroacético (TCAA), ácido monocloroacético (MCA) e ácido bromoacético (BAA), sendo os primeiros os mais prevalentes em águas tratadas com cloro (BROWN; LEMAY JR.; BURSTEN, 2005).

A influência de brometos na formação de AHA é significativa. Em águas que contêm íons brometo (Br^-), o cloro pode oxidar esses íons a ácido hipobromoso (HOBr), que reage mais rapidamente com a matéria orgânica do que o próprio cloro, formando espécies mistas e bromadas de ácidos haloacéticos. O ácido bromocloroacético, por exemplo, é um composto altamente tóxico, com maior citotoxicidade e genotoxicidade do que os análogos clorados. Esse efeito é uma das razões pelas quais as águas de áreas costeiras, onde o brometo é naturalmente

mais presente devido à proximidade do mar, podem apresentar níveis mais elevados de subprodutos bromados (RICHTER; NETTO, 1991).

Portanto, a cloração da água, embora seja uma solução eficaz para eliminar patógenos e garantir a segurança microbiológica, precisa ser equilibrada com a gestão dos subprodutos formados. O controle rigoroso da formação de AHA exige estratégias como monitoramento constante do pH, controle da carga orgânica da água bruta e a utilização de tecnologias de tratamento prévio, como carvão ativado e coagulação otimizada, para reduzir a quantidade de precursores orgânicos antes da cloração. A remediação dos AHA, uma vez formados, é mais complexa e cara, e, por isso, a prevenção é sempre a abordagem mais eficaz.

ÁCIDOS HALOACÉTICOS COMO SUBPRODUTOS DA CLORAÇÃO

A cloração da água é um processo essencial para garantir a segurança microbiológica da água potável. A eficácia do cloro na eliminação de microrganismos patogênicos é amplamente reconhecida, e a adição de cloro à água resulta na formação de HOCl, que é a principal espécie desinfetante. Quando o Cl_2 gasoso é adicionado à água, ele se transforma em HOCl e OCl^- , com a eficiência de desinfecção sendo maior quando predomina o HOCl, especialmente em pH mais baixo (BROWN; LEMAY JR.; BURSTEN, 2005). Essa característica torna o cloro uma ferramenta valiosa no tratamento de água, mas também levanta questões sobre os subprodutos da cloração, que surgem a partir da reação entre o cloro e a matéria orgânica presente na água.

Os AHA são um dos principais subprodutos gerados durante o processo de cloração. Eles se formam por meio de uma reação de substituição do cloro com grupos carboxílicos presentes na matéria orgânica dissolvida na água. Esse processo ocorre principalmente em águas com alta concentração de ácidos húmicos e fúlvicos, que são compostos orgânicos derivados da decomposição de plantas e materiais biológicos (SINGER, 1999; DI BERNARDO, 1993). Como já descrito anteriormente, os AHA mais comuns incluem o DCAA, TCAA, MCA e o BAA, sendo a formação desses compostos mais significativa em condições em que a água apresenta maior carga de carbono orgânico dissolvido. Portanto, a quantidade de

cloro adicionada, juntamente com o pH da água e o tempo de contato são fatores cruciais que influenciam a formação e concentração de AHA.

Quando a água contém íons brometo (Br^-), que são comumente encontrados em águas de regiões costeiras ou com alta salinidade, o cloro pode reagir com o brometo, formando o HOBr. Este ácido é mais reativo que o cloro e reage com a matéria orgânica da água de forma mais eficiente, levando à formação de ácidos haloacéticos bromados, como o ácido bromocloroacético, que têm toxicidade maior em comparação com seus análogos clorados. A presença de brometos aumenta a citotoxicidade e genotoxicidade dos AHA, tornando-os ainda mais perigosos para a saúde humana (PRASAD, 2020).

A ocorrência de AHA nos sistemas de abastecimento de água é uma preocupação global, especialmente porque esses compostos não volatilizam, ao contrário de outros subprodutos como os trihalometanos (THM). Como resultado, os AHA se acumulam ao longo das redes de distribuição, o que pode aumentar a concentração desses compostos em áreas de grande armazenamento de água. Esse acúmulo é um problema, já que os AHA não desaparecem com o tempo e podem atingir concentrações significativas antes de serem consumidos. Em algumas situações, como em reservatórios de grande porte ou sistemas de distribuição com grande tempo de contato, a formação de AHA pode exceder os limites de segurança estabelecidos pelos órgãos reguladores.

A Portaria GM/MS nº 888/2021, que estabelece os limites máximos permitidos de AHA na água potável no Brasil, visa mitigar esses riscos, embora a eficácia desses limites seja frequentemente questionada. A formação de AHA pode ser minimizada por meio de estratégias preventivas, como o controle da carga orgânica da água antes da cloração, utilizando tecnologias de coagulação otimizada ou adsorção em carvão ativado. Tais processos são recomendados para reduzir a quantidade de precursores orgânicos antes da adição de cloro, diminuindo assim a formação de AHA. Contudo, mesmo com esses métodos, a formação de AHA nunca pode ser completamente evitada, o que implica a necessidade de um monitoramento rigoroso da qualidade da água tratada e da implementação de alternativas de desinfecção que gerem menos subprodutos, como o uso de cloraminas.

Embora as cloraminas sejam uma alternativa viável para reduzir a formação de AHA e THM, elas não estão isentas de riscos, pois podem formar outros subprodutos indesejáveis, como as nitrosaminas, que também apresentam potencial tóxico (PRASAD, 2020).

Portanto, a escolha do método de desinfecção deve ser cuidadosamente considerada, levando em conta o equilíbrio entre a eliminação de microrganismos patogênicos e a formação de subprodutos tóxicos. Isso torna o controle da qualidade da água um desafio complexo, que exige não apenas o uso de tecnologias adequadas, mas também políticas públicas eficazes para garantir a segurança hídrica para a população.

MÉTODOS DE DETECÇÃO E MONITORAMENTO DE ÁCIDOS HALOACÉTICOS

A detecção precisa dos AHA na água potável é um desafio analítico devido à sua natureza química e às baixas concentrações em que frequentemente estão presentes. A importância da detecção desses compostos é crescente, visto os riscos à saúde humana associados à exposição crônica. Assim, a escolha dos métodos analíticos adequados é essencial para monitorar a qualidade da água e garantir que os níveis de AHA permaneçam dentro dos limites regulamentares estabelecidos por órgãos de saúde pública.

Existem diversos métodos para a detecção dos ácidos haloacéticos, sendo os mais utilizados a cromatografia gasosa (CG) e a cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC). A seguir, serão discutidos em detalhes esses dois métodos, com foco nas suas características e aplicações específicas para a detecção dos ácidos haloacéticos.

Cromatografia Gasosa com Detector de Captura de Elétrons (CG-DCE)

A cromatografia gasosa (CG) é uma das técnicas mais empregadas para a análise quantitativa e qualitativa dos AHA. Nesse método, a amostra é extraída e posteriormente injetada em uma coluna cromatográfica, onde os compostos presentes na água são separados com base nas suas propriedades de volatilidade e interação com a coluna. Os AHA são analisados em sua forma derivatizada,

geralmente com o uso de éter metil-terc-butílico (MTBE), seguido de derivatização com diazometano ou metanol ácido para transformar os ácidos em ésteres metílicos, que possuem características mais voláteis e podem ser detectados com maior sensibilidade (APHA; AWWA; WEF, 2017).

O Detector de Captura de Elétrons (DCE) é utilizado para detectar compostos com grupos halogênios na sua estrutura, como os AHA, devido à sua alta afinidade para captura de elétrons. Esse método é altamente sensível e permite a detecção de quantidades muito baixas de AHA (na faixa de ng/L), o que é crucial considerando que os AHA podem estar presentes em concentrações que variam de microgramas a nanogramas por litro.

Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC)

A cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) é outra técnica amplamente utilizada para análise dos AHA. Embora a CG seja mais comum, a técnica de HPLC é preferencial em alguns casos devido à sua menor necessidade de derivatização e maior versatilidade em termos de tipos de colunas e fase móvel. Além disso, a técnica de HPLC pode ser acoplada a diversos detectores, como detector de condutividade ou espectrofotômetro UV, dependendo das características dos AHA e da necessidade de análise. No caso dos AHA, que são compostos polares e não voláteis, a detecção por íons ou fluorescência também pode ser eficaz (APHA; AWWA; WEF, 2017).

Adicionalmente, a técnica de HPLC oferece a vantagem de alta resolução, o que significa que compostos semelhantes podem ser bem separados, uma característica importante quando se analisa uma mistura complexa de subprodutos da cloração.

RISCOS À SAÚDE E IMPACTOS AMBIENTAIS

A presença de AHA na água potável é uma preocupação crescente devido aos riscos à saúde associados à exposição a esses compostos, especialmente pela ingestão prolongada ou crônica, tal como discutido previamente. Embora a cloração seja amplamente utilizada para garantir a segurança microbiológica da água, a

formação de subprodutos como os AHA introduz um novo conjunto de riscos tóxicos que podem afetar a saúde humana em diversos níveis. Diversos estudos epidemiológicos e experimentais têm demonstrado que a exposição aos AHA pode provocar uma série de efeitos adversos, incluindo carcinogenicidade, genotoxicidade e toxicidade reprodutiva. Esses efeitos têm sido observados em modelos animais e, em menor escala, em estudos epidemiológicos humanos.

A classificação carcinogênica dos AHA foi revisada pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC), que classificou o DCAA e o TCAA como Grupo 2B, ou seja, possivelmente carcinogênicos para os seres humanos. Em estudos em animais, a exposição crônica ao DCAA resultou em tumores hepáticos, como carcinomas e adenomas hepatocelulares, em camundongos e ratos (IARC, 2014). Os mecanismos propostos para essa carcinogenicidade incluem modificação de vias de sinalização celular, estresse oxidativo e alterações nos processos de apoptose. Esses efeitos estão principalmente relacionados à alteração no metabolismo celular e ao aumento da proliferação celular em órgãos como o fígado, o que pode predispor à formação de tumores (WHO, 2011).

Em relação à genotoxicidade, os AHA têm mostrado causar danos no DNA celular, resultando em mutação genética, lesões cromossômicas e danos no material genético. Estudos *in vitro* e *in vivo* indicam que os AHA, especialmente o DCAA e o TCAA, podem induzir a formação de adutos de DNA, que são moléculas formadas pela ligação covalente de compostos químicos ao DNA, prejudicando a integridade genética e levando a alterações celulares. Esses efeitos genotóxicos aumentam o risco de câncer e de outras doenças relacionadas à modificação genética.

A toxicidade reprodutiva dos AHA também tem sido um ponto de atenção. Estudos têm indicado que a exposição a esses compostos pode prejudicar o sistema reprodutor, afetando a fertilidade e o desenvolvimento fetal em modelos animais (NAROTSKY, 2013). Em particular, o DCAA foi relacionado a efeitos adversos sobre os órgãos reprodutores e a diminuição da fertilidade em camundongos e ratos expostos por meio da ingestão de água contaminada. Além disso, efeitos negativos no desenvolvimento fetal também foram observados em estudos com animais, incluindo alterações no peso ao nascimento e nas características de desenvolvimento dos filhotes (WHO, 2004; USEPA, 2003).

No entanto, é importante ressaltar que a exposição aos AHA não ocorre apenas por ingestão. Embora os AHA sejam compostos não voláteis e com baixa volatilidade, exposições dérmica e inalatória também podem representar um risco, especialmente em ambientes com níveis elevados de cloro. Durante atividades como banhos, chuveiros ou o consumo de água contaminada com cloro, pequenas quantidades de AHA podem ser absorvidas pela pele ou inspiradas durante o processo de evaporação, resultando em exposição adicional. No entanto, a principal via de exposição continua sendo a ingestão de água tratada que contém níveis significativos desses compostos (CASARETT; DOULL, 2001).

Dessa forma, os riscos à saúde associados aos AHA são uma preocupação crescente para a saúde pública, uma vez que esses compostos são difíceis de remover uma vez formados. O controle da sua formação, por meio de técnicas como coagulação otimizada e adsorção em carvão ativado, alternativas à cloração (como o uso de cloraminas), é uma das abordagens mais eficazes para mitigar os riscos à saúde humana e ambiental. Entretanto, apesar dessas estratégias, o monitoramento contínuo e o desenvolvimento de novas tecnologias de tratamento de água são essenciais para garantir que a água potável seja segura para consumo e que os riscos aos seres humanos e ao meio ambiente sejam minimizados.

PADRÕES REGULATÓRIOS PARA ÁCIDOS HALOACÉTICOS

O controle da qualidade da água e a segurança da água potável são regulados por normas e padrões que visam proteger a saúde pública. No contexto da cloração e dos subprodutos formados, os AHA são regulamentados por diferentes órgãos nacionais e internacionais, que estabelecem limites máximos permitidos para sua presença na água consumida pela população. Esses padrões são essenciais para garantir a qualidade da água e minimizar os riscos à saúde associados à exposição a compostos potencialmente tóxicos.

A World Health Organization (WHO), uma agência das Nações Unidas responsável por coordenar questões internacionais de saúde pública, recomenda que as concentrações de AHA na água potável sejam mantidas abaixo de 30 µg/L para os DCAA e TCAA, que são os compostos mais prevalentes nos sistemas de

abastecimento de água (WHO, 2011). Esses limites visam reduzir os riscos de efeitos carcinogênicos, genotóxicos e reprodutivos associados ao consumo de água com níveis elevados desses subprodutos.

Nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental (USEPA) também estabeleceu limites para os AHA com base em sua toxicidade e nos dados epidemiológicos disponíveis. A USEPA classifica o DCAA e o TCAA como compostos com potencial carcinogênico, e recomenda que os níveis totais de AHA não ultrapassem 60 µg/L. Além disso, a EPA adotou o conceito de limite máximo de concentração (LMO), que é utilizado para determinar a concentração de qualquer subproduto da desinfecção na água potável, levando em consideração não apenas a toxicidade, mas também a eficácia do tratamento e os custos de implementação dos métodos de controle.

No Brasil, a Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece os padrões de potabilidade da água, incluindo a presença de AHA, de acordo com as diretrizes internacionais, como as da OMS e da EPA. A portaria estabelece limites específicos para cada tipo de AHA, com o objetivo de reduzir os efeitos adversos à saúde sem comprometer a eficácia da desinfecção (BRASIL, 2021). No entanto, a implementação desses padrões enfrenta desafios, especialmente em áreas remotas ou em sistemas de pequeno porte, onde a infraestrutura de monitoramento e os recursos financeiros são limitados. Apesar disso, a portaria brasileira exige que os sistemas de abastecimento de água realizem o monitoramento periódico dos subprodutos da cloração, garantindo que os níveis de AHA permaneçam dentro dos limites estabelecidos.

Apesar dos esforços de órgãos regulatórios internacionais e nacionais, a eficácia da regulamentação no controle dos subprodutos da cloração ainda é um tema de debate. A falta de dados epidemiológicos robustos sobre os efeitos a longo prazo dos AHA em populações expostas a baixas concentrações ao longo do tempo é uma das principais dificuldades para a atualização dos limites máximos permitidos. Além disso, os desafios técnicos e financeiros para a implementação de métodos de monitoramento eficazes em sistemas de abastecimento de água de menor escala tornam difícil a garantia de conformidade com os padrões regulatórios, especialmente em países em desenvolvimento.

Embora a legislação atual forneça uma base importante para a proteção da saúde pública, ela também destaca a necessidade de novas estratégias de monitoramento e controle. O avanço das tecnologias de tratamento de água e o desenvolvimento de métodos de desinfecção alternativos, como o uso de cloraminas, podem oferecer soluções para reduzir a formação de AHA enquanto mantém a eficiência da desinfecção. A atualização dos padrões regulatórios para levar em consideração as novas evidências científicas e as tecnologias emergentes será fundamental para garantir a segurança da água potável no futuro.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos ácidos haloacéticos (AHA) como subprodutos da cloração revela a complexidade e a importância do controle de qualidade da água potável. A cloração, amplamente adotada como método primário de desinfecção, é eficaz na eliminação de patógenos, mas ocasiona como consequência inevitável, a formação de subprodutos potencialmente perigosos para a saúde humana. Os AHA, apesar de serem encontrados em concentrações relativamente baixas, apresentam riscos carcinogênicos, genotóxicos e reprodutivos, o que torna seu monitoramento e controle uma prioridade para os sistemas de abastecimento de água.

Este estudo destacou os principais mecanismos de formação dos AHA, sua ocorrência nos sistemas de distribuição, e os riscos à saúde associados à sua presença na água. A revisão dos métodos de detecção e dos desafios enfrentados pelos profissionais da área de saúde pública revelou que, embora técnicas como cromatografia gasosa e cromatografia líquida de alta eficiência sejam eficazes para a análise de AHA, essas metodologias ainda apresentam limitações em termos de custo, tempo de análise e necessidade de infraestruturas especializadas.

A prevenção da formação de AHA deve ser a prioridade para os sistemas de abastecimento de água. O controle da carga orgânica na água bruta antes da cloração, por meio de técnicas como coagulação otimizada e adsorção em carvão ativado, pode ajudar a reduzir a formação de AHA e minimizar os riscos à saúde. No entanto, a utilização de cloraminas como desinfetante secundário também surge

como uma alternativa para reduzir a formação desses compostos, embora traga consigo novos desafios, como a formação de nitrosaminas.

A análise dos padrões regulatórios existentes, tanto internacionais quanto nacionais, revela que a Portaria GM/MS nº 888/2021 oferece uma base sólida para o controle dos AHA na água potável, alinhando-se aos parâmetros estabelecidos pela OMS e EPA. Contudo, a eficácia desses limites ainda é uma questão debatida, principalmente devido à falta de dados epidemiológicos robustos sobre os efeitos a longo prazo dos AHA em concentrações subletais. A legislação vigente, embora seja um avanço importante, deve ser continuamente aprimorada à medida que novas tecnologias de monitoramento e tratamento se tornam disponíveis.

Em termos de política pública, é fundamental que os órgãos responsáveis pela gestão da água potável invistam em tecnologias de monitoramento contínuo e em sistemas de tratamento de água que possam reduzir a formação de subprodutos indesejáveis, como os AHA, sem comprometer a eficácia da desinfecção. O desenvolvimento de novas tecnologias e a implementação de regulamentos mais rígidos são essenciais para garantir que a água consumida pela população esteja dentro dos padrões de segurança estabelecidos, protegendo assim a saúde pública e os ecossistemas aquáticos.

Portanto, o controle sobre a presença dos AHA na água potável representa um desafio contínuo para os profissionais de saúde pública e para os sistemas de abastecimento de água. A evolução das tecnologias de detecção e tratamento, juntamente com a atualização dos padrões regulatórios, são passos fundamentais para garantir a segurança hídrica no futuro. A integração de abordagens inovadoras de monitoramento e a implementação de métodos de desinfecção mais eficientes são essenciais para minimizar os riscos à saúde associados aos subprodutos da cloração e para promover um ambiente mais seguro e sustentável para as gerações futuras.

REFERÊNCIAS

APHA; AWWA; WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd Edition. Washington DC: American Public Health Association, 2017.

- BRASIL. Ministério da Saúde. 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, 7 maio 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.htm. Acesso em: 12/12/2025
- BROWN, T. L.; LEMAY Jr, H. E.; BURSTEN, B. E. Química: a Ciência Central. 9. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.
- CASARETT, L. J.; DOULL, J. Casarett & Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons. 6th Ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- NAROTSKY, M. G. et al. Developmental Toxicity of Disinfection Byproducts in F344 Rats. Birth Defects Research Part B: Developmental and Reproductive Toxicology, v. 98, n. 5, p. 311-326, 2013.
- PRASAD, M. N. V. (Editor). Disinfection By-products in Drinking Water: Detection and Treatment. 1st Edition. Elsevier, 2020.
- RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. A. Tratamento de Água – Tecnologia Atualizada. São Paulo: Edgar Blücher, 1991.
- SINGER, P. C. Formation and Control of Disinfection By-Products in Drinking Water. American Water Works Association (AWWA), 1999. (Citado também em: DI BERNARDO, L. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. Vol 2. Rio de Janeiro: ABES, 1993).
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Toxicological Review of Dichloroacetic Acid (CAS No. 79-43-6) in Support of Summary Information on the Integrated Risk Information System (IRIS). Washington, DC: USEPA, 2003.
- WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION). Dichloroacetic acid in drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva: World Health Organization, 2004.
- WHO (World Health Organization). Guidelines for Drinking-water Quality. 4th Edition. Geneva: WHO, 2011. (Pages. 352 e 423).