

CAPÍTULO 7

MODELO HIDROGEOLÓGICO E CONTROLE ESTRUTURAL NA CIRCULAÇÃO DAS ÁGUAS E NAS CONCENTRAÇÕES DE FLUORETO NO SISTEMA AQUÍFERO CÁRSTICO-FISSURAL DO GRUPO BAMBUÍ

As rochas carbonáticas e pelíticas neoproterozóicas do Grupo Bambuí formam um sistema aquífero importante em Jaíba, Verdelândia e Varzelândia onde estão perfurados mais de 300 poços tubulares (ver Anexos VI e VIII). A água subterrânea é utilizada pelas prefeituras municipais e por particulares para consumo humano, irrigação e dessedentação de animais.

Este capítulo descreve o modelo conceitual do sistema aquífero do Grupo Bambuí a partir da caracterização das unidades hidrogeológicas, das formas de circulação e da composição das águas. Foram alvos do capítulo testar a existência de um controle estrutural nas concentrações de fluoreto e a influência das formas de circulação das águas para o aumento das concentrações desse íon.

O modelo apresentado foi construído com base em dados obtidos na pesquisa de campo, análise das características das captações, no estudo de fraturas e feições cársticas, do mapa potenciométrico, além da análise de isótopos de trítio natural nas águas subterrâneas. Foi investigado o controle estrutural do fluxo pelo estabelecimento de relações entre as direções de fraturamento, feições cársticas nas rochas e lineamentos de relevo (Anexo V), e pela análise da influência dessas estruturas na produtividade dos poços e na salinidade das águas subterrâneas.

7.1 Sistemas e unidades hidrogeológicas

Na região podem ser identificados dois sistemas hidrogeológicos: sistema cárstico-fissural, composto pelas intercalações de calcários e pelitos do Grupo Bambuí e o sistema granular, em aluviões e coberturas colúvio-eluvionares. Todos os poços tubulares são abastecidos pelo sistema cárstico-fissural, especialmente onde predominam os calcários. Os sedimentos são importantes como aquífero nos aluviões, onde as águas freáticas são aproveitadas por meio de poços escavados (cacimbas) e como aquíferos sazonais nas coberturas colúvio-eluvionares no topo plano das serras da Jaíba, Sabonetal e São Felipe.

As rochas do Grupo Bambuí, segundo os dados de campo e estudo petrográficos, apresentam macroporosidade relacionada às feições cársticas e fraturas. Observa-se em lâmina delgada a existência de microporosidade do tipo intrapartícula, interpartícula e poros

em zonas de estilolização. Os calcários apresentam-se recristalizados e, portanto, a microporosidade existente é muito reduzida e com pouca conexão entre os espaços vazios. Assim, o armazenamento e fluxo da água ocorrem em fraturas, falhas e principalmente em feições cársticas.

Optou-se no mapeamento hidrogeológico por não utilizar os nomes das unidades litoestratigráficas formais, e sim agrupar as rochas de acordo com suas propriedades hidrogeológicas.

O *Sistema Aquífero Cárstico-fissural do Grupo Bambuí*, na área de estudo, pode ser dividido em quatro unidades hidrogeológicas (Fig. 7.1): Aquífero Carbonático Inferior, Aquitarde, Aquífero Carbonático Superior e Zona Não Aquífera (Tab. 7.1). A zona não aquífera não pode ser visualizada em mapa (Fig. 7.1) devido existência da cobertura granular.

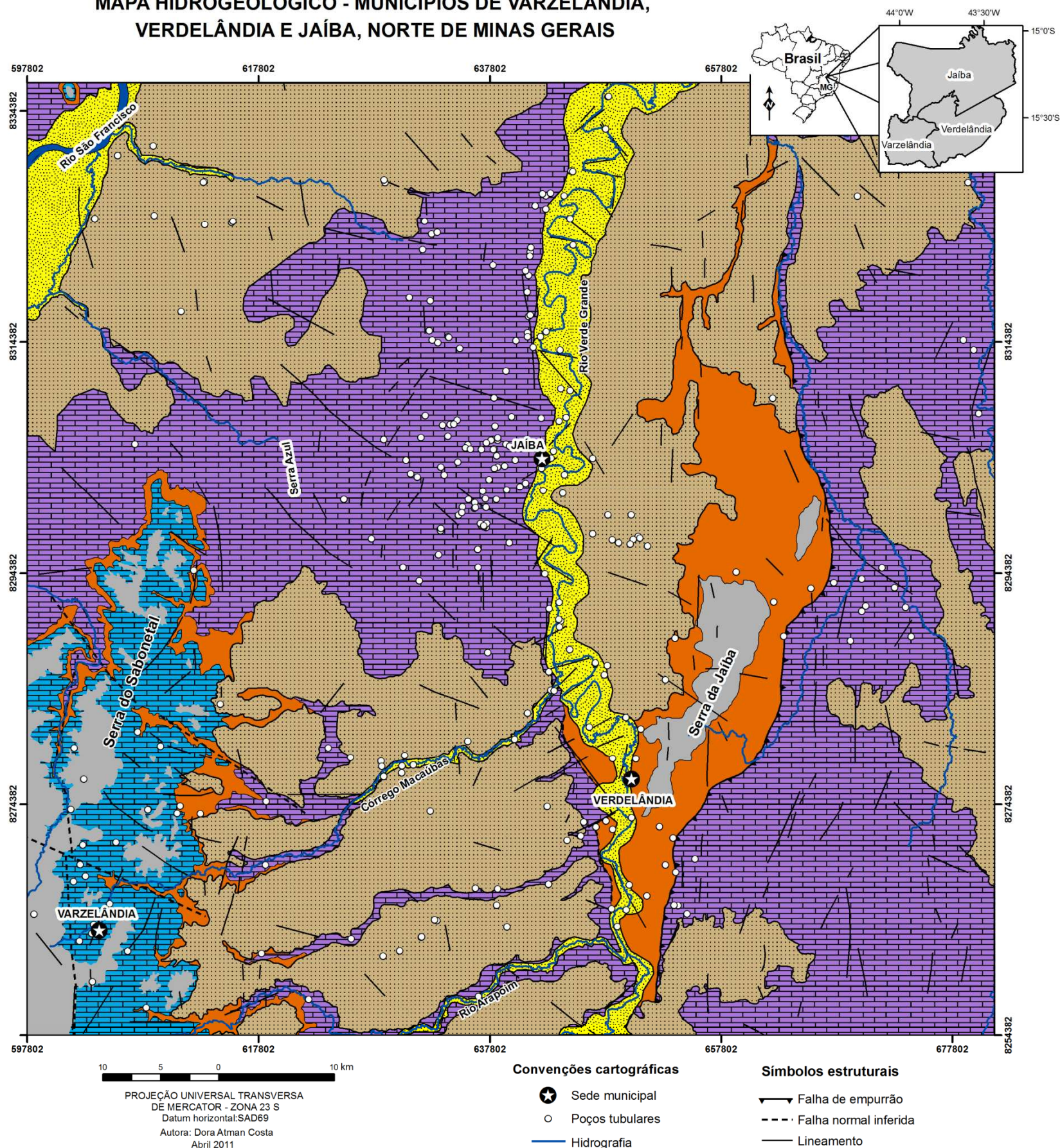
Aquífero Carbonático Inferior (ACI) - Ocorre na porção central da área, a leste e noroeste da Serra do Sabonetal e a sudeste da Serra da Jaíba, com rochas aflorantes entre as cotas 480m e 550m. É composto por calcários aloquímicos (com calcarenito e calcirrudito oolítico/pisolítico, calcilutito) e microbialito com estromatólitos colunares correlacionados a Fm. Lagoa do Jacaré. Próximo à base da serra do Sabonetal predominam intercalações de calcilutitos e pelitos. Além de calcita os calcários são compostos por quantidades variáveis de dolomita e quartzo, com frações inferiores a 10% de albita, clorita, moscovita, microclina e minerais opacos. Apresentam-se bastante recristalizados, localmente com substituição da calcita, presente no interior dos aloquímicos ou na matriz, por sílica microcristalina, dolomita e fluorita.

Os afloramentos são em geral em lajedo, frequentemente observados no interior de dolinas ou vales cársticos, que são muito comuns. Condutos e fendas de espessura centimétrica a métrica, sumidouros e surgências ao longo das drenagens controladas estruturalmente são indícios de um carste desenvolvido em profundidade (Fig. 7.2 a, b e c). A análise dos perfis dos poços tubulares indica que essa unidade hidrogeológica tem até 200 metros de espessura.

Na maior parte da área o ACI tem característica de aquífero livre, sendo sobreposto apenas pelas coberturas elúvio-coluvionares. Na base da serra da Jaíba e na serra do Sabonetal é coberto por pelitos e ritmitos, com contato gradacional.

A primeira entrada d'água dos poços perfurados no aquífero ACI aflorante ou sob as coberturas colúvio-eluvionares está entre as cotas 423m e 519m e a profundidade do nível d'água máxima é 50 metros. Há vazões entre 1m³/h e 320m³/h.

MAPA HIDROGEOLÓGICO - MUNICÍPIOS DE VARZELÂNDIA,
VERDELÂNDIA E JAÍBA, NORTE DE MINAS GERAIS



SISTEMA AQUÍFERO CÁRSTICO-FISSURAL BAMBUÍ
Rochas do topo do Grupo Bambuí (neoproterozóico)

Aquífero Carbonático Superior

Aquífero livre composto por calcarenitos, calcilutitos, calcirruditos e biolíticos associados ao topo da Fm. Serra da Saudade. Permoporosidade é relacionada a feições cársticas, fraturas e falhas. Setenta e oito por cento dos poços tem vazões menores que 20m³/h e 15% entre 20m³/h e 103m³/h. Nível d'água entre as cotas 630 e 800m.

Aquitarde

Siltitos, ritmitos, margas, com lentes e camadas de calcário. Correlacionáveis a Fm. Serra da Saudade. Fraturamento elevado mas com permoporosidade muito reduzida devido a fraturas fechadas ou de abertura muito estreita.

Aquífero Carbonático Inferior

Aquífero livre composto por calcarenito, calcirrudito, calcilutito, e biolítico correlacionáveis a Fm. Lagoa do Jacaré. Permoporosidade relacionada a feições cársticas, fraturas e falhas com zonas carstificadas de alto potencial hídrico. Trinta e nove por cento dos poços tem vazões menores que 20m³/h, 46% entre 20m³/h e 100m³/h e 15% entre 100m³/h e 320m³/h. Nível d'água entre as cotas 420m a 560m.

SISTEMA AQUÍFERO GRANULAR
Paleógeno/Neógeno

Aluvião (zona saturada)

Areias, argilas, lentes conglomeráticas e concreções calcárias. Importância hidrogeológica limitada ao abastecimento doméstico por meio de cisternas.

Cobertura Colúvio-eluvionar (zona sazonalmente saturada)

Areias e argilas vermelhas localizadas no topo das serras resultantes do intemperismo e erosão das rochas da Fm. Três Marias e/ou do Grupo Uruçuia. Formam depósitos de até 30 metros de espessura. Importante como área de abastecimento de nascentes sazonais.

Cobertura Colúvio-eluvionar (zona insaturada)

Areias e argilas vermelhas que distribuem-se no vale do rio Verde Grande e São Francisco. Podem alcançar espessura de até 60 metros. Toda a água infiltrada no meio não é suficiente para saturar os solos e fica restrita às camadas superiores sujeitas a intensa evaporação.

Figura. 7.1. Mapa Hidrogeológico da região de Verdelândia, Varzelândia e Jaíba, norte de Minas Gerais.



Figura. 7.2. Fraturas e feições cársticas nas unidades hidrogeológicas que compõem o Sistema Aquífero Cárstico-fissural Bambuí. **a)** Dolina de fundo rochoso com fratura N10W no centro, ACI. **b)** Sumidouro no vale cárstico no ACI. **c)** Surgência cárstica controlada por fratura de direção N10W no ACI. **d)** Família de fraturas no Aquitarde. **e)** Trecho do rio Verde Grande controlado por fraturas N10W nos pelitos. **f)** Lábias e fendas cársticas abertas no ACS. **g)** Paredão calcáreo com feições cárstica no ACS (*setas*: fenda com colapso de blocos, condutos arredondados e elípticos; *linha pontilhada*: dissolução paralela ao acamamento. **h)** Fratura e condutos com espeleotemas e indícios de percolação de água. (As coordenadas UTM e a cota do ponto estão registradas em cada figura)

Cerca de 34% dos poços apresentam valores de vazão menores do que 20 m³/h e 18% maiores do que 100 m³/h (Tab. 7.1). Destacam-se duas regiões com maior frequência de vazões altas e excepcionais: a porção central da área e a região sudeste da serra da Jaíba (Fig. 7.3), ambas representando zonas de maior carstificação e com boas condições de recarga.

Na primeira região, a recarga é facilitada pela existência de dolinas, solos rasos, relevo plano e maior exposição das rochas carbonáticas. Nas proximidades da serra da Jaíba a infiltração e permeabilidade são favorecidas pelas estruturas rúpteis resultantes da maior deformação nas rochas.

O pH das águas varia entre 6,32 e 8,23, com mediana de 7,02. A C.E. está entre 427 e 1417 µS/cm, com média de 780 µS/cm. Os maiores valores de C.E. encontram-se a sudeste da serra da Jaíba e, localmente, nas proximidades do rio Verde Grande (Fig. 7.3).

Os poços abastecidos pelo ACI que atravessam o aquitarde (pelitos) apresentam vazões bastante inferiores aos poços perfurados nos calcários aflorantes, com média de 22 e 64 m³/h, respectivamente (Tab. 7.1), evidenciando a importância das exposições do calcário para a recarga aquífera.

As águas do ACI sob os pelitos são mais salinas (média: 1125 µS/cm) e alcalinas (média: 7,29) do que as águas do ACI aflorante ou sobre a cobertura granular. A mediana do pH é 7,23. A primeira entrada d'água (a partir da superfície) dos poços localizados sobre o aquitarde, mas que captam águas do ACI, está entre 345 e 569 m.

Interpretam-se três formas de recarga principais para o ACI: infiltração direta das águas de chuva em zonas de absorção cárstica (sumidouros e fraturas abertas), infiltração indireta de águas superficiais através dos aluviões e dolinas, e, secundariamente, e de forma indireta a partir das camadas aquíferas superiores com gotejamento através do aquitarde. A recarga indireta deve ocorrer, também, ao longo do rio Verde Grande e ao longo dos córregos Escuro e Macaúbas nas épocas de chuvas.

Nas áreas planas do vale do rio Verde Grande e nos interflúvios de seus afluentes com cobertura elúvio-coluvionar a infiltração não é suficiente para saturar os solos e gerar excedentes, como indicam os testes com os infiltrômetros e os resultados do balanço hídrico anual (Velásquez *et al.* 2009).

Aquitarde - O aquitarde reúne rochas predominantemente pelíticas (siltitos arenosos, siltitos argilosos e ritmitos silto-areno-argilosos), com calcário e margas subordinados, associados à Fm. Serra da Saudade. As rochas apresentam elevada frequência de fraturas de alto ângulo e paralelas ao S₀ (Fig. 7.2 d). Entretanto, os planos de acamamento e fraturas têm aberturas muito estreitas e incipiente conexão, que dificultam o armazenamento e o fluxo de

água subterrânea. Constituem a base da serra da Jaíba e afloram ao longo do rio Verde Grande e nas escarpas das serras do Sabonetal e São Felipe e (Fig. 7.2e).

Os principais minerais constituintes das rochas pelíticas são: quartzo, clorita, muscovita, às vezes biotita, e opacos. Embora a percolação nessas rochas tenha o caráter de drenança, exceção a este comportamento ocorre a sul da serra da Jaíba, em Verdelândia, onde três poços exploram água exclusivamente dessa unidade na zona mais deformada próximo a falha de empurrão que coloca lado a lado os calcários do *ACI* com os pelitos. Dois desses poços apresentam dados de vazões, sendo 8,4 e 30 m³/h, indicando que, localmente, esse aquítarde pode funcionar como um aquífero de baixo potencial hídrico.

Apesar de ser comum o aumento considerável de permeabilidade das rochas próximo a zona de falha, na área em foco, o contato calcário-pelito apresenta um grande contraste de permoporosidade favorecendo a diminuição da velocidade do fluxo, aumento do tempo de contato entre água-rocha e, conseqüentemente, o aumento da salinidade da água (Fig. 7.3).

Aquífero Carbonático Superior (ACS) – Está localizado nas serras do Sabonetal e São Felipe com rochas calcárias aflorantes entre as cotas 636 e 822 m, no domínio das rochas do topo da Fm. Serra da Saudade. Foram cadastrados 26 poços perfurados nesse aquífero. As entradas d'água variam entre as cotas 683 e 744 m. Trata-se de aquífero livre, composto principalmente por calcarenito/calcirrudito olítico/písolítico e intraclástico, com calcilutitos e menos frequente estromatólito. Na base e no topo apresentam intercalações pelíticas. Os calcários são compostos preferencialmente por calcita, com quantidades variadas de quartzo, com substituição de calcita em aloquímicos e na matriz por sílica microcristalina, fluorita e óxidos de ferro.

O ACS exhibe condutos e cavernas de dimensões métricas a decamétricas especialmente no calcarenito oolítico intraclástico, aproveitando as direções de fraturamento pré-existent e/ou fraturas preenchidas por veios de calcita. A presença do calcilutito pode ser responsável por uma concentração do fluxo, com um aumento local da permeabilidade horizontal. A permeabilidade vertical, com dissolução preferencial das fraturas subverticais, é favorecida nas porções aflorantes facilitando a infiltração das águas de chuva. Nesses casos há formação de fendas que podem interceptar as camadas mais carstificadas e formar cavernas (Fig. 7.2 *f, g* e *h*).

Setenta e cinco por cento das vazões são menores do que 20 m³/h e o restante está entre 20 m³/h e 103 m³/h. As águas apresentam pH entre 6,84 e 7,96. São águas menos salinas, com C.E. entre 504 e 790 µS/cm.

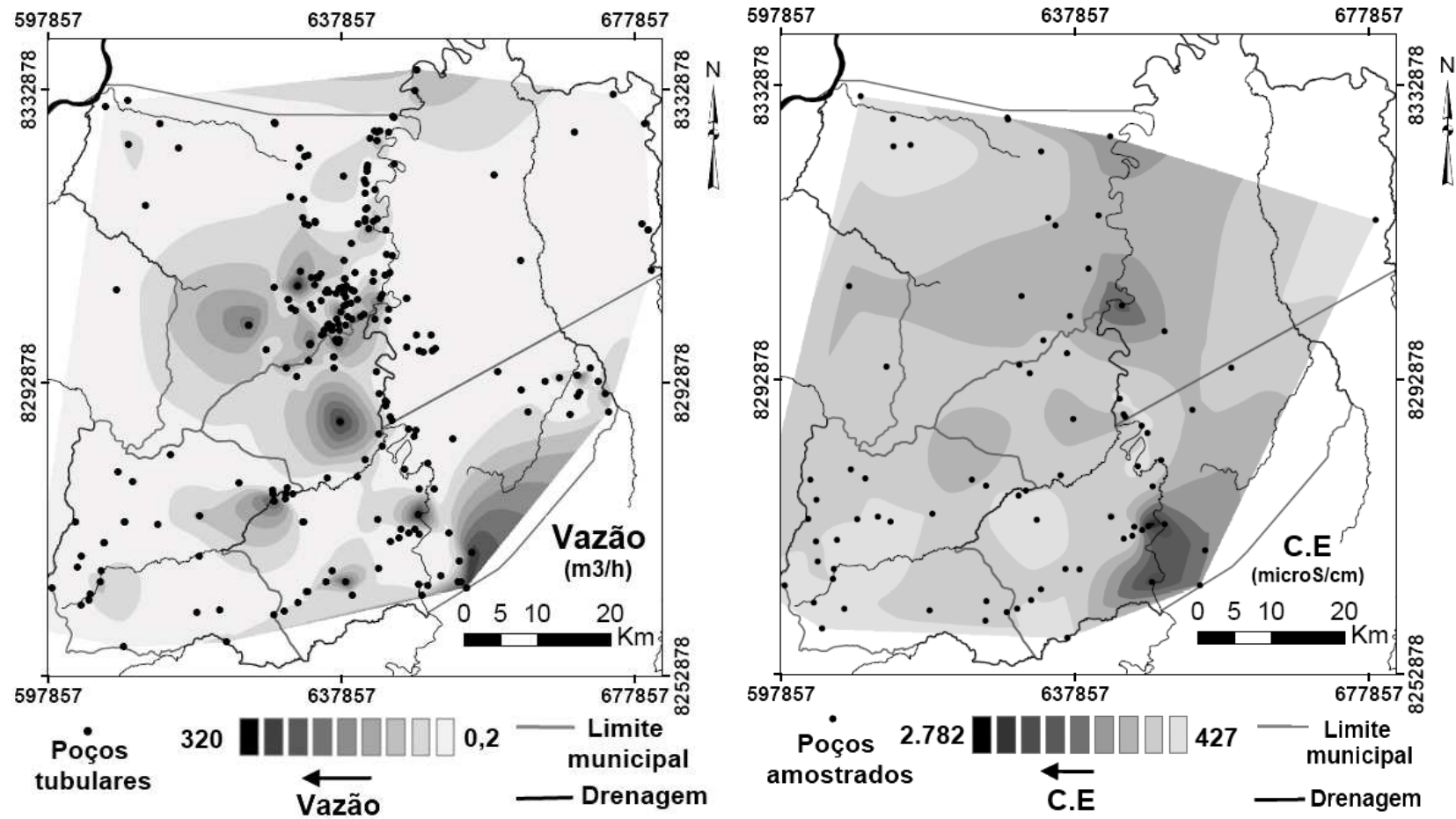


Figura 7.3 Mapas de isovalores de vazão dos poços tubulares e condutividade elétrica das águas do Sistema Aquífero Cárstico-fissural do Grupo Bambuí

Tabela 7.1. Características do Aquífero Carbonático Superior (ACS) e Aquífero Carbonático Inferior (ACI).

UNIDADE	ACS	ACI			
		Total	Aflorante	Sob pelitos	
Espessura máx. (m)	90	200	200	200	
Cota Superfície	med.	718	485	486	484
	média	723	491	490	496
	min.	636	454	454	459
	max.	769	609	539	609
	d.p	32	23	17	35
	n	18	186	140	46
1ª entrada d'água (Cota m)	med.	702	463	464	445
	média	707	461	468	447
	min.	683	345	423	345
	max.	744	569	519	569
	d.p	22	33	21	49
	n	5	63	44	19
Cota N.A. (m)	med.	716	471	472	469
	média	716	472	473	470
	min.	659	421	424	421
	max.	764	550	523	550
	d.p	30	19	19	20
	n	16	178	137	41
Q (m³/h)	med.	13	25	32	14
	média	20	56	64	22
	min.	5	0,2	1	0,2
	max.	103	320	320	112
	d.p	23	69	73	26
	n	16	238	191	47
	<20	75%	39%	34%	64%
	20-60	19%	29%	30%	26%
	60-100	6%	17%	19%	9%
	100-200	-	8%	9%	2%
>200	-	7%	9%	-	
C.E (µS/m)	med.	660	754	740	893
	média	649	872	780	1125
	min.	504	427	427	507
	max.	790	2569	1417	2569
	d.p	83	395	231	607
	n	16	60	44	16
pH	med.	7,26	7,07	7,02	7,23
	média	7,38	7,20	7,17	7,29
	min.	6,84	6,32	6,32	6,60
	max.	7,96	8,40	8,23	8,40
	d.p	0,36	0,48	0,47	0,52
	n	15	60	44	16
F⁻ (mg/L)	med.	0,42	0,37	0,37	0,26
	média	0,45	0,90*	0,74	1,24**
	min.	0,16	0,12	0,12	0,12
	max.	0,79	11,00	3,64	11,00
	d.p	0,22	1,67	0,75	2,74
	n	9	52	35	17

Desconsiderando o valor anômalo de 11,00 mg/L: * média = 0,70 mg/L ** média = 0,63 mg/L

No Aquífero Cárstico Superior a recarga direta da água meteórica é significativa nas exposições de rochas fraturadas e carstificadas e sobre os topos planos das serras do Sabonetal e São Felipe. A descarga ocorre em nascentes permanentes e córregos localizados próximo ao contato com o aquífero.

Zona não aquífera – Localiza-se na serra do Sabonetal, acima do ACS, e na serra da Jaíba, acima do Aquífero. Esta zona está sob a cobertura colúvio-eluvionar. Na serra do Sabonetal reúne as rochas da Fm. Três Marias. São camadas pelíticas que contém intercalados calcilitos, margas, arcósios e lentes de calcários que são sobrepostos por arenitos e siltitos finos ferruginosos. Na serra da Jaíba, afloram, acima do aquífero, as associações carbonáticas da Fm. Serra da Saudade e a Fm. Três Marias. São cerca de 80 metros de espessura com calcário, arcósio e arenito pouco fraturado e pouco permeáveis. Não existem poços profundos cadastrados nessa região, o que, aliado à ausência de nascentes e drenagens perenes, denotam a reduzida importância hídrica das rochas da serra da Jaíba. Essa serra foi considerada por Silva (1984) como de baixo potencial hídrico e Freitas *et al.* (2008) não a classificaram como uma área importante de recarga.

O *Sistema aquífero granular* na área em estudo pode ser dividido em três unidades (Fig. 7.1): Aluviões, Coberturas colúvio-eluvionares sazonalmente saturadas e Coberturas colúvio-eluvionares insaturadas.

Aluviões (zona saturada) – Distribuem-se ao longo dos rios São Francisco, Verde Grande e seus principais tributários. São depósitos resultantes do retrabalhamento fluvial de materiais detríticos diversos. São constituídos por areias brancas, amareladas, cascalhos e argilas localmente concrecionados por precipitação de carbonatos. Os aluviões têm importância hidrogeológica limitada ao abastecimento doméstico por meio de cisternas.

Coberturas colúvio-eluvionares sazonalmente saturadas – Ocorrem nos topos planos e nas altas encostas das serras do Sabonetal, São Felipe e na serra da Jaíba. São formadas pelo manto de intemperismo e por depósitos sedimentares provenientes da erosão das rochas da Fm. Três Marias e do Grupo Urucua. São coberturas arenosas, porosas e permeáveis que são saturadas nos períodos chuvosos e que descarregam em várias nascentes, principalmente no contato com o topo do Grupo Bambuí.

Coberturas colúvio-eluvionares insaturadas - São compostas por sedimentos resultantes da erosão das rochas em terrenos elevados e pelo intemperismo dos calcários, pelitos e margas presentes no vale dos rios Verde Grande e São Francisco. São areias e argilas vermelhas, que podem alcançar espessura de até 60 metros, mas que tem reduzida importância hidrogeológica para armazenamento e recarga. Grande parte da água de chuva nas áreas desse

tipo de cobertura escoo ou é evaporada, com apenas uma pequena parcela sendo infiltrada nas camadas superiores do solo. A porção infiltrada não é suficiente para saturar o aquífero granular ou recarregar o sistema aquífero adjacente (Velásquez *et al.* 2009).

7.2 Análises de fraturas, feições cársticas e lineamentos

As rochas das unidades aquíferas encontram-se bastante fraturadas e carstificadas, com predominância de fraturas subverticais. Para identificar o padrão do fraturamento e do desenvolvimento da carstificação nas unidades aquíferas, foram medidas em campo direções de fraturas, condutos e eixo longitudinal de cavernas. Assim foi possível comparar as direções dessas estruturas com os lineamentos demarcados no relevo.

Existe uma similaridade na dispersão das direções de fraturas no *Aquífero Cárstico Inferior* (ACI) e no *Aquífero Cárstico Superior* (ACS). Entretanto, no ACI as direções de fraturas de maior frequência são N60-70W e N10-20E, enquanto no ACS destacam-se as direções N20-30E e N0-10W (Fig. 7.4).

A carstificação (condutos e eixo longitudinal de cavernas) se destaca no ACI na seguinte ordem decrescente de frequência: N0-10W, N50- 60W, N10-30E e N60-70E e no ACS nas direções N30-40E e N60-70W.

A figura 7.4 evidencia a existência de concordância do padrão de carstificação com o do fraturamento em cada aquífero, com exceção para a baixa frequência de feições cársticas na direção N0-10W do aquífero superior.

Embora seja notória a similaridade das direções de fratura entre os dois aquíferos, o mesmo não ocorre com relação às direções mais frequentes de carstificação entre o ACS e ACI, indicando distintas condições hidrodinâmicas na evolução do carste. A direção de dutos N50-70W é frequente nos dois aquíferos.

Os lineamentos obtidos a partir da interpretação da imagem de satélite na escala 1:50.000 marcam satisfatoriamente dois intervalos de direções comuns nos dois aquíferos: N30-70W e N20-50E, mesmo exibindo elevada dispersão (Fig. 7.4). As direções N10W a N10E são mais evidentes no ACI.

A tabela 7.2 sintetiza as direções das fraturas, dutos e lineamentos de cada unidade aquífera. As direções N60W e N30E destacam-se por serem comuns às duas unidades para todos os três parâmetros sob análise. Destaca-se que as direções de lineamentos refletem de forma satisfatória as direções mais frequentes de carstificação e fraturas.

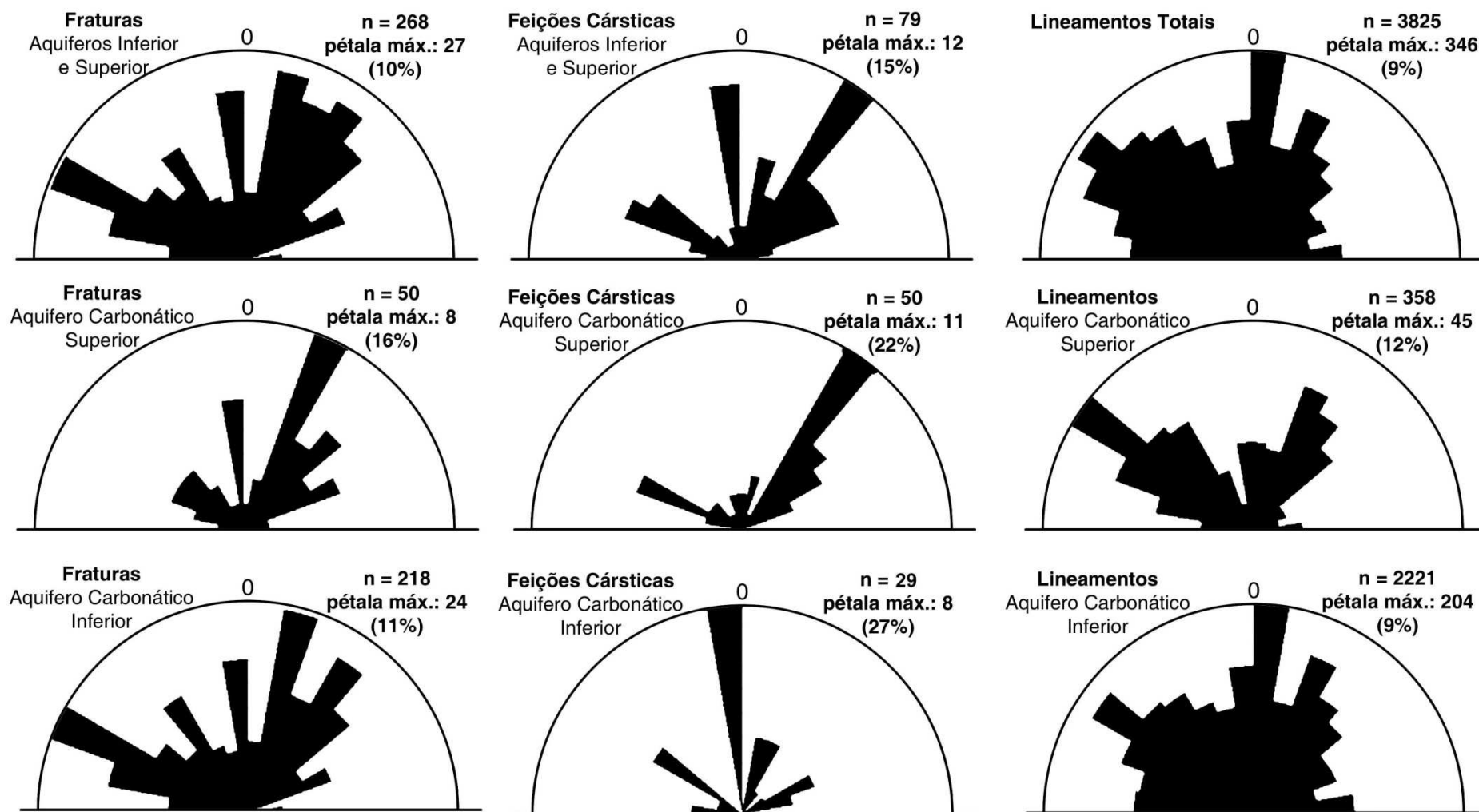


Figura. 7.4. Comparação entre as frequências das direções de fraturas, carstificação e lineamentos para os aquíferos cársticos Inferior (ACI) e Superior (ACS). O diagrama de lineamentos totais resume a estatística de todos os lineamentos traçados na área de estudo e abrange uma área maior que a soma das áreas dos aquíferos ACI e ACS.

Tabela 7.2. Comparação entre direções de fraturas, feições cársticas e lineamentos mais frequentes no Aquífero Cárstico Inferior (ACI) e Aquífero Cárstico Superior (ACS). Em negrito os valores modais.

Aquífero	FRATURAS	CARSTE	LINEAMENTOS
ACI	N60-70W	N50-60W	N50-60W
	N10-20E	N10-20E	N0-10E
	N30-40E	N20-30E	N20-40E
	N0-10W	N0-10W	N0-10W
	N60-70E	N60-70E	
ACS	N20-30E	N30-40E	N20-30E
	N40-70W	N60-70W	N50-60W
	N40-70E	N40-60E	N30-40E
	N0-10W		

7.3 Estudo de lineamentos e parâmetros hidrogeológicos

Após constatar que os lineamentos traçados refletem as direções mais frequentes de carstificação e fraturas nas unidades aquíferas, foi realizado o estudo dos lineamentos e parâmetros hidrogeológicos. Testou-se a existência de diferenças na composição das águas e produtividade dos poços associados a lineamentos (AL) e daqueles não associados (NAL), e entre poços locados próximo a lineamentos de direções diferentes. Essas análises, apresentadas a seguir, foram realizadas para todos os poços perfurados no sistema cárstico-fissural, sem fazer distinção entre o ACI e ACS. A área de ocorrência do ACS é muito inferior à área do ACI, o que inicialmente sugere uma análise estatística separada. Entretanto, há poucos dados disponíveis para o ACS para a realização de inferências estatísticas. Dada a importância desse aquífero no sistema e para o entendimento da problemática do flúor, a análise em conjunto foi estabelecida tendo em vista o melhor aproveitamento dos dados para a identificação das associações entre flúor e vazão, características hidroquímicas e lineamentos no sistema aquífero do Grupo Bambuí.

7.3.1 Comparação entre vazão, condutividade elétrica, cloreto, unidades de trítio e fluoreto entre poços associados a lineamentos e poços não associados

Um poço associado a lineamento (AL), nesse trabalho, é aquele localizado a uma distância menor ou igual a 250 metros de qualquer lineamento. As feições lineares traçadas na escala 1:50.000 (Anexo V, Fig. 7.5) representam vales secos, drenagens encaixadas, eixos de dolinas elípticas, alinhamento de dolinas e uvalas, contraste de umidade na vegetação. No item 7.2 foi apresentada a semelhança entre as direções de lineamento e as direções de

fraturas e feições cársticas medidas em campo, sugerindo que as feições geomorfológicas lineares mapeadas têm relação com essas estruturas em subsuperfície. Assim poços AL estão também relacionados às zonas de fraturas e feições cársticas com representatividade na superfície.

Como a permoporosidade das unidades hidrogeológicas definidas está relacionada com fraturas e feições cársticas, não são prováveis poços tubulares nesse sistema aquífero que não interceptam tais estruturas. Portanto, infere-se que os poços não associados a lineamentos (NAL) sejam também poços abastecidos por fluxos em fraturas e feições cársticas. Sua não associação a lineamentos, entretanto, pode ser interpretada pela existência de:

- a) zonas de cobertura granular espessa, que impede a identificação da zona fraturada subjacente;
- b) zonas com predominância de fraturas/dutos subhorizontais, que por isso não se manifestam na superfície;
- c) zonas de fraturamento/carstificação profunda;
- d) zonas de fraturas e dutos que se relacionam com lineamentos que, entretanto, só podem ser identificadas em escala de trabalho de mais detalhe que 1:50.000.

Dessa forma, para a análise na escala deste trabalho, interpreta-se que a separação entre poços associados a lineamentos e poços não associados distingue poços que atravessam *zonas de fraturas e carstificação com influência no relevo* daqueles poços cuja *presença de fraturas e feições cársticas não tem representatividade na superfície* (Fig. 7.6). Fraturas e feições cársticas com influência no relevo são aquelas que têm conexão com dolinas/uvalas, vales secos e drenagens e, portanto, denotam zonas de boas permeabilidade vertical e alimentação. A *existência ou inexistência de zonas de boa permeabilidade vertical* parece ser a principal diferença entre poços associados e não associados a lineamentos na região em estudo.

No ítem 7.1 foram descritas, juntamente com as unidades hidrogeológicas, as principais formas de recarga dos sistemas aquíferos. Entre elas destacam-se a infiltração direta em zonas de afloramento e absorção cárstica. Desse modo, espera-se que os poços associados a lineamentos apresentem maior contribuição da recarga de águas meteóricas. Assim espera-se também que a salinidade e as concentrações de flúor nas águas nos dois grupos sejam diferentes.

Foram cadastrados 284 poços nos municípios de Jaíba, Verdelândia e Varzelândia e selecionados cinco conjuntos de amostras: poços com dados de vazão (n=254, Fig. 7.5), poços com dados de C.E. (n=76), poços com dados de cloreto (n=76), poços com dados de fluoreto

(n=75) e dados de trítio (n=25) para avaliar a diferença estatística dos parâmetros entre AL e NAL.

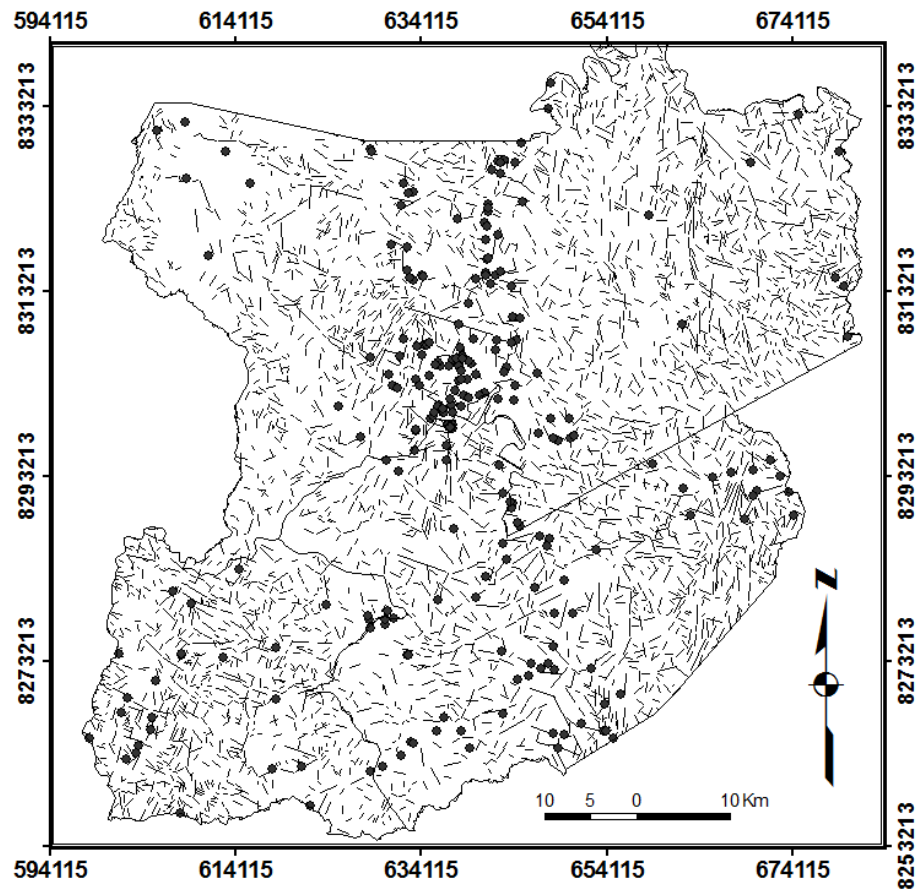


Figura 7.5. Lineamentos interpretados na imagem de satélite Geocover Landsat na escala 1:50.000 e poços tubulares com dados de vazão cadastrados nos municípios de Jaíba, Varzelândia e Verdelândia.

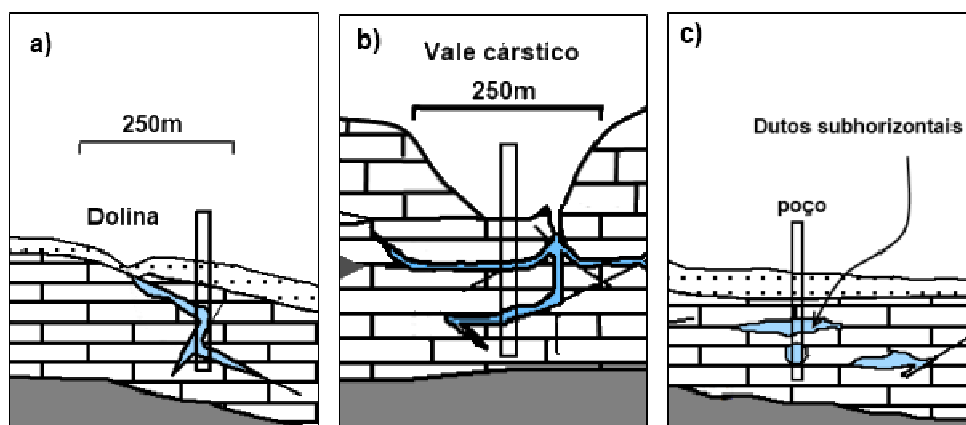


Figura 7.6. Exemplos das condições hidrogeológicas interpretadas para poços associados e não associados a lineamentos. **a)** Poço associado a lineamento – locado a menos de 250 metros de uma dolina elíptica. **b)** Poço associado a lineamento locado em um vale cárstico com sumidouro. **c)** Poço não associado a lineamento, que atravessa zona de cobertura espessa e dutos subhorizontais.

Quarenta e quatro por cento dos poços com dados de vazão estão associados a lineamentos (Tab. 7.3). Os poços associados a lineamentos apresentam valores de vazão média, mínima e máxima superior às dos poços não associados a lineamentos, além de serem mais comuns no primeiro grupo poços com vazões muito altas a excepcionais (entre 100 e 330 m³/h, Fig. 7.7 a). Importante ressaltar que, mesmo com frequência mais baixa, no grupo NAL também existem poços com vazões altas a excepcionais (60 a 320m³/h) típicas de fluxos em dutos, provavelmente subhorizontais, que se desenvolvem principalmente ao longo do acamamento, normalmente no contato de calcarenito com calcilito.

Tabela 7.3. Vazão e Condutividade Elétrica (C.E.) dos poços associados e não associados a lineamentos.

VAZÃO (m ³ /h)	ASSOCIADOS		NÃO ASSOCIADOS		C.E. (μS/m)	ASSOCIADOS		NÃO ASSOCIADOS	
	n	%	N	%		n	%	n	%
N	112		142		n	38		38	
Média	60		48		média	783		868	
mediana	22		25		mediana	707		746	
mín.	1		0,2		mín.	427		456	
máx.	320		270		máx.	1970		2569	
d.p	78		57		d.p	273		428	
Classes	n	%	N	%	Classes	n	%	n	%
Baixa (0-20)	49	44	60	42	300-500	1	3	4	11
Média (20-60)	28	25	41	29	500-700	17	45	12	32
Alta (60-100)	14	13	28	20	700-900	12	32	10	26
Muito alta (100-200)	11	10	7	5	900-1100	4	11	5	13
Excepcionais (200-330)	10	9	6	4	1100-1300	1	3	3	8
					>1300	3	8	4	11

Entre os poços que apresentam dados de C.E, 50% (38) são AL (Fig. 7.7 b). Os poços NAL tendem a ser um pouco mais salinizados, com valores de C.E. mais elevados para a média e mediana (Tab. 7.3). Além disso, poços com valores de C.E. maiores que 900 μS/cm são mais frequentes no grupo de poços NAL.

O Cloreto possui correlação de Pearson de 0,891 (p < 0,001) com a C.E, o que justifica as maiores concentrações desse elemento encontradas no grupo de poços NAL (Fig. 7.7 c). Neste grupo são também mais comuns as ocorrências de concentrações maiores que 80 mg/L (Tab. 7.4).

As maiores concentrações de fluoreto também se encontram nas águas dos poços NAL, com maior porcentagem de poços com concentrações acima de 0,8 mg/L e de 1,5 mg/L (limite de potabilidade pela Portaria MS.518/2004), alcançando os valores máximos de 4,8 mg/L e 11,0 mg/L (Tab. 7.4).

Assim conclui-se que os poços AL têm vazões um pouco mais altas, menor C.E. e valores significativamente menores de cloreto e fluoreto nas águas em relação aos poços não associados.

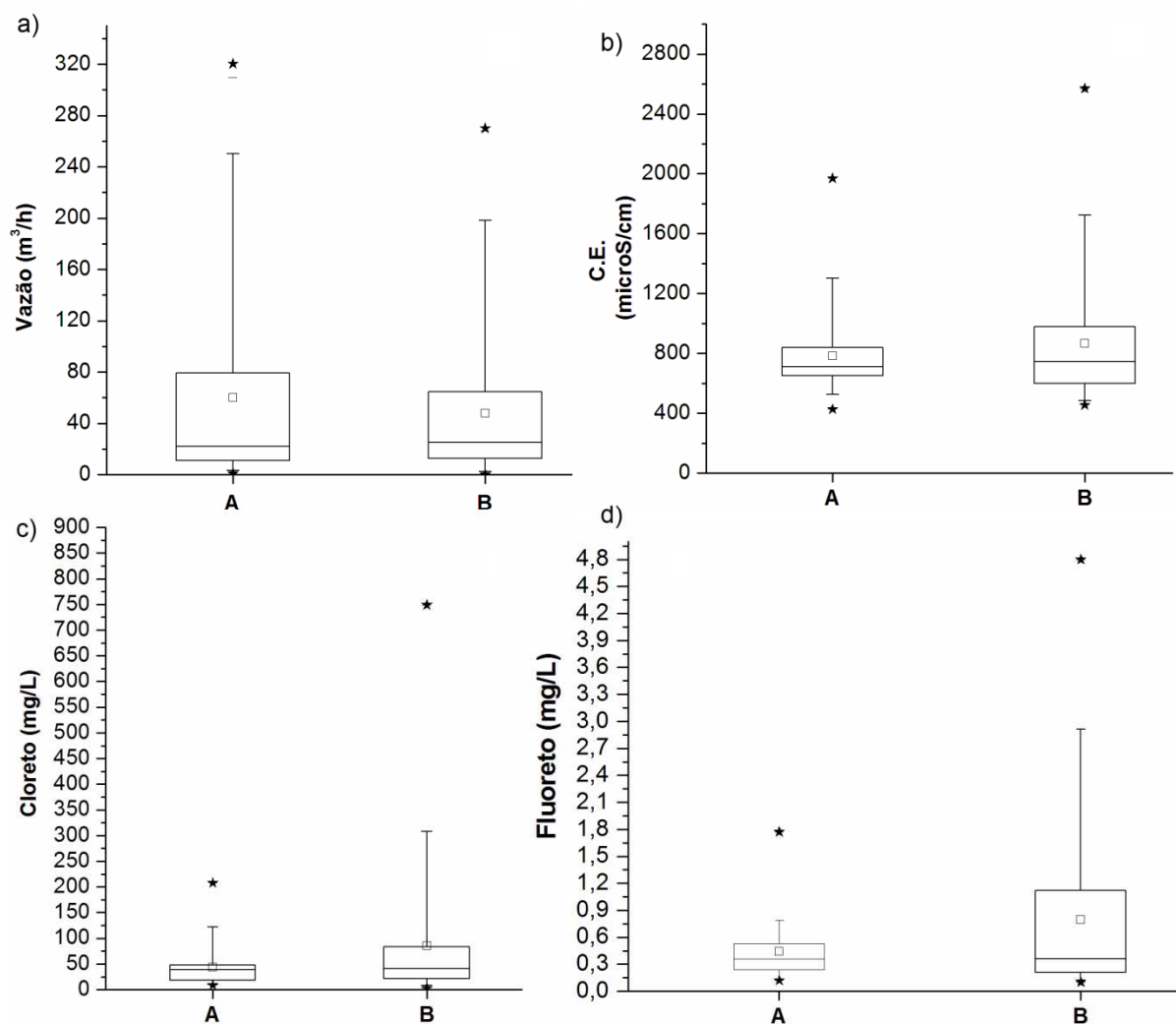


Figura. 7.7. Vazão e parâmetros hidroquímicos dos poços associados a lineamentos (A) e não associados a lineamentos (B). **a)** Vazão. **b)** Condutividade Elétrica (C.E.). **c)** Cloreto. **d)** Fluoreto.

Tabela 7.4 Concentrações de cloreto e fluoreto nos poços associados e não associados a lineamentos

Cl (mg/L)	Associados	Não associados	F ⁻ (mg/L)	Associados	Não associados *	Não Associados
n	38	38	n	34	39	40
média	43,72	85,15	média	0,44	0,80	1,0
mediana	35,70	37,70	mediana	0,36	0,36	0,37
mín.	8,83	3,04	mín.	0,12	0,10	0,10
máx.	208,00	749,00	máx.	1,77	4,80	11,0
d.p	40,69	135,92	d.p	0,32	1,00	1,88
Classes			Classes	n (%)	n (%)	n (%)
0 a 40	20	20	0 a 0,4	18 (53)	23(59)	23 (58)
40 a 80	15	8	0,4 a 0,8	14 (41)	4(10)	4(10)
80 a 120	0	5	0,8 a 1,2	1 (3)	4(10)	4(10)
120 a 160	1	0	1,2 a 1,6	0	4(10)	4(10)
160 a 200	1	1	1,6 a 2,0	1(3)	1(3)	1(3)
≥200	1	4	≥2,0		3(8)	4(10)

Esse resultado pode estar relacionado ao fato dos poços nesse grupo atravessarem zonas de maior permeabilidade horizontal e vertical, com entrada de águas de chuva nos locais de absorção cárstica e em fraturas abertas na superfície responsáveis pela diluição das águas.

Os poços NAL não apresentam vazões muito inferiores daquelas dos poços associados, fato interpretado como devido à existência de zonas de boa permeabilidade horizontal, entretanto com menor conexão direta com a água meteórica. Nesse caso interpreta-se que é muito importante a contribuição de fluxos provenientes do aquífero a montante.

Os dados de isótopos de trítio natural nas águas subterrânea (Fig. 7.8) corroboram essa hipótese. As águas dos poços NAL são mais empobrecidas em trítio, e portanto, mais antigas que as águas nos poços AL. Os poços associados a fraturas e feições cársticas ligadas a estruturas na superfície (poços AL) apresentam águas de menor tempo de renovação, confirmando a existência da recarga de águas meteóricas.

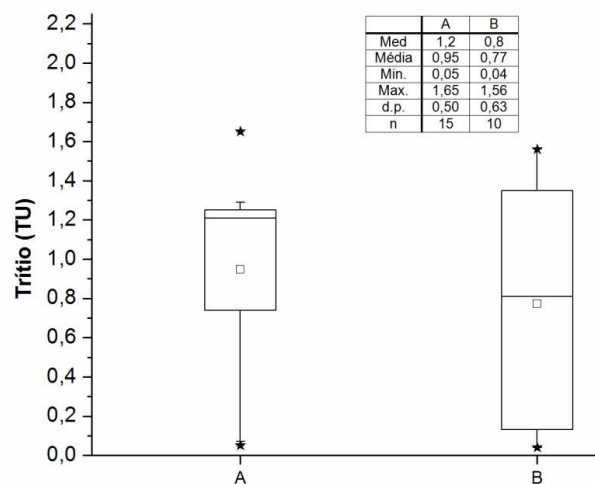


Figura 7.8. Unidades de trítio natural nas águas subterrâneas em poços associadas (A) e não associadas a lineamentos (B).

Essas diferenças na dinâmica das águas e na forma de recarga são fatores importantes para a ocorrência de concentrações elevadas de fluoreto nas águas subterrâneas no Sistema Aquífero Cárstico-fissural do Grupo Bambuí.

7.3.2 Controle estrutural na composição das águas e na produtividade dos poços associados a lineamentos

Para identificar as direções de estruturas mais favoráveis e menos favoráveis ao fluxo subterrâneo, e as diferenças na composição das águas nessas estruturas, foram comparadas as

características das águas dos poços associados à classe de lineamentos com diferentes direções.

Os 3.825 lineamentos foram agrupados em seis classes de 30° (Tab. 7.5) ordenadas segundo as direções NS (N15W a N15E), NNE (N15-45E), ENE (N45-75E), EW (N75-90E a N75-90W), WNW (N45-75W), NNW (N15-45W). Esse agrupamento reúne todos os lineamentos interpretados em um número de classes de fácil operacionalidade.

As classes que reúnem o maior número de lineamentos e poços associados a lineamentos são: WNW e NS. Importante ressaltar que um poço pode estar associado a mais de um lineamento e por isso a soma dos poços por direção descritos na tabela 7.5 não reflete o total de poços estudados. O número de poços associados a uma determinada classe de lineamentos é proporcional ao número de lineamentos, com $r^2 = 0,63$.

As médias mais altas das vazões estão nas direções WNW e NNE (Tab. 7.6 e Fig. 7.9.) O maior máximo, a mediana mais elevada e a maior porcentagem de vazões muito altas a excepcionais também ocorrem no conjunto de poços associados a lineamentos WNW. Entre as seis classes de lineamentos destacam-se as direções WNW, NNE e NS pela existência de vazões excepcionais. Essas direções são concordantes com as frequentes feições cársticas medidas em campo (Tab.7.2 e Fig. 7.4) e, portanto, refletem zonas onde o carste está mais desenvolvido.

Tabela 7.5. Número de poços (n) com valores de Vazão (Q), Condutividade Elétrica (C.E.), concentração de cloreto (Cl) e fluoreto (F) por classe de lineamento.

Classe	Direções	Azimute	Lin. (n)	Poços (n)	Q (n)	CE (n)	Cl- (n)	F- (n)
NS	N15W a N15E	165 -15	722	30	24	6	6	6
NNE	N15-45E	15-45	666	26	23	11	11	11
ENE	N45-75E	45-75	375	22	18	8	8	5
EW	N75-90E a N75-90W	75-105	516	12	11	2	2	2
WNW	N45-75W	105-135	872	32	28	10	10	8
NNW	N15-45W	135-165	674	25	23	8	8	8

Os poços associados a lineamentos ENE e NNW apresentam mais de 80% das vazões médias ou baixas (Tab. 7.6). A direção NNW não representa uma direção frequente de fraturas ou feições cársticas em quaisquer das unidades aquíferas.

A direção ENE, no entanto, aparece no diagrama de fraturas e feições cársticas do Aquífero Carbonático Superior, mas não se destaca no Aquífero Carbonático Inferior.

A classe WNW apresenta águas mais salinizadas, com mais de 30% dos seus poços com C.E. maior do que 900 μ S/m. A classe EW, que também parece reunir águas mais salinas, apresenta apenas dois poços associados, sendo tal amostragem pouco representativa. As águas

dos poços associados aos lineamentos ENE e NNW tendem a ser as menos salinizadas (Fig. 7.9 b).

Os valores extremos mais altos de cloreto ocorrem ao longo das direções WNW e NNE, também de maiores vazões. A direção ENE, de vazão mais baixa, apresenta também as concentrações mais baixas de cloreto (Fig. 7.9 c).

Nos poços associados a lineamentos existe pouca diferença entre os parâmetros estatísticos das concentrações de fluoreto por direção. Entretanto nota-se que as classes NNE e WNW apresentam valores extremos maiores que 0,8mg/L de flúor (Fig. 7.9 d).

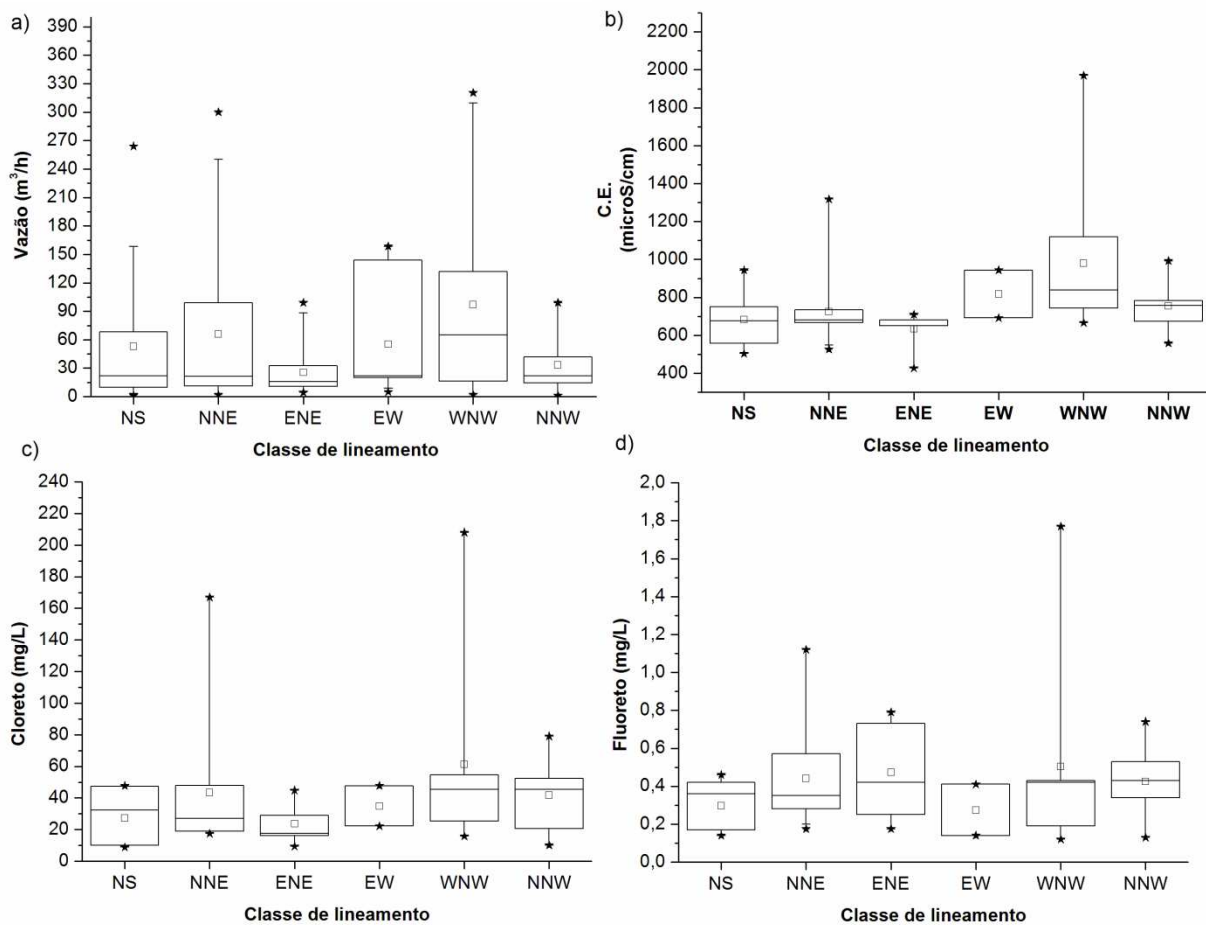


Figura 7.9. Parâmetros hidrogeológicos por classe de lineamento. **a)** Vazão. **b)** Condutividade elétrica (C.E.). **c)** Cloreto. **d)** Fluoreto.

Os dados obtidos nos itens 7.2 e 7.3 foram resumidos na tabela 7.8. É importante ressaltar que as estruturas mais favoráveis ao fluxo subterrâneo ocorrem ao longo da direção WNW, NS e NNE. Paradoxalmente, entretanto, duas dessas direções apresentam maiores salinidade e ocorrências de concentrações de fluoreto superiores a 0,8 mg/L. Esses resultados refletem a dinâmica das águas no Sistema Aquífero Cárstico-fissural do Grupo Bambuí e serão explicados a seguir.

Tabela 7.6. Estatística das vazões e condutividade elétrica em poços associados a lineamentos nas classes de lineamentos

VAZÃO (m³/h)	NS	NNE	ENE	EW	WNW	NNW	C.E. (µS/m)	NS	NNE	ENE	EW	WNW	NNW
N	24	23	18	11	28	23	n	6	11	8	2	10	8
Média	53	66	26	55	97	33	média	683	726	635	818	979	755
Mediana	22	22	15	22	58	22	mediana	671	680	666	-	815	732
mín.	1	2	4	5	2	1	mín.	504	526	427	692	666	558
máx.	264	300	99	158	320	99	máx.	944	1318	709	944	1970	992
d.p	63	88	27	58	101	29	d.p	142	210	86	126	382	137
Classes	n (%)	n(%)	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)	Classes	n (%)	n(%)	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)
Baixa (0-20)	11(45)	11(48)	13(72)	4(36)	9(32)	8(35)	300 a 500	0	0	1(12)	0	0	0
Média 20-60	4(17)	5(22)	3(17)	4(36)	5(18)	11(48)	500 a 700	4(67)	7(64)	6(75)	1(50)	2(20)	3(38)
Alta (60-100)	4(17)	2(9)	2(11)	0	3(11)	4(17)	700 a 900	1(17)	3(27)	1(12)	0	4(40)	3(38)
Muito alta (100-200)	4(17)	2(9)	0	3(27)	5(18)	0	900 a 1100	1(17)	0	0	1(50)	1(10)	2(25)
Excepcionais (200-330)	1(4)	3(13)	0	0	6(21)	0	1100 a 1300	0	0	0	0	1(10)	0
							>1300	0	1(9)	0	0	2(20)	0

Tabela 7.7. Estatística das concentrações de cloreto e fluoreto em poços associados a lineamentos nas classes de lineamentos

Cloreto (mg/L)	NS	NNE	ENE	EW	WNW	NNW	F⁻ (mg/L)	NS	NNE	ENE	EW	WNW	NNW
N	6	11	8	2	10	8	n	6	11	5	2	8	8
Média	27,38	43,42	23,81	34,95	61,38	41,78	média	0,30	0,44	0,47	0,27	0,50	0,43
Mediana	25,20	27,00	17,65	-	42,20	44,75	mediana	0,30	0,35	0,42	-	0,35	0,39
mín.	8,83	17,50	9,38	22,20	15,80	10,10	mín.	0,14	0,18	0,18	0,14	0,12	0,13
máx.	47,70	167,00	44,80	47,70	208,00	79,10	máx.	0,46	1,12	0,79	0,41	1,77	0,74
d.p	16,14	41,33	12,89	12,75	56,69	22,30	d.p	0,12	0,27	0,25	0,13	0,51	0,17
Classes	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)	Classes	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)
0 a 20	3 (50)	5(46)	5(62)	0	2(20)	2(25)	0 a 0,4	4 (67)	6 (55)	2(40)	1(50)	4(50)	4(50)
20 a 40	1(17)	1(9)	1(13)	1(50)	3(30)	1(12)	0,4 a 0,8	2(33)	4 (36)	3(60)	1(50)	3(38)	4(50)
40 a 60	2(33)	4(36)	2(25)	1(50)	3(30)	3(38)	0,8 a 1,2	0	1(9)	0	0	0	0
60 a 80	0	0	0	0	0	2(25)	1,2 a 1,6	0	0	0	0	0	0
>80	0	1(9)	0	0	2(20)	0	1,6 a 2,0	0	0	0	0	1(13)	0

Tabela 7.8. Principais resultados obtidos para as classes de lineamentos

	CLASSE DE LINEAMENTOS	Representa fraturas frequentes?	Representa direção de feição cárstica frequente ?
Mais frequente	WNW e NS	Sim	Sim
Maior número de poços associados	WNW e NS	Sim	Sim
Melhores vazões	WNW e NNE	Sim	Sim
Piores vazões	ENE NNW	Sim (ACS) Não	Sim (ACS) Não
Águas mais salinas (maior C.E. e Cl)	WNW	Sim	Sim
Águas menos salinas (menor C.E. e Cl)	ENE	Sim (ACS)	Sim (ACS)
Maior concentração de fluoreto	WNW	Sim	Sim

7.4 Modelo hidrogeológico e de circulação das águas no Sistema Aquífero Cárstico-fissural do Grupo Bambuí

A descrição das unidades hidrogeológicas, a identificação do padrão de fraturamento e carstificação e a importância das diferentes formas de recarga foram a base para a construção do modelo hidrogeológico e de circulação do Sistema Aquífero Cárstico-fissural do Grupo Bambuí.

O fraturamento nas unidades aquíferas tem um padrão semelhante, sendo as direções mais frequentes N60-70W, N10-40E e N0-10W. Em geral o processo de carstificação ocorreu de forma mais intensa ao longo das fraturas mais frequentes. Pode-se inferir desse fato que o maior número de ocorrências de fraturas nas direções acima citadas gerou caminhos de maior permeabilidade com concentração do fluxo nessas áreas e maior intensidade da carstificação ao longo dessas direções.

O carste se desenvolveu de forma diferente nos dois aquíferos, sendo mais frequente feições cársticas de direção NS no Aquífero Carbonático Inferior e feições cársticas NE no Aquífero Carbonático Superior. Condições hidrodinâmicas diferentes estão provavelmente ligadas à existência de uma barreira hidráulica (aquítarde) impedindo a conexão direta entre os aquíferos e a posição topográfica distinta dos dois reservatórios.

O ACI, localizado em cotas inferiores, recebe uma contribuição de fluxos oriunda do aquífero a montante com componente para norte (local da descarga regional) que se distribui

em uma rede de fraturas e dutos aparentemente mais permeável nas direções N50-70W e N0-10W.

Os municípios de Jaíba, Verdelândia e Varzelândia localizam-se próximo a confluência do rio Verde Grande e São Francisco, local de descarga regional do sistema hidrogeológico da bacia do rio Verde Grande. Segundo Silva (1995), a bacia hidrológica do rio Verde Grande é coincidente com os limites da bacia hidrogeológica, na maior parte da área, com existência de um fluxo subterrâneo de direção aproximada NS (coerente com a drenagem superficial) até o nível de base regional. Tal fato é coerente com um maior desenvolvimento do carste ao longo das fraturas WNW e NS observadas no Aquífero Carbonático Inferior.

No caso do ACS, com base no diagrama de frequência de fraturas para esse aquífero, pode-se dizer que a permeabilidade é maior na direção N20-30E e devido ao fluxo preferencial nessa direção explica-se o desenvolvimento da carstificação.

Interpreta-se que a direção NNE, de boas vazões, no ACI é a direção principal dos fluxos locais, que pode apresentar uma carstificação importante, entretanto mais rasa, sob influência do nível de base local.

Portanto, caracteriza-se a existência de dois níveis de fluxos, interpretados como um nível mais profundo regional, direcionada ao rio São Francisco, e outro nível local, direcionado para o Rio Verde Grande. No mapa potenciométrico (Fig. 7.10) nota-se a influência do nível de base local, o rio Verde Grande, pela convergência das linhas de fluxo locais de variadas direções para o centro da área. As direções NS e WNW são indicativas dos fluxos sob influência do nível de base regional, o rio São Francisco. Interessante observar que o rio Verde Grande passa a ser influente na parte norte da área, abastecendo o aquífero a nordeste de Jaíba.

O mapa de concentrações de trítio natural, elaborado por interpolação dos resultados de 26 amostras (22 amostradas por Velásquez *et al.* 2009 e 4 amostradas neste trabalho) retiradas de poços profundos das duas unidades aquíferas, corrobora os resultados obtidos (Fig. 7.11). Destacam-se duas regiões com águas mais antigas (áreas leste do rio Verde Grande e noroeste de Jaíba) que apresentam concentrações de trítio inferiores a 1,0 UT. Segundo os cálculos realizados por Velásquez *et al.* (2009) as águas subterrâneas na região com concentrações de trítio inferior a 0,2 UT apresentam tempo de renovação superior a 250 anos. A faixa NE-SW apresenta concentrações de trítio superior a 1,0 UT, que corresponde a um tempo de renovação inferior a 60 anos.

A faixa NE-SW marca as áreas de recarga próximas a serra do Sabonetal e no trecho médio dos córregos Escuro e Macaúbas. Nesses locais encontram-se estruturas cársticas que

permitem a interconexão de águas superficiais e subterrâneas e, portanto, o predomínio de fluxos locais. Além disso confirma o comportamento influente do rio Verde Grande n parte norte da área. Como esperado, no ACS as águas apresentam período curto de renovação.

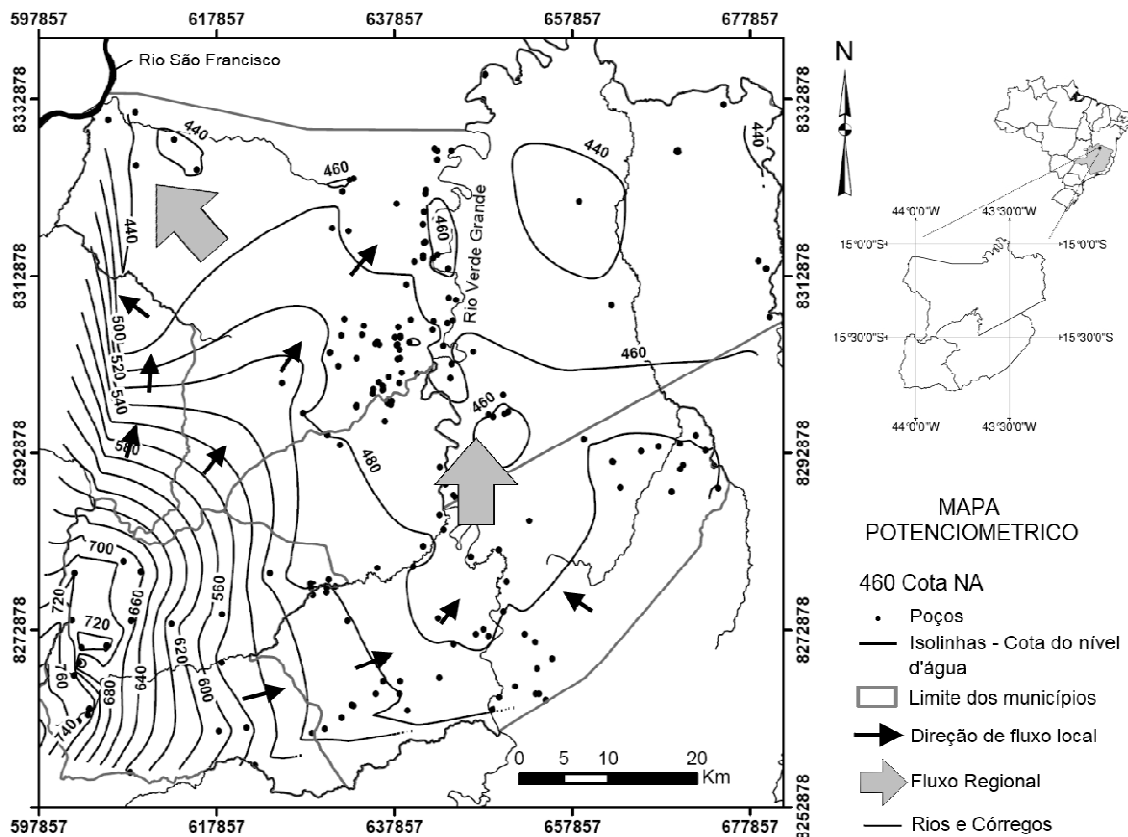


Figura 7.10. Mapa potenciométrico.

As áreas de águas mais antigas demonstram locais de fluxo mais lento e reduzida condição para a entrada de águas superficiais. À leste do rio Verde Grande localiza-se o aquítarde, que dificulta o fluxo e a recarga. A noroeste da área o Aquífero Carbonático Inferior ocorre sob uma espessa cobertura, que, devido a alta taxa de evaporação relacionada ao clima semi-árido, provavelmente dificulta a recarga das águas do aquífero cárstico profundo (Velásquez *et al.* 2009).

Assim, é notório nos poços situados nas cotas mais baixas da topografia, onde as cotas das zonas aquíferas interpretadas pelos poços são também inferiores, que as águas sejam mais antigas, permitindo inferir que se trata do fluxo de nível regional com recarga reduzida de água meteórica.

Os poços localizados a no máximo 250 metros dos lineamentos apresentam tendência de vazões mais altas e menor salinidade do que aqueles localizados em um distância superior. Os poços associados a lineamentos provavelmente atravessam zonas de fluxo mais intenso,

com boa permeabilidade vertical e existência de recarga de águas meteóricas, resultando em vazões maiores e diminuição da salinidade.

A análise dos parâmetros hidrogeológicos dos poços associados a lineamentos por direção revelou que os poços mais produtivos se associam aos lineamentos WNW, NS e NNE, que são também os de maior salinidade, maior concentração de cloreto e com valores altos de concentração de fluoreto (Fig. 7.9). Os lineamentos WNW e NS são as direções de um sistema de falhas normais inferidas na serra do Sabonetal e São Felipe e que atravessa o ACI e ACS (Fig. 7.1). Assim, é possível que as vazões maiores, salinidade, concentrações de cloreto e fluoreto mais elevados reflitam as condições dos fluxos regionais nessas direções em descontinuidades abertas e relativamente profundas que recebem águas da descarga regional.

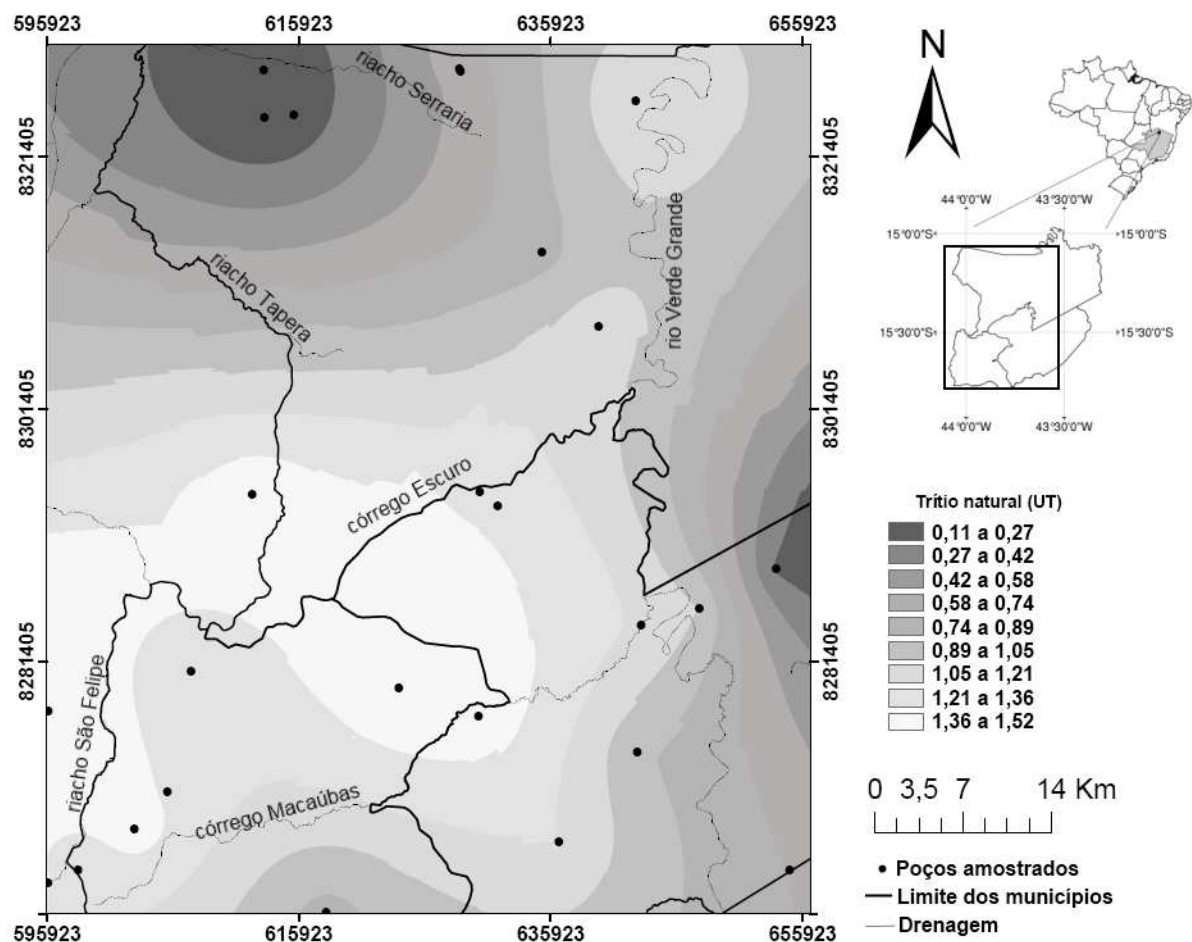


Figura 7.11. Mapa de isoconcentrações de trítio natural nas águas subterrâneas.

As direções ENE e NNW apresentam as vazões menores e têm em comum o fato de não representarem fraturas e feições cársticas frequentes no ACI. Infere-se que, no aquífero

em foco, essas direções não apresentam boa permeabilidade devido a baixa frequência ou a natureza fechada das fraturas (Fig. 7.4).

O número de lineamentos na direção ENE é o menor entre as classes de lineamentos (Tab. 7.5). Essa direção tem representatividade nas fraturas e feições cársticas no ACS. É notório o fato dos poços associados a lineamentos nas direções ENE e NNW apresentarem águas menos salinizadas do que os poços associados a outras classes. Provavelmente as fraturas ENE apresentam abertura importante na superfície e se fecham em profundidade, sendo atuantes apenas para o fluxo local, especialmente no ACS, onde fluem águas mais doces, com concentrações de cloreto mais baixas, de menor tempo de residência.

Esses resultados são semelhantes aos resultados de Silva (1984) sobre a existência de uma carstificação mais rasa ao longo das fraturas N30-40E e de uma carstificação mais profunda nas direções N60-70W e N30-40W.

Nesse estudo foram identificados dois fatores que favorecem as concentrações elevadas de fluoreto: locais de recarga de águas meteóricas reduzidas (permeabilidade vertical pouco desenvolvida) com tempo de renovação maior e fluxos regionais ao longo de fraturas e dutos onde o fluoreto pode ser acumulado ao longo do fluxo.

A Fig. 7.12 apresenta em síntese o modelo hidrogeológico e de circulação do Sistema Aquífero Cárstico-fissural do Grupo Bambuí na região em estudo.

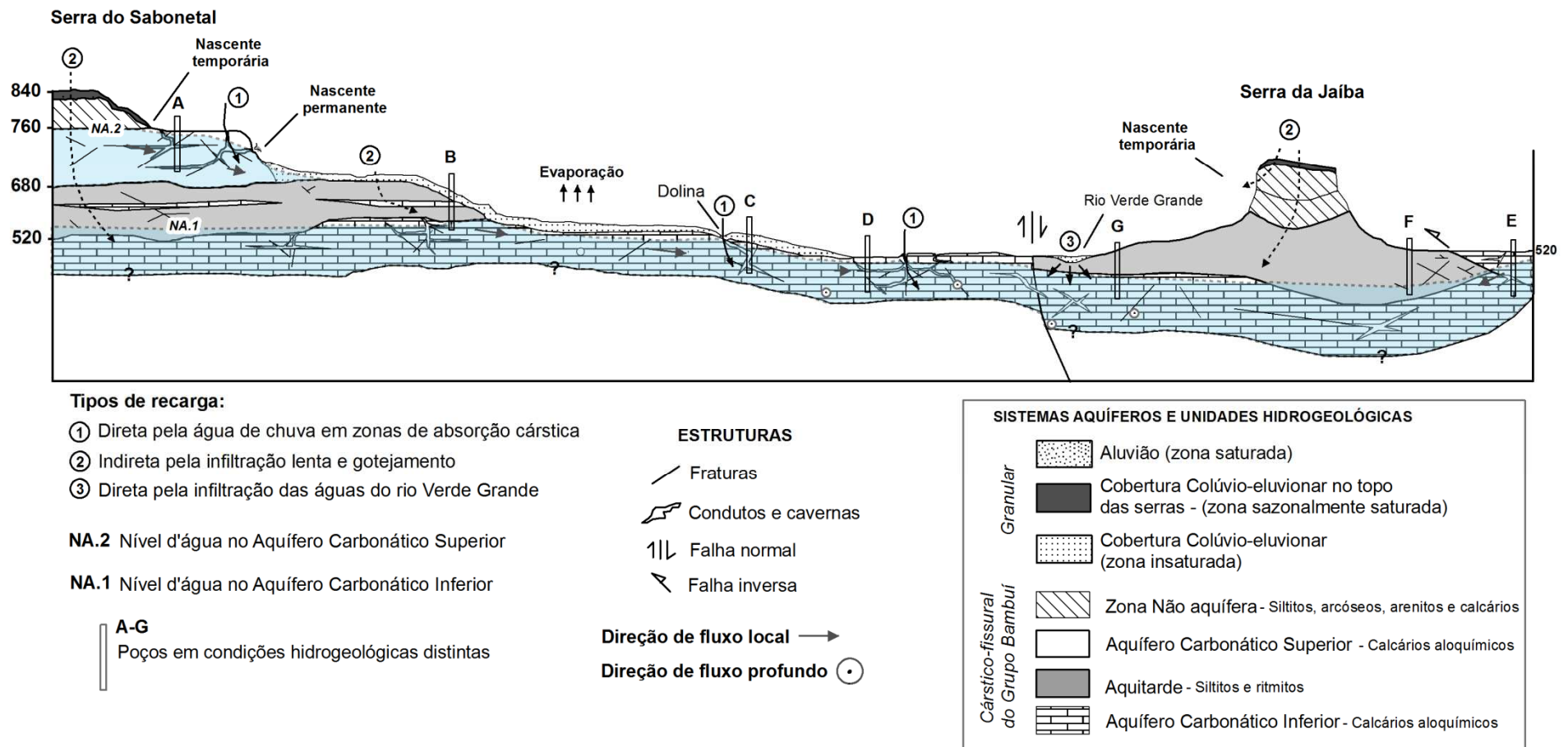


Figura 7.12. O modelo hidrogeológico e de circulação das águas no Sistema Aquífero Cárstico-fissural do Grupo Bambuí