

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA IRRIGAÇÃO EM JAÍBA E JANAÚBA : SODICIDADE E ALCALINIDADE

Fábio Henrique de Souza Faria¹; Luiz Antônio Lima²; Moisés Santiago Ribeiro³;
Silvânio Rodrigues Santos⁴; Kleber Mariano Ribeiro⁵

RESUMO: Devido à escassez hídrica superficial, os irrigantes da região Norte Mineira necessitam usar as águas subterrâneas disponíveis e de qualidade inferior. Os prováveis problemas de seu uso na irrigação são a salinização, alcalinização e sodificação dos solos. A avaliação da qualidade de água pode evitar prejuízos aos investimentos na agricultura irrigada. O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade das águas subterrâneas de Janaúba e Jaíba quanto aos problemas sodicidade e alcalinidade. Os valores de pH e CE predominantes indicam risco moderado de uso, com superioridade para Jaíba. A RASaj tem classificação S₁ em 94%, das análises. Os valores de Mg, Ca e HCO₃ são em maioria baixos, médios e elevados e classificados como sem risco, risco moderado e severo risco de uso na irrigação, respectivamente. Os valores de Na e PS das águas e PST do solo não representam risco de sodificação dos solos ou restrição ao uso da água na irrigação. As águas são classificadas como de uso irrestrito em 59 a 83% das análises quanto ao risco de redução de infiltração nos solos. A classificação USSL das águas para uso na irrigação é C₃S₁ e a UCCC é C₂S₁ para o maior percentual de análises destes municípios.

ABSTRACT: Due to surface water shortages, the north Minas Gerais region producers need to use the groundwater available and of inferior quality. The likely problems of these waters in the region are the soil salinity, sodicity and alkalinity. The assessment of the water quality can prevent damage to investment in irrigated agriculture. The objective of this work was to examine the Janaúba and Jaíba groundwater quality by the sodicity and alkalinity problems. The pH and EC values indicates moderate risk its use in irrigation, but small values in Jaíba. The RASaj has S₁ classification in 94% of the analyses. The Mg²⁺, Ca²⁺ and HCO₃⁻ predominant values were low, middle and high, and it indicates no risk, moderate risk and severe risk to water use in irrigation, respectively. The Na⁺ and PS water and soil PST values not represented sodicity risk or restriction on the use of waters for irrigation. The waters were classified as unrestricted use with respect to risk of reducing its infiltration into the soil in 59 to 83% of the tests. The USSL classification as to use in irrigation is C₃S₁ and the UCCC is C₂S₁ for both municipalities, in a greater percentage of analyses.

Palavras-chave: pH, sódio, poço tubular

1) Prof. UNIMONTES/DCA, Av.Reinaldo Viana 2630, Janaúba-MG, C.P. 91, fone fax 38 38212756, fabio.faria@unimontes.br;

2) Prof. UFLA/DEG, Campus Ufla, C.P. 37, Lavras-MG, fone fax 35 3829 1362, lalima@ufla.br;

3) Doutorando UFLA/DEG, Campus Ufla, C.P. 37, Lavras-MG, fone fax 35 3829 1362, moisessantiago@hotmail.com;

4) Prof. UNIMONTES/DCA, MSc., Av.Reinaldo Viana 2630, Janaúba-MG, C.P. 91, fone fax 38 38212756 silvanio.santos@unimontes.br;

5) Graduando Eng. Agrícola UFLA/DEG, Campus Ufla, C.P. 37, Lavras-MG, fone fax 35 3829 1362, klebermariano@gmail.com

1- INTRODUÇÃO

A atividade frutícola irrigada tem obtido sucesso na região Norte Mineira em função de fatores climáticos favoráveis e investimentos em infra-estrutura específica. Apesar dos projetos públicos de irrigação não integrarem a região, a atividade tem despertado o interesse dos demais produtores que possuem recursos hídricos subterrâneos satisfatórios, dada à insuficiência da malha hidrológica superficial. Estudos geológicos comprovaram as potencialidades hídricas do cárstico regional, com vazões específicas de até $36 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$, classificaram as águas como C_2S_1 e C_3S_1 , em geral, mas não qualificaram com propriedade a natureza e eventuais problemas de seu uso (Ramos & Paixão, 2003; Peixoto et al., 1986). Em análise de 1.200 dados de uma perfuradora de poços tubulares, constatou-se vazão média e modal de $23 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (amplitude de $264 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) em poços de 100 m de profundidade na região, suficiente para irrigar área de 6 ha.

A região compreendida entre os rios São Francisco, Verde Grande e Gortuba apresentam intensa carstificação, com domínio geológico do Grupo Bambuí, seguido pela Formação Paraopeba. Ocorre predomínio de rochas carbonáticas, intercaladas pelas pelíticas. As águas desta região são carbonatadas-cálcicas ou calco-magnesianas, e em menor proporção mistas ou cloretadas-sódicas (CETEC, 1981).

Os investimentos em agricultura irrigada são de vulto e risco, exigindo, portanto, estudos complexos para detectar pontos críticos e auxiliar na tomada de decisão. O diagnóstico da qualidade de águas subterrâneas através de interpretação rigorosa das análises de um banco de dados da região é uma importante ferramenta para a agricultura irrigada.

São vários os problemas gerados com o uso sistemático destas águas na irrigação devido às suas características físico-químicas, já que a região apresenta evapotranspiração elevada e pluviografia desuniforme e deficitária. As principais conseqüências são a sodificação e a alcalinização dos solos, ocorrendo sua desestruturação pelo sódio e redução da infiltração, armazenamento e condutividade hidráulica, e a elevação do pH pelo cálcio e carbonatos em excesso na solução, reduzindo a solubilidade de elementos essenciais à nutrição das plantas.

Para avaliar e classificar as águas com relação aos problemas supracitados pode-se utilizar as características CE, pH, Ca, Mg, Na, K, Cl, CO_3 e HCO_3 e suas interrelações - razão de adsorção de sódio (RAS), porcentagem de sódio (PS), carbonato de sódio residual (CSR), índice de saturação (IS), índice de estabilidade (IE), equivalente carbonato de cálcio (E_{CaCO_3}) e outras.

A irrigação com água acentuadamente calcária propicia altas concentrações de HCO_3^- na solução do solo e CaCO_3 precipitado, valores elevados de pH e virtualmente nenhum H^+ e Al^{3+} trocáveis. Assim, ao reduzir a concentração de Al^{3+} na solução do solo, ou ainda, se concomitante, houver contribuição percentual expressiva de cátions como o sódio, potássio ou magnésio na água

de irrigação ou no solo, haverá tendência à dispersão da estrutura dos solos devido ao aumento da dupla camada difusa (DCD), provocada por esses cátions de grande raio hidratado e de elevada energia de hidratação, principalmente quando o teor total de cátions no solo for baixo (Jucksch, 1987; Emerson, 1983; So & Aylmore, 1995). Pizarro (1985) relacionou os cátions decrescentemente com relação à força de adsorção ao complexo de troca: $Al > Ca > Mg > H > K > Na$.

Sob outra ótica, a irrigação com água rica em Ca^{2+} e Mg^{2+} favorece a floculação da argila e a estabilidade de agregados, pois nestes solos predominam cátions divalentes e a relação entre $Na/Ca + Mg$ é baixa, apresentando partículas de argila floculadas e, conseqüentemente, boa permeabilidade (Silva & Carvalho, 2005). Lindsay (1979) afirmou que o carbonato de cálcio no solo em teores elevados influencia algumas de suas propriedades, como por exemplo, os valores de pH, que se situam na faixa de 7,3 a 8,5, e que somente na presença de sódio se elevam além de 8,5.

Nunes et al. (2006) compararam os efeitos das águas de poços tubulares (10) com os das águas superficiais (14) em solos na região de Janaúba e constataram decréscimo do grau de floculação das argilas e dispersão promovida pela elevação do pH, causando elevação na densidade do solo, diminuição na porosidade total e macroporosidade, bem como redução da condutividade hidráulica em meio saturado. Em avaliação da qualidade destas águas, estes autores concluíram que as águas de poços têm teores elevados de cálcio e bicarbonato e valores médios de CE e RAS, superiores às de rio (Nunes et al., 2005).

Silva & Carvalho (2004) estudaram os efeitos da irrigação com águas calcárias e não-calcárias sobre propriedades químicas e físicas dos solos em bananais de 100 propriedades em Janaúba e Jaíba. Verificaram maiores valores de pH, condutividade elétrica, teor de Ca e matéria orgânica, menor densidade de solo e maiores produtividades em solos com águas calcárias em relação às águas não-calcárias. Esta situação contraditória verificada nas duas pesquisas pode ser atribuída ao efeito modulador de propriedades do solo como o teor de matéria orgânica, mineralogia e status anterior de saturação por cátions do complexo de troca, segundo Nunes et al. (2006).

No semi-árido Nordeste, onde se utiliza a água subterrânea com maior frequência e para diversos fins, vários trabalhos de caracterização e classificação das águas para fins de irrigação tem sido feitos (Andrade Júnior et al., 2006; Medeiros et al., 2003; Maia et al., 2001), com ênfase para os problemas da alcalinização e sodificação. Maia et al. (1998a,b) ressaltaram as alterações na classificação da água de irrigação quando utilizadas diferentes metodologias de cálculo da RAS. Na avaliação do risco de sodicidade das águas para fins de irrigação da região da Chapada do Apodi (CE) e no Baixo-Açu (RN) observaram que, em média, $RASp < RAS < RAScor < RASaj$, ocorrendo superestimação dos valores por esta última em 50%.

A variação espacial e temporal das características das águas, o uso e a textura dos solos dos irrigantes devem ser considerados na análise do uso de água calcária de qualidade duvidosa. Contudo, as informações de um diagnóstico grupal de análise são necessárias, relevantes e indicadoras. Práticas corriqueiras como calagem e correção da fertilidade de solos a serem irrigados com águas calcárias podem ser desnecessárias e até mesmo prejudiciais e irreversíveis.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar e classificar a qualidade de águas subterrâneas para irrigação com relação à alcalinidade e sodicidade na região do pólo hortifrutícola Janaúba-Jaíba.

2- MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização e Fisiografia da Área de Abrangência do Estudo

Este estudo foi realizado na região Norte de Minas, para as análises de águas de poços tubulares localizados entre os rios São Francisco, Verde Grande e Gortuba, denominada Depressão SanFranciscana, com altitude de aproximadamente 518 m, e compreendida entre os paralelos 14°00' e 16°00' e os meridianos 44°00' e 44°30'. A classificação do clima da região segundo Koeppen é Aw, caracterizado por chuvas concentradas no verão, e seco 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°C, respectivamente. A insolação é de 2763 horas anuais e umidade relativa média de 70,6%, sendo que no período seco a UR pode chegar a extremos 20%. A evapotranspiração potencial média calculada pelo método de Hargreaves, para Janaúba, é 1.649 mm anuais, e o déficit hídrico médio é de 778 mm ano⁻¹ (Rodrigues et. al., 2002).

As análises de água utilizadas neste trabalho foram cedidas pela Epamig/CTNM - Laboratório de Água e Solos. Os protocolos de água são referentes aos anos entre 1993 e 2006, totalizando 1.200 análises. Selecionaram-se 450 análises em área potencial de irrigação restrita ao aquífero confinado de alta vazão, com 280 análises próximas a Janaúba e 170 análises próximas a Jaíba.

2.2. Características , Metodologias e Classificação das Análises de Água

As características analisadas foram pH, CE em dS m⁻¹ a 25° C, Ca²⁺, Mg²⁺, Na²⁺, K⁺, Cl⁻, CO₃²⁻ e HCO₃⁻ em me L⁻¹. A partir destas, foram calculadas as variáveis RAS, RAS ajustada (RASaj), RAS corrigida (RAScor), Carbonato de Sódio Residual (CSR), Porcentagem de Sódio (PS), Equivalente Carbonato de Cálcio (E_{CaCO3}) e Erro Iônico ou Índice de Schoeller, segundo Ayers & Westcot (1991), Teissedré (1988) e Maia et al.(2001).

A metodologia de análise de água adotada pelo laboratório da Epamig no período em estudo foi Embrapa (1979; 1997). Os dados das análises de águas foram tabulados em planilha eletrônica e analisados pelo programa computacional SISVAR 5.0 (Ferreira, 2003). Elaborou-se tabelas com média, moda, coeficiente de variação e amplitude de valores para melhor esclarecimento da magnitude da variabilidade de qualidade de água.

Para a interpretação das características da qualidade de água e classificação adotaram-se as metodologias descritas em Ayers & Westcot (1991) e Teissedré (1988).

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características analisadas das águas subterrâneas dos municípios de Janaúba e Jaíba necessárias ao estudo da sodicidade e alcalinidade têm seus valores dispostos na Tabela 1.

Os valores médios e modais de pH são superiores a 7 para os dois municípios. A amplitude de 2,2 a 2,9 unidades indicam grande variabilidade da característica nas análises. A classificação da água para pH, segundo Ayers & Westcot (1991), é predominante como uso moderado na irrigação para 56 a 69% das análises, respectivamente para Janaúba e Jaíba (Tabela 2). Com valores médios de pH pouco superiores a 7 e valores médios de pHc (Tabela 3) pouco inferiores a 7 (diferença média de 0,5 unidade), obteve-se um Índice de Saturação de Langelier ($IS = pH_a - pH_c$) de baixo valor positivo e um Índice de Estabilidade (IE) próximo a neutralidade. Segundo Ryznar (1944), $IE = 2 pH_c - pH_a$, e seus valores entre 6,0 e 6,5 correspondem a águas neutras ou com baixa atividade incrustante/corrosiva. Pode-se afirmar para as águas dos dois municípios a condição de baixa alcalinidade.

Tabela 1. Estatísticas descritivas dos resultados analíticos de características físico-químicas das águas subterrâneas dos municípios de Janaúba e Jaíba

Característica	Janaúba				Jaíba			
	Me	Mo	Cv %	A	Me	Mo	Cv %	A
pH	7,11	7,00	5,81	2,90	7,23	7,45	5,80	2,20
CE dS m ⁻¹	1,06	0,98	45,46	3,30	0,86	0,86	30,45	1,62
Ca²⁺ me L ⁻¹	7,92	7,25	48,02	26,93	6,55	6,79	41,54	14,16
Mg²⁺ me L ⁻¹	2,40	2,44	65,27	10,87	1,82	1,70	62,92	6,40
K⁺ me L ⁻¹	0,17	0,12	51,48	1,02	0,12	0,10	127,31	1,02
Na⁺ me L ⁻¹	1,87	1,89	69,82	9,51	1,36	0,91	94,92	8,22
HCO₃⁻ me L ⁻¹	12,44	12,98	42,64	33,00	12,05	13,42	40,81	28,00
CO₃⁻⁻ me L ⁻¹	0,06	0,00	397,10	2,00	0,03	0,00	408,10	1,00
Cl⁻ me L ⁻¹	3,35	2,90	82,89	17,60	2,92	3,40	86,84	16,00

Me – média , Mo – moda , CV – coeficiente de variação , A – amplitude de valores .

Tabela 2. Classificação quanto ao uso de água na irrigação das características relativas à sodicidade e alcalinidade das águas subterrâneas dos municípios de Janaúba e Jaíba

Caracter.	Janaúba			Jaíba		
	Grau de restrição de uso da água na irrigação					
	S R	R M	R S	S R	R M	R S
	----- % -----					
CE	15,41	82,79	1,80	27,44	72,56	0
pH*	40,14	56,63	3,23	25,0	69,51	5,49
Ca*	19,0	54,50	26,5	30,5	59,75	9,75
Mg*	92,83	7,17	0	98,17	1,83	0
Na	99,28	0,36	0,36	94,51	5,49	0
HCO ₃	0,40	32,67	66,93	1,45	26,81	71,74
CSR	43,42	52,19	4,39	29,00	64,50	6,50
PS**	99,65	0	0,35	98,78	1,22	0
Infilt. (RAS)	83,87	15,41	0,72	70,73	28,66	0,61
Infilt. (RASco)	82,87	16,33	0,80	65,94	33,33	0,73
Infilt. (RASaj)	71,71	27,49	0,80	59,42	39,86	0,72

UCCC – University of California Committee Consultants (1974) SR-sem restrição, RM – restrição moderada, RS – restrição severa. Fonte: Ayers & Westcot (1991), Villas Boas et al.(1994)*, Teissedré (1988)**.

Em trabalho realizado com o objetivo de avaliar o efeito da irrigação com água calcária sobre as propriedades químicas do solo, no norte de Minas Gerais, Silva et al. (2001) verificaram que o pH do solo eleva-se em média, em torno de 1,4 unidades em apenas quatro anos de irrigação com água calcária, reduzindo a solubilidade de alguns nutrientes essenciais à nutrição das plantas.

Os valores médios de CE das águas foram 0,86 e 1,06 dS m⁻¹ para os dois municípios. Estes valores apresentam pequena diferença a favor do município de Jaíba, provavelmente pela proximidade do Rio São Francisco, dreno natural da bacia considerando-se a macro-topossequência e o fator de diluição/depuração da água

A classificação da CE quanto ao uso das águas na irrigação é de moderada restrição em percentual predominante das análises (72 a 82%). Isto se deve à ampla faixa de 0,7 a 3,0 dS m⁻¹ considerada de uso moderado da água pela classificação de Ayers & Westcot (1991). Na Tabela 4 tem-se a classificação comparativa da CE considerando as classes C_n de CE propostas pela classificação do USSL (Richards, 1954) e a classificação proposta pelo Comitê de Consultores da Universidade da Califórnia (1974) citado por Pizarro (1985). A amplitude dilatada dos valores de CE de Janaúba se deve a peculiaridade de algumas localidades (Maromba e Poção Velho), conhecidas por águas de valores elevados de CE.

Valores médios de CE e pH semelhantes foram encontrados por Nunes et al. (2005) e Silva & Carvalho (2004), em análise da água calcária da região, com CE 1,2 e 1,0 dS m⁻¹, e pH 7,2 e 7,0, respectivamente.

Vale ressaltar que os valores de salinidade da água são importantes na análise de risco da sodificação e alcalinização do solo, haja vista que o aumento do teor de sais no solo pode resultar em maiores teores de sódio, aumento ou redução de flocculação das argilas e elevação do pH devido ao incremento de cátions no complexo de troca do solo.

Tabela 3. Estatísticas descritivas de parâmetros físico-químicos das águas de poços tubulares de Janaúba e Jaíba

Características	Janaúba				Jaíba			
	Me	Mo	Cv %	A	Me	Mo	Cv %	A
RAS	0,88	0,87	95,80	10,86	0,96	1,32	63,39	3,82
RAScor	1,38	1,21	72,69	10,17	1,53	2,05	55,27	5,88
RASaj	2,45	1,91	67,29	12,38	2,64	3,79	55,19	10,94
pHc	6,69	6,55	5,30	2,50	6,79	6,80	5,62	2,80
I. Saturação	0,41	0,36	121,09	3,44	0,30	0,37	123,70	3,90
I. Estabilidade	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
Ca+Mg me L ⁻¹	10,32	10,20	45,96	31,86	8,37	8,97	37,80	17,66
Ca ^o me L ⁻¹	1,68	1,95	77,83	18,96	1,64	1,76	31,13	3,19
HCO ₃ /Ca ²⁺	2,86	2,10	159,43	43,44	2,01	2,11	75,84	14,77
PS %	16,17	16,43	68,40	91,47	14,86	9,64	85,11	65,06
CSR me L ⁻¹	2,27	2,38	268,25	46,69	3,92	6,08	140,24	32,34
E _{CaCO3} kg ha ⁻¹	1.880	1.861	42,65	4.980	1.816	2.035	40,73	4.200
PST solo %	0,04	-1,24	3760,85	16,20	-0,20	-0,56	513,01	5,69

Me – média , Mo – moda , CV – coeficiente de variação , A – amplitude de valores ocorridos.

Tabela 4. Classificação comparativa das classes de CE entre a UCCC e a USSL para análises de águas de poços tubulares de Janaúba e Jaíba

Fonte de Classific.	Classes CE	Janaúba				Jaíba		
		RAS	RAScor	RASaj	%	RAS	RAScor	RASaj
UCCC	C1	22,23	22,31	22,31	43,75	37,68	37,68	
	C2	65,94	66,53	66,53	64,02	60,86	60,86	
	C3	10,03	9,56	9,56	1,21	1,45	1,45	
	C4	1,79	1,59	1,59	-	-	-	
USSL	C1	1,44	1,20	1,20	0,61	0,72	0,72	
	C2	20,79	23,11	22,31	34,15	38,41	39,85	
	C3	74,55	72,11	72,92	65,24	60,87	58,70	
	C4	3,23	3,59	3,59	-	-	-	

Fonte: UCCC (1974)/Pizarro (1985), USSL(Richards, 1954)/Teissedre (1988).

A razão de adsorção de sódio (RAS) é o indicador mais adequado e adotado para avaliação da sodicidade das águas e sua capacidade de sodificação do solo. Nas análises deste estudo obtiveram-se baixos valores de RAS com as metodologias de cálculo preconizadas – RAS, RAScor e RASaj, para os dois municípios. Os valores médios e modais das RAS de Jaíba tiveram pequena superioridade sobre os de Janaúba, mas com menores amplitudes. A classificação da sodicidade das análises revelou concentração na classe S₁ para Janaúba (94,81%) e Jaíba (95,66%) mesmo em seus valores mais críticos – RASaj, conforme as Tabelas 5 e 6.

Nas tabelas encontram-se duas classificações C_nS_n da águas, a primeira relativa ao laboratório de salinidade do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USSL) e a segunda relativa ao Comitê dos Consultores da Universidade da Califórnia (UCCC).

Os acréscimos de valores de RAS advindos de maior rigor das diferentes metodologias de cálculo não promoveram mudanças significativas de classes significativas para as águas dos dois municípios, porém, nota-se uma pequena margem de superioridade de qualidade para a região de Jaíba.

Analisando-se os valores, conclue-se que é baixo o risco de sodificação dos solos pelas águas subterrâneas da região, com valores percentuais acentuados nas classes C₁S₁ e C₂S₁ da UCCC devido ao nível superior da classe C₂ (1,5 dS m⁻¹), inferior ao da classe C₂ da USSL (2,25 dS m⁻¹), e que por este fato apresentou predominância de classes de maior risco, C₂S₁ e C₃S₁.

Percebe-se, portanto, que os maiores riscos de uso destas águas são pertinentes à salinidade e alcalinidade e não à sodicidade. Peixoto et al. (1986) em discussão preliminar sobre o uso das águas subterrâneas desta região para irrigação a classificaram como C₂S₁ e C₃S₁ utilizando a metodologia USSL, semelhante à esta avaliação. Evidencia-se a manutenção dos níveis de salinidade e sodicidade das águas desta região nestas duas décadas, apesar do acentuado e contínuo rebaixamento de nível dinâmico dos poços, em toda a região.

Tabela 5. Classificação USSL das águas de poços tubulares do Norte de Minas com a RAS calculada por diferentes metodologias

Classes C _n S _n	Janaúba			Jaíba		
	RAS	RAScor	RASaj	RAS %	RAScor	RASaj
C ₁ S ₁	1,08	1,20	1,20	0,61	0,72	0,72
C ₂ S ₁	20,79	22,31	22,31	34,15	36,96	36,23
C ₂ S ₂	0,36	0	0	0	0	0,72
C ₃ S ₁	74,19	72,11	68,53	65,24	60,87	58,70
C ₃ S ₂	0	0,80	3,59	0	1,45	3,62
C ₃ S ₃	0	0	0,80	0	0	0
C ₄ S ₁	3,23	3,59	2,79	0	0	0
C ₄ S ₂	0,36	0	0,80	0	0	0

RAS – razão de adsorção de sódio, RAScor e aj – razão de adsorção de sódio corrigida e ajustada

Tabela 6. Classificação UCCC das águas de poços tubulares do Norte de Minas com a RAS calculada por diferentes metodologias

Classes C_nS_n	Janaúba			Jaíba		
	RAS	RAScor	RASaj	RAS	RAScor	RASaj
	----- % -----					
C_1S_1	21,86	21,91	21,91	34,76	37,68	36,96
C_1S_2	0,36	0,40	0,40	0	0	0,72
C_2S_1	65,95	66,53	64,94	64,02	59,42	57,25
C_2S_2	0	0	1,59	0	1,45	3,62
C_3S_1	9,68	9,16	8,37	1,22	1,45	1,45
C_3S_2	0,36	0,40	0,80	0	0	0
C_3S_3	0	0	0,40	0	0	0
C_4S_1	1,79	1,59	0,40	0	0	0
C_4S_2	0	0	1,20	0	0	0

RAS – razão de adsorção de sódio, RAScor e aj – razão de adsorção de sódio corrigida e ajustada

Maia et al. (1998a,b) obtiveram resultados diferenciados aos deste estudo na classificação das águas e avaliação do risco de sodificação dos solos pelo seu uso na irrigação, na Chapada do Apodi e Baixo Açu (RN) utilizando diferentes metodologias de cálculo da RAS. Observaram que quanto maior a condutividade elétrica da água menor foi o número de águas que passavam de uma classe de menor risco para maior risco de sodicidade, quando se utilizada a RAS ou a RAScor. Ao utilizar a RASaj o perigo de sódio foi superestimado em 50%. Há de se ressaltar que na região deste estudo há predominância de águas cloretadas-sódicas e com valores superiores de CE.

Nunes et al (2005) encontraram nas análises de águas subterrâneas da região de Janaúba e Jaíba valores médios de $RAS = 0,6$, $HCO_3^- + CO_3^{2-} = 7,8$, $Na^+ = 1,7$, $Ca^{2+} = 10,3$ e $Mg^{2+} = 1,6$ $mmolc\ dm^{-3}$. Estes valores foram inferiores aos do presente estudo em bicarbonato e magnésio e superiores em cálcio, mas proporcionam $IS = 0,5$. Com estas características, as águas analisadas pelos autores supracitados causaram nos solos efeitos deletérios típicos de alcalinidade e sodificação: redução de floculação, porosidade total e macroporosidade, densidade global e condutividade hidráulica.

Já no estudo de Silva et al. (2004), águas de semelhantes características - $RAS = 0,64$; $HCO_3^- + CO_3^{2-} = 7,0$; $Na^+ = 1,4$; $Ca^{2+} = 7,5$ e $Mg^{2+} = 2,0$ $mmolc\ dm^{-3}$ e $IS = 0,2$ induziram efeitos diferenciados, causando floculação das argilas dos solos evidenciada pela redução na densidade global, mas com o efeito prejudicial da elevação do pH. Nunes et al. (2005) atribuíram a possibilidade destas conseqüências opostas ocorrerem devido à qualidade das argilas presentes (2:1) e ao teor de matéria orgânica do solo, induzindo um efeito modulador das propriedades do solo.

Os valores médios de sódio (1,3 a 1,8 $meq\ L^{-1}$), bem como das porcentagens de sódio (PS = 14 a 16%) são relativamente baixos nestas águas, ambos classificam-nas quanto ao uso na irrigação como irrestritas, em grande maioria das análises (94 a 99%). Entretanto, ocorreram grande

amplitude de valores para as duas características. Tais níveis condizem com a sua formação geológica, predominantemente carbonatada-cálcica e com baixas concentrações de sódio.

A porcentagem de sódio trocável do solo (PST) é uma característica de grande importância para a predição e classificação de solos sódicos. A metodologia de estimação da PST utiliza a RAS, através de nomograma ou a equação, segundo Pizarro (1985):

$$PST = 100 (-0,0126 + 0,01475 RAS) / 1 + (- 0,01126 + 0,01475 RAS)$$
. Os valores médios de PST encontrados para Janaúba e Jaíba foram muito baixos, 0,04 e -0,20 %, os modais negativos e as amplitudes iguais a 16,20 e 5,60 %, respectivamente, o que denota grande variação das águas e conseqüências sobre os solos. Porém, evidenciam de modo geral ausência de problemas.

Analisou-se conjuntamente os valores de Ca, Mg, Ca^o e das relações Ca/Mg e Ca + Mg. Os valores médios de Ca (7,96 e 6,55 me L⁻¹) expressam risco moderado de uso na irrigação para a maioria das águas (55 a 62 %), e os valores de Mg (2,40 e 1,82 me L⁻¹) pertencem a faixa de normalidade para irrigação das águas (92 a 98%), para Janaúba e Jaíba, respectivamente. No entanto, as amplitudes dos valores de Mg ultrapassam a faixa de normalidade, segundo Ayers & Westcot (1991) e expressam a variação de qualidade de água.

Apesar da classificação dos valores de Ca e Mg das águas quanto ao uso na irrigação ser de moderado e nenhum risco, o histórico de conseqüências nos solos irrigados com águas calcárias na região acusa elevado acúmulo de seus teores nos solos (Ca²⁺>7 mmolc dm⁻³ e Mg²⁺>3 mmolc dm⁻³). Silva & Carvalho (2005) corroboram os relatos, afirmando que o Ca chega a teores quatro vezes maiores em solos irrigados com águas calcárias quando comparadas às águas não calcárias.

O cálcio é notadamente um íon floculante por ter força eletrostática superior aos cátions monovalentes, força esta superior à força de hidratação, que causa o distanciamento das placas de argilas ou expansão da dupla camada difusa (DCD) por íons superiores em raio iônico hidratado (Lima, 1997). É importante conhecer os valores das relações do Ca com os íons Mg e Na da água de irrigação para que se preveja a provável condição de dispersão ou floculação dos solos. As águas deste estudo apresentaram relação Ca/Mg superiores a 4,0 e de amplitudes superiores a 14,0 para os dois municípios. Estes valores analisados conjuntamente com os baixos valores de sódio e PS, indicam e permitem concluir que é grande a probabilidade de ocorrer alcalinização e não sodificação dos solos irrigados com estas águas.

A alcalinização dos solos pode induzir a dispersão das argilas por precipitar Al³⁺ e assim permitir que cátions com menor valência em relação ao Al³⁺ passem a dominar o complexo de troca do solo, favorecendo a expansão da DCD (Jucksch, 1987). Como conseqüências tem-se indisponibilidade de nutrientes (Fe, B, Cu, Zn, N, S e P), elevação de densidade global, redução da macroporosidade, porosidade total, armazenamento de água, aeração, condutividade hidráulica e permeabilidade do solo. Há de se ressaltar a condição pluviográfica regional, caracterizada por altas

intensidades em curto prazo, que podem lixiviar os sais. Caldas de defensivos preparadas com águas alcalinas exigem acidificação a pH 5,5 – 6,5, sob pena de dissociação molecular dos produtos e conseqüente inatividade, em pouco tempo.

Os valores médios e de amplitude de HCO_3^- nas águas de Janaúba e Jaíba são elevados, típicos da formação geológica cárstica. A classificação das águas quanto ao uso na irrigação para teores de bicarbonato indicam restrição severa em percentuais elevados de análises (67-71%). Esta classificação evidencia seu potencial de alcalinização e sodificação, pela ação neutralizadora dos íons H^+ e pela ação precipitante de carbonatos de cálcio e magnésio, com conseqüente vacância no complexo de troca para o sódio, ou seja, permite elevar a concentração de sódio na solução do solo.

Ao estabelecer-se a relação entre HCO_3^- e Ca^{2+} pode-se analisar empiricamente a disponibilidade do cátion para a formação do carbonato de cálcio e conseqüente precipitação, bem como a disponibilidade do ânion para se associar à outros cátions, como por exemplo o sódio. Nas águas de Janaúba, verificada a razão média 2,86, tem-se que em 78,5% das águas analisadas os valores desta relação são maiores que 1, enquanto em Jaíba, com razão média 2,01, 66,67% das análises foram maiores que 1. Essa maior disponibilidade proporcional de Ca^{2+} , maior nas águas de Jaíba, evidencia que poderá ocorrer precipitação do cálcio na forma de carbonato de cálcio e assim se reduz sua concentração na solução do solo, o que reduziria sua influência sobre o pH.

Tal fato é comprovado pelos elevados valores de CSR médios (2 a 4 meq L^{-1}), classificando as águas como de moderada restrição ao uso na irrigação em 52 a 65% das análises. Entretanto, é necessário que haja equivalente disponibilidade de sódio nas águas ou nos solos para que tal sodificação se verifique, o que não se confirmou nas análises de água. Nunes et al. (2005) e Silva & Carvalho (2004), em análise da água calcária na região, apresentaram dados que resultam em CSR com valores aproximados aos deste estudo: 1,9 e 2,25 me L^{-1} , respectivamente, corroborando a afirmação.

Os teores médios estimados de Ca^{2+} são semelhantes nos dois municípios: 1,68 e 1,64 me L^{-1} . Porém, significativamente discrepantes em amplitude (18,96 e 3,19 me L^{-1}) a favor de Jaíba. O Ca^{2+} , segundo Ayers & Westcot (1991) citando Suarez (1981), representa a concentração final de cálcio que permaneceria na solução do solo, como resultado da aplicação de uma água de determinada salinidade e teor relativo de bicarbonato em relação ao cálcio ($\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$). O CaCO_3 provável a ser formado tem baixa solubilidade em solução (6,6 mg L^{-1}). Considerando-se que no semi-árido Mineiro as irrigações são necessárias em mais de 300 dias ano⁻¹, que a ET_c média da banana (principal cultura irrigada) é de 8 mm dia⁻¹ e que cada mm de lâmina representa 10 m³ ha⁻¹ de água, pode-se calcular o montante de Ca^{2+} adicionado à solução do solo por ano agrícola (700 - 800 kg Ca^{2+} ha⁻¹ ano⁻¹) e prever as conseqüências.

O equivalente de cálcio é um estimador bastante prático da quantidade de carbonato de cálcio adicionado ao solo. A elevação do pH do solo ao longo dos anos se deve aos elevados teores acumulados de cálcio e bicarbonato das águas de poço tubular da irrigação. O efeito dessas águas sobre o pH dos solos pode ser estimado com base nos teores de $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, relativos ao equivalente em carbonato de cálcio com PRNT de 100 % (Maia et al., 2001). A estimativa para as águas em questão resultaram em equivalentes 1.816 e 1.880 kg $\text{CaCO}_3 \text{ ha}^{-1}$, para Jaíba e Janaúba, respectivamente, considerando-se hipoteticamente uma safra de cultura anual com consumo de lâmina igual a 300 mm. Naturalmente, uma cultura perene irrigada 300 dias ano⁻¹ exigiria uma lâmina oito vezes maior. A amplitude dos valores desta variável para os municípios ultrapassou 4.000 kg ha^{-1} , refletindo a grande variação dos teores de bicarbonato das águas e de efeito marcante sobre o pH dos solos irrigados.

É difícil prever a elevação do pH dos solos com base na quantidade de Ca^{2+} adicionado, pois a reação depende do poder tampão de cada solo. Pode-se, entretanto, construir curvas de incubação de cada solo com doses crescentes da água subterrânea. Esta simulação da alteração do pH do solo devido ao uso contínuo de diferentes níveis de água de irrigação ainda é dificultada devido ao manejo diferenciados que influenciam as variações de umidade do solo e o balanço de nutrientes em função da diversificação dos cultivos.

A redução da infiltração de água nos solos é uma das principais conseqüências da irrigação com águas de qualidade inferior. Para classificação dos efeitos das águas sobre a permeabilidade dos solos confrontou-se a RAS com a CE das análises individualmente, conforme Ayers & Westcot (1991). Obteve-se percentual variável de 59 a 83% das análises classificadas sem restrição de uso, 15 a 39% como restrição moderada e menos de 1% como restrição severa. Utilizou-se RAS obtida com três metodologias e o resultado mostrou uma variação máxima de 11 a 12% de mudança de classes ao se trocar a RAS pela RASaj (crítica). A variação dos percentuais das análises dentro da classe moderada quando comparados os municípios variou de 15 a 27% para Janaúba e de 28 a 39% para Jaíba, contraditoriamente às outras características, que comprovaram superioridade de qualidade das águas a favor de Jaíba.

O íon potássio (K^+) nas águas subterrâneas apresentou valores médios em 0,17 e 0,12 me L^{-1} para Janaúba e Jaíba, respectivamente. A amplitude de valores foi de 1,02 me L^{-1} para ambos os municípios. O K^+ é um cátion de menor raio iônico (10,64 Å), isento de caráter dispersante apesar de monovalente (menor força eletrostática), e tem mobilidade moderada no solo. Sua presença nas águas é desejável, já que como principal nutriente para a bananicultura, predominante na região, pode reduzir os custos de adubação. Os teores acusados nas análises de águas de 0,12 a 0,17 me L^{-1} ou 4,7 a 6,6 mg L^{-1} as classificam como anormais por serem superiores a 2 mg L^{-1} (Ayers &

Westcot, 1991). Esses níveis indicam uma concentração aproximada de 4 - 6 g m⁻³ de água, ou seja, ao se aplicar 80 m³ ha⁻¹ dia⁻¹ adiciona-se ao solo 0,4 kg K⁺.

Foram feitos testes de regressão linear simples, polinomial quadrática e múltipla (método stepwise) correlacionando as características das análises com a finalidade de estudar as interrelações de íons com ação alcalinizante para o conjunto das análises das águas. Encontrou-se significância para várias interações, contudo, os melhores ajustes (p<0,05) foram obtidos com Ca x CE, Ca + Mg x CE e Σ Cátions x CE, descritas no Quadro 1 (x = CE). A regressão múltipla evidenciou contribuição significativa dos íons Ca>Cl>Mg>Na para Janaúba e Ca>Mg>HCO₃>Cl para Jaíba. Os percentuais de contribuição iônica do Ca na CE foram de 81 e 68% para Janaúba e Jaíba, respectivamente. As demais regressões não apresentaram bom ajuste, com baixos valores de r².

Quadro 1. Equações de regressão das características das águas

Municípios	Características	Tipo regressão	Equações regressão	r ²
Janaúba	Ca x CE	Linear	y= 2,01 + 5,563x	0,61
		Quadrática	y= -1,112 + 10,107x - 1,205x ²	0,68
Jaíba		Linear	y= 0,316 + 7,245x	0,48
		Quadrática	y= -2,247 + 13,427x - 3,406x ²	0,50
Janaúba	Ca + Mg x CE	Linear	y= 2,898 + 6,91x	0,63
		Quadrática	y= -1,655 + 13,457x - 1,707x ²	0,74
Jaíba		Linear	y= 1,18 + 1,087x	0,89
		Quadrática	y= 0,297 + 1,415x - 0,0247x ²	0,89
Janaúba	ΣCátions x CE	Linear	y= 3,8052 + 7,941x	0,66
		Quadrática	y= 1,413 + 15,44x - 1,956x ²	0,77
Jaíba		Linear	y= - 9,897 + 1,308x	0,51
		Quadrática	y= -0,194 + 13,569x - 2,04x ²	0,51
Janaúba	CE _a = 0,1378 + 0,0621Ca + 0,0431Cl + 0,0760Mg + 0,0535Na			0,68
Jaíba	CE _a = 0,2497 + 0,0569Ca + 0,0927Mg + 0,3164HCO ₃ + 0,0185Cl			0,70

Calculou-se o erro iônico ou Índice de Schoeller (Teissedré, 1988) das análises, para averiguar o equilíbrio de cátions e ânions, ou seja, verificar a ausência significativa de íons nas análises, devido à probabilidade da ocorrência de elementos problemáticos como manganês, ferro ou boro nas águas. Os resultados foram - 14 e - 10 % e significam a ausência destes percentuais em cátions, provavelmente pela ausência do Fe e Mn, este último em altos teores nestas águas, segundo Nunes et al. (2006). 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). É aconselhável, portanto, que se faça uma análise completa para constatação dos teores dos íons ausentes das análises.

4- CONCLUSÕES

Os valores médios de pH indicam baixa alcalinidade das águas e classificam seu uso na irrigação como risco moderado dos dois municípios.

Verificou-se a elevada contribuição do Ca na CE das águas, bem como valores médios de HCO_3 elevados, o que comprova um acentuado potencial para alcalinização dos solos dos dois municípios.

Os valores médios de sódio não representam risco de sodificação dos solos e não há risco de redução de infiltração de água no solo.

Constatou-se predomínio de análises de água com a classificação C_3S_1 pela metodologia USSL, e C_2S_1 pela UCCC para os dois municípios. A RAS foi classificada como S_1 em percentual superior à 94%, mesmo com a utilização da RASaj.

Com a utilização das águas subterrâneas da região na irrigação, a provável alcalinização dos solos torna proibitiva a prática da calagem, e a quimigação com produtos precipitantes e defensivos tornam obrigatória sua acidificação a valores abaixo do pHc.

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

ANDRADE JÚNIOR, A.S., SILVA, E. F. F., BASTOS, E. A., MELO, F. B., LEAL, C.M.. Uso e qualidade da água subterrânea para irrigação no Semi-Árido Piauiense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande. v.10, n.4, p.873-880, 2006.

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, 1999. 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. 1.200p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo.** Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1979. 249p.

EMBRAPA. **Manual de métodos e análises de solo.** 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS. 1997. 212 p.

EMERSON, W.W. Inter-particle bonding. In: **Soils: an Australian viewpoint.** Melbourne: CSIRO : Academic Press, 1983. p.477-498.

JUCKSCH, I. **Calagem e dispersão de argila em amostra de um Latossolo Vermelho-Escuro.** 1987. 37 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

LINDSAY, W.L. **Chemical equilibria in soils.** New York: John Wiley, 1979. 449 p.

LIMA, L. A. Efeitos de sais no solo e na planta. In: Gheyi, H.R.; Queiroz, J.E.; Medeiros, J.F. **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada.** Campina Grande: UFPB, SBEA, 1997, cap.4, p.113-136.

MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C.; OLIVEIRA, M.. Classificação da água de irrigação utilizando quatro metodologias de cálculo para a Razão de Adsorção de Sódio - I. Região da Chapada do Apodi, Rio Grande do Norte. **Caatinga**, Mossoró, 11(1/2):41-46. 1998a.

MAIA, C. E., MORAIS, E. R. C.; OLIVEIRA, M.. Classificação da água utilizando quatro metodologias de cálculo para a Razão de Adsorção de Sódio - II. Região do Baixo Açu, Rio Grande do Norte. **Caatinga**, Mossoró,.11(1/2):47-52. 1998b.

MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C.; OLIVEIRA, M.. Estimativa de carbonato de cálcio aplicado via água de irrigação nas regiões da Chapada do Apodi e Baixo Açu, RN. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v.5, n.1, p.71-75, 2001.

MEDEIROS, J.F.; LISBOA, R. A.; OLIVEIRA, M.; SILVA JÚNIOR, M.J.; ALVES, L.P. Caracterização das águas subterrâneas usadas para irrigação na área produtora de melão da Chapada do Apodi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v.7, n.3, p. 469-472, 2003.

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

NUNES, W. A. G. DE A.; KER, J.C.; RUIZ, H.A. , NEVES, J.C.L.; BEIRIGO, R.M.; BONCOMPANI, A.L.P. Características físicas de solos da região de Janaúba-MG, irrigados com água de poços tubulares ou do rio Gorutuba. **Irriga**, Botucatu. v.11, n.1, p.107 -118, janeiro-março, 2006.

PEIXOTO, C. A. DE MELLO, 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. **ITEM**, Brasília. n.26, p.11-17, 1986.

RAMOS, M.L.S. & PAIXÃO, M.M.O.M. **Disponibilidade hídrica de águas subterrâneas – Produtividade de poços e reservas exploráveis 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. 41 p.

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**, Pelotas. abr., vol.24, n.1, p.108-110. 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, p.472, 1944.

SILVA, J.T.A.; CARVALHO, J.G. DE. Propriedades do solo, estado nutricional e produtividade de bananeiras Prata Anã irrigadas com águas calcárias. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras. v. 28, n.2, p.334-340, mar./abr. 2004.

SILVA, J. T. A.; CARVALHO, J.G. Avaliação nutricional de bananeira Prat-Anã sob irrigação no semi-árido do Norte de Minas Gerais, pelo método do DRIS. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras. v. 29, n.4. p. 731-739, jul/ago. 2005.

SO, H.B.; AYLMOORE, L.A.G. The effects of sodicity on soil physical behaviour. In: NAIDU, R.; SUMNER, M.E.; RENGASAMY, P. (Ed.). **Australian sodic soils: distribution, properties and management**. East Melbourne: CSIRO, p.71-80, 1995.

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