

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO AQUÍFERO PASSO DAS TROPAS, NA REGIÃO DE SANTA MARIA, RS: COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL E SUA INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO HIDROGEOLÓGICO

Wankler ¹, F. L.; Faccini, U. F. ² & Silva, P. L. ³

RESUMO - O presente trabalho discute o efeito do sistema de falhas pós-deposicionais do Membro Passo das Tropas no comportamento hidrogeológico do Aquífero Passo das Tropas. Este trabalho foi realizado na região limítrofe da área urbana da cidade de Santa Maria (RS). A metodologia inclui o uso de informações de imagens de radar, dados de afloramento, integração de modelos digitais de elevação (DEM) com dados estruturais e litológicos e caracterização estrutural e análise petrofísica das falhas. Os resultados mostram que a formação de blocos e sub-blocos estruturais, associado a erosão diferencial, formou pequenos aquíferos livres nos altos topográfico no sul e sudeste da área e um confinado, restrito ao noroeste da área de estudo. A presença de zonas de bandas de deformação e *shale smears* nas falhas constitui-se na principal barreira de permeabilidade vertical.

ABSTRACT – his work discuss the effect of post-depositional normal fault system of Passo das Tropas Member on hidrogeologic conduct of Passo das Tropas Aquifer. Researches were done on urban limitrophe area of Santa Maria city (RS). The methodology includes use of radar images information, outcrop data, digital elevation model integrated with litologic structural data and structural characterization and petrophysical analysis of faults. The results reveal that several small unconfined aquifers on high topographic at south/southeast of the área and one confined aquifer restricted to northwest were formed by the structural blocks and sub-blocks formation in association with differential erosion. The presence of deformation bands and shale smears in fault is the strong barriers to vertical permeability.

Palavras-Chave– Santa Maria, Aquífero Passo das Tropas, sistema de falhas

¹ Professor Adjunto - UFRR, IGeo. - Campus do Paricarana, Av. Ene Garcez, 2413, Br. Aeroporto, Boa Vista/RR.- CEP 69304-000 – (95)36213114, Fax (95)36213162 – fwankler@uol.com.br.

² Professor Titular - UNISINOS, PPGEÓ – Av. Unisinos, 950, Caixa Postal 275 São Leopoldo/RS – CEP 93.022-000 – (51) 35908174 e FAX (51)35908177 – ufaccini@unisinos.br.

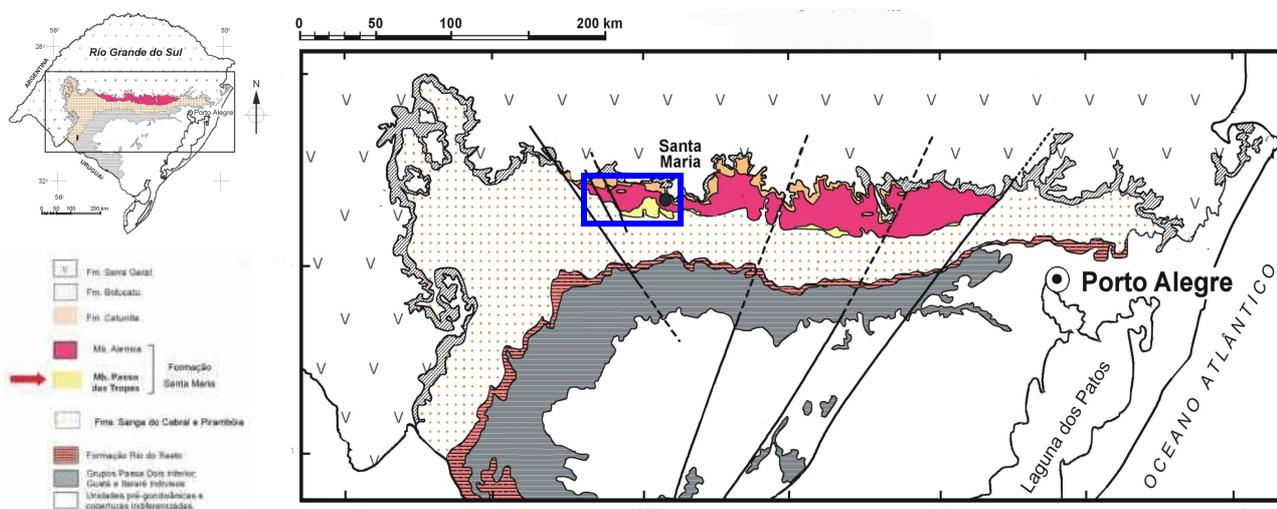
³ Acadêmico em Geologia - UNISINOS – Av. Unisinos, 950, Caixa Postal 275 São Leopoldo/RS – CEP 93.022-000 – (51) 35908174 e FAX (51)35908177 – pablois@yahoo.com.

INTRODUÇÃO

O Aquífero Passo das Tropas é uma unidade hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Guarani (SAG). É uma reserva hidrológica estratégica, pois sua área de ocorrência coincide com uma das regiões populacional e economicamente mais importantes da região central do Estado Rio Grande do Sul. Este trabalho está vinculado aos estudos do projeto “Hidroestratigrafia e modelagem geológica comparada do Sistema Aquífero Guarani nas áreas de Santa Maria e Estância Velha-Ivoti, RS” desenvolvido na UNISINOS/RS, que objetiva gerar critérios para delimitação de perímetros de proteção de poços a partir de mapeamento hidroestratigráfico e hidrogeológico, com vistas à geração de metodologias extensivas às demais áreas de ocorrência do sistema no Estado. Resultados preliminares deste projeto têm demonstrado que as características deposicionais e estruturais da rocha reservatório (Membro Passo das Tropas) interferem no comportamento hidráulico do aquífero. (Gardin & Faccini 2002; Faccini *et al* 2003; e Machado, 2005).

Zonas de falha exercem um importante efeito no controle do fluxo de água subterrânea, seja por afetar a geometria do depósito, seja pela natureza selante ou não das falhas. A presença de estruturas relacionadas à deformação rúptil (falhas, fraturas e juntas) pode vir a causar efeitos expressivos no comportamento da condutividade hidráulica em aquíferos porosos (Freeze & Cherry, 1993). Deste modo, estudos que analisem os efeitos tectônicos do reservatório são necessários para, em conjunto com dados deposicionais e hidrogeológicos, elaborar modelos conceituais de aquíferos (Hubbenberger & Aiger, 1999).

Assim, o objetivo deste trabalho é fazer uma avaliação qualitativa das influências que o sistema de falhas exerce sobre a heterogeneidade do Aquífero Passo das Tropas na região circundante da cidade de Santa Maria, numa área delimitada entre as coordenadas $-54^{\circ}07'38''$ - $29^{\circ}38'12''$ e $-53^{\circ}32'46''$ - $29^{\circ}51'32''$; (Figura 1).



CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

A unidade hidroestratigráfica estudada - Aquífero Passo das Tropas (Figura 2) – faz parte do Compartimento Central-Missões do Sistema Aquífero Guarani (Machado, 2005). Na região de Santa Maria, este aquífero é anisotrópico, com uma direção geral de fluxo para norte. Sua recarga é originada da drenança (gotejamento) a partir do Membro Alemoa ou diretamente em suas áreas aflorantes nas porções sul e sudeste, podendo ainda ocorrer recarga direta pelas redes de drenagem que formam a cabeceira do Vacacaí-Mirim, devido à rede de falhamentos da área (Faccini *et al* 2003). A análise conjunta do gradiente hidráulico do aquífero com os dados geológicos sugerem que estas anisotropias sejam resultado da combinação do padrão de paleocorrentes com a compartimentação pós-deposicional (Giardin & Faccini, 2004). A rocha reservatório – Membro Passo das Tropas - pertence ao Grupo Rosário do Sul (Andreis *et al* 1980), de ocorrência restrita à borda Sudoeste da Bacia do Paraná, no Rio Grande do Sul. Litologicamente apresenta dois intervalos com distintas características granulométricas e texturais que Wankler (2006) caracterizou e denominou informalmente de unidades São Valentim e Sarandi (Figura 2).

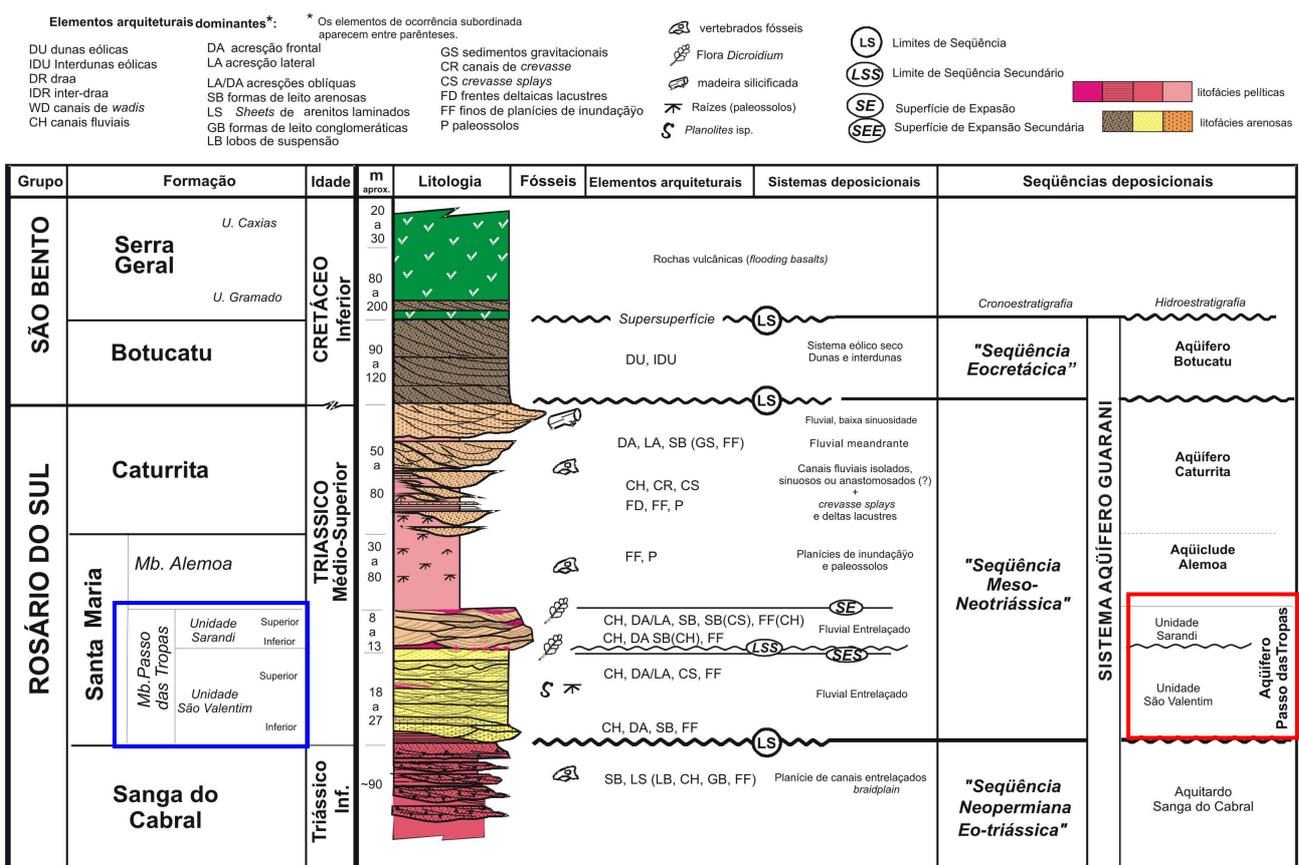


Figura 2 – Coluna estratigráfica e Hidroestratigrafia da área de estudo. Em vermelho é assinalado o Aquífero estudado e em azul sua rocha reservatório (Wankler, 2006).

A unidade inferior (São Valentim) é constituída por arenitos médios a finos, brancos a levemente rosados, com estratificação cruzada de pequeno a médio porte, algumas vezes maciços, com concentração de finos no topo, apresentando estruturas de fluidização, icnofósseis (*Planolites* isp.) e marcas de raiz. A superior (Sarandi) é constituída por arenitos médios a grossos, cor castanho claro, com estratificação cruzada de médio a grande porte, com níveis de conglomerados intraformacionais de cinco a dez centímetros na base, passando para arenitos médios com estratificação cruzada de pequeno porte e lentes de dois metros de espessura a mais de dez metros de extensão intercaladas com siltitos no topo, onde se registra fósseis de plantas (*Dicroidium*). O ambiente deposicional das duas unidades é interpretado como fluvial entrelaçado (Wankler, *op cit.*). A Unidade é segmentada por falhamentos NE e NW, que geraram blocos estruturais com rejeitos que variam entre 10 e 50 metros, produzidos pela movimentação por gravidade, rotação ou escalonamento (Da Rosa & Faccini, 2005).

METODOLOGIA

A metodologia incluiu: a análise de imagens de radar do Projeto RADAM, utilizada para o reconhecimento dos principais lineamentos estruturais presentes; atividades de campo, onde foram recolhidos dados para caracterização dos falhamentos associados aos lineamentos; plotagem dos dados em um aplicativo de georeferenciamento (ArcGIS, versão 8.1), com base cartográfica feita a partir da vetorização de cartas planialtimétricas digitais de escala 1:50.000 (IBGE); geração de um modelo digital do terreno (TIN - *triangular irregular network*) para sobreposição da rede de falhas (ArcView, versão 3.2) e de integração de um modelo digital do terreno gerado no aplicativo Ilwis (versão 4.0), com a imagem digital do mapa geológico de Wankler (2006). Para caracterização estrutural e análise petrofísica das falhas foi adotada a nomenclatura sugerida em Antonelli & Aydin (1995) para classificação de falhas em arenitos porosos, que tem sido utilizada tanto reservatórios de petróleo como em água subterrânea (Borba, 1996; Rawling *et al*, 2001; Eichhubl *et al*, 2004; e Tindall, 2006).

RESULTADOS

As imagens de radar mostraram que os lineamentos segmentam a área nos sentidos preferenciais NW-SE e NE-SW. Correspondem à falhas normais, verticais a subverticais (80-90°), de grande rejeito vertical (20-30m), com zonas de deformação de 0,10 a 1 metro. A movimentação diferenciada das falhas fragmentou as unidades geológicas da área de estudo em um conjunto de *horsts* e *grabens*, com camadas de mergulho muito suave (média 3 graus) de direção NE (Figura 3).

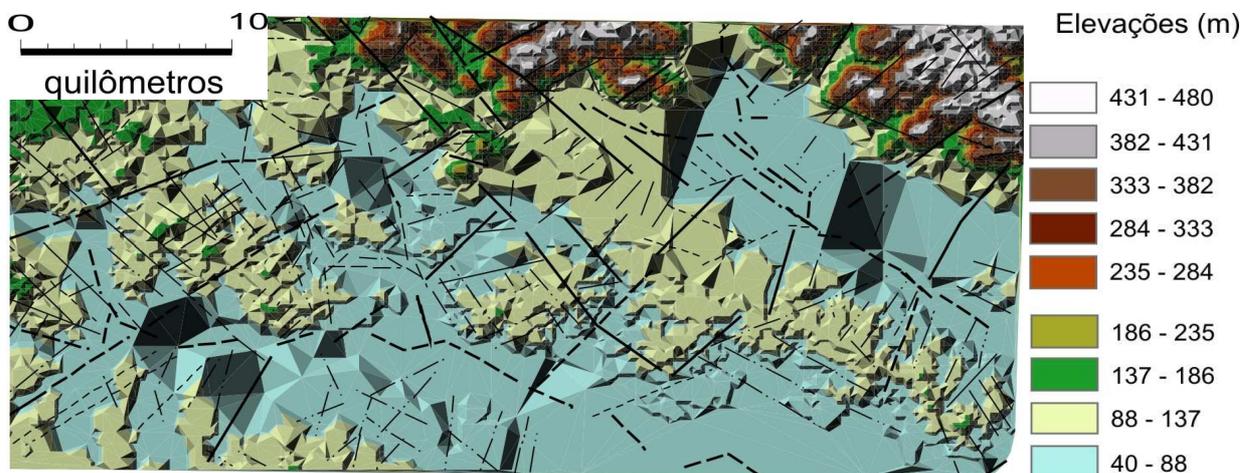


Figura 3 - Modelo Digital do Terreno (TIN) com sobreposição dos lineamentos identificados através das imagens de radar. Observar a relação entre a topografia e os lineamentos.

Nos *horst*, as litologias mais frequentemente observadas são os arenitos da Formação Sanga do Cabral e, nos *grabens*, os depósitos do Membro Passo das Tropas. Trata-se, aparentemente, do resultado da erosão diferencial causada pela rede de drenagens que se implantou após a tectônica pós-deposicional, que inicialmente decapou o topo dos altos estruturais, destruindo as camadas arenosas mais resistentes e expondo os litotipos da Formação Sanga do Cabral. Durante este período, fragmentos do Membro Passo das Tropas foram preservados nos baixos estruturais. Atualmente devido a composição litológica mais resistente à erosão, funcionam como cornijas das elevações das áreas do entorno da cidade de Santa Maria (Figuras 4 e 5).

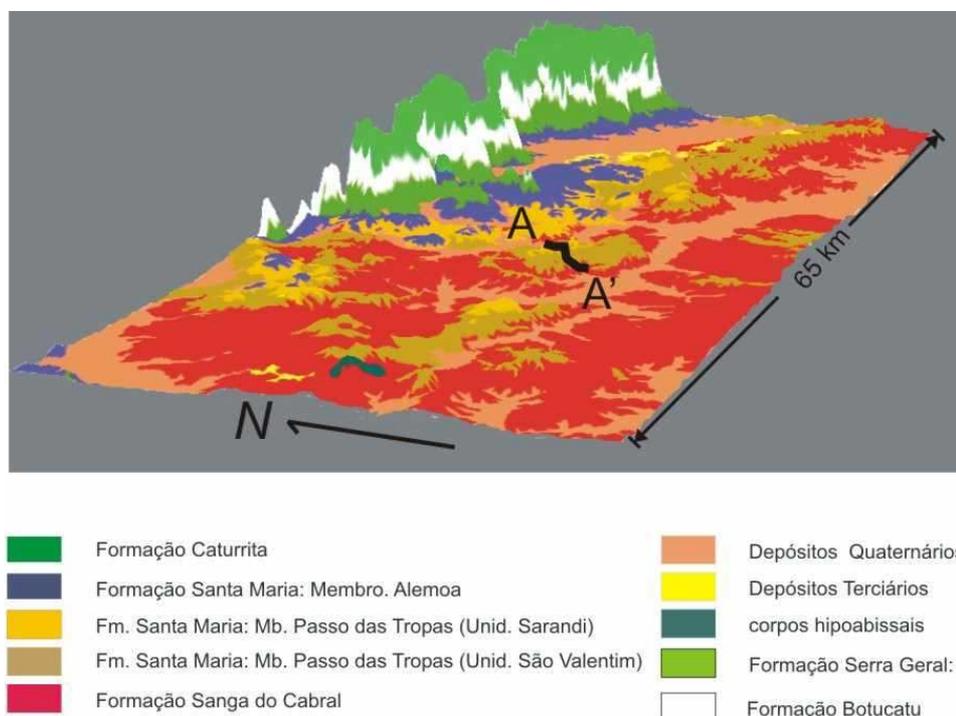


Figura 4 –Superposição do DEM e do mapa geológico da área, mostrando a distribuição das ocorrências do Membro Passo das Tropas (unidades São Valentim e Sarandi). Observar que esta unidade ocorre no topo das elevações nas porções sul e sudoeste da área. A seção A-A' corresponde à Figura 5.

Estes *horst* e *grabens* apresentam uma compartimentação interna, definida por um conjunto de falhas normais secundárias e fraturas, ambas com alinhamento normal em relação aos maiores lineamentos. As falhas secundárias são verticais, com rejeito vertical de 0,3 a 6 metros, que, por sua vez, limitam um conjunto de sub-blocos escalonados em direção às falhas de maior hierarquia (figura 5). Isto sugere que os pequenos rejeitos das falhas secundárias podem ter uma significativa contribuição no valor medido dos rejeitos das falhas que limitam os blocos principais.

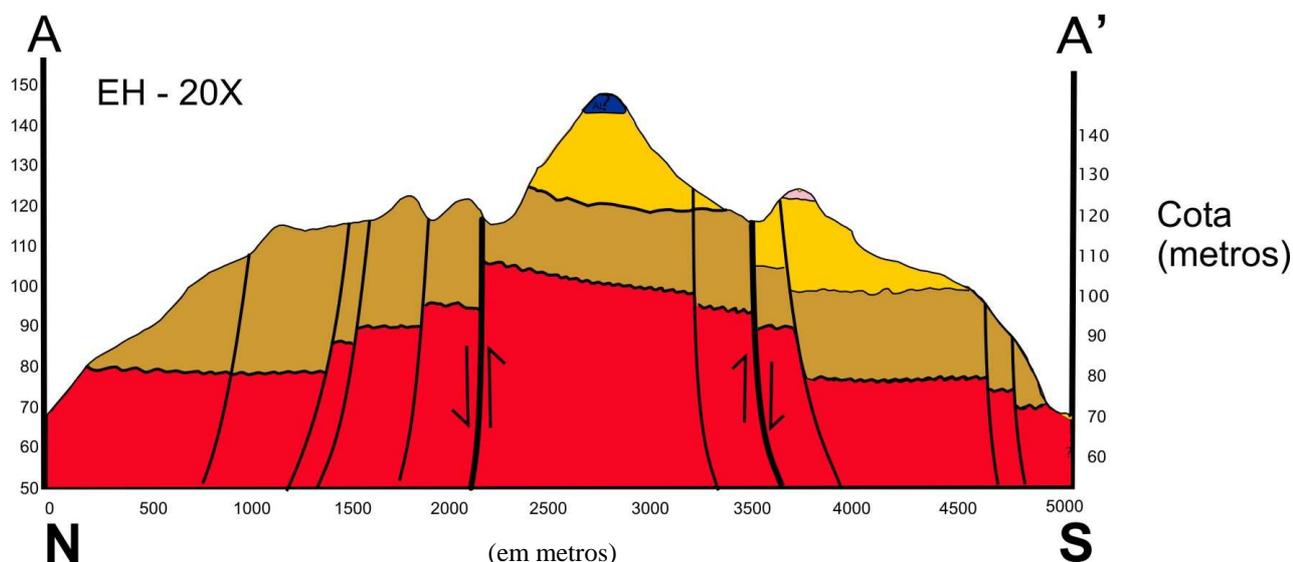


Figura 5 - Seção A-A' vista na Figura 3, mostrando em corte a arquitetura dos blocos estruturais. Observar o escalonamento das falhas normais secundárias.

No perímetro urbano de Santa Maria, o basculamento dos blocos e sub-blocos torna o aquífero confinado a partir das cotas 55 – 41 (Figura 6A), sendo abastecido pelo gotejamento do aquífero sobreposto e pelas áreas aflorantes do aquífero ao sul, onde se localizam entre as cotas 68 a 92, nas vertentes dos arroios Cadena e Passo das Tropas. As áreas de recarga, localizadas na região do Camobi, estariam dentro da UFSM, nas encostas da Região Rural de Pains, no substrato do Rio Vacacaí Mirim. Ao se comparar os baixos estruturais identificados com a superfície potenciométrica do Aquífero Passo das Tropas na área urbana de Santa Maria, observa-se que os baixos potenciométricos coincidem com as áreas limitadas pelas falhas principais (Figuras 6B e 6C).

Estes resultados sugerem que a compartimentação estrutural gerou heterogeneidades que causaram redução e perda da conectividade das rochas-reservatório, gerando aquíferos livres de pequena extensão nas áreas sul e sudeste. Na região noroeste da área de estudo, onde o decaimento gerado pela erosão foi menos intenso, o resultado foi o confinamento e anisotropia do comportamento hidráulico.

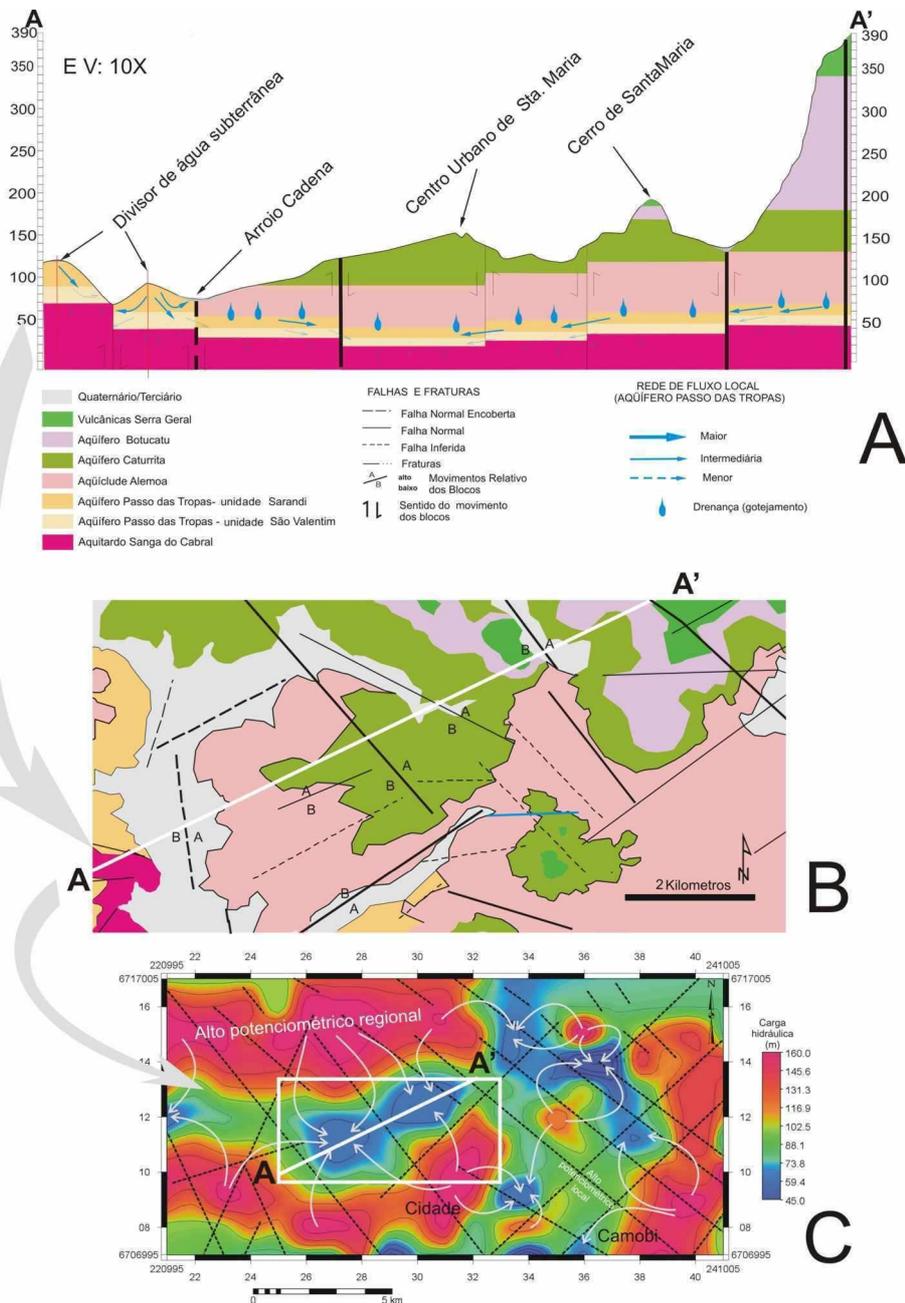


Figura 6 - Aquífero confinado Passo das Tropas: A) seção vertical do aquífero, na área do centro urbano de Santa Maria, com a distribuição de fluxo local hipotética representada; B) mapa geológico do centro urbano de Santa Maria com o movimento relativo dos blocos identificados; C) mapa potenciométrico de Giardin & Faccini (2003) com a localização da seção vertical (A) e mapa (B) (retângulo branco) - comparar a localização dos baixos potenciométricos com as depressões estruturais observadas nas figuras (A) e (B).

A caracterização estrutural das falhas permitiu reconhecer superfícies de deslizamento, estruturas de deslizamento com preenchimento de argilas (*shale smears*), brecha de falha e bandas de deformação. Sua descrição e os efeitos no comportamento hidrogeológico do aquífero serão discutidos a seguir.

As falhas com rejeito apresentam um *gauche* de 0,10 até 1 metro de espessura, cuja composição varia conforme a rocha afetada pela falha. Nas zonas de deformação observadas

próximo ao contato do Membro Passo das Tropas com a Formação Sanga do Cabral, foram reconhecidas estruturas de deslizamento com preenchimento de argilas (*shale smears*; Figura 7). As falhas são preenchidas por brecha de falha (*sensu* Sibson, 1977) formadas por fragmentos angulosos de arenito estratificado, por vezes plasticamente deformado, seccionado por fraturas sinuosas de pequena extensão, definindo uma zona da falha de aproximadamente 1 metro de espessura. Associadas às zonas de maior deformação, as camadas de arenito médio mostram-se deformadas por *drag folds*.



Figura 7 – Na foto à esquerda, observa-se uma superfície de deslizamento, mostrando *drag folds*; à direita, detalha da foto anterior, localizando uma *shale smears*.

Em áreas onde as falhas colocam em contato camadas areníticas, como na unidade São Valentim, a zona de falha tem 5 a 15 centímetros e é preenchida por fragmentos incoesos dos arenitos médios, formando lentes de geometria externa sinuosa com um padrão interno anastomosado, com 10 cm de espessura e 1 a 1,5 metros de extensão. Esta feição é classificada como brechas de falha (*sensu* Sibson, 1977). Na unidade Sarandi, as falhas observadas mostram pequenos rejeitos, com zonas de falha de 0,10 a 0,30 m, que internamente mostram uma rocha plasticamente deformada, sem presença de *shale smears* (Figura 8).

Em termos do efeito das zonas de falha nos controles de fluxo do aquífero, as superfícies de deslizamento cuja zona de deformação apresenta preenchimento por *shale smears* podem apresentar baixíssima permeabilidade perpendicular ao plano de falha. Já ao longo do plano de sua superfície, o efeito dependerá da pressão dos fluidos e do estado de *stress* atuante, podendo apresentar valores de permeabilidade elevados, se estes controles mantiverem a superfície aberta (Antonelly & Aydin, 1994). Na área onde não é observado *shale smear*, as características incoesas das brechas de falha sugerem padrões de permeabilidade perpendicular comparativamente menores que as apresentadas nas zonas de falha com preenchimento de argila.



Figura 8 - Foto da esquerda, com superfícies de deslizamento com brachas de falha; foto da direita, foto em detalhe das brechas de falha.

As bandas de deformação (Figura 9) formam conjuntos regularmente distribuídos, visíveis nos afloramentos com 10 a 15 cm de espaçamento, normais às falhas secundárias. Caracterizam-se como estruturas aproximadamente planares, podendo ter de poucos centímetros a dezenas de metros de extensão. Sua identificação em campo é facilitada pela erosão diferencial, que ressalta suas estruturas. Em rocha fresca, a zona deformada apresenta uma cor esbranquiçada onde, em alguns locais, se observa uma litificação localizada, especialmente quando as zonas de deformação ocorrem agrupadas com um espaçamento em torno 10 centímetros. Nesses casos, Antonelli & Aydin (*op cit*) as classificam como zonas de bandas de deformação, onde freqüentemente a litificação afeta toda a área perturbada. As zonas de deformação e bandas de deformação ocorrem associadas tanto às falhas NE-SW como às NW-SE.



Figura 7 – Bandas de deformação no Membro Passo das Tropas. A zona sem coloração identifica os locais que litificação é mais pronunciada.

A presença de zonas de bandas de deformação na rocha-reservatório pode causar significativo efeito no comportamento hidrogeológico do aquífero. Antonelli & Aydin (1995), ao analisarem arenitos eólicos do Arches National Park (EUA), verificaram que a permeabilidade perpendicular em uma banda de deformação pode ser de uma a quatro vezes menor do que na rocha matriz. Na interpretação dos autores, a presença de bandas de deformação em elevada densidade, se por um lado não causa mudanças na porosidade, por outro, pode resultar em efeitos significativos na permeabilidade média do reservatório. As superfícies de deslizamento resultam da perda de coesão da rocha, em função da elevada concentração da deformação. Em arenitos porosos, a zona de deformação das falhas pode mostrar porosidades que tendem a zero e o tamanho de grão pode ser reduzido a até 0,5 mm (Aydin & Johnson, 1983).

CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho apontam para as seguintes conclusões:

- as principais direções de lineamentos identificadas nas imagens de radar representam falhas normais que segmentam todas as unidades da área de estudo, ocasionado a compartimentação do Membro Passo das Tropas em blocos e sub-blocos estruturais;
- a compartimentação estrutural gerou heterogeneidades nos aquíferos, em função de redução e perda da conectividade dos depósitos pelo basculamento dos blocos e barreiras de permeabilidade vertical;
- a erosão diferencial que afetou os blocos estruturais causou a segmentação do Aquífero Passo das Tropas, formando pequenos aquíferos livres nos altos topográficos no sul e sudeste da área e um confinado, restrito ao noroeste da área de estudo;
- as barreiras de permeabilidade vertical são a presença de zonas de bandas de deformação e a presença de *shale smears* preenchendo as superfícies de deslizamento;

BIBLIOGRAFIA

- ANDREIS, R.R.; BOSSI, G.E.; MONTARDO, D.K. 1980. “O Grupo Rosário do Sul (Triássico) no Rio Grande do Sul”. In: Anais do 31º Congresso Brasileiro de Geologia, Camboriú, 1980, v. 2, p. 659-73.
- ANTONELLINI, M. & AYDIN, A. 1995. *Effect of faulting on fluid flow on porous sandstones: geometry and spatial distribution*. AAPG Bulletin, 79 (5): 642-671
- ANTONELLINI, M. & AYDIN, A. 1994. *Effect of faulting on fluid flow on porous sandstones: petrophysical properties*. AAPG Bulletin, 78: 355-377.
- AYDIN, A. & JOHNSON, A. M. 1983. *Analysis of faulting on porous sandstones. Great Britain*. Journal of Structural Geology, 5 (1): 19-31
- BORBA, C. 1996. *Heterogeneidades Estruturais em Reservatórios: Geometria e Distribuição de Falhas*. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Estadual de Campinas, 170
- Da Rosa , A. A. S. & Faccini, U. F. 2005. *Delimitação de blocos estruturais em seqüências mesozóicas na região central do Estado do Rio Grande do Sul*. Gæa , 1:(1)16-23.

- EICHHBL, P. ET AL. 2004. *Paleo-fluid flow and deformation in the Aztec Sandstone at the Valley of Fire, Nevada – Evidence for the coupling of hydrogeologic, diagenetic, and tectonic process*. GSA Bulletin, 116 (9/10): 1120-1136.
- FACCINI, U. F.; GIARDIN, A.; MACHADO, J. L. F., 2003. “*Heterogeneidades litofaciológicas e hidroestratigrafia do Sistema Aquífero Guarani na Região Central do Rio Grande do Sul*”. In: *Geometria, Arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares - um estudo de casos*. São Leopoldo, Editora Unisinos organizado por Paim, P. S. G.; Faccini, U. F. & Neto, R. G.(85-7431-205-3) (convênio 88.98.0750.00 – PADCT III), p. 147-173.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. 1993. *Groundwater*. New Jersey (EUA). Prentice-Hall. 604 p.
- GIARDIN, A & FACCINI, U. F. 2004 “*Complexidade hidroestratigráfica e estrutural do sistema aquífero guarani: abordagem metodológica aplicada ao exemplo da área de Santa Maria-RS, Brasil*”. Rev. Águas Subterrâneas, 18:39-54.
- GIARDIN, A. & FACCINI, U. F. 2002. “*Heterogeneidades faciológicas e hidroestratigrafia do Aquífero Guarani na região central do Rio Grande do Sul: abordagem metodológica e resultados preliminares*”. In: 12º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 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.
- MACHADO, J. L. F. 2005. *Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul*. Tese de Doutorado, PPGeo/UNISINOS, São Leopoldo. 254 p.
- RAWLING, G. C.; GOODWIN, L. B. & WILSON, J. L. 2001. Internal architecture, permeability structure, and hidrologic significance of contrasting fault-zone types. *Geology*, 29 (1): 43-46.
- SIBSON, R. H. 1977. *Fault rocks and fault mechanism*. Journal of Geological Society of London, 133: 191-214.
- TINDALL, S. E. 2006. *Jointed deformation bands may not compartmentalize reservoirs*. AAPG Bulletin, 90 (2): 177-192
- WANKLER, F. L. 2006. *Arquitetura Deposicional e Compartimentação Estrutural do Aquífero Passo das Tropas, na região de Santa Maria, RS: influências no comportamento Hidrogeológico*. Tese de Doutorado, PPGeo/UNISINOS, São Leopoldo, 193 p.