

Aspectos Hidrodinâmicos e Qualidade das Águas Subterrâneas do Aquífero Bambuí no Norte de Minas Gerais

Maria do Carmo Fonte Boa Souza¹, Sílvia Corrêa Oliveira²,
Maricene Menezes de Oliveira Mattos Paixão¹, Maria Goretti Haussmann¹

maria.fonte987@uol.com.br; silvia@desa.ufmg.br;
maricene.paixao@meioambiente.mg.gov.br; goretti.haussmann@meioambiente.mg.gov.br

Recebido: 23/01/13 - revisado: 15/07/13 - aceito: 07/11/13

RESUMO

O sistema Bambuí é um aquífero com potencial hídrico médio, localizado na região do médio São Francisco em Minas Gerais, que apresenta relativa limitação de disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas, associada a pressões crescentes. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar as águas subterrâneas deste sistema nas Sub-bacias do rio Verde Grande e dos rios Jequitai e Pacuí, com ênfase na qualidade destas águas. Observou-se que o valor do gradiente hidráulico médio foi de 0,34 e a condutividade elétrica (CE) variou entre 10 e 8.774 $\mu\text{S}/\text{cm}$, havendo predominância de águas com CE inferior a 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. As águas apresentaram, em sua maioria, caráter neutro a levemente alcalino, sendo muito duras. A relação entre os principais íons foi $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ e as concentrações de Cloreto aumentaram no decorrer do fluxo subterrâneo. As águas subterrâneas na região estudada foram inadequadas para fins de consumo humano em 82% dos poços monitorados, sendo que 64% dos poços apresentaram-se inadequados exclusivamente em função de parâmetros organolépticos.

Palavras-chave: Norte de Minas Gerais, Aquífero Bambuí, Qualidade de Águas Subterrâneas, Sub-bacia rio Verde Grande, Sub-bacia dos rios Jequitai e Pacuí.

INTRODUÇÃO

A mesorregião do Norte de Minas, uma das doze do estado de Minas Gerais, tem área de 128.454,108 km^2 e população de 1.591.507 habitantes, englobando 89 municípios. As chuvas escassas (precipitação acumulada inferior a 900 mm/ano) e as altas temperaturas (média anual de 24 °C), típicos do clima semiárido, tornam essa região muito suscetível à seca, sendo que 9,84% de seu território encontram-se dentro do polígono das secas (BRASIL, 2005; IBGE, 2010). O Norte de Minas caracteriza-se por duas estações bem definidas, em termos de precipitações: uma chuvosa que vai de outubro a abril e outra seca que vai de maio a setembro.

A região, inserida na bacia do médio São Francisco, está compreendida nos domínios do Planalto do São Francisco, Depressão Sanfranciscana e Cristas de Unaí. A litologia é embasada pelas rochas da Formação Urucuia, Mata da Corda, Are-

ado e do Grupo Bambuí. A região apresenta o domínio de uma morfologia plana a suavemente ondulada em 69,74% de sua extensão, com pequena presença de cadeias montanhosas, com destaque para a Serra do Jaíba e a Serra do Cabral. A bacia hidrográfica do rio São Francisco drena quase metade da área do Estado (cerca de 236.000 km^2), incluindo as regiões central, oeste, noroeste e norte. A cobertura vegetal é típica de cerrado e caatinga (CAMPOS & DARDENNE, 1997; ANA & IGAM, 2006; SILVA & ROSA, 2009).

Geologicamente, a região apresenta afloramentos de gnaisses arqueanos, pertencentes ao embasamento cristalino, rochas carbonáticas e terrígenas que compõem o Grupo Bambuí, de idade neoproterozóica, arenitos do Grupo Urucuia (Cretáceo) e coberturas recentes. A deposição das formações do Grupo Bambuí é resultado da paleogeografia do embasamento e de processos tectônicos, havendo áreas de embasamento em altos estruturais (Alto de Januária) e depocentros locais na porção sul e leste, onde a espessura do Grupo Bambuí é substancialmente maior. A Formação Sete Lagoas, representada por sucessão plataformarasa, constituída por calcários e dolomitos, aflora, exclusivamente, na margem esquerda do rio São

¹ - IGAM/Instituto Mineiro de Gestão das Águas

² - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG.

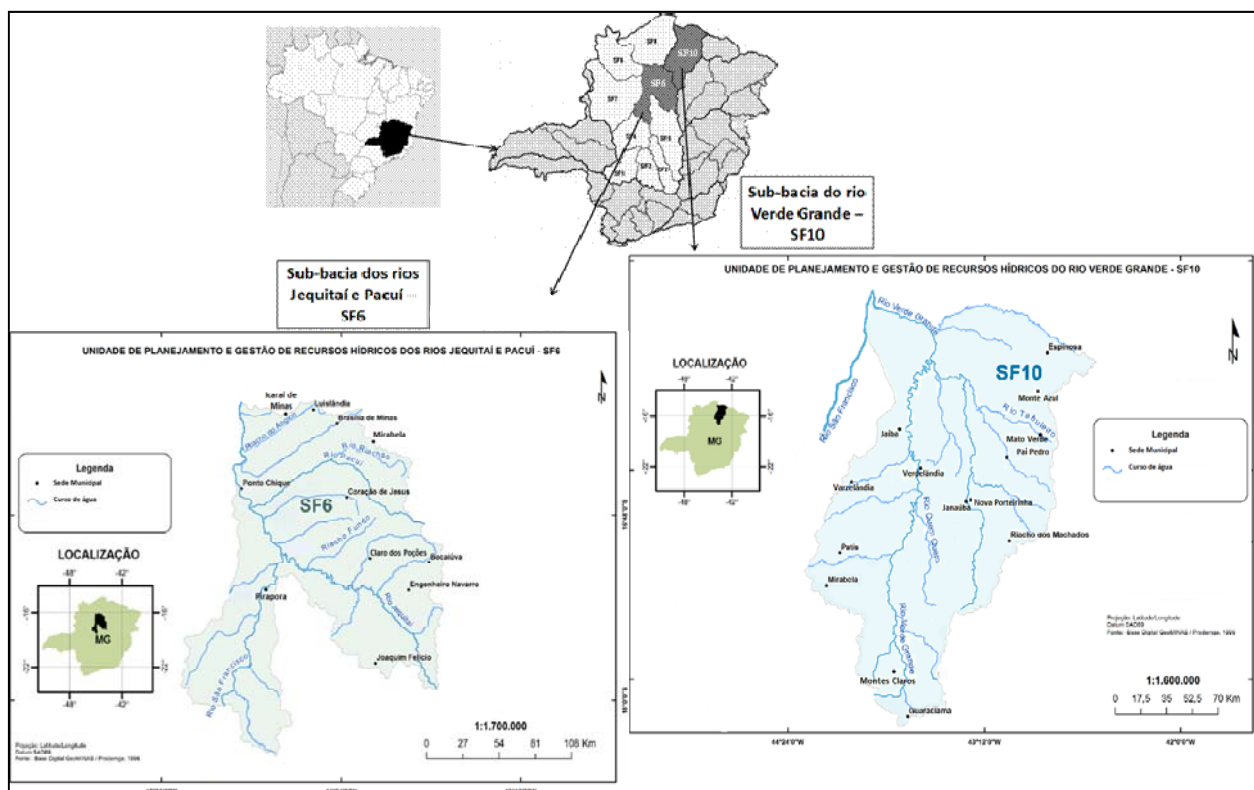


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo

Fonte: Adaptado de CBH JEQUITÁI E PACUÍ, 2010 e de ANA, 2011.

Francisco. As unidades médias do Grupo Bambuí, formações Serra de Santa Helena (siltitos, folhelhos e lentes de calcário escuro) e Lagoa do Jacaré (calcários oolíticos/intraclásticos, siltitos e margas), apresentam uma ampla distribuição em toda a região. Estudo petrográfico dos carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré na região de Lontra (sul da área) evidencia importante variação faciológica para esta unidade. Já as formações Serra da Saudade (siltitos e folhelhos) e Três Marias (arenitos, arcósios e siltitos) afloram apenas nos extremos leste e sul da área, apresentando depocentros locais, diferenciados das formações inferiores (PES-SOTI *et al.*, 1989; IGLESIAS & UHLEIN, 2009).

O sistema aquífero Bambuí apresenta espessura média estimada de 2.500 m e produtividade de muito variável, em função da heterogeneidade dos terrenos regionais, compreendendo os metasedimentos, em sua maioria, de natureza carbonática de idade neoproterozóica (850 a 650 Ma.). A extensão do aquífero Bambuí é estimada em 182.000 km² de área de recarga total, abrangendo Minas Gerais, Bahia, Goiás e Distrito Federal. Em

função da presença de rochas calcárias, o aquífero pode ser dividido, em: fraturado, fraturado-cárstico e cárstico, sendo que, de forma geral, as áreas de maior produtividade dos poços correspondem às áreas cársticas, em que predominam rochas calcárias. O carste representa 32% da área total do Bambuí e 19% desta área apresenta comportamento de aquífero tipicamente fraturado. (ZOBY *et al.*, 2004; ANA, 2005). A área de estudo, no Norte de Minas Gerais, corresponde a uma área de, aproximadamente 39.000 km².

A escassez de água na região associada à elevada demanda por recursos hídricos subterrâneos torna necessário conhecer as potencialidades do aquífero Bambuí, suas propriedades e sua qualidade físico-química. O potencial hídrico subterrâneo na região é classificado como médio, com reservas exploráveis de apenas 47 m³/s, no domínio fraturado-cárstico. A faixa mais comum de vazões dos poços é de 5 a 60 m³/h para profundidades, geralmente, entre 50 e 150 m (ANA, 2006). A transmissividade está compreendida entre 20 m²/dia a 1.000 m²/dia, de acordo com Silva e colaboradores

(1982). Faixa diferente e ainda mais ampla da transmissividade no Bambuí foi reportada pelo Cetec (1984), com valores entre 233 m²/dia e 7700 m²/dia. A capacidade específica é, em média, 3,6 m³/h/m (ZOBY *et al.*, 2004). O uso da água subterrânea concentra-se, em Minas Gerais, na bacia do rio Verde Grande e na bacia do rio Riachão (afluente do Pacuí) e em alguns municípios das microrregiões administrativas de Unaí e Montes Claros, e é utilizada principalmente para consumo humano, irrigação e dessedentação animal (CPRM, 2009). O principal objetivo deste estudo é avaliar a qualidade do aquífero Bambuí nas sub-bacias do rio Verde Grande (SF10) e dos rios Jequitaiá e Pacuí (SF6), cuja localização é mostrada na Figura 1, correspondente a 35,5% do sistema aquífero Bambuí. Esta avaliação incluiu aspectos relacionados à qualidade das águas subterrâneas, ao fluxo e a níveis estáticos. Também foram analisados os prováveis processos responsáveis pelas variações qualitativas nas águas e adequabilidade destas águas para diferentes usos.

METODOLOGIA

Os métodos usados neste estudo incluíram levantamentos de campo e análises laboratoriais. Os ensaios de campo contemplaram medições de níveis de água estáticos quando possível, medidas da taxa de descarga usando dados de cada poço, amostragem de água subterrânea para análise de parâmetros físico-químicos e análises de campo – temperatura, Eh, pH, STD e condutividade elétrica – CE.

As amostragens foram feitas em poços de abastecimento distribuídos na área de estudo, abrangendo a SF6 e a SF10, tendo sido executadas em 13 campanhas semestrais, de 2005 a 2011. O número de poços e a configuração da rede de monitoramento variaram no decorrer do monitoramento, sendo atualmente 58 poços, com 19 pontos na SF6 e 39 na SF10. Considerando as 13 campanhas, os poços de monitoramento totalizaram 124 e foram executadas 9.884 medições. Foram selecionados 28 dos parâmetros analisados, a saber: temperatura, pH, CE, STD, Eh, dureza total, turbidez, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, P, Si, Al, As, Fe, F, Cu, fenóis, Mn, Ni, Pb, Se e Zn. As análises físico-químicas foram executadas pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – Cetec, de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005), com

exceção de Cloretos totais (USGS, 1985); sólidos totais dissolvidos - STD (ABNT, 1989-a); e fenóis (ABNT, 1989-b). As medições de níveis estáticos foram realizadas nas campanhas de 2010 a 2012, em 33 poços em que houve condições apropriadas. O tratamento dos dados foi feito utilizando os softwares AquaChem, Golden Surfer 9 e Statistica 8.0. O gradiente hidráulico médio da área de estudo foi estimado de acordo com Coelho e Damázio (2006), com base em medições de nível estático executadas em períodos chuvosos em 33 poços.

Para fins de verificação da adequação das águas para os diferentes usos, foram considerados tanto os limites de concentração estabelecidos pela Resolução Conama nº 396/2008, quanto pela Portaria MS Nº 2914/2011, sendo esta última no caso de consumo humano. Buscou-se verificar os percentuais de atendimento aos padrões tanto em relação ao número total de medições, que incluem resultados de diferentes campanhas em um mesmo poço, quanto em relação ao número total de poços.

Para avaliar a adequação das águas subterrâneas do aquífero Bambuí para fins de irrigação foi utilizada a RAS – Razão de Adsorção de Sódio, de acordo com a equação: $RAS = Na^+ / [(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2]^{1/2}$. As concentrações de Mg²⁺, Ca²⁺ e Na⁺ foram previamente substituídas por miliequivalente/L (meq/L) para aplicação da equação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aquífero na área de estudo

As águas subterrâneas ocorrem no calcário Bambuí em zonas caracterizadas com porosidade secundária, criadas devido a falhas, cavidades e fraturas, sendo que as características hidráulicas exibem ampla variabilidade refletindo a heterogeneidade de comportamento dos aquíferos carbonáticos.

Em algumas áreas os rendimentos são elevados, especialmente quando as cavidades estão conectadas. A elevação do lençol freático, tomando como referência o nível do mar, variou de 436 a 928 m. O gradiente hidráulico médio é de 0,34. A Figura 2 mostra o mapa potenciométrico obtido a partir dos níveis estatísticos do lençol freático na área de estudo e os sentidos dos fluxos de águas subterrâneas. É possível observar que o fluxo subterrâneo predominante tem sentido de sudoeste para nordeste. Regionalmente, os sentidos dos fluxos variam em função de variações localizadas nos gradientes hidráulicos.

Tabela 1 – Estatística descritiva da composição físico-química das águas subterrâneas na área de estudo.

Variável	Amplitude*	Média ± DP**	Variável	Amplitude	Média ± DP
Temperatura (C)	22,6 a 32,7	26,6 ± 1,5	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	7,4 a 438,1	265,6 ± 91,3
pH	5,1 a 8,6	7,1 ± 0,5	K ⁺ (mg/L)	0,5 a 28,2	2,5 ± 3,0
CE (µS/cm)	10,1 a 8774	773 ± 594	Mg ²⁺ (mg/L)	0,5 a 62,2	12,5 ± 11,7
STD (mg/L)	6,7 a 2169	520,1 ± 360	Mn (mg/L)	0 a 5,5	0,1 ± 0,3
Eh (mV)	-155 a 736	89,7 ± 112,7	Na ⁺ (mg/L)	0,6 a 322	32,5 ± 40,2
Dureza total (mg/L)	8,0 a 1261	292,4 ± 207,9	Ni (mg/L)	0,002 a 0,021	0,002 ± 0,001
Turbidez (NTU)	0,1 a 477	8,6 ± 34,1	SO ₄ ²⁻ total (mg/L)	0,5 a 796	31,3 ± 71,5
Al (mg/L)	0,1 a 19,8	0,26 ± 1,12	Cl ⁻ (mg/L)	0,2 a 801	61,9 ± 116,1
As (mg/L)	0 a 2,029	0,0003 ± 0,0017	NO ₃ ⁻ (mg/L)	0 a 41,9	1,6 ± 3,2
Ca ²⁺ (mg/L)	0,4 a 373,6	109,5 ± 67,4	Pb (mg/L)	0,002 a 0,481	0,005 ± 0,024
Cu (mg/L)	0,002 a 0,2	0,004 ± 0,013	P total (mg/L)	0 a 2,3	0 ± 0,1
Fenóis (mg/L)	0,0005 a 0,01	0,001 ± 0,0009	Se (mg/L)	0,0003 a 0,0131	0,0006 ± 0,0014
Fe (mg/L)	0 a 2,3	0,1 ± 0,2	Si (mg/L)	0,5 a 31,5	11,4 ± 4,6
F ⁻ (mg/L)	0,1 a 6,3	0,4 ± 0,7	Zn (mg/L)	0,01 a 7,24	0,2 ± 0,5

122

A qualidade das águas subterrâneas

A estatística descritiva da composição físico-química das águas subterrâneas na área de estudo é resumida na Tabela 1. A elevada ordem de amplitude encontrada para a CE foi observada também para a dureza total e para STD, cujas amplitudes foram de 8764 mg/L, 1.253 mg/L e 2.162 mg/L, respectivamente. Também houve grandes variações nos valores de outros parâmetros medidos, a exemplo da turbidez com amplitude de 476,9 NTU e dos íons predominantes. O Cloreto, por exemplo, variou em 800,8 mg/L e o Cálcio, em 341,1 mg/L. Tais variações, em geral, ocorrem em função das diferentes interações água-rocha ao longo do percurso das águas decorrente de diferenças no gradiente hidráulico, na natureza das rochas e nos processos químicos envolvidos.

A qualidade das águas subterrâneas na área de estudo se altera espacialmente, a exemplo da CE, cujos valores variaram amplamente, de 10 a 8.774 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A Figura 3 mostra a distribuição espacial da CE para períodos chuvosos e secos nos anos de 2010/2011. Observa-se uma tendência de concentrações maiores na porção leste da área de estudo e nos períodos secos, embora as diferenças entre os dois períodos sejam relativamente pequenas. Já na porção oeste – com menores concentrações em ambos os períodos – o comportamento foi oposto, com tendência de redução dos níveis da CE nos períodos secos. Esta variação na CE pode ser explicada por dois fenômenos de efeitos contrários.

O primeiro é o da diluição das águas subterrâneas pelas águas pluviais no período chuvoso, que parece ser predominante na porção leste da área de estudo. O segundo fenômeno seria relacionado à ação, pelas chuvas, de arraste e concentração de sais da zona não saturada, predominante na porção oeste da área de estudo. De modo geral, nesta porção, houve aumento da CE no período chuvoso. Os valores da CE indicam que a maioria delas (93% dos poços monitorados) situa-se abaixo do valor de 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que corresponde a uma salinidade considerada tolerável para consumo humano.

No aquífero Bambuí, embora as águas apresentem considerável variação em relação à dureza – classificadas desde macias (concentrações entre 0 e 75 mg/L de CaCO_3) a muito duras (concentrações maiores de 300 mg/L de CaCO_3), há uma predominância de águas muito duras, incrustantes (37% dos poços, correspondente a 39% das medições) e duras (26% dos poços, correspondente a 34% das medições), como mostrado na Figura 4.

Apenas 6,3% dos poços corresponderam a águas classificadas como macias, mais especificamente os pontos identificados como FD001, JB003, MC002, MTC002 e JB021, com medianas de 9,4; 28; 48,1; 56,5; e 51,2 mg/L, respectivamente. Estes pontos estão distribuídos espacialmente na região sul (2 poços) e na região norte (4 poços) da área estudada.

Os valores de pH medidos no campo oscilaram de 5,1 a 8,6, isto é, as águas do aquífero variam de ácidas a alcalinas, havendo predominância de águas com caráter neutro a levemente alcalino, pH entre 6,5 e 7,5 (45% dos poços, correspondente a 39% das amostras), seguidas de águas com caráter alcalino, ou seja com pH acima de 7,5 (34% dos poços, correspondente a 51% das amostras). Apenas 0,9% das medições correspondentes a medições em um único poço, codificado como FD001, estiveram abaixo do limite inferior de pH de 6 para consumo humano, estabelecido pela Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde.

Foram identificados cinco tipos de classes, sendo que 85,5% são águas bicarbonatadas cálcicas, 7,3% cloretadas sódicas e 5,6% bicarbonatadas sódicas. As relações iônicas predominantes, utilizando as unidades de miliequivalente-grama por litro (meq / L), no carste fraturado do Bambuí caracterizam-se pela sequência: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$.

Para compreender melhor as variações químicas no sistema de águas subterrâneas no interior da área de estudo, foram tomadas seis seções hidroquímicas ao longo do caminho de fluxo predominante - sudoeste em direção ao nordeste. Uma comparação entre o comportamento dos ânions mostrada na Figura 5 (b) indica tendência de aumento gradual nas concentrações do Cloreto com a linha de fluxo. Já o Sulfato e o Bicarbonato não apresentam nenhuma tendência de variação com o fluxo, havendo predomínio do bicarbonato em relação ao Sulfato em todos os pontos de monitoramento. Quanto à evolução dos cátions analisados mostrada na Figura 5 (a), nenhum deles apresenta tendência de elevação com o fluxo subterrâneo predominante no Bambuí, ao longo de toda a área estudada, o que se evidencia pela redução no ponto 5 do gráfico. Em toda a área de estudo, as concentrações de Cálcio em meq/L apresentam-se maiores que os dois outros cátions analisados, Sódio e Magnésio. Provavelmente, o aumento da concentração de Cloreto no decorrer do fluxo ocorre em função da dissolução deste íon do meio rochoso. Por outro lado, provável explicação para o comportamento dos demais íons no aquífero, seria o clima semiárido da região, caracterizado por

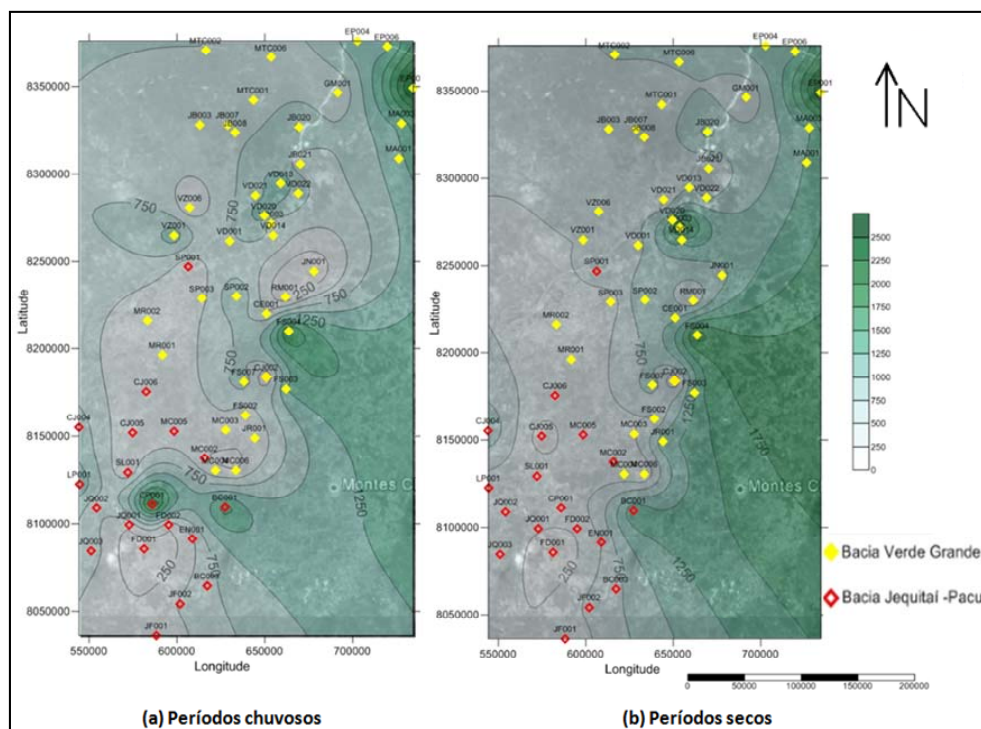


Figura 3 - Plumas de isoteores da condutividade elétrica - CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) – (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos.

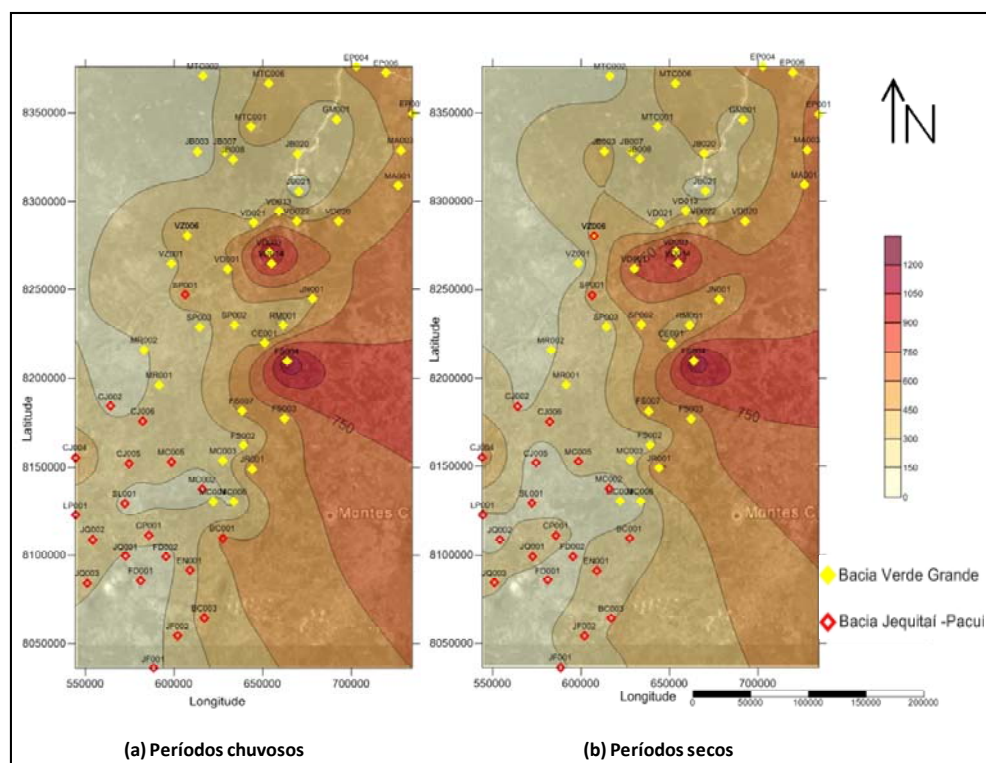


Figura 4 - Plumas de isoteores da dureza total (mg/L) – (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos.

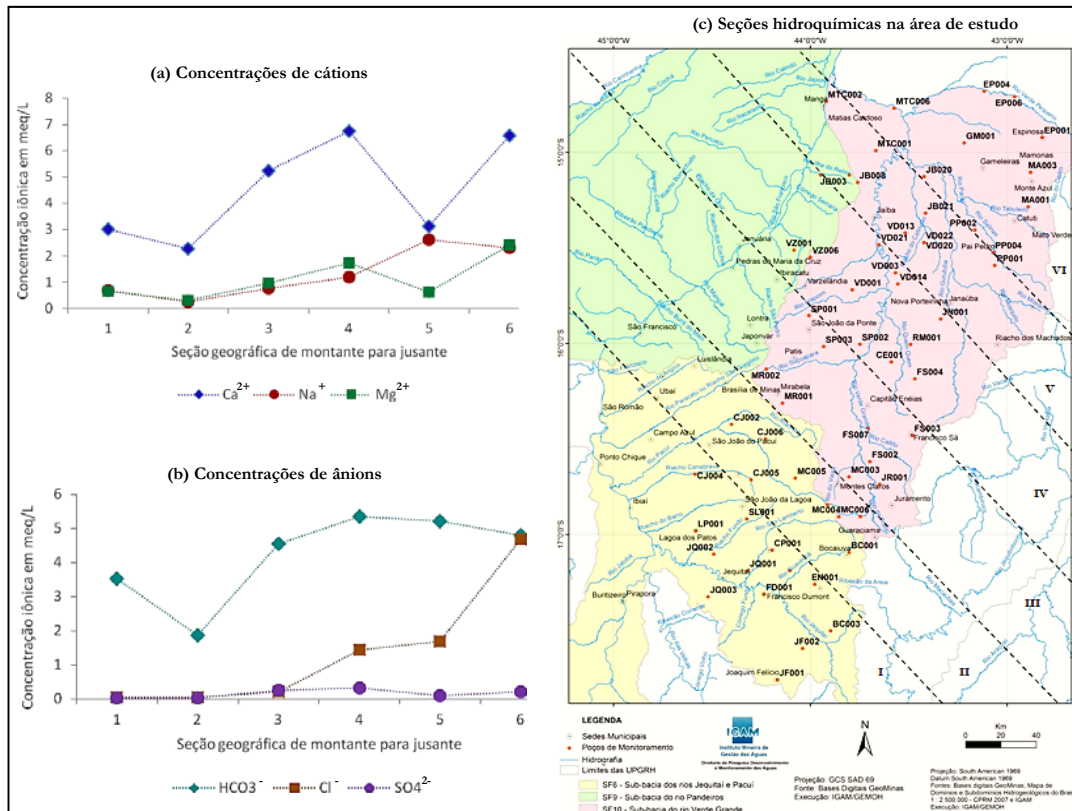


Figura 5 – Seções hidroquímicas – linhas tracejadas no mapa – e respectivos gráficos mostrando a evolução dos íons principais nas águas subterrâneas ao longo da linha de escoamento (baseado nas medianas de cada seção).

baixas taxas de precipitações, associado à ocorrência de reações de dissolução em equilíbrio com reações de precipitação no decorrer do fluxo desta região.

A classificação hidroquímica das águas subterrâneas

Fácies hidroquímicas são corpos de água, no aquífero, com composições químicas diferentes, sendo que cada fácies hidroquímica define um grupo de águas subterrâneas com composição semelhante e tem, tipicamente, uma origem ou padrão de evolução único. As fácies são função da litologia, cinética da solução, e padrão do fluxo do aquífero e fornecem indicações sobre os processos ambientais que atuam continuamente. Elas são classificadas com base nos íons dominantes, podendo ser mais facilmente expressas por meio do diagrama trilinear de Piper (MELO *et al.*, 2008). Para definição das fácies hidroquímicas presentes na porção do aquífero em estudo foi elaborado o Diagrama de Piper para as amostras analisadas, conforme mostrado na Figura 6. O balanço iônico realizado

indicou erro médio de 2,69%, com 75% das análises com erro inferior a 10%. Do total de amostras de águas, 51% delas águas pertencem às fácies hidroquímicas Ca²⁺-Mg²⁺-Na⁺HCO₃-Cl; e 30% pertencem às fácies hidroquímicas: Ca²⁺-Na⁺-Mg²⁺-HCO₃-Cl. As fácies hidroquímicas Na⁺-Ca²⁺-Mg²⁺-Cl-HCO₃ e Mg²⁺-Ca²⁺-Na⁺-HCO₃-Cl representam cada uma, apenas 0,8% das águas dos poços analisados. As relações entre os íons dissolvidos na água subterrânea podem indicar certa relação com o litotipo do qual a água se origina. A predominância das águas bicarbonatadas cálcicas é característica de aquíferos associados ao carste e indica a presença dos minerais calcita e dolomita nas rochas.

Com relação ao total de medições, 90% delas são adequadas para fins de consumo humano; e dos 10% que se apresentaram inadequadas, 5,7% o foram por excederem limites relacionados a questões organolépticas e o restante, 4,3% referem-se a padrões associados a riscos à saúde. Ainda para o consumo humano, verificou-se que 23% dos poços monitorados no período de 2005 a 2011 apresentaram águas inadequadas para este fim em função de excederem padrões relacionados a riscos à saúde.

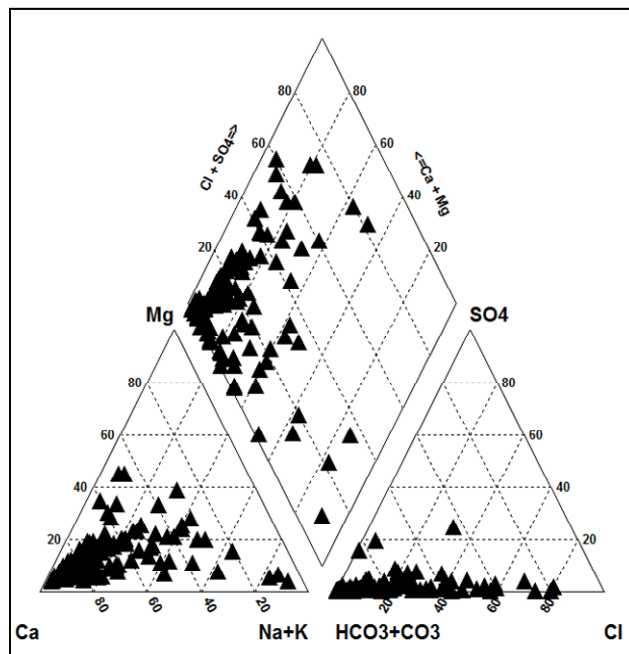


Figura 6 - Diagrama trilinear de Piper para as amostras analisadas – 124 poços no período de 2005-2011.

Dentre os poços que excederam limites somente para um parâmetro, quatro deles foram para nitrato (EP004, LP001, MA001 e VD022), quatro deles excederam limites de fluoreto (JB003, JB007, MTC002 e VZ006), cinco poços excederam limites de chumbo (BC001, JB008, SL001, VD001, VZ001), e um poço para arsênio (FD001). Outros poços excederam limites para mais de um parâmetro conjuntamente, caso do poço MA003 que excedeu limites de nitrato e de chumbo, do poço EP001 que excedeu limites de nitrato e de fluoreto e do poço PP001 para bário e nitrato. Estes resultados demonstram a necessidade de algumas restrições de uso por parte dos órgãos responsáveis.

Considerando também os parâmetros organoléticos, o percentual total de poços inadequados aumenta consideravelmente, para 82% do total, sendo que os parâmetros de caráter organolético que mais excederam os limites legais foram: Ferro (56% dos poços), Alumínio (47,6%) e Manganês (23%). A turbidez, a cor e a dureza ultrapassaram os limites em 42%, 40% e 16% dos poços, respectivamente. As elevadas concentrações de ferro, alumínio e manganês, não são resultados esperados para águas subterrâneas em ambientes cársticos, e associados a níveis elevados de turbidez como ocorreu, podem indicar possíveis interferências do bombeamento e dos próprios poços de extração, o que deverá ser mais bem avaliado futuramente.

Quanto ao uso para dessedentação animal, 99,2% do total de medições no período de 2005 a 2011 resultaram em águas adequadas para este fim, com base nos padrões preconizados pela Resolução Conama nº 396/2008. Em relação ao total de 124 poços monitorados no período de 2005 a 2011, verificou-se que 38% deles apresentaram águas inadequadas para a dessedentação. Dentre estes, 18,5% dos poços excederam o limite para Manganês; 7,3% dos poços excederam limite para Fenóis; 6,5% dos poços excederam limite para Fenóis e Manganês. Outros poços (4% do total) excederam, individualmente, limites de mais de um parâmetro, a saber: Chumbo e Manganês; Chumbo, Manganês e Fenóis; Fenóis e Fluoreto; Alumínio e Manganês; e Fluoreto, Alumínio e Manganês.

Para fins de recreação e de acordo com a Resolução Conama nº 396/2008, 97,9% do total de medições feitas no período de 2005 a 2011 resultaram em águas que são adequadas. Em relação ao total de 124 poços monitorados no período de 2005 a 2011, verificou-se que 24% deles apresentaram águas inadequadas para recreação. Dentre estes, 17 poços excederam limites para Fenóis, 10 poços ultrapassaram padrão para Nitrato, um poço excedeu limite de Selênio, um poço excedeu limites de Nitrato e de Chumbo, e um poço excedeu limites de Fenóis e de Chumbo.

Em climas semiáridos, as altas taxas de evaporação da água tendem a enriquecer o solo com

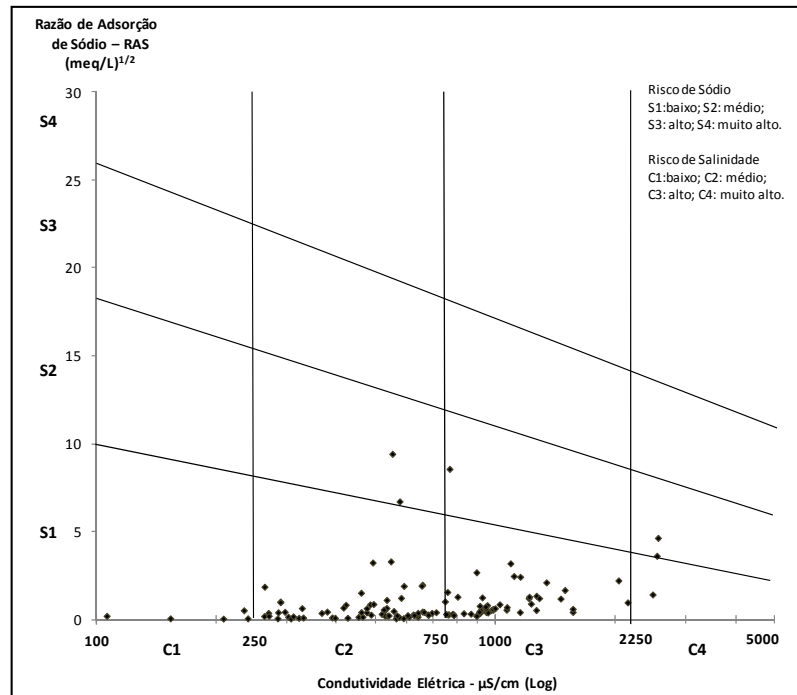


Figura 7 - Diagrama de Wilcox para as amostras analisadas – 124 poços no período de 2005-2011.

os solutos, ao longo do tempo, potencializando o risco de salinização. Dois parâmetros são usados para avaliar a adequação da água na irrigação: a razão de adsorção de sódio – RAS (ou SAR em inglês) e a salinidade, medida indiretamente pela CE. A RAS indica a porcentagem de sódio contida na água que pode ser adsorvido pelo solo, sendo sua análise de grande importância uma vez que concentrações excessivas deste elemento podem causar o endurecimento e a impermeabilização do solo. A salinidade também é um fator limitante ao uso na agricultura, impactando os solos e o desenvolvimento das plantas (LIMA *et al.*, 2010; HUSSEIN *et al.*, 2012).

Para avaliar a adequação das águas subterrâneas do Bambuí para fins de irrigação, além da verificação do atendimento aos padrões legais (Resolução Conama nº 396/2008), foi feita classificação da água subterrânea para irrigação, baseada na razão de adsorção de sódio (RAS) e na condutividade elétrica medidas da água.

Com relação ao total das medições realizadas em 124 poços no período de 2005 a 2011, 99,2% delas são adequadas para fins de irrigação, de acordo com a Legislação mencionada anteriormente. Para a irrigação, verificou-se que 31% dos poços monitorados no mesmo período (124 poços) apresentaram águas inadequadas para este fim.

Dentre estes, os percentuais de poços que excederam limite legal para parâmetro individual foram, respectivamente: 10,5% para Manganês; 5,6% para Fluoreto; 3,2% para Ferro; 1,6% para Zinco. Cinco poços (4% deles) excederam padrões de Ferro e Manganês, conjuntamente; dois poços excederam concentrações de Cloreto e Alumínio; e dois de Cloreto e Manganês. Outros poços excederam, individualmente, limites de mais de um parâmetro, a saber: Cobre e Manganês; Fluoreto e Cobre; Fluoreto e Zinco; e Cloreto, Fluoreto, Cobre e Ferro.

A RAS variou de zero a 10,1 (meq/L)^{1/2}, com mediana de 0,48 (meq/L)^{1/2}. A classificação das amostras de água, de acordo com o Diagrama de Wilcox, é apresentada na Figura 7.

A maioria das amostras concentrou-se nos campos C2-S1 e C3-S1 do diagrama de Wilcox, ou seja, com risco de salinidade baixo e risco de sódio moderado; seguido de risco de salinidade baixo e risco de sódio alto, respectivamente. Um único poço (MTC002) apresentou águas com risco de salinidade alto e risco de sódio moderado – campo C3-S2 – e dois poços (EP001 e VD004) tiveram suas águas no campo C4-S2, com risco de salinidade muito alto e risco de sódio moderado. Estes pontos concentram-se mais ao norte da área estudada (Figura 2).

CONCLUSÕES

De modo geral e em relação ao total de 124 poços monitorados no período de 2005 a 2011, verificou-se que as águas subterrâneas na região podem ser consideradas inadequadas para fins de consumo humano, ao se considerar que 82% dos poços de monitoramento da área estudada apresentaram violação de padrões legais. Todavia, 64% dos poços apresentaram-se inadequados exclusivamente em função de parâmetros organolépticos, a maioria em função de concentrações elevadas de Ferro, Alumínio e Manganês. Quanto à dessedentação animal, 38% dos poços apresentaram águas inadequadas para este fim. Já para a irrigação foram 31% dos poços considerados inadequados, sendo que o risco por sódio não constitui fator crítico, mas a condutividade elétrica é fator limitante, localizadamente.

A grande variabilidade na hidroquímica na área estudada do sistema Bambuí é característica de ambientes carstificados e pode ser explicada pelas variações no comportamento hidráulico e pelas diferenças nas interações com os litotipos advindas de formas de dissolução cárstica (dolinas, sumidouros, cavernas) associadas às fraturas com feições bem localizadas, que conferem elevada anisotropia ao sistema.

As elevadas concentrações de Ferro, Alumínio e Manganês não são resultados esperados para águas subterrâneas em ambientes cársticos e suspeita-se que o próprio poço de extração possa estar contribuindo para estes valores. Conclui-se, portanto, pela necessidade de avaliações mais detalhadas, em cada poço, para verificar o excesso destes constituintes que tornam parcela considerável dos poços inapropriada, inclusive para consumo humano.

AGRADECIMENTOS

CPRM – Serviço Geológico do Brasil; IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas; Fapemig – Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais; CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

REFERÊNCIAS

ANA. Agência Nacional das Águas. *Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil*. Brasília: ANA, 2005. Cadernos de Recursos Hídricos. Disponível

em: <<http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VF%20DisponibilidadeDemanda.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2012.

ANA. Agência Nacional das Águas. *Atlas nordeste – Abastecimento urbano de água: Alternativas de oferta de água para as sedes municipais da região nordeste do Brasil e do norte de Minas Gerais*. Brasília: ANA, 2006. 79p. Relatório.

ANA. Agência Nacional das Águas; IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Estudo de caracterização dos recursos hídricos no estado de Minas Gerais: primeira etapa do Plano Estadual de Recursos Hídricos*. Belo Horizonte: Projeto PROÁGUA / Semiárido, 2006. 177p. Relatório.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 10664. 1989. Águas – Determinação de Resíduos Sólidos- método gravimétrico. Rio de Janeiro. 14p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR ABNT 10740. 1989. Água – Determinação de fenol total. Rio de Janeiro. 6p.

APHA. American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21 ed. Washington, 2005. 1200p.

BRASIL, Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional. *Nova Delimitação do Semi-Árido Brasileiro*. Brasília: MI-SDR, 35 p., 2005.

CAMPOS, José Eloi Guimarães; Dardenne, Marcel Auguste. Estratigrafia e sedimentação da bacia san-franciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, Brasília, v. 27, n. 3, p. 269-282, Set. 1997.

CETEC. *Estudos Integrados de Recursos Naturais: Bacia do Alto São Francisco e Parte Central da Área Mineira da SUDENE, Hidrologia Subterrânea*. 1984. Belo Horizonte: CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 274p. 1984.

COELHO, Cristiano J. da C.; Damázio, Eduardo. Aspectos da disponibilidade e dos usos da água na bacia do rio Bacanga – Ilha do Maranhão – MA. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, v. 19, p. 73-84, 2006.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Implantação de Rede Integrada de Monitoramento das Águas Sub-

terrâneas: proposta técnica. Belo Horizonte: CPRM, 2009. 85p. Relatório.

HUSSEIN, Mohammed Tahir; Mazin, Yousif, M. Al; Awad, Hussein S. Potentiality of Secondary Aquifers in Saudi Arabia: Evaluation of Groundwater Quality in Jubaila Limestone. *International Journal of Geosciences*, v. 3, p. 71-80, 2012.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Demográfico 2010*. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/entorno/>. Acesso em: 23 jul. 2012.

IGLESIAS, Mario Iglesias; Uhlein, Alexandre. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozoicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 39, n. 2, p. 256-266, Jun. 2009.

LIMA, Eugenio Antônio de; Beraldo, Valdir José; Guiler, Selma Chaves; Brandão, Luiz Carlos Ribeiro; Costa, Estácio Alves. Possibilidades de aproveitamento das águas subterrâneas do estado da Paraíba na agricultura irrigada utilizando o gráfico do U. S. Salinity Laboratory. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16., 2010, São Luis, *Anais...*, São Luis: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - ABAS, 2010. p. 1-12.

MELO, Jose Geraldo de; Vasconcelos, Mickaelon Belchior; Moraes, Franklin de; Morais, Samara Danielle Oliveira de; Medeiros, José Ivan de. Aspectos da salinização das águas subterrâneas na borda sul da bacia Potiguar, RN. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008, Natal, *Suplemento...*, Natal: ABAS, 2008, p. 1-13.

PESSOTI, J.E.S.; Demattê, J.L.I.; Rueda, J.R.J.; Marconi, A. Relação entre fisiografia e solos desenvolvidos de material cenozoico da região do rio Jequitaiá, MG. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*, Piracicaba, v. 46, n. 2, p. 495-518, 1989.

SILVA, Adelbani Braz; Gimena, Emílio Custódio; Escondino, Paulo Cyro Baptista. Estudo Hidrogeológico do carste da Jaíba, norte de Minas Gerais. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2., 1982, Salvador, *Anais...*, Salvador, 1982. p. 65-88.

SILVA, Mirna Karla Amorim; Rosa, Roberto. Diagnóstico do meio físico da bacia hidrográfica do rio

São Francisco, no Estado de Minas Gerais-Brasil. IN: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal, *Anais...*, Natal: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009. p. 4393-4400.

USGS. United State Geological Survey: USGS I-1187. 1985. Standard Test Methods for Chloride Ion In Water. In: EPA/40 CFR 136.3(a) – ASTM D512. Washington. 13p. 1985.

ZOBY, José Luiz Gomes; Matos, Bolivar Antunes; Conejo, João Gilberto Lotufo. Disponibilidade de águas subterrâneas na bacia do rio São Francisco. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004, Cuiabá, MT, *Anais...*, São Paulo: Revista Águas Subterrâneas - ABAS, 2004. p. 1-21.

Hydrodynamic Aspects And Groundwater Quality Of The Bambuí Aquifer In The North Of Minas Gerais

ABSTRACT

The Bambuí system is a medium potential aquifer, located in the basin of San Francisco river in Minas Gerais. This aquifer presents limitations on the availability of surface and groundwater, combined with increasing pressures. The main objective of this study was to evaluate the groundwater of this system in the sub-basin of the Verde Grande river and sub-basin of the rivers Jequitaiá-Pacuí, with emphasis on the quality of these waters. It was observed that the average value of the hydraulic gradient was 0.34 and the electrical conductivity (EC) ranged between 10 and 8774 S/cm, and there was a predominance of water with EC lower than 1500 S/cm. The waters were mostly neutral to slightly alkaline, and presented elevated hardness. The relationship between the major ions was $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^{+} > HCO_3^{-} > Cl^{-} > SO_4^{2-}$ and chloride concentrations increased during the groundwater flow. The groundwater in the study area was unsuitable for human consumption in 82% of monitored wells, also, 64% of the wells were inadequate solely because of organoleptic aspects.

Key-words: North of Minas Gerais, Bambuí Aquifer, Groundwater Quality, Verde Grande river sub-basin, Rivers Jequitaiá-Pacuí sub-basin.