ANÁLISE DA EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS DE UM SISTEMA AQUÍFERO CÁRSTICO, NORTE DE MINAS GERAIS

Stela Cota[1]; Guilherme F. Marques [2]; Leila M. Velásquez; Paulo Rodrigues[1]; Rodrigo de Paula[3]

RESUMO – Os sistemas cárstico fraturados são importantes componentes da hidrologia do semi-árido e semi-úmido no Brasil como fontes abastecimento de água, em função da característica intermitente das águas superficiais nestas regiões. Desta forma, compreender seu comportamento e respostas a intervenções antrópicas é o primeiro passo para assegurar o uso sustentável das reservas e a disponibilidade futura da água. O presente artigo discute a evolução temporal do nível potenciométrico medido em três períodos distintos nos aquíferos que compõem o sistema cárstico-fissural da bacia do riacho Mocambo, município de São Francisco, norte de Minas Gerais, com o objetivo de entender o comportamento hidráulico geral e subsidiar o desenvolvimento de um modelo conceitual de fluxo subterrâneo na bacia. Este modelo será empregado posteriormente no planejamento do uso da agua. Para os três períodos, o formato das isopotenciais e as principais direções de fluxo se mantiveram os mesmos, indicando um possível comportamento homogêneo, do ponto de vista hidráulico geral, do sistema cárstico-fissural estudado.

ABSTRACT – Karst fractured systems are important components of Brazilian semi-arid and semi-humid hydrology, given the intermittent and uncertain nature of the surface water supplies. In this context, the understanding the karst behavior, as well as its response to water uses are a first step towards sustainable long-term groundwater management. This paper discusses the temporal evolution of the potentiometric level, measured in three distinct periods in the karst system of the Mocambo river watershed, north of Minas Gerais state, Brazil, with the aim of understanding the general hydraulic behavior e provide subsidy to the development of a conceptual groundwater flow model in the watershed. For all three periods analyzed, the equipotential surface and the main groundwater flux directions remained mostly unchanged, indicating a possible homogenous behavior of the studied area from a general hydraulic standpoint.

Palavras-chave: Hidrogeologia, sistema cárstico, potenciometria.

INTRODUÇÃO

O domínio cárstico fraturado é comum nas regiões semi-áridas e semi-úmidas do Brasil, representando mais de 145 mil km² ou 23% da bacia do Rio São Francisco e constituem 8% do total de exploração das reservas de água subterrânea nesta bacia. O carste é formado por rochas calcáreas ou carbonáticas, onde a circulação da água se faz nas fraturas e outras descontinuidades (diáclases) que resultaram da dissolução do carbonato pela água. Essas aberturas podem atingir grandes dimensões, criando verdadeiros rios subterrâneos. São aquíferos heterogêneos,

[1] Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN), Caixa Postal 941, Belo Horizonte, MG, Brasil, sdsc@cdtn.br
[2] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Av. Amazonas, 7675, Belo Horizonte, MG. Brasil. gmarques@civil.cefetmg.br
[3] Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antonio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG, Brasil, menegase@yahoo.com.br

descontínuos, com águas duras, com fluxo em canais. Esses sistemas são importantes componentes da hidrologia regional como fontes abastecimento de água, em função da característica intermitente das águas superficiais no semi-árido. Desta forma, compreender seu comportamento e respostas a intervenções antrópicas é o primeiro passo para assegurar o uso sustentável das reservas e a disponibilidade futura da água.

O presente artigo discute a evolução temporal do nível potenciométrico nos aquíferos que compõem o sistema cárstico-fissural da bacia do riacho Mocambo, município de São Francisco, norte de Minas Gerais, às margens do rio São Francisco em seu curso médio (Figura 1). Os níveis potenciométricos foram mapeados em poços tubulares da região entre abril/2010 e julho/2010 em diferentes momentos do ciclo hidrológico: final do período de chuvas (abril), meio (julho) e final do período seco (outubro). Mapas potenciométricos interpolados foram desenhados e sua coerência é analisada com o comportamento esperado para um sistema fissural-cárstico, com vistas a obter indícios do grau de conexão hidráulica entre as fraturas e condutos. Esses resultados visam embasar a elaboração de um modelo conceitual de fluxo dos aquíferos estudados, colaborando para o planejamento do uso dos mananciais subterrâneos e superficiais na bacia.

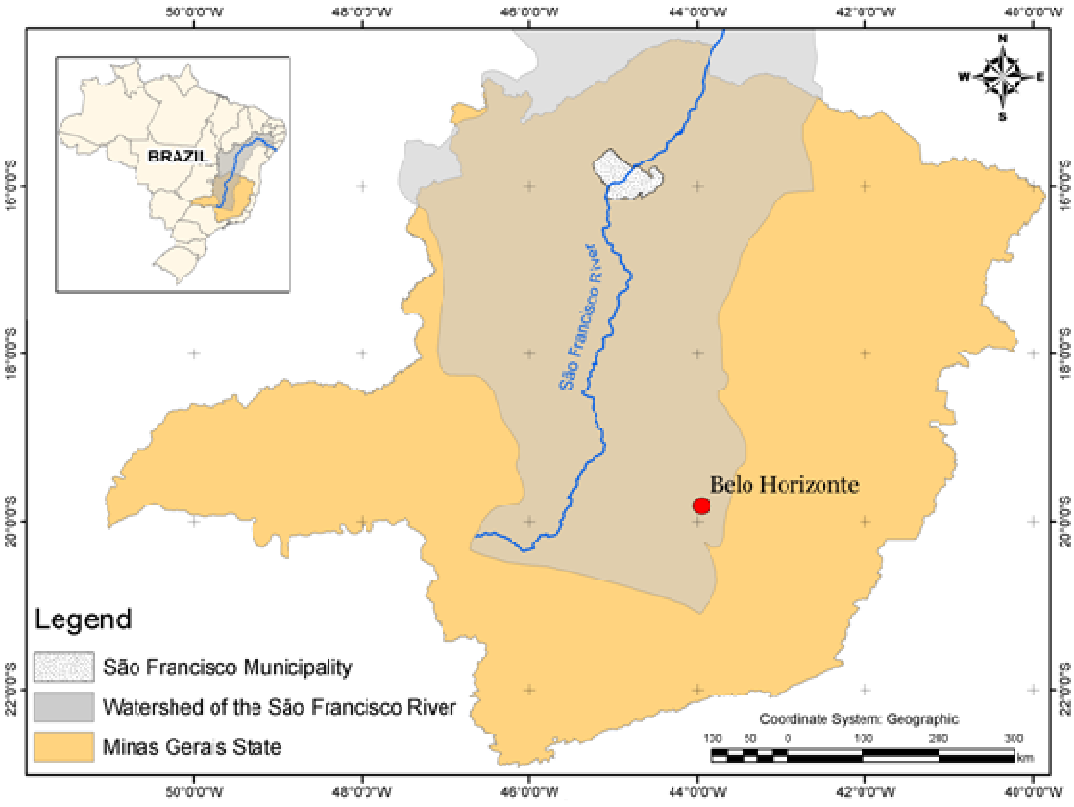

Figura 1 – Localização da área de estudo (de Velásquez *et al.*, 2007a)

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi desenvolvido na bacia do riacho Mocambo, localizado a sul da cidade de São Francisco (Figura 2). Localizado a cerca de 600 km de Belo Horizonte, a cidade de São Francisco, sede do município, está localizada nas seguintes coordenadas: 44°51' e 15°56'. A área é classificada como tropical semi-úmido e quente (PATRUS *et al*., 2001), com temperatura média de 24° C e índice pluviométrico de 1053 mm (médias entre 1938 e 1999), com estação úmida entre novembro e março, seguida de um longo período seco e quente. No município de São Francisco, estima-se que 70% da população rural depende da água subterrânea para abastecimento devido a fatores como a limitada disponibilidade de mananciais com boa qualidade sanitária e bacia preservada, a ausência de mananciais superficiais perenes e os custos inferiores de implantação e operação de sistemas com poços tubulares (OLIVEIRA *et al*, 2007).

A escolha da bacia foi feita com base na disponibilidade de dados prévios sobre a geologia da área em maior detalhe e na possibilidade de se selecionar uma rede de monitoramento para potenciometria adequada. A bacia, com aproximadamente 360 km^2, é constituída pelas sub-bacias dos riachos Mocambo, Tabocal, Pageú, Várzea de Casa e Tinguis.

No contexto regional a área está inserida no compartimento central da Bacia do São Francisco, constituída de coberturas neoproterozóicas pouco deformadas da porção centro-sul do cráton do São Francisco – unidade geotectônica neoproterozóica que permaneceu estável em relação às faixas de dobramento brasilianas Araçuaí, Alto Rio Grande, Brasília, Rio Preto, Sergipana e Riacho do Pontal (ALMEIDA, 1977). As principais unidades de preenchimento da Bacia do São Francisco são os Supergrupos Espinhaço, (Pale/Mesoproterozóico), e São Francisco (Neoproterozóico), além do Grupo Santa Fé (permo-carbonífero) e os Grupos cretácico Areado, Mata da Corda e Urucuia.

O Grupo Bambuí, pertencente ao Grupo São Francisco, é a principal unidade litoestratigráfica neoproterozóica de cobertura do Cráton do São Francisco, compreendendo uma mega-seqüência pelítica e carbonática depositada em plataforma carbonática (Subgrupo Paraopeba) recoberta por sedimentos predominantemente siliciclásticos depositados em bacia de antepaís (Formação Três Marias, DARDENNE, 1978). Constitui espessa seqüência de rochas sedimentares e metassedimentares de baixo grau metamórfico que cobre amplas áreas nos estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia.

Formalmente, o Grupo Bambuí é constituído das Formações Sete Lagoas (calcários e dolomitos com intercalações localizadas de pelitos), Serra de Santa Helena (folhelhos, siltitos, margas e lentes esparsas de calcário), Lagoa do Jacaré (calcários pretos, com intercalações de

siltitos), Serra da Saudade (siltitos e folhelhos) e Três Marias (siltitos, arcósios e arenitos arcosianos) (RADAMBRASIL, 1982). Com exceção da Formação Três Marias, as demais formações, são reunidas sob a denominação de Subgrupo Paraopeba (op.cit).

As rochas constituintes da bacia foco são pertencentes ao Grupo Bambuí, de idade neo-proterozóica, mapeadas por Freire & Castro (2003), na escala 1:60.000 e em escala de detalhe, 1:25.000, em duas áreas chaves no interior desta bacia. Os autores descrevem uma sequência com constantes intercalações de rochas pelíticas e calcários subhorizontais de espessuras variáveis (centimétricas, métricas a dezenas de metros). No topo, ocorrem os arenitos cretácicos intemperizados do Grupo Urucuia, com espessuras de 20 a 30m. Sedimentos predominantemente arenosos formam as coberturas eluvio-coluvionares e os aluviões junto ao rio São Francisco.

Devido a tal diversidade litológica e em função do objeto do trabalho, com exceção dos arenitos do Grupo Urucuia, a ausência de estudos que comprovadamente correlacionem as unidades mapeadas à estratigrafia formal do Grupo Bambuí, optou-se pela identificação das unidades litológicas, tanto quanto possível, de acordo com a predominância dos termos pelítico ou carbonático (Figura 3).

Com base no mapa geológico e dados de perfis geológicos de poços tubulares perfurados pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA/MG), foram identificadas 4 unidades hidroestratigráficas, da base para o topo (Figura 3): i) Calcário inferior, abaixo da cota 550 m, formando um aqüífero cárstico-fissural inferior; ii) Pelito intercalado com calcário, com espessuras das camadas pelíticas e carbonáticas variando entre 10 e 30 metros, funcionando como aquitardo; iii) Calcário superior, com 40 metros de espessura, ocorrendo acima da cota 640 m, constituindo o aqüífero cárstico-fissural superior, e, iv) Arenitos do Grupo Urucuia com 20 a 30 m de espessura.

Em estudo geológico abrangendo a porção do município correspondente à margem direito do rio São Francisco, Freire & Castro (2003) mediram as fraturas sub-verticais nos calcários, e dutos gerados pela dissolução cárstica (Figura 4). Embora os máximos das fraturas e dutos não apresentem uma concordância exata, verifica-se uma associação entre o grupo de direções N30^{o}-80^{o}W e N10^{o}- 40^{o}E, e considerando-se as direções médias das fraturas (N55^{o}W e N30^{o}E) e dos dutos (N60^{o}W e N25^{o}E). Salienta-se uma direção marcante de carstificação em N80^{o}-90^{o}W. De acordo com VELÁSQUEZ et al. (2003) tal direção é concordante com a orientação de fraturas mais abertas dentre todas as demais, sendo de difícil medição em campo por conta da irregularidade da superfície do calcário. Porém, nos metapelitos é a direção de fratura mais freqüente. A autora chama ainda atenção para a presença constante de fraturas sub-horizontais alargadas pela dissolução cárstica na área desse estudo.

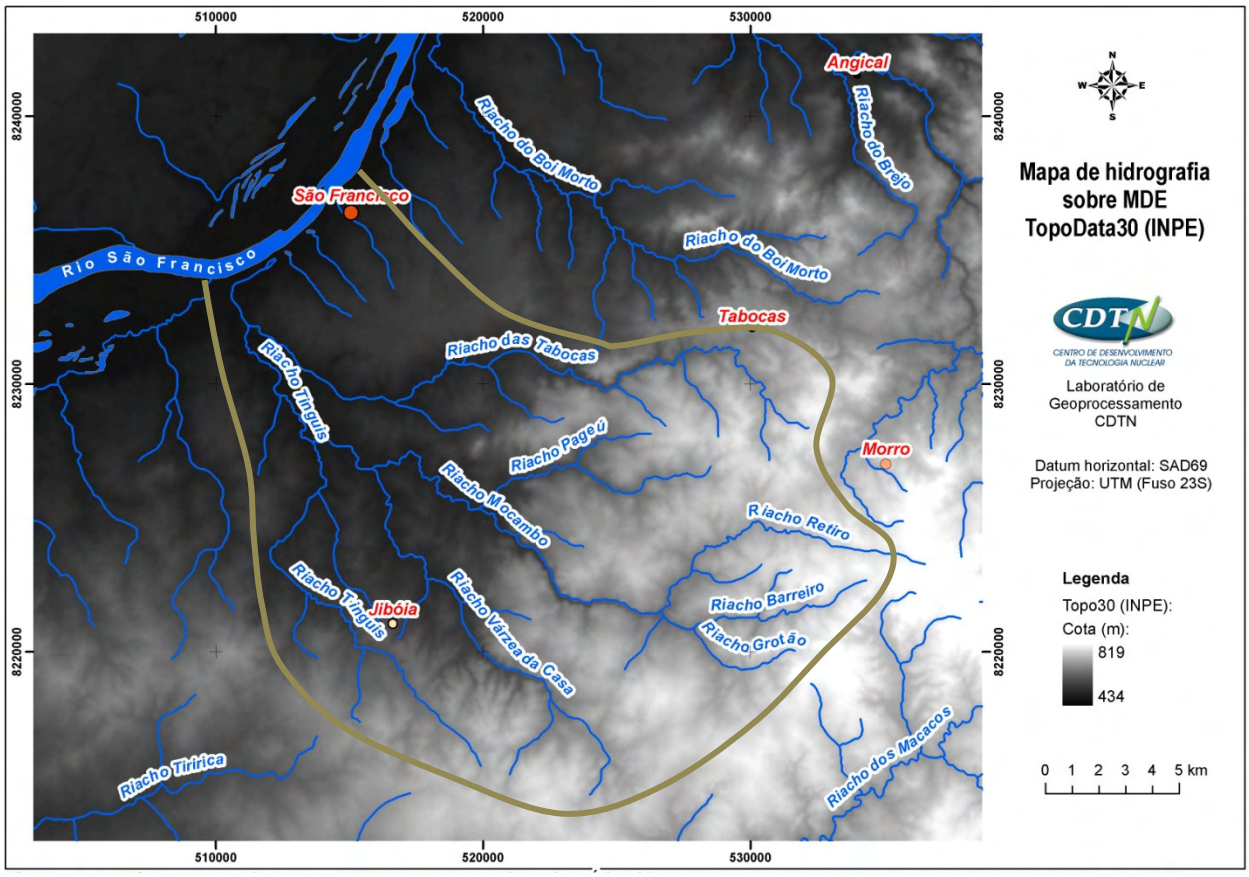

Figura 2 – Localização da bacia escolhida para o estudo – Bacia do Riacho Mocambo

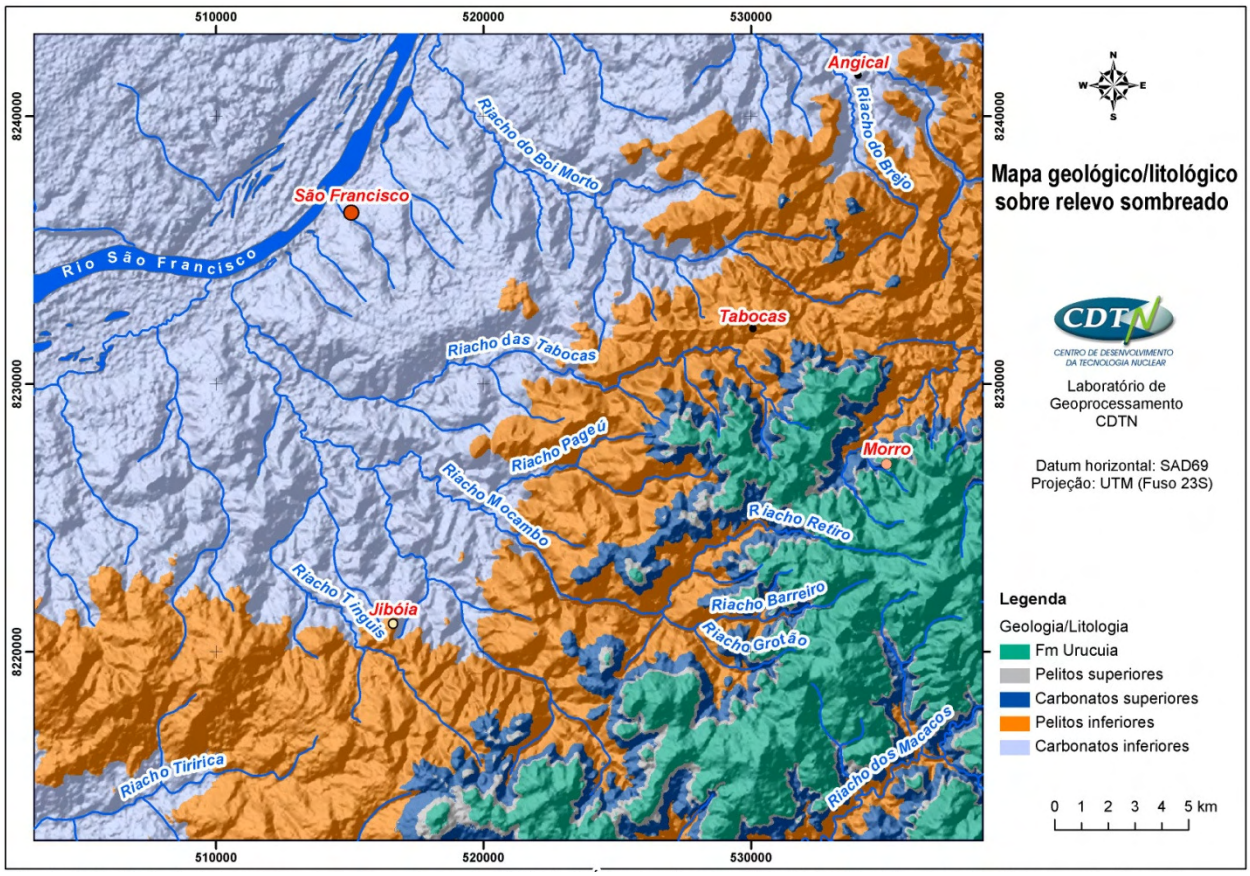

Figura 3 – Mapa geológico /~~litológico~~ da área de estudos

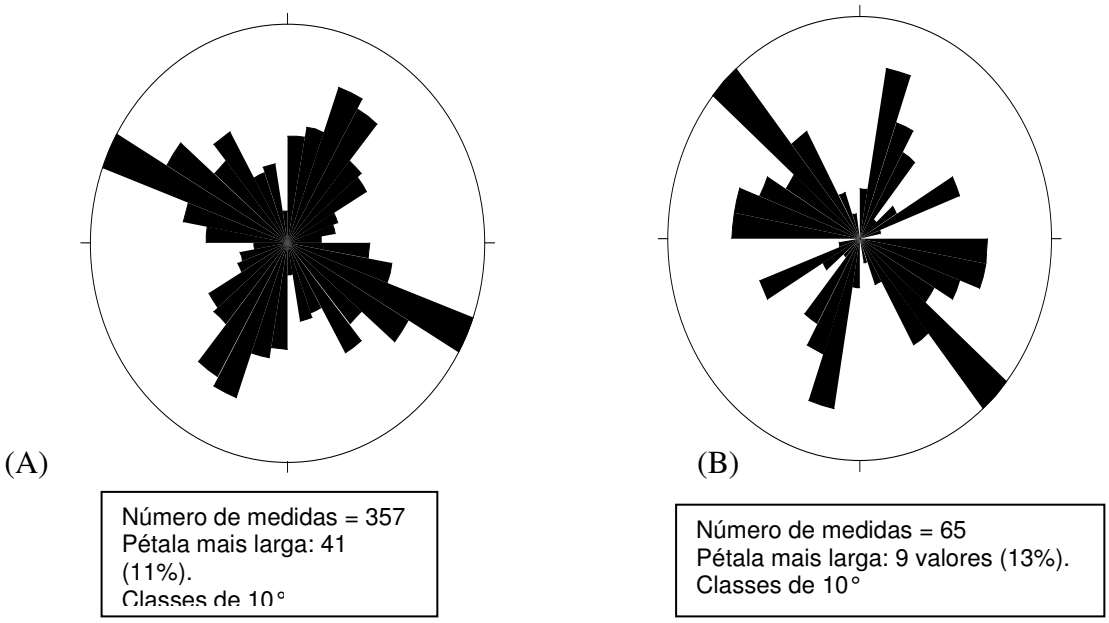

Figura 4 – Diagramas de roseta, das direções de fratura nos calcários, N = 357 (A) e direções dos condutos nos calcários, N = 65 (B) (FREIRE & CASTRO, 2003)

As direções e gradientes de fluxo normalmente são complexos em sistemas anisotrópicos como aquíferos fissurais e cársticos e são determinados pelas descontinuidades. No caso em estudo, componentes horizontais nas descontinuidades subverticais e horizontais são predominantes nos locais em que as unidades cársticas-fissurais estão presentes e componentes verticais se tornam ativas na presença de unidades pelíticas. A partir das medidas de fraturas e dutos acima descritos, é possível inferir pelo menos três direções médias potenciais para fluxo (N55^o-60^{o}W, N70^o-90^{o}W e N25^o-30^{o}E). Entretanto, pode-se dizer que o fluxo geral do sistema regional ocorre segundo as direções NW no sentido do rio São Francisco, localizado a noroeste da área, correspondendo ao nível regional de base, como será visto adiante por meio do mapa potenciométrico.

A vazão média de testes de bombeamento dos poços é de 20,7 m^3/h alcançando máximo de 260 m^3/h, esta relacionada à presença das fraturas alargadas e dutos de dissolução cárstica (op. cit.)

A recarga dos aquíferos na região pode ocorrer de quatro diferentes formas: (a) através dos arenitos do Grupo Urucuia, localizados sobre o Grupo Bambuí, a sudeste da cidade de São Francisco; (b) por drenagem vertical através das unidades pelíticas; (c) por infiltração direta nas áreas de afloramento de arenito e (d) localmente através da infiltração direta em fraturas abertas e dutos cársticos.

ANÁLISE DA POTENCIOMETRIA LOCAL

O nível piezométrico em poços tubulares, variando entre 13 e 31 pontos, de acordo com a campanha, também foi registrado em abril, julho e outubro de 2009 e em abril e julho de 2010 (Tabela 1). Para isso, os poços foram desligados por 24 horas ou até que o nível se estabilizasse. Os dados digitais de elevação (MDE) na região da bacia do córrego Mocambo foram obtidos no site do TOPODATA (INPE, 2011). Esses dados foram interpolados previamente pelo INPE para uma grade de 30x30m a partir dos originais SRTM (90x90m).

Os mapas potenciométricos dos aquíferos na bacia do riacho Mocambo foram obtidos a partir de dados de nível d'água medidos em poços tubulares em estado recuperado (final período de chuvas), em abril/09, deprimido (final do período de seca), em outubro/09, e em julho/2009 (meio do período de seca), conforme é apresentado nas Figuras 5 a 7, respectivamente. Os valores de carga hidráulica foram obtidos com base na cota altimétrica definida pelo MDE elaborado para a área. Embora o tamanho das figuras não permita a identificação de todos os detalhes, os resultados são apresentados neste artigo para análise qualitativa do comportamento geral das linhas potenciométricas (ex: trechos com maior e menor gradiente).

Analisando as figuras 5 a 7, é possível verificar que as cargas hidráulicas acompanham a topografia da bacia, apresentando linhas de fluxo convergentes em direção do rio São Francisco. Duas áreas de maior condutividade hidráulica são identificáveis, respectivamente nas áreas mais altas e mais baixas do terreno. Entre elas, há uma zona de menor condutividade hidráulica, mostrada pela queda mais acentuada na carga hidráulica. Essas características acompanham, de forma geral, a geologia da região, em que os dois principais aquíferos carbonáticos são intercalados com lentes pelíticas (Figura 8).

Na região dos pelitos inferiores, os maiores gradientes hidráulicos podem ser explicados pela predominância de componentes de fluxo verticais, enquanto que na região mais próxima ao Rio São Francisco, a predominância de componentes de fluxo horizontais, típicos de unidades cársticas-fissurais explicam os menores gradientes hidráulicos.

Tabela 1 – Dados de altimetria, níveis estáticos e cotas potenciométricas para os poços monitorados

Poço	Altimetria (m)	NE Abril 2009	Cota NE Abril 2009	NE Julho 2009	Cota NE Julho 2009	NE Out 2009	Cota NE Out 2009	NE Abr 2010	Cota NE Abril 2010	NE Jul 2010	Cota NE Julho 2010
P-5	648	2.95	645	3.40	644	4.07	644	3.8	644	4.54	643
P-6	518	0.72	517	3.08	515	3.54	514	1.3	517	--	--
P-17	665	--	--	17.86	647	--	--	--	--	17.39	648

P-18	678	11.95	666	13.07	665	14.05	664	9.96	668	--	--
P-30	613	--	--	0.87	612	--	--	0.49	612	1.82	611
P-35	477	17.20	460	--	--	> 21,5	--	--	--	19.03	458
P-41	642	2.64	639	7.73	634	9.03	633	--	--	5.31	636
P-43	587	8.45	578	--	--	--	--	6.9	580	9.36	577
P-46	497	1.42	496	--	--	4.23	493	--	--	3.63	493
P-49	553	--	--	0.41	553	0.52	553	--	--	0.52	553
P-57	520	5.14	515	6.19	514	--	--	--	--	5.65	515
P-59	514	7.76	506	9.58	504	11.04	503	--	--	8.72	505
P-60	506	2.30	503	3.6	502	4.42	501	2.25	503	2.98	503
P-66	484	3.30	480	--	--	4.18	480	3.1	481	3.33	480
P-73	684	--	--	3.73	680	--	--	3.35	680	6.2	677
P-87	476	1.80	474	3.3	472	4.10	471	1.55	474	2.82	473
P-91	644	4.30	640	4.8	639	--	--	4	640	4.57	640
P-95	658	23.00	635	23.95	634	--	--	--	--	--	--
P-96	552	13.10	539	--	--	--	--	--	--	--	--
P-97	525	8.84	516	--	--	10.34	514	--	--	11.4	513
P-98	663	0.58	662	--	--	--	--	--	--	--	--
P-99	680	20.46	659	--	--	15.00	665	--	--	20.41	659
P-100	669	10.86	658	--	--	11.58	658	10.37	659	11.55	658
P-102	517	7.87	509	9.5	508	--	--	--	--	9.82	507
P-104	581	--	--	12.39	568	12.74	568	--	--	14.29	567
P-105	665	--	--	7.05	658	8.37	656	4.43	660	6.72	658
P-106	648	--	--	18.6	630	--	--	--	--	14.2	634
P-107	504	--	--	7.5	497	> 7,34	--	--	--	7.27	497
P-109	517	--	--	13.75	503	15.20	502	11.36	506	13.27	504
P-111	543	--	--	8	535	--	--	--	--	6.6	537
P-113	635	--	--	6.35	629	5.83	629	--	--	6.29	629
P-114	665	--	--	10.45	654	--	--	--	--	10.6	654
P-115	658	--	--	6.34	652	--	--	--	--	6.19	652

Para os três períodos monitorados, o formato das isopotenciais e as principais direções de fluxo se mantiveram os mesmos, em que pesem as diferenças dos mapas interpolados, relacionadas ao uso de alguns pontos de medição diferentes nos dois momentos. Esse resultado fornece indícios de que o sistema cárstico-fissural apresenta comportamento, do ponto de vista hidráulico geral, semelhante a um meio poroso. Em Marques et al (2011a) e Marques et al (2011b) o nível piezométrico dos poços foi analisado com métodos de séries temporais, incluindo funções de autocorrelação, e correlação cruzada, comparando respostas entre os níveis potenciométricos dos poços e a eventos de precipitação. Essa análise apontou para uma rede de fissuras e dutos mais bem desenvolvida, indicando boa conexão entre os poços na região do poço P41 e área próxima ao Rio

São Francisco, onde existe predomínio de rochas peliticas. No presente estudo, a média do rebaixamento nos poços monitorados no período seco (entre abril e outubro/2009) foi de 2,37 m (Tabela 2). No período chuvoso seguinte (outubro/2009 e abril/2010), a média de recuperação do nível nos poços foi, essencialmente, a mesma (2,54 m).

Tabela 2 – Estatística dos rebaixamentos (-) e recuperação (+) nos poços tubulares monitorados

Período	Jul/2009 - Abr/2009	Out/2009 - Jul/2009	Out/2009 – Abr/2009	Abr/2010 - Out/2009	Jul/2010 - Abr/2010
Mínimo (m)	0.45	-0.52	0.72	-0.27	0.23
Máximo (m)	5.09	1.46	6.39	-4.09	2.85
Média (m)	1.62	0.70	2.37	-2.54	1.41
Desvio padrão (m)	1.28	0.63	1.57	1.37	0.85
Núm. observações	11	13	11	8	11

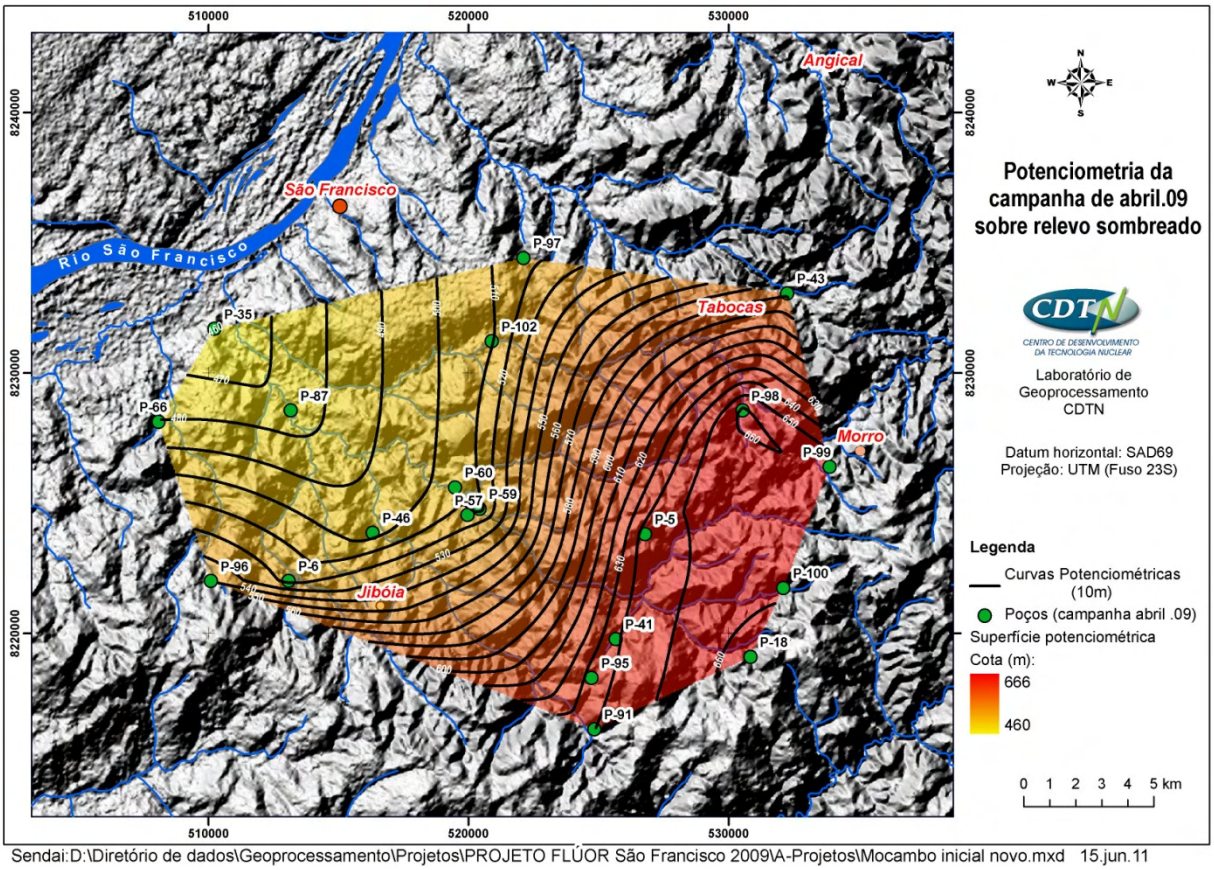

Figura 5 – Mapa potenciométrico dos aquíferos na bacia do riacho Mocambo – abril/2009

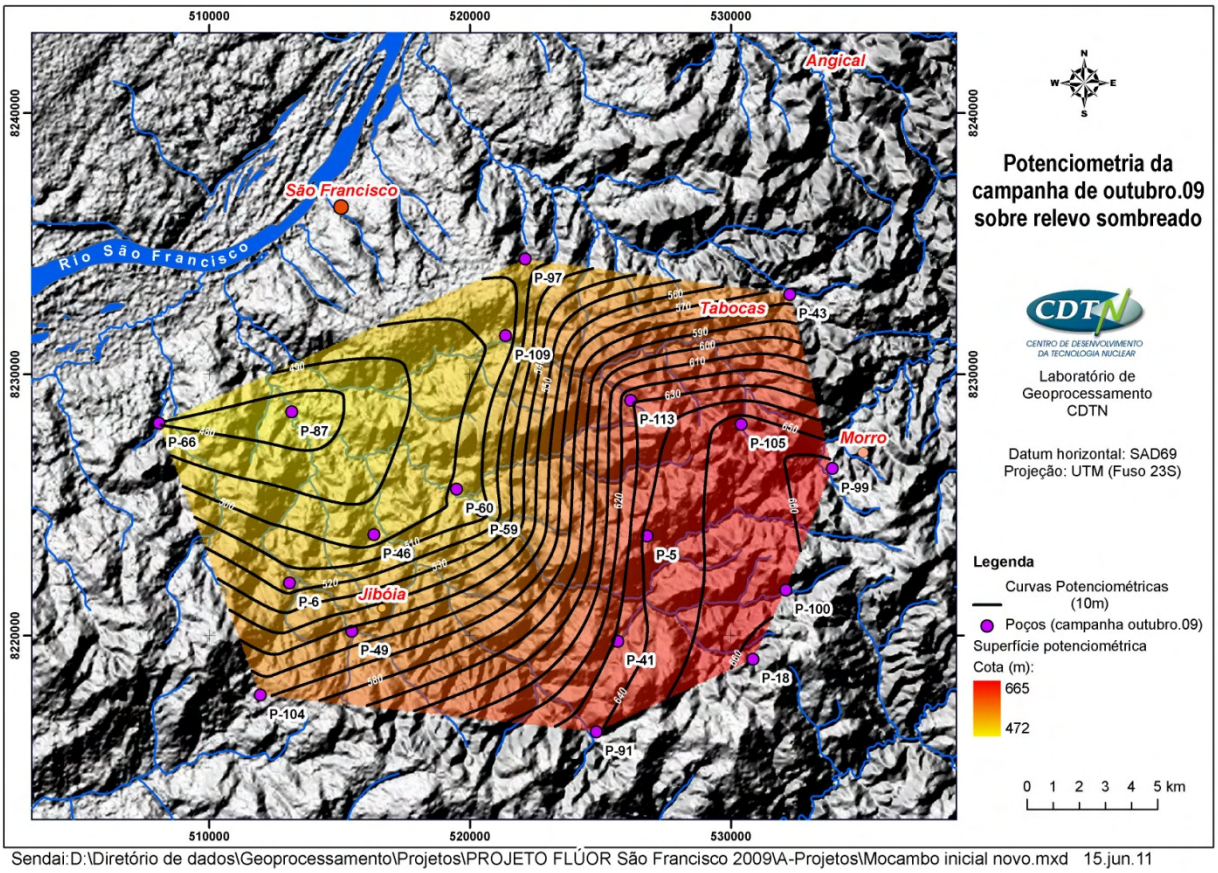

Figura 6 – Mapa potenciométrico dos aquíferos na bacia do riacho Mocambo – outubro/2009

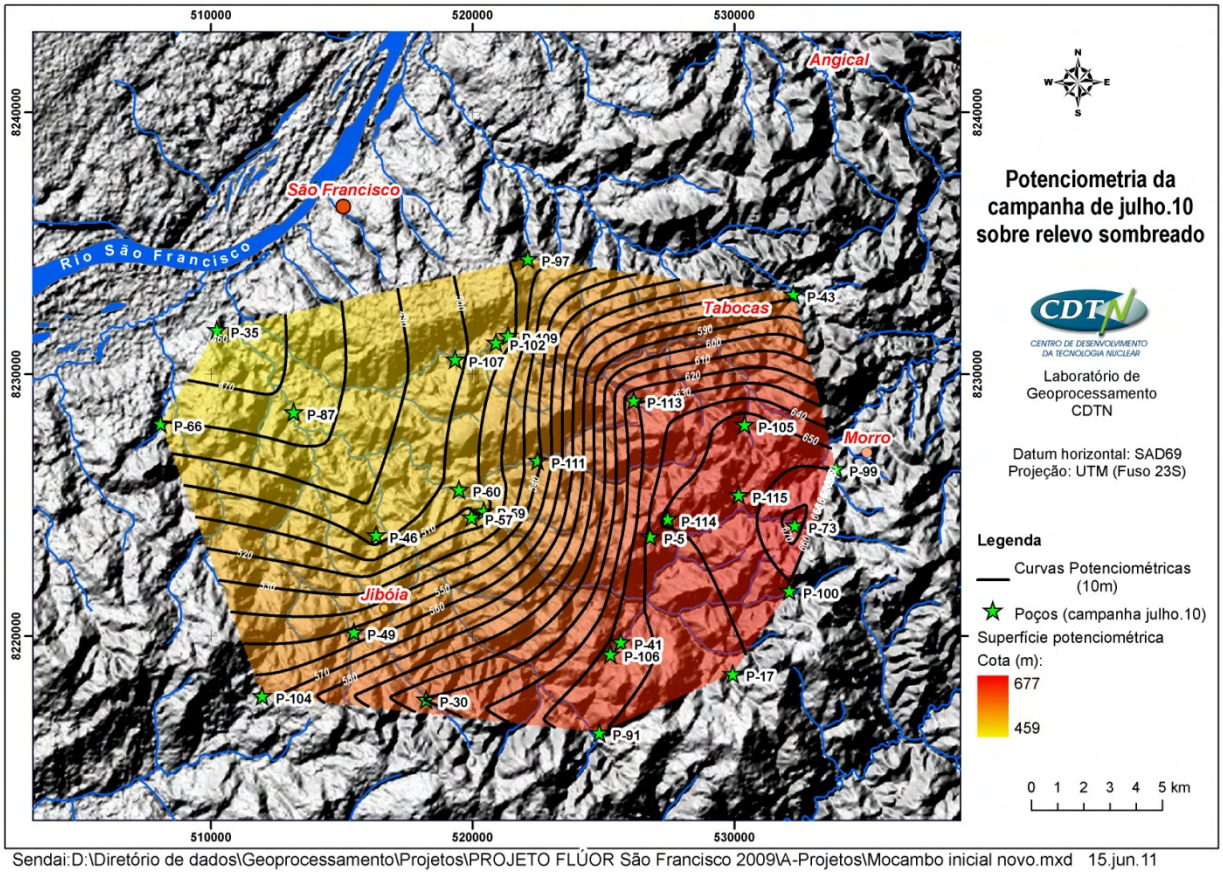

Figura 7 – Mapa potenciométrico dos aquíferos na bacia do riacho Mocambo – julho/2010

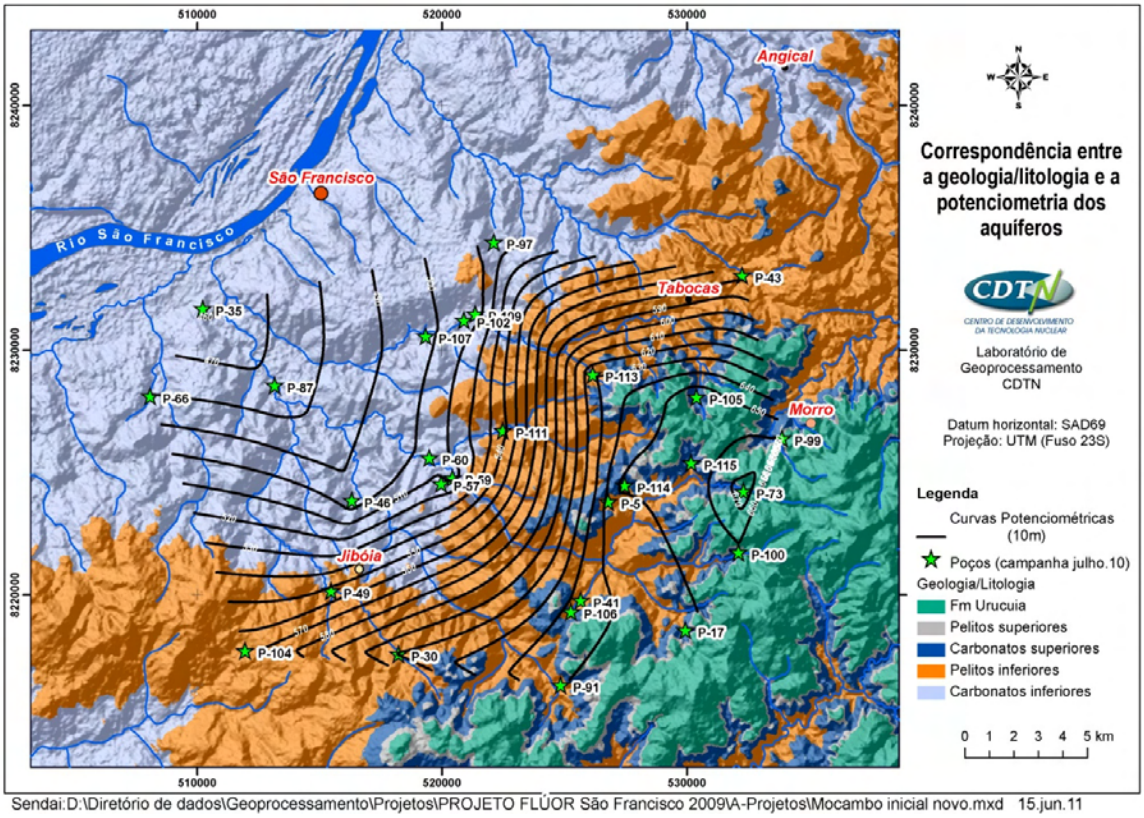

Figura 8 – Correspondência entre a geologia e a potenciometria dos aquíferos na bacia do Riacho Mocambo com dados de julho/2010

CONCLUSÕES

Apesar das diferentes unidades hidroestratigráficas presentes na bacia, os dados apontam para um comportamento geral de níveis potenciométricos acompanhando a topografia de superfície e com drenagem em direção ao Rio São Francisco. Foi possível identificar que as duas áreas de maior condutividade hidráulica correspondem aos dois principais aquíferos carbonáticos presentes nas áreas mais altas e mais baixas. Entre as duas, foi observada uma zona de menor condutividade hidráulica, correspondente à área de pelitos.

Além disso, a pouca variação nesse comportamento entre os períodos seco e chuvoso ao longo dos dois anos analisados, confirmada através de análise estatística dos níveis potenciométricos, aponta para uma possível rede de fraturas e dutos cársticos bem desenvolvida, o que foi corroborado por outros estudos recentes na região. Esse resultado fornece indícios de que o sistema cárstico-fissural apresenta comportamento, do ponto de vista hidráulico geral, semelhante a um meio poroso. Estas informações são fundamentais para o desenvolvimento de um modelo conceitual de escoamento subterrâneo para a bacia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq e da FAPEMIG.

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, F.F. M. DE. (1977). O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, v.7 (4), p.349-364.

DARDENNE, M.A. (1978). Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, 1978, Recife. *Anais*... Recife: SBG, v.2. p. 597-610.

FREIRE, A. P. S.; CASTRO, R. E. L. (2003). Mapeamento geológico na sub-bacia hidrográfica do riacho mocambo com ênfase nas ocorrências de fluorita e sua relação com as anomalias de fluoreto na água subterrânea no Município de São Francisco. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. Relatório do Trabalho Final de Graduação, 94 p.

MARQUES, G.F.; COTA, S.; Braga Jr., P.V.; VELÁSQUEZ, L.M.; RODRIGUES, P.; DE PAULA, R.S. (2011a) "Hydrodynamic Characterization of a Karst Aquifer in the Brazilian semi-

arid Region with Time Series Analysis of Hydrology Data". In: 2011 World Environmental & Water Resources Congress: Bearing knowledge for sustainability. Palm Springs.

OLIVEIRA, F.M.; MARQUES, G.F.; VELASQUEZ, L.N.M. (2007). Estudo do planejamento de fontes de produção de água subterrânea em área com alta incidência de flúor natural. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo.

PATRUS, M.L.R.A; SANTOS, A.C.S DOS; FIGUEIREDO, V.L.S.; MATOS, A.R. , MENEZES, I.C.R. (2001) "Parcela mineira da bacia do rio São Francisco: caracterização hidroclimática e avaliação dos recursos hídricos de superfície". In: PINTO, C.P e NETO, M.A.M. (Ed). Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. Belo Horizonte: SBG-MG. p. 285-326.

RADAMBRASIL (1982). *DNPM*. Folha SD.23, Brasília. Rio de Janeiro, 660 p.

INPE, Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (2011). Disponível em: http://www.dsr.inpe.br/topodata. Acesso em: 12 set. 2011.

VELÁSQUEZ, L.N.M.; FANTINEL, L.M.; COSTA, W.D.; UHLEIN, A.; FERREIRA, E.F.E.; CASTILHO, L.S.; PAIXÃO, H.H. (2003). Origem do Flúor na Água Subterrânea e sua relação com os casos de fluorose dental no município de São Francisco, Minas Gerais. Belo Horizonte: Fapemig (Relatório CRA 294/99), 138p.

VELÁSQUEZ, L. N. M., FANTINEL, L. M., UHLEIN, A., ARANHA, P. R. A., QUÉMENÉUR , J.J., VARGAS, A. M. D., FERREIRA, E. F. E.,CASTILHO, L. S., MARQUES, G.F., MINARDI, P.S., RODRIGUES, P.S.H., GONÇALVES, S.L., FARIA, C.F., FERNANDES, J.M.S. (2007a) "Estudo da tipologia das ocorrências de fluorita que ocasionam anomalias nos níveis de fluoreto da água subterrânea, e a sua relação com os casos de fluorose dental no município de São Francisco, Minas Gerais". Relatório Final, Processo FAPEMIG: CRA- 1110/03.

VELÁSQUEZ, L. N. M., FANTINEL, L. M., UHLEIN, A., ARANHA, P. R. A., VARGAS, A. M. D., FERREIRA, E. F. E., CASTILHO, L. S. (2007b) "Investigação hidrogeológica do Flúor em aquíferos carbonáticos do médio São Francisco, MG, e epidemiologia da fluorose dentária associada". Relatório Final, Processo 503.146/2003-0 MCT/CNPq/CTHidro 01/2003. 139p.