

COMPLEXIDADE HIDROESTRATIGRÁFICA E ESTRUTURAL DO SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI: ABORDAGEM METODOLÓGICA APLICADA AO EXEMPLO DA ÁREA DE SANTA MARIA-RS, BRASIL*

Arnoldo Giardin¹
Ubiratan Faccini²

RESUMO

Uma porção estratigraficamente complexa do Sistema Aquífero Guarani foi investigada a partir de uma abordagem metodológica integrada. Foram individualizados dois aquíferos, denominados Passo das Tropas (principal aquífero) e Caturrita, correspondentes, respectivamente, ao Membro Passo das Tropas da Formação Santa Maria e às fácies arenosas da Formação Caturrita. Dois aquícludes, um correspondente ao Membro Alemoa da Formação Santa Maria e outro formado pelos pelitos da Formação Caturrita confinam os aquíferos: o primeiro situando-se entre ambos os aquíferos e o segundo acima do aquífero Caturrita. As litofácies aluviais da Formação Sanga do Cabral foram classificadas como aquícardo, com base na análise de seus afloramentos. A direção geral de fluxo da água subterrânea na porção investigada do aquífero Passo das Tropas é aproximadamente coincidente com a das suas paleocorrentes. Este aquífero é compartimentado em blocos por um sistema de falhamentos NW que provoca rejeitos superiores a sua espessura. Análises potenciométricas comparativas demonstram a importância da identificação das heterogeneidades estratigráficas e estruturais na precisa avaliação do comportamento hidrogeológico da área. A atuação dos falhamentos na recarga direta do aquífero principal, embora não definitivamente estabelecida, é sugerida pelo comportamento hidráulico dos poços a SE da área de estudo.

Palavras-chave: Aquífero Guarani, aquíferos granulares, estratigrafia, hidroestratigrafia

ABSTRACT

A complex stratigraphic portion of the Guarani Aquifer System was investigated following an integrated methodological approach. Two aquifers were identified, named the Passo das Tropas (main aquifer) and the Caturrita aquifers, corresponding respectively to the Passo das Tropas Member of the Santa Maria Formation and to the sandy facies of the Caturrita Formation. Two aquicludes, the Alemoa Member of the Santa Maria Formation and the mudstones facies of the Caturrita Formation, confine the aquifers. The first between Passo das Tropas and Caturrita aquifers and the second above the Caturrita aquifer. The alluvial facies of the Sanga do Cabral Formation corresponds to an aquitard, as indicated by outcrop analysis. The general ground water flow direction in the Passo das Tropas Aquifer is about the same of the paleocurrent directions. This aquifer is segmented into blocks by a NW fault system that caused vertical displacements which exceed the aquifer thickness. Comparative piezometric analysis demonstrates the importance of the stratigraphic and structural heterogeneities to the appropriated hydrogeological evaluation of the area. The role played by the faults in the direct recharge of the main aquifer, although not definitively established, is suggested by the well's hydraulic in the SE portion of the study area.

Key words: Guarani Aquifer, granular aquifers, stratigraphy, hydrostratigraphy.

* Resultados preliminares deste trabalho foram apresentados no XII Congresso da ABAS, Florianópolis-SC, 2002.

¹ Doutorando em Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia – UNISINOS. Geólogo da Companhia Riograndense de Saneamento – CORSAN e da Secretaria de Obras Públicas e Saneamento – SOPS-RS arnoldo@redesul.com.br arnoldo@euler.unisinos.br

² Professor do Programa de Pós-Graduação em Geologia – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS ufaccini@euler.unisinos.br

1- Introdução

O Sistema Aquífero Guarani (SAG), com extensão aproximada de 1,2 milhões de km² (839.800 Km² no Brasil, distribuídos por 8 estados da federação), compreende diversas unidades sedimentares das bacias do Paraná e Chaco-Paraná, recobrando extensas áreas no Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina (Rebouças, 1994; Araújo *et al.*, 1995; Campos, 1999).

No Brasil, sua grande diversidade litológica e estrutural vem sendo documentada em artigos recentes (e.g. Giardin & Faccini, 2002; Da Rosa *et al.*, 2003), indicando a necessidade do contínuo detalhamento de áreas específicas, visando identificar as heterogeneidades faciológicas e hidroestratigráficas que caracterizam seus diferentes compartimentos, em escalas adequadas à exploração e manejo dos recursos hídricos nele contidos.

Como o SAG apresenta-se peculiarmente estruturado no Rio Grande do Sul (hidroestratigráfica e tectonicamente), o presente trabalho pretende contribuir neste sentido, fornecendo à comunidade hidrogeológica brasileira uma visão da porção meridional deste sistema aquífero.

Os resultados aqui apresentados decorrem da aplicação de uma abordagem metodológica que integra informações sedimentológicas, geofísicas e estratigráficas a parâmetros hidrogeológicos, em área situada na Região Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (Bacia Hidrográfica Vacacaí - Vacacaí Mirim), onde o SAG apresenta uma organização estratigráfica distinta do restante da Bacia do Paraná.

O objetivo principal é testar a aplicabilidade desta metodologia na identificação dos controles geológicos sobre o comportamento hidrogeológico do SAG na área de Santa Maria - RS, onde ocorre a maior complexidade hidroestratigráfica deste sistema aquífero, bem como as potencialidades destes procedimentos na análise de aquíferos granulares, em áreas geologicamente similares.

2. Contexto Geológico

As unidades litoestratigráficas estudadas neste trabalho pertencem ao grupo Rosário do Sul, de ocorrência restrita à borda sudeste da Bacia do Paraná, no Rio

Grande do Sul (Figura 1). A organização estratigráfica regional e faciológica deste intervalo, na Região Central do Estado, são ilustradas na Figura 2.

Constituído por depósitos continentais Permo-Triássicos, o Grupo Rosário do Sul é composto, litoestratigraficamente, pelas Formações Sanga do Cabral, Santa Maria e Caturrita.

A Formação Sanga do Cabral integra a seqüência Neopermiana-Eotriássica e reúne, sob esta denominação litoestratigráfica formal, uma associação de fácies eólicas na base e depósitos aluviais de planície entrelaçada, no topo. Na área de estudo, ocorre apenas a associação de fácies aluviais, estando ausente o conjunto de fácies eólicas, correspondentes à Formação Pirambóia, no norte da bacia.

A seqüência Meso-Neotriássica compreende as formações Santa Maria e Caturrita (Faccini, 2000; Faccini *et al.* 2000). A primeira, delimitada na base por superfície erosional sobre a qual se depositam os arenitos de canais fluviais de baixa a moderada sinuosidade do Membro Passo das Tropas e, no topo, litofácies pelíticas de planícies de inundação, ricos em vertebrados fósseis e horizontes de paleossolos do Membro Alemoa. O Membro Passo das Tropas constitui-se no melhor aquífero na área de estudo.

A Formação Caturrita, topo da seqüência Triássica, é constituída principalmente por arenitos depositados por sistemas fluviais de canais isolados a meandantes, associados a *crevasse splays* e deltas lacustres de pequenas dimensões, com litofácies pelíticas associadas e tendência de predomínio de arenitos para o topo da unidade. O aquífero constituído pelos arenitos Caturrita é explorado na área de estudo por uns poucos poços.

A deposição da bacia é encerrada com os depósitos eólicos da Formação Botucatu (que, na área de estudo, não foi penetrada por qualquer poço) que são recobertos pelos vulcanitos da Formação Serra Geral. Estas unidades, pertencentes ao Grupo São Bento, não são aqui analisadas, mas há indicações de que tanto os vulcanitos da Formação Serra Geral quanto os arenitos intensamente litificados da Formação.

Botucatu atuam, localmente, como aquíferos fraturados.

Figura 1: (a, b) Localização da área de estudo, no contexto da Bacia do Paraná. **(b)** Mapa geológico simplificado da região central do Rio Grande do Sul, enfatizando as unidades sedimentares de interesse nas proximidades Cidade de Santa Maria (CPRM, 1994, modificado). As setas indicam as direções médias de paleotransporte do sistema fluvial Passo das Tropas (Triássico Médio), principal aquífero da região (Faccini, 2000). O retângulo demarca a área investigada. Note-se o alinhamento das drenagens segundo NW, condicionadas pela principal direção regional de falhamentos (Sistema de Falhamentos Jaguari-Mata).

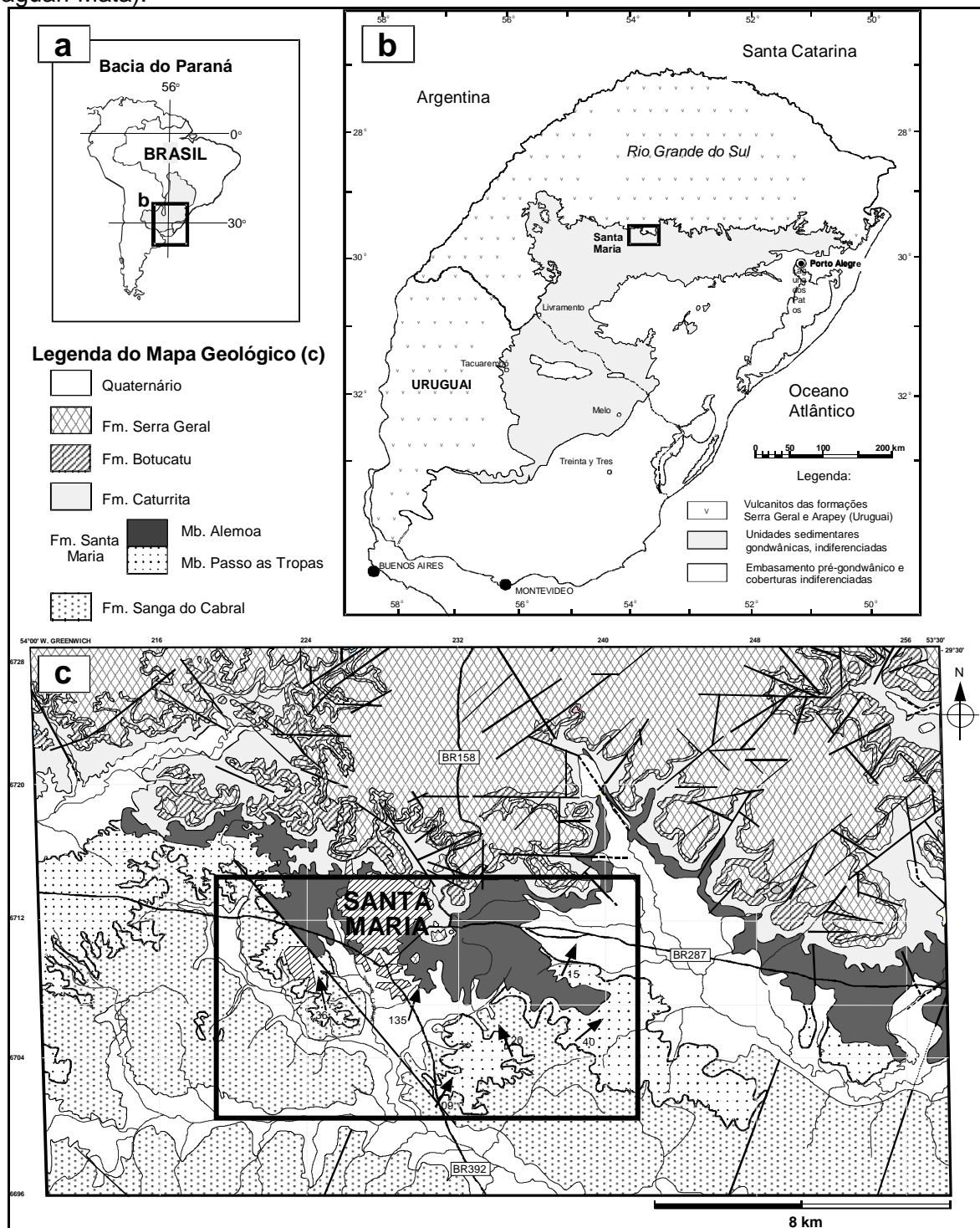
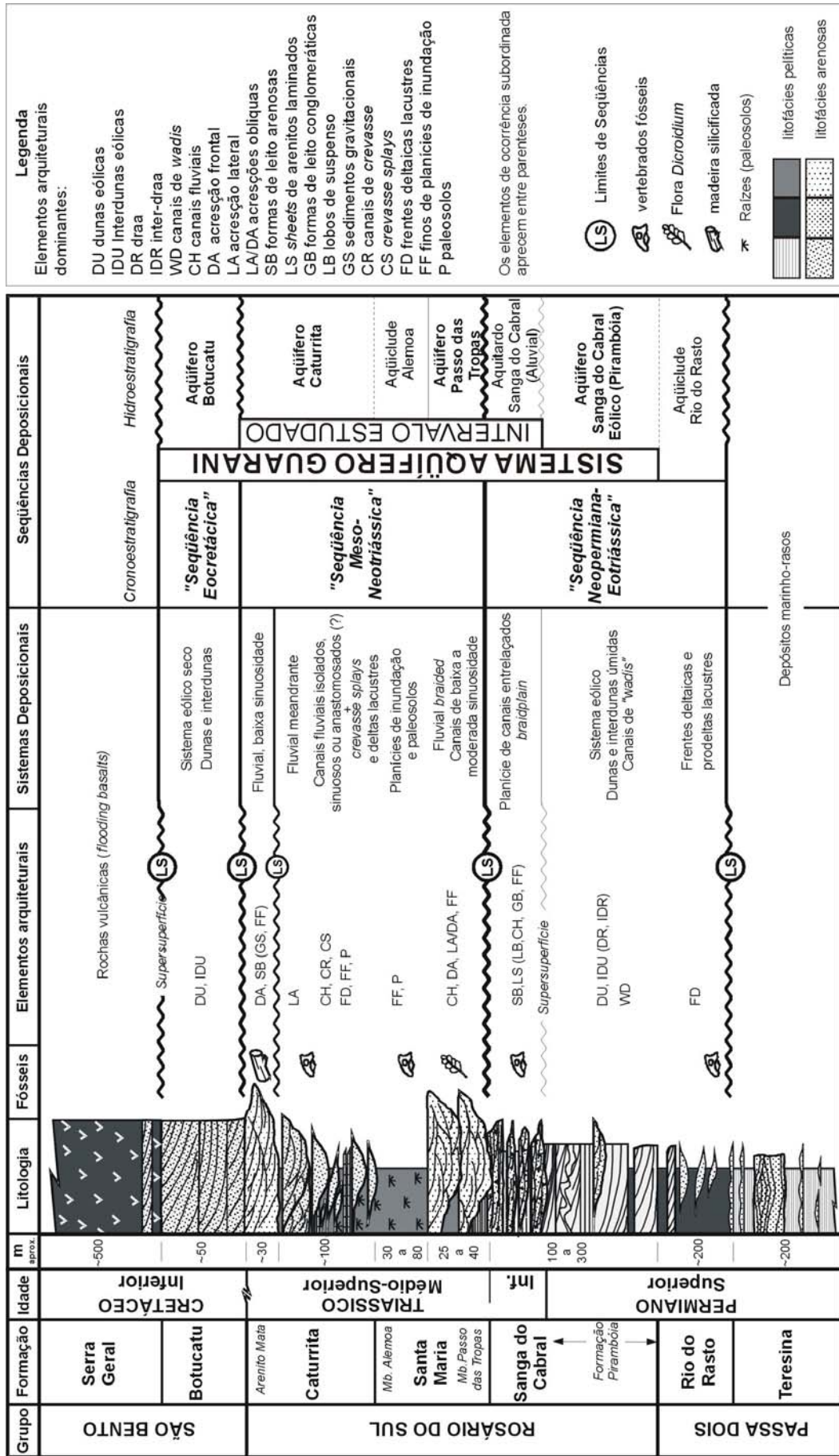


Figura 2: Coluna estratigráfica esquemática, principais heterogeneidades faciológicas e hidrostratigrafia do Sistema Aquífero Guarani na Região Central do Rio Grande do Sul, indicando as denominações litoestratigráficas formais do intervalo estudado (Formações Sanga do Cabral, Santa Maria e Caturrita do Grupo Rosário do Sul) e as seqüências deposicionais correspondentes (modificado de Faccini, 2000).

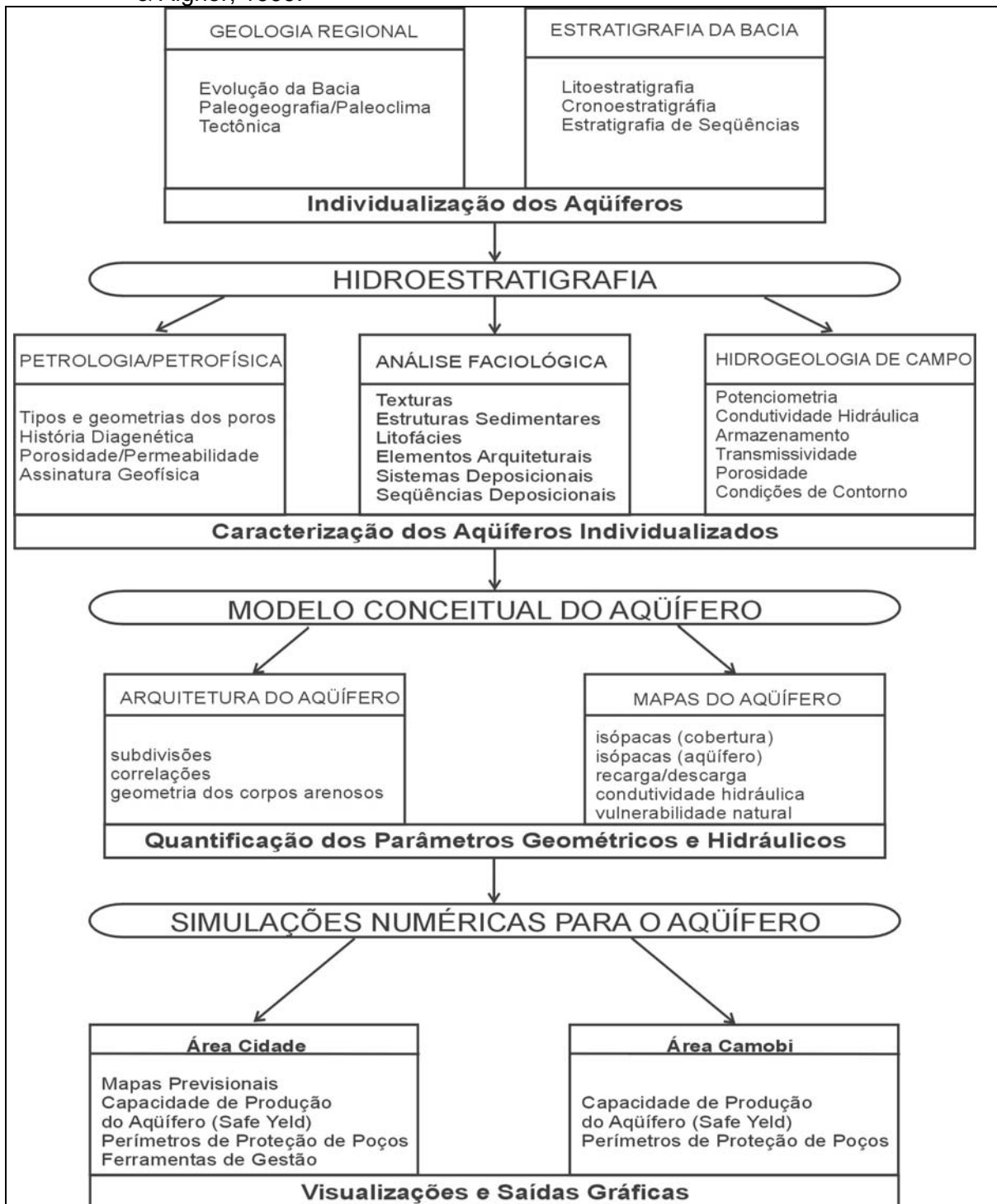


3. Abordagem Metodológica

A base metodológica deste trabalho foi adaptada de Huggenberger & Aigner (1999). Parte de uma abordagem regional, em escala de bacia, com detalhamentos progressivos, necessários para a formulação de modelos conceituais e simulações numéricas do comportamento dos aquíferos individuais identificados (Figura 3).

Um reconhecimento de campo destinado ao entendimento do arcabouço litoestratigráfico e das seqüências deposicionais da região em estudo constituiu-se na primeira etapa do trabalho, ao qual somou-se a coleta de dados de poços destinados à captação de água subterrânea existentes na área.

Figura 3: Fluxograma da abordagem metodológica adotada, adaptada de Huggenberger & Aigner, 1999.



Foram localizados 69 poços com informação de bom grau de confiabilidade, distribuídos em duas áreas, denominadas Cidade (42 poços) e Camobi (27 poços). A Tabela 1 lista os 62 poços com informações completas.

Com o objetivo de efetivamente testar a metodologia de trabalho, a investigação abordou a área como se pioneira fosse, aproveitando-se apenas de dados brutos de sondagem e conhecimento geológico básico, partindo-se do marco hidrogeológico zero.

As informações foram processadas e organizadas relacionalmente em um banco de dados. Mapas em escala 1:100.000 e 1:50.000 e seções geológicas em escalas 1:25.000 e 1:20.000 foram construídos, a partir dos perfis litológicos fornecidos pelos perfuradores, que foram igualmente digitalizados (Figura 5).

Poços selecionados foram submetidos a perfilagens Gama, com o objetivo de aferir as espessuras dos pacotes arenosos identificados durante as perfurações e suas respectivas assinaturas geofísicas. Somados aos poços que já contavam com perfilagem no momento de sua perfuração (04, executados pela CPRM), um total de 16 poços foram investigados geofisicamente.

A interpretação da informação litológica dos perfis construtivos dos poços, combinada com a informação geofísica e o controle estratigráfico de campo, permitiu a compreensão dos arcabouços crono e litoestratigráficos.

Através de fotointerpretação e análise do modelo numérico do terreno, executado a partir da digitalização de cartas topográficas em escala 1:25.000, foram identificados os principais condicionantes estruturais da área.

Seções estratigráficas de subsuperfície foram construídas, sem que as informações referentes às entradas de água existentes fossem consideradas, procedimento que visou garantir a isenção da interpretação hidroestratigráfica posterior.

A divisão estratigráfica resultante, combinada com o detalhamento fotogeológico, possibilitou a definição do arcabouço tectono-estratigráfico final utilizado (Figura 4).

As Entradas de Água (EAs) foram posteriormente relacionadas à litoestratigrafia, visando a definição hidroestratigráfica da área. A delimitação dos aquíferos, aquícludes e aquítardo existentes no pacote de rochas investigado viabilizou a etapa posterior, de caracterização dos aquíferos individualizados.

A piezometria dos poços cadastrados foi inicialmente estabelecida, assumindo todos os poços como extraíndo água de um único aquífero e não levando em consideração as heterogeneidades faciológicas e tectônicas (Figura 6). Esta primeira abordagem potenciométrica foi feita com o objetivo de compará-la posteriormente com as potenciométricas estabelecidas levando-se em consideração a hidroestratigrafia e as descontinuidades produzidas pela tectônica.

Dois blocos compartimentados tectonicamente por fraturamentos NW, tiveram a piezometria do aquífero Passo das Tropas estabelecida (Figuras 7 e 8).

O primeiro deles, na área Cidade, representado na Figura 7, mostrou a manutenção da depressão potenciométrica anteriormente indicada; mas com deslocamento para sul. O alto potenciométrico regional (ver Figura 6) que a análise geral havia identificado (pois considerou todas as cargas hidráulicas indistintamente) foi suprimido pois era devido ao aquífero Caturrita e não ao Passo das Tropas.

O segundo, na área Camobi, mostrou a inversão da natureza potenciométrica de uma região que, na análise geral foi identificada como divisor de águas subterrânea; mas que se mostrou uma depressão potenciométrica quando apenas poços de um bloco tectonicamente delimitado e hidráulicamente contínuo foram considerados. Modelos conceituais para os aquíferos identificados foram então construídos, a partir da interpretação das informações coletadas.

A modelagem numérica destes reservatórios, etapa final prevista pela abordagem metodológica adotada, será executada quando volume suficiente de dados hidráulicos estiver tabulado, o que constitui um dos objetivos futuros da pesquisa em curso.

Figura 4: Arcabouço estrutural da área de estudo. As principais direções de fratura foram plotadas (linhas pontilhadas) sobre um mosaico semi-controlado de radar (Projeto RADAMBRASIL). As áreas Cidade e Camobi estão delimitadas por retângulos brancos e as aglomerações urbanas por linhas pretas contínuas. Na borda e cantos do mapa, temos as coordenadas UTM (faixa 22J). A simples observação da figura permite estabelecer que o contato atual entre os sedimentos Gondwânicos e a Fm. Serra Geral foi tectonicamente definido e que as falhas orientadas segundo NW são as mais marcadas devido aos seus rejeitos verticais que colocaram justapostas rochas de diferentes competências.

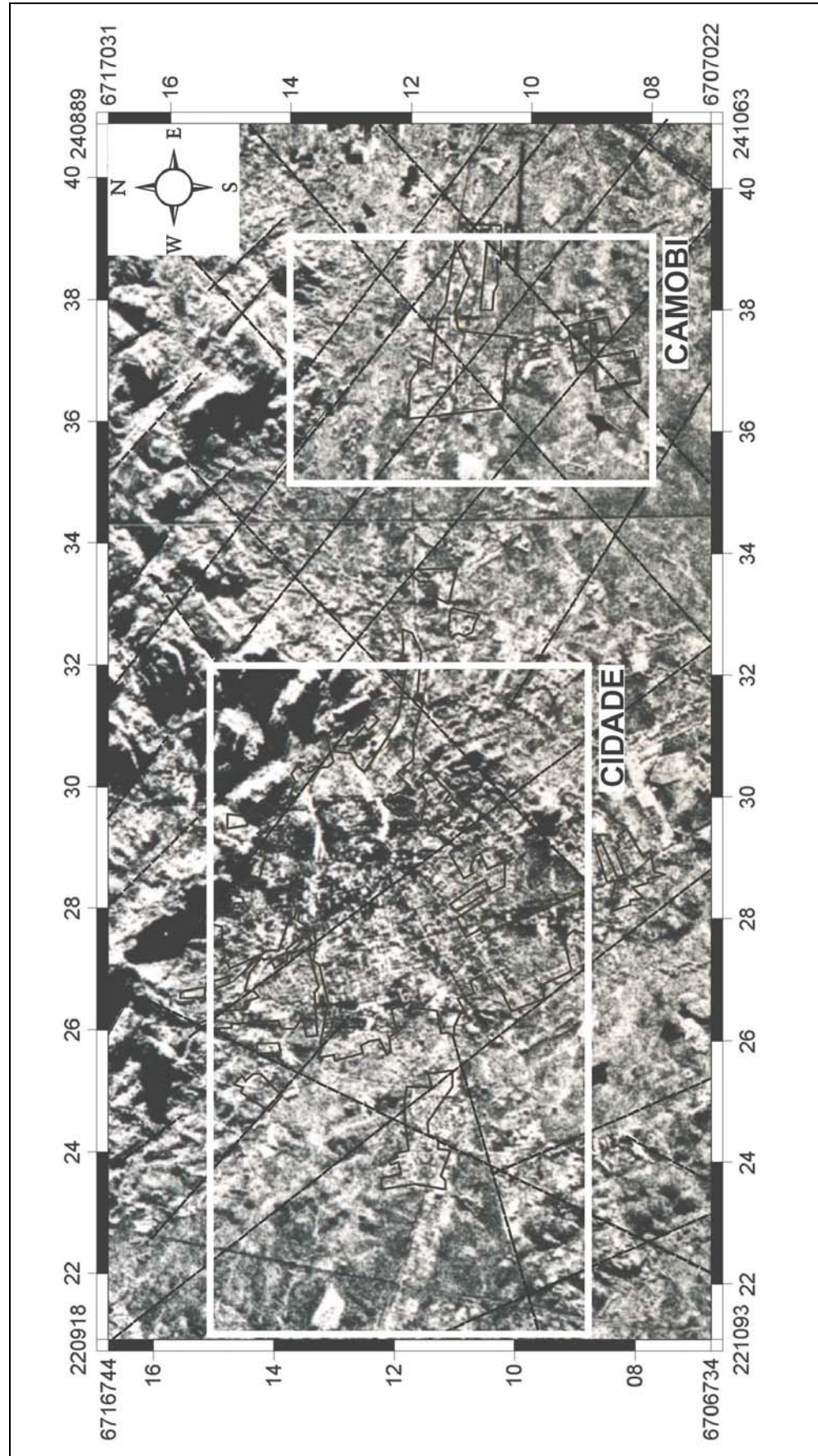


Tabela 1: Poços da região de Santa Maria com coordenadas UTM (Faixa 22J), cotas de boca e dos níveis estáticos, profundidades (medidas a partir da boca dos poços) até a base das unidades atravessadas ou fundo do poço (S: Solo; CT: Fm. Caturrita; AL: Mb. Alemoa da Fm. Santa Maria; PT: Mb. Passo das Tropas da Fm. Santa Maria; SC: Fácies aluviais da Fm. Sanga do Cabral).

POÇO	UTM-E	UTM-N	Cota de Boca	Cota do NE	Profundidades				
					S	CT	AL	PT	SC
1	226775	6709950	83	72.75	1		32	60	102
2	225380	6711250	85	85.3	4		12	42	60
3	225075	6711950	86	82.83	12		18	59	81
4	223400	6712375	129	86.38	1		51	83	84
5	223375	6712250	120	83	2		46	78	90
6	222000	6711475	95	95	5		17	57	90
7	227575	6712400	130	82.4	4	44	106	144	
8	227515	6712400	120	78.9	4	18	93	120	
9	227915	6712500	143	800	1	48			
10	231750	6712375	115	64.55	18		69	95	119
11	228975	6713850	123	123.12	6	50	58	90	
12	226575	6714350	110	800	1		66	114	
13	226425	6714150	103	800	1	13	59	89	132
14	228525	6713350	132	800	2	36	68	108	
15	227250	6711775	100	79.9	6		76	100	102
16	235979	6710413	109	87	6		26.5	46.5	96
17	237590	6710575	99	59.37	8.3		59	73	75
18	237819	6710628	98	61.97	5		53	64.5	
19	238350	6711390	86	73.5			33	80	
20	237975	6711875	81	66.11	8.5		28.5	54	57
21	237990	6712100	85	75.6	8		26	61.5	63.5
22	238050	6712525	94	79.05	6.5	11.5	36.5	66.5	68.5
24	237108	6709218	99	85.68	7.3		23	41	51
25	237481	6709961	95	85.52	14		38.5	61	92
27	236825	6709850	108	65.8	5		20	60	110
28	236870	6709892	106	99.12	6		19	47	100
29	236525	6709610	111	82.72	5		16	44	100
30	236733	6709561	102	83.14	1		16	44	57
31	237060	6709550	97	60	3		21	55	102
32	236710	6708295	102	80	5		17	55	60
33	237149	6709920	100	85.8	5		17	55	101.5
34	236713	6708254	102	80.77	2		23	58	60
35	237395	6709125	96	84.11	8		14	42	100
37	237847	6709004	85	800	10		21	48	54
38	237426	6709036	100	91.8	8		14	42.5	100
39	237418	6709035	100	87.8	8		14	40	100
40	237390	6709098	96	87.11	8		15	63	103
41	225984	6711438	86	73.42	5.6		71.5	109	
41-B	225984	6711438	86	76	3	32	66	99	
42	236680	6709175	97	80.4	5		20	38	128
43	237422	6709644	90	77.5	8		32	53.2	80
44	222269	6712309	98	66	6		31	50	200
45	227761	6714517	115	800	2		50	85	109
46	229256	6710948	102	84	3	24	52	90	120
47	228097	6712938	140	83.9	3	55	100	140	
48	228486	6711525	135	68	3	44	102	120	
49	230048	6712133	140	47.21	4	19	114	150	
50	227853	6711443	105	58.2	3		78	90	
51	228512	6712031	143	66.68	4		37	69	130
53	222275	6712111	100.5	73.75	5		28	59	120
54	237241	6710236	99.5	76.5	4		49	76	
55	222427	6712880	134	90	5	44	89	120	
56	227725	6712891	132	111.86	9	42	82	92	
57	227800	6712941	133	112	2	46	81		
58	228027	6712997	135	111.3	3		73	95	100
59	226966	6711638	105	49.4	4		19	55	120
61	237146	6710276	99.5	74.5	2		47		84
62	222272	6712205			4		58	78	100
63	229297	6711376	99.5	56.7	4		61	96	120
65	229300	6711380	100	63.3	4		58	80	
66	228950	6710600	97	74	6	17	46		100
67	229115	6710702	99.5	72.5					

Figura 5: Seções geológicas nas áreas Cidade (AB) e Camobi (CD) mostrando os rejeitos verticais produzidos pelo sistema de falhamento NW. A compartimentação hidráulica detectada na análise potenciométrica é decorrência desta tectônica. No retângulo inferior à direita, mapa de localização das seções.

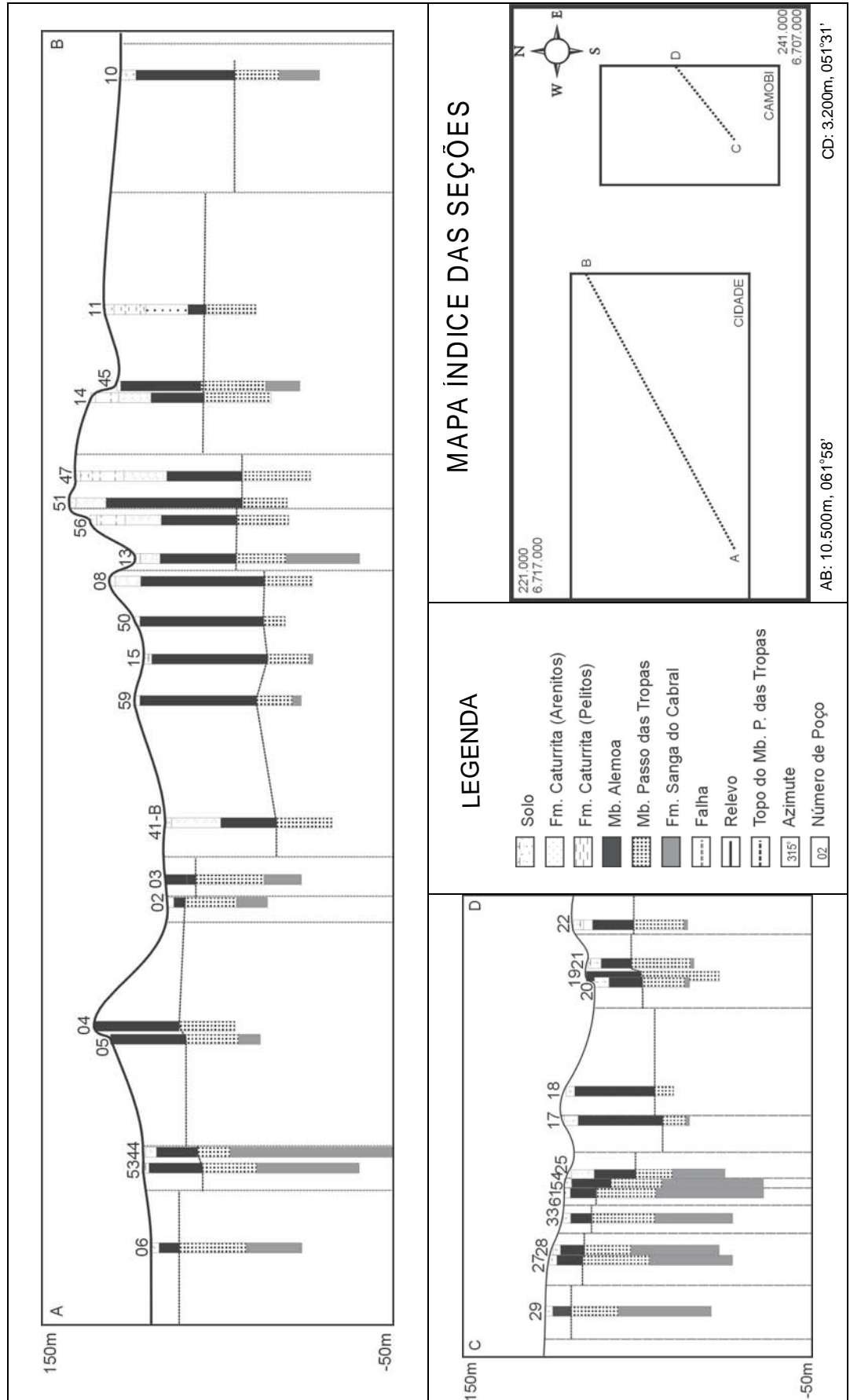


Figura 6: Potenciometria e direções gerais de fluxo das áreas Cidade e Camobi, estabelecidas sem considerar a hidrostratigrafia ou as heterogeneidades faciológicas e tectônicas. Esta abordagem, denominada de “geral” no corpo do texto foi feita com o objetivo de demonstrar os erros de interpretação que podem ser produzidos quando as heterogeneidades hidrostratigráficas e tectônicas não são consideradas em uma análise potenciométrica. Como pode ser observado no quadrante NW da figura, existiria um alto potenciométrico regional nesta área, responsável pelo estabelecimento de fluxo subterrâneo com direção SSE em direção a uma depressão potenciométrica (assinalada no mapa). No quadrante SE da figura, existiria um divisor de águas subterrâneas (assinalado na figura como Alto Potenciométrico Local) na área do Campus da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.

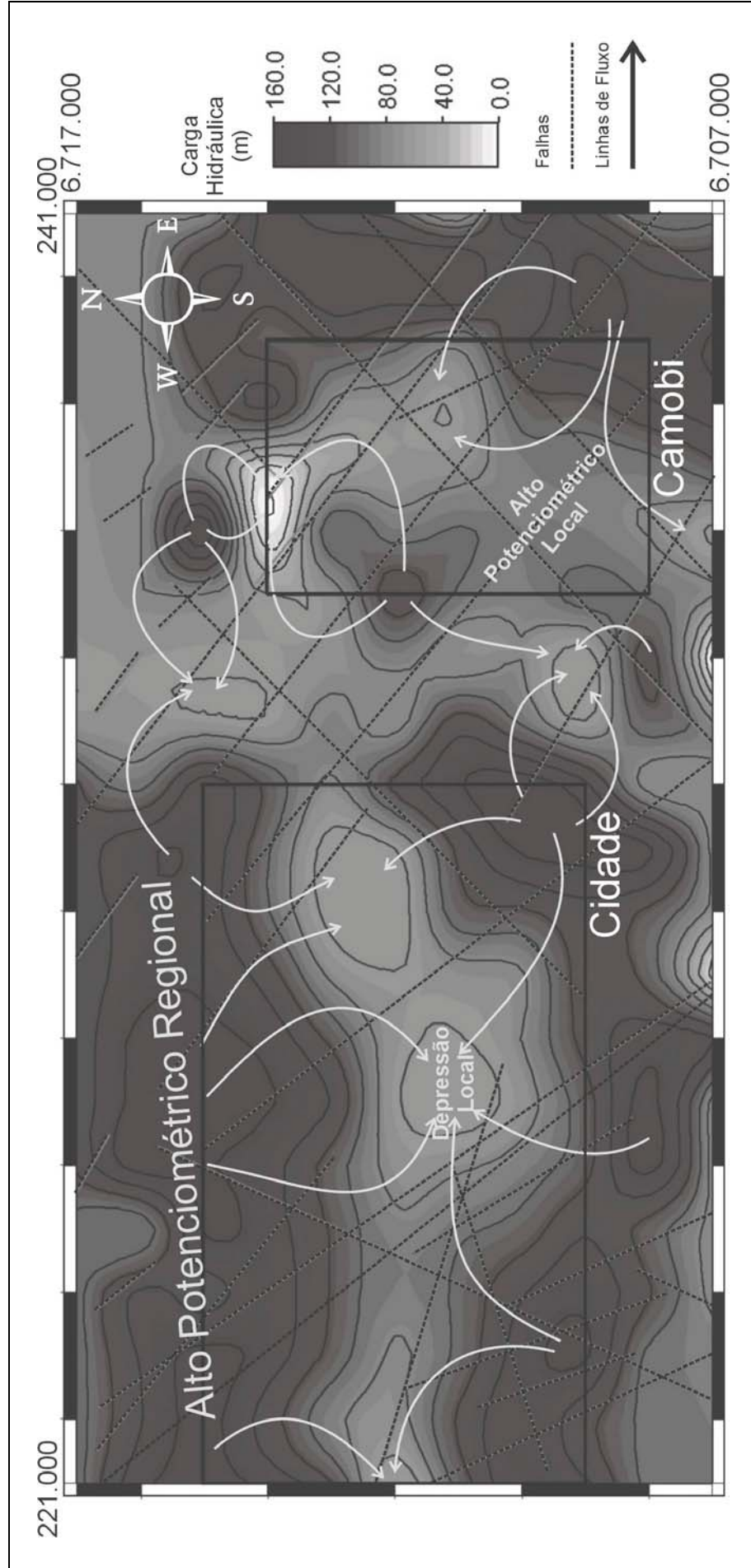


Figura 7: Potenciometria feita em um bloco limitado por falhas (linhas tracejadas) da área Cidade (Figura 6). A depressão potenciométrica definida pela análise geral permanece, mas deslocada para Sul.

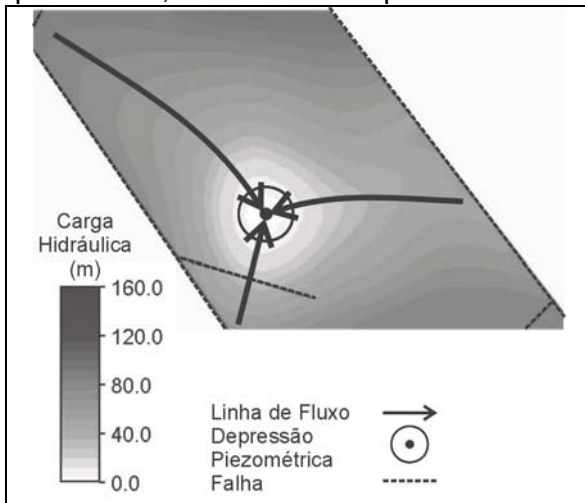
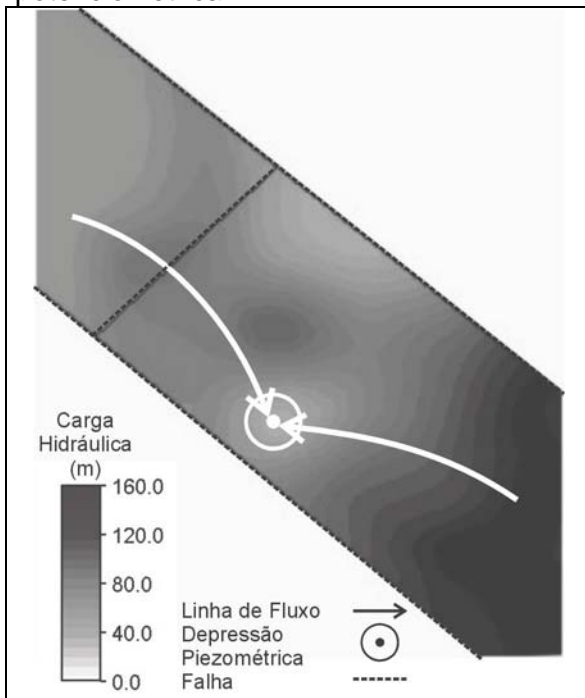


Figura 8: Potenciometria de um bloco limitado por falhas (linhas tracejadas) da área Camobi. A região (assinalada), definida pela análise geral como um divisor de águas subterrâneas, passa a ser caracterizada como depressão potenciométrica.



4. Hidroestratigrafia e Condicionantes Geológicos

A investigação procedida individualizou dois aquíferos granulares denominados Passo das Tropas e Caturrita, o principal deles materializado nos dominantes litofácies arenosos do Membro

Passo das Tropas da Formação Santa Maria e o segundo nos corpos arenosos isolados da Formação Caturrita. Estes mesmos aquíferos foram pioneiramente investigados por CPRM (1994).

Os arenitos Passo das Tropas têm como elementos arquiteturais característicos depósitos de macroformas de canais fluviais, com acreção frontal e oblíqua, associados a litofácies finas de planícies de inundação, subordinadas. As implicações desta variabilidade arquitetural no fluxo da água subterrânea não foram ainda investigadas mas é razoável supor que a condutividade hidráulica do Aquífero Passo das Tropas variará em função dos diferentes elementos arquiteturais envolvidos, acarretando refração das linhas de fluxo nas interfaces.

Os corpos arenosos da Formação Caturrita apresentam uma variação vertical nos padrões arquiteturais, indicando mudanças do estilo fluvial, da base para o topo da unidade. Na base, ocorrem como depósitos de canais isolados (*ribbons*) encaixados em fácies pelíticas de planícies de inundação. Em direção ao topo, predominam canais amalgamados, com padrões de acreção lateral (*sheets*), com menor proporção de fácies finas preservadas. No conjunto estes corpos arenosos constituem-se em aquíferos heterogêneos, de extensões variáveis, determinadas pela variação dos padrões fluviais que definem as proporções entre as litofácies arenosas e pelíticas. As recorrências de litofácies pelíticas da Formação Caturrita, similares aos pelitos do Membro Alemoa, correspondem hidrogeologicamente a aquicludes.

O comportamento hidrogeológico do Membro Alemoa da Formação Santa Maria corresponde a um aquiclude, determinado por suas litologias predominantemente pelíticas, interpretadas como finos de planícies de inundação contendo horizontes de paleossolos.

As fácies aluviais da Formação Sanga do Cabral formam um aquífero, comportamento hidráulico determinado pela geometria tabular de suas camadas, constituídas de arenitos finos composição, ricos em argilominerais na matriz. Os elementos arquiteturais predominantes neste conjunto de rochas são as formas de leito arenosas e os arenitos finamente laminados com pelitos laminados ou maciços intercalados.

O principal condicionante estrutural presente na área estudada é um sistema de fraturamento NW, cuja orientação predominante varia de 315° na área Cidade até 327° na área Camobi. Na Figura 5, podemos observar rejeitos verticais de 58,50m medidos entre os poços 02 e 41-B e de 40,00m medido entre os poços 07 e 14. A magnitude destes rejeitos é maior do que a espessura média do Membro Passo das Tropas na área de estudo: 29,47m (medidas em 30 poços). A compartimentação hidráulica imposta por esta tectônica é um dos condicionantes hidrogeológicos mais importantes da área.

Formando um padrão subortogonal com o sistema de fraturas NW já referido, um sistema orientado para NE, com azimute variável entre 052° na área Cidade até 058° na área Camobi forma o arcabouço tectônico da área. Este sistema; porém, não produziu rejeitos verticais significativos identificáveis nas seções geológicas construídas.

Hidraulicamente, também não se detectou influência deste sistema de fraturas, pois a piezometria - considerada dentro de blocos limitados a NE e a SW pelo sistema de fraturamento NW - não é, aparentemente, afetada por ela, tanto na área Cidade quanto na área Camobi.

5. Hidrogeologia

Quando considerada a porção investigada do SAG como uma única unidade hidrogeológica contínua, a potenciometria estabelecida para o "aquífero" indica direção de fluxo com sentido SSE na área Cidade e um alto potenciométrico no quadrante SW da área Camobi (Figura 6). Quando, porém, a análise potenciométrica leva em consideração a hidroestratigrafia e a compartimentação produzida pela tectônica (Figuras 7 e 8), o resultado se altera significativamente: Na área Cidade, o fluxo regional com sentido SSE desaparece dando lugar a um fluxo concêntrico em direção a uma depressão potenciométrica deslocada para sul. Na área Camobi, a região inicialmente considerada como divisor de água subterrânea na análise geral passa a ser, agora corretamente, identificada como uma depressão potenciométrica.

No primeiro caso (Figura 7) as mudanças foram devido ao emprego do critério hidroestratigráfico, tendo sido

empregados na análise apenas poços que extraem água exclusivamente do aquífero Passo das Tropas, excluindo-se portanto os que captam água do aquífero Caturrita, que haviam sido considerados na análise geral. No segundo, o critério de continuidade hidráulica (tectônico) foi decisivo na inversão da natureza potenciométrica da área ocupada pelo Campus da UFSM, sendo devida ao emprego apenas de poços perfurados em uma porção do aquífero com continuidade hidráulica definida (bloco limitado por falhamentos).

Nos demais blocos tectonicamente definidos, embora a distribuição das cargas hidráulicas não tenha permitido a construção de mapas potenciométricos, pode ser definida uma direção geral de fluxo no sentido Norte. Esta direção, oposta à obtida pela abordagem genérica, é compatível com o mergulho geral do Membro Passo das Tropas em direção ao centro da bacia e também com a direção média de suas paleocorrentes (Figura 1).

5.1. Aquífero Passo das Tropas

A direção geral do fluxo da água subterrânea no Aquífero Passo das Tropas é aproximadamente para Norte, compreendida na faixa de variação das paleocorrentes determinada para seus arenitos (350° a 050°, com média em 020°). Esta direção é a resultante da conjugação do vetor do gradiente hidráulico com dois vetores de anisotropia, um deles determinado pelo falhamento NW (315° a 327°) e outro pelas paleocorrentes (direção média de 020°), à semelhança do descrito em Fetter (1981), ilustrado nas Figuras 9 e 10 (USEPA, 1991). O detalhamento da piezometria, somado ao conhecimento da condutividade hidráulica nas direções perpendiculares à do falhamento e das paleocorrentes permitirá o estabelecimento seguro da direção de fluxo no aquífero como um todo, bem como no interior dos blocos tectonicamente individualizados.

As transmissividades obtidas nos 11 poços com teste de bombeamento variam entre 0,01 e 6,27m²/h, os maiores valores estando distribuídos na área Camobi. O maior valor de T foi obtido para um poço totalmente penetrante (aquífero com 18,00m de espessura) em cujas proximidades os valores de T obtidos (poços 34 e 25) situaram-se em aproximadamente 0,15 m²/h. Os dados deste poço (24) fornecem

um valor de condutividade hidráulica de 0,348 m/h.

No bloco NE da área Camobi, os valores de T para três poços (20, 21 e 22) situaram-se entre 0,33 e 0,50 m²/h e a espessura do aquífero variou de 23,50 até 27,50m. Esta consistência de dados permitiu o cálculo de uma condutividade hidráulica média de 0,0154 m/h válida para este bloco.

Anisotropia marcante é evidenciada pelos dois valores de K referidos nos parágrafos anteriores, o primeiro deles 22,6 vezes maior que o segundo. Também o valor de K resultante dos dados do poço 34 (espessura de 35,00m e transmissividade igual a 0,15 m²/h) 0,004 m/h, situado no mesmo bloco estrutural do poço 24, nos dá indicação de anisotropia, a princípio atribuível à tectônica, podendo, porém, derivar de variações locais de porosidade devido a eventos diagenéticos (Garcia *et al.* 1999; Faccini *et al.* 1999).

A distribuição dos demais dados de transmissividade, não permite estabelecer com segurança, valores de condutividade hidráulica para os demais blocos da área Camobi ou Cidade.

O aquífero, em uma análise local, é contínuo, função da expressão de seus corpos arenosos, relacionados a depósitos de canais fluviais (acresções frontais, laterais e oblíquas), mas esta continuidade pode ser quebrada pela tectônica (sistema de falhamento NW).

A recarga deste aquífero ocorre por drenança (gotejamento) a partir do Membro Almoa e diretamente em suas áreas de exposição, ao sul e ao oeste da área estudada.

Não pode, contudo, ser descartada, sem maior investigação, a alimentação direta a partir das drenagens, como sugerido pelos poços da área Camobi, onde os arroios que formam as cabeceiras do Rio Vacacaí Mirim, encaixados no sistema NW de fraturamento, podem estar recarregando diretamente o aquífero no local, acarretando o diferencial hidráulico detectado nestes poços em relação aos da área Cidade.

Figura 9: Num aquífero isotrópico, direção de fluxo e gradiente hidráulico são paralelos (perpendiculares às equipotenciais).

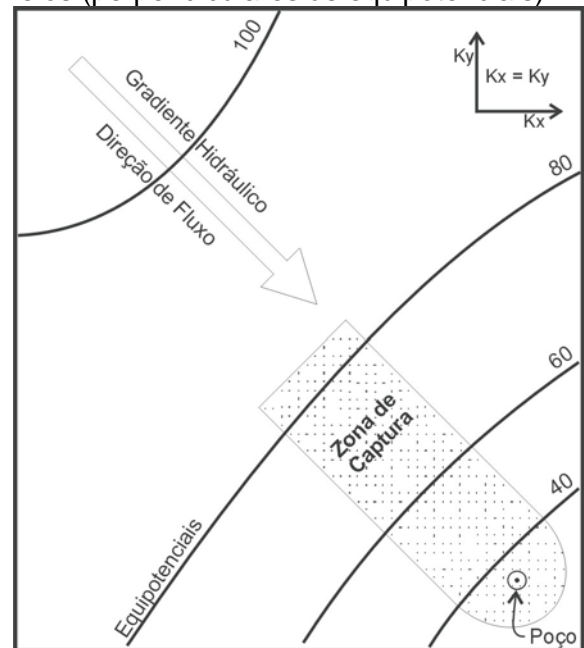
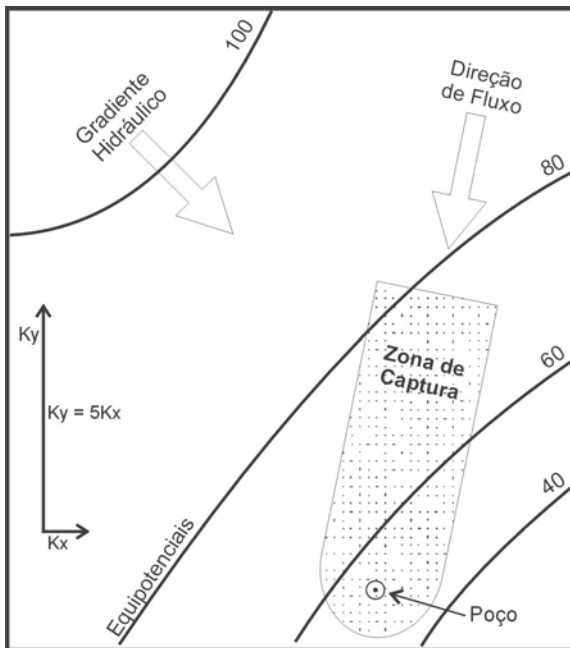


Figura 10: Alteração da direção do fluxo da água subterrânea devido à anisotropia. O ângulo entre o gradiente hidráulico e a direção de fluxo é determinado pela razão entre as condutividades hidráulicas (no exemplo, $K_y = 5K_x$).



Embora não tenha sido procedida uma análise de vulnerabilidade, o confinamento deste aquífero, a profundidade de sua ocorrência, seus tipos litológicos e os das rochas confinantes, os solos tipicamente argilo-arenosos ocorrentes na região e os baixos valores médios de condutividade hidráulica, indicam baixa vulnerabilidade natural que, porém, pode ser grandemente elevada devido à influência do fraturamento, a ser investigado quando da determinação da existência ou não de recarga direta a partir das drenagens.

5.2. Aquífero Caturrita

Três poços da área Cidade, situados em sua porção NE, captam água deste aquífero, nenhum deles tendo sido submetido a ensaio de bombeamento, sendo conhecida apenas a carga hidráulica do poço mais a NE na área Cidade (poço 11) que nos informa um artesianismo de aproximadamente 23,00m caracterizando o aquífero como confinado.

Com estas limitações pouco se pode afirmar a respeito das características hidráulicas do aquífero, apenas que a carga potenciométrica do único poço com esta informação disponibilizada é a mais elevada de todos os poços analisados (123,12m), o que sugere a possibilidade de recarregar o Aquífero Passo das Tropas sempre que houver conexão hidráulica entre ambos, devido a fraturamento tectônico.

As vazões informadas para os poços deste aquífero variam entre 6,0 e 40,0 m³/h não tendo sido possível a determinação de

um gradiente devido à má distribuição espacial dos dados disponíveis.

A associação faciológica do Aquífero Caturrita (canais fluviais isolados, sinuosos, anastomosados/meandranes, e *crevasse splays*), indica características de aquífero estratificado (variação de K menor que uma ordem de grandeza entre as camadas) ou multi-aquífero, dependendo da relação a ser estabelecida entre as condutividades hidráulicas das camadas.

Sua recarga se dá de forma direta - nas áreas de exposição de suas fácies arenosas - e por gotejamento, a partir de suas litofácies pelíticas, quando existentes.

Embora valores absolutos de vulnerabilidade natural não tenham sido obtidos até o momento, por estar capeado por um máximo de 34,00m (poço 09) e ser constituído por arenitos grossos a médios, este Aquífero é enquadrável em uma categoria de maior vulnerabilidade do que o Aquífero Passo das Tropas. O papel dos paleossolos na compartimentação hidráulica deste aquífero não está ainda estabelecido, mas eles poderão constituir-se em camadas guia para a hidroestratigrafia do Caturrita.

5.3. Aquitardo Sanga do Cabral

A porção da Formação Sanga do Cabral penetrada pelos poços analisados é constituída principalmente por arenitos finamente laminados a maciços (fácies fluviais) e sua caracterização como aquífero foi feita com base na investigação de afloramentos. O intervalo carece de informação hidrogeológica direta, pois nenhum dos poços analisados extrai água indubitavelmente desta formação.

5.4. Aquícludes

O Membro Alemoa da Formação Santa Maria e as fácies pelíticas da Formação Caturrita são os dois aquícludes penetrados pelos poços investigados. O aquíclude Alemoa sendo o de maior espessura, podendo alcançar 75,00m (poço 08) e o outro apresentando espessura variável, sendo possivelmente descontínuo, função da variação dos estilos fluviais, conforme sugerido em escala de afloramento.

6. Conclusões

Dois aquíferos são identificáveis na área: Passo das Tropas e Caturrita. O primeiro deles mais homogêneo e contínuo, enquanto que o segundo caracteriza-se por

heterogeneidades verticais e horizontais mais acentuadas.

A direção geral do fluxo no Aquífero Passo das Tropas é resultante da conjugação dos vetores de anisotropia produzidos pelo falhamento NW e pelas direções de paleocorrentes conjugados com o vetor teórico de fluxo ortogonal às equipotenciais.

Os rejeitos verticais produzidos pelos falhamentos NW são de maior magnitude que a espessura média do aquífero na região, podendo a comunicação hidráulica entre os blocos tectonicamente individualizados ocorrer apenas através de fraturas, situação ainda não investigada. Os valores mais altos de transmissividade obtidos na área Camobi sugerem recarga direta do aquífero a partir das drenagens existentes nas cabeceiras do Rio Vacacaí Mirim. A carga hidráulica do aquífero Caturrita permite supor participação na recarga do Passo das Tropas por drenança vertical através de fraturas.

Na escala operacional, abordar as rochas do Grupo Rosário do Sul como um único aquífero é inadequado. As heterogeneidades identificadas mostram a necessidade do conhecimento das diferentes características dos aquíferos individuais que compõem o SAG para sua correta gestão.

Os dados, conclusões preliminares e hipóteses de trabalho levantadas até o momento, demonstram que a integração de informações geológicas e geofísicas, somadas às técnicas clássicas da hidrogeologia, permite uma maior compreensão do papel das heterogeneidades no fluxo da água subterrânea, quesito fundamental para o aproveitamento sustentável do potencial produtivo dos aquíferos e sua gestão.

Bibliografia

- ARAÚJO, L. M., FRANÇA, A. B. & POTTER, P. E. 1995. Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai: mapas hidrogeológicos das formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó. Universidade Federal do Paraná (UFPR) e PETROBRÁS S.A., 16p. e Anexos.
- CAMPOS, H. C. N. S. 1999. Modelación conceptual y matemática del Acuífero Guaraní, Cono Sur. Mapa Hidrogeológico do Aquífero Guaraní. *Acta Geológica Leopoldensia*, 23(4): 3-50.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 1994. *Mapa Hidrogeológico da Folha de Santa Maria, 1:100.000*. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos. Projeto Mapas de Previsão de Recursos Hídricos Subterrâneos - SUREG-PA.
- FACCINI, U. F. 2000. *Estratigrafia do Permo-Triássico do Rio Grande do Sul: estilos deposicionais versus espaço de acomodação*. Porto Alegre, PPGeo-UFRGS, Tese de Doutorado, 2Vol., 322p, Documentação Anexa, 23 figs.
- FACCINI, U. F., GARCIA, A.J.V., LAVINA, E.L.C., SUSZCZYNSKI, A.M. & ZERFASS, H. 1999. Geometry, architecture and porosity distribution in Triassic sandstones in Southern Paraná Basin, Brazil: porous aquifer potential in Mercosul context. 51^a. *Reunião Anual da SBPC (A.33-022; CD-ROM)*, PUCRS, Porto Alegre.
- FACCINI, U. F., LAVINA, E. L., LOPES, R.C., SCHULTZ, C.L. & DUTRA, T. G. D. 2000. Gondwana sequences (Early Permian to Early Cretaceous) in Southern Border of Paraná Basin - stratigraphy and paleontology (Rio Grande do Sul State, Southern Brazil). In: 31^o *International Geological Congress, SBG - IUGS. Roteiro Geológico. Pre-Congress Field Trip -Bft02*, 37p.
- FETTER, C. W. 1981. Determination of the direction of ground water flow. *Ground Water Monitoring Review* 1(3):28-31.
- GARCIA, A.J.V., FACCINI, U.F., LAVINA, E.L.C., ZERFASS, H. & SUSZCZYNSKI, A.M. 1999. Geometry, architecture and porosity distribution in Mesozoic sandstones in Southern Paraná Basin, Brazil: reservoir/aquifer potential in Mercosul context. *Geological Society of America. 1999 Annual Meeting (P124)* Denver, Colorado, USA, p.350.
- GIARDIN, A. & FACCINI, U. F. 2002. Heterogeneidades faciológicas e hidroestratigrafia do Aquífero Guaraní na região central do Rio Grande do Sul: abordagem metodológica e resultados preliminares. In: 12^o. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, ABAS, Florianópolis-SC, 16p., *Anais*, CD-ROM.
- HUGGENBERGER, P. & AIGNER, T. 1999. Introduction to the special issue on aquifer-sedimentology: problems, perspectives and modern approaches.

Sedimentary Geology, 129:179-186.

REBOUÇAS, A. C. 1994. Sistema Aqüífero Botucatu no Brasil. *In*: 8^o. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, ABAS, Recife-PE, *Anais*, p.500-509.

ROSA FILHO, E. F., HINDI, E. C., ROSTIROLLA, S. P., FERREIRA, F.J.F & BITTENCOURT, A.V.L.. 2003. Sistema Aqüífero Guarani – considerações preliminares sobre a influência do Arco de

Ponta Grossa no fluxo das águas subterrâneas. *Águas Subterrâneas*, 17:91-111.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. 1991. Delineation of wellhead protection areas in fractured rocks. *EPA Report /570-9-91/009*, Office of Ground Water and Drinking Water, USEPA, 144 pp.