

# CONTROLE ESTRUTURAL DO FLUORETO NO AQUÍFERO CÁRSTICO DO MUNICÍPIO DE SÃO FRANCISCO – MG

Leila Nunes Menegasse Velásques<sup>1</sup>; Walter Duarte Costa<sup>2</sup>; Lúcia Maria Fantinel<sup>3</sup>;  
Alexandre Uhlein<sup>4</sup>; Efigênia Ferreira e Ferreira<sup>5</sup> & Lia Silva de Castilho<sup>6</sup>

**Resumo** - O consumo de água subterrânea com excesso de fluoreto tem provocado fluorose dental em grande parte da população infantil no vale do Rio São Francisco. A fluorose dental ataca o esmalte do dente, podendo gerar deformidades anatômicas dos dentes e até mesmo a sua perda total. A pesquisa realizada no município de São Francisco revelou ser a fluorita disseminada no Calcário Bambuí o mineral responsável pela liberação do fluoreto para as águas subterrâneas. Constatou-se uma grande influência das estruturas geológicas no teor de fluoreto encontrado nessas águas, pois a dissolução desse elemento químico é proporcional à dificuldade de renovação dessas águas em profundidade. No aquífero cárstico-fissural, o fluxo das águas infiltradas é facilitado ao longo das fraturas abertas, ocorrendo o inverso com aquelas fechadas. Assim, as fraturas distensivas propiciam maior vazão aos poços que as interceptam, com menores teores de fluoreto dissolvido, ao passo que as fraturas compressivas, como as de cisalhamento, propiciam baixas vazões aos poços que as interceptam e mais elevado teor de fluxo a essas águas. O modelo estrutural definido nessa pesquisa permitiu definir quais as direções estruturais mais aconselháveis para serem exploradas nas futuras captações de água subterrânea através de poços tubulares.

**Abstract** - The ground water's consumption with excess of fluoride has provoked dental fluorosis in a great part of the infant population in São Francisco River's Vale. Dental fluorosis attacks the tooth's enamel and can generate anatomics deformities or the total lost of them. The survey realized in São Francisco town showed that the fluorite disseminated in the Bambuí Limestone is the responsible for the fluoride's liberation to ground waters. The survey also showed that the fluoride's tenor found in these waters has great geologic structures influence, because this chemical

---

<sup>1</sup> Prof<sup>a</sup> DEGEOL-IGC/UFMG Av. Antônio Carlos, 6627-Campus Pampulha. 31270-901, BH-MG. Tel.(31) 9123 4393–[menegase@lcc.ufmg.br](mailto:menegase@lcc.ufmg.br)

<sup>2</sup> Prof. DEGEOL-IGC/UFMG –Tel. (31) 3287.5232 – Rua do Ouro, 780/102 – Serra-BH - [walter.costa@terra.com.br](mailto:walter.costa@terra.com.br)

<sup>3</sup> Prof<sup>a</sup> DEGEOL-IGC/UFMG. Tel.(31) 34995446 – [lfantinel@uol.com.br](mailto:lfantinel@uol.com.br)

<sup>4</sup> Prof. DEGEOL-IGC/UFMG – Tel. (31) 34995444 – [uhlein@lcc.ufmg.br](mailto:uhlein@lcc.ufmg.br)

<sup>5</sup> Prof<sup>a</sup> DOSP-FO/UFMG. Tel. (31) 34992457 – [efigenia@net.em.com.br](mailto:efigenia@net.em.com.br) - Av. Antônio Carlos, 6627- Campus Pampulha.31270-901, BH-MG.

<sup>6</sup> Prof<sup>a</sup> ODR-FO/ Tel.(31) 88068758 – [liacastilho@ig.com.br](mailto:liacastilho@ig.com.br)

element's dissolution is proportional to the difficulty of these water's renovation in profundity. In the fissural-carstic aquifers, the infiltrated waters' flux is facilitated along the opened fractures, while the opposite occurs with the closed ones. So, the distensile fractures propitiate a higher discharges to the wells that intercept them, with smaller fluorides' tenors dissolved, while the compression fractures, like these of shear, propitiate low discharges to the wells that intercept them and higher fluoride tenor to these waters. The structural model defined in this survey maid possible to define which structural directions are the most admissible to be explored in the futures ground waters' capitations through the tubular wells.

**Palavras-Chave** - controle estrutural; contaminação ; fluoreto.

## **INTRODUÇÃO**

O município de São Francisco está localizado em uma região carente do Estado de Minas Gerais, de limitada disponibilidade em mananciais superficiais de água e que se caracteriza pela ausência de planejamento integrado de seus recursos hídricos, compondo um quadro sócio-econômico com expressivos índices de pobreza e comprometimento da qualidade da saúde da população, o que contribui para a ocorrência de doenças de veiculação hídrica.

Uma das endemias que vem sendo verificada na região é a fluorose dentária (ou fluorose dental), diagnosticada em 1995 pela FUNASA e por odontólogos do município. A fluorose dentária é uma anomalia do desenvolvimento dos dentes que está ligada a deformações do esmalte e ocorre em conseqüência da ingestão prolongada de flúor em quantidades excessivas na faixa etária em que o esmalte está em formação, ou seja, do nascimento da criança até os cinco anos. Trata-se de doença caracterizada pelo aumento da porosidade do esmalte, fazendo com que este adquira aspecto opaco e manchado de branco a vários tons de marrom, até preto. Clinicamente, as características variam de finas linhas brancas cruzando o dente em forma de traço a até várias formas de erosão. A perda da substância do esmalte pode gerar deformidades anatômicas dos dentes, levando, em alguns casos, à perda dos mesmos.

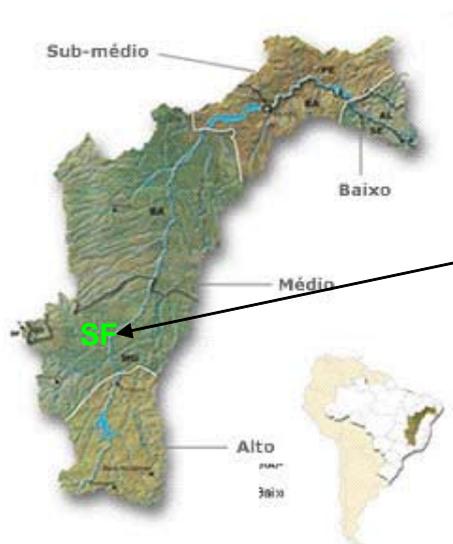
A fluorose dentária atinge parte da população de São Francisco, principalmente crianças e jovens residentes na zona rural e, uma vez instalada a doença, é de caráter permanente, restando apenas tratamento corretivo e de restauração dos dentes afetados. Esse tratamento consiste em lixar o esmalte poroso externo até que seja removida a mancha provocada pela impregnação do esmalte poroso por pigmentos da alimentação. Em casos mais graves, torna-se necessário implantar coroas ou facetas dentárias.

O flúor é um elemento químico essencial para a resistência dos dentes e dos ossos. Entretanto, a ingestão deste elemento em excesso tem provocado sérios problemas de fluorose dentária (e fluorose óssea) a populações em diversas partes do mundo, como na Índia, Kenya e África do Sul. No Brasil, poucos são os estudos que abordam o assunto, embora casos dessas doenças também existam.

Na sede do município, o abastecimento de água é realizado por meio de mananciais superficiais, principalmente pela captação e tratamento de água do rio São Francisco e, secundariamente, por água subterrânea (poços tubulares). Na área rural, o abastecimento é realizado principalmente por meio de poços tubulares. No poço de abastecimento público do distrito de Mocambo foi encontrado pela FUNASA, em 1995, um elevado teor de fluoreto na água (3,2 mg/L) – 4,6 vezes superior ao limite ótimo recomendado para a região, que é de 0,7 mg/L. Em São Francisco, a fluorose dentária foi inicialmente diagnosticada neste distrito, afetando duzentos e setenta pessoas, número indiscutivelmente alarmante quando comparado à pequena população local.

## LOCALIZAÇÃO E DADOS GERAIS DA ÁREA

O município de São Francisco está localizado na macrorregião Norte de Minas Gerais, na média bacia hidrográfica do rio São Francisco (Figuras 1a, 1b). Seu território de 3.298,44 km<sup>2</sup> está compreendido entre as coordenadas 45°15' e 44°25' de longitude Oeste de Greenwich e 15°33' e 16°10' de latitude Sul, com o marco da cidade-sede em 44°51'36" e 15°56'24".



**FIGURA 1a.** - Localização do município de São Francisco na bacia hidrográfica do rio São Francisco.

<http://www.cbhsaofrancisco.org.br/>



**FIGURA 1b.** - Localização do município de São Francisco no Estado de Minas Gerais.

FONTE: IGA (Instituto de Geociência Aplicada) em 10/05/1999 disponível em:

<http://www.almg.gov.br/munmg/m61106.asp>

Há no município importantes mananciais de água subterrânea, muitas vezes, os únicos disponíveis durante todo o ano, já que a maioria dos cursos d'água é de caráter intermitente, não sendo raros os rios de leito seco. Em conjunto com os mananciais superficiais, as águas subterrâneas podem servir ao abastecimento público, animal, agropecuário e industrial. Faz-se necessário, contudo, conhecer a qualidade dessas águas e estabelecer um programa integrado de gestão de recursos hídricos.

A partir do final da década de 1970 foram executados vários poços tubulares principalmente pela Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco (CODEVASF) na tentativa de resolver o grave problema de água na região. De maneira geral, os poços começaram a funcionar no ano de 1980, mas, na década seguinte, os odontólogos começaram a perceber o manchamento escuro nos dentes de crianças do distrito de Mocambo. Análises da água de abastecimento do distrito, realizadas pela FUNASA em 1995, viriam confirmar os teores elevados de fluoreto e alertar órgãos públicos sobre a ocorrência de fluorose dentária na região.

## **SÍNTESE GEOLÓGICA DA REGIÃO**

Em termos geológicos, o município de São Francisco está inserido no compartimento central da Bacia do São Francisco, na área 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 brasileiras Araçuaí, Alto Rio Grande, Brasília, Rio Preto, Sergipana e Riacho do Pontal.

O arcabouço geológico desse município é constituído, da base para o topo, pelas seguintes unidades:

- Seqüência carbonática e pelítica neoproterozóica do Grupo Bambuí
- Arenitos, folhelhos e siltitos cretácicos do Grupo Areado
- Arenitos cretácicos do Grupo Urucuia
- Sedimentos elúvio-coluvioranes cenozóicos, provavelmente tércio-quaternários
- Sedimentos aluvionares quaternários

O mapeamento geológico regional foi realizado na escala 1:250.000 em toda a porção do município situada na margem direita do rio São Francisco, totalizando 1831 km<sup>2</sup> (Figura 2). Esta é a principal área de exposição das unidades do Grupo Bambuí no município. As seqüências carbonáticas e pelíticas ocorrem também na área a norte do rio São Francisco, mas, neste caso, estão amplamente recobertas por rochas cretácicas e por sedimentos cenozóicos.

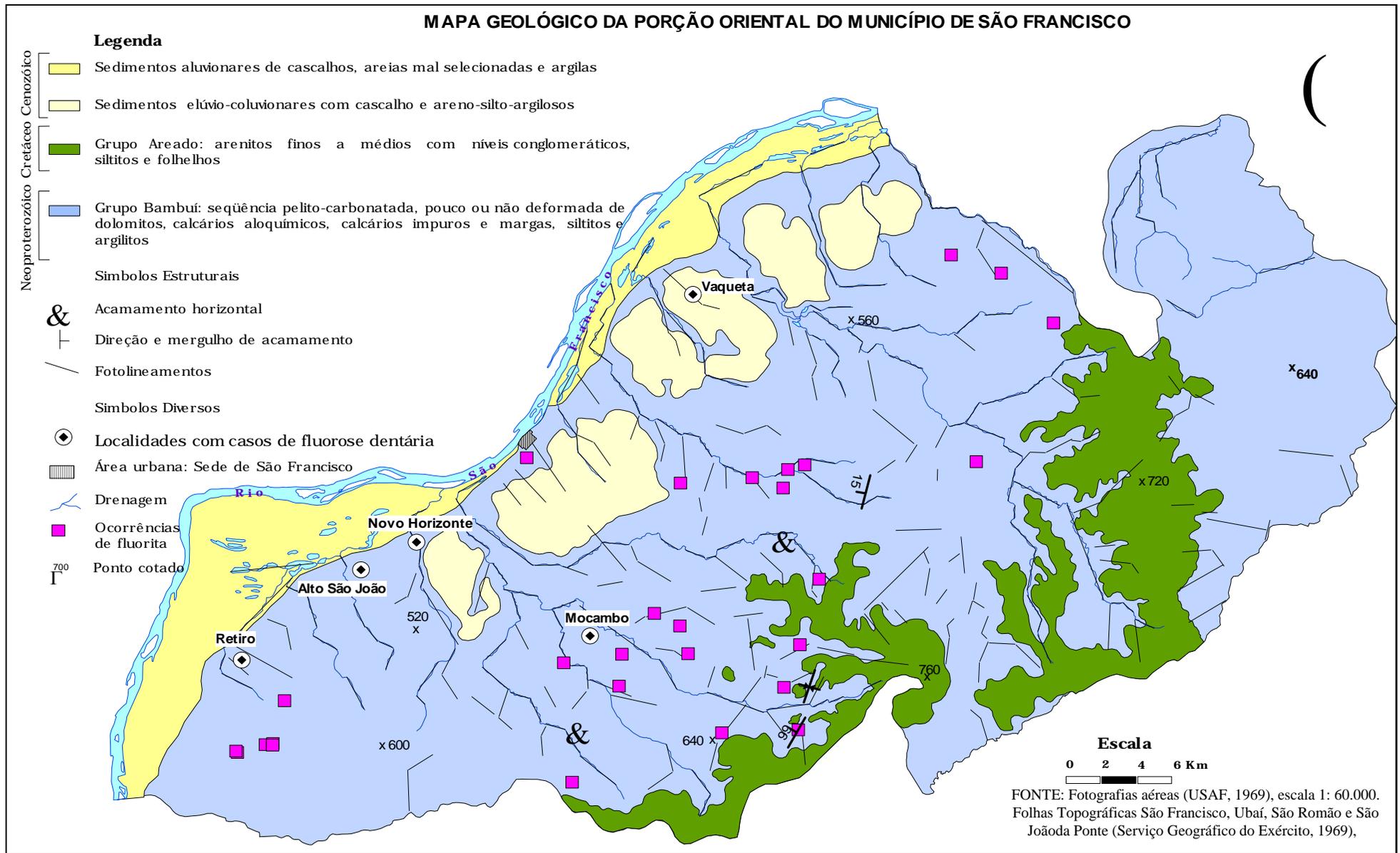
Na área mapeada, principalmente em seu limite sul, as unidades cretácicas ocorrem como morros testemunhos e elevações tabulares de arenitos e pelitos do Grupo Areado. No setor setentrional do município, as rochas deste grupo ocorrem sotopostas a arenitos do Grupo Urucuia.

Os sedimentos cenozóicos têm ampla distribuição no território como coberturas esparsas das unidades anteriores e como extensos depósitos aluviais associados aos principais cursos d'água.

Na área mapeada – território municipal da margem direita do rio São Francisco – são reconhecidos conjuntos de rochas sedimentares a anquimetamórficas terrígenas/químicas neoproterozóicas do Grupo Bambuí; rochas sedimentares terrígenas psamíticas e pelíticas cretácicas do Grupo Areado, além de sedimentos terrígenos cenozóicos, perfazendo, da base para o topo, a seguinte coluna:

- Seqüência carbonática e pelítica neoproterozóica, não metamórfica, ou com metamorfismo incipiente, constituída por dolomitos, calcários aloquímicos, calcários impuros e margas, metapelitos, siltitos e argilitos do Grupo Bambuí, em camadas e lentes predominantemente horizontais a subhorizontais, pouco ou não deformadas;
- Arenitos, siltitos e folhelhos cretácicos do Grupo Areado em camadas horizontais sobrepostas em discordância às rochas metassedimentares do Grupo Bambuí;
- Sedimentos detríticos elúvio-coluvionares arenosos com cascalho e areno-silto-argilosos, localmente laterizados, formando cunhas e camadas sobrepostas às unidades anteriores ou como rampas de baixa declividade que se interdigitam, nas cotas mais baixas, com os depósitos aluvionares;

Sedimentos detríticos aluvionares quaternários representados por camadas e lentes de cascalhos, areias mal selecionadas e argilas que ocorrem como depósitos de preenchimento de canal fluvial e de planície de inundação associados aos principais sistemas de drenagem da área.



**Figura 2 - Mapa Geológico da Área Pesquisada**

## **GEOLOGIA ESTRUTURAL**

Graças à sua localização intra-cratônica, a área de estudos foi pouco afetada pelos eventos tectônicos brasileiros, sendo caracterizada por camadas horizontais a sub-horizontais. Observa-se amplamente, entretanto, um intenso fraturamento, tanto nos sedimentos calcários como nos pelíticos.

Uma maior ênfase foi dada às estruturas rúpteis (fraturas) tendo em consideração o fato dessas regerem as características da circulação das águas subterrâneas em aquíferos cárstico-fissurais, presentes em toda a extensão da área de estudo.

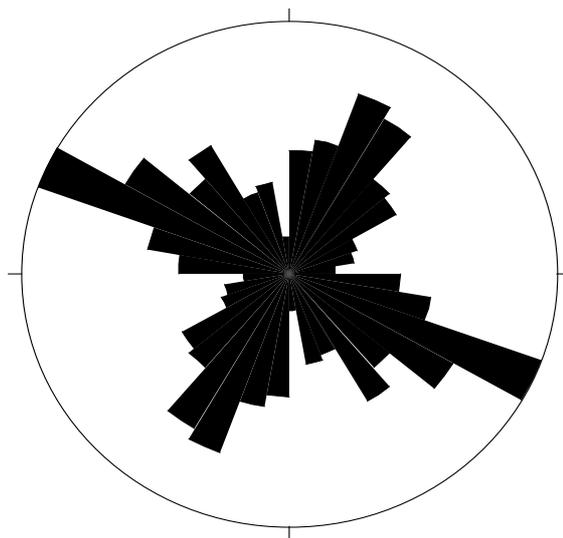
Foram constatadas, através dos diagramas de roseta de fraturas, três nos calcários, máximos em N60°-70°W (Figura 3), e quatro sistemas nos pelitos, com máximos em N70°-90°W (figura 4). Esses sistemas podem ser considerados correspondentes, uma vez que as rochas apresentam competências bastante diferentes ocorrendo refrações das tensões e nas deformações. Os demais sistemas encontrados nos pelitos foram N0°-30°E, N50°-70°E e N30°-50°W, e nos calcários os sistemas: N20°-40°E e N30°-40°W.

Os fotolineamentos, que refletem as estruturas rúpteis em superfície, apresentam um elevado grau de dispersão, porém é nítida a existência de quatro direções principais N0°-10°E, N40°-60°E, N80°-90°W e N30°-50°W. (Figura 5)

O diagrama de roseta para os condutos de dissolução cárstica, os quais são condicionados pelos sistemas de fraturas, mostra também a existência de quatro direções principais (Figura 6): N10°-30°E, N60°-70°, N60°-90°W e N30°-50°W. As cavernas e grutas possuem maior desenvolvimento aproximadamente nas direções NS, EW e N40°-50°W, coerentes, portanto, com as direções dos condutos medidas em superfície.

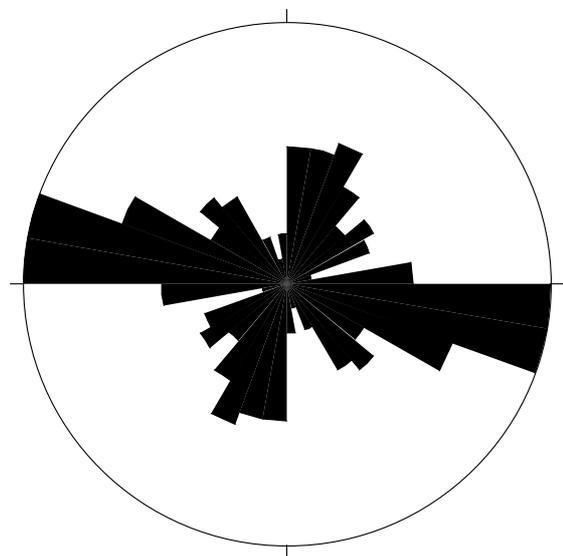
É notável a correspondência dessas direções entre as três feições avaliadas (fraturas, fotolineamentos e condutos). No conjunto, as direções de maior correspondência entre as feições são: N10°-40°E, N70°-90°W e N30°-50°W (Tabela 1).

As fraturas nos pelitos são mais numerosas porém mais fechadas do que nos calcários, daí apresentarem uma maior correspondência com os fotolineamentos. Tal fato decorre da maior resistência à ruptura oferecida pelos calcários em relação aos pelitos.



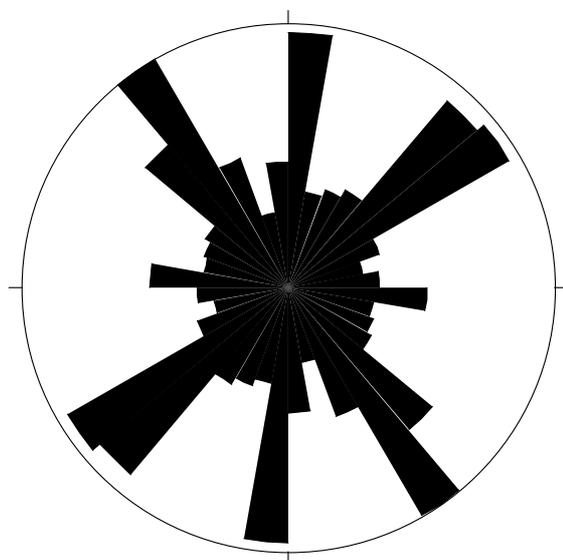
Número de medidas = 357  
 Pétala mais larga: 41 valores, 11%  
 de todos os valores.  
 Classes de 10°

**FIGURA 3** – Diagrama de roseta, mostrando as direções de fratura nos calcários



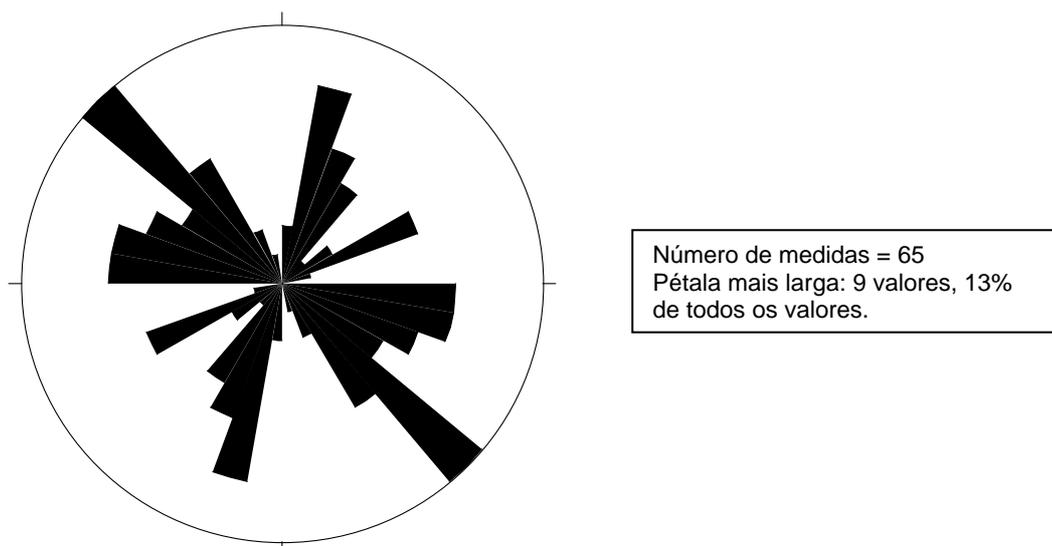
Número de medidas = 166  
 Pétala mais larga: 21 valores, 12%  
 de todos os valores.  
 Classes de 10°

**FIGURA 4** – Diagrama de roseta, mostrando as direções de fratura nos pelitos



Número de medidas = 2515  
 Pétala mais larga: 263 valores, 10%  
 de todos os valores.  
 Classes de 10°

**FIGURA 5** – Diagrama de rosetas das direções dos fotolineamentos



**FIGURA 6** – Diagrama das direções Preferenciais dos condutos nos calcários

**Tabela 1** - Direções de fraturas, condutos e fotolineamentos a partir dos diagramas de roseta

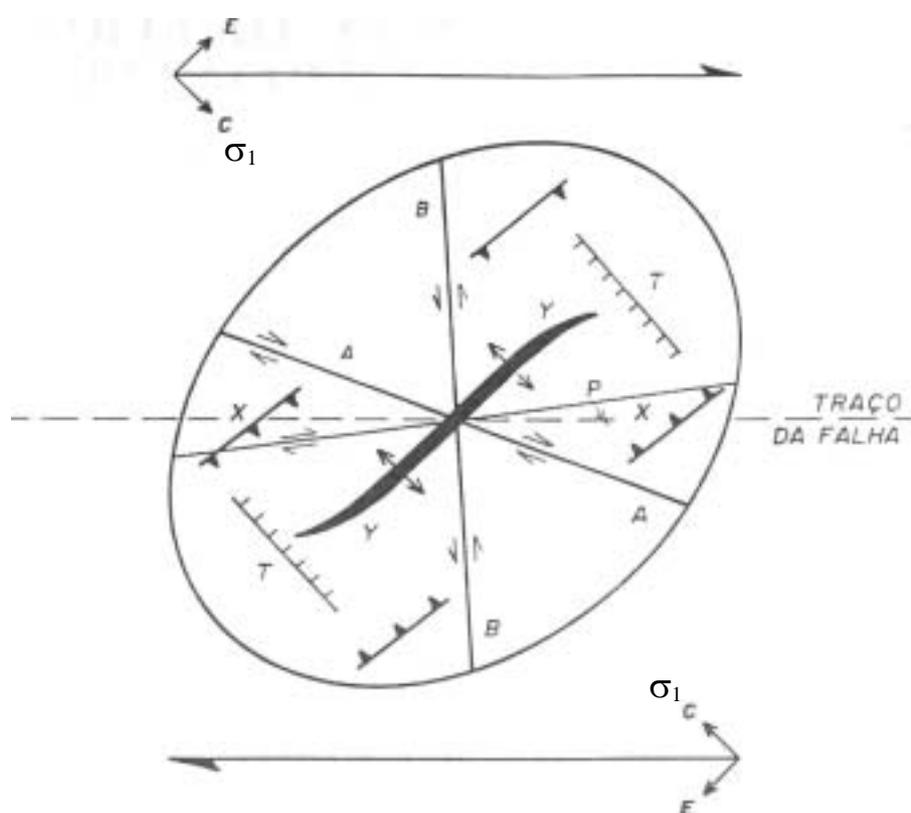
FAMÍLIAS DE FRATURAS NO CALCÁRIO	FAMÍLIAS DE FRATURAS NOS PELITOS	CONDUTOS DE DISSOLUÇÃO CÁRSTICA	FOTOLINEAMENTOS
N20° - 40°E	N0° - 30°E	N10° - 30°E	N0° - 10°E
-	-	-	N40° - 60°E
-	N50° - 70°E	N60° - 70°E	-
N60° - 70°W	-	-	-
-	N70° - 90°W	N60° - 90°W	N80° - 90°W
N30° - 40°W	N30° - 50°W	N30° - 50°W	N30° - 50°W

Os dobramentos existentes são pouco expressivos, de pequenas amplitude e comprimento de onda (decimétricos a métricos), apresentando eixos horizontais de direção NE-SW ou com mergulhos baixos, às vezes para NE, às vezes para SW. Outro aspecto importante é a presença de veios de calcita branca recristalizada, preenchendo fraturas de extensão, sub-paralelas ao acamamento ou cortando-o geralmente em baixos ângulos. Geralmente, as feições de dobramento, estrias e veios, ocorrem associadas, indicando sua presença nas zonas de maior deformação. A fluorita também é mais freqüente nestas zonas.

### O modelo de deformação

A partir das observações das estruturas rúpteis em campo, das direções de maior desenvolvimento da dissolução cárstica e dos resultados estatísticos nos diagramas de roseta, foi possível a proposição de um modelo de deformação adaptado para a área.

O modelo proposto é o do estado de tensões compressivas, no qual há a geração de cinco tipos de falhas/fraturas e um de dobra representados na Figura 7. De acordo com este modelo as dobras são as primeiras estruturas a se formar e seus eixos são perpendiculares à direção de tensão  $\sigma_1$ . Paralelamente à  $\sigma_1$  são formadas falhas normais, se houver um componente de divergência  $\sigma_3$ , que correspondem às estruturas mais abertas dentre todas as geradas (fraturas de distensão). Sistemas de falhas ou fraturas conjugadas (sintéticas e antitéticas) se desenvolvem formando ângulos de aproximadamente  $60^\circ$  entre si, porém este ângulo dependerá do ângulo de atrito das rochas envolvidas. Estruturas compressionais, como falhas reversas e falhas de empurrão podem se desenvolver perpendicularmente à direção de  $\sigma_1$



**FIGURA 7** - Modelo de deformação e direções das principais estruturas associadas (modificado de ZALÁN, 1990).

**Par conjugado de falhas transcorrentes:**

- A - Falha Sintética
- B - Falha Antitética
- P - Fraturas-P ou Falhas Transcorrentes Sintéticas secundárias

## Estruturas Distensionais

T - Falhas normais, diáclises, diques

## Estruturas Compressionais

X - Falhas reversas, de empurrão

Y - Dobras, diápiros

C - Vetor de compressão derivado do cisalhamento

E - Vetor de distensão derivado do cisalhamento

Comparando-se as direções de geração das estruturas rúpteis do modelo às direções encontradas na área de estudos, propõe-se um vetor de tensão  $\sigma_1$  horizontal, compressivo, de direção ESE-WNW, resultante da compressão nas faixas marginais do Cráton do São Francisco. De acordo com o modelo, paralelamente a  $\sigma_1$  seriam geradas falhas normais e fraturas mais abertas (distensivas). De fato, o sistema de fraturas N70°-90°W (90°-110°), além de ser o mais expressivo nos pelitos (Figura 4), corresponde também, de acordo com as observações em campo, a uma das principais direções de desenvolvimento da carstificação nos calcários.

O par conjugado de falhas de cisalhamento e fraturas associadas na área corresponde aos sistemas N60°-70°E (sintéticas ou dextrais) e N30°-50°W (antitéticas ou sinistrais). Abaixo do limite sul da área de estudos, ocorrem vários lineamentos extensos e bastante expressivos de direção N55°E, coincidente com a direção regional de orientação do rio São Francisco. Tais lineamentos, de acordo com o modelo proposto para a área, constituiriam falhas representativas ou do sistema de falhas de cisalhamento sintéticas secundárias (P), ou ao sistema de falhas transcorrentes (Figura 7).

Os fraturamentos de direção N0°-30°E correspondem a estruturas de alívio, geradas após cessar a compressão.

A partir das feições estruturais descritas acima, propõe-se a ocorrência de um evento tectônico compressivo de baixa intensidade marcada por duas fases, sendo uma no domínio rúptil-dúctil seguida de outra no domínio rúptil (Tabela 2). O evento seria de idade Brasiliana e teria ocorrido sob influência da compressão nas faixas marginais ao Cráton do São Francisco (Faixa Araçuaí e Faixa Brasília), onde se insere a área de estudos.

A primeira fase teria caráter compressivo no domínio rúptil-dúctil, caracterizada por dobramentos localizados e zonas de cisalhamento rúpteis de baixo ângulo (sub-paralelas ao acamamento) às quais se associam *tension gashes* e vênulas de calcita branca. Acredita-se que nesta fase tenham ocorrido as remobilizações de fluorita nos calcários. As direções NE-SW dos eixos das dobras de baixo ângulo constituem os melhores indicadores dessa fase, cuja compressão se deu na direção SE-NW.

Na segunda fase, marcada pela tensão compressiva no domínio rúptil, e cujo vetor de maior tensão  $\sigma_1$  é horizontal e de direção N70°-90°W, ocorreram os fraturamentos verticais e subverticais de orientação nessa mesma orientação (fraturas de distensão) e os de cisalhamento dextrais, sinistrais e dextrais secundárias.

Cessada a compressão, dá-se início a uma fase epirogenética, descompressiva, ocorrendo, assim, os fraturamentos de alívio verticais e subverticais de direção N0°-30°E. A erosão da seqüência sedimentar teria também provocado um efeito descompressivo sobre o pacote sedimentar, gerando as fraturas sub-horizontais e abrindo as demais sub-verticais anteriormente geradas.

**Tabela 2-** Resumo hipotético para os eventos e fases de deformação na área.

<b>Evento Brasileiro (Orogênes)</b>	1ª fase (rúptil-dúctil)	- Dobras localizadas, com eixos NE-SW e vergência indefinida - Zonas de cisalhamento rúpteis de baixo ângulo - <i>Tension gashes</i> e vênulas de calcita branca
	2ª Fase (rúptil)	- Fraturas de distensão verticais e sub-verticais (N70°-90°W) e de cisalhamento (N60°-70°E, N30°-50°W)
<b>Epirogênes</b>	3ª Fase (rúptil)	- Fraturas de descompressão verticais e sub-verticais de direção N0°-30°E e geração de fraturas sub-horizontais

## HIDROGEOLOGIA

O estudo hidrogeológico dessa região baseou-se nos dados dos poços cadastrados no município de São Francisco.

Do total de 143 pontos d'água cadastrados e que continham dados úteis, 136 correspondem a poços tubulares e os 7 restantes são nascentes (2), cisternas (4) e represa (1). As vazões desses poços são extremamente variáveis, desde poucos m<sup>3</sup>/h até alcançar 260 m<sup>3</sup>/h, refletindo o elevado grau de anisotropia do aquífero mais explorado e a necessidade de conhecimento geológico para obtenção de sucesso na produção dos poços.

### Caracterização dos aquíferos

A elaboração de um modelo físico dos aquíferos é extremamente importante para o entendimento das formas de recarga, da circulação da água subterrânea e das relações hidráulicas entre os compartimentos hidrogeológicos.

Nesse modelo, foi possível caracterizar as alternâncias de rochas carbonáticas e pelíticas do Grupo Bambuí, bem como os sedimentos arenosos das coberturas e Grupo Areado, tendo sido

definidos dois sistemas hidrogeológicos hidráulicamente conectados: o inferior, Sistema Cárstico-fissural, sobreposto pelo Sistema Granular.

O sistema *aquífero cárstico-fissural* é constituído pela seqüência de unidades de rochas carbonáticas e pelíticas pertencentes ao Grupo Bambuí, ocupando cerca de 75% da área estudada. As camadas pelíticas e carbonáticas dispõem-se sub-horizontalmente. A espessura estimada do Grupo Bambuí na sub-bacia de Mocambo a partir do nível de base (rio São Francisco) até o topo, é de aproximadamente de 170 metros. Essa espessura pode ser considerada representativa de toda a área estudada, considerando-se a disposição sub-horizontal dos estratos.

As unidades carbonáticas são caracterizadas por zonas que sofreram um intenso processo de carstificação e fraturamento, resultando em aquíferos de elevado potencial hídrico devido à alta permeabilidade e capacidade de armazenamento. A carstificação caracteriza-se pelo processo da dissolução química da rocha carbonática pela ação da água ao longo das discontinuidades tectônicas e sedimentares das rochas.

Por sua vez, as unidades pelíticas possuem fraturamentos intensos, porém mais “fechados”, resultando em baixas permeabilidades. Funcionam, assim, como aquíferos e, dependendo do grau de fraturamento, chegam a constituir aquíferos pobres. As fraturas dos metapelitos são importantes, portanto, por constituírem o meio de conexão hidráulica para alimentação dos aquíferos carbonáticos subjacentes.

No domínio hidrogeológico cárstico-fissural as melhores possibilidades de armazenamento das águas subterrâneas estão condicionadas às zonas de maior incidência de fraturamentos nas unidades carbonáticas e pelíticas e/ou de feições de dissolução cárstica mais acentuadas nas unidades carbonáticas.

Como já enfatizado anteriormente, os estratos de calcário desse sistema aquífero dispõem-se sub-horizontalmente, entretanto, a presença dos fraturamentos subverticais e subhorizontais contribui significativamente para o desenvolvimento dos fenômenos de carstificação. Em alguns poucos locais onde foram identificados dobramentos, observou-se uma maior carstificação condicionada ao eixo das dobras. Este sistema aquífero é o principal alvo deste estudo, visto que constitui na mais importante fonte de abastecimento de água para a população vitimada pela endemia de fluorose dentária constatada.

O sistema *aquífero granular* é representado pelas seguintes unidades: sedimentos pertencentes ao Grupo Areado, sobreposto ao Sistema aquífero cárstico-fissural, porém recoberto pelas Coberturas Tercio-Quaternárias e Aluviões/Coluviões recentes. As áreas que margeiam o rio São Francisco correspondem aos principais depositários das aluviões na região. Ocupam 25% da área estudada e constituem-se de sedimentos arenosos de granulometria areia fina a média (Grupo Areado), sedimentos siltico-argilosos e arenosos, mal selecionados e inconsolidados (Coberturas Tercio-

Quaternárias) e sedimentos distribuídos ao longo das calhas de drenagens e planícies de inundação de rios, sendo constituídos de areia, cascalho, silte e argilas (Aluviões/Coluviões recentes).

Em geral, o domínio cárstico-fissural é livre, com profundidade do nível de água de 14m em média. Entretanto, dependendo das condições hidrodinâmicas (volumes de água e permeabilidade no meio cárstico) os pelitos funcionam localmente como aquícludes engendrando condições de artesianismo dos aquíferos cársticos, como tipificado nas fazendas Tabocal de Baixo e Mangai.

A recarga nos *aquíferos cársticos* pode se dar de quatro formas: i) através dos arenitos do Grupo Areado, sotoposto ao Grupo Bambuí (porções leste e sudeste) e das coberturas Tércio-Quaternárias; ii) por drenança através das unidades pelíticas; iii) diretamente pela infiltração nas áreas de afloramento dos calcários e iv) localmente a partir da infiltração pluviométrica através das dolinas e sumidouros. Por sua vez, a recarga do *sistema granular* ocorre pela precipitação direta nos arenitos da Fm. Areado, nas coberturas tércio-Quaternárias e nas aluviões.

Após o processo de recarga, a circulação da água subterrânea no sistema aquífero cárstico-fissural ocorre através das descontinuidades rúpteis nas unidades carbonática e pelítica e dos canais de dissolução na unidade carbonática. Sendo assim, é extremamente importante neste tipo de aquífero a caracterização dessas descontinuidades na área objeto de estudo.

Como já discutido na geologia estrutural, foram constatadas pelo menos três direções principais de fraturas verticais a subverticais medidas nos calcários, quatro nos pelitos e quatro nos dutos de dissolução, reunidos na Tabela 1. O estudo estatístico dos fotolineamentos indicou ainda quatro direções principais. Além dessas, uma quinta família ocorre subparalelamente ao acamamento, visíveis apenas nas rochas calcárias, ao longo das quais também a carstificação atuou.

Esses resultados indicam quatro direções importantes de fluxo das águas subterrâneas: N10° - 30°E (sistema de descompressão), 60°-70°E (sistema de cisalhamento dextral), N70°-90°W (sistema de distensão) e N30°-50°W (sistema de cisalhamento sinistral). Dentre essas, as duas últimas, são as que apresentam, no conjunto, um menor grau de dispersão entre os quatro tipos de feições analisadas.

Um estudo estatístico de correspondência entre as vazões dos poços e as direções dos lineamentos mostra que os poços mais produtivos são aqueles localizados em lineamentos de direções N70°-90°W. Esses dados contribuem para a concepção de um modelo de fluxo regional de circulação da água subterrânea de SE para NW, na direção N70°-90°W. O fluxo subterrâneo estaria ocorrendo no sentido do trecho do rio São Francisco situado a oeste da área, o qual corresponde ao nível de base regional. Contudo, fluxos locais certamente ocorrem, nas demais direções constatadas, como é típico de terrenos cársticos.

## Parâmetros Hidráulicos dos poços profundos

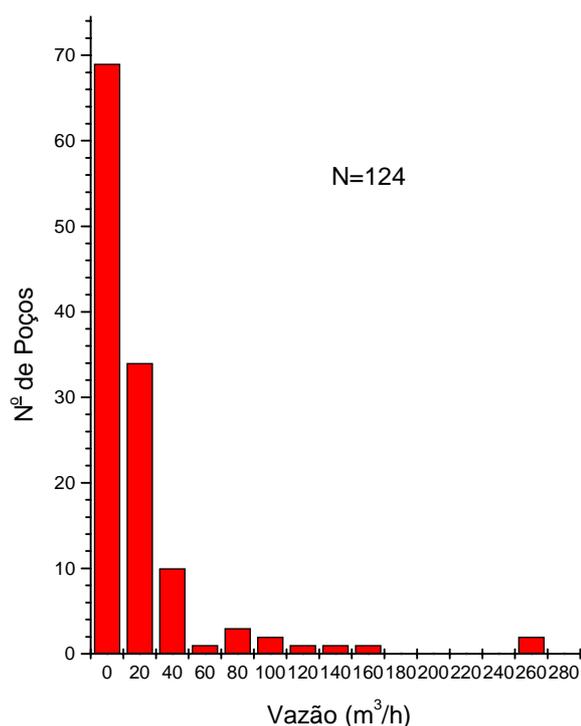
### Vazão

A Tabela 3 reúne os valores estatísticos dos parâmetros hidráulicos mais importantes, gerados a partir dos dados obtidos de 136 poços tubulares cadastrados no sistema aquífero cárstico-fissural.

Os poços possuem uma grande variação de produção, refletindo a grande heterogeneidade e anisotropia dos aquíferos, apresentando-se desde secos a vazões de até 264m<sup>3</sup>/h. Entretanto, a grande maioria dos poços (56%) possui vazões de até 20m<sup>3</sup>/h (Figura 8). Os poços de alta vazão normalmente estão associados a condições de confinamento do aquífero. A tendência das fraturas se fecharem em profundidade, observada nessa figura, assim como a ação da carstificação se atenuar, podem ser constatadas por meio da correlação negativa de spearman's existente entre a vazão e a profundidade do poço e entre a vazão e o nível dinâmico (Tabela 4).

**Tabela 3** - Parâmetros hidráulicos dos poços profundos.

PARÂMETROS	VAZÃO	N.E.	N.D	PROF.
	m <sup>3</sup> /h	m	m	m
NÚMERO	124	103	97	123
MÉDIA	20,77	13,60	42,75	95,92
DESVIO PADRÃO	40,98	12,52	24,08	24,70
MEDIANA	8,25	10,00	43,48	100,0
MÁXIMO	264,0	68,00	99,56	154,0
MÍNIMO	0,00	0,60	2,00	28,00
	0-20	5-20	50-60	100-110
FREQUÊNCIA	69 poços	70 poços	20 poços	30 poços



**Figura 8-** Distribuição da freqüência dos valores de vazão dos poços.

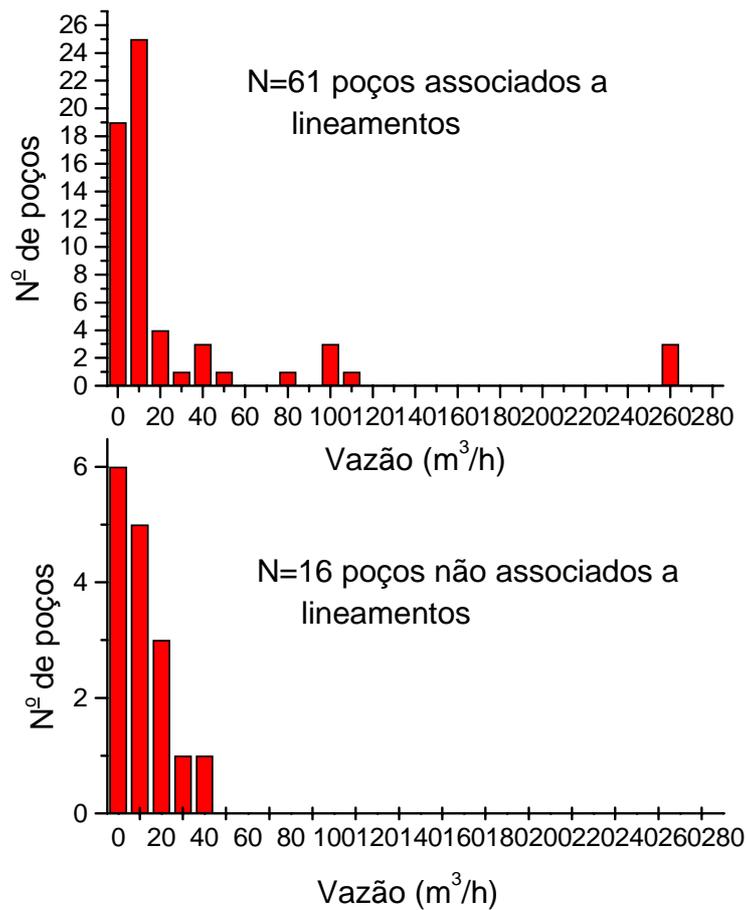
**Tabela 4 -** Correlações de Spearman's da vazão com a profundidade dos poços e com o nível dinâmico.

PARÂMETROS CORRELACIONADOS	** CORRELAÇÃO DE SPERMAN'S	ERRO	NÚMERO DE DADOS
Vazão-Profundidade	-0,619	0,00	119
Vazão-Nível dinâmico	-0,739	0,00	97

\*\* significativo para erro < 0,001

Os lineamentos estruturais detectados nas imagens de sensoriamento remoto são o reflexo, em superfície, das falhas e fraturas. Nos aquíferos cársticos-fissurais as vazões estão associadas à interceptação do maior ou menor número dessas descontinuidades, incluindo os dutos de dissolução. Os resultados do estudo das vazões dos poços associados e não associados aos lineamentos foto interpretados corroboram a veracidade dessa afirmação.

A freqüência de poços associados e não associados a lineamentos não se diferencia muito para vazões de até 20 m<sup>3</sup>/h, cujos valores são de 72% e 69%, respectivamente, conforme pode ser observado na figura 9. Entretanto, o maior diferencial reside no fato de que apenas no conjunto dos poços associados a lineamentos é que as vazões ultrapassam 40m<sup>3</sup>/h, com 15% (08) desses poços acima deste valor, encontrando-se valores excepcionais acima de 100m<sup>3</sup>/h.



**Figura 9** - Vazões dos poços associados e não associados a lineamentos.

As vazões dos poços em aquíferos cárstico-fissurais são influenciadas ainda pelas características dos sistemas de fraturas, que por sua vez, são regidas pela história tectônica da região. Como já apresentado na geologia estrutural, foi concebido um modelo de deformação para a área com base nos dados de campo. Os sistemas encontrados foram assim relacionados:

- a) Sistema de distensão: N70°-90°W
- b) Sistema de alívio: N0°-30°E
- c) Sistemas de Cisalhamento Dextral ou sintético: N50°-70°E
- d) Sistemas de Cisalhamento Sinistral ou antitético: N30°-50°W

O grau de permeabilidade “esperado” nesses sistemas de fratura é, em ordem decrescente, de acordo com o modelo adaptado,  $a > b > c \approx d$ , em função das aberturas das fraturas.

Com base nas observações de campo, constataram-se, duas direções mais intensamente carstificadas, sendo uma, N70°-90°W (sistema distensivo) e a outra, N0°-30°E (sistema de alívio ou de descompressão). Outros dois sistemas identificados são os de cisalhamento N50°-70°E (dextral) e o N30°-50°W (sinistral).

As vazões muito elevadas (em torno de 100m<sup>3</sup>/h) a excepcionais (260m<sup>3</sup>/h) indicam condições de alto grau de carstificação e de artesianismo. Relacionando-se as vazões dos poços aos sistemas de fraturamentos, constatam-se produções muito elevadas em três deles (N70°-90°W, N30°-50°W e N0°-30°E) o que permite supor que a carstificação ocorre em todos os sistemas.

Entretanto, o sistema distensivo (N70°-90°W) destaca-se por apresentar poços associados a um conjunto de indicadores de maiores produtividades, isto é, maior porcentagem de vazões acima de 20m<sup>3</sup>/h (39%) e de vazões muito elevadas a excepcionais (Tabelas 5 e 6). Dentre os 9 poços acima de 20m<sup>3</sup>/h, dois possuem vazões muito elevadas e três, vazões excepcionais. Estes dados corroboram com a maior permeabilidade desse sistema previsto, a partir do modelo proposto para a área. O valor de 20m<sup>3</sup>/h foi tomado como referência, baseado no fato de que a maior parte dos poços na área (56%) possuem vazões de até este valor.

**Tabela 5** - Produtividade dos poços em função dos sistemas de fraturas

<b>VAZÃO</b>	<b>SISTEMA DISTENSIVO N70°-90°W N=23</b>	<b>SISTEMA DESCOMPRESSIVO N0°-30°E N=8</b>	<b>SISTEMA CISAL. SINIST. N30°-50°W N=26</b>	<b>*SISTEMA CISAL. DEXT. N50°-70°E N=2</b>
< 20 m <sup>3</sup> /h	61%	88%	81%	50%
20-100 m <sup>3</sup> /h	17%	0%	19%	50%
> 100 m <sup>3</sup> /h	22%	12%	0%	0%

\* Estatisticamente não representativo

De acordo com os dados estatísticos, em termos de produtividade, os poços do sistema de cisalhamento sinistral (N30°-50°W) e descompressivo (N0°-30°E), apresentam um comportamento muito semelhante (Tabela 6). A expectativa, com base no modelo e nas observações de campo (dissolução cárstica nessa direção), é de que o sistema descompressivo seja mais promissor em relação ao de cisalhamento. Entretanto, a análise estatística daquele sistema, assim como o sistema dextral, não pode ser considerada conclusiva devido ao pequeno tamanho da amostra (oito). Contudo, um único poço, mas de grande vazão (100m<sup>3</sup>/h) (Tabela 6), pode ser indicativo dessa potencialidade esperada. Do mesmo modo, o sistema dextral, com apenas 02 poços, não pode ser considerado para efeito dessa análise.

**Tabela 6** - Estatística da produtividade dos poços (m<sup>3</sup>/h) nos sistemas de fraturas

PARÂMETRO ESTATÍSTICO	SISTEMA DISTENSIVO N70°-90°W N=23	SISTEMA DESCOMPRESSIVO N0°-30°E N=8	SISTEMA CISAL. SINIST. N30°-50°W N=26	*SISTEMA CISAL. DEXT. N50°-70°E N=2
Média	51,93	18,38	18,09	-
Mediana	11,31	8,88	8,98	-
Mínimo	0,40	1,51	0,600	2,02
Máximo	264,0	100,0	113,14	32,72
Desvio Padrão	88	32,79	26	-

\* Estatisticamente não representativo

### Níveis Estático e Dinâmico

O nível estático encontra-se, em 68% dos poços, entre 5 e 20 metros de profundidade. Já o nível dinâmico apresenta um elevado grau de variação, com 20,6% dos poços entre 50 e 60 metros de profundidade.

### Profundidade

A maior parte dos poços possuem profundidade entre 60 e 120 metros, com maior incidência, 24,4%, entre 90 e 100 metros

## **HIDROQUÍMICA**

### **Geoquímica do Flúor**

A Portaria 1469/00 do Ministério da Saúde, estabelece os teores mínimo, ótimo e máximo de flúor na água de abastecimento público em função da temperatura máxima média regional, que para a área de estudos são de 0,6mg/L, 0,7mg/L e 0,8mg/L, respectivamente.

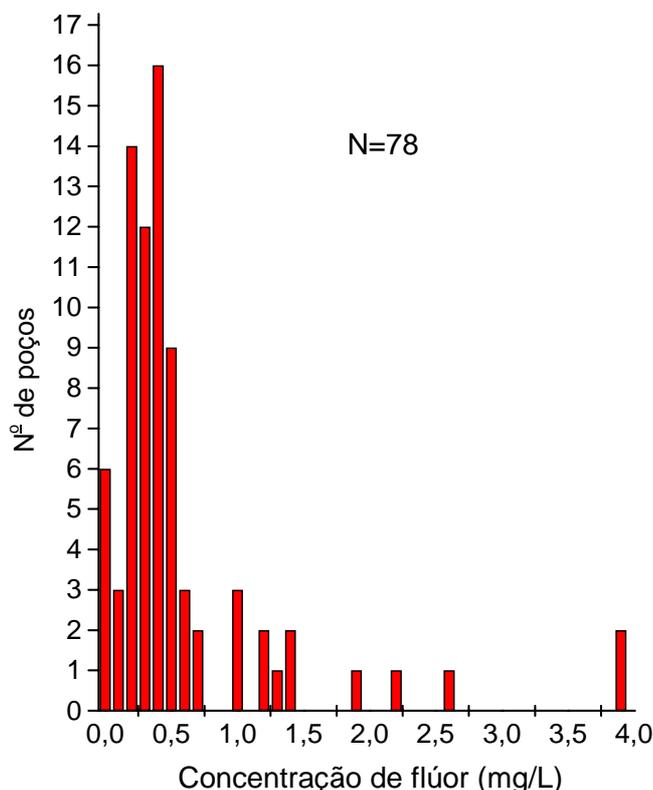
O estudo estatístico das concentrações do flúor nas águas subterrâneas baseou-se em dados de 78 poços tubulares.

O *background* de fluoreto na água subterrânea é importante do ponto de vista hidrogeoquímico por representar a concentração regional e indicar a distribuição areal de minerais fluoríticos nas rochas. O *background* foi considerado o valor mais frequentemente encontrado nas águas dos poços profundos, que, na área de estudos variou entre 0,40-0,50mg/L (Figura 10), o que permite adotar o valor médio de 0,45mg/L.

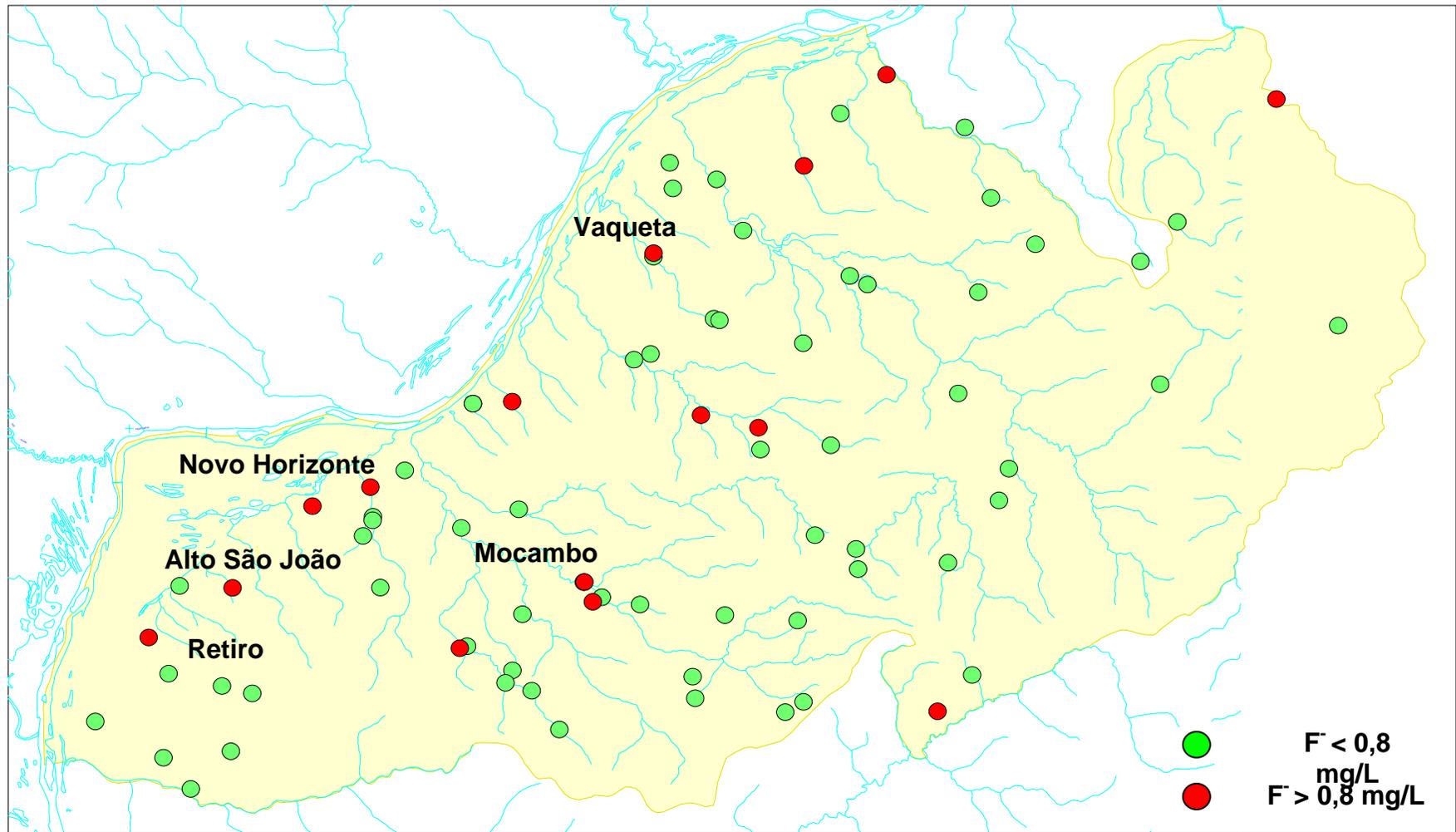
Apesar de estar bem abaixo do limite máximo para esta área (0,8mg/L), o *background* pode ser considerado relativamente elevado do ponto de vista hidrogeológico, tendo em consideração a pequena abundância de minerais de flúor na crosta terrestre e as concentrações máximas de 0,3mg/L normalmente encontradas nas águas subterrâneas. Assim, valores naturais de flúor nas águas subterrâneas acima do *background* serão considerados elevados nesta área.

Em termos estatísticos, as concentrações apresentaram-se desde ausentes até um máximo de 3,90mg/L, com média de 0,57 mg/L e mediana de 0,40mg/L (Tabela 7). O elevado desvio padrão (0,72mg/L) indica a presença de anomalias dessas concentrações.

Constatou-se que 65,4% (51) das amostras apresentam valores abaixo do *background*. e 16,7% (13) das amostras encontram-se acima do limite máximo permissível de 0,8 mg/L, o que permite classificar estas águas como naturalmente contaminadas com flúor (Figura 11)



**Figura 10** - Frequência da concentração de fluoreto nas águas subterrâneas.



**Figura 11** – distribuição do fluoreto na água subterrânea segundo o limite de potabilidade (portaria 1469/00)

**Tabela 7** - Dados estatísticos de fluoreto nas águas dos poços profundos.

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	FLÚOR mg/L
N	78
Média	0,57
Mediana	0,40
Máximo	3,90
Mínimo	0,00
Desvio Padrão	0,72
<i>Background</i>	0,45

### Relações do fluoreto com a estratigrafia

De acordo com as observações de campo, a fluorita ocorre nos níveis de calcarenitos inferiores e médios da coluna do Subgrupo Paraopeba aflorantes na área. Esta observação é corroborada com os dados estatísticos obtidos por meio da correlação entre as concentrações de F<sup>-</sup> e a locação hipsométrica das entradas d'água dos poços na área estudada (Tabela 8).

**Tabela 08** - Concentrações de F<sup>-</sup> com a locação hipsiométrica das entradas de água dos poços.

CONCENTRAÇÃO DE FLÚOR	FAIXA HIPSOMÉTRICA	
	400-600 m	600-700 m
F > 0,80 mg/L*	45,8% (11)	2,4% (1)
0,45 mg/L < F < 0,80 mg/L**	70,8% (17)	26,2% (11)
Nº de dados	24	42

\* acima do limite de potabilidade (Port. 1469/00 MS)

\*\* acima do *background*

### Relações do fluoreto com as estruturas rúpteis

As concentrações de F<sup>-</sup> na água subterrânea possui uma notável relação com os sistemas de fraturas na área estudada, embora apenas os sistemas distensivo (N70°-90°W) e de cisalhamento sinistral (N30°-50°W) possam ser considerados estatisticamente válidos, além do grupo de poços não associados a sistemas de fraturas (Tabela 9).

Assim sendo, o sistema de cisalhamento sinistral é o que possui o maior número de poços acima do *background* de 0,45mg/L de F<sup>-</sup> (50% dos poços nesse sistema), o maior valor médio (0,73mg/L) e máximo (3,9mg/L). O sistema de cisalhamento dextral, embora não possua número de poços estatisticamente válidos, apresenta um poço com elevada concentração de F<sup>-</sup> (3,9mg/L).

Dentre os sistemas extensivos, o distensivo possui 29% dos poços acima do *background* e o descompressivo 57%. No sistema compressivo sinistral este valor é de 50%. Nota-se o

comportamento similar e com valores mais elevados entre os sistemas descompressivo e de cisalhamento sinistral, o mesmo ocorrendo com relação às concentrações de F<sup>-</sup> acima de 0,8mg/L (máximo permitido), sendo superiores nesses dois sistemas. E no sistema distensivo, esta concentração é de 21%, portanto, apenas um pouco abaixo dos demais.

Em contraste, os poços não associados a sistemas de fraturas, possuem 20% acima do background e apenas 1 poço com concentração de F<sup>-</sup> acima de 0,8mg/L.

É possível que a diluição seja o fator mais importante nesse resultado, de acordo com os dados obtidos. Constatou-se que produções substancialmente maiores nos poços localizados no sistema distensivo têm um comportamento similar entre os sistemas descompressivo e sinistral. As concentrações de F<sup>-</sup> relacionadas aos sistemas de fraturas, refletem claramente aquela constatação, ou seja, elas são maiores nos sistemas de menor produtividade, quais são os descompressivo e sinistral (Tabela 9). Corroborando com esta conclusão, o fato de, dentre os cinco (5) poços localizados no sistema distensivo (de maior produção) e que possuem concentrações acima de 0,8mg/L de F<sup>-</sup>, quatro (04) possuem baixas vazões, entre 2,5 e 10,56 m<sup>3</sup>/h.

**Tabela 9** - Estatística da concentração de fluoreto (mg/L) dos poços nos sistemas de fraturas.

PARÂMETRO ESTATÍSTICO	SISTEMA DISTENSIVO N70°-90°W N=24	**SISTEMA DESCOMPRES. N0°-30°E N=7	SISTEMA CISAL.SINIST. N30°-50°W N=24	*SISTEMA CISAL.DEXTR. N50°-70°E N=2	POÇOS NÃO ASSOCIADOS A FRATURAS N=20
Média	0,54	0,8	0,73	-	0,4
Mediana	0,40	0,5	0,48	-	0,37
Mínimo	ND	0,19	0,1	0,20	ND
Máximo	2,6	2,6	3,9	3,92	2,2
F>0,45 mg/L	7 (29%)	4 (57%)	12 (50%)	1	4 (20%)
F>0,8 mg/L	5 (21%)	2 (29%)	6 (25%)	1	1 (5%)

\*sem significado estatístico; \*\*fraco significado estatístico; ND: Não Detectado

A correlação negativa vazão-concentração de F<sup>-</sup>, (p=-0,39, Tabela 9) dificulta a análise da influência de cada um dos sistemas de fraturamentos sobre a concentração do F<sup>-</sup> na água subterrânea. Entretanto, é nítida a influência dos fraturamentos sobre a concentração de F<sup>-</sup> nas águas subterrâneas, confirmada pelos baixos valores constatados para grupo de poços não associados a fraturas.

## Relações do fluoreto com os parâmetros hidráulicos

O F<sup>-</sup> possui correlação negativa com a vazão dos poços e positiva com a profundidade (Tabela 10). A tendência da diminuição da concentração do F<sup>-</sup> em poços de vazões mais elevadas indicam o processo de diluição no aquífero. Uma outra razão seria o menor tempo de contato água-rocha devido à maior permeabilidade do meio onde as vazões são mais elevadas.

**Tabela 10** - Correlações da concentração do F<sup>-</sup> com parâmetros hidráulicos dos poços.

PARÂMETRO	VAZÃO	NÍVEL DINÂMICO
F	-0,390**	0,489*
NÚMERO DE DADOS	67	53

\*\* correlação é significativa para  $p < 0,01$

\* correlação é significativa para  $p < 0,05$

A tendência da concentração de F<sup>-</sup> de aumentar com a profundidade do nível dinâmico (Tabela 10) indica também o efeito da sua diluição pela renovação das águas à medida que se avança para maiores profundidades.

Tal fato é corroborado pelas correlações negativas existentes entre a vazão e o nível dinâmico e entre a vazão e a profundidade dos poços (Tabela 11). Ou seja, as fraturas tendem a se fechar com o aumento da profundidade, assim como a ação da dissolução cárstica tende a diminuir, dificultando, então, a renovação das águas e conseqüentemente provocando um aumento na concentração do F<sup>-</sup>. Além disso, é plausível que a disponibilidade da fluorita seja maior em profundidade, devido à ação da sua dissolução já se encontrar mais avançada nas zonas mais superficiais.

**Tabela 11** - Correlações da vazão com o nível dinâmico e profundidade dos poços.

PARÂMETRO	NÍVEL DINÂMICO	PROFUNDIDADE
VAZÃO	-0,739**	-0,619*
NÚMERO DE DADOS	97	53

\*\* correlação é significativa para  $p < 0,01$

\* correlação é significativa para  $p < 0,05$

Em síntese, os aquíferos são mais produtivos a menores profundidades onde a ação cárstica é mais desenvolvida e as fraturas são mais abertas, e onde também ocorre o efeito da diluição da concentração de F<sup>-</sup> causada pela maior capacidade de renovação das águas. Desse modo, maiores concentrações de F<sup>-</sup> são esperadas ocorrerem em poços mais profundos.