

● REVISTA

INOVA Ciência & Tecnologia

● CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO DO TRIÂNGULO MINEIRO PARA APLICAÇÃO NA PRODUÇÃO DE CERVEJA

Geovanna Oliveira Higino de Paula¹  , Maria Clara Bernardino dos Santos¹  ,
Wilson Joaquim Boitrigo¹  , Claudia Maria Tomas Melo¹  ,
Eduardo Santos Almeida¹  .

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro Campus Uberlândia

RESUMO: A qualidade e a composição da água desempenham um papel crucial na produção de cerveja, uma vez que os minerais presentes influenciam diretamente o sabor e as características finais da bebida. Este estudo analisou os principais íons presentes na água de abastecimento de dez municípios do Triângulo Mineiro, em Minas Gerais, avaliando seus impactos potenciais na produção de cerveja. Foram realizadas análises de pH, alcalinidade e concentrações de cálcio, magnésio, sódio, potássio, cloreto e sulfato em amostras de água coletadas. Os resultados revelaram diferenças significativas nos parâmetros que influenciam a qualidade final da cerveja produzida com a água das cidades avaliadas, considerando tanto as características sensoriais desejadas quanto os requisitos específicos dos processos. A maior parte das amostras apresentou pH ácido, com algumas fora da faixa recomendada para consumo humano, mas adequadas para a produção de cerveja. As análises de alcalinidade, cloreto e sulfato indicaram impactos no perfil sensorial e na estabilidade da bebida, enquanto os níveis de cálcio e magnésio foram avaliados na fermentação e na clarificação, apontando a necessidade de ajustes na composição da água utilizada. Este estudo reforça a importância do controle rigoroso da qualidade da água na produção de cerveja, destacando sua influência na eficiência do processo e nas características sensoriais da bebida.

Palavras-chave: pH. Íons. Qualidade. Sensorial. Eficiência.

PHYSICOCHEMICAL ASSESSMENT OF SUPPLY WATER IN THE TRIÂNGULO MINEIRO REGION FOR APPLICATION IN BEER PRODUCTION

ABSTRACT: The quality and composition of water play a crucial role in beer production, as the minerals present directly influence the flavor and final characteristics of the beverage. This study analyzed the main ions present in the water supply of ten municipalities in the Triângulo Mineiro region, Minas Gerais, assessing their potential impacts on brewing. Analyses of pH, alkalinity, and concentrations of calcium, magnesium, sodium, potassium, chloride and sulfate were conducted on collected water samples. The results revealed significant differences in parameters that influence the final quality of beer produced with water from the evaluated cities, considering both the desired sensory characteristics and the specific process requirements. Most samples exhibited acidic pH, with some falling outside the recommended range for human consumption but still suitable for brewing. Alkalinity, chloride, and sulfate analyses indicated impacts on the sensory profile and stability of the beer, while calcium and magnesium levels were assessed for their effects on fermentation and clarification, highlighting the need for adjustments in water composition. This study reinforces the importance of strict water quality control in beer production, emphasizing its influence on process efficiency and the sensory characteristics of the beverage.

Keywords: pH. Ions. Quality. Sensory. Efficiency.

* Autor correspondente:
eduardoalmeida@iftm.edu.br

Recebido: 26/02/2025.
Aprovado: 28/03/2025.

Como citar: Paula, G. O. H. de; Santos, M. C. B. dos; Boitrigo, W. J.; Melo, C. M. T.; Almeida, E. S. . Avaliação físico-química da água de abastecimento do triângulo mineiro para aplicação na produção de cerveja. Revista Inova Ciência & Tecnologia / Innovative Science & Technology Journal, [S. I.], [s.d.].

Editores:
Dra. Vanessa Cristina Caron  

Copyright: este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da Licença de atribuição Creative Commons, que permite uso irrestrito, distribuição, e reprodução em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.



INTRODUÇÃO

A fabricação de cerveja consome significativamente mais água do que o volume de cerveja produzido. Basicamente, são utilizados dois tipos de água em uma cervejaria: água de serviço que é usada em processos e equipamentos, como na geração de vapor para aquecimento e resfriamento, sem contato direto com o produto final; e água cervejeira que é empregada no preparo do mosto, na transferência de produtos em elaboração e na lavagem final de garrafas, latas e barris. O volume necessário de água para produzir 1 litro de cerveja varia de aproximadamente 10 litros em plantas produtivas mais antigas ou de menor porte, a 3,2 litros em fábricas maiores e mais modernas (Bortoli *et al.*, 2013; Rebello, 2009; Junior e Barros, 2020; Salimbeni, Meneguetti e Rolim, 2016; Rosa e Afonso, 2015; Muxel, 2022).

A água é o principal ingrediente da cerveja em termos de quantidade, compondo cerca de 90 a 95% de sua formulação. Em cada etapa do processo de produção, há uma preocupação constante com a manutenção da qualidade da água, já que suas propriedades influenciam diretamente o sabor, a cor, a formação de espuma e outras características sensoriais da bebida. A composição da água e sua interação com os demais ingredientes impactam o sabor final do produto (Muxel, 2022; Salimbeni, Meneguetti e Rolim, 2016).

Os padrões de potabilidade da água são definidos pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 (MS, 2021). Além desses requisitos de potabilidade, o cervejeiro precisa considerar parâmetros específicos como conteúdo mineral, dureza e pH (Muxel, 2022). A concentração de íons H^+ desempenha um papel importante na regulação da atividade enzimática, na solubilização de compostos adstringentes, na variação de cor e na coagulação dos componentes proteicos do mosto (Rosa e Afonso, 2015). Para otimizar a ação enzimática, o pH inicial do processo deve ser ajustado para uma faixa de 5,0 a 5,5, favorecendo a atividade das enzimas α e β amilases e das proteases presentes nos grãos (Rebello, 2009; Torre, 2022). Em pH alcalino, pode ocorrer a solubilização de materiais indesejáveis, como taninos, polifenóis e sílica das cascas do malte, que podem conferir adstringência indesejada à bebida (Bortoli *et al.*, 2013; Torre, 2022). O pH também influencia a isomerização dos α -ácidos do lúpulo, sendo que os valores de pH próximos à neutralidade, embora não sejam ideais para a mosturação, promovem uma maior taxa de isomerização do que os pH mais ácidos (Torre, 2022). O pH da água cervejeira afeta o pH final da cerveja, que geralmente varia entre 3,8 e 4,2 para a família Ale e entre 4,2 e 4,8 para as Lagers, com exceções para estilos como Gueuze, Lambic e Catharina Sour que são mais ácidas. Ácidos orgânicos utilizados para ajuste do pH também podem conferir sabores específicos, como a acidez acética do ácido acético, a acidez láctica do ácido láctico e a acidez cítrica do ácido cítrico (Muxel, 2022).

Entre os parâmetros de interesse para os cervejeiros, destacam-se os íons cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), além da alcalinidade total, que afetam o desempenho da mosturação e da fermentação. A presença de sódio

(Na^+), cloreto (Cl^-) e sulfato (SO_4^{2-}) também influencia o sabor da água e, consequentemente, da cerveja (Palmer e Kaminski, 2021).

Os íons de cálcio são essenciais e talvez os mais importantes na produção de cerveja. Eles atuam como cofatores que protegem a amilase da desativação térmica durante a sacarificação (hidrólise) do amido, aumentando sua eficiência. Além disso, o cálcio favorece a coagulação proteica durante a fervura do mosto (formação do trub quente), precipita o oxalato (como CaC_2O_4), prevenindo a turvação posterior da bebida, e estimula a floculação da levedura após a fermentação (Rosa e Afonso, 2015; Torre, 2022). A concentração ideal de cálcio é de aproximadamente 50 mg L^{-1} , em cervejas leves, podendo chegar a até 250 mg L^{-1} em cervejas de sabores mais intensos, como as IPAs (Bortoli *et al.*, 2013; Muxel, 2022). Contudo, os íons de magnésio (Mg^{2+}), embora não essenciais para a floculação, desempenham um papel importante no crescimento, reprodução e atividade enzimática das leveduras. Níveis insuficientes de magnésio podem alterar a morfologia da levedura e afetar sua performance. O magnésio também protege a levedura contra o estresse causado pelo álcool e pela temperatura e promove uma maior atenuação (consumo de açúcar) do mosto. Diferentemente do cálcio, que é praticamente inerte em relação ao sabor, o excesso de magnésio pode conferir um gosto amargo. Em geral, a adição de magnésio à água cervejeira é desnecessária, pois o malte já contém Mg^{2+} suficiente, nos níveis recomendados de 10 a 30 mg L^{-1} . Concentrações acima de 70 mg L^{-1} podem trazer amargor e acidez indesejados e, em quantidades superiores a 125 mg L^{-1} , o magnésio pode ter efeito laxante e diurético. Tanto o cálcio quanto o magnésio contribuem para a eficiência de isomerização dos alfa-ácidos durante a fervura do mosto (Muxel, 2022; Palmer e Kaminski, 2021; Rosa e Afonso, 2015; Torre, 2022).

Altos níveis de dureza e alcalinidade na água não são desejáveis, sendo, em alguns casos, necessária sua redução (Rosa e Afonso, 2015). Águas com elevados teores de bicarbonato são classificadas como águas de dureza temporária, pois o bicarbonato precipita durante a fervura. Quando associados a sulfatos ou cloretos, os íons de cálcio e magnésio formam a dureza permanente. É recomendada uma alcalinidade inferior a 25 mg L^{-1} , podendo chegar no máximo a 50 mg L^{-1} (Bortoli *et al.*, 2013). A alcalinidade elevada está associada a problemas como a diminuição da atividade enzimática durante a produção do mosto, o aumento da cor, a inibição do desenvolvimento das leveduras e o aumento da turbidez (Torre, 2022). Uma água alcalina usada na lavagem (*sparge*) eleva o pH do mosto, aumentando a extração de taninos, silicatos e cinzas das cascas do malte, o que pode impactar negativamente o sabor da cerveja (Palmer e Kaminski, 2021).

Os íons Ca^{2+} , Mg^{2+} e Zn^{2+} são classificados como íons funcionais, pois desempenham funções específicas ou participam ativamente dos processos químicos e bioquímicos na produção da cerveja. Por outro lado, os íons Na^+ , Cl^- e SO_4^{2-} são classificados como sensoriais. Os ânions de cloreto conferem à cerveja um paladar mais encorpado e equilibrado, com ênfase no caráter de malte, muitas vezes associado a uma percepção de dulçor. O

cloreto é frequentemente adicionado à água cervejeira como contra-íon do cálcio e/ou magnésio; no entanto, concentrações acima de 100 mg L⁻¹ podem favorecer a corrosão dos equipamentos de produção e, quando superiores a 250 mg L⁻¹, dificultam a floculação da levedura (Rosa e Afonso, 2015; Torre, 2022). O sulfato é amplamente utilizado para intensificar o amargor em cervejas mais lupuladas, mas concentrações acima de 400 mg L⁻¹ podem prejudicar a percepção do aroma do lúpulo. O Na⁺ ajuda a acentuar tanto os sabores do malte quanto dos lúpulos, sendo recomendado entre 70 e 150 mg L⁻¹; em excesso, no entanto, pode tornar a cerveja salobra e, acima de 250 mg L⁻¹, confere um sabor azedo. Os íons K⁺ têm um perfil de sabor semelhante ao sódio, mas só produzem um sabor salgado perceptível em concentrações superiores a 500 mg L⁻¹ (Muxel, 2022; Torre, 2022).

Embora a água seja a principal fonte de íons, ela não é a única; o malte também contribui com íons como fosfato, potássio, magnésio e cloreto, que, juntamente com o zinco, são amplamente absorvidos pelo metabolismo da levedura durante a fermentação. Alguns íons, como cálcio e cloreto, permanecem inalterados e passam diretamente para a cerveja final, sem diferenças significativas entre o mosto e a bebida acabada. O lúpulo e outros adjuntos também podem contribuir, embora em menor escala, para a quantidade total de íons na cerveja final (Muxel, 2022).

O fornecimento de água potável de boa qualidade é fundamental para a indústria de alimentos e bebidas. A água potável é obtida de fontes de água doce, e sua qualidade está relacionada à geologia da área de captação. A água que flui por rochas calcárias, ricas em carbonato de cálcio, tende a apresentar altos níveis de sólidos dissolvidos, alcalinidade e dureza total. Em contraste, a água que passa por formações rochosas como o granito apresenta poucos sólidos dissolvidos e menor dureza e alcalinidade. A água dura contém sais de cálcio e magnésio em solução, frequentemente sob a forma de bicarbonatos quando derivada de rochas calcárias, ou de sulfatos quando proveniente de arenito. Já a água mole é obtida em superfícies onde flui por terrenos rochosos ou é captada de fontes subterrâneas, como aquíferos de cascalho ou laterita, com baixo teor mineral e sais de sódio e potássio, como bicarbonatos, sulfatos, cloretos, fluoretos ou nitratos (Salimbeni, Meneguetti e Rolim, 2016; Palmer e Kaminski, 2021).

Na fabricação de cerveja, a tendência atual é que as cervejarias dependam cada vez mais do abastecimento de água municipal. No entanto, muitas delas buscam expandir sua linha de produtos, e a água disponível no município pode não ser adequada para a produção de certos tipos de cerveja (Salimbeni, Meneguetti e Rolim, 2016). Assim, o conhecimento sobre o pH e o conteúdo mineral da água torna-se especialmente importante para o desenvolvimento de novos produtos e para a análise sensorial.

Este estudo concentra-se na análise dos íons presentes na água de abastecimento de 10 municípios da região do Triângulo Mineiro, em MG: Araguari, Campina Verde, Indianópolis, Ituiutaba, Iturama, Monte Carmelo, Patrocínio, Prata, Uberaba e Uberlândia, com o objetivo de identificar os principais íons que impactam a produção de cerveja.

MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de água foram coletadas em frascos de PET previamente higienizados entre os dias 27 de dezembro de 2022 e 22 de fevereiro de 2023. Após a coleta, as amostras foram imediatamente refrigeradas a uma temperatura de 2°C em uma incubadora tipo BOD (SOLAB/SL-200) para preservar sua integridade até as análises subsequentes.

As análises dos parâmetros pH, além das concentrações dos cátions Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺ e dos ânions Cl⁻, SO₄²⁻ e alcalinidade, foram realizadas conforme o protocolo descrito por Almeida (2010). Todos os procedimentos analíticos ocorreram nos Laboratórios Integrados do IFTM *Campus* Uberlândia. Para medir o pH, utilizou-se um pHmetro modelo PG-1800 da marca Gehaka. Cada análise foi executada em triplicata e em dias alternados (inter-dia) para garantir a reprodutibilidade dos resultados.

Todos os reagentes empregados eram de alta pureza (grau P.A. ou superior). As vidrarias foram cuidadosamente lavadas e enxaguadas com água deionizada antes do uso, e a água utilizada tanto para o preparo dos reagentes quanto para o enxágue das vidrarias foi obtida por um sistema de purificação Master All MS-2000 da Gehaka.

A análise estatística dos dados foi realizada no software Jamovi, aplicando-se o teste de Tukey para comparação de médias, com um nível de significância de 5% e confirmação de distribuição normal dos dados (p > 0,05).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta as datas das coletas de água e as respectivas empresas responsáveis pelo abastecimento em cada município, indicando também a esfera administrativa de cada órgão (municipal ou estadual).

Tabela 1: Cidades, data das coletas e órgãos de abastecimento das águas analisadas.

Cidade	Data da coleta	Empresa de Abastecimento*	Esfera
Araguari	15/01/2023	SAE	Municipal
Campina Verde	04/01/2023	COPASA	Estadual
Indianópolis	03/02/2023	COPASA	Estadual
Ituiutaba	30/12/2022	SAE	Municipal
Iturama	27/12/2022	COPASA	Estadual
Monte Carmelo	11/02/2023	DMAE	Municipal
Patrocínio	22/02/2023	DAEPA	Municipal
Prata	08/01/2023	COPASA	Estadual
Uberaba	15/02/2023	CODAU	Municipal
Uberlândia	18/01/2023	DMAE	Municipal

*<https://aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/>

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A Tabela 2 mostra os resultados das análises de pH, alcalinidade e dos ânions cloreto e sulfato na água de abastecimento dos dez municípios avaliados. As médias são acompanhadas de desvios padrão e letras indicativas de diferenças estatísticas, de acordo com o teste de Scott-Knott a um nível de significância de 5%.

Tabela 2: Resultados de pH, cloreto, alcalinidade e sulfato das águas por município.

Cidades	pH	Alcalinidade (mg L ⁻¹)	Cloreto (mg L ⁻¹)	Sulfato (mg L ⁻¹)
Araguari	5,22±0,54b	17,3±2,3a,b	3,0±0,2a	2,3±0,8a
Campina Verde	6,18±0,30a	10,1±2,0c,d	2,1±0,3c,d	68,8±3,1b
Indianópolis	6,25±0,21a	18,3±3,5a,b	2,9±0,3a,b	11,3±0,8c
Ituiutaba	6,09±0,23a	11,2±1,7b,c,d	2,2±0,5a,b,c,d	51,9±2,2d
Iturama	6,07±0,52a	18,1±2,0a,b	1,9±0,2c,d	1,4±0,2a
Monte Carmelo	5,61±0,88b	14,0±3,9b,c	2,1±0,7b,c,d	0,5±0,2a
Patrocínio	5,30±0,19b	5,3±1,1d	2,6±0,2a,b,c	26,0±3,1e
Prata	6,41±0,28a	11,9±3,5b,c,d	2,4±0,3a,b,c,d	6,4±2,0a,c
Uberaba	6,37±0,15a	24,5±1,9a	2,2±0,3a,b,c,d	6,5±0,3a,c
Uberlândia	5,63±0,78b	8,7±1,2c,d	1,6±0,3d	6,2±1,2a
Portaria 888/2021	6 a 9	---	250	250

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Conforme a Tabela 2, observa-se que todos os resultados apresentaram valores de pH abaixo de 7,0, indicando características ácidas nas amostras de água. Segundo a Portaria GM/MS nº 888/2021, o pH da água destinada ao consumo humano deve estar entre 6,0 e 9,0. As amostras das cidades de Araguari (5,22 ± 0,54), Monte Carmelo (5,61 ± 0,88), Patrocínio (5,30 ± 0,19) e Uberlândia (5,63 ± 0,78) apresentaram valores abaixo da faixa regulamentada, com médias estatisticamente semelhantes. Contudo, esses valores de pH situam-se dentro da faixa ideal para a produção de cerveja, que varia de 5,2 a 5,6 (Palmer e Kaminski, 2021; Palmer, 2022). No entanto, as demais cidades apresentaram valores de pH que, embora estejam dentro dos limites regulamentares para consumo humano, encontram-se fora da faixa considerada ideal para a produção cervejeira.

É importante ressaltar que o ajuste de pH da água para a produção de cerveja pode ser feito com a adição de ácidos ou bases de grau alimentício. Para reduzir o pH, ácidos minerais como clorídrico (HCl), sulfúrico (H₂SO₄) e fosfórico são comumente utilizados, sendo que o ácido fosfórico, embora popular, pode formar complexos com íons de cálcio no mosto na forma de hidroxiapatita (Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂), o que pode afetar a sacarificação e a clarificação. Ácidos orgânicos, como o

acético, o cítrico e o láctico, também são usados, embora o acético e o cítrico sejam menos empregados devido aos sabores pronunciados que conferem. Para elevar o pH, pode-se utilizar bases fortes, como hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH), ou bases fracas, como carbonato de cálcio (CaCO₃) e bicarbonato de sódio (NaHCO₃). Esses compostos aumentam a alcalinidade da água e adicionam cátions específicos (Na⁺, K⁺ ou Ca²⁺), o que pode influenciar o perfil mineral da água e, consequentemente, o sabor e a claridade da cerveja (Palmer e Kaminski, 2021).

Uma alta alcalinidade não é ideal para a produção de cervejas claras, pois dificulta a regulação do pH da água. Recomenda-se que a alcalinidade esteja abaixo de 50 mg L⁻¹ e não exceda 100 mg L⁻¹, exceto em estilos de cervejas escuras, em que valores de até 150 mg L⁻¹ são aceitáveis (Palmer e Kaminski, 2021; Palmer, 2022; Torre, 2022). Todas as cidades avaliadas apresentaram água de abastecimento dentro desses limites recomendados. Patrocínio registrou o menor valor de alcalinidade (5,3±1,1 mg L⁻¹ CaCO₃), sendo estatisticamente similar a Prata, Ituiutaba, Campina Verde e Uberlândia. Por outro lado, Uberaba apresentou o maior valor de alcalinidade (24,5±1,9 mg L⁻¹ CaCO₃), estatisticamente semelhante a Iturama, Araguari e Indianópolis.

A alcalinidade atua como o principal sistema tampão da água; os íons bicarbonato (HCO₃⁻) tendem a elevar o pH ao reagir com H⁺ para formar ácido carbônico (H₂CO₃), que pode se decompor em água e CO₂. Em contrapartida, o cálcio, quando em excesso, precipita na forma de carbonato de cálcio (CaCO₃), liberando H⁺ na solução e, assim, diminuindo o pH. Dessa forma, o controle do pH durante a mosturação é mais eficiente com baixos valores de alcalinidade (Palmer, 2022; Muxel, 2022). Por outro lado, em cervejas escuras, uma alcalinidade mais elevada é vantajosa, pois ajuda a neutralizar a acidez dos maltes escuros. A redução da alcalinidade da água pode ser obtida por diluição com água deionizada, fervura, adição de cal hidratada (hidróxido de cálcio - Ca(OH)₂) ou pela introdução dos ácidos também usados para ajustar o pH (Palmer e Kaminski, 2021).

Os teores de cloreto nas amostras de água analisadas variaram de 1,6 mg L⁻¹, observado em Uberlândia, que apresentou média estatisticamente similar às cidades de Campina Verde, Iturama, Monte Carmelo, Uberaba e Prata, a 3,0 mg L⁻¹, registrado em Araguari, com valor médio estatisticamente semelhante às cidades de Indianópolis, Ituiutaba, Patrocínio, Prata e Uberaba. Observou-se que Prata e Uberaba formaram um grupo intermediário, apresentando médias estatisticamente equivalentes às cidades com os maiores e menores teores de cloreto. Todos os valores encontrados ficaram bem abaixo do limite máximo permitido pela legislação vigente (VMP: 250 mg L⁻¹).

Concentrações adequadas de íons Cl⁻ contribuem para o corpo e realce do sabor maltado da cerveja. Esses íons geralmente são adicionados durante as correções de cálcio, por meio de cloreto de cálcio (CaCl₂), geralmente di-hidratado (CaCl₂ · 2H₂O) ou cloreto de sódio (NaCl). Concentrações de Cl⁻ na faixa

de 150-250 mg L⁻¹ podem conferir à cerveja um caráter enjoativo, com sensação pastosa e, em associação com íons Na⁺, um sabor salgado. Combinado a íons SO₄²⁻, o cloreto confere um sabor mineral. Acima de 300 mg L⁻¹, o cloreto pode dificultar a floculação da levedura, prejudicando a clarificação e a estabilidade do sabor da bebida, além de favorecer a corrosão dos equipamentos de produção. Concentrações em torno de 500 mg L⁻¹ podem causar uma sensação de descarbonatação no paladar (Palmer e Kaminski, 2021; Palmer, 2022; Muxel, 2022).

Em relação aos níveis de sulfato, Monte Carmelo apresentou o menor valor (0,5 ± 0,2 mg L⁻¹), sendo estatisticamente semelhante aos resultados de Araguari, Iturama, Prata, Uberaba e Uberlândia. O maior valor foi registrado em Campina Verde (68,8 ± 3,1 mg L⁻¹), diferindo significativamente das demais cidades. Ituiutaba e Patrocínio também apresentam concentrações elevadas de sulfato, com 51,9 ± 2,2 mg L⁻¹ e 26,0 ± 3,1 mg L⁻¹, respectivamente, distinguindo-se das outras localidades. Todas as amostras de água das cidades avaliadas neste estudo apresentaram teores de SO₄²⁻ abaixo do limite recomendado de 250 mg L⁻¹.

O teor de sulfato na água para produção de cerveja pode variar de 0 a 250 mg L⁻¹. Em concentrações de 200 a 400 mg L⁻¹, esse ânion intensifica o amargor do lúpulo, tornando-o mais persistente e assertivo, o que confere à cerveja uma percepção mais seca e refrescante. A adição de sulfato à água cervejeira é geralmente realizada por meio do sulfato de cálcio di-hidratado (CaSO₄·2H₂O), conhecido como gipsita ou gesso. O sulfato de magnésio heptahidratado (MgSO₄·7H₂O) também pode ser utilizado, embora menos frequentemente. Teores extremamente baixos de sulfato podem comprometer o sabor do lúpulo em cervejas mais lupuladas. Em contrapartida, concentrações elevadas podem reduzir a qualidade do amargor e conferir um sabor mineral à cerveja. Acima de 400 mg L⁻¹, o amargor pode se tornar adstringente e desagradável. Cervejeiros tchecos e alemães evitam o uso de sulfatos em suas *Lagers*, pois esses íons interferem no perfil sensorial nobre e suave dos lúpulos usados nos estilos *Pilsner* e *Helles*. A remoção de sais de sulfato, que são geralmente muito solúveis, pode ser realizada por processos de troca iônica ou osmose reversa (Muxel, 2022; Palmer e Kaminski, 2021; Palmer, 2022; Torre, 2022).

Vale ressaltar que a proporção entre os íons sulfato e cloreto é um parâmetro importante na elaboração de uma cerveja, pois influencia o equilíbrio entre o amargor dos lúpulos e o dulçor dos maltes, afetando também a sensação de boca, variando entre um corpo mais seco e um corpo mais denso (Muxel, 2022; Palmer e Kaminski, 2021; Palmer, 2022).

A Tabela 3 apresenta os resultados das concentrações dos cátions cálcio, magnésio, sódio e potássio na água de abastecimento dos municípios avaliados. Valores iguais, indicados por letras idênticas, não diferem estatisticamente entre si conforme o teste de Scott-Knott, com um nível de significância de 5%.

Tabela 3: Resultados de cálcio, magnésio, sódio e potássio das águas por município.

Cidades	Cálcio (mg L ⁻¹)	Magnésio (mg L ⁻¹)	Sódio (mg L ⁻¹)	Potássio (mg L ⁻¹)
Araguari	5,7±0,6e	0,3±0,1e	13,5±1,5a,b	<L.D*
Campina Verde	28,7±1,2b	3,4±0,2c	15,0±1,0a	2,5±0,5a
Indianópolis	35,0±2,0b	4,9±0,6b,c	11,5±1,5b	1,3±0,6b
Ituiutaba	28,3±2,9b	3,4±0,4c	5,5±0,5c	1,0±0,6b
Iturama	25,3±2,5b,c	3,6±0,8c	6,0±0,5c	1,0±0,3b
Monte Carmelo	13,3±2,9d	1,2±0,4d,e	2,5±0,5d,e	<L.D*
Patrocínio	17,0±1,0c,d	1,4±0,4d,e	1,0±0,1e	1,0±0,1b
Prata	21,3±1,5c	5,6±0,5b	5,0±1,0c,d	1,0±0,6b
Uberaba	48,7±6,0a	9,5±1,6a	12±2,1a,b	2,0±0,6a,b
Uberlândia	23,7±1,5c	1,0±0,2d,e	8,0±1,0c	<L.D*
Portaria 888/2021	---	---	200	---

*L.D = limite de detecção do método.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Quanto ao Ca²⁺, o município de Uberaba apresentou o maior valor (48,7±6,0 mg L⁻¹). As cidades de Indianópolis, Campina Verde e Ituiutaba registraram concentrações de cálcio estatisticamente semelhantes, assim como Iturama, Uberlândia e Prata, e, em outro grupo, Patrocínio e Monte Carmelo. Embora em grupos diferentes, as cidades de Ituiutaba e Iturama, assim como Prata e Patrocínio, apresentaram teores de cálcio análogos. Araguari registrou a menor concentração de Ca²⁺ (5,7±0,6 mg L⁻¹). Todos os municípios apresentaram valores abaixo da faixa recomendada para produção cervejeira (50 a 150 mg L⁻¹), podendo ajustar essas concentrações com a adição de sais de cálcio, como cloreto de cálcio (CaCl₂), di-hidratado (2H₂O) ou anidro, e sulfato de cálcio (CaSO₄), geralmente di-hidratado (Palmer e Kaminski, 2021).

Embora neutros em termos de sabor, os íons Ca²⁺ são essenciais na produção de cerveja, atuando como cofatores em várias reações bioquímicas nas fases quente e fria do processo. Durante a mostura, o cálcio ajuda a reduzir o pH ao reagir com os fosfatos do malte, aumentando o rendimento do extrato e protegendo as enzimas amilolíticas contra a desnaturação. Na fervura, o cálcio auxilia na coagulação proteica (formação do trub), o que promove níveis adequados de proteínas no mosto e precipitação do oxalato, evitando o fenômeno do *gushing*. Durante a maturação, o cálcio estimula a floculação da levedura e a formação de complexos entre proteínas e polifenóis, melhorando a clarificação e estabilidade físico-química da bebida (Palmer e Kaminski, 2021; Palmer, 2022; Muxel, 2022). Em concentrações acima de 250 mg L⁻¹, no entanto, o cálcio pode inibir a absorção de magnésio pela levedura e prejudicar o desempenho da fermentação (Palmer e Kaminski, 2021).

Em relação ao Mg^{2+} , a água de Araguari apresentou a menor concentração ($0,3 \pm 0,1 \text{ mg L}^{-1}$), sendo estatisticamente similar às cidades de Patrocínio, Uberlândia e Monte Carmelo. Prata e Indianópolis exibiram valores estatisticamente semelhantes entre si, assim como Iturama, Campina Verde e Ituiutaba. O município de Uberaba ($9,5 \pm 1,6 \text{ mg L}^{-1}$) apresentou a maior concentração de magnésio, destacando-se em relação aos demais.

O íon Mg^{2+} atua de forma semelhante ao cálcio e é um nutriente essencial para o metabolismo da levedura, devendo estar presente no mosto em um nível mínimo de 5 mg L^{-1} . Em geral, não é necessário adicionar magnésio à água cervejeira, pois o malte fornece quantidades adequadas, exceto em mostos que contêm grandes quantidades de açúcares refinados ou adjuntos. Concentrações de Mg^{2+} entre 20 e 40 mg L^{-1} podem intensificar o sabor em estilos escuros de cerveja, como Porter e Stout. Em contrapartida, concentrações superiores a $70\text{--}80 \text{ mg L}^{-1}$ podem provocar um sabor amargo e ácido, e quando ultrapassam 125 mg L^{-1} , o magnésio pode conferir à bebida um efeito laxante e diurético (Palmer e Kaminski, 2021; Palmer, 2022; Muxel, 2022).

Em relação ao sódio, nenhuma das cidades ultrapassou o limite máximo permitido pela legislação (VMP: 200 mg L^{-1}). Campina Verde apresentou o maior valor ($15,0 \pm 1,0 \text{ mg L}^{-1}$), sendo estatisticamente similar a Araguari e Uberaba, que, por sua vez, tiveram valores similares aos de Indianópolis. Patrocínio registrou a menor concentração ($1,0 \pm 0,1 \text{ mg L}^{-1}$), estatisticamente igual a Monte Carmelo. As amostras de água das cidades de Ituiutaba, Iturama, Prata e Uberlândia mostraram valores médios estatisticamente iguais, variando de $5,0 \pm 0,5$ a $8,0 \pm 1,0 \text{ mg L}^{-1}$.

Concentrações de sódio entre 70 e 150 mg L^{-1} intensificam a doçura do malte na cerveja, especialmente quando associadas aos íons cloreto, além de proporcionar uma sensação de corpo maior, particularmente em cervejas claras. Contudo, águas com menores concentrações de sódio geralmente resultam em um sabor mais limpo, especialmente em *Lagers*. Exceto no caso do estilo *Gose*, caracterizado por alta concentração de sal, recomenda-se que a concentração de sódio na água de mostura não exceda 100 mg L^{-1} . Concentrações entre 150 e 200 mg L^{-1} podem conferir um sabor salgado à bebida, e acima de 250 mg L^{-1} podem resultar em um

sabor azedo desagradável. Altas combinações de sódio com cálcio, magnésio, bicarbonato e sulfato podem gerar sabores minerais, metálicos, ásperos, azedos e amargos. O sódio é um subproduto do abrandamento da água por troca iônica, processo que não ocorre ao utilizar osmose reversa. Além disso, na correção da água para aumentar a alcalinidade, é comum a adição de bicarbonato ou hidróxido de sódio (Mosher, 2018; Palmer e Kaminski, 2021; Palmer, 2022; Muxel, 2022).

Em relação ao potássio, as concentrações em Araguari, Monte Carmelo e Uberlândia ficaram abaixo do limite de detecção do método fotométrico. Campina Verde apresentou o maior valor entre as cidades analisadas ($2,5 \pm 0,5 \text{ mg L}^{-1}$), sendo estatisticamente igual a Uberaba, que, por sua vez, mostrou similaridade com Indianópolis, Ituiutaba, Iturama, Patrocínio e Prata.

Os íons K^+ têm um sabor similar ao dos íons Na^+ e podem conferir um gosto salgado à cerveja quando suas concentrações excedem 500 mg L^{-1} . No entanto, é raro que sua quantidade seja alta o suficiente para afetar o sabor da bebida, mesmo que o malte contribua naturalmente para uma concentração de potássio relativamente altas de potássio no mosto e na cerveja, geralmente em torno de 200 mg L^{-1} , podendo alcançar até 500 mg L^{-1} . Assim, quando é necessário ajustar os níveis de íons cloreto na água utilizada na produção de cerveja, o cloreto de potássio (KCl) é preferido. Além disso, o potássio é menos prevalente em águas naturais em comparação com o sódio e também pode ser removido por osmose reversa (Styburski, 2026; Palmer e Kaminski, 2021; Palmer, 2022; Muxel, 2022).

Com base nas análises realizadas, observou-se que as concentrações de diversos íons na água das cidades do Triângulo Mineiro variam, e essas variações podem ter um impacto significativo na produção de cerveja. Cidades com baixos níveis de sulfato na água podem afetar o sabor do lúpulo, enquanto baixos teores de sódio influenciam o sabor maltado. A maioria das cidades apresentou águas brandas, adequadas para a produção de cerveja. Compreender essas variações iônicas é essencial para a produção de cervejas de qualidade, permitindo ajustes nos processos conforme as características da água disponível.

A Figura 1 resume as principais características da água analisada para a produção de cerveja nas 10 cidades do Triângulo Mineiro.

Figura 1: Características da Água do Triângulo Mineiro para Produção de Cerveja.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

É importante ressaltar que as águas analisadas foram coletadas de um único ponto em cada cidade selecionada para o estudo, o que limita a representatividade dos resultados para as cidades como um todo. Para obter uma avaliação mais precisa, seria necessário realizar coletas em múltiplos pontos das cidades.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise das amostras de água disponíveis para uso industrial e consumo humano nas diferentes cidades avaliadas revelou variações que podem estar relacionadas aos diferentes tipos de rochas da região e ao método de captação, seja subterrânea ou superficial. Assim, para a padronização da água destinada à indústria cervejira, torna-se essencial implementar um rigoroso controle de qualidade. Esse controle é fundamental tanto para garantir as reações bioquímicas adequadas durante a etapa de brassagem quanto para assegurar o sabor final do produto destinado ao mercado consumidor.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro (IFTM) pelo apoio e recursos disponibilizados durante a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, O. A. **Qualidade da água de irrigação**. Cruz das Almas, BA: Embrapa, 2010.

BORTOLI, D. A. S.; SANTOS, F.; STOCCO, N. M.; ORELLI JR., A. A.; TOM, A.; NEME, F. F.; NASCIMENTO, D. D. Leveduras e produção de cervejas – revisão. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, v. 3, n. 1, p. 45-58, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 65, de 10 de dezembro de 2019. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 11 dez. 2019. Edição 239, Seção 1, p. 31. Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-65-de-10-de-dezembro-de-2019-232666262>. Acesso em: 11 nov. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2024/prt6098_18_12_2024.html. Acesso em: 21 maio 2026.

JUNIOR, A. A. M.; BARROS, Z. X. Utilização racional de água em cervejaria brasileira. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 35, n. 2, p. 287-294, 2020.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017**. Disponível em: https://portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria_Consolidacao_5_28_SETEMBRO_2017.pdf. Acesso em: 11 nov. 2024.

MOSHER, R. **Radical Brewing: receitas, contos e ideias transformadoras em um copo de cerveja**. 1. ed. Porto Alegre, RS: Editora Krater, 2018. 328 p.

MUXEL, A. A. **Química da cerveja**. 1. ed. Curitiba, PR: Editora Appris, 2022.

NOLASCO, G. M.; GAMA, E. M.; REIS, B. M.; REIS, A. C. P.; GOMES, F. J. S.; MATOS, R. P. Análise da alcalinidade, cloretos, dureza, temperatura e condutividade em amostras de água do município de Almenara/MG. **RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara/MG**, v. 2, n. 2, p. 52-64, 2020.

PALMER, J. J. **How to brew - tudo que você precisa saber para fazer excelentes cervejas**. 1. ed. Porto Alegre, RS: Editora Krater, 2022. 592 p.

PALMER, J.; KAMINSKI, C. **Água – um guia completo para fabricantes de cerveja**. 1. ed. Porto Alegre, RS: Editora Krater, 2021. 296 p.

REBELLO, F. F. P. Produção de cerveja. **Revista Agrogeoambiental**, dez. 2009.

ROSA, N. A.; AFONSO, J. C. A química da cerveja. **Química Nova na Escola**, São Paulo, SP, v. 37, n. 2, p. 98-105, maio 2015.

SALIMBENI, J. F.; MENEGUETTI, M. P. D. R. D.; ROLIM, T. F. **Caracterização da água e sua influência sensorial para produção de cerveja artesanal**. 2016. Trabalho de Graduação (Bacharel em Engenharia Química) – Curso de Engenharia Química, Universidade São Francisco, Campinas.

STYBURSKI, D.; JANDA, K.; BARANOWSKA-BOSIACKA, I.; ŁUKASZEWICZ, M.; MARCHLEWICZ, M. Beer as a potential source of macroelements in a diet: the analysis of calcium, chlorine, potassium, and phosphorus content in a popular low-alcoholic drink. **European Food Research and Technology**, Berlin, v. 244, n. 10, p. 1853-1860, 2018.

TORRE, L. **Ciência da cerveja - a química dos processos cervejeiros**. 1. ed. Porto Alegre, RS: Editora Krater, 2022.