

## **CAPÍTULO 8**

### **ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO COMO SUBSÍDIO PARA A CONSOLIDAÇÃO DO MODELO HIDROGEOLÓGICO E DE CONCENTRAÇÃO DE FLUORETO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

A partir dos estudos geológicos e hidrogeológicos realizados e apresentados foi construído um modelo conceitual e de funcionamento do Sistema Aquífero Cárstico Fissural do Grupo Bambuí. Determinou-se a distribuição lateral e vertical das unidades geológicas, as heterogeneidades texturais e composicionais dessas unidades e as principais rochas portadoras de flúor. Com base nesses estudos e na investigação das características dos poços tubulares foram descritas as principais unidades hidrogeológicas. Em seguida investigou-se a influência das fraturas, falhas e feições cársticas na produtividade dos poços, no conteúdo de íons dissolvidos nas águas, e em particular, nas concentrações de fluoreto.

Esses estudos concluíram que: os aquíferos carbonáticos do Grupo Bambuí contém fácies enriquecidas em flúor (principalmente pela presença de fluorita), que as diferentes formas de recarga são importantes para existência de concentrações elevadas de fluoreto, e que os fluxos regionais apresentam concentrações elevadas de fluoreto.

A seguir, apresenta-se um zoneamento hidrogeoquímico do Sistema Aquífero do Grupo Bambuí construído para testar o modelo hidrogeológico proposto e investigar as concentrações de fluoreto, tendo em vista a análise dos fatores citados na literatura (Capítulo 2, ítem 2.4) que favorecem a concentração do flúor nas águas: razão Na/Ca alta, existência de reações de troca catiônica, aumento da salinidade, da temperatura e da alcalinidade.

#### **8.1 Zoneamento hidrogeoquímico**

O conjunto de dados selecionados para representar quimicamente os aquíferos reúne poços amostrados por Velásquez *et al.* (2007), os resultados da segunda campanha do IGAM (coleta realizada em abril de 2008) mais os resultados de 15 poços coletados durante a elaboração dessa dissertação. Essas amostras apresentam um balanço iônico com erro inferior a 11%. Para análise dos parâmetros hidráulicos foram utilizados todos os poços disponíveis no inventário de pontos d'água (Anexo VII).

De maneira geral, nas águas do sistema cárstico-fissural predominam os íons bicarbonato e cálcio, típicos de aquíferos carbonáticos. Entretanto, existe uma compartimentação química nesse sistema que reflete as variações das condições de recarga, circulação e composição do aquífero. Esses compartimentos foram chamados de *zonas hidrogeoquímicas*, sendo propostas 4 zonas (Fig.8.1 e Fig.8.2). Cada zona reúne poços com cotas da superfície, nível d'água e entradas d'água semelhantes, perfurados sob um mesmo aquífero em condições hidrogeológicas definidas (Tab.8.1, Tab. 8.2).

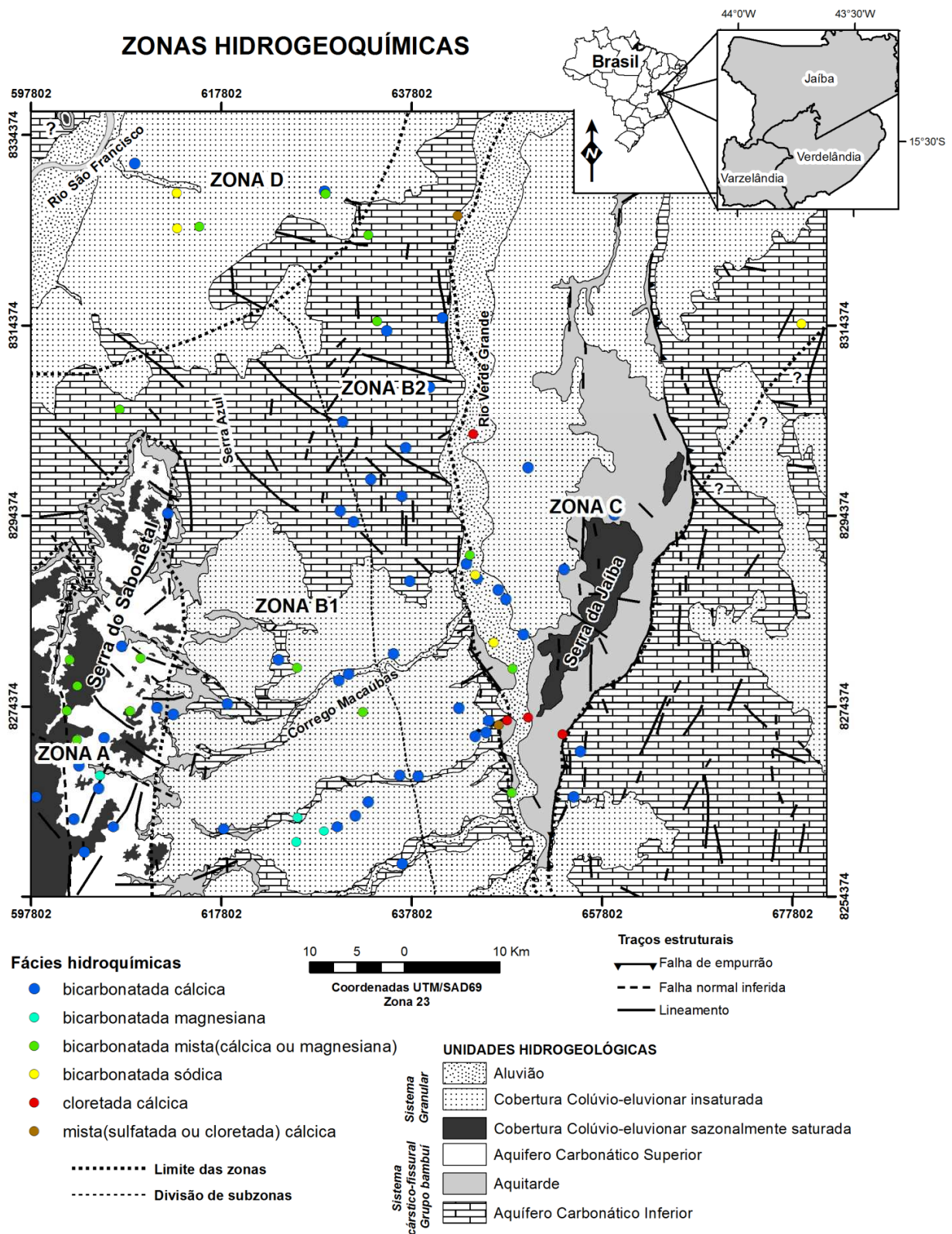
A **zona A** reúne 26 poços abastecidos pelo Aquífero Carbonático Superior (ACS). A **zona B** agrupa 172 poços abastecidos pelo Aquífero Cárstico Inferior (ACI) a oeste do rio Verde Grande e a **zona C** 55 poços abastecidos pelo ACI sob o aquitarde, a leste do rio verde Grande. Os quinze poços da **zona D** localizam-se a noroeste do município de Jaíba, próximo ao rio São Francisco. Segundo os dados disponíveis para os poços na zona D (espessura do revestimento, cota da superfície, cota do fundo do poço e nível d'água, Anexo VII) e as cotas estimadas para o topo e base das rochas que compõem o ACI no mapeamento geológico e hidrogeológico, interpreta-se que os poços atravessam a cobertura colúvio-eluvionar espessa e o Aquífero Carbonático Inferior.

*Tabela 8.1. Número de poços por zona hidrogeológica*

ZONA	N de pontos	% de poços
A	26	10
B	172	64
C	55	21
D	15	6
<b>TOTAL</b>	<b>268</b>	<b>100</b>

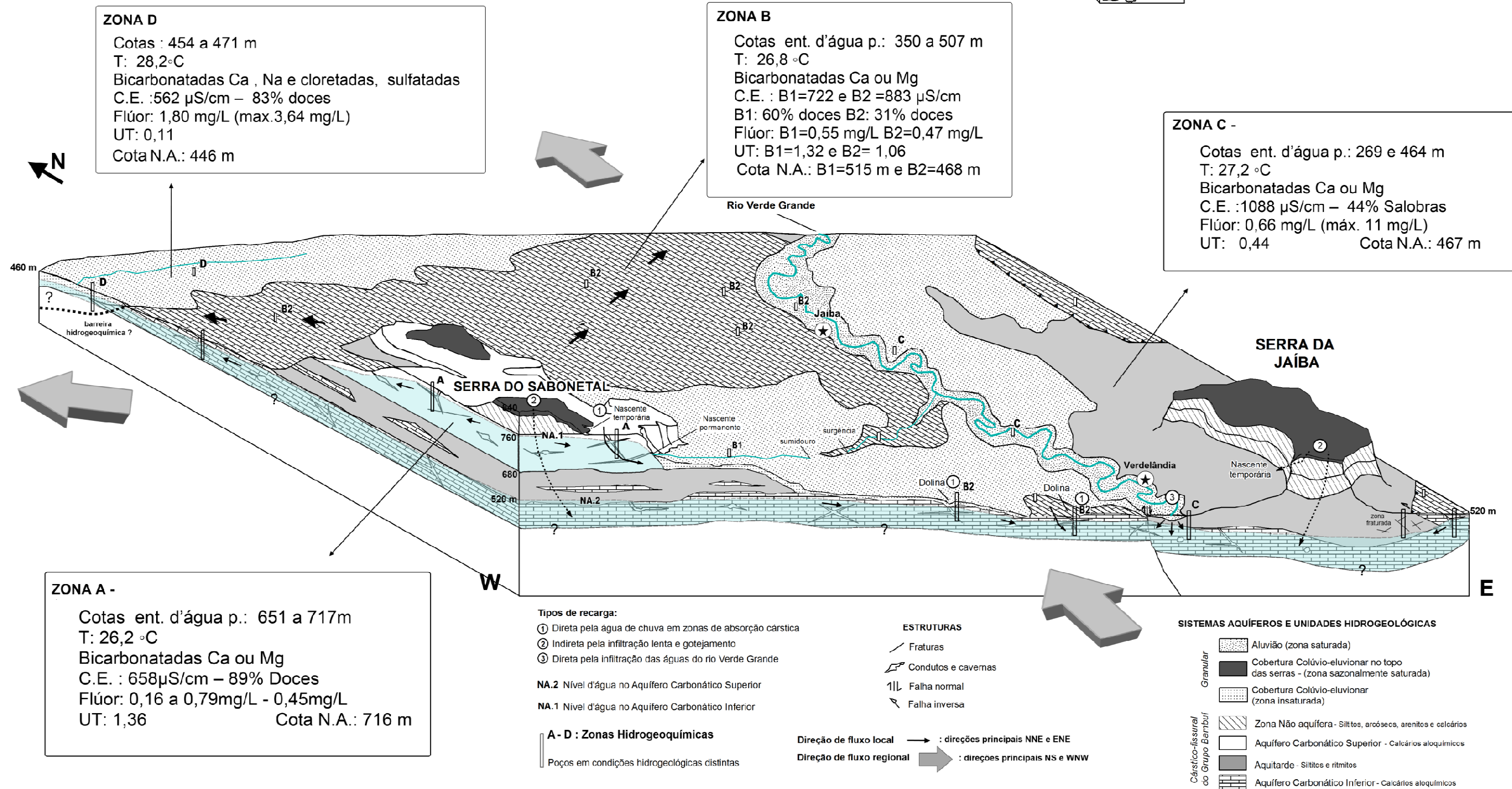
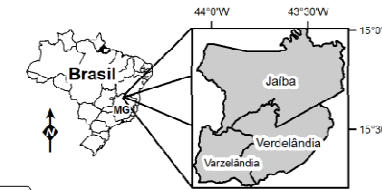
Nota-se que as águas nas zonas A e B são quimicamente semelhantes (Fig.8.3), porém diferentes das águas da zona C e D. As características de cada zona hidrogeoquímica serão descritas a seguir e posteriormente comparadas para interpretar os processos envolvidos nas variações da composição das águas no sistema aquífero cárstico-fissural, especialmente aqueles responsáveis pelas variações nas concentrações de fluoreto.

Os poços na **zona A** estão perfurados no intervalo das cotas 636m e 822m (Tab.8.2). As entradas d'água mais profundas registradas estão entre as cotas 651 e 717 (Fig.8.4 a) e o nível d'água médio é 716m. As entradas d'água abaixo da cota 690m provavelmente atravessam uma zona de transição entre os pelitos do aquitarde e os calcários do ACS. As médias para os valores de temperatura, ph e eh são, respectivamente, 26,2°C, 7,27 e 217mv (Fig.8.4 b e c).

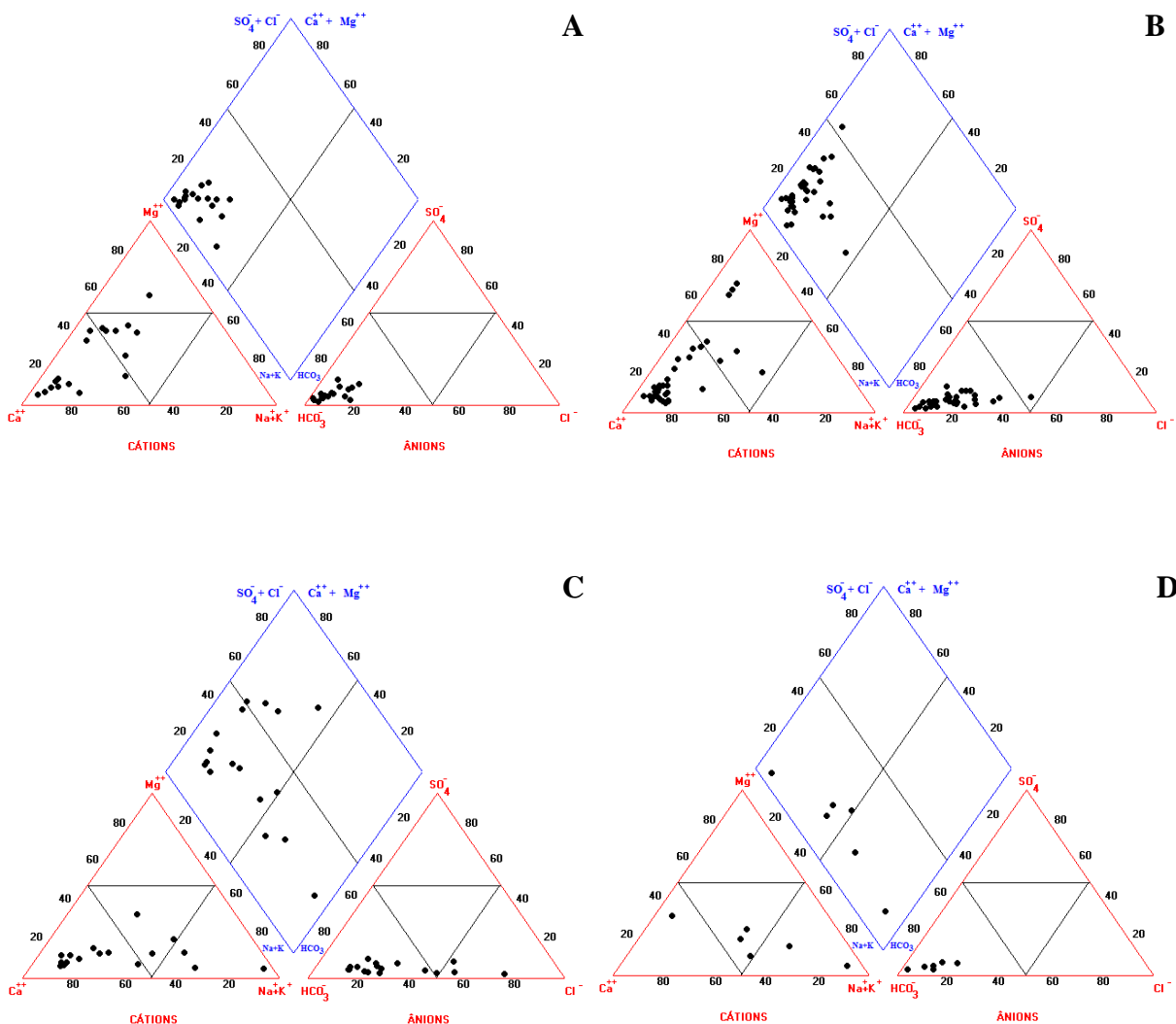


*Figura 8.1. Zonas hidrogeoquímicas e as fácies hidroquímicas do Sistema Aquífero Cárstico-fissural do Grupo Bambuí*

**MODELO HIDROGEOLÓGICO E ZONEAMENTO HIDROGEOQUÍMICO  
MUNICÍPIOS DE VERDELÂNDIA, VARZELÂNDIA E JAÍBA**



**Figura 8.2** Modelo hidrogeológico e zoneamento hidrogeoquímico. Descrito nos quadros o intervalo das cotas de entrada d'água mais profunda, o valor médio da temperatura, as fácies hidroquímicas predominantes, o valor médio da condutividade elétrica, a classificação das águas quanto ao STD (<500mg/L: doce, 500 a 1000 mg/L: salobra e > 1000 mg/L: salgada), as concentrações de fluoreto (valores mínimo, máximo e a média), o valor médio de trítio e a média das cotas do nível d'água na zona.



**Figura 8.3.** Diagrama de Piper – Classificação das águas nas zonas hidrogeoquímicas A,B,C e D

As águas representativas desse aquífero são bicarbonatadas cálcicas, raramente magnesianas ou bicarbonatadas mistas, com valor médio de STD e C.E. igual a 451mg/L e 658 $\mu$ S/cm, respectivamente (Tab.8.3 e Fig.8.4 d). Setenta e nove por cento das águas são doces e o restante são águas salobras.

As concentrações de flúor na **zona A** variam de 0,16 a 0,79 mg/L, com valor médio de 0,45mg/L. Apesar da presença de fluorita nos calcários dessa unidade, as concentrações de fluoreto são as mais baixas, com média de 0,45 mg/L. Todos os valores são menores que 1,5 mg/L (máximo permitido para potabilidade segundo a Portaria MS.518/2004). O tempo relativamente curto de residência das águas (evidenciado pelos valores médios de trítio e pelas baixas concentrações de cloreto, Tab.8.2 e Fig.8.3 e) é desfavorável à existência de concentrações elevadas de fluoreto nessa zona.

**Tabela 8.2. Características hidroquímicas das águas por zona. Os valores dos parâmetros hidroquímicos representam a média.**

ZONA		A	B1	B2	C	D
Contexto geológico		ACS	ACI porção oeste	ACI próximo ao rio Verde Grande	ACI sob aquitarde, leste da área.	ACI sob cobertura detrítica insaturada
Cota superfície	Média	732	531	484	483	471
	Máx.	822	631	520	508	481
	Mín.	636	489	464	459	454
Cota do fundo do poço	Média	635	457	402	377	358
	Máx.	692	623	478	440	416
	Mín.	570	403	296	261	321
Nível d'Água	Média	716	515	468	467	446
	Máx.	806	607	501	502	465
	Mín.	632	444	444	421	424
Vazão	Média	18	49	70	22	23
	Máx.	102	250	320	116	88
	Mín.	4	1	1	0,2	4
n		18	20	17	17	6
Classificação - Diagrama de Piper		Bicarbonatadas cálcicas, raramente magnesianas e bicarbonatadas mistas	Bicarbonatadas cálcicas, magnesianas e mistas	Predominantemente Bicarbonatadas cálcicas	Bicarbonatada cálcicas, mistas, sódicas, cloretada cálcica, mista (sulfatada ou cloretada) cálcica	Bicarbonatadas cálcicas, sódicas e mistas
Classificação das águas – STD *		79% doces 22% salobras	60% doces 40% salobras	31% doces 69% salobras	31% doces 44% salobra 25% salgada	83% doces 17% salobras
CE (µS/cm)		658	722	883	1088	562
STD (mg/L)		451	484	595	768	415
pH		7,27	7,17	7,04	7,29	7,60
Eh		217	79	77,56	14	34
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		371	397	385,41	370	298
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>		15,56	16,91	22,35	18,00	9,25
Cl <sup>-</sup>		18,59	31,10	65,36	149,02	23,89
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,62	0,22	3,66	2,36	0,08
Ca <sup>2+</sup>		82,39	92,27	138,20	123,04	39,95
Mg <sup>2+</sup>		19,63	24,08	11,60	14,45	11,00
Na <sup>+</sup>		19,25	19,10	22,58	68,90	60,67
K <sup>+</sup>		2,38	1,71	1,54	2,78	1,97
UT		1,36	1,32	1,06	0,44	0,11
[F <sup>-</sup> ] (mg/L)	Média	<b>0,45</b>	<b>0,55</b>	<b>0,47</b>	<b>1,35** / 0,66***</b>	<b>1,80</b>
	Máx.	0,79	2,07	1,44	11	3,64
	Mín.	0,16	0,3	0,12	0,12	0,25

\* 0 > STD < 500 – Água doce    500 < STD > 1500 – Água salobra    STD > 1500 – Água Salgada

\*\* Considerando o valor anômalo de 11,00mg/L de F.    \*\*\* Desconsiderando o valor anômalo

A forma de recarga principal é a água de chuva nas zonas de absorção cárstica e a circulação dessas águas no carste é relativamente rápida. Infere-se que a lenta infiltração das águas meteóricas na cobertura colúvio-eluvionar pode atravessar os pelitos, psamitos e calcários que compõem a zona não saturada do sistema cárstico-fissural e recarregar o ACS (ver Fig.7.13). Entretanto essa contribuição é muito reduzida se comparada à recarga direta.

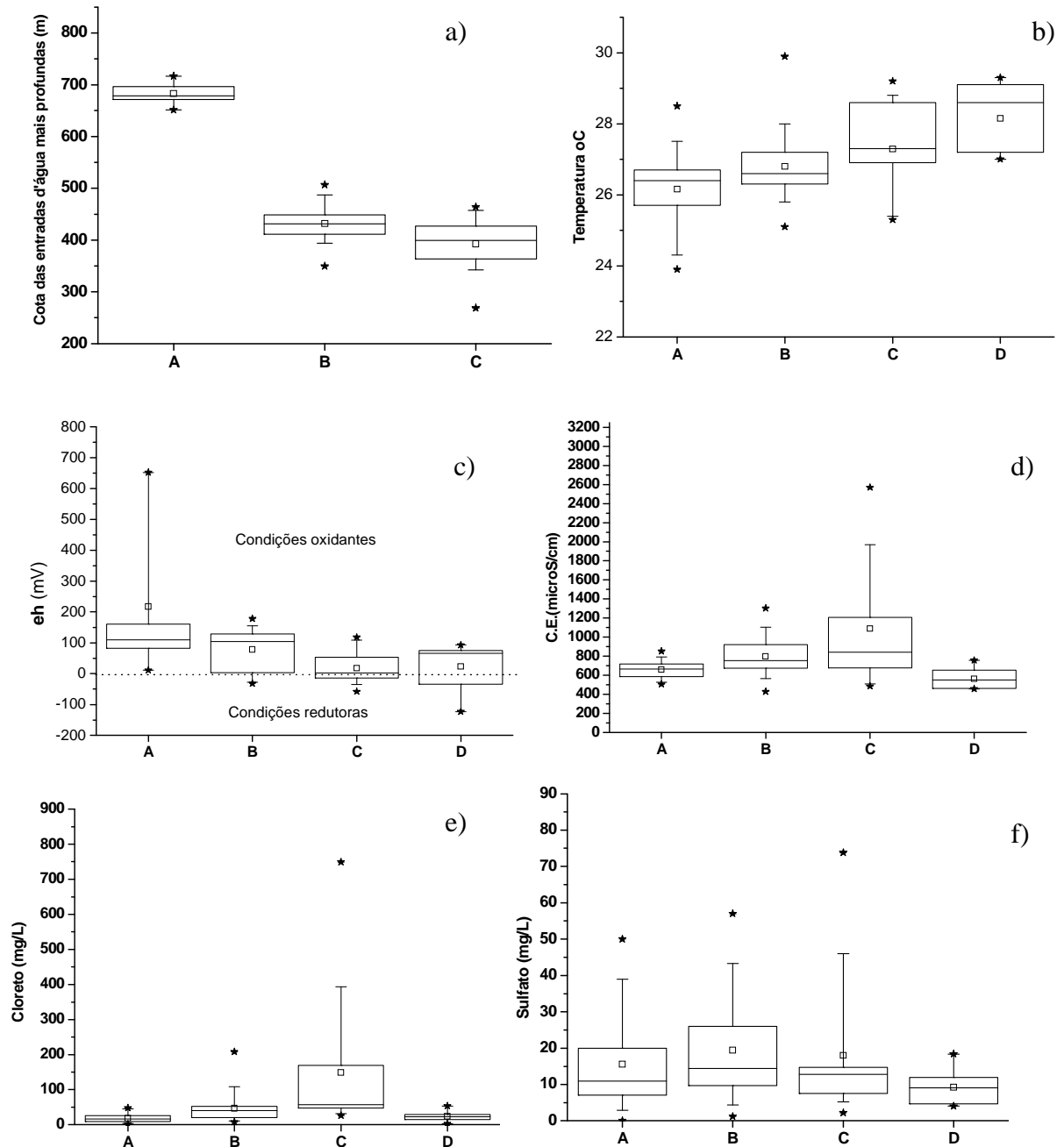
As reações hidrogeoquímicas importantes na zona A foram sintetizadas na tabela 8.3. Dentre elas destacam-se: a dissolução/precipitação da calcita e dolomita existentes nos calcários, responsáveis pela adição ou remoção de bicarbonato, cálcio, e/ou magnésio; a dissolução da fluorita, também presente nas rochas carbonáticas, com liberação do flúor; a hidrólise de silicatos (micas, plagioclásios e feldspatos existentes nos siltitos e subarcóseos sobrepostos), que seriam responsáveis pela incorporação dos íons Na e K, e a oxidação de sulfetos (opacos identificados tanto nos siltitos como nas rochas carbonáticas) responsável pela formação do sulfato (Fig. 8.3 f).

**Tabela 8.3. Formas de recarga e processos hidrogeoquímicos na Zona A**

<b>Formas de recarga</b>	<b>Processos hidrogeoquímicos</b>
Infiltração direta da água de chuva em zonas de absorção cárstica	Dissolução/precipitação da calcita e dolomita Dissolução da fluorita Oxidação de sulfetos
Interação da água da chuva com as coberturas elúvio-coluvionares areno-argilosas	Dissolução do gás carbônico Adsorção de íons no solo Hidrólise de silicatos Evaporação/precipitação
Infiltração lenta das águas no aquífero granular e drenança/gotejamento nos siltitos, subarcóseos e carbonatos da zona não saturada até o Aquífero Cárstico Superior	Adsorção de íons no solo Dissolução de óxidos e hidróxidos de ferro Óxido-redução do ferro Oxidação de sulfetos Hidrólise de silicatos Adsorção de íons nos siltitos argilosos Troca catiônica Dissolução da calcita, dolomita e fluorita

A **zona B** reúne os poços que são abastecidos principalmente pelo ACI entre o Rio Verde Grande e as serras do Sabonetal e São Felipe. Os poços estão perfurados em cotas que variam entre 464m e 631m (Tab. 8.2). As entradas d'água mais profundas estão entre as cotas 350m e 507m.

Os poços perfurados em cotas superiores a 520m podem atravessar os pelitos, na zona de transição entre aquitarde e o ACI. Três poços seguramente atravessam os pelitos (VAR027, VAR070 e IVZ24). Chama atenção que estes poços apresentam nível d'água muito próximo a superfície indicando que podem estar sob condições de confinamento.



**Figura 8.4.** Entrada d'água e parâmetros físico-químicos das águas nas zonas hidrogeoquímicas

Como a zona B reúne o maior número de poços e a maior extensão em área, esta foi dividida em subzonas: B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub>. A maior parte dos poços perfurados na subzona B<sub>1</sub> está sob a cobertura elúvio-coluvionar insaturada espessa ou sob pelitos, e a cota média do nível d'água para essa subzona é 515m. São comuns córregos com leito rochoso ou associados a estruturas cársticas, como dolinas e sumidouros, indicando que existe uma conexão importante com a água subterrânea.

As nascentes permanentes (Fig.7.12) e os trechos de águas perenes dos córregos associados à serra do Sabonetel e São Felipe estão relacionados a descarga do ACS (Zona A) no contato com o



aquitarde. Os córregos entretanto ao atravessar a subzona B<sub>1</sub> podem ter suas águas capturadas pelas estruturas cársticas, passando a circular em subsuperfície.

Na zona B<sub>2</sub> os calcários do ACI estão expostos ou sob um solo bastante raso, e são mais comuns dolinas, lajedos e afloramentos com zonas de absorção cárstica. Os poços estão perfurados em cotas baixas, próximas às cotas do rio Verde Grande, e a cota média do nível d'água nessa subzona é 468m.

Na subzona B<sub>1</sub> 60% das águas são doces, enquanto na subzona B<sub>2</sub> apenas 31% apresentam STD menor que 500mg/L. Há um aumento da salinidade das águas de B<sub>1</sub> (C.E. médio igual a 722 µS/cm) para B<sub>2</sub> (C.E. médio igual a 883 µS/cm, Tab. 8.2) e também um aumento das concentrações médias de cloreto, de 31,10 mg/L para 65,36 mg/L.

As águas na zona B são principalmente bicarbonatadas cálcicas, raramente bicarbonatadas magnesianas ou mistas e estão em condições oxidantes. Ocorrem nessa zona águas com concentrações de cloreto e sulfato maiores que as águas na zona A (Fig.8.4 e e f) e também mais quentes (Fig. 8.4 b).

Nos poços da zona B as águas apresentam concentrações de flúor que podem ser prejudiciais à saúde. O fluoreto varia entre 0,12 mg/L e 2,07mg/L (Tab.8.2). Os calcários do ACI também apresentam ocorrências de fluorita e a dissolução desse mineral é a principal fonte de flúor para as águas. Nessa zona as águas subterrâneas apresentam maior tempo de renovação que na zona A, e o fluoreto, assim como o cloreto, se acumula ao longo do fluxo, da subzona B<sub>1</sub> para B<sub>2</sub> (Tab.8.2).

**Tabela 8.4. Formas de recarga e processos hidrogeoquímicos na Zona B**

<b>Formas de recarga</b>	<b>Processos hidrogeoquímicos</b>
Infiltração direta da água de chuva em zonas de absorção cárstica	Dissolução/precipitação da calcita e dolomita Dissolução da fluorita Oxidação dos sulfetos
Infiltração das águas dos aluviões + águas superficiais ao longo das drenagens cársticas	Dissolução do gás carbonônico Adsorção de íons no solo Evaporação/precipitação Dissolução da calcita, dolomita e fluorita
Drenança das águas da zona A através dos Aquitarde.	Adsorção de íons nos siltitos argilosos Troca catiônica Hidrólise de silicatos Dissolução da calcita, dolomita e fluorita (margas e lentes carbonáticas) Oxidação dos sulfetos

As principais formas de recarga são: infiltração direta em zonas de absorção cárstica e através da infiltração de água superficial ao longo das drenagens associadas ao carste. Infere-se, ainda, a drenança de águas do ACS através do aquitarde nas cotas mais altas. Destacam-se entre as reações hidrogeoquímicas teóricas na zona B (Tab.8.4) a dissolução/precipitação da calcita e

dolomita e a dissolução da fluorita, minerais presentes no aquífero, e a oxidação dos sulfetos, presente no aquitarde e no ACI.

Na **zona C** estão os poços que captam águas do ACI abaixo do aquitarde, na parte leste da área. As cotas da superfície variam entre 459m e 508m, as cotas das entradas d'água mais profundas entre 269m e 464m, e as cotas do fundo do poço entre 261m e 440m (Tab.8.2 e Fig.8.4a). O nível d'água médio é 467m.

Nessa zona estão os poços mais profundos e também as águas mais salinizadas (C.E. média de 1088  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Quarenta e quatro por cento das águas da zona C são salobras, 25% salgadas e 31% são doces. O pH médio é 7,29 e a temperatura média igual a 27,2. Nessa zona ocorrem algumas águas de eh negativo mostrando a existência de condições redutoras.

As águas são dos tipos: bicarbonatadas cálcicas, bicarbonatadas mistas, bicarbonatadas sódicas, cloretada cálcica, e sulfatada-cloretada cálcica. As concentrações de fluoreto variam de 0,12 a 11,00mg/L F, com média de 0,66 mg/L (considerando o valor anômalo de 11,00mg/L a média é de 1,35 mg/L F). Nessa zona ocorrem condições favoráveis ao aumento da solubilidade da fluorita relacionadas ao aumento de temperatura (Fig. 8.4b), salinidade (Fig. 8.4d), e razão sódio/cálcio (Fig. 8.5 a a c).

As entradas d'água dos poços na zona C e as características hidroquímicas das águas revelam a existência de fluxos mais profundos, provenientes das áreas a montante da bacia hidrogeológica do rio Verde Grande. Tal interpretação é concordante com as baixas concentrações de trítio natural verificadas nessa zona (Tab. 8.2).

As formas de recarga interpretadas são a infiltração das águas do rio Verde Grande e infiltração de uma pequena parcela das águas presentes nas coberturas colúvio-eluvionares nos períodos chuvosos no topo da serra da Jaíba. As águas infiltradas podem atravessar as camadas de arcóseos, calcários e pelitos das formações Três Marias e Serra da Saudade (Tab.8.5).

**Tabela 8.5. Formas de recarga e processos hidrogequímicos na Zona C**

<b>Formas de recarga</b>	<b>Processos hidrogequímicos</b>
Contribuição das águas do ACI a montante da bacia hidrogeológica	Dissolução/precipitação da calcita, dolomita e fluorita Concentração de íons ao longo do fluxo
Infiltração das águas dos aluviões do rio Verde Grande + recarga direta das águas do rio em fraturas.	Troca catiônica Dissolução/precipitação da calcita, dolomita e fluorita
Infiltração da água da chuva nos topos planos da serra da Jaíba e drenança nos colúvios e elúvios arenosos, arcóseos, subarcóseo, calcários e pelitos da zona não saturada e do aquitarde.	Adsorção de íons no solo Hidrólise de silicatos Dissolução da calcita, dolomita e fluorita Adsorção de íons nos siltitos argilosos Troca catiônica Oxidação de sulfetos

A **zona D** localiza-se a noroeste do município de Jaíba, próximo ao rio São Francisco. Os poços estão perfurados entre as cotas 454m e 471m. É a zona onde o nível d'água médio é mais profundo, a temperatura das águas mais elevada (temperatura média igual a 28,2 °C) e onde as águas apresentam os menores valores de  $e_h$  (Fig. 8.4 *a a c*).

Os baixíssimos valores de trítio, o modelo de fluxo apresentado no capítulo 7 e os dados da literatura (Silva 1995) caracterizam a zona D como parte da área de descarga regional da bacia hidrogeológica do rio Verde Grande. O nível d'água profundo, a temperatura elevada e a existências de condições redutoras são coerentes com essa interpretação.

Entretanto, diferentemente do esperado para águas de longo tempo de renovação, os valores de STD e CE indicam águas pouco salinizadas. As águas na zona D são essencialmente doces (apenas 17% dos poços apresentam águas salobras, Tab.8.2). A C.E. média é 562 $\mu$ S/cm, STD médio igual a 415mg/L e pH médio igual a 7,60. Os valores de cloreto, sulfato e cálcio são baixos, se comparados as demais zonas, e as concentrações de sódio altas (Fig.8.5 *a a c*). Além das águas bicarbonatadas cálcicas, ocorrem também águas bicarbonatadas sódicas e bicarbonatadas mistas.

Os índices de troca de bases de Scholer (1962) e o índice de troca de Ca e Na sugerem que trocas iônicas ocorrem entre o aquífero e as águas subterrâneas principalmente na zona D. O aquífero nessa zona libera o sódio e retém o cálcio (Fig.8.5 *b a d*).

Uma hipótese plausível para explicar esse comportamento é a existência de uma barreira geoquímica com boa capacidade de adsorção e troca. Essa barreira pode ser siltitos e ritmitos argilosos, com presença de argilas sódicas, não aflorantes, ou ainda a presença de solos argilosos. Silva (1984) também observou a existência das águas doces e sódicas nessa região e atribuiu o fato à presença de siltitos ou arcóseos.

Escodino (1982) por meio de estudos geoeletricos na região de Mocambinho, demonstram a existência de um paleovale preenchido por sedimentos que podem alcançar até 60m de espessura. O topo do calcário são foi inferido entre as cotas 400m e 430m. Apesar dos poços na zona D não estarem localizados exatamente no paleovale mapeado, é possível que exista uma continuidade dessa estrutura, e nesse caso os sedimentos argilosos, com presença de argilas sódicas, constituiriam a barreira geoquímica.

As concentrações de flúor nessa zona são bem superiores as demais. A média das concentrações de fluoreto para as nove amostras analisadas é de 1,80 mg/L, com valor máximo de 3,64 mg/L e mínimo de 0,25mg/L. Essas concentrações são consideradas prejudiciais a saúde, e na região do projeto Jaíba as águas são utilizadas para consumo humano, com ocorrências de fluorose dental associada já diagnosticada (Velásquez *et. al.*, 2009). Interpreta-se que o aumento da razão Na/Ca

(Fig.8.5 a a c) e os processos de acumulação ao longo do fluxo são os principais fatores hidroquímicos para o aumento das concentrações de fluoreto nessa zona.

Infere-se, portanto, que na zona D os processo hidrogeoquímicos mais importantes são troca catiônica entre sódio e cálcio e adsorção de íons nas argilas presentes nos solos/rochas (Tab. 8.6). Essas reações podem ser acompanhadas da precipitação de calcita e dolomita. A solubilidade da fluorita aumenta com o aumento da razão Na/Ca e com o aumento da temperatura, permitindo maior quantidade de fluoreto na solução sem que haja, contudo, a saturação.

Infere-se que na zona D, devido à espessa cobertura e o clima semi-árido, a entrada de águas meteóricas na cobertura é muito reduzida ou inexistente.

**Tabela 8.6. Processos hidrogeoquímicos na Zona D**

Processos hidrogeoquímicos	
Contribuição das águas do ACI a montante da bacia hidrogeológica	Dissolução/precipitação da calcita e dolomita Concentração de íons ao longo do fluxo
Reações na “barreira geoquímica” (solos ou rochas argilosas)	Troca catiônica Adsorção Precipitação de calcita e dolomita

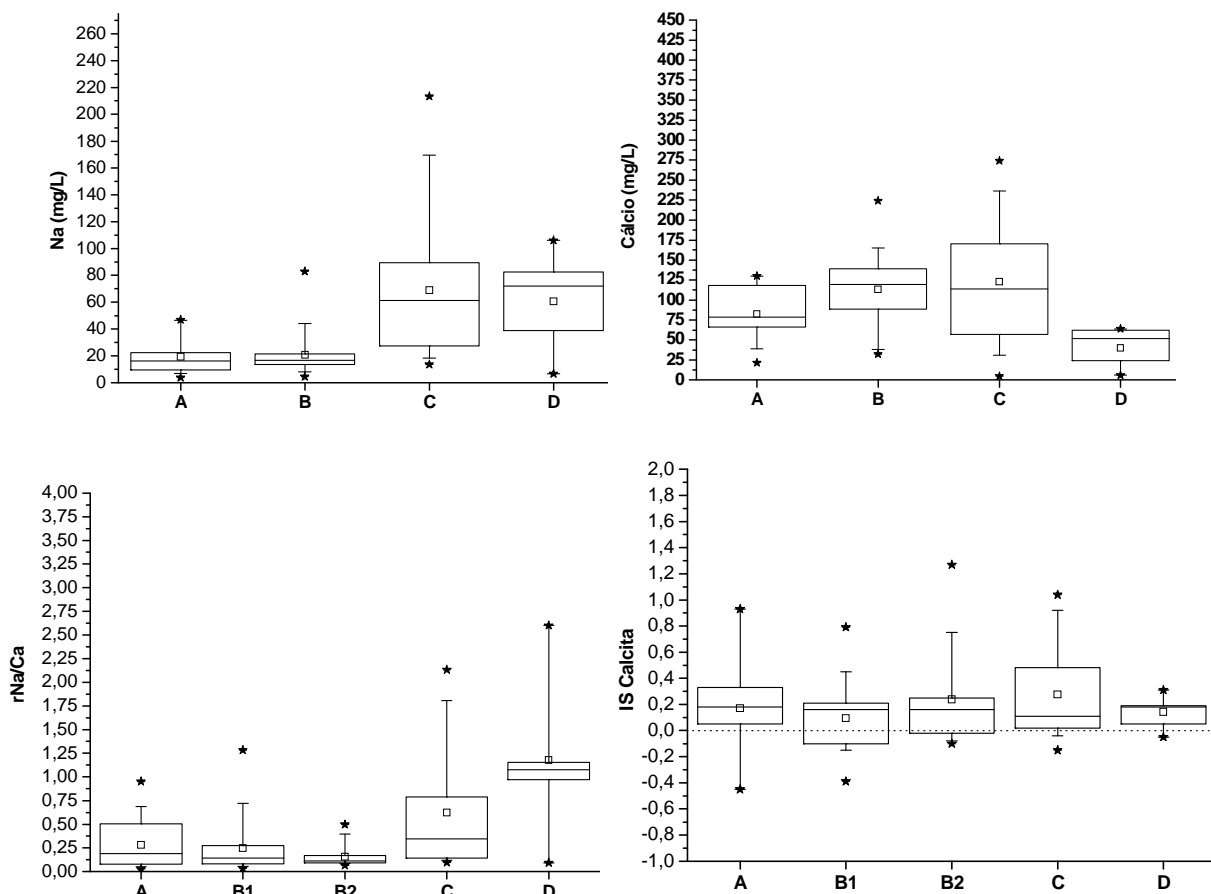
O zoneamento hidrogeoquímico apresentado é coerente com o modelo de circulação das águas discutido no capítulo 7. Nas zonas A e B a existência de fluxos locais é evidenciada pela existência de águas bicarbonatadas cálcicas, de baixa salinidade, em condições oxidantes e de temperaturas mais baixas. Identifica-se uma evolução química do fluxo subterrâneo de B1 para B2. Na zona C, onde estão perfurados os poços com entradas d’águas mais profundas, as águas apresentam C.E. elevada, concentrações elevadas de cloreto e maior temperatura. A zona D foi interpretada como zona de descarga regional e as concentrações de trítio (Tab. 8.2), temperaturas elevadas e as cotas baixas do nível d’água são coerentes com essa interpretação.

As correlações estatísticas também confirmam o modelo. Existe uma correlação inversa entre a temperatura das águas e as cotas do fundo do poço (*correlação de Spearman*- igual a -0,394\*\*) e entre a temperatura e as cotas do nível d’água (-0,555\*\*), mostrando que os poços com cotas do nível d’água mais baixas, mais profundas, as águas são mais quentes.

A cota do nível d’água correlaciona-se negativamente com a C.E (*correlação de Pearson* igual a -0,316<sup>1</sup>) e positivamente com o eH (*Spearman* 0,377\*), mostrando que as águas mais profundas são mais salinas e apresentam eh mais baixo. A cota do fundo do poço apresenta uma correlação negativa (*Spearman* -0,336\*) com o sódio, mostrando que as águas mais fundas são mais ricas nesse elemento.

<sup>1</sup> \*Correlação significativa para  $p < 0,05$ . \*\*Correlação significativa para  $p < 0,01$

O trítio se correlaciona negativamente com a temperatura (*Spearman* -0,527\*\*) e com o sódio (*Spearman* -0,675\*\*), confirmando a relação de que as águas mais antigas são mais quentes e mais ricas em sódio. As correlações estatísticas para C.E mostraram que os íons mais importantes para a salinização das águas são, segundo a ordem de importância: Cl (*Pearson* 0,891\*), Ca (*Spearman* 0,661\*), sulfato (*Pearson* 0,641\*\*), sódio (*Pearson* 0,531\*\*), bicarbonato (*Spearman* 0,514\*\*) e magnésio (*Spearman* 0,311\*\*)



**Figura 8.5.** Concentrações de sódio e cálcio, razão Na/Ca e valores do índice de saturação da calcita nas zonas hidrogeológicas.

A condutividade elétrica, o cloreto e o sulfato aumentam gradativamente da zona A para a subzona B1 e para a subzona B2 (Tabela 8.2 e Fig. 8.4) indicando a salinização ao longo do fluxo. Esses resultados corroboram a direção de fluxo local SW-NE identificadas no capítulo 7. Além do fluxo local SW-NE o mapa potenciométrico indica ainda que existe um divisor hidrogeológico nessa direção que seria o limite entre as zonas C e D. Portanto é bastante provável que o fluxo local SW-NE não abasteça a zona D, e esta zona receba águas apenas do fluxo profundo, que sofrerá

processos de troca catiônica, adsorção e precipitação na barreira geoquímica (comentada anteriormente) ocasionando a diminuição da salinidade das águas.

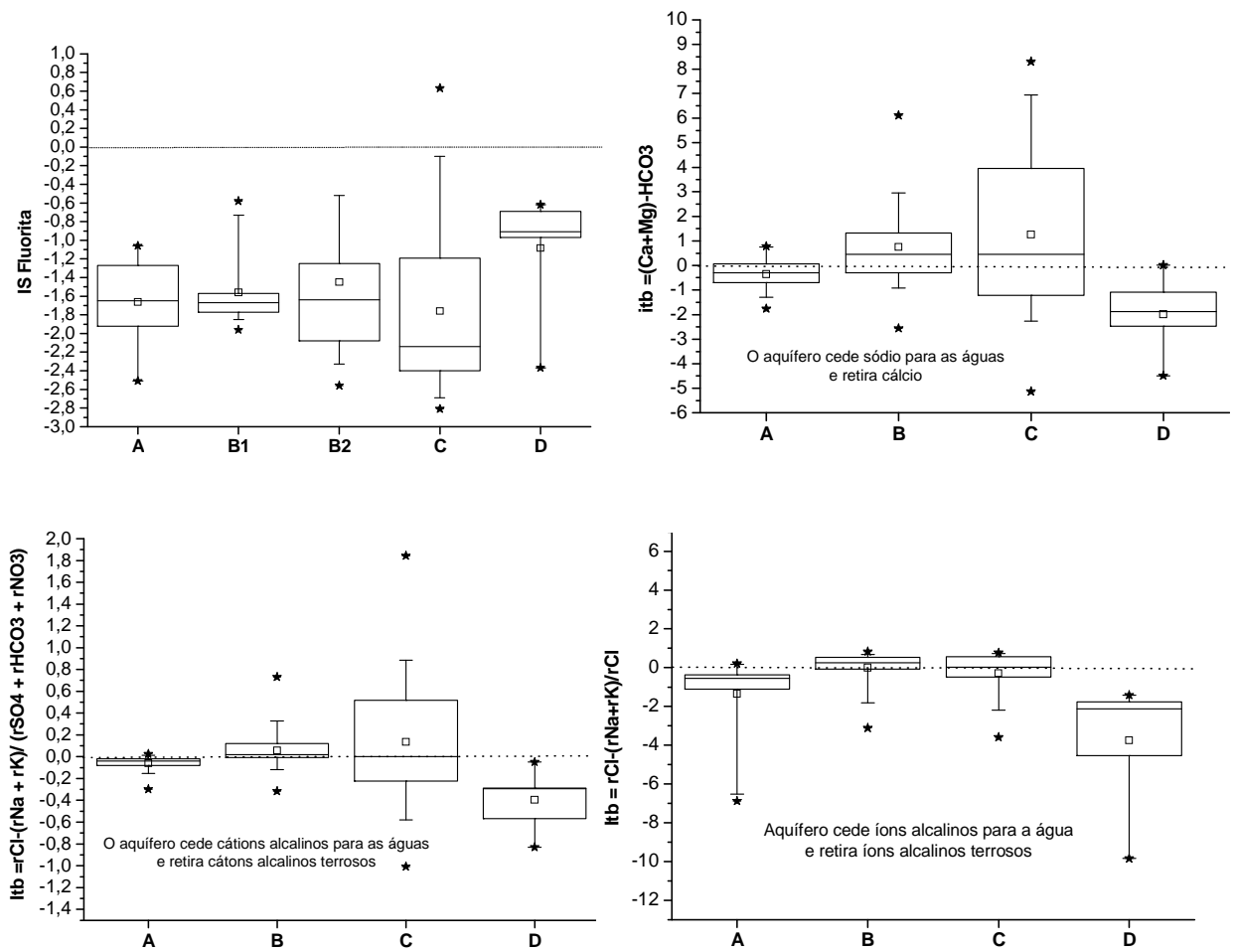
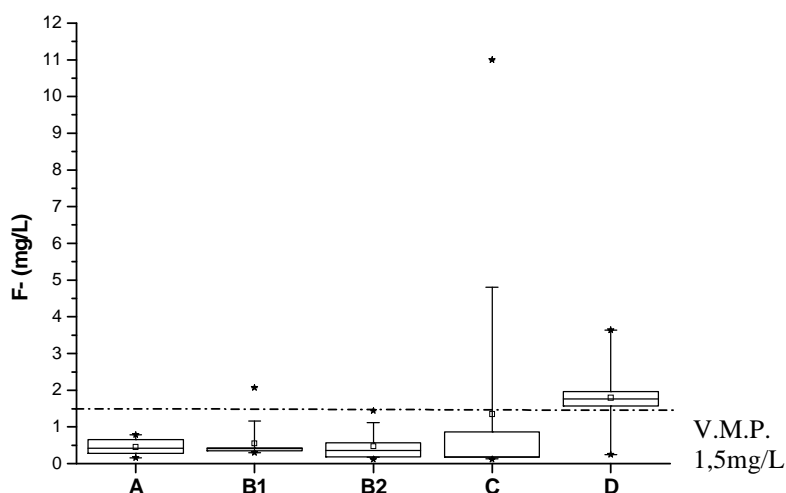


Figura 8.6. Índice de saturação da fluorita, e índices de troca de bases

## 8.2 Conclusões sobre o flúor nas águas do Sistema Aquífero Cárstico-fissural do Grupo Bambuí

As concentrações de fluoreto superiores a 1,5mg/L podem ser encontradas principalmente nas zonas C e D (Fig. 8.7 e Fig. 8.8). Em cada zona as características químicas das águas, as formas de circulação e a composição das rochas são os condicionantes das concentrações.



**Figura 8.7.** Concentrações de fluoreto nas subzonas e zonas hidrogeoquímicas. O valor máximo permitido na portaria MS.518/2004 para potabilidade é de 1,5 mg/L (linha tracejada).

As fácies mais enriquecidas em flúor são os calcarenitos e calcirruditos oolíticos e intraclásticos presentes nos aquíferos Carbonático Superior (topo da Fm. Serra da Saudade) e Carbonático Inferior (Fm. lagoa do Jacaré). As ocorrências de fluorita macroscópica e microscópica e as ocorrências de águas com concentrações de fluoreto elevadas não apresentam uma coincidência espacial direta (Fig.8.8). As águas são insaturadas em relação à fluorita (índice de saturação negativo, Fig.8.6a). Apenas um poço na zona C apresenta águas saturadas em relação à fluorita.

Portanto, os íons fluoreto continuam sendo adicionados ao longo dos fluxos e podem alcançar concentrações muito altas ao longo dos fluxos regionais e nas áreas de descarga do aquífero, onde estão as águas mais antigas, de temperatura mais elevada, e com alta razão Na/Ca, esta última confirmada pela correlação positiva entre o flúor e o sódio (*Pearson* 0,465\*\*) e negativa entre o flúor e o cálcio (*Spearman* -0,428\*\*).

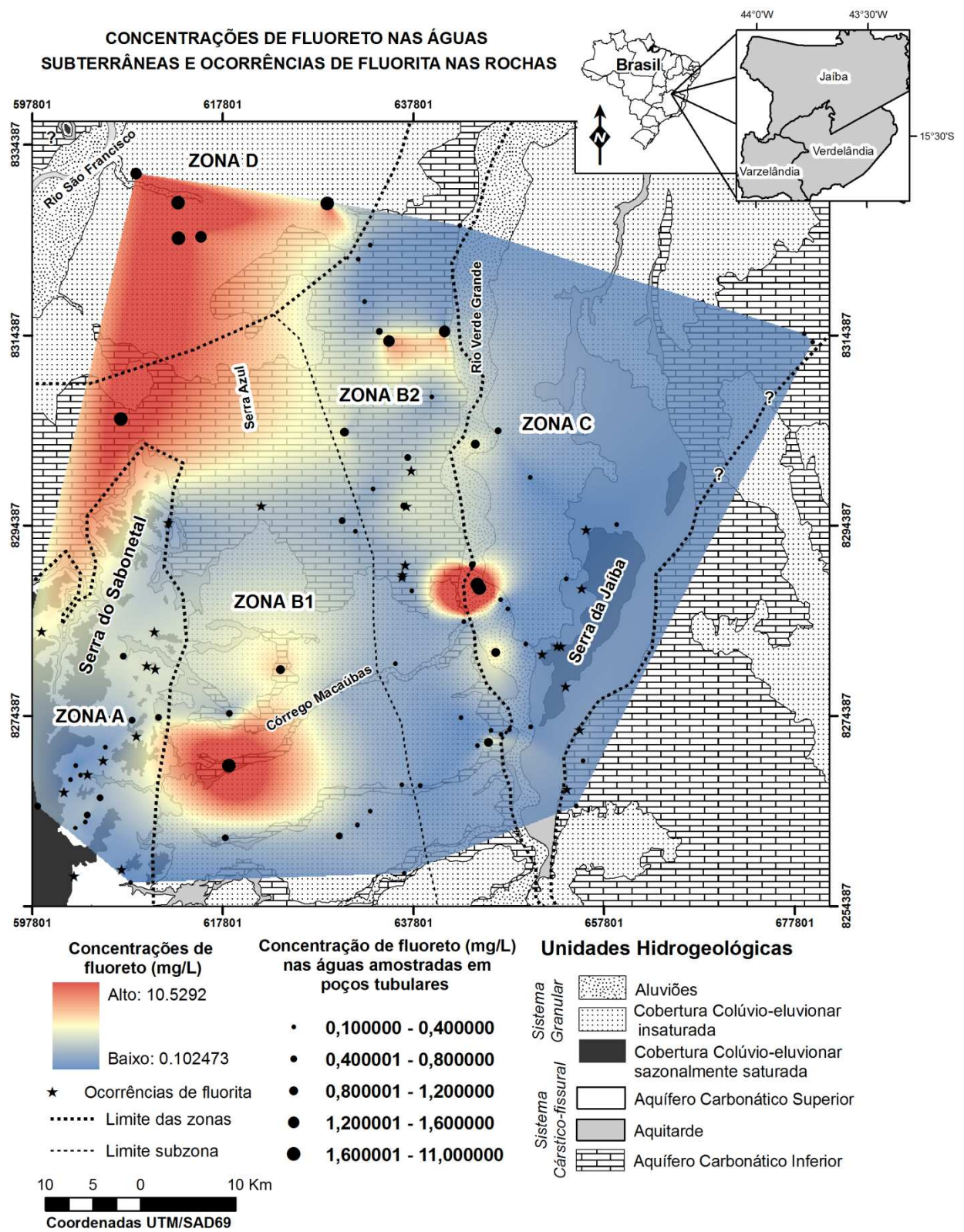


Figura 8.8. Concentrações de fluoreto nas águas subterrâneas e ocorrências de fluorita nas rochas