

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE E TRATAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA IRRIGAÇÃO EM JAÍBA E JANAÚBA - PRECIPITAÇÃO E CORROSÃO

Moisés Santiago Ribeiro¹; Fábio Henrique de Souza Faria²; Luiz Antônio Lima³;
Silvânio Rodrigues dos Santos⁴; Marina de Jesus Soares⁵

RESUMO: A qualidade inferior das águas subterrâneas e a adoção de sistemas localizados de irrigação agravam os problemas de obstruções dos equipamentos. A avaliação da qualidade das águas com relação à precipitação e corrosão é fundamental para seu uso e manejo. Objetivou-se neste trabalho avaliar a qualidade das águas subterrâneas de Janaúba e Jaíba com relação à tais problemas. Analisaram-se as características físico-químicas pH, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- e CO_3^{2-} , e foram calculados IS, IE e Ca° . Estimou-se o volume de ácido fosfórico e clorídrico para neutralização da alcalinidade da água em quimigação sistemática, a fim de evitar precipitação de carbonato de cálcio. Elevados teores de bicarbonato, severamente restritivos foram verificados em mais de 63% dos poços amostrados. Isto, associado à alta relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ indica o precipitante sob a forma de carbonato de cálcio. Pelos valores médios de IS pouco acima de 0,3 e de 6,0 para IE evidencia-se o caráter precipitante em mais de 85% das águas analisadas, porém próximo da neutralidade. Incrustações podem ser evitadas pela aplicação de ácido clorídrico e fosfórico em quimigação sistemática nas quantidades médias de 1,0 e 0,3 L m^{-3} , respectivamente, para os municípios de Janaúba e Jaíba.

ABSTRACT: The inferior quality of groundwater and the adoption of the irrigation systems located aggravate the problems of obstructions of equipment. The water quality assessment with regard to the likely precipitation and corrosion is crucial for its use and management. The objective of this work was to evaluate the quality of groundwater of Janaúba and Jaíba with regard to these problems. Were analysed the physical and chemical characteristics pH, EC, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- and CO_3^{2-} , and were calculated IS, IE and Ca° . Was estimated the volume of phosphoric and hydrochloric acid to neutralization the alkalinity of the water in chemigation systematic, to avoid precipitation of calcium carbonate. High levels of bicarbonate, severely restrictive were recorded in more than 63% of the wells sampled. This coupled with high relation $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ indicates a precipitate in the form of calcium carbonate. By average values IS little above 0.3 and of 6.0 for IE shows the property precipitating in more than 85% of the water analyzed, but close to neutrality. Incrustations can be avoided by applying phosphoric and hydrochloric acid in the chemigation systematic in quantities averages of 1.0 and 0.3 m L^{-3} , respectively, for the municipalities of Janaúba and Jaíba.

Palavras-chave: carbonato de cálcio, pH, poço tubular

1) Eng. Agrº, MSc.,Doutorando UFLA/DEG, Campus Ufla, C.P. 37, Lavras-MG, moissantiago@hotmail.com;

2) Eng. Agríc., Prof. UFLA/DEG, PhD, Campus Ufla, C.P. 37, Lavras-MG, lalima@ufla.br;

3) Eng. Agrº, Prof. UNIMONTES/DCA, MSc., Doutorando UFLA/DEG, Av.Reinaldo Viana 2630, Janaúba-MG, C.P. 91, fabio.faria@uni montes.br;

4) Eng. Agrº, Prof. UNIMONTES/DCA, MSc., Av.Reinaldo Viana 2630, Janaúba-MG, C.P. 91, silvanio.santos@uni montes.br;

5) Graduanda Geografia ISEJAN/DC, Epamig, C.P. 12, Janaúba-MG, _marinaepamig@yahoo.com.br

1- INTRODUÇÃO

A região Norte Mineira possui área irrigável que permite produtividades elevadas e isentas de sazonalidade para boa parte dos cultivos. A atividade frutícola irrigada em expansão busca melhoria de eficiência adotando a irrigação localizada com emissores de baixo volume de aplicação e bocais de diâmetro reduzido, o que a torna vulnerável às obstruções. A qualidade inferior das águas subterrâneas, de natureza precipitante, pode agravar o problema, e reduzir a eficiência a níveis antieconômicos.

Apesar dos projetos públicos de irrigação não integrarem a região, produtores rurais usuários de poços tubulares exclusivos aos perímetros e outros investidores tem demonstrado interesse em se integrar à atividade de agricultura irrigada. Estudos geológicos comprovam as potencialidades hídricas do cárstico regional, com vazões específicas de até $36 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$, mas não qualificaram com propriedade a natureza e eventuais problemas de seu uso (Ramos & Paixão, 2003; Peixoto et al., 1986). É notável a intensa carstificação, ou seja, a ocorrência de rochas carbonáticas na região compreendida entre os rios São Francisco, Verde Grande e Gorutuba, com domínio geológico do Grupo Bambuí, seguido pela Formação Paraopeba.

As águas desta região são carbonatadas-cálcicas ou calco-magnesianas, e em menor proporção mistas ou cloretadas-sódicas (CETEC, 1981). Há uma predominância de sólidos em solução como carbonatos de cálcio e de magnésio, com propensão à precipitação sob determinados valores de pH e altas temperaturas, conforme a composição e concentração iônica.

Os carbonatos são os precipitados mais comuns e são produzidos quando sua concentração na solução ultrapassa o produto de solubilidade para o pH e temperatura da água. Lima & Silva (2000) relataram que o bicarbonato de cálcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) encontra-se naturalmente dissolvido nas águas, destacando-se com elevada concentração nas águas calcárias. Sua baixa solubilidade, no entanto, faz com que se dissocie em CO_2 e calcita (CaCO_3). A solubilidade do carbonato de cálcio também é muito baixa, em torno de $6,6 \text{ mg L}^{-1}$. A precipitação do carbonato de cálcio é favorecida sob fluxo laminar ou repouso nos intervalos de rega, ao longo dos tubos de polietileno pretos sob altas temperaturas e raios solares e na saída dos emissores onde a evaporação contribui para o aumento da concentração dos sais.

Pode-se prever a natureza da água, precipitante ou corrosiva, através do cálculo do Índice de Saturação do Carbonato de Cálcio na solução, ou Índice de Langelier (Langelier, 1936): $\text{IS} = \text{pH}_a - \text{pH}_c$, onde pH_c é o pH teórico da água que esta alcançaria em equilíbrio com o CaCO_3 e o pH_a é o pH atual da água. Se IS for negativo, há subsaturação de CaCO_3 e tendência da água ser corrosiva ou dissolver depósitos cálcicos; e se positivo, tendência para formação de precipitados e causar obstruções. Segundo Ayers & Westcot (1991), se as águas contiverem teor de Ca^{2+} maior que 6,0

me L⁻¹ e bicarbonato acima de 5,0 me L⁻¹ podem ocorrer precipitações na fertirrigação de fertilizantes fosfatados. Cuidados-se devem ser tomados na incorporação de agroquímicos à água de irrigação, em especial os fertilizantes devido às possíveis condições favoráveis a saturação, provocando precipitação.

A severidade da corrosão ou precipitação de carbonato de cálcio pode ser classificada pelo Índice de Estabilidade (Ryznar, 1944): $IE = 2pH_c - pH_a$. Se IE for menor que 5 poderão ocorrer incrustações acentuadas, de 5 a 6 ocasionarão incrustações em parte aquecidas, de 6 a 6,5 não ocorrerá problema (neutralidade), de 6,5 a 7 poderá haver corrosão leve, de 7 a 8 poderá ocasionar corrosão em partes aquecidas e acima de 8 poderá ocorrer corrosão acentuada.

A prevenção às obstruções pode ser feita mediante a análise da água de irrigação, devendo-se correlacionar a geometria do emissor (diâmetro e comprimento da saída) com o diagnóstico e cálculo dos possíveis precipitados para adoção de medidas de tratamento e manejo. Segundo Abreu (1987), realiza-se a prevenção de precipitação de carbonatos com aplicação de ácidos (clorídrico, fosfórico, nítrico ou sulfúrico) mediante determinação do fator ácido “f” de neutralização, que é o volume de ácido (me L⁻¹) necessário para atingir o pH desejado, normalmente entre 6 e 6,5, mediante curva de neutralização em laboratório. Ou ainda, pelo cálculo do fator “f” através da alcalinidade corrigida (Alc_c) para evitar precipitação. A aplicação deve ser feita durante a rega ou de preferência no final, para que a água acidulada permaneça na tubulação e evite a precipitação (Figueiredo et al., 2004; Nakayama & Bucks, 1981).

Snitzer (1990) recomenda que para análises de água indicando bicarbonato expresso em ppm ou mg L⁻¹, basta multiplicar a concentração de bicarbonato pelo fator 0,46 e obter-se-á a quantidade em litros de ácido sulfúrico (95%) por hectare-metro de água de irrigação. Para análises que expressem o bicarbonato em me L⁻¹, de mesmo modo, basta multiplicá-los pelo fator 15,2.

Egreja Filho et al. (1999) elaborou um programa computacional para correção da alcalinidade de águas para fertirrigação - AlKa 1.0, que se mostrou eficiente no cálculo do volume de ácido (H₃PO₄, HCl, H₂SO₄ e HNO₃) a ser empregado.

Na região Norte Mineira existem poucos trabalhos sobre qualidade de água, porém, sabe-se que a grande maioria das águas possui natureza precipitante com baixo IS e IE próximo da neutralidade. Silva & Carvalho (2004) ao estudar a água de poços tubulares de 50 propriedades de bananicultores em Janaúba encontraram valores médios de pH = 7,0, CE = 1,0 dS m⁻¹, RAS = 0,64, HCO₃⁻ + CO₃²⁻ = 7,0, Na⁺ = 1,4, Ca²⁺ = 7,5 e Mg²⁺ = 2,0 mmol_c dm⁻³, e IS = 0,2. Pode-se chegar com estes dados à valores médios de pH_c = 6,8 e IE = 6,6, configurando uma condição de transição entre isenção de problemas e corrosão leve, e que se deve ao fato da proximidade das zonas limítrofes.

Nunes et al (2005) ao estudar a qualidade de água da região de Janaúba e Jaíba avaliaram-se 10 poços tubulares (Nunes et al., 2005) e encontraram valores médios de $\text{pH} = 7,2$, $\text{CE} = 1,2 \text{ dS m}^{-1}$, $\text{RAS} = 0,6$, $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} = 7,8$, $\text{Na}^+ = 1,7$, $\text{Ca}^{2+} = 10,3$ e $\text{Mg}^{2+} = 1,6 \text{ mmolc dm}^{-3}$, a partir dos quais verificaram-se valores médios de $\text{pH}_c = 6,7$, $\text{IS} = 0,5$ e $\text{IE} = 6,2$. Assim, estas águas foram classificadas como isentas de problemas de precipitação ou corrosão.

Maia et al. (1998) pesquisaram na região do Baixo Assu (RN) as características físico-químicas de 30 análises de águas de poços tubulares para classificação quanto a obstrução e corrosão, e concluíram que 3 análises foram incrustantes e 27 corrosivas. Com a mesma finalidade, Maia et al. (1997) ao avaliarem 316 análises de água da Chapada do Apodi (CE) concluíram que 61% destas foram incrustantes, 29% corrosivas e 10% neutras (IS médio = 0,12). Ambas as águas se caracterizaram cloretadas-sódicas. No Assu ocorreram médios teores de cálcio e bicarbonato, e no Apodi ocorreram elevados teores de cálcio e magnésio e médios de bicarbonato.

Este estudo teve por objetivo avaliar e classificar a qualidade das águas subterrâneas da região de Janaúba e Jaíba para fins de irrigação, com relação à capacidade de incrustação e corrosão e estimar a quantidade média de ácido suficiente para evitar a precipitação sob a forma de carbonatos.

2- MATERIAL E MÉTODOS

2.1- Localização e Fisiografia da Área de Abrangência do Estudo

As amostras de água analisadas foram coletadas na região Norte de Minas, em poços tubulares localizados entre os rios São Francisco, Verde Grande e Gorutuba, denominada Depressão SanFranciscana, com altitude de aproximadamente 518 m, e compreendida entre os paralelos $14^{\circ}00'$ e $16^{\circ}00'$ e os meridianos $44^{\circ}00'$ e $44^{\circ}30'$. A classificação do clima da região segundo Koeppen é Aw, caracterizado por chuvas concentradas no verão, e secas nos meses do inverno. Possui pluviosidade média anual de 871 mm, concentrados de novembro a março. A temperatura média anual é de 24°C e as médias de verão e inverno são 32 e $19,5^{\circ}\text{C}$, respectivamente. A insolação é de 2763 horas anuais. Com umidade relativa média de 70,6%, sendo que no período seco pode chegar a 20%. A evapotranspiração potencial média calculada pelo método de Hargreaves, para Janaúba, é da ordem de 1.649 mm anuais, e o déficit hídrico médio é de 778 mm ano^{-1} (Rodrigues et. al., 2002).

Os dados utilizados para o presente estudo foram provenientes dos boletins de análises de água emitidos pelo Laboratório de Solos, Plantas e Água do Centro Tecnológico Norte de Minas pertencente à Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (CTNM/EPAMIG). Foi adquirido um total de 280 e 170 análises de água de poços tubulares distribuídos na região de Janaúba e Jaíba, respectivamente, obtidas entre os anos de 1999 e 2006.

2.2- Características e Metodologias de Classificação da Água

Avaliaram-se as características físico-químicas pH, CE em dS m^{-1} a 25°C , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , CO_3^{2-} e HCO_3^- em me L^{-1} , determinadas segundo Embrapa (1997). Estimaram-se as médias do índice de saturação, segundo Ayers & Westcot (1991), do índice de estabilidade segundo Ryznar (1944) e o cálcio corrigido (Ca°) segundo Suarez (1981). Calculou-se o volume de ácido para rebaixamento do pH e neutralização da alcalinidade de saturação do carbonato de cálcio, segundo Abreu (1987). O Erro Iônico ou Índice de Schoeller foi calculado segundo Teissedré (1988).

Foi determinada a média aritmética, a moda e a amplitude da classe modal e o coeficiente de variação dos dados das características físico-químicas da água, com o auxílio do programa computacional estatístico Sisvar, versão 5.0, segundo Ferreira (2003).

Para a interpretação das características da qualidade de água adotaram-se as metodologias, segundo Ayers & Westcot (1991), Ryznar (1944) e Teissedré (1988).

O volume de ácido para neutralizar a alcalinidade foi calculado pelas equações 1, 2, 3 e 4, segundo Abreu (1987).

Cálculo do fator “f” através da alcalinidade corrigida (Alc_c):

$$p\text{Alc}_c = p\text{Alc} + IS \quad \therefore \text{Alc}_c = 10^{-p\text{Alc}_c} \quad (1)$$

Cálculo da concentração de $\text{CO}_3 + \text{HCO}_3^-$ a eliminar (Alc_e):

$$\text{Alc}_e = \text{Alc} - \text{Alc}_c = f(\text{meL}^{-1}) \quad (2)$$

Onde:

$$\text{Alc} = \text{CO}_3 + \text{HCO}_3^- \quad (3)$$

$$\text{Volume do ácido (L)} = f * N^{-1} \quad (4)$$

Onde:

N = Normalidade do ácido a ser aplicado ($\text{H}_3\text{PO}_4 = 45$, $\text{HCl} = 12$, $\text{H}_2\text{SO}_4 = 36$ e $\text{HNO}_3 = 16$).

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características físico-químicas das águas subterrâneas dos municípios de Janaúba e Jaíba necessárias ao estudo da precipitação ou corrosão pelo carbonato de cálcio estão apresentadas na Tabela 1. A classificação das características físico-químicas: CE, HCO_3^- e pH, relativas à sodicidade e alcalinidade da água de Janaúba e Jaíba, para fins de irrigação estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1. Características físico-químicas da água de poços tubulares da região de Janaúba e Jaíba

Composição	Janaúba				Jaíba			
	Me	Mo	A	CV	Me	Mo	A	CV
pH	7,11	7,00	5,81	2,90	7,23	7,45	5,80	2,20
CE	1,06	0,98	45,46	3,30	0,86	0,91	30,45	1,62
Ca ²⁺	7,92	7,25	48,02	26,93	6,55	6,25	34,85	14,16
Mg ²⁺	2,40	2,44	65,27	10,87	1,82	1,37	62,92	6,40
K ⁺	0,17	0,12	51,48	1,02	0,12	0,10	127,31	1,02
Na ⁺	1,87	1,89	69,82	9,51	1,36	0,91	94,92	8,22
HCO ₃ ⁻	12,48	14,95	42,68	33,00	9,19	7,04	48,55	28,00
CO ₃ ⁻	0,06	0,00	397,10	2,00	0,03	0,00	408,10	1,00
Cl ⁻	3,36	2,28	82,67	17,60	3,06	3,40	58,31	16,00

pH; Condutividade elétrica da água (CE) em dS m⁻¹; Íons em me L⁻¹; Média (Me), Moda (Mo) e Amplitude (A) em me L⁻¹; Coeficiente de Variação (CV) em %

Tabela 2. Classificação das características físico-químicas relativas à sodicidade e alcalinidade da água de Janaúba e Jaíba, para fins de irrigação.

Características físico-químicas	Janaúba			Jaíba		
	SR	RM	RS	SR	RM	RS
CE	15,41	82,79	1,80	27,44	72,56	0,00
HCO ₃ ⁻	0,40	32,67	66,93	1,45	26,81	71,74
pH	40,14	56,63	3,23	25,00	69,50	5,49
Ca	19,0	54,50	26,5	30,5	59,75	9,75

pH; Condutividade elétrica da água (CE) em dS m⁻¹; HCO₃⁻ em me L⁻¹; Grau de restrição: SR = sem restrição; RM = restrição moderada; RS = restrição severa em % de poços amostrados.

Os valores médios de CE das águas foram de 0,86 e 1,06 dS m⁻¹ para Jaíba e Janaúba, respectivamente. Os menores valores de CE de Jaíba, quando comparados aos de Janaúba, se devem provavelmente a maior proximidade do Rio São Francisco, dreno natural da bacia considerando-se uma macro-topossequência, ou seja, pelo fator de diluição/depuração da água.

A classificação da CE quanto ao uso das águas na irrigação é de moderada restrição em 72,56 a 82,79% dos poços analisados. Isto se deve à ampla faixa de 0,7 a 3,0 dS m⁻¹ considerada de restrição moderada ao uso da água pela classificação de Ayers & Westcot (1991). A CE pode ser uma variável a auxiliar no diagnóstico da precipitação e corrosão, já que em elevados valores tem-se maior probabilidade de conter maiores teores de Ca²⁺ e HCO₃⁻, ou seja, ocorrer saturação ou subsaturação de CaCO₃, segundo Suarez (1981).

Verificaram-se valores médios dos íons de Ca^{2+} iguais a 7,92 e 6,55 me L^{-1} e de Mg^{2+} iguais a 2,40 e 1,82 me L^{-1} para Janaúba e Jaíba, respectivamente. Apesar das médias destes íons estarem dentro de uma faixa de normalidade para água de irrigação, a amplitude de seus valores ultrapassam a faixa de normalidade, segundo Ayers & Westcot (1991) e expressam a variação de qualidade de água indicando suficiência de cálcio para correspondência ao bicarbonato na formação de carbonato de cálcio.

Os valores médios e modais de pH foram pouco superiores a 7 para os dois municípios. Porém, a amplitude de 2,2 e 2,9 para Jaíba e Janaúba, respectivamente, indicam grande variabilidade desta característica nas análises de água. O pH da água segundo Ayers & Westcot (1991) é classificado como de restrição moderada em 56,6 e 69,5% dos poços de Janaúba e Jaíba, respectivamente. Assim, percebe-se para a maioria dos poços analisados dos dois municípios uma água de moderada alcalinidade ($4,5 < \text{pH} < 5,5$ e $7,0 < \text{pH} < 8,0$). Valores médios de pH semelhantes foram encontrados por Nunes et al. (2005) e Silva & Carvalho (2004), em análise da água calcária da região, com pH 7,2 e 7,0, respectivamente.

Os valores médios de cálcio 7,92 e 6,55 me L^{-1} das águas classificam-nas como de risco moderado para uso na irrigação, observando-se a ocorrência desta classe em 54,50 e 59,75% das análises de água para Janaúba e Jaíba, respectivamente. Salienta-se sobre o risco de formação de precipitados de fósforo se for feita fertirrigação com fertilizantes fosfatados nestas águas.

Observaram-se elevados teores médios e modais de HCO_3^- da água dos dois municípios, e que condizem com a formação geológica cárstica, que confere sua natureza carbonatada-cálcica, conforme os estudos geológicos realizados por Ramos & Paixão (2003). Variações nos teores de bicarbonatos podem ser observadas pelos elevados valores de amplitude verificados para Janaúba e Jaíba, iguais a 42,68 e 48,55 me L^{-1} , respectivamente.

Para a classificação da água quanto aos teores de bicarbonato, maiores percentuais de poços amostrados, iguais a 63,93 e 71,74% indicaram restrição severa, e 26,81 e 32,67% restrição moderada, observados para Janaúba e Jaíba, respectivamente.

Esta classificação evidencia seu potencial de alcalinização, pela ação neutralizadora dos íons H^+ e precipitação de carbonatos de cálcio e magnésio. Em análise conjunta dos valores médios e amplitude de classe do HCO_3^- , do Ca^{2+} e das relações $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ e $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ igualmente elevados, pode-se inferir que seja alta a probabilidade da condição precipitante destas águas.

As características físico-químicas estimada: pHc, índice de saturação (IS), índice de estabilidade (IE), cálcio corrigido (Ca°) e as relações $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ e $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Estatística descritiva das características físico-químicas da água subterrânea dos municípios de Janaúba e Jaíba

Características físico-químicas	Janaúba				Jaíba			
	Me	Mo	Cv %	A	Me	Mo	Cv %	A
pHc	6,69	6,55	5,30	2,50	6,79	6,80	5,62	2,80
IS	0,41	0,36	121,09	3,44	0,30	0,37	123,70	3,90
IE	6,04	5,89	12,61	4,72	6,37	6,26	9,42	6,18
Ca/Mg	4,24	3,81	63,20	14,16	4,79	3,70	68,91	17,10
HCO ₃ /Ca	2,86	2,10	159,43	43,44	2,01	2,11	75,84	14,77
Ca°	1,68	1,60	77,83	18,96	1,64	1,76	31,13	3,19

Concentração de íons de hidrogênio associada com o equilíbrio do carbonato (pHc); Índice de Saturação (IS); Índice de estabilidade (IE); Relação Ca/Mg; Cálcio contido na água do solo (Ca°) em me L⁻¹; Média (Me), Moda (Mo) e Amplitude (A) em me L⁻¹; Coeficiente de Variação (CV) em %

Os valores médios e modais de pHc foram próximos de 7, mas com uma amplitude média elevada de pelo menos 2,5 e CV pouco acima de 5%, para os dois municípios. Esses valores propiciam um índice de saturação médio variável de 0,30 a 0,41, o que confere às águas a condição de precipitantes, com valores de amplitude pouco acima de 3 e CV próximo de 120%.

Verificaram-se valores médios e de amplitude da relação Ca²⁺/Mg²⁺ superiores a 4,0 e 14,0, respectivamente para os dois municípios. A magnitude destes valores indica a disponibilidade do cálcio devido à sua predominância como cátion e permite concluir que se o valor de pH for favorável, pode ocorrer precipitação de carbonato de cálcio.

O Ca°, segundo Suarez (1981), representa a concentração final de cálcio que permanecerá na solução do solo como resultado da interação entre a relação HCO₃⁻/Ca²⁺ e a salinidade total (CE) da água de irrigação. Os teores médios estimados de Ca° foram semelhantes nos dois municípios. Porém, se verificou elevado valor de amplitude para Janaúba, quando comparado a Jaíba. Empiricamente, a diferença entre os teores Ca²⁺ e Ca° poderia ser considerada como a quantidade de cálcio precipitado sob alguma forma de sal.

Os valores médios do índice de saturação de 0,41 e 0,30 para os municípios de Janaúba e Jaíba, respectivamente, são indicativos de condição precipitante, porém, próxima à neutralidade. Em Janaúba as análises precipitantes somam um percentual de 85,25 contra 14,75 das análises corrosivas, e na Jaíba 89,10% das análises são precipitantes e 10,90% são corrosivas.

Ao estabelecer-se uma relação entre HCO₃⁻ e Ca²⁺ pode-se analisar empiricamente a disponibilidade do cátion e do ânion para a formação do carbonato de cálcio. Para Janaúba, tem-se

que em 78,5% das águas analisadas os valores da relação $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ são maiores que 1, enquanto em Jaíba 66,67% foram maiores que 1. É forte indicativo da condição precipitante das águas

Os valores médios e modais para o índice de estabilidade entre 6 e 6,4 são indicativos de que as águas dos dois municípios de modo geral são classificadas como neutras, à exceção de Janaúba com moda igual a 5,89 (incrustante em partes aquecidas). Apesar de um valor relativamente baixo de CV igual a 12,6 e 9,4, observou-se elevada amplitude de classe igual a 4,72 e 6,18, para Janaúba e Jaíba, respectivamente, o que indica uma grande variabilidade da qualidade de água da região, quanto à propensão à precipitação.

A distribuição de frequência das classes de precipitação/corrosão das análises de água está apresentada na Figura 1, indicando: IP - incrustações pesadas, IPA - incrustações em partes aquecidas; N - neutra, CL - corrosão leve, CPA - corrosão em partes aquecidas e CA - corrosão acentuada. Observa-se que em pouco mais de 45% dos poços amostrados a sua água propicia problemas de incrustações em partes aquecidas.

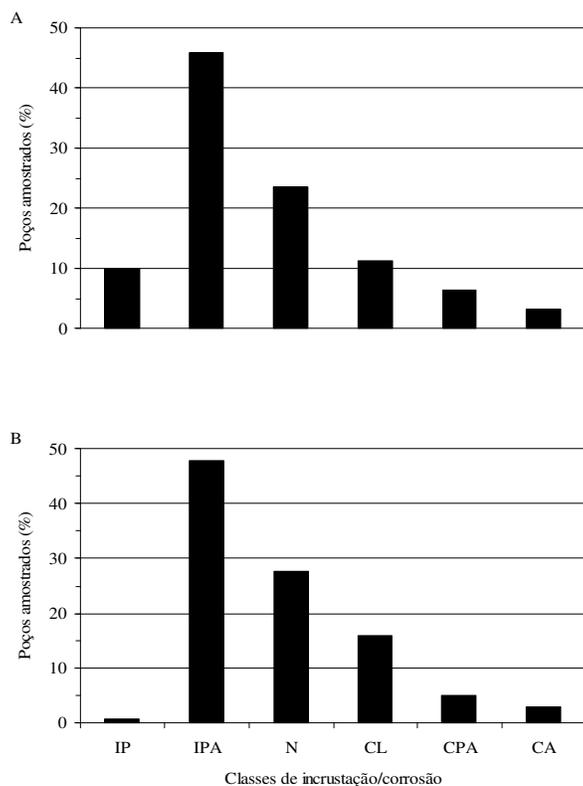


Figura 1. Distribuição de frequência das classes de incrustação e corrosão da água de Janaúba (A) e Jaíba (B).

Os volumes de ácido clorídrico e fosfórico necessários para neutralizar a alcalinidade ou rebaixar o pH das águas de poços tubulares a fim de evitar a precipitação do carbonato de cálcio são mostrados na Tabela 4.

Observa-se que os valores médios da quantidade de ácido clorídrico e fosfórico a se aplicar para reduzir o pH da água a níveis que previnam da precipitação dos carbonatos situaram-se próximos de 1,0 e 0,3 L m³, respectivamente. Devido aos elevados valores de alcalinidade (CO₃ + HCO₃⁻) da água, quando comparados aos baixíssimos valores de alcalinidade corrigida para os diferentes pH desejáveis, a quantidade de ácido calculada pouco variou.

Entretanto, ao considerar a normalidade de cada ácido para o cálculo do volume de ácido a aplicar, se observa uma quantidade média igual a 0,7 L excedente de ácido clorídrico com relação ao fosfórico. Assim, em função da solubilidade dos elementos resultantes da aplicação destes ácidos (fosfato de cálcio = 1,2 mg L⁻¹ a 20°C e cloreto de cálcio = 813 g L⁻¹ a 25°C), da concentração do produto comercial e do custo de mercado, pode-se optar pelo ácido mais adequado técnica-econômicamente à prevenção de precipitações na forma de carbonatos. Com o propósito de racionalizar o uso de ácido na prevenção de precipitação, segundo Vermeiren & Jobling (1997) tem-se realizados ensaios satisfatórios com injeções periódicas de soluções (0,5 a 1%) de ácido clorídrico a 36%, seguidas de uma lavagem com água.

Tabela 4. Quantidade de ácido (L m⁻³) a se aplicar na água subterrânea de Janaúba e Jaíba para neutralizar a sua alcalinidade e acidificá-la a diferentes valores de pH.

Ácido/Redução de pH	Janaúba				Jaíba			
	Me	Mo	Cv %	A	Me	Mo	Cv %	A
HCl / 5,5	1,065	1,067	41,277	2,780	1,019	1,161	40,662	2,276
HCl / 6,0	1,045	1,053	42,168	2,780	0,998	1,133	41,553	2,274
HCl / 6,5	1,033	1,043	42,686	2,780	0,986	1,113	42,101	2,278
HCl / 7,0	1,024	1,039	43,093	2,770	0,976	1,109	42,509	2,279
H ₂ PO ₄ / 5,5	0,284	0,305	41,250	0,740	0,272	0,310	40,659	0,607
H ₂ PO ₄ / 6,0	0,279	0,296	42,244	0,740	0,266	0,302	40,535	0,606
H ₂ PO ₄ / 6,5	0,275	0,278	42,822	0,740	0,263	0,300	42,107	0,608
H ₂ PO ₄ / 7,0	0,273	0,294	43,045	0,740	0,260	0,296	42,508	0,608

Média (Me), Moda (Mo) e Amplitude (A) em me L⁻¹; Coeficiente de Variação (CV) em %

Calculou-se o Erro Iônico ou Índice de Schoeller das análises de água, segundo Teissedré (1988) para averiguar o equilíbrio de cátions e ânions, ou seja, verificar a ausência significativa de íons nas análises, devido à probabilidade de ocorrência de elementos problemáticos como boro,

ferro ou sulfato nas águas. O erro iônico médio verificado para as análises físico-químicas das águas de diferentes poços tubulares foi igual a -11 e -14% para a região de Janaúba e Jaíba, respectivamente. Com base no valor médio de condutividade elétrica da água, a diferença média entre cátions e ânions admitida seria de até -6,48% para Janaúba e -7,04% para Jaíba, segundo Custodio & Llamas (1983). No entanto, os valores de erro iônico encontrados podem ser creditados a ausência dos íons Fe e Mn nas análises obtidas, uma vez que, segundo Nunes et al. (2005) são elevados os teores destes elementos na água dessa região. É aconselhável, portanto, que se faça uma análise completa para constatação dos teores dos íons ausentes das análises.

5- CONCLUSÕES

Elevados valores médios de HCO_3^- e da relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ conferem caráter precipitante à maioria das águas de poços tubulares de Janaúba e Jaíba, especificamente na forma de carbonato de cálcio, sob condições climáticas favoráveis

Valores médios de índice de saturação e de estabilidade são indicativos da ocorrência de precipitação em uma condição próxima à neutralidade.

Com o uso destas águas na irrigação, tornar-se-á mais freqüente a ocorrência de problemas de incrustações, quando comparados aqueles advindos de sua ação corrosiva.

Problemas de incrustações em tubulações de irrigação podem ser evitados pela aplicação sistemática de ácido clorídrico e fosfórico nas quantidades médias de 1,0 e 0,3 L m⁻³, respectivamente, para as águas subterrâneas de Janaúba e Jaíba.

AGRADECIMENTOS

À Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) pelo fornecimento dos boletins de análises de água da região de Janaúba e Jaíba. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão de bolsas de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J.M.H. **Obturaciones**. II Curso Internacional de Riego Localizado. INIA, CRIADA-II. Canárias, 1987, 16p.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. 2.ed. Traduzido por H.R. Gheyi; J.F. Medeiros; F.A.V. Damasceno. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29).

CETEC - CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **2º Plano de desenvolvimento integrado do Noroeste Mineiro. Síntese.** Belo Horizonte: CETEC (Série de publicações técnicas). 1981. 130 p.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrologia subterrânea.** 2. ed. Barcelona: Omega, 1983. 1200p.

EGREJA FILHO, F.B.; MAIA, C.E.; MORAIS, E.R.C. de. Método computacional para correção da alcalinidade de águas para fertirrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.415-423, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. **Manual de métodos de análise de solo.** 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 1997. 212p.

FERREIRA, D.F. **Programa de análises estatísticas (statistical analysis software) e planejamento de experimentos - SISVAR 5.0 (Build 67).** DEX/UFLA, Lavras, 2003.

FIGUEIREDO, L.P.; VILELA, L. A. A ; GUIMARÃES, P. T. G.; NOGUEIRA, F. D.; GUIMARÃES, M. J. L.; FIGUEIREDO, F. C. **Uso de ácido cítrico e complexo enzimático na prevenção de obstrução de vazão em simulação de fertirrigação.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 8., 2004, Lages. **Anais...** Lavras: UFLA, 2004. CD-Rom.

LANGELIER, W.F. The analytical control of anticorrosion water treatment. **Journal of American Water Works Association**, Denver, v.28, n.10, p.1500-1521, 1936.

LIMA, L.A.; SILVA, E. Irrigação por gotejamento em café. **Revista Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v.48, p.50-55, set., 2000.

MAIA, C.E; MORAIS, E.R.C. de. Qualidade da água para fertirrigação por gotejamento. II. Região do Baixo Assu, RN. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.6 n.1, p.12-26, 1998.

MAIA, C.E; MORAIS, E.R.C. de; OLIVEIRA, M. de. Qualidade da água para fertirrigação por gotejamento. I. Região da Chapada do Apodi, RN. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.5, n.4, p.293-307, 1997.

NAKAYAMA, F.S, BUCKS, D.A. Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers.** St. Joseph, v.24, n.4, p.77-80, 1981.

NUNES, W.A.G. de A.; KER, J.C.; NEVES, J.C.L.; RUIZ, H.A. FREITAS, G.A.; BEIRIGO, R.M. Qualidade da água de irrigação de poços tubulares e do rio Gorutuba na região de Janaúba-MG, **Irriga**, Botucatu, v.10, n.4, p.403-410, nov./dez., 2005.

PEIXOTO, C.A. de M.; ESCODINO, P.C.B.; MARQUES, A.F.S.M. Água subterrânea para irrigação na região cárstica do Norte de Minas Gerais e Sul da Bahia - Discussão preliminar. **Revista Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n.86, p.11-17, 1986.

RAMOS, M.L.S.; PAIXÃO, M.M.O.M. **Disponibilidade hídrica de águas subterrâneas – Produtividade de poços e reservas explotáveis dos principais sistemas aquíferos**. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), 2003. 41p.

RODRIGUES, M.G.V.; SOUTO, R.F.; MENEGUCCI, J.L.P. Efeito da poda da última penca do cacho da bananeira prata anã (AAB) irrigada na produção de frutos no norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.24, n.1, p.108-110, abr., 2002.

RYZNAR, T. A new index for determining the amount of calcium carbonate scale formed by a water. **Journal of American Water Works Association**, Denver, v.36, n.3, p.472-494, 1944.

SILVA, J.T.A. da; CARVALHO, J.G. de. Propriedade do solo, estado nutricional e produtividade de bananeiras ‘Prata anã’ (AAB) irrigadas com águas calcárias. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.28, n.2, p.332-338, mar./abr., 2004.

SNITZER JR., S. **Manual de Manutenimento para Sistemas de Riego de Bajo Volumen**. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation. Glendora, Califórnia, 1990. 56p

SUAREZ, D.L. Relation between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternate method of estimating SAR of soil or drainage waters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.45, p.469-475, 1981.

TEISSÉDRE, J.M. **Qualidade da água para irrigação**. Curso de elaboração de projetos de Irrigação. Módulo 3.2. ABEAS. Brasília-DF. 1988. 31p.

VEIMEIREN, L.; JOBLING, G.A. **Irrigação localizada**. In: GHEYI, H.R.; DAMASCENO, F.A.V.; SILVA JUNIOR, L.G.A.; MEDEIROS, J.F. de. Campina Grande: UFPB, 1997, 184p. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 36.