

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GEOLOGIA SEDIMENTAR**

TESE DE DOUTORADO

**COMPARTIMENTAÇÃO ESPACIAL E ARCABOUÇO
HIDROESTRATIGRÁFICO DO SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI
NO RIO GRANDE DO SUL**

José Luiz Flores Machado

Orientador: Dr. Ubiratan Ferrucio Faccini

Comissão Examinadora:

Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho

Dr. Jorge Montañó Xavier

Dr. Ricardo da Cunha Lopes

São Leopoldo – Rio Grande do Sul

Fevereiro de 2005

Ficha catalográfica

M149 Machado, José Luiz Flores

Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aqüífero Guarani no Rio Grande do Sul / José Luiz Flores Machado. – Porto Alegre: UNISINOS, 2005.

237 f. : ilust.

Tese – Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geologia – Área de Concentração em Geologia Sedimentar.

CDU 556.3(816.5)

1. Hidrogeologia – Rio Grande do Sul
2. Hidroestratigrafia
3. Aqüífero Guarani
4. Compartimentação Estrutural

CPRM – Superintendência Regional de Porto Alegre
Gerência de Relações Institucionais e Desenvolvimento – GERIDE
Seção de Documentação Técnica – SECDOT
Bibl. Ana Lúcia B. F. Coelho – CRB10/840

“Somente quando o poço seca é que nos damos conta da importância da água”

Benjamin Franklin

“É inevitável que, quanto mais ambicioso o trabalho, mais imperfeita seja a sua execução... Mas isso não quer dizer que ele só deva ser apresentado quando não houver mais nenhuma esperança de melhorá-lo”

Friedrich Hayek
(The Constitution of Liberty)

ATESTADO DE APROVAÇÃO

ATESTAMOS que a tese de Doutorado

**Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema
Aqüífero Guarani no Rio Grande do Sul,**

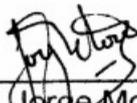
apresentada por **José Luiz Flores Machado,**

foi aceita e aprovada como atendimento parcial aos requisitos para a obtenção
do grau de **Doutor em Geologia**, com conceito APROVADO COM LOUVOR

Banca Examinadora:



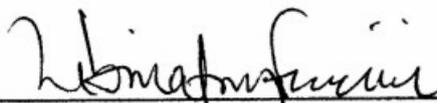
Prof. Dr. Ernani F. da Rosa Filho
Universidade Federal do Paraná



Prof. Dr. Jorge Montañó Xavier
Universidade da República do Uruguai



Prof. Dr. Ricardo da Cunha Lopes
CPRM



Prof. Dr. Ubiratan Ferrucio Faccini
UNISINOS


Presidente da Banca Examinadora

16 / 03 / 2005
Data

AGRADECIMENTOS

Agradeço de todo o coração a Maria Bernadete, Gabriella e Fernando, minha esposa e filhos, por terem me apoiado e compreendido minhas “ausências”, relacionadas com minhas atividades na confecção desta tese.

Agradeço também:

À CAPES, pois através de uma bolsa desta instituição foi possível completar meus estudos de doutorado.

À Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – SGB/CPRM, através de todos seus funcionários, meus colegas, que direta ou indiretamente me auxiliaram na confecção da tese e que por serem muitos, me abstenho de nomeá-los, para evitar injustiças, com prováveis omissões.

À Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, que me proporcionou a oportunidade de estudar em tão prestigiosa instituição e me colocou a disposição toda a sua estrutura, para a finalização desta tese. Aqui se incluem os professores e colegas do pós-graduação que participaram de discussões sobre o tema e os alunos bolsistas, que ajudaram no cansativo trabalho de implementação gráfica da documentação e edição do texto.

À Companhia Riograndense de Saneamento – CORSAN e seu corpo técnico, que gentilmente me cedeu grande parte do seu acervo técnico para análise nesta tese. Do mesmo modo foram muito importantes os dados obtidos de empresas particulares de perfuração.

Ao Prof. Dr. Antonio Jorge V. Garcia, pelo incentivo no prosseguimento dos meus estudos, que culminaram com esta tese.

Ao Prof. Dr. Heraldo Campos, por acreditar na minha concepção de um estudo regional do Sistema Aquífero Guarani, devido às grandes lacunas existentes no seu conhecimento.

Ao Prof. Dr. Ubiratan Ferrucio Faccini, meu orientador, presente em todas as fases do trabalho, grande incentivador, sem o qual teria sido impossível para eu concluir esta tese.

RESUMO

Esta tese trata da influência que os grandes sistemas de falhas no Rio Grande do Sul, produzem na estruturação espacial e hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Inicialmente foram apresentados os conceitos relativos a unidades hidroestratigráficas e sistemas aquíferos, com a posterior determinação da hidroestratigrafia do SAG no Rio Grande do Sul.

Foram confeccionadas oito seções geológicas e hidrogeológicas, que permitiram a delimitação de quatro grandes compartimentos estruturais. O Compartimento Leste é delimitado pelo Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu (Falha do Leão), e os aquíferos estão associados com as Formações Botucatu e Pirambóia ou exclusivamente a Formação Botucatu, na porção norte - nordeste do compartimento. O Compartimento Oeste é delimitado pelo Sistema de Falhas Jaguari - Mata e sua hidroestratigrafia é semelhante à da porção uruguaia do SAG, com a ocorrência das Formações Guará e Botucatu, correlacionáveis com a Formação Tacuarembó do Uruguai. O Compartimento Norte - Alto Uruguai pertence à área de influência norte do Sistema de Falhas Terra de Areia - Posadas, estando totalmente confinado pelos derrames da Formação Serra Geral, e o SAG é representado apenas pelas litologias eólicas da Formação Botucatu. O Compartimento Central - Missões caracteriza-se principalmente pela presença de aquíferos associados com as formações triássicas.

Após a delimitação dos compartimentos estruturais, eles foram caracterizados quanto à espessura das camadas do SAG, espessura das camadas confinantes, cotas do topo do SAG, direção do fluxo da água e conteúdo iônico (STD).

ABSTRACT

This thesis shows the effects of great fault systems of Rio Grande do Sul State on Guarani Aquifer System structural organization and hydrostratigraphy. Initially was presented the concepts related with hydrostratigraphic units and aquifer systems, with subsequent determination of SAG's hydrostratigraphy in the Rio Grande do Sul. Seven geological and hydrogeological cross-sections were produced delineating four great structural compartments. Dorsal de Canguçu Fault System (Leão Fault) limits the Leste Compartment and the aquifers are associated with Botucatu/Pirambóia Formations or only Botucatu Formation in the north-northeast portion of the compartment. Jaguari-Mata Fault System limits the Oeste Compartment and its hydrostratigraphy is similar to the Uruguayan portion of the aquifer system. The Norte-Alto Uruguai Compartment is influenced by the north portion of the Terra de Areia-Posadas Fault System, with eolian litologies of Botucatu Formation totally confined by volcanic lavas of Serra Geral Formation. The Central-Missões Compartment is characterized by aquifers associated only to Triassic formations.

After structural delimitation, compartments were characterized by total thickness of SAG, confining beds thickness, altimetry of SAG's top, direction of groundwater flow and total solid dissolveds (TSD) content.

SUMÁRIO

	página
Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	v
Sumário	vi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Extensão e caracterização sucinta do SAG no contexto dos países do Cone Sul	3
1.2.1 Brasil	3
1.2.2 Uruguai	5
1.2.3 Argentina	7
1.2.4 Paraguai	9
1.3 Formulação do problema	9
1.4 Delimitação do tema e área de estudo	12
1.5 Objetivos	15
1.5.1 Objetivo geral	15
1.5.2 Objetivos específicos	15
2 MATERIAIS E MÉTODOS	16
2.1 Levantamento e revisão bibliográfica	16
2.2 Coleta, cadastramento e interpretação de dados de poços tubulares	17
2.3 Confeção de mapas de contorno estrutural	17
2.4 Construção de seções	19
2.5 Mapas potenciométricos	20
2.6 Mapa de espessura	20
2.7 Mapa de espessura das rochas confinantes	20
2.8 Mapa hidroquímico	21
2.9 Definição de unidades hidroestratigráficas	21
3 EVOLUÇÃO DOS CONHECIMENTOS RELACIONADOS COM O SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI NO RIO GRANDE DO SUL	22
3.1 Evolução dos conhecimentos estratigráficos	22
3.2 Histórico das investigações hidrogeológicas	25
3.2.1 Avanços originados dos trabalhos acadêmicos	29
4 DEFINIÇÕES FUNDAMENTAIS DOS SISTEMAS AQÜÍFEROS	39
4.1 Considerações gerais	39
4.2 Parâmetros hidrogeológicos fundamentais	40
4.2.1 Porosidade	40
4.2.2 Condutividade Hidráulica	41
4.2.3 Transmissividade	44
4.2.4 Coeficiente de Armazenamento	45
4.3 Classificação dos tipos de aquíferos	46
4.4 Heterogeneidade e anisotropia da condutividade hidráulica dos aquíferos	49
4.5 Outros termos importantes utilizados em hidrologia subterrânea .	52
4.5.1 Nível Freático (NF)	52

4.5.2	Nível Estático (NE)	52
4.5.3	Nível Dinâmico (ND)	52
4.5.4	Rebaixamento (s)	52
4.5.5	Raio de Influência (R)	52
4.5.6	Capacidade Específica (Q/s)	52
4.5.7	Poço jorrante ou surgente	53
5	CONCEITUAÇÃO E DELINEAMENTO DE UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS	54
5.1	Princípios	54
5.2	Unidades Hidroestratigráficas – conceitos	55
5.3	Zonas Aqüíferas, Aqüíferos e Sistemas Aqüíferos	60
5.4	Formação hidrogeológica, grupo hidrogeológico e sistemas hidrogeológicos	63
5.5	Níveis de identificação de entidades hidrogeológicas	64
5.6	Conceito de entidade hidrogeológica	65
5.7	Natureza das entidades hidrogeológicas	66
5.8	Conceito de províncias hidrogeológicas e aqüíferas	68
5.9	Nomenclatura: diretrizes propostas por Laney & Davidson (1986)	69
5.10	Discussão sobre o delineamento das unidades hidroestratigráficas e sistemas aqüíferos.....	71
6	ELEMENTOS ESTRUTURAIS CONDICIONANTES DO SISTEMA Aqüífero Guarani no Rio Grande do Sul	73
6.1	A Estruturação Tectônica do Sistema Aqüífero Guarani na Bacia do Paraná – uma síntese	73
6.1.1	Falhas e lineamentos	73
6.1.2	Arcos	75
6.2	Considerações preliminares sobre a proposição de compartimentação do SAG no RS	77
6.3	Compartimentos Estruturais do SAG no Rio Grande do Sul	82
6.3.1	Compartimento Leste	82
6.3.2	Compartimento Oeste	87
6.3.3	Compartimento Norte - Alto Uruguai	89
6.3.4	Compartimento Central - Missões	93
7	UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS RELACIONADAS COM O SISTEMA Aqüífero Guarani no Rio Grande do Sul	95
7.1	Considerações preliminares	95
7.2	Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral	99
7.3	Unidade Hidroestratigráfica Botucatu	105
7.4	Unidade Hidroestratigráfica Guará	116
7.5	Unidade Hidroestratigráfica Arenito Mata	123
7.6	Unidade Hidroestratigráfica Caturrita	126
7.7	Unidade Hidroestratigráfica Alemoa	131
7.8	Unidade Hidroestratigráfica Passo das Tropas 1	135
7.9	Unidade Hidroestratigráfica Passo das Tropas 2	141
7.10	Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral	148
7.11	Unidade Hidroestratigráfica Pirambóia	152
7.12	Unidade Hidroestratigráfica Rio do Rasto	159

8 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPARTIMENTOS ESTRUTURAIS DO SAG	164
8.1 Introdução	164
8.2 Compartimento Oeste	168
8.3 Compartimento Leste	178
8.4 Compartimento Norte - Alto Uruguai	184
8.5 Compartimento Central – Missões	189
9 ARCABOUÇO HIDROESTRATIGRÁFICO DO SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI NO RIO GRANDE DO SUL	196
10 CONCLUSÕES	204
11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	212
ANEXOS	226
Anexo 1	
Dados de poços tubulares do Compartimento Oeste (Confinado)	228
Dados de poços tubulares do Compartimento Leste (Confinado)	229
Dados de poços tubulares do Compartimento Norte – Alto Uruguai (Confinado)	231
Dados de poços tubulares do Compartimento Central – Missões (Confinado)	232
Dados de poços tubulares do Compartimento Oeste (Afloramentos)	233
Dados de poços tubulares do Compartimento Leste (Afloramentos)	234
Dados de poços tubulares do Compartimento Central – Missões (Afloramentos)	234
ANEXO 2	
Mapa de localização das cidades citadas no texto	237

Índice de Figuras

Capítulo 1

Figuras:

1.1	Localização do Sistema Aquífero Guarani no Estado do Rio Grande do Sul .	1
1.2	Distribuição dos valores de espessura do SAG não levando em consideração as suas compartimentações estruturais (Araújo <i>et al.</i> , 1995) ..	4
1.3	Isolinhas representativas da espessura das rochas confinantes do SAG não levando em consideração as suas compartimentações estruturais (Araújo <i>et al.</i> , 1995)	6
1.4	Mapa potenciométrico com as linhas de fluxo do SAG traçadas sem levar em consideração as compartimentações estruturais (Araújo <i>et al.</i> , 1995)	8

Capítulo 2

Figuras

2.1	Mapa de poços selecionados do Sistema Aquífero Guarani	18
-----	--	----

Capítulo 3

Figuras

3.1	Evolução histórica das principais propostas de organização litoestratigráfica do intervalo permo-triássico/juro-cretácico da Bacia do Paraná até o início da década de 1980, enfatizando os trabalhos relacionados à estratigrafia do Rio Grande do Sul. (Faccini, 2000)	23
3.2	Seqüências deposicionais e equivalências litoestratigráficas do Mesozóico do Rio Grande do Sul, segundo Faccini (2000) e Faccini, Giardin & Machado (2003)	24
3.3	Mapa das províncias hidrogeológicas do Rio Grande do Sul (Hausmann, 1995)	27
3.4	Hidroestratigrafia química preliminar para os aquíferos da região central do Rio Grande do Sul (Machado, 1998)	29
3.5	Classificação das unidades hidrogeológicas da Formação Serra Geral (Lisboa, 1996)	37

Capítulo 4

Figuras

4.1	Porosidade primária com espaços livres (a) e preenchidos (b) (Fetter, 1989)	40
4.2	Porosidade, retenção e vazão específica x granulometria (CETESB, 1977) .	41
4.3	Experimento de Darcy para a condutividade hidráulica (Verruijt, 1970)	42
4.4	Piezômetro mostrando a carga hidráulica do aquífero (Verruijt, 1970)	43
4.5	Valores de K em função de distintos materiais (Pulido, 1978)	43
4.6	Diagrama mostrando a diferença conceitual entre condutividade hidráulica e transmissividade, modificado de Pulido (1978)	44
4.7	Comparação entre o coeficiente de armazenamento em aquíferos confinados e a porosidade em aquíferos livres (Watson & Burnett, 1995)	46
4.8	Tipos de aquíferos conforme o tipo de porosidade	47
4.9	Relação de K e K' em diferentes aquíferos segundo Krusemann e deRidder (1980)	48
4.10	Aquíferos com pressão artesianana (confinados) e hidrostática (livres)	49
4.11	Heterogeneidade de acamamento e de "trending" (Freeze e Cherry, 1979)	50
4.12	Combinações entre heterogeneidade e anisotropia (Freeze e Cherry, 1979) .	51
4.13	Aquífero arenoso relativamente homogêneo (Freeze e Cherry, 1979)	51
4.14	Ilustração do raio de influência e cone de rebaixamento em torno de um poço perfurado em aquífero confinado	53

Capítulo 5

Figuras

5.1	Correspondência entre os termos hidroestratigráficos tradicionais e os utilizados pelo USGS (http://www.geology.buffalo.edu/courses/...)	56
5.2	Classificação das unidades hidroestratigráficas de acordo com suas características de porosidade e permeabilidade (DAEE/USP, 1992)	57
5.3	Coluna hidroestratigráfica utilizando os termos tradicionais da hidroestratigrafia e sua correlação direta com a litologia (http://www.longlake.ca/...)	58
5.4	Coluna hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Dakota e aquíferos associados (http://www.kgs.ku.edu/Dakota/vol1/hydro/hydro02.htm)	59
5.5	Coluna hidroestratigráfica detalhada do <i>High Plains Aquifer</i> com a descrição sucinta das características litológicas (http://capp.water.usgs.gov/gwa/ch_c/jpeg/C067.jpeg)	59
5.6	Conjunto de colunas hidroestratigráficas mostrando grandes variações na localização das unidades hidroestratigráficas em bacias geológicas contíguas do Colorado Plateau (http://capp.water.usgs.gov/gwa/ch_c/jpeg/C109.jpeg)	60
5.7	Seqüência hidroestratigráfica composta para várias bacias do Sistema Dakota-Glen Canyon (http://capp.water.usgs.gov/gwa/ch_c/jpeg/C121.jpeg)	62
5.8	Seqüências hidroestratigráficas compostas do High Plains e Dakota aquífer para vários locais nos estados de Kansas e Colorado (EUA) (http://www.kgs.ku.edu/Dakota/vol3/fy92/rep08.htm)	63
5.9	Províncias hidrogeológicas do Rio Grande do Sul (Hausmann, 1995)	68
5.10	Sistemas aquíferos denominados segundo a litologia, litoestratigrafia e cronoestratigrafia em uma coluna hidroestratigráfica para os estados de Illinois e Wisconsin (EUA) (Fetter, 1980)	70

Capítulo 6

Figuras

6.1	Mapa Estrutural do SAG no contexto do Cone Sul modificado de Araújo <i>et al.</i> , 1999, Paulipetro (1982) e Zalán <i>et al.</i> , 1986	74
6.2	Evolução estrutural do SAG e seu contexto na Bacia do Paraná (Fúlfaro <i>et al.</i> , 1982)	76
6.3	Mapa da região de Minas do Leão, com a localização da Falha do Leão e a base do SAG, modificado de Aboarrage & Lopes (1986)	78
6.4	Variação no condicionamento dos afloramentos do SAG na região de Lages, em Santa Catarina, devido à estrutura de grande porte relacionada com a Falha do Leão, que muda suas condições hidrogeológicas. Mapa modificado de DNPM (1986)	79
6.5	Mapa geológico entre os municípios de São Pedro do Sul e Jaguarí onde podem ser visualizadas as estruturas que compõem o Sistema de Falhas Jaguarí - Mata, de direção noroeste modificada de Zerfass <i>et al.</i> (2003)	80
6.6	Principais sistemas de falhas que compartimentam o Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul e as rosetas que definem as principais direções de falhamentos, modificado de Lisboa (1996)	81
6.7	Mapa de localização das seções utilizadas na compartimentação do Sistema Aquífero Guarani	83
6.8	Seção geológica esquemática nas Minas do Leão, em que estão representadas as estruturas relacionadas com o prolongamento, a partir do Escudo, do Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu, que compartimentam mais a norte, o SAG em setores Leste e Central	84

6.9	Seção geológica esquemática ilustrando o efeito do Sistema de Falhas da Dorsal de Canguçu (SFDC) sobre o SAG causando a elevação das cotas do topo do SAG no Compartimento Leste, em relação ao Compartimento Norte-Auto Uruguai	85
6.10	Seção geológica esquemática entre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, notando-se a grande diferença entre as cotas do topo do SAG nos dois estados, devido a compartimentação Leste e Norte - Alto Uruguai	86
6.11	Seção geológica esquemática em que aparece o Sistema de Falhas Jaguari - Mata e a compartimentação Oeste e Central - Zona Missões do SAG Nota-se a estruturação dômica devido a falhamentos secundários (não representados)	88
6.12	Seção geológica esquemática onde se visualiza o Sistema de Falhas Terra de Areia - Posadas delimitando os Compartimentos Central - Missões e Norte - Alto Uruguai	90
6.13	Seção geológica esquemática Tramandaí - Torres, não levando em consideração a estruturação tectônica, aparentando uma sinclinal, modificado de Fabrício (1980)	91
6.14	Seção hidrogeológica esquemática onde se visualiza o Sistema de Falhas Terra de Areia - Posadas limitando os Compartimentos Norte - Alto Uruguai e Central - Missões e o Sistema de Falhas Jaguari - Mata limitando os Compartimentos Central - Missões e Oeste	92
6.15	Seção geológica esquemática mostrando o Sistema de Falhas Jaguari - Mata (SFJM) delimitando os compartimentos Oeste e Central – Missões, e o Sistema de Falhas Terra de Areia - Posadas (SFTA-P) que delimita os compartimentos Central - Missões e Norte - Alto Uruguai	94

Capítulo 7

Figuras

7.1	Mapa geológico das porções aflorantes e confinadas do SAG no Rio Grande do Sul	97
7.2	Diaclasamento colunar dos basaltos da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral	101
7.3	Basaltos da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral com aspecto maciço, em afloramento na estrada Santana do Livramento – Quaraí	101
7.4	Áreas de alteração de basalto da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral propícias para infiltração de águas superficiais, nas proximidades de Santo Antônio da Patrulha	102
7.5	Derrame basáltico da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral ocupando uma depressão nos arenitos eólicos da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, na região de Santo Antônio da Patrulha	102
7.6	Perfilagem geofísica do poço 9 - UR - 13 - RS em Uruguaiana, podem ser observadas nas seções gama e resistência os sucessivos derrames que compõem a Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral	103
7.7	Área de ocorrência das litologias da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral nos quatro compartimentos do SAG	104
7.8	Modelo conceitual de evolução hidrogeoquímica da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral e sua relação com o SAG e unidades permianas (Machado <i>et al.</i> , 2002)	105
7.9	Grandes sets de estratificações cruzadas de dunas eólicas da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, expostos em pedreiras no município de Santo Antônio da Patrulha	108
7.10	Afloramento de grandes sets de estratificações cruzadas em cotas elevadas dificultando o armazenamento de águas subterrâneas, afloramento na região de Unistalda, próximo ao Sistema de Falhas Jaguari – Mata	109

7.11	Afloramento da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu em uma condição topo-estrutural desfavorável à ocorrência de águas subterrâneas. A altitude deste afloramento é superior a 200 metros estando as litologias endurecidas por fenômenos diagenéticos. Em geral as melhores exposições desta unidade hidroestratigráfica está em regiões onde ela não é aquífera. Este afloramento situa-se próximo à cidade de Taquari	109
7.12	Meseta conhecida como Cerro Palomas, cujo topo está protegido da erosão pela presença de camadas endurecidas da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, capeando as litologias da Unidade Hidroestratigráfica Guará. O afloramento situa-se nas proximidades da cidade de Livramento	110
7.13	A Unidade Hidroestratigráfica Botucatu caracteriza-se por sua uniformidade litológica conforme se pode ver nos afloramentos, feição confirmada pelos perfis geofísicos, de poços e sondagens Este afloramento com aspecto de muralha, pertence a uma pedreira no município de Santo Antônio da Patrulha	110
7.14	Poço tubular 9 QA - 01 - RS em Quaraí, captando a da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu e mostrando a sua relação de teto e base com as Unidades Hidroestratigráficas Serra Geral e Guará	111
7.15	Poço tubular 9 TE - 02 - RS em Teutônia, captando a Unidade Hidroestratigráfica Botucatu mostrando a diferenciação na granulometria dos arenitos eólicos	112
7.16	Poço tubular 7 SA - 01 - RS na Vila Ernesto Alves em Santiago, captando as Unidades Hidroestratigráficas Botucatu e Guará, onde nota-se a maior porcentagem de argilas na segunda unidade	113
7.17	Poço 7 QU - 02 - RS em Quaraí, perfurado nas Unidades Hidroestratigráficas Botucatu e Guará captando exclusivamente a segunda unidade	114
7.18	Poço tubular 9 FE - 01 - RS na cidade de Feliz, perfurando as Unidades Hidroestratigráficas Botucatu e Pirambóia, mostrando uma grande uniformidade granulométrica na primeira unidade	115
7.19	Área de ocorrência da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu nos quatro compartimentos estruturais	116
7.20	Morros aplainados formados pela silicificação dos arenitos fluviais do topo da Unidade Hidroestratigráfica Guará, visualizados da estrada que liga os municípios de Santiago e São Francisco de Assis	119
7.21	Detalhe do arenito de origem fluvial com seu topo silicificado mantendo a topografia e formando os morros aplainados, localizado próximo da cidade de São Francisco de Assis	120
7.22	Arenitos eólicos da Unidade Hidroestratigráfica Guará sobrepostos por pelitos e arenitos de interdunas. Afloramento na estrada que liga São Francisco de Assis a Manoel Viana	120
7.23	Poço tubular 9 UR - 14 - RS de Uruguaiana, seccionando as Unidades Hidroestratigráficas Botucatu e Guará, captando somente esta última unidade. No perfil gama/resistência é possível visualizar grandes diferenças no conjunto litológico, nem sempre perceptíveis em amostras de calha	121
7.24	Área de ocorrência da Unidade Hidroestratigráfica Guará dentro do Compartimento Oeste, limitada pelo Sistema de Falhas Jaguari – Mata	122
7.25	Lenhos fósseis característicos da Unidade Hidroestratigráfica Arenito Mata em afloramento próximo de São Pedro do Sul	124
7.26	Detalhe dos arenitos fluviais grosseiros, que apresentam lenhos fósseis em afloramento próximo a cidade de Mata	124
7.27	Perfil geofísico composto G SPS 3b de São Pedro do Sul, onde se observa a relação da Unidade Hidroestratigráfica Arenito Mata com as litologias das Unidades Hidroestratigráficas Passo das Tropas 1 e Alemoa	125
7.28	Área de ocorrência da Unidade Hidroestratigráfica Arenito Mata junto ao Sistema de Falhas Jaguari – Mata	126

7.29	Porção predominantemente pelítica da Unidade Hidroestratigráfica Caturrita próxima de Candelária, neste caso são esperados poços de pequena vazão ou secos	128
7.30	Arenitos finos sigmoidais junto a litologias pelíticas proporcionando pequena potencialidade aquífera para a Unidade Hidroestratigráfica Caturrita. Afloramento próximo ao Distrito Industrial do município de Santa Cruz do Sul	128
7.31	Arenitos fluviais da Unidade Hidroestratigráfica Caturrita com maiores possibilidades de armazenamento de água subterrânea. Afloramento no município de Agudo	129
7.32	Seqüência de arenitos tabulares da Unidade Hidroestratigráfica Caturrita na região entre Faxinal do Soturno e Agudo. A predominância de litologias arenosas propicia maiores vazões nos poços tubulares	129
7.33	Poço tubular 9 SM - 01 - RS de Santa Maria (Praça dos Bombeiros), em que se observa o conjunto arenoso de granulometria fina da Unidade Hidroestratigráfica Caturrita e sua relação com as demais unidades	130
7.34	A Unidade Hidroestratigráfica Caturrita ocorre dentro dos limites do Compartimento Central – Missões	131
7.35	Lamitos vermelhos típicos da Unidade Hidroestratigráfica Alemoa, em afloramento na região de Santa Cruz do Sul	132
7.36	Detalhe dos lamitos vermelhos da Unidade Hidroestratigráfica Alemoa. O conjunto devido a predominância de pelitos é considerado como um aquíclode. Detalhe do afloramento 7.35	133
7.37	Falha que coloca em contato os pelitos da Unidade Hidroestratigráfica Alemoa com os arenitos das Unidades Hidroestratigráficas Passo das Tropas 1 e Sanga do Cabral. Afloramento na estrada entre São Pedro do Sul e São Vicente do Sul	133
7.38	Perfil geofísico gama e resistência do poço 9 SM - 05 - RS de Santa Maria, mostrando a relação das litologias das Unidades Hidroestratigráficas Alemoa e Passo das Tropas 1.....	134
7.39	Área de ocorrência da Unidade Hidroestratigráfica Alemoa dentro do Compartimento Central – Missões	135
7.40	Aspecto em afloramento dos arenitos fluviais grossos da Unidade Hidroestratigráfica Passo das Tropas 1. Saibreira na cidade de Venâncio Aires ...	138
7.41	Afloramento de arenitos fluviais de granulometria média a grossa da Unidade Hidroestratigráfica Passo das Tropas 1, no município de Santa Maria	138
7.42	Arenitos fluviais de granulometria média a grossa da Unidade Hidroestratigráfica Passo das Tropas 1, na cidade de Santa Maria, formando um sistema aquífero	138
7.43	Poço tubular 9 SM - 02 - RS de Santa Maria (Passo do Ferreira), perfurado na área de afloramento da Unidade Hidroestratigráfica Passo das Tropas 1 onde se vê as camadas de arenito com diferentes granulometrias e sua relação com a unidade inferior	139
7.44	Poço tubular 9 SM - 03 - RS de Santa Maria (Vila Rigão), captando a Unidade Hidroestratigráfica Passo das Tropas 1 confinada pelos pelitos da Unidade Hidroestratigráfica Alemoa	140
7.45	Área de ocorrência da Unidade Hidroestratigráfica Passo das Tropas 1 dentro do Compartimento Central – Missões	141
7.46	Afloramento típico dos arenitos grossos da base da Unidade Hidroestratigráfica Passo das Tropas 2, próximo da cidade de Rio Pardo	143
7.47	Detalhe dos fragmentos de argilito rosa imersos no pacote arenoso grosso. Afloramento da Unidade Hidroestratigráfica Passo das Tropas 2, nas proximidades da cidade de Rio Pardo	144

7.48	Detalhe da estratificação cruzada acanalada dos arenitos fluviais grossos. Esta litologia apresenta altos valores de porosidade e permeabilidade. Detalhe do afloramento na cidade de Rio Pardo	144
7.49	Poço tubular ARM – 06 em Arroio do Meio, perfurado até os arenitos médios a grossos da Unidade Hidroestratigráfica Passo das Tropas 2, onde se vê a alta porosidade eficaz do aquífero	145
7.50	Poço tubular 9 SC - 03 - RS em Santa Cruz do Sul, onde se vê a relação existente entre as Unidades Hidroestratigráfica Passo das Tropas 1 e 2	146
7.51	Poço tubular 9 SC - 04 - RS em Santa Cruz do Sul, captando as Unidades Passo das Tropas 1 e 2 onde a primeira unidade é mais espessa que na figura anterior	147
7.52	Área de ocorrência da Unidade Hidroestratigráfica Passo das Tropas 2 dentro do Compartimento Central - Missões.....	148
7.53	Afloramento da Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral mostrando níveis de conglomerados com cimento carbonático localizado na estrada entre São Pedro do Sul e São Vicente do Sul	150
7.54	Detalhe de um afloramento da Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral mostrando estruturas cruzadas acanaladas. Afloramento na cidade de Rio Pardo	150
7.55	Intercalações de siltitos e argilitos avermelhados com intervalos de arenito muito fino da Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral confinando arenitos finos vermelhos da Unidade Hidroestratigráfica Pirambóia. Poço tubular 7 CA - 01 - RS no município de Cacequi (Saicã)	151
7.56	Área de ocorrência da Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral nos Compartimentos Central - Missões e Oeste	152
7.57	Afloramento típico das litologias arenosas da Unidade Hidroestratigráfica Pirambóia na rodovia que liga os municípios de Rosário do Sul e Santana do Livramento. Os arenitos finos apresentam estratificações cruzadas de grande porte	154
7.58	Afloramento de litologias arenosas eólicas da Unidade Hidroestratigráfica Pirambóia próximo a cidade de Mata. Nota-se as estratificações cruzadas de grande porte e a homogeneidade das litologias	155
7.59	Detalhe de afloramento de litologias da Unidade Hidroestratigráfica Pirambóia no Compartimento Central - Missões, no município de General Câmara. Na foto observa-se o contato entre as dunas eólicas e os sedimentos interdunas com estratificação plano-paralela	155
7.60	Poço tubular G CQ 15 em Cacequi, perfurado na Unidade Hidroestratigráfica Pirambóia aflorante, observando-se as intercalações de litologias interdunas dentro do pacote de arenitos eólicos	156
7.61	Poço tubular G CS em Capela de Santana, perfurado em arenitos eólicos e interdunas da Unidade Hidroestratigráfica Pirambóia. A porção predominantemente pelítica corresponde a Unidade Hidroestratigráfica Rio do Rasto	157
7.62	Poço tubular 9 SM - 06 - RS em Dilermando de Aguiar, captando a Unidade Hidroestratigráfica Pirambóia confinada por uma seqüência siltico-argilosa da Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral	158
7.63	Área de ocorrência da Unidade Hidroestratigráfica Pirambóia dentro dos compartimentos Oeste, Central - Missões e Leste	159
7.64	Afloramento típico de litologias pelíticas da Unidade Hidroestratigráfica Rio do Rasto na região central do estado, próximo da cidade de Pântano Grande.....	160
7.65	Detalhe do afloramento anterior onde se nota o acamadamento horizontalizado de siltitos bordôs a esverdeados . Esta seqüência dificulta o fluxo e o armazenamento de águas subterrâneas. Detalhe do afloramento da figura 7.64	161

7.66	Afloramento de litologias pelíticas avermelhadas com arenitos muito finos sigmoidais, representando um ambiente deltáico lacustre da Unidade Hidroestratigráfica Rio do Rasto, próximo do limite internacional do Brasil com o Uruguai, em Aceguá	161
7.67	Poço tubular 9 FM - 02 - RS em Formigueiro, perfurado em litologias predominantemente pelíticas das Unidades Hidroestratigráficas Rio do Rasto e Estrada Nova	162
7.68	Área de ocorrência da Unidade Hidroestratigráfica Rio do Rasto nos quatro compartimentos estruturais	163

Capítulo 8

Figuras

8.1	Mapa de Contorno Estrutural do Topo do Sistema Aquífero Guarani	165
8.2	Mapa Potenciométrico do Sistema Aquífero Guarani	166
8.3	Mapa estrutural do SAG	167
8.4	Mapa de Contorno Estrutural do Topo do Sistema Aquífero Guarani Compartimentado	169
8.5	Mapa Potenciométrico do Sistema Aquífero Guarani Compartimentado	172
8.6	Mapa de Espessura do SAG	174
8.7	Mapa de Espessura das Rochas Confinantes do SAG	176
8.8	Seção no município de Uruguaiana, mostrando o efeito das condições estruturais do topo do SAG sobre a produtividade dos poços	177
8.9	Mapa Hidroquímico do Sistema Aquífero Guarani	179

Capítulo 9

Figuras

9.1	Arcabouço hidroestratigráfico dos compartimentos estruturais do SAG proposto para o Rio Grande do Sul	198
-----	---	-----

Capítulo 10

Figuras

10.1	Resultado final da subdivisão espacial do SAG onde podem ser visualizados os seus quatro compartimentos estruturais e grandes estruturas que não afetam sua hidroestratigrafia	205
10.2	Hidroestratigrafia regional do SAG e seu relacionamento com os compartimentos estruturais no Rio Grande do Sul	207

Índice de Quadros

Quadros

4.1	Relações entre as classificações hidrogeológica e de permeabilidade (Modificado de DAEE/USP, 1992)	39
5.1	Classificação das entidades hidrogeológicas segundo seus níveis de amplitude, com exemplos relacionados ao SAG (modificado de Petit <i>et al.</i> 2003)	66

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O maior problema relacionado com o desenvolvimento e ampliação da captação e uso de recursos hídricos subterrâneos no Estado do Rio Grande do Sul para diversos fins, reside no desconhecimento da estruturação dos sistemas aquíferos e de suas potencialidades. Entre os principais aquíferos destaca-se no estado, por sua extensão areal e espessura, o Sistema Aquífero Guarani (SAG).

Este sistema aquífero engloba litologias arenosas representativas do final da deposição permiana na Bacia do Paraná, culminando com a sedimentação eólica eocretácea (Figura 1.1).

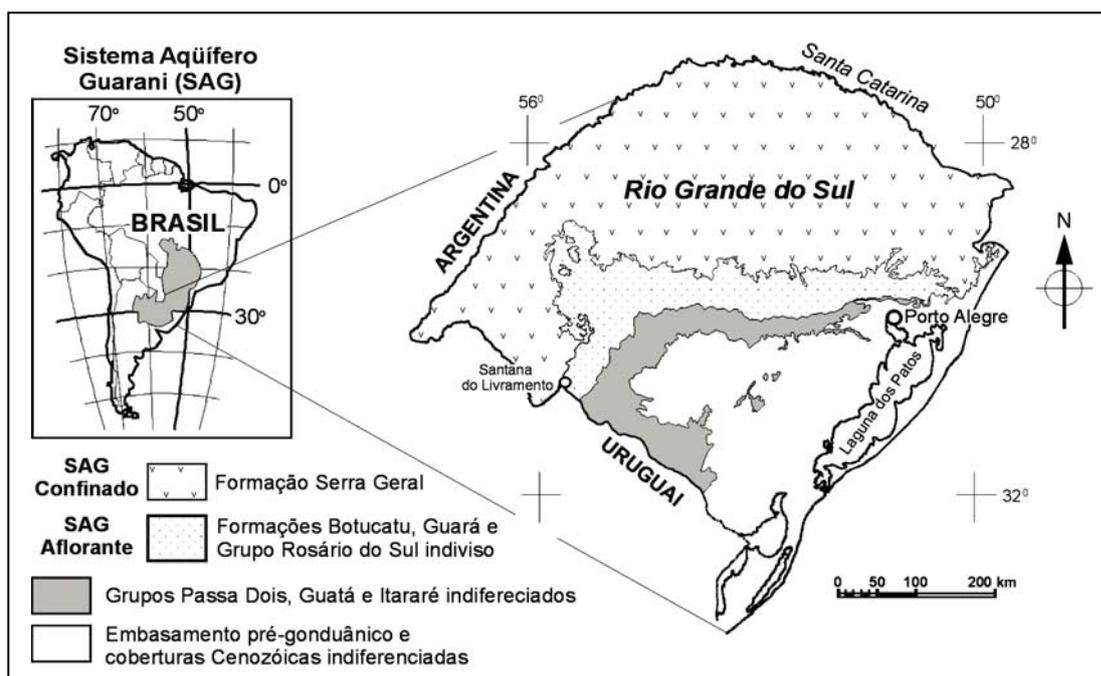


Figura 1.1 Localização do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no Estado do Rio Grande do Sul.

Ele estende-se por uma área que ultrapassa os limites do Estado do Rio Grande do Sul e mesmo as fronteiras do país, necessitando um estudo

aprofundado de suas características hidrogeológicas, para orientar a sua exploração e planejamento do aproveitamento de seus recursos.

Devido ao fato de comportar-se como um aquífero multicamadas, de acordo com a concepção de um grande sistema aquífero, tem a sua arquitetura desconhecida em escala macro e a influência que esta conformação tem nas suas reservas e qualidade da água.

Para dar embasamento a uma proposta cartográfica na escala de trabalho de 1: 1.000.000, que melhor defina a ocorrência e visualização das principais características do sistema aquífero, foram escolhidos dois temas que podem ser considerados básicos: 1) compartimentação do sistema aquífero segundo as grandes estruturas tectônicas que o afetaram e 2) determinação do arcabouço hidroestratigráfico que corresponde à sucessão de litologias aquíferas, aquíferas e aquícluses que compõem o sistema aquífero.

O interesse em estudar o Sistema Aquífero Guarani sob vários aspectos e em maior detalhe, justifica-se pela importância que ele pode representar para o Estado do Rio Grande do Sul e grande parte do Brasil, tendo em vista ser este um dos maiores reservatórios mundiais de água subterrânea em condições de ser utilizado como reserva estratégica.

Mesmo com a reconhecida importância que esse sistema aquífero possui para o Estado do Rio Grande do Sul, até a presente data não foi realizado nenhum estudo de caracterização geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica integrado em escala regional para esse manancial subterrâneo. Esta lacuna de conhecimento impossibilita ou dificulta a gestão adequada e a efetiva proteção do sistema aquífero. Concomitante com a falta de estudos integrados sobre esse sistema aquífero existe também uma grande carência de dados hidrogeológicos cartografados.

Tendo em vista as considerações expostas acima, justificam-se plenamente os estudos para a caracterização e cartografia do Sistema Aquífero Guarani no Estado do Rio Grande do Sul, em escala de trabalho de 1:1.000.000 e na apresentação escala de 1 3.000.000, dado o seu caráter de ineditismo e extrema importância para a definição das condições geológicas e hidrológicas da ocorrência de água subterrânea na porção sul da Bacia do Paraná.

1.2 Extensão e caracterização sucinta do SAG no contexto dos países do Cone Sul

1.2.1 Brasil

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) possui ampla distribuição no sudeste e sul do país, ocupando uma área total de 890.899 km². Os estudos mais recentes incluíram além das Formações Botucatu e Pirambóia, os estratos pertencentes ao Grupo Rosário do Sul, quando então recebeu a denominação de SAG, visando também uniformizar a sua hidroestratigrafia com a dos demais países do Cone Sul.

A espessura do SAG em sua porção confinada é muito variável. São citadas espessuras superiores a 600 m (Araújo *et al.*, 1995,1999 e Rosa F^o *et al.*, 1998, 2003). Espessuras entre 200 e 300 m são mais comuns, diminuindo em áreas de afloramento (Figura 1.2).

Segundo Rocha (1996, 1997), a espessura das rochas confinantes varia de poucas dezenas de metros a mais de 1000 m. A maior espessura é registrada na região de Cuiabá Paulista (SP), onde os basaltos da Formação Serra Geral alcançaram a profundidade de 1930 m (Figura 1.3).

Do ponto de vista hidráulico, os parâmetros mais representativos do SAG são segundo Rebouças (1976) e Teissedre & Barner(1981):

Condutividade hidráulica entre 8,0 m/dia para arenitos da Formação Botucatu e 0,8 m/dia para a Formação Pirambóia e correlatas. No aquífero livre, a porosidade efetiva varia entre 10 e 20% e o coeficiente de armazenamento aumenta de 10⁻³ a 10⁻⁶ com o aumento do confinamento. Os valores de transmissividade encontrados variam 350 e 550 m²/dia.

Com relação à hidroquímica, nas áreas de afloramento as temperaturas são de 22 a 27 °C, pH entre 5,4 e 9,2, salinidade inferior a 100 mg/l e são predominantemente bicarbonatadas cálcicas ou mistas. Na área confinada, a temperatura varia de 22 a 58,7 °C, o pH de 6,3 a 9,8, salinidade entre 100 e 500 mg/l e a fácies química bicarbonatada sódica, localmente sulfatada ou cloretada sódica (Campos, 2000; Silva, 1983; Silva *et al.*, 1982; Kimmelman e Silva *et al.*, 1989).

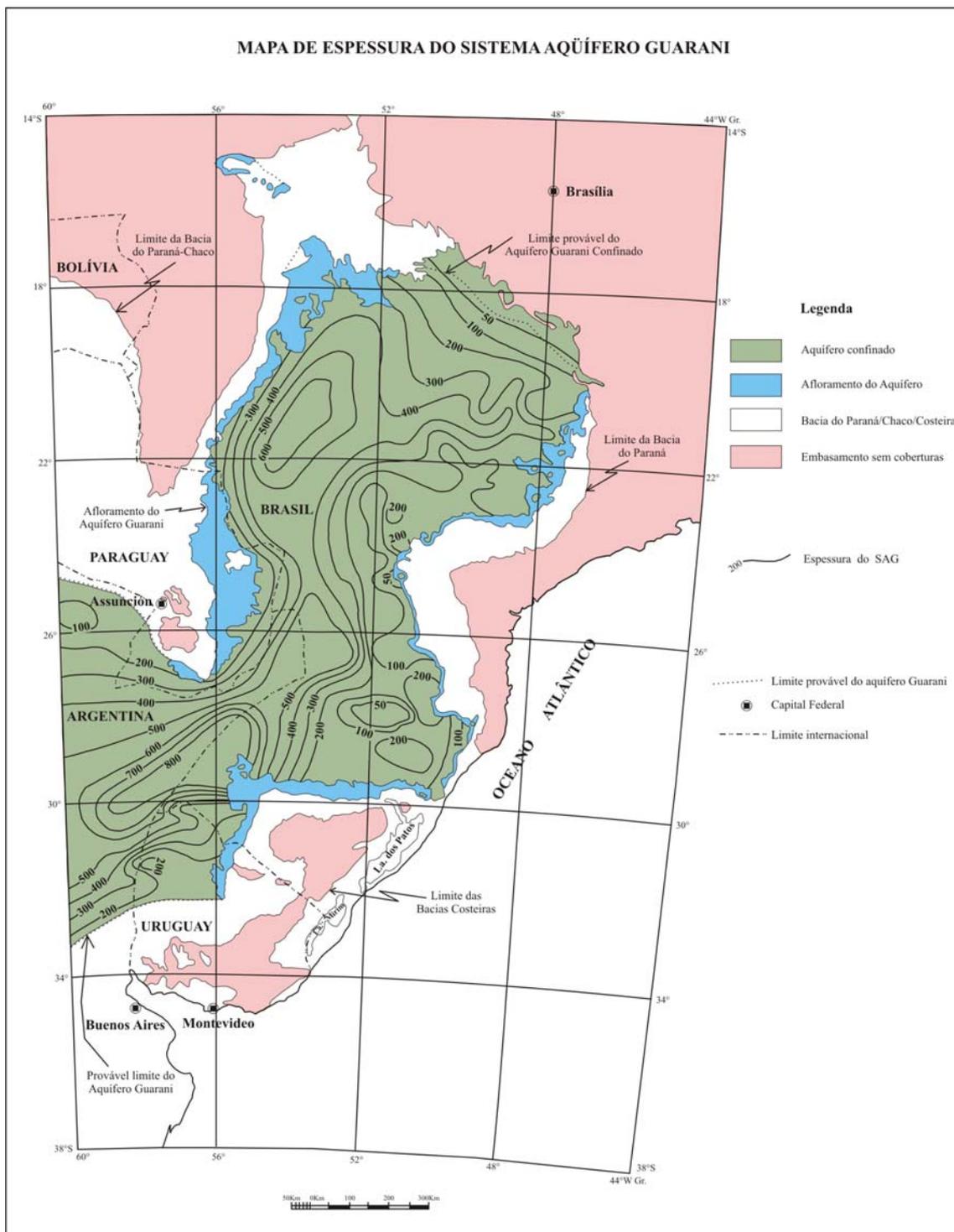


Figura 1.2 Distribuição dos valores de espessura do SAG não levando em consideração as suas compartimentações estruturais (Araújo *et al*, 1995).

1.2.2 Uruguai

Apesar das reduzidas dimensões de sua área de 58.500 km², quando comparada com a porção brasileira, o SAG possui uma importância para o Uruguai proporcionalmente maior que aquela que esse aquífero apresenta para o Brasil, pois é intensamente explorado para fins turísticos em estâncias hidrotermais

O arcabouço estratigráfico do SAG é constituído pelo Grupo Batovi Dorado e Formação Buena Vista (Ferrando & Montaña, 1987; Ferrando *et al.*, 1987). Na base do Grupo Batovi Dorado, Ferrando & Andreis (1986) descrevem um episódio de deposição eólica que denominam Formação Cuchilla Ombú, correlacionável à Formação Pirambóia. Acima ocorre a Formação Tacuarembó, correlacionável à Formação Guará. No topo da seqüência, em contato com os basaltos da Formação Arapey, ocorre a Formação Rivera (Ferrando & Andreis 1986), correspondente à Formação Botucatu no Brasil. Quanto à espessura de todo o sistema aquífero, ela varia de cerca de 200 m até 650 m. Em afloramento, a Formação Rivera (eólica), não supera os 30 m de espessura, podendo alcançar os 100 m nos poços termais profundos (Montaño *et al.*, 1998). A Formação Arapey definida por Bossi (1966), confina o SAG com uma sucessão de derrames basálticos. As maiores espessuras encontram-se na região de Salto com 1000 m e diminuem para o sul com espessuras de aproximadamente 400 m em Paso Ullestie.

Os parâmetros hidráulicos indicam que, para a área de Rivera (Montaño & Pessi, 1985 e 1988), a transmissividade média de 150 m²/dia e o coeficiente de armazenamento de 10⁻³, indicam que o aquífero é semiconfinado. Na área de Tacuarembó, as transmissividades são de apenas 25 m²/dia e vazão média nos poços de 3,5 m³/h. Na zona confinada estimativas de transmissividade realizadas pela TAHAL (1986) e IPT (1980) indicam valores que variam de 250 m²/dia na região SE até 1500 m²/dia para a NW.

Com relação à qualidade das águas, na área de afloramento, predominam águas bicarbonatadas cálcicas (Montaño & Pessi, 1985). Na área confinada, o SAG capta em conjunto aquíferos mesozóicos e permianos, apresentando águas bicarbonatadas sódicas com maiores valores de resíduo seco (Montaño & Carrión, 1990).

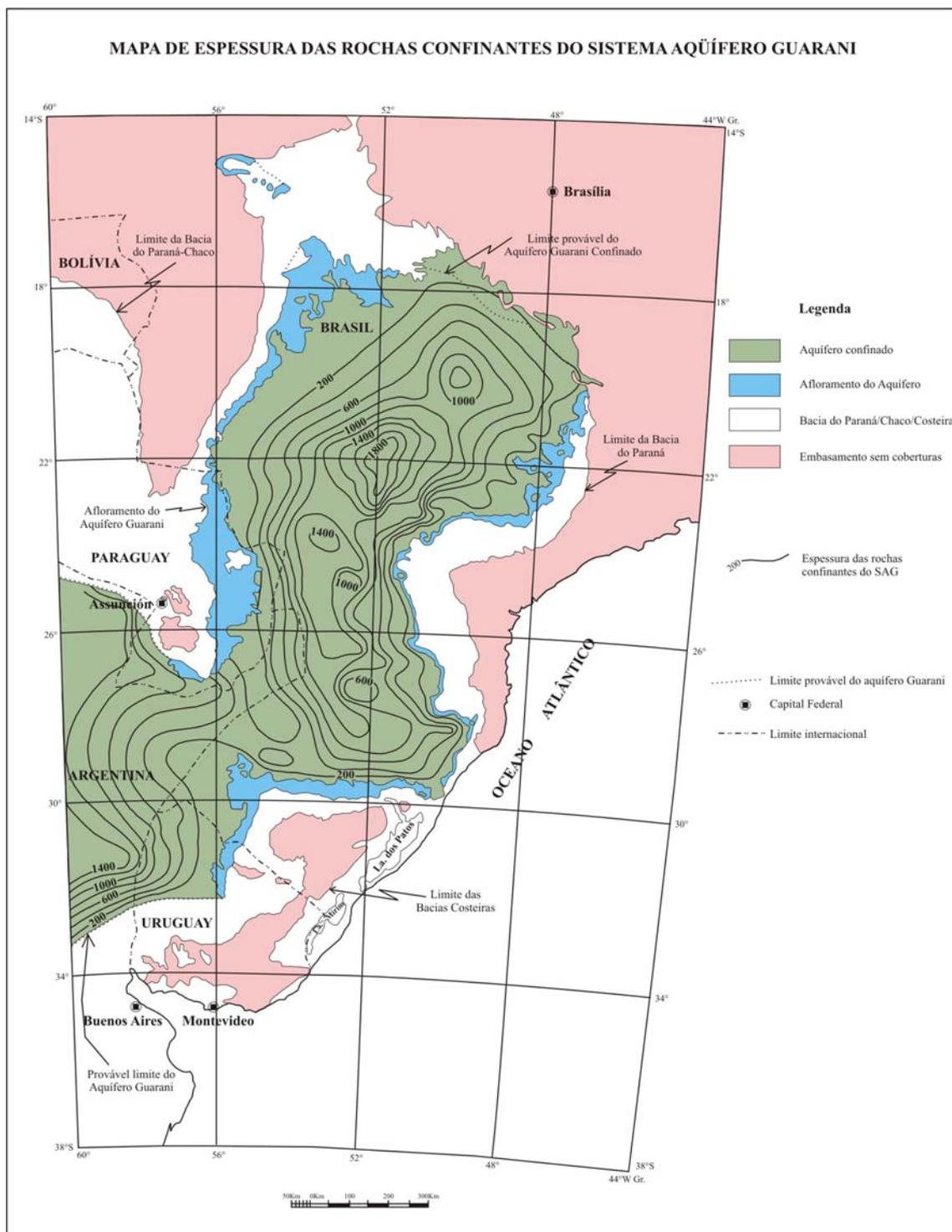


Figura 1.3 Isolinhas representativas da espessura das rochas confinantes do SAG não levando em consideração as suas compartimentações estruturais (Araújo *et al*, 1995).

1.2.3 Argentina

Com uma área aproximada de 225.500 km² da Bacia Chaco-Paranaense (Araújo *et al.*, 1995), a importância do SAG reside principalmente na presença de águas termominerais.

O SAG é constituído por arenitos da Formação San Cristóbal, que apresentam similaridades com as formações Rivera, Tacuarembó, Guará e Botucatu, pela origem eólica dos sedimentos. A porção triássica do aquífero é representada pela Formação Buena Vista (Padula, 1972). Todo esse conjunto é capeado pelos basaltos da Formação Curuzú Cuatiá, que abriga o aquífero representado pelo Membro Solari, que corresponde às intercalações arenosas recorrentes da Fm. Misiones e que particularmente na Argentina apresentam interesse econômico para captação.

A escassez de dados de perfurações, já que o SAG é predominantemente confinado, dificulta sobremaneira o conhecimento de sua geometria e arquitetura (Fili & Tujchneider, 1977; Fili *et al.*, 1997; Kittl, S, 2000). Os arenitos cretácicos que afloram em Misiones e Corrientes, até a presente data se desconhece se estão em relação de continuidade com os arenitos infrabasálticos da Fm. Misiones.

Poucas informações existem acerca de suas características hidráulicas, porém dado a sua proximidade, estima-se para o sistema aquífero os valores semelhantes aos dos parâmetros hidráulicos encontrados nos poços profundos uruguaios.

Segundo Silva Busso (1999), as águas com TDS<1500 mg/l, moles a moderadamente duras e de tipos bicarbonatadas a cloro-sulfatadas sódicas, são diretamente correlacionáveis com as zonas de recarga no Uruguai. As águas com TDS>1500 mg/l, duras, salobras e com tipo químico cloretado sódico, são originadas de mistura de águas meteóricas com águas conatas e de fluxo lateral ou vertical ascendente.

Segundo Araújo *et al.* (1995, 1999), as direções das linhas de fluxo indicariam que as principais áreas de descarga do SAG estariam na região limítrofe entre a Argentina e os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Figura 1.4).

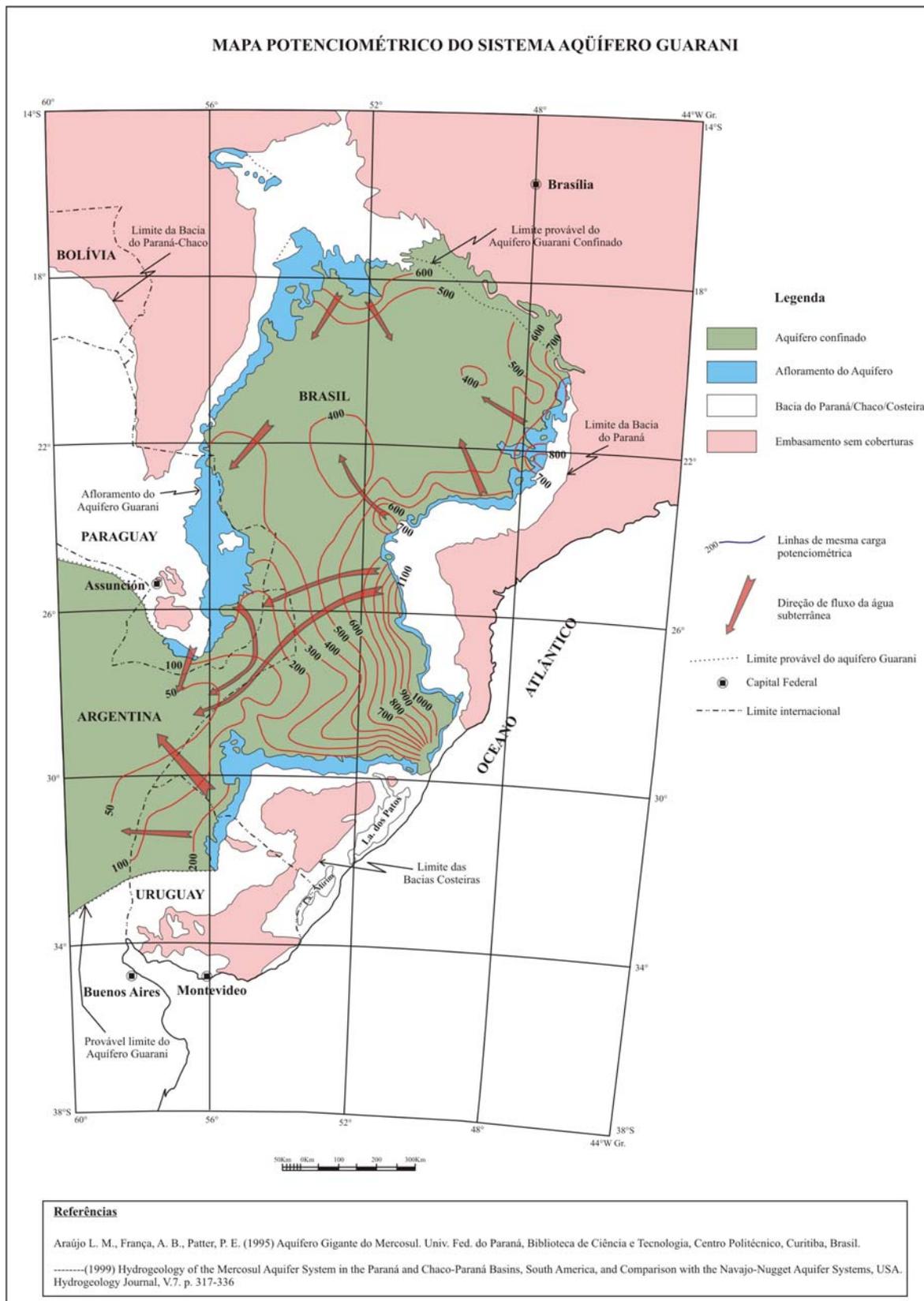


Figura 1.4 Mapa potenciométrico com as linhas de fluxo do SAG traçadas sem levar em consideração as compartimentações estruturais (Araújo *et al*, 1995).

1.2.4 Paraguai

Com uma área de 71.700 km² (Araújo *et al.*, 1995), o SAG no território paraguaio corresponde ao limite oeste da área de recarga do aquífero. A Formação Alto Paraná, constituída de derrames basálticos, o confina em cerca de 27.000 km². O sistema aquífero compõe-se de camadas triássicas e jurássicas (Godoy & Paredes, 1995). É representado pela Formação Misiones, marcadamente eólica, correspondendo as Formação Botucatu e Pirambóia do Brasil.

A espessura do Sistema Aquífero Guarani, apesar de muito variável, apresenta valores médios de 300 m e é confinado por basaltos da Fm. Alto Paraná, com espessuras estimadas entre 700 e 800 m nas proximidades do rio Paraná. Nas áreas aflorantes a condutividade hidráulica oscila entre 0,2 e 0,4 m/dia e a transmissividade de 40 a 500 m²/dia. Nas áreas confinadas a condutividade hidráulica atinge de 0,5 a 4,6 m/dia e a transmissividade de 200 a 1300 m²/dia (Lopes, 1984).

Com relação às suas temperaturas, Teissedre & Barner (1981) e Silva *et al.* (1982) propõem a seguinte relação para predizer temperaturas no teto do aquífero:

$$T (^{\circ}\text{C}) = 0,0282 P (\text{m}) + 22 \quad P = \text{profundidade em metros}$$

Nas áreas de maior profundidade, próximo ao rio Paraná, esperam-se valores de 40 a 43 °C para a temperatura das águas do SAG.

1.3 Formulação do Problema

O Sistema Aquífero Guarani desde a época de sua proposição em 1994, e mesmo posteriormente com o trabalho da Petrobrás (Araújo *et al.*, 1995), é tratado e apresentado como se fosse um grande sistema homogêneo, transfronteiriço, de alta potencialidade e excelente qualidade química de suas águas.

Neste estudo é discutida a validade para o Estado do Rio Grande do Sul das condições conhecidas da bibliografia e já citadas acima, para o SAG no Brasil e mesmo na porção internacional do sistema. São examinadas pormenorizadamente suas características geológicas e relativa extensão

espacial, além das condições hidrodinâmicas, hidráulicas e hidroquímicas, que determinam a identidade das unidades hidroestratigráficas que compõem o sistema hídrico em sua totalidade. Também é discutida a delimitação estratigráfica de topo e base do SAG, dentro do âmbito da Bacia do Paraná, levando-se em conta a sua definição como um sistema aquífero poroso intergranular.

Inicialmente, deve ser levado em consideração que a apresentação do SAG como um sistema aquífero homogêneo com continuidade horizontal, presta-se apenas para a confecção de mapas em pequena escala, já que o mesmo é considerado transfronteiriço, ocupando áreas em quatro países (Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai). Para o Estado do Rio Grande do Sul considera-se que existam estruturas tectônicas de grande magnitude e que elas teriam capacidade de, durante o Mesozóico, compartimentar o sistema aquífero em grandes blocos com características geológicas, hidrodinâmicas, hidráulicas e hidroquímicas bastante diferenciadas. As principais estruturas são mencionadas e localizadas na Figura 6.1. No entanto, no mapeamento das variáveis hidrológicas e hidroquímicas dos mapas de pequena escala, elas não são levadas em consideração como importantes na compartimentação espacial do SAG. Desse modo, as condições topo-estruturais do SAG podem adquirir extrema importância no zoneamento das potencialidades hídricas do mesmo, já que estas estruturas irão comandar a arquitetura e distribuição espacial do pacote aquífero.

Com base nas condições de sedimentação das formações que compõem o SAG, são definidas as principais unidades hidroestratigráficas que correspondem ao arcabouço estratigráfico do sistema aquífero, aqui definido apenas para o limite estadual, já que para outros estados e países, pode haver mudanças significativas na estratigrafia. Na concepção atual, o SAG é apresentado como uniforme em toda sua extensão vertical, apesar de ser constituído por definição como um sistema que engloba litologias fluviais, lacustres e eólicas de idades consideradas como juro-triássicas.

No Estado do Rio Grande do Sul já são conhecidas de longa data, condições locais de aproveitamento de unidades aquíferas, que atualmente são consideradas como pertencentes ao SAG. Os aquíferos resultantes da sedimentação gonduânica são caracterizados pela grande variação litológica

resultantes dos ambientes fluviais, lacustres e eólicos em que se depositaram. Esta diversidade de ambientes de deposição aliada à estruturação tectônica originada das reativações dos grandes sistemas de falhamentos pré-cambrianos e aqueles associados com o evento da abertura do Oceano Atlântico, produziram condições particulares de aproveitamento das águas subterrâneas nas unidades aquíferas.

A partir desse raciocínio, um Grupo ou Formação geológica poderia ter unidades com características hidrológicas e hidroquímicas muito diferentes, não podendo estas ser explicadas apenas pelos condicionamentos hidrodinâmico, hidráulico e hidroquímico, sendo fundamental, então, a determinação das unidades hidroestratigráficas. Assim, o SAG pode ter tantas características de potenciometria, capacidade específica e salinidade, quantas forem as unidades hidroestratigráficas que o compõem, impondo-se portanto a sua individualização para a correta interpretação das suas condições de ocorrência.

O SAG é considerado como um dos principais sistemas aquíferos do planeta, tanto em distribuição espacial, quanto em reservas de água doce de boa qualidade. Essa descrição apesar de válida para demonstrar a ocorrência do aquífero de forma global, quanto confrontada com casos particulares, como, por exemplo, o Estado do Rio Grande do Sul, pode sofrer sérias restrições. Nesse estado, em várias regiões o SAG compreende unidades aquíferas com baixa capacidade hidráulica e mesmo grandes áreas em que a Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, que corresponde ao seu topo, apresenta-se com potencialidade nula, sendo secos os poços tubulares nela perfurados. A ocorrência desse fenômeno pode estar relacionada com compartimentações específicas, originadas através de movimentações tectônicas de grande extensão. As estruturas de grande porte também podem gerar contornos estruturais do topo da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, favoráveis à acumulação e transmissão de água subterrânea, proporcionando a construção de poços tubulares de alta vazão.

1.4 Delimitação do tema e área de estudo

A proposta da tese é essencialmente a determinação da vocação aquífera dos estratos sedimentares depositados no intervalo Neopermiano ao Eocretáceo da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul.

A escolha desse intervalo prende-se ao fato de que o Sistema Aquífero Guarani, denominação proposta informalmente pelo geólogo uruguaio Danilo Anton, na 1ª Jornada Técnico-Científica Sobre Gestão Sustentável do Aquífero Internacional Botucatu realizada na cidade de Curitiba em 1994, englobava no Brasil as Formações Pirambóia (Neopermiana), Rosário do Sul (Triássica) e Botucatu (admitida como Jurássica).

Posteriormente foi chamado de Aquífero Gigante do Mercosul por Araújo *et al.* (1995), em um trabalho que pode ser considerado pela sua extensão e profundidade de abordagem, como o principal levantamento científico descrevendo a sua ocorrência nos quatro países do MERCOSUL. Apesar do nome diferente, foi mantida a mesma estratigrafia já definida para o SAG, sendo descrito como um sistema hidráulico juro-triássico.

Mesmo com a concepção de um sistema aquífero abrangendo o intervalo de tempo juro-triássico, os mapas hidrogeológicos de pequena escala até o lançamento do Mapa Hidrogeológico do Aquífero Guarani em escala 1:2.500.000 (Campos, 2000), mostram o SAG englobando apenas as formações Pirambóia e Botucatu (Gilboa *et al.*, 1976), inclusive salientando as interrupções deposicionais da Formação Botucatu no Rio Grande do Sul.

A proposição do SAG, através de uma abordagem cronoestratigráfica, delimitando o sistema através das idades das unidades hidroestratigráficas de topo e base e não da litoestratigrafia, como mundialmente é aceito nos estudos hidrogeológicos, é na realidade um grande complicador na análise da hidrodinâmica, hidráulica e hidrogeoquímica do sistema. Esse direcionamento na definição do sistema aquífero, leva à constatação de que o posicionamento na coluna geológico-estratigráfica pode variar de acordo com os avanços nos estudos estratigráficos. Por exemplo, o sistema aquífero juro-triássico, a despeito do grande intervalo de topo e base, hoje mais propriamente seria estabelecido do Neopermiano ao Eocretáceo, ampliando ainda mais esse intervalo. Também deve ser salientado que as unidades litoestratigráficas

formais mostram evidências de lacunas nos registros estratigráficos, o que impossibilitaria a definição de uma hidroestratigrafia única para todo o Estado do Rio Grande do Sul.

Aliada a todas as dificuldades na interpretação do funcionamento do SAG no Rio Grande do Sul, a evolução e estruturação tectônica da Bacia do Paraná influencia diretamente na gênese das litologias que compõem o arcabouço hidroestratigráfico desse sistema, proporcionando o surgimento de vários conjuntos aquíferos, relacionados a diferentes origens da sedimentação. As seqüências formam à primeira vista não um, mas sim vários sistemas aquíferos.

Por outro lado, a simplificação dos conceitos estratigráficos para a interpretação da constituição do SAG, como pode ser observado nos trabalhos anteriores, significa que, p. ex., sejam tomadas informações ultrapassadas quanto à coluna litoestratigráfica utilizada na construção do arcabouço hidroestratigráfico do sistema aquífero. Assim, o SAG no Rio Grande do Sul, constituído basicamente por “*red beds*” continentais, originados por processos sedimentares em grande parte associados a sistemas aluviais, é tratado em termos litoestratigráficos como constituído pela Formação Rosário do Sul, não sendo levadas em consideração desse modo as condições geológicas locais ou regionais que promoveram heterogeneidades litofaciológicas verticais, devido aos processos erosivos e de não deposição. Isso proporciona uma falsa característica de homogeneidade que é eliminada quando se contempla sua definição mais atual, como Grupo Rosário do Sul, integrado pelas formações Sanga do Cabral, Santa Maria e Caturrita.

Com relação à síntese hidroestratigráfica do SAG para o conjunto da Bacia do Paraná proposta por Campos (2000), está incluído no arcabouço o Membro Morro Pelado da Formação Rio do Rasto. Esta afirmação não pode ser validada para o Rio Grande do Sul, pelo menos no estágio atual do conhecimento. Se considerarmos a inclusão de novas formações ou membros no arcabouço do SAG, poder-se-ia eventualmente incluir a fácies mais arenosa da Formação Estrada Nova, os calcários e intrusões de diabásio da Formação Irati e os membros arenosos da Formação Rio Bonito. Com certeza ter-se-ia o maior sistema aquífero do mundo e estudá-lo seria nada mais do que estudar integralmente a Bacia do Paraná.

Devido ao fato do SAG apresentar grande dificuldade para ser interpretado apenas com base em de considerações hidráulicas, em razão da complexidade litoestratigráfica criada com a proposição de que ele é um sistema hidráulico limitado pelas idades de seus aquíferos, é necessária então uma abordagem baseada nos conceitos da estratigrafia de seqüências. Os trabalhos já realizados sobre esse tema no estado, definiram as principais seqüências estratigráficas que compõem o Neopermiano-eocretáceo. Dessas seqüências foram identificadas as principais unidades litoestratigráficas. Observa-se que as unidades hidroestratigráficas do SAG mantêm íntima relação com as unidades litoestratigráficas da coluna geológica neopermiana-eocretácea.

Conquanto a origem da estratigrafia de seqüências esteja umbilicalmente ligada com a indústria do petróleo, pois nela pode ser mais facilmente aplicada a sismoestratigrafia de sistemas marinhos, atualmente novas pesquisas têm sido realizadas visando sua aplicação no estudo de ambientes continentais. Com o grande incremento do conhecimento e evolução dos conceitos da estratigrafia de seqüências ao final dos anos setenta, foi possível um grande salto no desenvolvimento da geologia sedimentar atual, possibilitando uma previsão mais precisa da ocorrência e geometria dos estratos sedimentares.

Segundo Posamentier & Allen (1994) o conceito de estratigrafia de seqüências pode ser aplicado na análise e predição de litologias e padrões estratigráficos, com base no estudo da ciclicidade do registro geológico. A aplicação desses conceitos no estudo das seqüências continentais do Grupo Rosário do Sul e da Formação Botucatu, foi intensamente explorada respectivamente por Faccini (1989, 2000) e Scherer (1998). A base conceitual extensamente desenvolvida nesses trabalhos serviu para determinar as seqüências deposicionais neopermianas a eocretáceas sul-rio-grandenses e encontram no presente trabalho uma de suas mais importantes aplicações na tentativa, possivelmente pioneira no Brasil, de modelamento conceitual hidrogeológico do SAG através da ótica da correlação de eventos deposicionais com o arcabouço hidroestratigráfico.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta tese de doutorado é determinar a constituição hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Guarani e correlacioná-la com a sua estruturação espacial no Estado do Rio Grande do Sul.

1.5.2 Objetivos Específicos

1) Caracterização dos vários reservatórios sedimentares porosos que compõem o arcabouço hidroestratigráfico do sistema aquífero, utilizando-se de informações de superfície e subsuperfície, para a determinação em escala macro da geometria, arquitetura e comportamento estrutural;

2) Caracterização da hidrodinâmica do fluxo subterrâneo através da potenciometria nas áreas confinadas e aflorantes, obtida de dados de poços tubulares profundos existentes;

3) Determinação com base nas características geológicas, hidrológicas e químicas do sistema aquífero das áreas de recarga, circulação e descarga das águas;

4) Desenvolvimento de interpretação hidrogeoquímica do sistema aquífero, com base em dados de análises químicas disponíveis, visando a definição dos tipos químicos, evolução geoquímica e qualidade para diversas finalidades de uso;

5) Construção com base nos dados de hidroestratigrafia, hidrologia, estruturas, hidrodinâmica, hidráulica e hidroquímica, de um modelo hidrogeológico conceitual para o Sistema Aquífero Guarani no Estado do Rio Grande do Sul.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho é centrado principalmente na análise da compartimentação espacial e da hidroestratigrafia do SAG nos limites do Estado do Rio Grande do Sul. A base principal na qual se apoiaram as interpretações das unidades hidroestratigráficas que compõem o sistema aquífero, foram os dados de poços tubulares profundos. Dados de superfície, obtidos através de trabalhos de campo na faixa de afloramentos e revisões históricas e conceituais da estratigrafia complementam estas interpretações.

A organização e metodologia adotada no trabalho estão resumidamente descritas nos tópicos abaixo:

2.1 Levantamento e revisão bibliográfica

Foram compilados os mapas geológicos disponíveis em várias escalas. Das várias fontes consultadas destacam-se especialmente: Mapa Geológico do Rio Grande do Sul (Carraro *et al.*, 1974), Mapa Geológico do Rio Grande do Sul (DNPM, 1989), Mapa Geológico das Folhas Porto Alegre e Uruguaiana (IBGE, 1986), Mapa de Integração Hidrogeológica da Bacia do Prata e Adjacências (Machado (coord.), 2000), Mapa Geológico do Rio Grande do Sul (CPRM, Inédito) e mapas geológicos inéditos elaborados pelo CiGO da UFRGS, em escala 1:100.000, contidos no relatório final do projeto “Geologia dos Recursos Minerais do Sul do Brasil”. Além desses, também foram consultados os mapas presentes nas publicações, teses e dissertações de Gammernann (1973); Bortoluzzi (1974); Andreis *et al.* (1980); Montardo (1982) e Faccini (1989; 2000).

Foi realizada revisão de trabalhos anteriores sobre a litoestratigrafia, estruturação tectônica, paleontologia e geocronologia da área abrangida pelo SAG e a evolução dos conceitos estratigráficos. Concomitantemente, foram compilados os dados sobre a hidrogeologia, hidráulica e hidroquímica das formações geológicas que compõem o arcabouço do SAG. Finalmente, foram consultadas as teses de doutorado de Faccini (2000) e Scherer (1998), que apresentaram revisões conceituais sobre a estratigrafia de seqüências de

ambientes continentais e sua aplicação aos estratos triássicos e cretáceos aflorantes no Rio Grande do Sul.

Objetivos: Gerar um conhecimento básico sobre as unidades hidrogeológicas que formam o SAG no Rio Grande do Sul e fazer uma correlação preliminar das unidades hidrogeológicas com as seqüências estratigráficas da Bacia do Paraná.

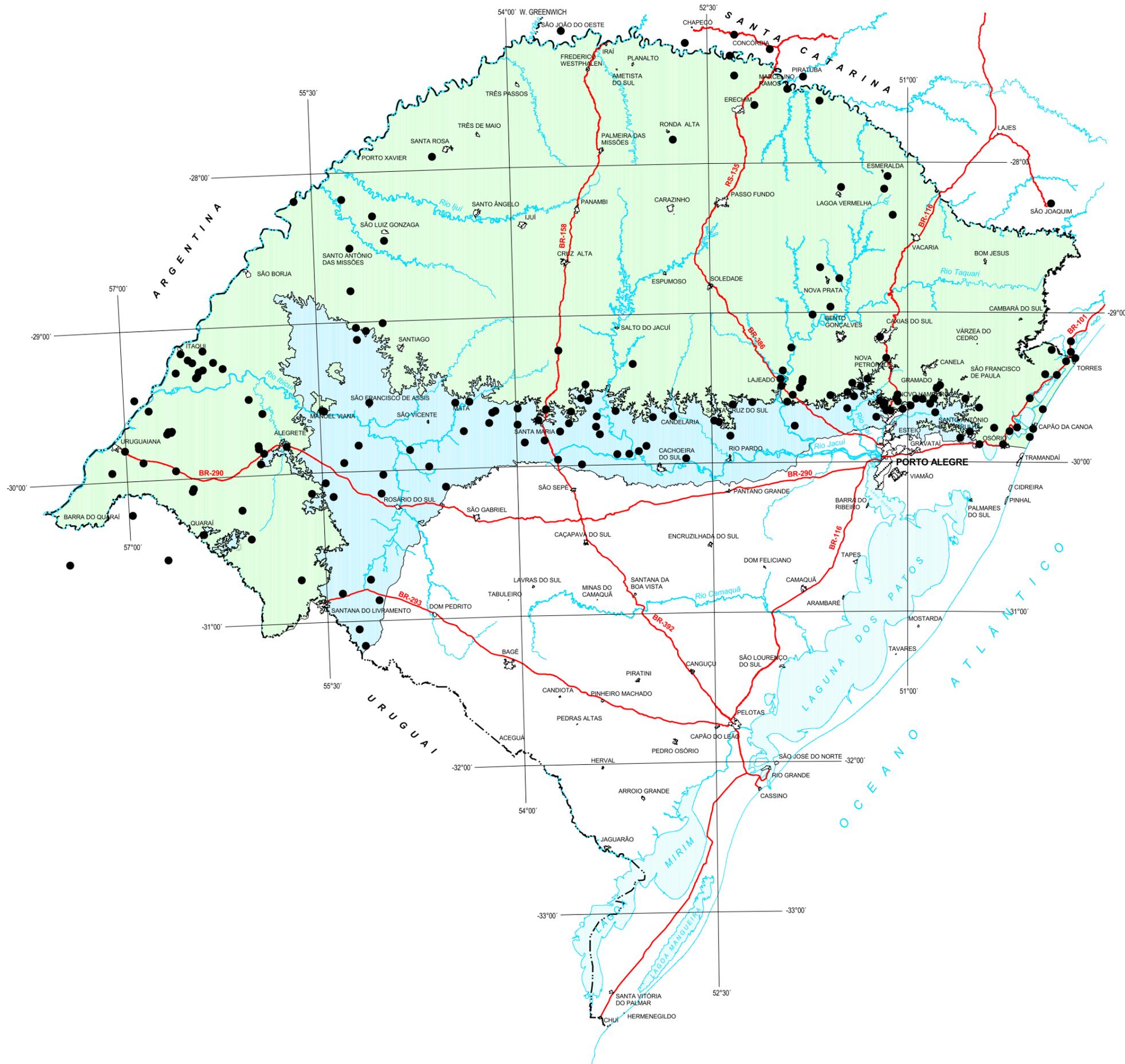
2.2 Coleta, cadastramento e interpretação dos dados de poços tubulares

Análise da descrição geológica dos perfis de poços tubulares profundos, cedidos pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Diretoria de Comandos Mecanizados (DCM) da Secretaria da Agricultura e Abastecimento, Programa de Açudes e Poços (PAP) da Secretaria de Obras Públicas e Saneamento e empresas particulares. Como a maioria dos poços não possui perfilagem geofísica, foram controlados estratigraficamente por meio de seções de superfície. Os dados de poços que captam o SAG em Santa Catarina, foram obtidos de Freitas *et al.* (2003) e Rosa F° *et al.* (1998). O mapa com a locação dos poços tubulares profundos utilizados no estudo pode ser visualizado na figura 2.1. Após a construção da planilha de dados, eles foram trabalhados no *software* de geoprocessamento *ArcView* 3.2.

Objetivos: Formar um banco com os dados geológicos (cotas de topo de aquíferos, espessuras, litoestratigrafia), hidrogeológicos (potenciometria, coeficientes hidrodinâmicos e hidráulica) e hidroquímicos (componentes iônicos e salinidade)

2.3 Confecção de mapas de contorno estrutural

- Construção de mapa com dados de poços significativos, na escala 1:1. 000.000 da porção superior da Formação Botucatu, que corresponde ao topo do SAG, nos locais em que a mesma esta confinada pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Nesse mapa não estão incluídas descontinuidades como falhas e fraturas, para que somente com sua



LEGENDA

- Área confinada do SAG
- Área aflorante do SAG
- Poço tubular
- Cidades
- Rodovias
- Rios

Fig. 2.1
MAPA DE POÇOS SELECIONADOS DO
SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

interpretação se indique as regiões de prováveis estruturas tectônicas que influenciem a compartimentação regional do aquífero.

- Confecção de mapa de contorno estrutural compartimentado, também em escala 1:1.000.000, com traços estruturais nas áreas que apresentaram indícios de descontinuidade, interpretados como importantes sistemas de falhamentos formadores e deformadores do SAG. No mapa foram mantidas apenas as linhas estruturais que apresentaram significado regional na organização hidroestratigráfica e hidrogeológica do SAG.

- Confecção de um mapa estrutural com as principais estruturas que ocorrem na área abrangida pelo SAG dentro estado, a partir da compilação de mapas de diversos autores e em diferentes escalas.

Objetivos: Estabelecer a compartimentação espacial do SAG, pois os dados obtidos com relação à potenciometria, capacidade produtiva dos poços, litologias descritas nos perfis geológicos e qualidade química das águas, demonstram a existência de várias zonas mapeáveis com ocorrência de características similares em todo o Estado.

2.4 Construção de seções

- Identificação em imagens de satélite (LANDSAT), radar, fotografias aéreas (1:60.000 e 1:110.000) de lineamentos que poderiam representar sistemas de falhas que controlam a hidrogeologia do SAG.

-Correlações de poços tubulares, poços para prospecção de petróleo, sondagens e dados relativos a cotas do topo do SAG tomados de afloramentos em trabalhos de campo e da bibliografia para, com esses dados, confeccionar seções esquemáticas geológicas e hidrogeológicas. Nestas seções devido as grandes áreas abrangidas, foi necessária a utilização de grandes exauros verticais.

Objetivos: Através da interpretação de imagens traçar os sistemas de falhamentos de maior hierarquia na compartimentação estrutural do SAG e documentar através da construção de seções, as relações estruturais inter e intracompartimentos.

2.5 Mapas potenciométricos

-Construção de mapa na escala 1:1.000.000, de isolinhas equipotenciais do topo do SAG (Formação Botucatu) e das áreas de afloramento. Nesse mapa estão marcadas as principais direções do fluxo hidrodinâmico, que serão comparadas com as direções de mergulho das camadas aquíferas do SAG.

-Confecção de mapa potenciométrico compartimentado, também em escala 1:1.000.000, com as linhas de fluxo circunscritas às áreas demarcadas pelos traços estruturais estabelecidos pelo mapa de contorno estrutural do topo do SAG.

Objetivos: Confirmar através da potencimetria, a compartimentação hidroestrutural do SAG a interpretada através dos poços tubulares, imagens, fotos aéreas e mapa de contorno estrutural de seu topo.

2.6 Mapa de espessura

Confecção de um mapa de espessuras do conjunto hidroestratigráfico do SAG, levando em consideração os dados dos poços no Estado de Santa Catarina e nos países limítrofes (Argentina e Uruguai) e também a compartimentação estrutural

Objetivo: Comparar os resultados obtidos de espessura do SAG, através de uma nova interpretação hidroestratigráfica e aqueles obtidos de trabalhos anteriores quando não existia a delimitação das unidades hidroestratigráficas que o compõem.

2.7 Mapa de espessura das rochas confinantes

Confecção de um mapa de espessura de todas as camadas confinantes do SAG, incluídas desde as rochas ácidas e básicas até aquelas correspondentes a deposições terciárias e quaternárias, a partir dos dados obtidos das perfurações.

Objetivo: Comparar os resultados obtidos no traçado das isópacas das camadas confinantes, tendo em conta as compartimentações espaciais, com aqueles obtidos de investigações anteriores onde se supõe uma continuidade física do SAG.

2.8 Mapa hidroquímico

Confecção do mapa hidroquímico com dados sobre sólidos totais dissolvidos (STD), que representam a salinidade das unidades hidroestratigráficas do SAG. Devido ao fato de haver uma distribuição heterogênea de análises químicas de poços entre os vários compartimentos, algumas áreas não são cobertas pelas isolinhas.

Objetivo: Verificar a existência de uma relação entre o aumento de salinidade nas águas subterrâneas e a direção do fluxo hidrodinâmico estabelecido nos mapas potenciométricos. Também identificar através das anomalias de concentração, a ocorrência de mais de uma unidade hidroestratigráfica em uma mesma área.

2.9 Definição de unidades hidroestratigráficas

A delimitação das unidades hidroestratigráficas subdivide o arcabouço geológico em partes mais ou menos permeáveis de modo a definir um sistema de fluxo.

A delimitação do arcabouço hidroestratigráfico em escala regional foi realizada a partir da execução das seguintes tarefas:

- Estudo dos conceitos relativos a litoestratigrafia e a estratigrafia de seqüências, obtidos de trabalhos anteriores, para estabelecer um arcabouço conceitual generalizado para as camadas;

- Estudos hidrogeológicos de subsuperfície usando perfis de perfuração, perfis geofísicos e em menor escala testemunhos de sondagem para a definição das litofácies;

- Compilação de testes de laboratório em litologias aquíferas;

- Testes hidráulicos *in situ* em poços tubulares;

- Estimativas sobre a porosidade eficaz e a condutividade hidráulica das unidades que compõem o arcabouço geológico;

- Compilação de estudos sobre a história geológica incluindo processos diagenéticos e efeitos da tectônica no arcabouço geológico.

Objetivo: O delineamento das unidades hidroestratigráficas, e sua correlação com a estratigrafia de seqüências, permitirão a determinação de um padrão preditivo na distribuição dos horizontes aquíferos no ambiente heterogêneo do SAG.

3 EVOLUÇÃO DOS CONHECIMENTOS RELACIONADOS COM O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI NO RIO GRANDE DO SUL

3.1 Evolução dos conhecimentos estratigráficos

Ao contrário do que ocorre com os estudos relativos à hidrogeologia da porção gonduânica no Rio Grande do Sul, especialmente os sedimentos triássicos e juro-cretácicos, já de longa data existem tentativas de ordenação estratigráfica desta seqüência, como se pode ver na Figura 3.1. Desde a primeira proposta, apresentada por White em 1908, muitas modificações foram sugeridas. A primeira registrada na bibliografia foi do geólogo brasileiro Euzébio Paulo de Oliveira em 1918. A ele seguiram-se mais de trinta pesquisadores versando sobre a estratigrafia, em geral com grandes modificações no ordenamento lito e cronoestratigráfico.

Nesta tese não serão descritos detalhadamente estes trabalhos históricos. Estão citados para demonstrar a complexidade a que estão sujeitos os fluxos de água no que hoje denominamos de SAG, já que o mesmo engloba litologias de várias formações geológicas. Na Figura 3.2 estão as principais seqüências deposicionais do Permo-Triássico no Rio Grande do Sul (Faccini, 2000; Faccini *et al.* 2003).

Dentro deste escopo, os trabalhos a partir da década de 70 adquirem fundamental importância para a hidroestratigrafia do SAG. Certamente, um dos principais trabalhos elucidativos da estratigrafia triássica no Rio Grande do Sul trata-se da proposição da Formação Rosário do Sul por Gamermann (1973). Dentro da definição litoestratigráfica desta formação, individualizou a fácies pelíticas, lacustre, denominada Formação Santa Maria. Em uma tentativa de correlação regional, aponta os arenitos da Formação Pirambóia considerados como fluviais por Washburne (1930) como equivalentes aos arenitos fluviais da Formação Rosário do Sul. Esta concepção é aceita e utilizada por Schneider (1974), em um trabalho considerado como um marco da fase moderna de investigação estratigráfica na Bacia do Paraná.

O trabalho de Bortoluzzi (1974) é muito importante, pois define precisamente fácies que compõem a Formação Santa Maria, também definida por ele. Na nova coluna estratigráfica, propõe que a fácies Caturrita seja correlacionável com a Formação Pirambóia, levando em consideração uma provável associação com a Formação Botucatu.

White (1908)			Oliveira (1918)			Oliveira (1927)		
Série São Bento	Eruptivas da Serra Geral Grés São Bento Camadas vermelhas do Rio do Rasto		Série São Bento	Eruptivas da Serra Geral Arenito Botucatu		Série São Bento	Eruptivas da Serra Geral Grés São Bento Grupo Rio do Rasto	
	Série Rio do Rasto							
Du Toit (1927)			Morais Rego (1930) & Oliveira (1930)			Huene & Stahlecker (1931)		
Série São Bento	Eruptivas Serra Geral Arenito Botucatu Grupo Rio do Rasto Grupo Estrada Nova Superior		Série São Bento	Eruptivas Serra Geral Arenito Botucatu		Série São Bento	Eruptivas da Serra Geral Grés São Bento Camadas do Rio do Rasto	
	Série Passa Dois			Grupo Rio do Rasto Cam. de Santa Maria Cam. da Serrinha Cam. de Teresina				
Carvalho (1932)			Fiúza da Rocha & Scorza (1940)			Gordon Jr. (1947)		
Série São Bento	Eruptivas Serra Geral Arenito Botucatu Grupo Rio do Rasto Grupo Teresina		Série São Bento	Eruptivas Serra Geral Arenito Botucatu		Série São Bento	Arenito Caiuá Formação Serra Geral Formação Botucatu Formação Santa Maria	
				Andar Santa Maria Andar Teresina			Série Passa Dois Formação Rio do Rasto Formação Estrada Nova	
Beurlen (1953)			Martins, Sena Sob. & Beurlen (1955)			Beurlen, Martins & Sena Sob. (1955)		
Série São Bento	Arenitos Botucatu Arenito Pirambóia (em SP) equivalente às Camadas de Santa Maria (no RS)		Série São Bento	Derrames da Serra Geral Arenito Botucatu Camadas de Santa Maria		Série São Bento	Derrames da Serra Geral Arenito Botucatu Camadas de Santa Maria (equivalentes ao conglomerado Seival, Bacia do Camaquã)	
Delaney & Goñi (1963)			Bortoluzzi & Barberena (1967)			Tommasi (1973)		
	Lavas da Serra Geral Formação Botucatu			Formação Serra Geral Formação Botucatu		Grupo São Bento	Formação Serra Geral Formação Botucatu	
	Fm. Santa Maria Superior			Formação. Santa Maria			Grupo Rio do Rasto	Fm. Santa Maria Formação Rio Pardo
	Fm. Santa Maria Inferior Formação Rio Pardo			Mb. Superior Mb. Inferior				
Gamermann (1973)			Bortoluzzi (1974)			Schneider <i>et alii</i> (1974)		
	Formação Serra Geral Formação Botucatu		Grupo São Bento	Formação Serra Geral Formação Botucatu		Grupo São Bento	Formação Serra Geral Formação Botucatu	
	Formação Rosário do Sul	fc. Santa Maria fc. fluvial		Formação Santa Maria	fc. Alemoa fc. Passo das Tropas		Mb. Santa Maria Formação Rosário do Sul	
Formação Rosário do Sul s.s.			Formação Rosário do Sul s.s.					
Soares (1975)			Jabur (1979)			Andreis, Bossi & Montardo (1980)		
Série São Bento	Formação Serra Geral Formação Botucatu		Série São Bento	Formação Serra Geral Formação Botucatu		Grupo São Bento	Formação Serra Geral Formação Botucatu	
				Formação Caturrita			Formação Caturrita	
	Formação Rosário do Sul	fc. Santa Maria fc. fluvial		Formação Santa Maria		Grupo Rosário do Sul	Formação Santa Maria	Mb. Alemoa
				Formação Rosário do Sul			Formação Sanga do Cabral	Mb. P. Tropas

Figura 3.1 Evolução histórica das principais propostas de organização litoestratigráfica do intervalo permo-triássico/juro-cretácico da Bacia do Paraná até o início da década de 1980, enfatizando os trabalhos relacionados à estratigrafia do Rio Grande do Sul (Faccini, 2000).

Parece não restar dúvidas de que a definição litoestratigráfica proposta por Andreis *et al.* (1980), baseada nos trabalhos de Gamermann (1973) e Bortoluzzi (1974), foi o avanço mais marcante no ordenamento das camadas triássicas do Rio Grande do Sul. Estes autores propõem a categoria de Grupo para a Formação Rosário do Sul, subdividindo-o em Formação Sanga do Cabral, Formação Santa Maria (Membros Alemoa e Passo das Tropas) e Caturrita.

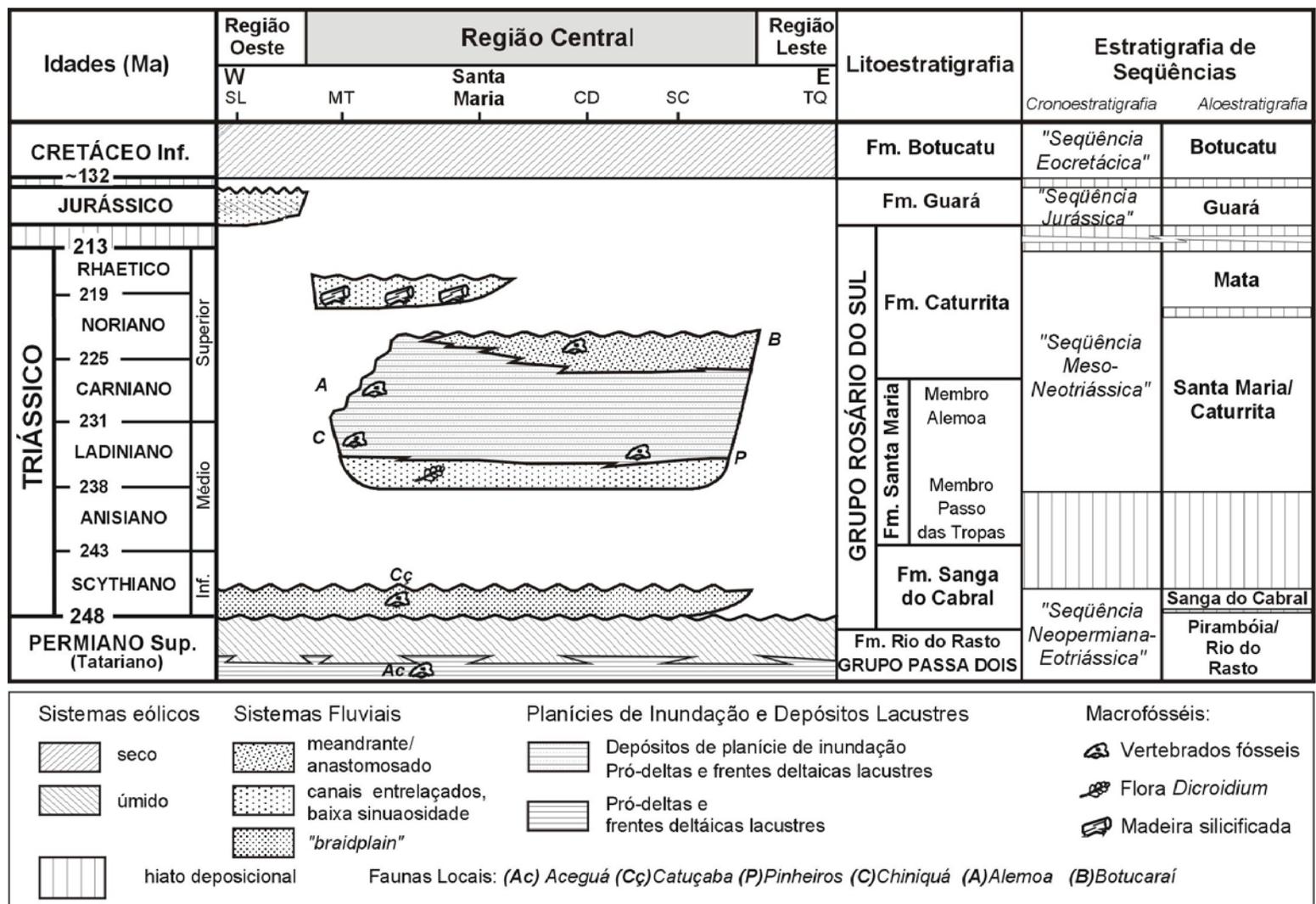


Figura 3.2 Seqüências deposicionais e equivalências litoestratigráficas do Mesozóico do Rio Grande do Sul, segundo Faccini (2000) e Faccini, Giardin & Machado (2003).

A importância deste trabalho também reside no refinamento do estudo da faciologia e dos paleoambientes do Triássico da Bacia do Paraná.

O termo “arenito Mata” foi estabelecido por Faccini (1989) para diferenciar dentre os depósitos arenosos do topo da Formação Caturrita, os arenitos fluviais portadores de notáveis quantidades de troncos silicificados de coníferas e que ocorrem principalmente nas regiões de Mata e São Pedro do Sul. Ainda não se conhece a importância hidrogeológica destes arenitos.

Dos trabalhos sobre a sedimentação, estratigrafia e estruturação da Bacia do Paraná em seu conjunto e o Triássico em particular, pela sua importância citamos os trabalhos de Lavina (1992), Schultz (1995), Milani (1997), Milani *et al.* (1998), Scherer (1998), Faccini (2000), Faccini *et al.* (2003) e Zeffass *et al.* (2003), que estão entre os mais recentes estudos detalhados da Bacia do Paraná.

3.2 Histórico das investigações hidrogeológicas

O Estado do Rio Grande do Sul caracteriza-se pela pequena produção de trabalhos relacionados com a pesquisa de água subterrânea.. A seguir serão discutidos alguns dos trabalhos mais marcantes das últimas décadas.

Entre os trabalhos mais aprofundados e pioneiros sobre os aquíferos rio-grandenses, tem-se o apresentado por Abrão Hausmann, em 1965, na Semana de Debates Geológicos (Sedegeo) da Escola de Geologia da UFRGS. Com o título “Esboço Hidrogeológico do Rio Grande do Sul”, pode ser considerado um marco na literatura hidrogeológica sul-rio-grandense, e por muitos anos permaneceu como a única fonte de informação sobre as províncias hidrogeológicas no Estado. Neste trabalho o autor considera que o Rio Grande do Sul não apresenta condições hidrogeológicas das mais promissoras, sendo que raramente seus aquíferos ultrapassam vazões de 100 m³/h. Define Província Hidrogeológica como “a área que apresenta em toda a sua extensão as mesmas características quanto às condições de vazão, captação e circulação de seus freáticos”. Segundo este trabalho, a Província da Borda Erodida do Planalto apresenta grandes oscilações freáticas, mas os arenitos podem produzir 10 m³/h. A *Cuesta* Basáltica é uma estrutura mergulhante para oeste, sem indicação de tectonismo apreciável, com o

arenito Botucatu fornecendo até 100 m³/h. Na Depressão Periférica o Permo - Triássico com camadas siltico-argilosas possui pobres condições hidrogeológicas e fornece vazões de 3 m³/h a 30 m³/h. O Botucatu com vazões de até 250 m³/h na porção oeste, tem uma queda de produtividade na parte oriental para cerca de 3 m³/h.

Com relação ao Sistema Aquífero Guarani, este é tratado em três partes, correspondentes às Formações Botucatu, Rio do Rasto e Santa Maria. Apesar de apresentar uma hidroestratigrafia bastante singela, com conceitos geológicos hoje ultrapassados, os dados hidrológicos e de qualidade química, entretanto, já indicam um conhecimento razoável da potencialidade hidrogeológica do reservatório.

Hausmann (1966), em seu trabalho sobre o comportamento do freático nas áreas basálticas do Rio Grande do Sul, conclui que os derrames da Formação Serra Geral cobrem os sedimentos gonduânicos com uma unidade morfológica bastante acentuada e de fácil identificação. O comportamento das efusivas como aquífero é considerado fraco, com as vazões raramente alcançando 40 m³/h, sendo em geral inferiores a 10m³/h. Sua importância para o entendimento da ocorrência do SAG reside nos processos erosivos e tectônicos responsáveis por três aspectos morfológicamente distintos: Planalto, Borda do Planalto e *Cuesta*. Dados estratigráficos indicam que o basalto mergulha para norte no litoral do Estado e que há um alto estrutural na região de Santa Maria. As variações altimétricas do contato Botucatu - Serra Geral revelam falhamentos pós-derrames.

Ainda segundo Hausmann (1966), os maiores índices de dureza são observados na região da fronteira sudoeste, especialmente no município de Uruguaiana. Águas minerais ocorrem em regiões afetadas por tectonismo, próximo ao rio Uruguai: Iraí, Sarandi, Ijuí, etc. As seções geológicas e o grande número de dados relacionados com o topo do aquífero Botucatu em toda a sua extensão no Estado são de grande valia para o estudo do comportamento estrutural do SAG.

Outro trabalho considerado como um marco no conhecimento da potencialidade dos aquíferos rio-grandenses e do Sistema Aquífero Guarani, foi o relatório denominado "Projeto Hidrogeologia da Fronteira Sudoeste do Rio

Grande do Sul”, de Presotto *et al* (1973), editado pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). Este projeto mapeou uma área de 67.000 km², com levantamentos geológicos, hidrogeológicos, além de cadastramento de poços tubulares, escavados e fontes. Vários ambientes geológicos foram abrangidos, sendo que os principais aquíferos mapeados foram os sistemas basálticos e porosos do Triássico ao Cretáceo. Também foi realizado um levantamento hidroquímico com análises da água dos poços. Como produtos, foram confeccionados mapas geológicos em escala 1:50.000, mapas hidrogeológicos, hidrológicos e hidroquímicos em escala 1:500.000. Apesar de ser um levantamento do início da década de 1970, mantém-se relativamente atualizado especialmente com relação ao Sistema Aquífero Guarani, ali tratado separadamente como Aquífero Botucatu e Aquífero Rosário do Sul.

Ainda com relação aos trabalhos regionais sobre os aquíferos rio-grandenses, deve ser mencionada a publicação da Acta Geologica Leopoldensia, Série Mapas, intitulada “Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul”, de Hausmann (1995) (Figura 3.3).

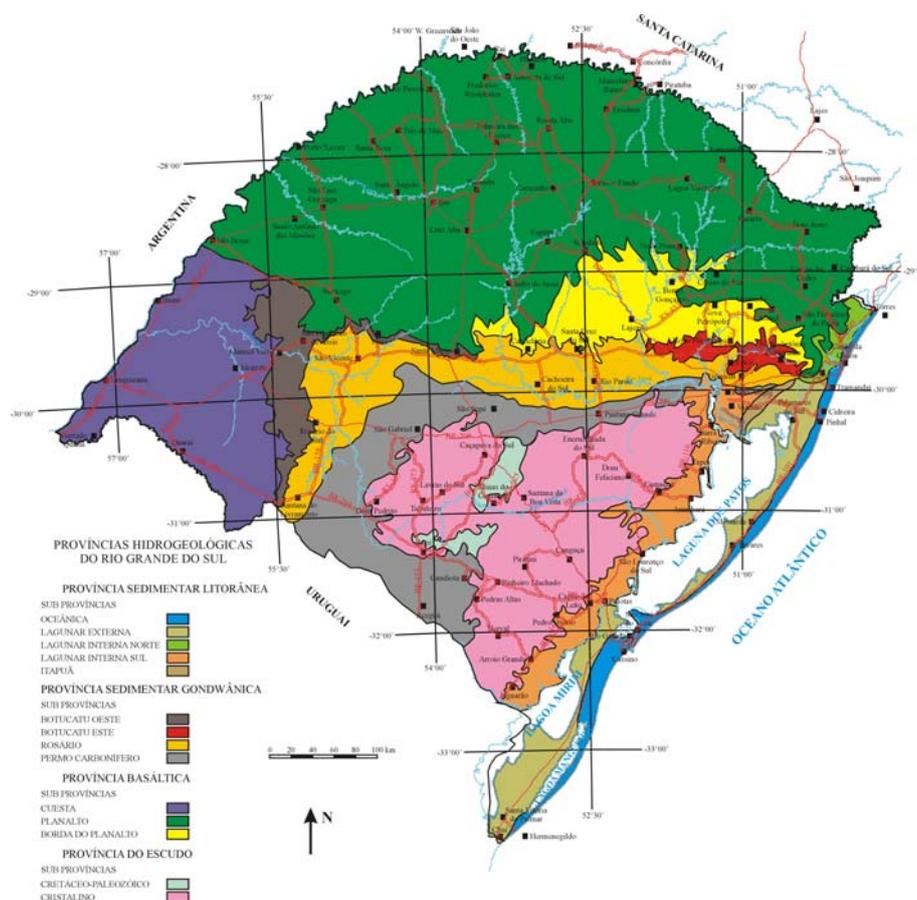


Figura 3.3 Mapa das províncias hidrogeológicas do Rio Grande do Sul (Hausmann, 1995).

Este trabalho, bem mais completo em relação aos outros desse autor, apresenta dados mais atualizados sobre todos os aquíferos rio-grandenses, entretanto, sem mencionar ainda a existência do Sistema Aquífero Guarani como uma unidade separada. Apesar de sua relativa modernidade, o trabalho não considera os últimos conhecimentos estratigráficos sobre as seqüências triássicas. Desse modo, ainda descreve os arenitos basais do Grupo Rosário do Sul, com “arenitos Rio Pardo”, não fazendo distinção de fácies. Importante salientar a preocupação do autor em descrever as condições climáticas no Estado, com a precipitação na área do SAG, em geral, acima de 1400 mm/ano, e a inclusão de seções hidrogeológicas ilustrativas do comportamento do Aquífero Botucatu.

Com relação aos mapeamentos hidrogeológicos em áreas de ocorrência do SAG, eles são ainda mais raros. Dentre estes mapeamentos pode ser citado o “Mapa de Previsão de Recursos Hídricos Subterrâneos da Folha de Santa Maria”, em escala 1:100.000, de Machado (1994), realizado com recursos do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Nesse trabalho foram coletados dados de mais de 260 poços tubulares, poços escavados e fontes, observados os valores hidrodinâmicos e da hidrogeoquímica do fluxo subterrâneo nos reservatórios aquíferos. A interpretação dos dados de campo, aliada a interpretações geológicas, permitiu uma primeira definição da arquitetura dos sistemas aquíferos triássicos nessa região.

É também de Machado (1998) o trabalho intitulado “Hidroestratigrafia Química Preliminar dos Aquíferos na Região Central do RS” (Figura 3.4). O autor, baseado em dados da geologia e do comportamento químico, determinou a fácies geoquímica e as correlacionou com os diferentes sistemas aquíferos, que após 1995 foram considerados como integrantes do Sistema Aquífero Guarani. Também nesse artigo, o autor confirma que dentre as formações aquíferas na região central do estado, a que apresenta maior importância é o Membro Passo das Tropas, da Formação Santa Maria.

Coluna Litológica Areia g m f Argila silte	Litoestratigrafia		Idades		Hidroestratigrafia		
	Formação	Grupo	Período	Era	Características das Unidades Hidrogeológicas		Tipos Geoquímicos
	Serra Geral Rochas Ácidas	São Bento	Cretáceo	MESOZOICA	Aqüífero	Fraturado	Bicarb. Cálc. Bicarb. Cálc.-Sód.
	Serra Geral Rochas Básicas						Bicarb. Sód. Bicarb. Sód.
Botucatu	Cret/Jurás	Aqüífero	Confinado Livre		Bicarb. Sód. Bicarb. Sód.		
Caturrita	Rosário do Sul	Jurás/Triás	Aqüífero		Bicarb. - Clor. Sód.		
Santa Maria		Triássico	Aqüicluda		-		
Membro Alemoa	Aqüífero		Confinado Livre		Bicarb. Sód. Bicarb. Cálc. -Sód.		
Membro Passo das Tropas	Aqüitardo	Bicarb. Mista					
Sanga do Cabral	Passa Dois	Permiano	Paleozóica		Aqüífero	Confinado	Sulf.-Clor. Sód. Clor.-Sulf. Sód.
Rio do Rasto						Livre	Bicarb. Sód. -Cálc.
Estrada Nova	Aqüicluda	-					



Figura 3.4 Hidroestratigrafia química preliminar para os aquíferos da região central do Rio Grande do Sul (Machado, 1998).

3.2.1 Avanços originados dos trabalhos acadêmicos

Com relação aos trabalhos regionais de nível acadêmico, têm-se os estudos dos aquíferos porosos e basálticos fraturados que pertencem à área de ocorrência do SAG e que foram objeto de dissertações de mestrado e teses de doutorado, dentre as quais, pela sua importância, citaremos defendidas junto ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia e Escola de Engenharia da UFRGS:

-Estudo Hidrogeológico para a instalação de captação de águas subterrâneas no arenito Botucatu, município de Alegrete (RS), de Schrader (1970);

-Pesquisa sobre o Aqüífero Basáltico da Região Sudoeste do Rio Grande do Sul, de Martins (1979);

-Estudo Hidrogeológico nas Províncias Litológicas do Estado do Rio Grande do Sul, de Sanberg (1980);

-Características Hidrodinâmicas dos Aqüíferos Basálticos do Rio Grande do Sul, de Dewes (1980);

-Estudo Hidrogeoquímico das Águas Subterrâneas no Estado do Rio Grande do Sul, de Abreu (1981);

-Banco de Dados Hidrogeológicos e Análise Estatística da Vazão dos Poços no Estado do Rio Grande do Sul, de Pessoa (1982);

-Análise Estrutural e Hidrogeológica do Aqüífero Fraturado da Formação Serra Geral do Rio Grande do Sul, de Möbus (1987);

-Caracterização Morfoestrutural e Hidrogeológica de Aqüíferos em Meio Fraturado através de Técnicas de Sensoriamento Remoto e Análise Estatística, em setor do Planalto Meridional – RS, de Takahashi (1991);

-Análise Hidrogeológica da Região Sudoeste do Rio Grande do Sul através de Técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, de Eilers (1993);

-Aplicações de Sensoriamento Remoto e Análise de Lineamentos em Estudos Tectônicos na Região de São Francisco de Assis, Porção da Borda Meridional da Bacia do Paraná, de Frasca (1996);

-Fácies, Estratificações Hidrogeoquímicas e seus controladores geológicos em Unidades Hidrogeológicas do Sistema Aqüífero Serra Geral, na Bacia do Paraná, RS, de Lisboa (1996);

-Integração de Dados Geológicos para Prospecção de Aqüíferos Fraturados em Trecho da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (RS), de Reginato (2003).

Schraeder (1970) utilizando poços tubulares perfurados pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), partindo de cálculos de transmissividade, porosidade, permeabilidade e coeficiente de armazenamento no arenito Botucatu confinado do município de Alegrete, apresenta uma

proposta detalhada de perfuração de poços para o aproveitamento do aquífero no abastecimento da cidade. Trata-se de um trabalho muito específico, porém com dados importantes da hidráulica do aquífero Botucatu.

Martins (1979) em uma dissertação tratando basicamente de aquíferos fraturados na fronteira oeste do Estado, salienta que a recarga nesse aquífero além de ser proveniente da precipitação pluviométrica, também pode ser devida a recarga advinda da Formação Botucatu sotoposta.

Em uma série de mapas hidroquímicos, com isolinhas de cálcio, magnésio, sódio, potássio, sulfato, cloretos, bicarbonato, resíduo seco, pH e condutividade elétrica, visualiza-se uma concentração de elementos em uma direção noroeste, o que poderia indicar um sistema de fraturamento preferencial na direção acima referida.

Finalmente, sugere uma tentativa de correlação entre o aquífero da Formação Serra Geral e o arenito Botucatu sotoposto, por intermédio de uma campanha de perfurações mais extensa com coleta de dados hidrogeológicos, para um estudo mais detalhado das características hidrodinâmicas do aquífero.

Sanberg (1980) estudou as quatro regiões litológicas do Estado do Rio Grande do Sul, através de técnicas de estatística multivariada, proporcionando a delimitação das características hidrodinâmicas e hidroquímicas através de análise de agrupamentos. Os poços utilizados foram obtidos junto ao arquivo técnico da CORSAN.

Na região litológica Sedimentares Gonduânicas, a Análise de Grupos Hierárquicos determinou quatro agrupamentos de poços, sendo que os poços do grupo 3, apresentam-se quase que totalmente na área de ocorrência da Formação Rosário do Sul. Os grupos 2 e 4 ocorrem na porção noroeste em áreas das Formações Botucatu e Rosário do Sul. O grupo 1 ocorre principalmente na região nordeste, área de ocorrência da Formação Botucatu.

Segundo o autor, o Rio Grande do Sul não possui aquíferos considerados como excelentes, a não ser a Formação Botucatu na região da Cuesta Basáltica, onde se encontra capeada pelos derrames vulcânicos de pouca espessura. Por considerar a Formação Rosário do Sul como um único aquífero (segundo os conceitos da época), as conclusões obtidas não

apresentam grande interesse para a determinação das unidades hidroestratigráficas do SAG no Rio Grande do Sul.

Dewes (1980) realizou um estudo sobre as características hidráulicas de poços perfurados pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) no Rio Grande do Sul, com ênfase na área basáltica. Foram calculadas as capacidades específicas, transmissividade pelo método de Theis-Jacob e o método de Sternberg para os poços com vazão variável. Foram calculados 64 valores para a Formação Serra Geral e os 20 valores restantes distribuem-se entre poços na Depressão Periférica e Litoral. Apenas alguns poços analisados refletem valores correspondentes ao SAG, devendo os valores ser tomados como médios para litologias arenosas e basálticas. Ainda segundo o autor, os valores de transmissividade devem ser utilizados com muita cautela para aquíferos fraturados, tendo maior utilidade à capacidade específica e a curva característica de poço para uma caracterização qualitativa do aquífero.

Abreu (1981), caracterizando a hidrogeoquímica dos aquíferos do Estado, apresenta resumidamente os dados hidrogeológicos das Formações Botucatu e Rosário do Sul (sendo feita apenas menção de duas fácies: fluvial e Santa Maria).

As características químicas dos aquíferos examinados foram o pH, dureza, alcalinidade, resíduo seco a 110°C, sílica, temperatura da água em graus Celsius, condutividade elétrica, razão de adsorção de sódio (SAR) e o tipo hidroquímico.

Para o autor, na unidade aquífera Botucatu, as águas cloretadas (20% com relação $rCl > r(Na + K)$) demonstram a baixa condição de fluxo, favorecendo um tempo maior de contato da água com a rocha nas águas de maior profundidade. Na unidade aquífera Rosário do Sul o tipo hidroquímico cloretado é freqüente, indicando que a fácies argilosa desta unidade dificulta a circulação e aumentam a presença de íons cloreto e sulfato.

Os resultados obtidos para a hidroquímica da Formação Rosário do Sul não podem ser utilizados por não terem sido realizados estudos individualizados das unidades hidroestratigráficas que compõem o Grupo Rosário do Sul.

Pessoa (1982) dedicou-se a formatar e preencher um Banco de Dados Hidrogeológicos digital, provavelmente o pioneiro no Estado, dados confiáveis obtidos junto a Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) e as empresas privadas Cia. T. Janér e Tecnipçoos.

Com os dados armazenados de vazão dos poços foi feito um tratamento estatístico das vazões nas regiões nas quais foi dividido o Estado. As unidades hidrogeológicas são: Planalto, Borda erodida do Planalto, Permo-Carbonífero, Rosário do Sul, Botucatu aflorante a Leste, Botucatu aflorante a Oeste, Botucatu sotoposto ao Basalto a Oeste, Botucatu sotoposto a Leste, Planície Costeira Lagunar, Planície Costeira Oceânica e Escudo.

Por comparação entre as diferentes unidades foram traçadas curvas N (nº de poços) x Q (vazão) com uma probabilidade de ocorrência de 90%. Desse modo, foram estimadas através dessas curvas, para cada unidade, a vazão alcançada com determinado número de poços com uma probabilidade de 90% de chance que ocorra vazões maiores ou iguais a essa.

A melhor unidade hidrogeológica encontrada foi o arenito Botucatu sotoposto ao basalto a oeste. Essa unidade, onde se encontram as maiores vazões, pode ser considerada, segundo a autora, o melhor aquífero do Estado. A análise das curvas mostra também que o arenito Botucatu sotoposto e aflorante a leste apresenta sensível redução dos rendimentos dos poços.

A Formação Rosário do Sul, que em outros trabalhos foi considerada como integrante da Unidade Permo-Carbonífera, foi analisada como uma unidade isolada, porque a presença de lentes areníticas poderia produzir aquíferos melhores que as formadas pela unidade anteriormente citada. Pela análise estatística, a produtividade média dos poços nessa unidade é menor que na Unidade Botucatu. Não são feitas menções quanto a produtividade da Formação Santa Maria.

Möbus (1987) aplicou técnicas geomatemáticas na análise de dados estruturais e hidrogeológicos na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

Quanto aos aspectos estruturais conclui que a distribuição das fraturas é heterogênea, com os eventos tectônicos provocando maiores deformações

em umas áreas que em outras. A orientação das fraturas na região, mostra ampla variabilidade, tanto espacial quanto de azimutes.

De grande importância é a constatação de duas orientações principais de fraturamentos: $N50^\circ \pm 5^\circ W$ e $N35^\circ \pm 5^\circ E$. As fraturas de direção noroeste controlam os principais cursos de água superficiais da região, com exceção do rio Uruguai. As fraturas de direção nordeste estão associadas predominantemente com os cursos de água secundários.

Quanto à hidrogeologia, foi possível obter uma compartimentação dos poços perfurados no aquífero fraturado, em função das variáveis estudadas. Pela análise de agrupamento foram determinadas cinco zonas hierárquicas no aquífero fraturado. Esse trabalho apesar de tratar especificamente os aquífero fraturado é importante para a compartimentação do SAG, pois reforça a predominância das estruturas noroeste nesta região do Estado, que também afetaram o SAG.

Takahashi (1991) utilizando técnicas e produtos de sensoriamento remoto identificou morfoestruturas intervenientes nas condições hidrogeológicas em setor do Planalto Meridional do Rio Grande do Sul.

Do ponto de vista estrutural, a distribuição espacial dos lineamentos ocorre de forma heterogênea, sendo verificadas zonas com densidades de lineamentos mais elevadas que outras. As orientações dos lineamentos identificados apresentam-se em concordância às direções já detectadas em estudos realizados na Formação Serra Geral (Soares *et al.* 1982), sendo mais freqüentes as direções Pitanga ($N60^\circ \pm 5^\circ E$) e a direção Médio Ivaí ($N45^\circ \pm 5^\circ W$). No tratamento efetuado sobre a orientação dos lineamentos verificou que as superfícies de tendências geradas, quando considerando todos os azimutes, não obtém ajustes capazes de refletir padrões regionais devido a presença de dois padrões principais bastante divergentes (NW e NE). Esse trabalho em conjunto com outros sobre a estruturação tectônica na área do SAG confirmam a conveniência de sua compartimentação espacial.

Eillers (1993) através de técnicas de interpretação morfoestruturais e estruturais, do uso de produtos de sensoriamento remoto e tratamento de dados através de técnicas geomatemáticas e de geoprocessamento, definiu um

modelo estrutural para o topo do SAG em uma região da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul.

Seu trabalho definiu um modelo estrutural preliminar para a área, primordial no condicionamento hidrogeológico regional, sendo que quanto a orientação dos lineamentos, a análise mostrou haver uma predominância de lineamentos pertencentes ao quadrante NW, com destaque para a direção N40°- 50°W (direção Médio Ivaí). A confirmação de direções preferenciais NW para essa região corrobora a necessidade de uma compartimentação do SAG nessa área.

Frasca (1996) desenvolveu o estudo buscando aplicações de ordem prática em benefício da pesquisa hidrogeológica e da gestão ambiental. Segundo as características físicas dos litotipos e de sua geometria, os sistemas foram subdivididos em:

- a) Aqüífero Intergranular Contínuo Livre. Este tipo ocorre em áreas de arenização e nas aluviões recentes, sendo constituído por sedimentos inconsolidados arenosos, areno-argilosos e lentes areníticas nos leitos dos rios. A permeabilidade é de alta a média com boa produtividade.
 - b) Aqüífero Intergranular Descontínuo Livre. É representado pelos solos transportados e coberturas detríticas arenosas, desenvolvidas sobre as Formações Rio do Rasto, Botucatu e o manto de intemperismo formado por alteração dos basalto da Formação Serra Geral. Segundo o autor funcionam como meio armazenador e transmissor de recarga para outros aqüíferos.
 - c) Aqüífero Intergranular Livre ou Confinado Associado a Zonas Fraturadas. É constituído por arenitos da Formação Rio do Rasto e Botucatu, sendo os principais aqüíferos da região, geralmente espessos e contínuos. Apesar das condições ideais de infiltração, porosidade, permeabilidade e fissuras favoráveis, pode não haver armazenamento devido a problemas estruturais, estando os padrões de fratura funcionando como drenos que abastecem rios e arroios da região. Esses padrões de fraturamento são aproximadamente regulares e de direção NW e NE, respectivamente Sistema Arco de Rio Grande e Sistema Cubatão-Lancinha, podendo estar interligados.
-

d) Aqüífero Descontínuo Fraturado Livre. Localiza-se em área de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Estruturalmente, apresenta-se muito fraturado e associado a falhas de direção NW e NE. Pode haver interconexão por gravidade da água que ocorre na Formação Serra Geral, penetrando nos arenitos da Formação Botucatu, ou ascensão das águas destes quando o nível potenciométrico estiver acima dos níveis de água na Formação Serra Geral.

Lisboa (1996) faz um amplo estudo da hidrogeoquímica e seus controladores geológicos nas Unidades Hidrogeológicas do Sistema Aqüífero Serra Geral no Rio Grande do Sul, concluindo que este sistema está condicionado por três unidades morfotectônicas: Fachada Atlântica, Abóbada Oeste e Abóbada Central.

Conclui que o aumento do pH e dos sólidos totais na Unidade Hidrogeológica Efusivas Básicas da Abóbada Central Densamente Dissecada é diretamente proporcional à profundidade de entrada de água no poço, o que indica influência dos arenitos sotopostos. A classificação das Unidades Hidrogeológicas do Planalto Meridional pode ser visualizada na Figura 3.5.

Esse trabalho é muito importante para o presente estudo, pois através de análises químicas das águas no Sistema Aqüífero Serra Geral, indica áreas onde existe influência do SAG sobre esse sistema aqüífero e vice-versa. A litoestratigrafia utilizada neste trabalho está desatualizada em relação aos conhecimentos atuais, não podendo ser utilizada nesta tese. Entretanto, os dados e interpretações relativos a geologia estrutural são de grande valia para a compartimentação do SAG na região da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul.

Reginato (2003), propondo metodologias de prospecção no Sistema Aqüífero Serra Geral, realizou um detalhamento estrutural com base em levantamentos de campo e interpretação de produtos de sensoriamento remoto.

As principais estruturas são de orientação nordeste e noroeste. Os poços com vazões de 10 a 20 m³/h estão geralmente correlacionados com lineamentos de direção nordeste, enquanto que nos de direção noroeste os poços apresentam vazões maiores do que 20 m³/h.

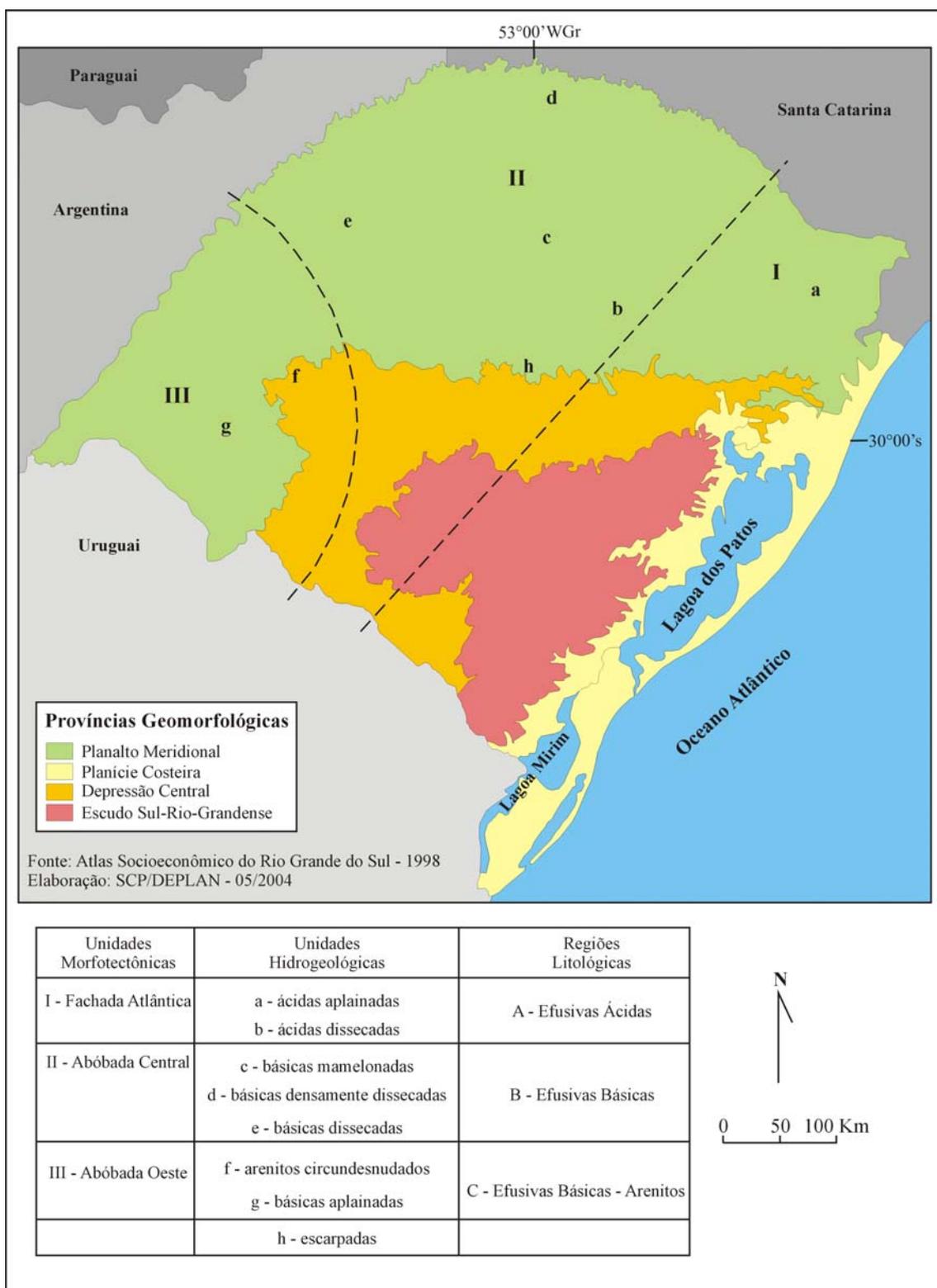


Figura 3.5 Classificação das Unidades Hidrogeológicas da Formação Serra Geral (Lisboa, 1996).

As conclusões com relação à análise hidroquímica são importantes, evidenciando a ocorrência de três campos principais: a) águas bicarbonatadas

cálcicas ou magnesianas (80,2%), b) águas bicarbonatadas sódicas (18,4%) e c) águas sulfatadas cálcicas ou magnesianas (1,4%). As águas bicarbonatadas sódicas são geradas através de mistura com as águas do Sistema Aquífero Guarani e as regiões de maior ocorrência destas águas são Nova Pádua e Veranópolis.

Todas as teses e dissertações enfocaram parcialmente a hidrogeologia do Sistema Aquífero Guarani, como correspondente às formações Botucatu e Rosário do Sul. Foram incluídas também aquelas que estudaram os derrames vulcânicos da Formação Serra Geral sob o ponto de vista geológico, estrutural e hidroquímico, tendo em vista a sua importância como confinante do sistema e inter-relacionamento que apresentam em seus fluxos hidrodinâmicos. Através dessas teses e dissertações, foram coletadas grandes quantidades de dados de poços tubulares e análises químicas de águas subterrâneas. As conclusões obtidas, mesmo que gerais, poderão, sob a nova ótica da estratigrafia de seqüências, contribuir para o embasamento científico de novas interpretações relacionadas com esse sistema aquífero.

4 DEFINIÇÕES FUNDAMENTAIS DOS SISTEMAS AQÜÍFEROS

4.1 Considerações gerais

Para complementar e aprofundar os conceitos emitidos sobre unidades hidroestratigráficas, neste capítulo são apresentadas algumas definições fundamentais relacionadas com a hidrologia subterrânea.

Estes termos serão utilizados durante a descrição das características das unidades hidroestratigráficas e também dos compartimentos estruturais. Eles compreendem as características geométricas e hidráulicas dos aquíferos que são representadas respectivamente pela porosidade e condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento. Também é apresentada a classificação e os fenômenos de heterogeneidade e anisotropia que afetam as camadas aquíferas.

Por fim, são apresentadas também conceituações sobre os termos mais utilizados na captação de água subterrânea através de poços, como medidas de nível de água e capacidade específica, que refletem condições hidrodinâmicas.

O relacionamento entre a classificação hidrogeológica das condições aquíferas ou não aquíferas, e o tipo de rochas representativo das classificações de permeabilidade, pode ser estabelecido por quantificações da permeabilidade (condutividade hidráulica), como pode ser visualizado na Quadro 4.1.

Permeabilidade m/dia	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4
Classificação da Permeabilidade	Impermeável		Pouco Impermeável		Pequena Impermeabilidade		Permeável		Muito Permeável		
Classificação Hidrogeológica	Aqüiclude		Aqüitardo		Aqüífero Pobre		Aqüífero Regular a Bom		Aqüífero Excelente		
Tipos de materiais	Argilitos Ardósias Granitos		Siltito Siltito Arenoso Argilitos		Areia Fina Siltito Areia Siltosa Calcário Fraturado		Areia Limpa Conglomerado Arenoso Areia Fina		Seixos Limpos		

Quadro 4.1 Relações entre as classificações hidrogeológica e de permeabilidade (Modificado de DAEE/USP, 1992).

4.2 Parâmetros hidrogeológicos fundamentais

4.2.1 Porosidade (n)

A porosidade n equivale ao volume de vazios V_v de uma amostra de rocha, dividida pelo volume total de rocha V_t , sendo definida como $n = V_v/V_t$. É expressa em fração decimal ou percentagem. É interessante distinguir entre **porosidade primária** (Figura 4.1), que é devida a matriz do solo ou da rocha e **porosidade secundária**, que pode ser devida a dissoluções posteriores ou então fraturamento regional estruturalmente controlado. A porosidade n pode ter grande influência na condutividade hidráulica K . Algumas técnicas estimam a condutividade hidráulica K a partir da porosidade e da análise de granulometria.

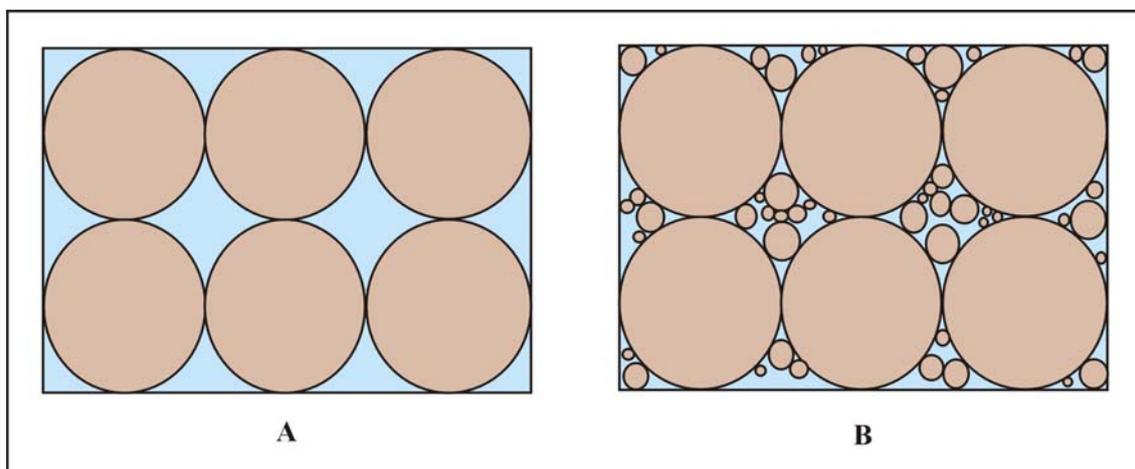


Figura 4.1 Porosidade primária com espaços livres (a) e preenchidos (b) (Fetter, 1980).

Essa porosidade assim definida não é a mais importante para o hidrogeólogo, pois nem toda a água contida nos poros pode ser extraída por drenagem natural ou mesmo bombeamento de poços. Desse modo, a **retenção específica** é a parte da água que fica na rocha e não é drenada, sendo expressa pela seguinte relação: $S_r = 100V_r/V_t$, sendo V_r o volume não drenado da água e V_t o volume total da rocha saturada. Quanto mais fino o material geológico (argiloso, p. ex.) maior é a retenção específica (Figura 4.2).

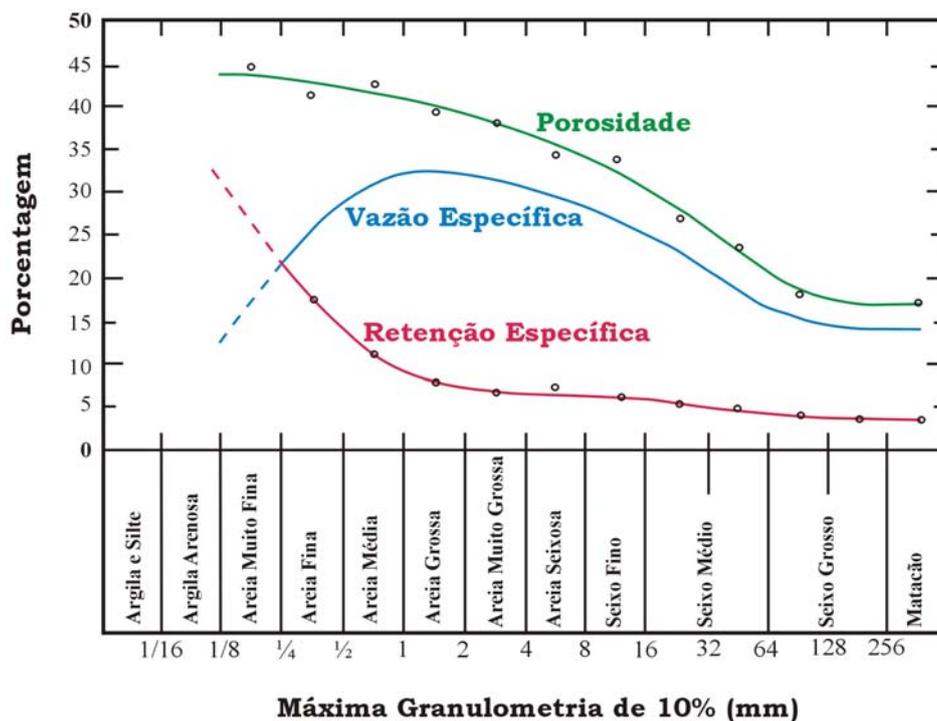


Figura 4.2 Porosidade, retenção e vazão específica x granulometria (CETESB, 1977).

Mais importante é a água que pode ser drenada, que é representada pela **porosidade específica** ou eficaz, que é dada pela seguinte relação:

$Pe = 100V_d/V_t$, sendo V_d o volume de água drenada e V_t o volume total de rocha saturada. A porosidade específica é chamada também de vazão específica.

4.2.2 Condutividade hidráulica (K)

A condutividade hidráulica é a mais importante propriedade física de um meio poroso, tanto quanto a porosidade é a sua mais importante propriedade geométrica. O Eng^o. Henry Darcy (1856) estabeleceu as bases do escoamento da água em um meio poroso concluindo que a vazão era:

- Proporcional à seção transversal (A) do filtro;
- Proporcional à diferença de cargas hidráulicas (h_1 e h_2) entre os piezômetros;
- Inversamente proporcional à distância (L) entre os piezômetros.

A fórmula de Darcy pode ser escrita como:

$$Q = KA (h_1 - h_2) / L$$

Onde: K = coeficiente de proporcionalidade denominado de condutividade hidráulica (L/T). (L = medida de distância e T = medida de tempo)

O gradiente hidráulico ou taxa de perda de carga por comprimento, é representado pela diferença de cargas hidráulicas (h_1 e h_2) dividida pelo comprimento L (Figura 4.3).

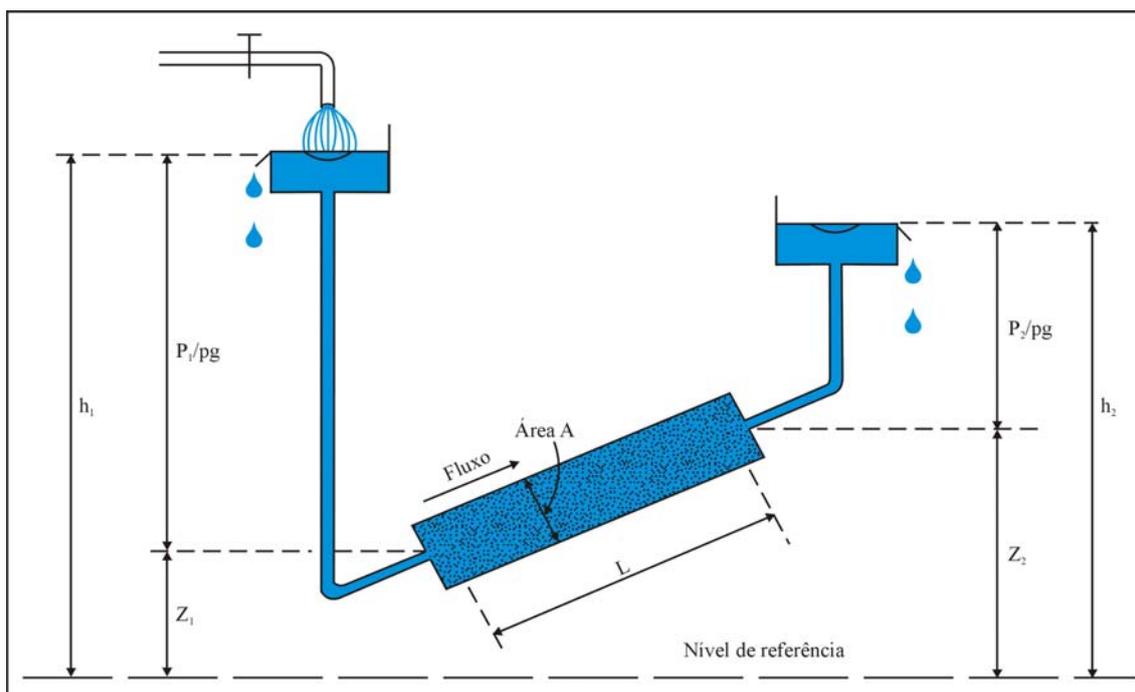


Figura 4.3 Experimento de Darcy para a condutividade hidráulica (Verruijt, 1970).

A carga hidráulica é a soma de duas parcelas: a carga de elevação z (altitude ou cota do ponto) e a carga de pressão P/γ (metros de coluna d'água acima do ponto) (Figura 4.4).

O coeficiente de proporcionalidade K da Lei de Darcy leva em conta as características do meio (porosidade, tamanho e distribuição das partículas, forma e arranjo das partículas, bem como as características de viscosidade e massa específica do fluido).

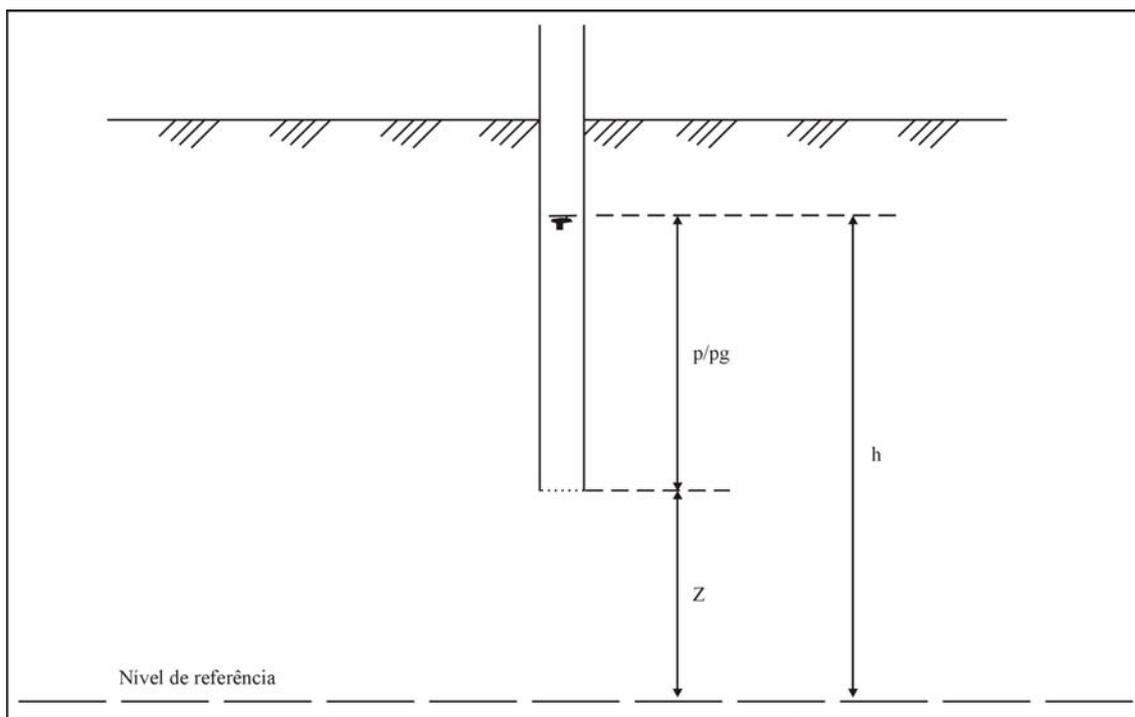


Figura 4.4 Piezômetro mostrando a carga hidráulica do aquífero (Verruijt,1970).

A condutividade hidráulica pode ser expressa em m/d, m/s ou cm/s (Figura 4.5), e pode ser determinada através de fórmulas, métodos de laboratório ou ensaios de campo. Em geral, devido ao acamamento das rochas a condutividade horizontal é maior que o valor na direção vertical.

Valores de la permeabilidad en función de los distintos materiales (valores representativos de K)

Clasificación litológica		m/día
Caliza arcillosa	porosidad 2%	$8,3 \times 10^{-5}$
Caliza	porosidad 16%	$2,2 \times 10^{-3}$
Arenisca limosa	porosidad 12%	$1,2 \times 1^{-1}$
Arenisca de grano grueso	porosidad 12%	$9,2 \times 10^{-1}$
Arenisca	porosidad 29%	2,0
Arena muy fina	bastante homométrica	8,3
Arena de grano medio	muy homométrica	$2,2 \times 10^2$
Arena de grano grueso	muy homométrica	$2,6 \times 10^3$
Grava	muy homométrica	$3,6 \times 10^4$
Arcilla montmorillonítica		10^{-5}
Arcilla caolinítica		10^{-3}

Figura 4.5 Valores de K em função de distintos materiais (Pulido,1978).

4.2.3 Transmissividade (T)

A transmissividade (T) é um dos parâmetros hidráulicos obtidos dos ensaios de bombeamento e está intimamente relacionado com a condutividade hidráulica (K) (Figura 4.6). Ela corresponde ao volume de água que pode ser transmitido horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero e define-se como a taxa de escoamento de água através de uma faixa de largura unitária do aquífero submetida a um gradiente hidráulico unitário.

Para aquíferos confinados a transmissividade é dada pela expressão: $T = Kb$ onde T é a transmissividade (L²/T), K é a condutividade hidráulica (L/T) e b a espessura do aquífero (L). Nos aquíferos livres a transmissividade é variável, pois muda a espessura do aquífero saturado com o tempo de bombeamento. As unidades de medida mais comuns são m²/s e m²/dia.

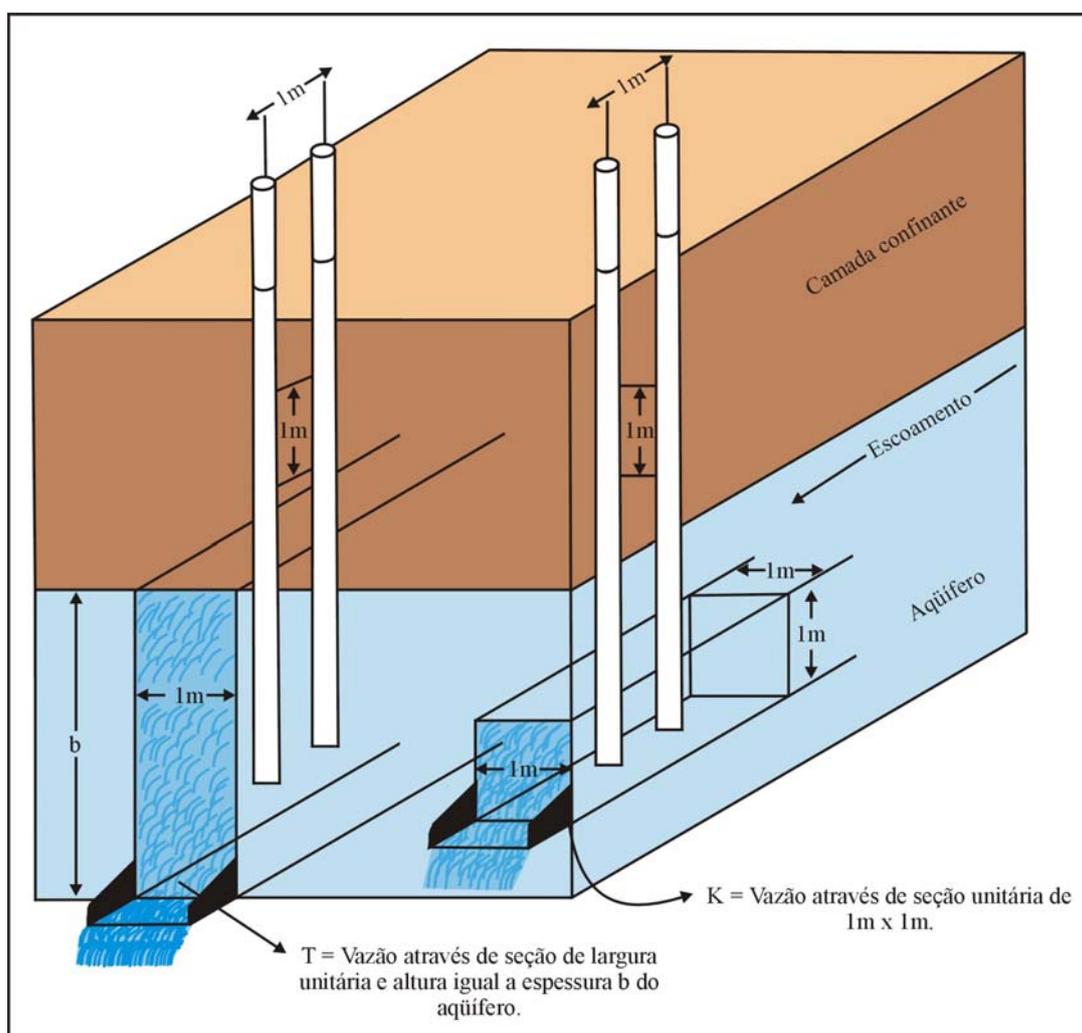


Figura 4.6 Diagrama mostrando a diferença conceitual entre condutividade hidráulica e transmissividade, modificado de Pulido (1978).

Valores altos de condutividade hidráulica não indicam necessariamente que o aquífero seja um grande produtor, pois se tiver pequena espessura sua transmissividade também será pequena.

4.2.4 Coeficiente de Armazenamento (S)

Outro parâmetro hidráulico importante obtido através de ensaios de bombeamento, com o auxílio de piezômetros é o Coeficiente de Armazenamento (S). Ele define-se com o volume de água possível de extrair de uma coluna de aquífero que tenha por base a unidade de seção ao diminuir a pressão em uma unidade (Figura 4.7) . Seus valores para o tipo de aquífero confinado costumam ser da ordem de 10^{-4} a 10^{-6} . Nos aquíferos livres coincide com a porosidade específica e oscila entre 0,01 e 0,4.

É importante destacar que o Sistema Aquífero Guarani constitui-se na maior parte de sua área de ocorrência de um aquífero confinado elástico, quando a água bombeada provém ao mesmo tempo dos seguintes fatores:

- 1 – Da água que se desloca dentro da formação em direção à zona de descarga ;
- 2 – Da compactação do terreno que tende a expulsar a água bombeada ;
- 3 – Da compressibilidade da água ;
- 4 – Da expansão dos gases que a água contém e que atuam sobre ela;
- 5 – Da água deslocada pela compressibilidade do terreno que constitui a formação;
- 6 – Do deslocamento da água originada pelas diferenças de potencial de origem químico e térmico.

Desses fatores os mais importantes são os 2, 3 e em alguns casos o 4. O fator de compressibilidade da água, responde por praticamente 75% da água obtida.

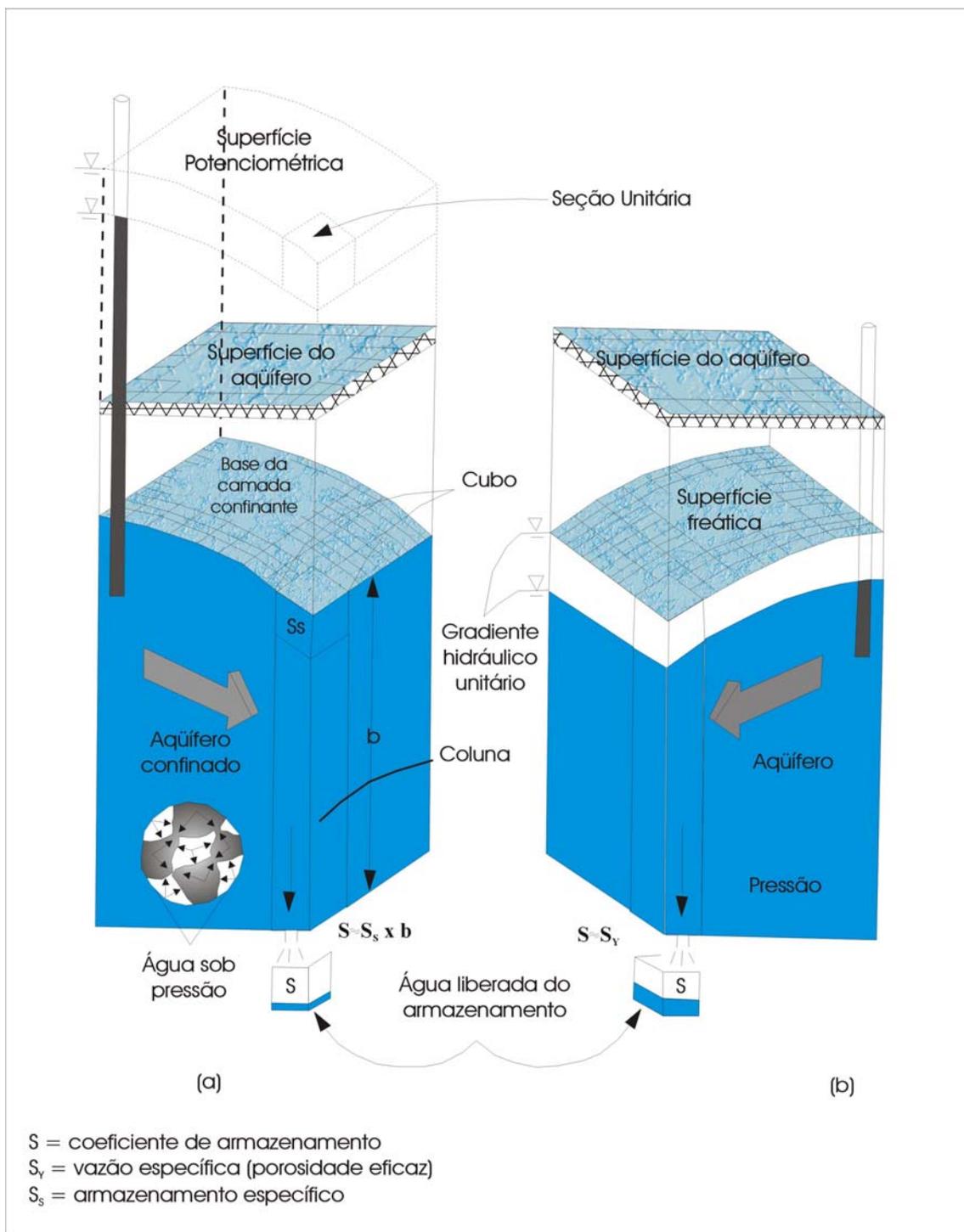


Figura 4.7 Comparação entre o coeficiente de armazenamento em aquíferos confinados e a porosidade em aquíferos livres (Watson & Burnett, 1995).

4.3 Classificação dos tipos de aquíferos

Muito embora ocorram na natureza formações geológicas com uma variedade muito grande de tipos de rochas, o comportamento hidráulico subdivide-se em três grandes tendências (meios porosos granulares, por

fraturamento e/ou dissolução). Apesar dos critérios-guia para o estabelecimento de unidades aquíferas não serem coincidentes com aqueles das unidades geológicas, o conhecimento preciso das características geológicas é fator determinante das caracterizações das unidades hidrogeológicas, como segue:

1- De acordo com o tipo de porosidade das formações litológicas que compõem seu arcabouço os aquíferos podem ter três subdivisões principais (Figura 4.8):

a – Aquíferos com **porosidade intergranular**, em geral primária, formados por litologias sedimentares predominantemente arenosas.

b – Aquíferos com **porosidade por fraturas**, em geral secundários, formados por litologias de origem ígnea e metamórfica e, em alguns casos, por rochas sedimentares muito litificadas.

c – Aquíferos com **porosidade por fraturas dissolvidas** e alargadas principalmente por ação de CO_2 dissolvido na água. Constituem os chamados *carsts*, formados por rochas carbonáticas sedimentares e metamórficas. Possuem grande heterogeneidade e anisotropia do fluxo, dificultando a aplicação dos cálculos hidráulicos.

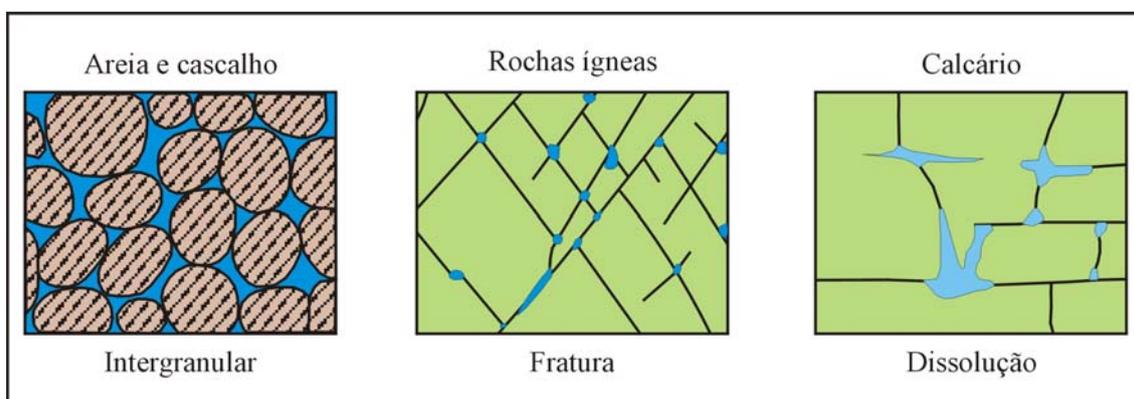


Figura 4.8 Tipos de aquíferos conforme o tipo de porosidade.

2 – De acordo com os valores relativos da condutividade hidráulica (K) podem ser classificados em (Figura 4.9):

a – **livres**, quando a condutividade hidráulica é média a alta em toda a espessura da formação litológica, praticamente sem variações significativas ($K=K$).

b – **semilivres**, quando existem duas zonas de condutividade hidráulica em que a superior apresenta uma diferença pouco significativa em relação à condutividade hidráulica da base do aquífero ($K' < K$).

c – **semiconfinados**, quando existem também duas zonas de condutividade hidráulica, neste caso os valores da zona superior são muitas vezes menores aos valores da base do aquífero ($K' \ll K$).

d – **confinados**, quando existem duas zonas de condutividade hidráulica, com os valores da porção superior insignificantes quando comparados com os da base do aquífero, podendo ser as litologias confinantes inclusive impermeáveis ($K=0$).

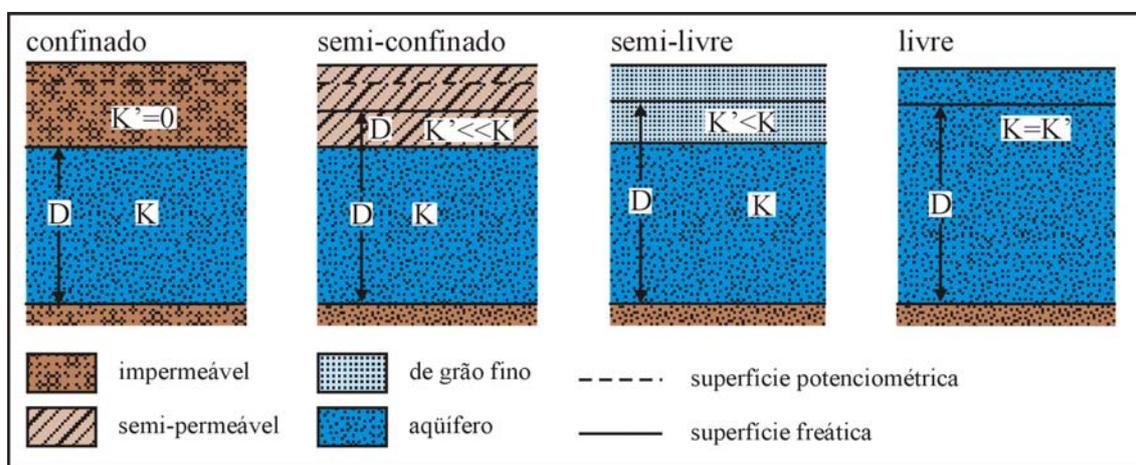


Figura 4.9 Relação de K e K' em diferentes aquíferos segundo Krusemann e deRidder (1980).

3 – Os aquíferos também podem ser classificados de acordo com a pressão atuante nas suas águas, tanto nas superfícies limítrofes superior (solo) ou inferior (zona confinada):

a - **Aquífero livre** (também chamado **freático**) é aquele cuja superfície superior é o nível freático, onde todos os pontos estão sob pressão atmosférica. Com relação à superfície limitante inferior, eles podem ser classificados em drenantes (base semipermeável) ou não drenantes (base impermeável). Aquíferos suspensos ocorrem dentro de uma superfície freática regional e possuem águas acumuladas sobre uma camada impermeável de extensão limitada (Figura 4.10).

b – **Aqüífero confinado ou sob pressão artésiana**, é aquele no qual a pressão no topo do aquífero é maior do que a pressão atmosférica. Aquífero confinado não drenante, é um aquífero que é limitado no topo e na base por camadas impermeáveis. Em aquíferos desse tipo o nível de água subterrânea fica acima do teto do aquífero e indica a carga potenciométrica ou carga hidráulica média. Quando o nível sobe acima da superfície do terreno, o artesianismo é surgente ou jorrante. O aquífero confinado é drenante quando pelo menos uma das camadas limítrofes é semipermeável, permitindo a entrada ou saída de fluxos de água por drenança. Em um aquífero semiconfinado as formações do topo podem fornecer quantidades consideráveis de água ao longo de uma grande extensão regional do aquífero.

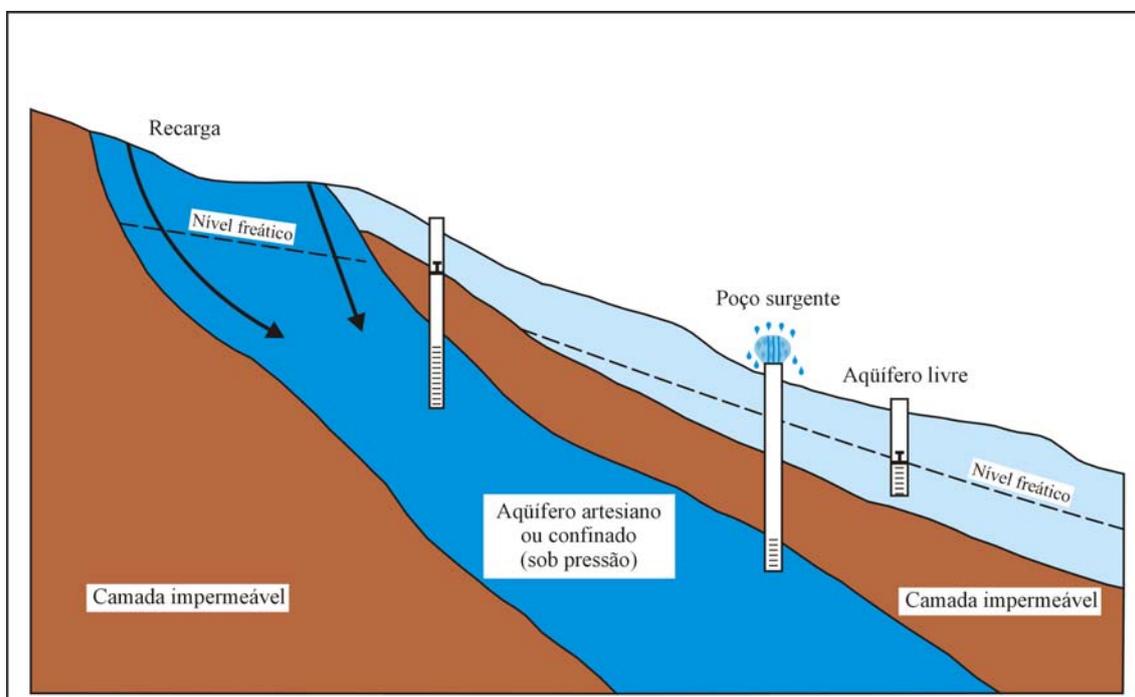


Figura 4.10 Aquíferos com pressão artésiana (confinados) e hidrostática (livres).

4.4 Heterogeneidade e anisotropia da condutividade hidráulica dos aquíferos

A condutividade hidráulica geralmente apresenta variações de valores dentro de uma formação geológica. Ela também pode mostrar variações de acordo com a direção da medida em um ponto da formação geológica. A

primeira propriedade é chamada heterogeneidade e a segunda anisotropia. Se uma condutividade hidráulica K é independente de posição dentro de uma formação geológica, ela pode ser considerada homogênea. Se for dependente da posição, a formação é heterogênea.

Existem três tipos principais de configurações heterogêneas em aquíferos (Figuras 4.11 e 4.12): 1) a **heterogeneidade estratificada**, comum em rochas sedimentares e depósitos marinhos e lacustrinos inconsolidados; 2) **heterogeneidade de descontinuidade**, causada pela presença de falhas e feições estratigráficas de larga escala; 3) **heterogeneidade de “trending”** especialmente comum em resposta aos processos de sedimentação, que produzem significativas variações faciológicas no sentido do transporte (p. ex., deltas e leques aluviais).

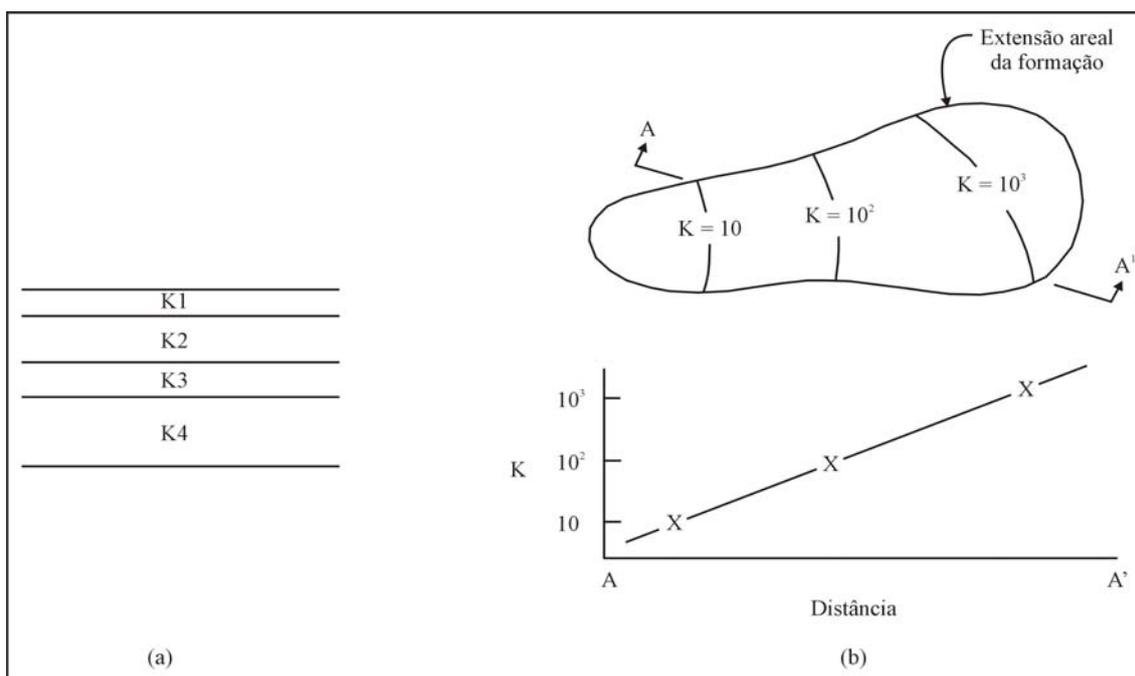


Figura 4.11 Heterogeneidade de acamamento e de “trending” (Freeze e Cherry, 1979).

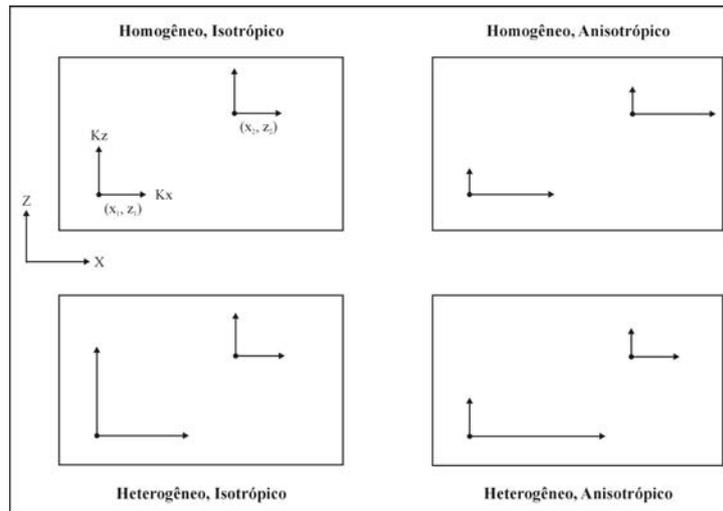


Figura 4.12 Combinações entre heterogeneidade e anisotropia (Freeze e Cherry, 1979).

Segundo Greenkorn e Kesser (1969), se todas as formações geológicas apresentam variação espacial de K , então de acordo com a definição clássica não existiriam aquíferos homogêneos. Eles redefinem a homogeneidade de um aquífero quando a função de densidade probabilística da condutividade hidráulica é monomodal. Para um aquífero heterogêneo a função de densidade probabilística é multimodal. A adaptação desses termos em relação à definição clássica, pode ser feita através da adjectivação de K como *condutividade hidráulica média* (Figura 4.13).

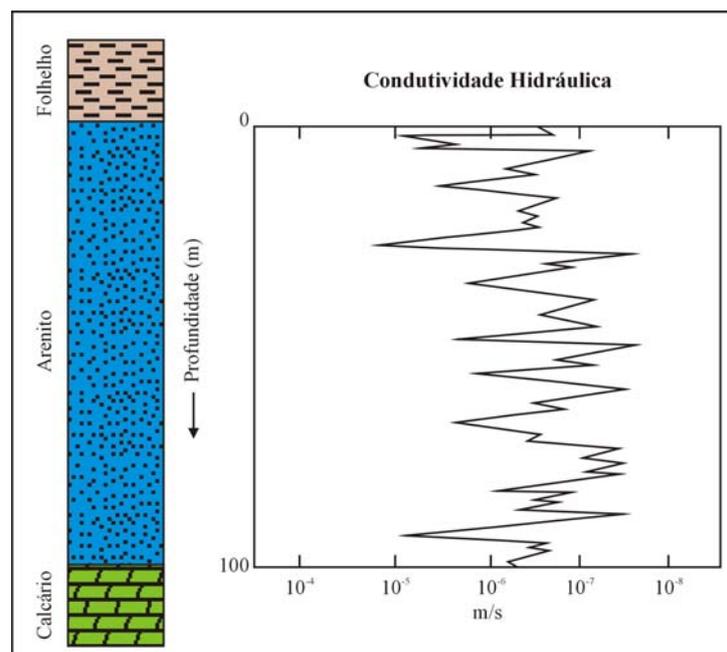


Figura 4.13 Aquífero arenoso relativamente homogêneo (Freeze e Cherry, 1979).

Se a condutividade hidráulica K é independente da direção de medida em um ponto do aquífero, então ele é isotrópico naquele ponto. No caso dela variar então o aquífero é anisotrópico naquele ponto. A diferença entre o máximo e o menor valor é conhecido como a direção principal de anisotropia. As direções são sempre perpendiculares uma em relação à outra. A causa primeira em uma pequena escala é a orientação dos minerais argilosos em rochas sedimentares e sedimentos inconsolidados.

4.5 Outros termos importantes utilizados em hidrologia subterrânea

4.5.1 Nível Freático (NF): corresponde ao primeiro nível de água encontrado em um aquífero e que está sob a influência da pressão atmosférica em toda a sua extensão.

4.5.2 Nível estático (NE): corresponde à pressão neutra do aquífero no ponto considerado. É a superfície livre da água dentro do poço, medida a partir da superfície do solo e referida ao nível médio dos mares, corresponde a uma pressão medida em metros.

4.5.3 Nível Dinâmico (ND): corresponde ao nível que a água atinge dentro do poço durante o transcurso de um bombeamento. Há uma relação direta entre o nível dinâmico e a vazão do poço, sendo que o mesmo é variável com o tempo.

4.5.4 Rebaixamento (s): corresponde à distância vertical dentro do poço entre o NE e o ND. O rebaixamento $s = ND - NE$ é relacionado com o nível de bombeamento do poço.

4.5.5 Raio de Influência (R): define-se como a distância desde o centro do poço ao limite do cone de depressão. É maior nos casos de poços perfurados em aquíferos confinados do que em livres. Também é maior em aquíferos de alta transmissividade comparados com os de baixa transmissividade (Figura 4.14).

4.5.6 Capacidade Específica (Q/s): define-se a capacidade específica como o cociente da vazão (Q) pelo rebaixamento (s) do poço, admitindo-se que

o bombeamento atingiu o regime de equilíbrio. É indicativa do rendimento característico do aquífero. Também pode ser usada como medida de eficiência do poço. A unidade usual para capacidade específica é de $m^3/h/m$.

4.5.7 Poço jorrante ou surgente: poço que apresenta pressão artesianas de modo a ultrapassar com sua vazão livre a superfície do terreno onde foi perfurado.

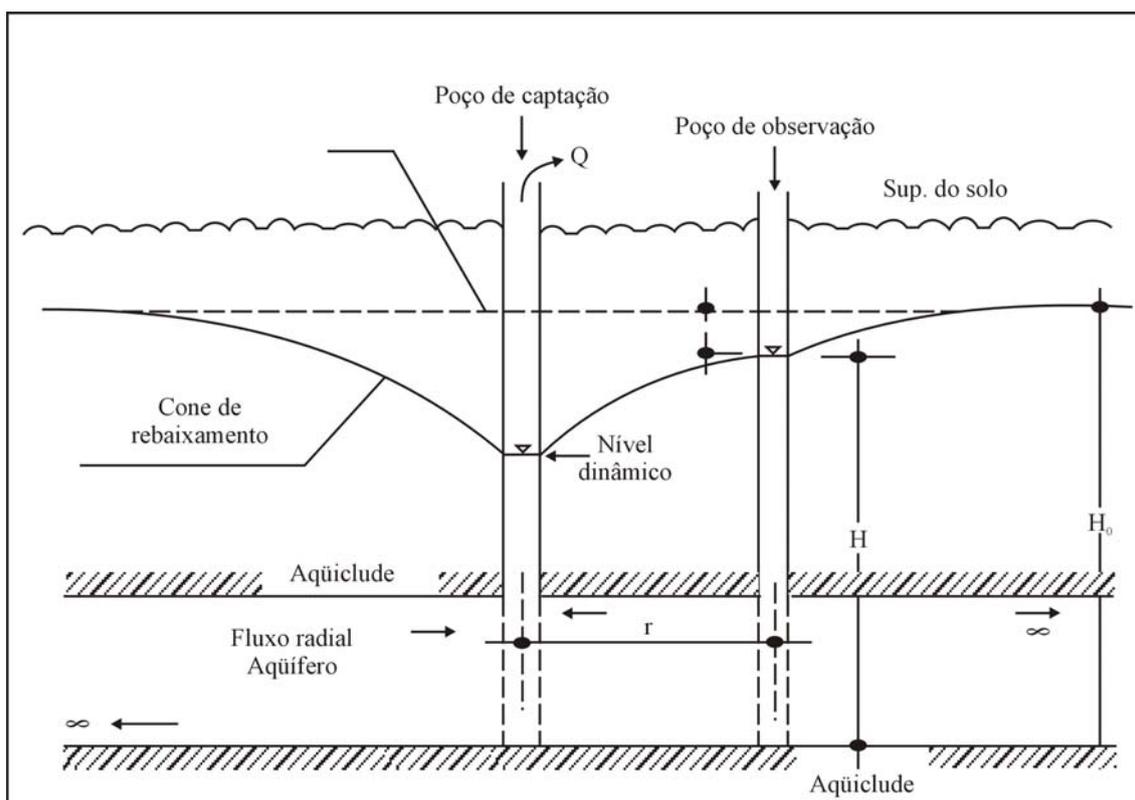


Figura 4.14 Ilustração do raio de influência e cone de rebaixamento em torno de um poço perfurado em aquífero confinado.

5. CONCEITUAÇÃO E DELINEAMENTO DE UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS

5.1 Princípios

Nos estudos hidrogeológicos existe a necessidade de um conhecimento mais aprofundado da litoestratigrafia de uma determinada região e seu relacionamento com as unidades hidrogeológicas. Tais unidades são essencialmente unidades estratigráficas, definidas e distinguidas pelas suas propriedades condutoras (ou não) de água, sendo denominadas unidades hidroestratigráficas e de hidroestratigrafia o estudo de seus inter-relacionamentos e propriedades (Galloway *et al.*, 1982).

Nestas investigações de águas subterrâneas é fundamental uma etapa de definição e mapeamento das unidades aquíferas e confinantes (unidades hidroestratigráficas) na subsuperfície da área a ser estudada. Com o delineamento dessas unidades, fragmenta-se o arcabouço geológico em função de sua permeabilidade, procurando-se definir o sistema de fluxo.

Para alcançar este objetivo uma grande dificuldade se apresenta, pois não existe um código amplamente e incontestavelmente aceito para a nomenclatura dos aquíferos e unidades confinantes (Seaber, 1988). A designação informal e a delimitação de unidades hidroestratigráficas podem levar a confusões, se os procedimentos não estão baseados em rigorosas evidências científicas e extensamente documentados. Tentativas de reconhecer unidades hidroestratigráficas como entidades formais no código estratigráfico em geral resultam em sucesso limitado. Com relação ao que ocorre nos Estados Unidos da América, as unidades hidroestratigráficas são consideradas unidades econômicas informais no Código Estratigráfico Norte Americano (NACSN, 1983) e no *International Stratigraphic Guide* (Hedberg, 1976). A disciplina de hidroestratigrafia, fundamentalmente um campo especializado dentro da disciplina de hidrogeologia é de pequeno interesse e raramente tratado pela maioria dos estratígrafos. Entidades litoestratigráficas que são mais conhecidas por sua utilidade do que por sua unidade litológica como p. ex., aquíferos, areias petrolíferas, camadas de

pedreiras e veios de minério, são consideradas unidades informais mesmo se denominadas (Hedberg, 1976).

No último século, as colunas litoestratigráficas mudaram muito com o avanço dos conhecimentos geológicos, entretanto, o agrupamento corrente das formações consiste ainda de uma mistura de nomenclaturas antigas e outras mais recentes. Desse modo, os nomes dos aquíferos têm variado de acordo com o aumento do conhecimento dos sistemas de fluxo de águas subterrâneas. Assim, muitos dos aquíferos que compõem o arcabouço do SAG deverão ser renomeados em função de refletirem continuidades hidráulicas, que cruzam linhas estaduais e mesmo internacionais.

5.2 Unidade Hidroestratigráfica – conceitos

É reconhecido pelos hidrogeólogos que o fluxo de água subterrânea nem sempre é restringido aos limites de uma unidade estratigráfica reconhecida. Os dois termos hidrogeológicos, “ **aquífero** ” e “ **unidade hidroestratigráfica** ”, são comumente empregados para subdividir a subsuperfície em unidades de maior importância para a hidrogeologia das águas subterrâneas (Noyes *et al.*). O termo “ aquífero ”, porém, é mais utilizado quando se leva em consideração o seu uso no abastecimento de água em termos econômicos. O conceito de aproveitamento econômico torna relativos os conceitos aqui tratados, pois eventualmente formações geológicas pouco permeáveis terão seu aproveitamento baseado em disponibilidades e necessidades momentâneas ou mesmo duradouras.

O termo “ aquífero ” é comumente definido por leis e regulamentações locais, o que torna ainda mais complicado o seu uso como um termo técnico. Por exemplo, a terminologia hidroestratigráfica do USGS pode ser visualizada na Figura 5.1.

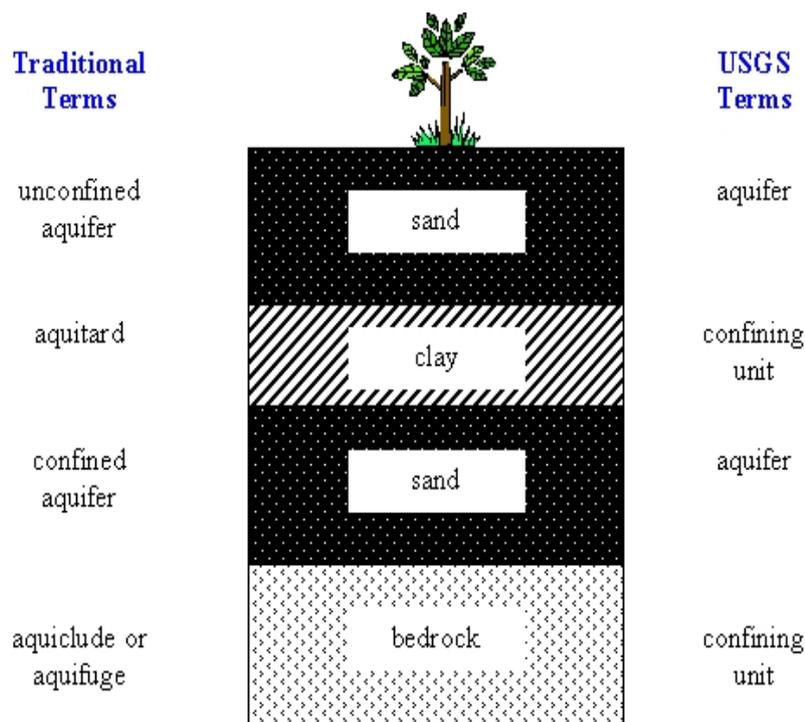


Figura 5.1 Correspondência entre os termos hidroestratigráficos tradicionais e os utilizados pelo USGS .

(http://www.geology.buffalo.edu/courses/gly414/Lectures/hydrostratigraphy_terminology.htm)

Utilizando-se a denominação de aquífero para determinada camada geológica, as outras camadas podem também ter denominações tais como aquítardo, aquíclude ou aquífugo. Entende-se por **aquítardos** as formações litológicas que armazenam água, mas possuem um coeficiente de condutividade hidráulica muito pequeno quando correlacionados com o dos aquíferos e como consequência transmitem água muito lentamente. Isto torna muito difícil a sua captação através de poços, entretanto, condições geológicas de drenança permitem que forneça verticalmente água para as formações mais permeáveis, quando então podem ser exploradas. Os **aquícludes** são aquelas formações litológicas que contêm água em seus poros, porém não têm capacidade de transmiti-la, impossibilitando a sua captação econômica. Esse conceito aplica-se especialmente no caso das argilas, que por sua alta porosidade armazenam até 50% de água, que não são transmitidas pelo baixíssimo coeficiente de condutividade hidráulica que possuem, não havendo possibilidade de captá-la através de poços tubulares. Além das argilas, formações geológicas que retenham ou impeçam a circulação de água em um meio aquífero, atuando como confinantes podem ser consideradas como aquícludes, como é o caso de alguns diques e soleiras de diabásio. Os

aqüífugos restringem-se às formações geológicas de rochas duras (maciças), que não contêm água e nem possuem a propriedade de transmiti-la. Incluem-se nesse caso as rochas granitóides e metamórficas inalteradas. Quando essas rochas estão intensamente fraturadas, como costuma ocorrer com as rochas basálticas, elas podem constituir aqüíferos. Uma síntese das possibilidades de interação entre porosidade e condutividade hidráulica (permeabilidade) é apresentada na Figura 5.2.



Figura 5.2 Classificação das unidades hidroestratigráficas de acordo com suas características de porosidade e permeabilidade (DAEE/USP, 1992).

O termo “unidade hidroestratigráfica”, no entanto, tem sido definido de maneiras variadas na literatura, não possuindo uma definição formal dentro do Código de Nomenclatura Estratigráfica Norte Americano (NASCN, 1983). **Unidades hidroestratigráficas** foram originalmente propostas por Maxey (1964) para “*corpos de rocha com extensão lateral considerável compondo um arcabouço geológico que funciona razoavelmente como um sistema hidrológico distinto*”. Ele também mostra a necessidade de definir unidades de água subterrânea que são baseadas não somente em características litológicas específicas, mas inclui parâmetros que correspondem especialmente ao movimento, ocorrência e armazenamento. A definição de Maxey (1964) implica que as unidades hidroestratigráficas possuam continuidade hidráulica e sejam entidades independentes de escala e mapeáveis. A capacidade de mapeamento neste caso significa que a geologia de superfície pode ser subdividida de acordo com a permeabilidade (Seaber, 1988). Assim uma unidade hidroestratigráfica única pode incluir uma formação, parte de uma formação, ou um grupo de formações.

Seaber (1988) descreve que existe uma divergência entre os hidrogeólogos sobre se “mapeiam e nomeiam os sistemas de fluxo e as formações rochosas separadamente, ou tentam encontrar meios de combinar os dois conceitos integrados em um único sistema de mapeamento e nomenclatura”. Muito dessa divergência em classificar e nomear unidades hidroestratigráficas ocorre porque “a natureza dos contornos de uma unidade não tem sido definida antes do mapeamento da unidade”. A definição proposta por Seaber (1982; 1986; 1988) para **unidade hidroestratigráfica**, é que esta é “*um corpo rochoso distinto por sua porosidade e permeabilidade*”, que ele considera mais consistente com a nomenclatura estratigráfica estabelecida. Com essa definição Seaber tenta comprovar a observação de que uma “unidade hidroestratigráfica pode ocorrer em uma ou mais unidades estratigráficas, aloestratigráficas, pedoestratigráficas e litodêmicas”. Ele empenha-se em definir uma unidade hidroestratigráfica que se aplica a todos os ambientes geológicos, baseando-se nas propriedades das rochas e sedimentos.

Embora as unidades hidroestratigráficas estejam definidas em termos de fluxo de água subterrânea, a feição controladora é geológica, conforme pode ser visualizado nas Figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6. Estes horizontes litoestratigráficos têm sido utilizados para definir a arquitetura dos aquíferos, como no caso do presente estudo do Sistema Aquífero Guarani.

Regional Hydrostratigraphy					
Period	Stratigraphy		Lithology		Hydraulic Behavior
Tertiary and Quaternary	Overburden		Till/Clay and Sand lenses		Aquitard
			Stratified Sediments		Aquifer/aquitard
Erosional Unconformity					
Cretaceous	Colorado Group		Shales with thin Sandstones		Aquitard
	Mannville Group	Grand Rapids Formation	Upper Sand	Interbedded Shale, Siltstone and Sandstone	Aquifer/aquitard
			Shale	Shale	Aquitard
			Lower Sand	Sandstone	Aquifer
	Mannville Group	Clearwater Formation	Clearwater shales	Shales with thin Sandstones	Aquifer/aquitard
			Wabiskaw Member	Sandstone	Aquifer
	McMurray Formation		Oil Sands	Water Sands	Aquifer/aquitard
Erosional Unconformity					
Devonian	Waterways Formation		Interbedded Shale and Limestone		Aquitard

Figura 5.3 Coluna hidroestratigráfica utilizando os termos tradicionais da hidroestratigrafia e sua correlação direta com a litologia (<http://www.longlake.ca/EIA/APPLICATION/vol 4/Appendix VI Hydrogeology.pdf>).

ERA	SYSTEM	ROCK STRATIGRAPHIC UNITS	HYDROSTRATIGRAPHIC UNITS
Cenozoic	Quaternary	Unconsolidated Sediments	High Plains & Alluvial Valley aquifers
	Tertiary	Ogalla Fm.	
Mesozoic	Cretaceous	Colorado Group	Upper Cretaceous aquitard
		Dakota Ss./Dakota Fm.	Upper Dakota aquifer
		Purgatoire Fm./Kiowa Fm..	Kiowa Shale aquitard
	Lower Dakota aquifer		
Jurassic/Triassic	Morrison Fm. Dockum Group	Morrison-Dockum aquifer	
Paleozoic	Permian/ Pennsylvanian	Permian Undiff	Permian-Pennsylvanian aquitard
		Cedar Hills Ss.	Cedar Hills Sandstone aquifer
		Permian/Pennsylvanian Undiff.	Permian-Pennsylvanian aquitard

The Morrison-Dockum is considered an aquifer only in southeastern Colorado and adjacent southwestern Kansas. Elsewhere in Kansas it is included in the Permian-Pennsylvanian aquitard.

Figura 5.4 Coluna hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Dakota e aquíferos associados (<http://www.kgs.ku.edu/Dakota/vol1/hydro/hydro02.htm>).

Era	Sistema	Série	Unidades Estratigráficas	Unidades Hidroestratigráficas	Características físicas	
Cenozóico	Quaternary	Holoceno e Pleistoceno	Alluvial deposits, valley-fill deposits and dune sand	High Plains aquifer	Cascalho, areia, silte e argila	
		Terciário	Superior		Mioceno	Ogallala Formation
	Anikaree Formation				Arenitos finos a muito finos. Camadas de poeira vulcânica, siltitos, argilitos e margas.	
	Inferior		Oligoceno		Brule Formation	White River Group
		Chadron Formation		Unidade confinante	Argilitos e siltitos	

Figura 5.5 Coluna hidroestratigráfica detalhada do *High Plains Aquifer* com a descrição sucinta das características litológicas (http://capp.water.usgs.gov/gwa/ch_c/peg/C067.jpeg).

Era	System	Series	Uinta Basin		Piceance Basin		San Juan Basin						
			Stratigraphic unit	Hydrostratigraphic unit	Stratigraphic unit	Hydrostratigraphic unit	Stratigraphic unit	Hydrostratigraphic unit					
Cenozoic	Tertiary	Pliocene											
		Miocene	Browns Park Formation	Not a principal aquifer									
			Bishop Conglomerate										
		Oligocene	Duchesne River Formation	Vinta Animas aquifer			Chuska Sandstone	Not a principal aquifer					
			Uinta Formation		Vinta Formation								
		Eocene	Wasatch Formation	Parachuto Crook Member	Green River Formation	Green River Formation	Parachuto Crook Member	Vinta Animas aquifer	San Jose Formation	Vinta Animas aquifer			
				Garden Gulch Member							Douglas Creek Member	Anvil Points Member	
				Renegade Tongue									Vinta Animas aquifer
				Douglas Creek Member									
				Main body									
		Paleocene	Green River Formation	Flagstaff Member	Wasatch Formation	Fort Union Formation	Not a principal aquifer	Nacimiento Formation	Animas Formation	Vinta Animas aquifer			
Mesozoic	Cretaceous	Upper	North Horn Formation				Ojo Alamo Sandstone						
			Mesaverde Group	Mesaverde aquifer	Mesaverde Group	Mesaverde aquifer	Kirtland Shale	Confining unit					
						Fruitland Formation	Not a principal aquifer						
						Picture Cliffs Sandstone							
						Lewis Shale	Confining unit						
						Mesaverde aquifer	Mesaverde aquifer						

Figura 5.6 Conjunto de colunas hidroestratigráficas mostrando grandes variações na localização das unidades Hidroestratigráficas em bacias geológicas contíguas do Colorado Plateau. (http://capp.water.usgs.gov/gwa/ch_c/peg/C109.jpeg).

5.3 Zonas aquíferas, aquíferos e sistemas aquíferos.

Partindo das menores para as maiores áreas, os termos usados para classificar rochas produtoras de água são zona, aquífero e sistema aquífero (Laney & Davidson, 1986). Os termos são propositalmente vagos (Freeze e Cherry, 1979) e também suficientemente flexíveis para compreender uma variedade de ambientes e escalas hidrogeológicas, contemplando as necessidades do projeto, conforme afirma Jorgensen (1982) em um editorial intitulado “*Aquifer Names*”, publicado em *Proceedings of the First C.V. Theis Conference*. Ainda nesse editorial ele argumenta que a falta de uma nomenclatura completa cria noções falsas, que podem levar a interpretações hidrológicas errôneas ou despropositadas.

A nomenclatura complica-se quando se designa fontes de água subterrânea usando nomes de formações ao invés de nomes hidroestratigráficos, o qual implicaria que: (1) a unidade inteira atua como um aquífero; (2) não existe conexão hidráulica entre unidades permeáveis adjacentes (MacFarlane *et al.*, 2000).

Uma **zona** é usada para separar um segmento de um aquífero com características hidrológicas particulares e que não são típicas de todo o aquífero, p. ex., uma subunidade altamente permeável de um aquífero regional, que pode ser delimitada em uma área cobrindo dezenas a centenas de quilômetros quadrados, constituiria uma zona.

Um **aquífero**, como definido por Lohman *et al.* (1972), corresponde a “*uma formação, grupo de formações ou uma parte de uma formação que contém suficiente material permeável para ceder significantes quantidades de água para poços e fontes*”. Fetter (1994) supõe que, para ser um aquífero, uma unidade rochosa deveria ter uma permeabilidade intrínseca mínima de 0,01 darcy, ou uma condutividade hidráulica aproximada de 0,03 pés/dia.

Para maiores áreas, um **sistema aquífero** foi originalmente definido por Poland *et al.* (1972) como “*um corpo heterogêneo de materiais com intercalações permeáveis e pobremente permeáveis que funcionam como uma unidade hidroestratigráfica produtora de água; ele compreende duas ou mais camadas permeáveis, separadas ao menos localmente por aquíferos que impedem o movimento das águas subterrâneas, mas que não afetam a continuidade hidráulica do sistema*”. A unidade confinante foi definida como equivalente aos termos aquífero e aquíclode e tem sido usada nos relatórios do *U.S. Geological Survey* desde 1972. Laney & Davidson (1986) sugerem que a definição de sistemas aquíferos poderia ser mais geral se o termo “ aquíferos” fosse substituído pelo termo “camadas permeáveis”. Para Jorgensen *et al.*

(1993), um **sistema aquífero** pode ser descrito como consistindo de “dois ou mais aquíferos no mesmo sistema hidráulico, os quais estão separados na maioria dos locais por uma ou mais unidades confinantes”. Sistemas aquíferos e unidades hidroestratigráficas que os compõem, em diversas bacias geológicas e localidades, podem se vistas nas colunas hidroestratigráficas das Figuras 5.7 e 5.8. Do mesmo modo, eles definem um **sistema confinante** como “duas ou mais unidades de confinamento, separadas na maioria dos locais por um ou mais aquíferos que não estão no mesmo sistema hidráulico”.

Era	System	Series	Basins						Hydrostratigraphic units		
			San Juan Basin	Four Corners platform	Black Mesa Basin	Kaiparowits Basin	Henry Mountains Basin and San Rafael Swell	Uimta Basin		Northern Paradox Basin and Uncompahgre Uplift	Piceance Basin
Cretaceous	Upper	Lower	Mancos Shale	Mancos Shale	Mancos Shale	Tropic Shale	Mancos Shale	East Mancos Shale	Mancos Shale	Mancos Shale	Mancos confining unit
			Dakota Sandstone	Dakota Sandstone	Dakota Sandstone	Dakota Sandstone	Dakota Sandstone	Dakota Sandstone	Dakota Sandstone	Dakota Sandstone	Dakota Sandstone
Jurassic	Upper	Middle	Brushy Basin Member	Brushy Basin Member	Brushy Basin Member	Brushy Basin Member	Brushy Basin Member	Brushy Basin Member	Brushy Basin Member	Brushy Basin Member	Morrison confining unit
			Morrison Formation	Morrison Formation	Morrison Formation	Morrison Formation	Morrison Formation	Morrison Formation	Morrison Formation	Morrison Formation	Morrison Formation
Triassic	Upper	Middle	Wanakah Formation	Wanakah Formation	Wanakah Formation	Romana Sandstone	Summerville Formation	Stump Formation	Wanakah Formation	Wanakah Formation	Curtis-Stump confining unit
			Entrada Sandstone	Entrada Sandstone	Entrada Sandstone	Entrada Sandstone	Entrada Sandstone	Entrada Sandstone	Entrada Sandstone	Entrada Sandstone	Entrada Sandstone
Triassic	Lower	Lower	Chinle Formation	Chinle Formation	Chinle Formation	Chinle Formation	Chinle Formation	Chinle Formation	Chinle Formation	Chinle Formation	Carmel-Twin Creek confining unit
			Moenkopi Formation	Moenkopi Formation	Moenkopi Formation	Moenkopi Formation	Moenkopi Formation	Moenkopi Formation	Moenkopi Formation	Moenkopi Formation	Moenkopi Formation

1 - Cow Springs Sandstone 3 - Wingate Sandstone
 2 - Junction Creek Sandstone 4 - Dolores Formation

Figura 5.7 Sequência hidroestratigráfica composta para várias bacias do Sistema Dakota-Glen Canyon (http://capp.water.usgs.gov/gw/ach_c/jpeg/C121.jpeg).

Era	System	Series	E. Las Animas & W. Baca Co., Colorado	Central & E. Baca Co., Colorado	West-central & southwestern Kansas	Central Kansas	Hydrostratigraphy
Cenozoic	Quaternary	Pleistocene	Dune sand and loess	Dune sand, loess, and alluvium	Dune sand, loess, and alluvium	Dune sand, loess, and alluvium	High Plains and Alluvial Valley Aquifers
	Tertiary	Miocene-Pliocene	Ogallala Fm.	Ogallala Fm.	Ogallala Fm.	Ogallala Fm.	
Mesozoic	Cretaceous	Upper	Colorado Group	Colorado Group	Colorado Group	Colorado Group	Upper Cretaceous Aquitard
		Lower	Dakota Ss.	Dakota Ss.	Dakota Formation	Dakota Formation	Upper
			Purgatoire Fm. / Kiowa Sh. Mbr. / Cheyenne Ss. Mbr.	Purgatoire Fm. / Kiowa Sh. Mbr. / Cheyenne Ss. Mbr.	Kiowa Fm. / Longford Mbr.	Kiowa Fm. / Longford Mbr.	Kiowa Shale Aquitard
	Jurassic	Upper	Morrison Fm.	Morrison Fm.	Morrison Fm.		Morrison-Dockum Aquifer
	Triassic	Upper	Dockum Group	Dockum Group			
	Paleozoic	Permian	Upper	Lykins Fm.	Upper Permian Series	Upper Permian Series	Upper Permian Series
Lower			Dog Creek Sh. / Blaide Fm. / Flower-pot Sh.		Dog Creek Sh. / Blaide Fm. / Flower-pot Sh. / Cedar Hills Ss.	Blaine Fm. / Flower-pot Sh.	Upper Evaporite Aquitard
			Lyons Ss.	Cedar Hills Ss. / Salt Plain Fm. / Harper Ss.	Salt Plain Fm. / Harper Ss.	Cedar Hills Ss. / Salt Plain Fm. / Harper Ss.	Permian Ss. Aquitard
Pennsylvanian		Lower	Fountain Fm.	Summer Gp.	Summer Gp.	Summer Gp.	Lower Evaporite Aquitard
				Chase Gp. / Council Grove Gp. / Admire Gp.	Chase Gp. / Council Grove Gp. / Admire Gp.	Chase Gp. / Council Grove Gp. / Admire Gp.	
Mississippian & Cambro-ordovician			Undifferentiated Mississippian, Viola, & Arbuckle Gp.	Not present in shallow subsurface			Deep Carbonate Aquifer
Precambrian	Precambrian	Las Animas Fm. & Granitic Rocks				Precambrian Basement	

Figura 5.8 Seqüências hidroestratigráficas compostas do High Plains e Dakota aquifer para vários locais nos estados de Kansas e Colorado (EUA) (<http://www.kgs.ku.edu/Dakota/vol3/fy92/rep08.htm>).

5.4 Formação hidrogeológica, grupo hidrogeológico e sistemas hidrogeológicos

Unidades hidrogeológicas funcionam ora como camadas portadoras de água ora como retardadoras do fluxo para os estratos adjacentes. A classificação hierárquica de Tóth (1978) para tais aquíferos ou unidades

confinantes é baseada em sua condutividade hidráulica, extensão regional e litoestratigrafia. A **formação hidrogeológica** corresponde aproximadamente aos limites das unidades litoestratigráficas convencionais.

Duas ou mais formações que funcionam como um complexo que pode tanto conduzir ou retardar o fluxo de água é combinado para formar um **grupo hidrogeológico**.

As unidades de terceira ordem ou mais extensas são os denominados **sistemas hidrogeológicos**, os quais são diferenciados dos anteriores pela “coerência de seu fluxo e sistema de pressão em vez dos parâmetros das rochas”.

5.5 Níveis de identificação de entidades hidrogeológicas

Três níveis de identificação de objetos ou entidades hidrogeológicas, com objetivos diferentes são deduzidos para o referencial hidrogeológico francês BD RHF (Petit *et al.*, 2003). Eles correspondem a escalas de visualização cartográficas diferente:

- Nível nacional NV1

Este nível permite uma descrição nacional, essencialmente descritiva de grandes conjuntos hidrogeológicos (sistema e domínio), quanto à importância dos critérios físicos – superfície, condutividade hidráulica, etc. – e/ou no que concerne a recurso quantitativo apreciável para o nível nacional. A gama de escala de utilização varia de 1:500.000 a 1:1.000.000. O Sistema Aquífero Guarani é um conjunto hidrogeológico de nível nacional, aplicando-se o critério de nível nacional para um país das dimensões da França, adaptando-o para a área do Estado ou mesmo a do país.

- Nível regional NV2

Este nível deve permitir uma representação regional das entidades hidrogeológicas (sistema e domínio) a uma escala média de 1:250.000, segundo os dois critérios seguintes:

- importância regional de entidades hidrogeológicas com relação a seu meio;

- entradas quantitativas e qualitativas das entidades.

A escala de utilização varia de 1:500.000 a 1:150.000. Este nível corresponde a departamentos regionais na França e equivale a áreas iguais ou menores que o Estado do Rio Grande do Sul.

- Nível local NV3

Este nível é a representação mais detalhada do referencial (1:50.000). Ele identifica o conjunto de unidades conhecidas, apoiando-se sobre os dois níveis precedentes, os completando em algumas áreas, pela identificação de unidades aquíferas locais. O objetivo é fornecer através das estruturas locais, um avanço no conhecimento do meio subterrâneo

A escala de utilização varia de 1:50.000 a 1:150.000.

5.6 Conceito de entidade hidrogeológica

Uma **entidade hidrogeológica** é uma parte do espaço geológico, aquífero ou não aquífero, correspondente a um sistema físico caracterizado quanto a sua idade e seu comportamento hidrogeológico (Petit *et al.*, 2003).

As entidades hidrogeológicas são distinguidas:

- com relação a três níveis;
- com relação ao seu potencial aquífero.

Elas são em número de sete: grande sistema aquífero, sistema aquífero, grande domínio hidrogeológico, domínio hidrogeológico, unidade aquífera, unidade semipermeável e unidade impermeável conforme pode ser visualizado no Quadro 5.1.

A definição das entidades hidrogeológicas é consequência do conhecimento, em um dado instante, do meio subterrâneo. O conjunto da área estudada é fragmentado em entidades hidrogeológicas, mantendo uma continuidade horizontal e vertical das entidades em nível nacional e regional.

Nível NV1 ou nível nacional Exemplo de Entidade	Nível NV2 ou nível regional Exemplo de Entidade	Nível NV3 ou nível local Exemplo de Entidade
Grande Sistema Aqüífero Guarani	Sistema Aqüífero Botucatu/Pirambóia	Unidade Aqüífera Guará
		Unidade Semipermeável Sanga do Cabral
Grande Domínio Hidrogeológico Planalto Basáltico	Domínio Hidrogeológico Cuesta Basáltica	Unidade Impermeável Alemoa

Quadro 5.1 Classificação das entidades hidrogeológicas segundo seus níveis de amplitude, com exemplos relacionados ao SAG (modificado de Petit *et al.* 2003).

5.7 Natureza das entidades hidrogeológicas

O grande sistema aqüífero

O grande sistema aqüífero é um sistema físico composto por uma ou mais unidades aqüíferas, globalmente em conexão hidráulica e que é circunscrito por limites litoestratigráficos e/ou estruturais. O grande sistema hidrogeológico é uma entidade de nível nacional NV1.

O grande domínio hidrogeológico

O grande domínio hidrogeológico é um campo espacial de referência que pode comportar terrenos diversos, tanto do ponto de vista da litologia quanto da estratigrafia, e que poderá no futuro estar individualizado em sistemas aqüíferos, em função do melhor conhecimento hidrogeológico.

O grande domínio hidrogeológico é uma entidade de nível nacional NV1.

O domínio hidrogeológico

O domínio hidrogeológico é uma entidade hidrogeológica correspondente a uma área menor dentro do grande domínio hidrogeológico ou do grande sistema aquífero. A subdivisão se efetua através de pelo menos um dos critérios seguintes: litologia, estrutura, estratigrafia, potenciometria, geoquímica e hidráulica.

O domínio hidrogeológico é uma entidade de nível regional NV2.

O sistema aquífero

O sistema aquífero é uma entidade hidrogeológica aquífera correspondente a uma subdivisão vertical ou horizontal de um grande sistema aquífero ou de um grande domínio hidrogeológico. A subdivisão também se efetua a partir de pelo menos um dos critérios seguintes: litologia, estrutura, estratigrafia, potenciometria, geoquímica e hidráulica. A constituição corresponde ao conhecimento do meio subterrâneo em determinada época.

O sistema aquífero é uma entidade de nível regional NV2.

A unidade aquífera

A unidade aquífera é um sistema físico elementar, apresentando condições hidrodinâmicas homogêneas, suficientemente condutora para permitir a circulação de água subterrânea. Uma unidade aquífera é uma unidade hidrogeológica de nível local, apresentando uma condutividade hidráulica média superior a 10^{-6} m/s e reservas em água suficientes para a sua captação.

Uma unidade aquífera é uma entidade de nível local NV3 e ela corresponde à descrição mais detalhada de entidades hidrogeológicas para o referencial nacional.

A unidade semipermeável

Uma unidade semipermeável é uma entidade hidrogeológica de nível local NV3, apresentando uma permeabilidade média compreendida entre 10^{-9} e 10^{-6} m/s e reservas de água subterrânea com produtividade insuficiente para ser captada através de poços.

A unidade impermeável

A unidade impermeável é um sistema físico elementar apresentando uma fraca circulação de água. Sua condutividade hidráulica média é sempre inferior a 10^{-9} m/s. Esta entidade é definida como um meio teoricamente impenetrável e não suscetível de ser atravessada por um fluido e na prática não deixa passar nenhum fluxo significativo sob um dado gradiente de potencial hidráulico. A unidade impermeável é uma entidade local de nível NV3.

5.8 Conceito de províncias hidrogeológicas e aquíferas

Segundo Hausmann (1995), considera-se como **Província Hidrogeológica** a “área que apresenta em toda a sua extensão aspectos semelhantes no que diz respeito às condições de captação e ocorrência das águas subterrâneas”. Estão incluídos neste conceito, vários aquíferos que apresentam condições de jazimento e estrutura, aliam-se para possibilitar a sua captação. Esta classificação leva em consideração as características geológicas, morfológicas e climáticas, entendendo-se que a ocorrência e comportamento das águas subterrâneas são essencialmente reflexos delas. Uma das formas de cartografar aquíferos, as províncias hidrogeológicas representam a sua distribuição geográfica baseada em províncias litológicas e geomorfológicas, como pode ser visualizada na Figura 5.9.

PROVÍNCIAS HIDROGEOLÓGICAS DO RIO GRANDE DO SUL	
Províncias	Sub - Províncias
Sedimentar Litorânea	Oceânica
	Lagunar Externa
	Lagunar Interna Norte
	Lagunar Interna Sul
	Itapuã
	Guaíba
Sedimentar Gondwânica	Botucatu Oeste
	Botucatu Leste
	Rosário
	Permo-Carbonífero
Basáltica	Cuesta
	Planalto
	Borda do Planalto
Escudo	Cretáceo - Paleozóico
	Cristalino

Figura 5.9 Províncias hidrogeológicas do Rio Grande do Sul (Hausmann, 1995).

Ainda segundo este autor, ela se distingue da **Província Aqüífera** que é “formada por um conjunto de áreas que apresentam aqüíferos de natureza semelhante quanto ao jazimento, estrutura e litologia”.

5.9 Nomenclatura: diretrizes propostas por Laney & Davidson (1986)

As diretrizes para nomear unidades de sistemas aqüíferos foram propostas pelo *U.S. Geological Survey* (Laney & Davidson, 1986). Estas propostas resultam de discussões informais entre hidrólogos e hidrogeólogos da *Water Resources Division* e representam um consenso.

Elas sugerem dois caminhos, no que concerne à denominação de unidades aqüíferas. O caminho mais simples é deixar as unidades aqüíferas sem denominação formal, para evitar a desnecessária criação de novos nomes de aqüíferos. A não denominação de aqüíferos é apropriada em áreas onde não existem unidades litoestratigráficas definidas formalmente ou onde a hidrogeologia é quase desconhecida. Machado (1997) utilizou esta linha de procedimento para definir as unidades aqüíferas na Folha Hidrogeológica de Porto Alegre - RS, onde não apresentou denominação formal baseada na litoestratigrafia.

Laney & Davidson (1986) sugerem também que os aqüíferos devem ter seu nome baseado em denominações litológicas, litoestratigráficas ou mesmo geográficas. Nomes associados a litologias são mais vantajosos onde não existem unidades litoestratigráficas formalmente reconhecidas na região estudada. Nomes baseados na litoestratigrafia são mais apropriados para aqüíferos que tenham extensão regional ou mesmo continental, como é o caso do Aqüífero Botucatu, Grupo São Bento da Bacia do Paraná. Nomes geográficos para a denominação de aqüíferos devem ser utilizados onde um nome litoestratigráfico ou mesmo um conjunto litoestratigráfico não é apropriado para definir o sistema aqüífero, como acontece com o *Great Plains Aquifer System* nos EUA.

Ainda segundo Laney & Davidson, não são recomendáveis nomes de aqüíferos ou sistemas aqüíferos baseados em: nomes cronoestratigráficos, nomes baseados somente em posição relativa, designação alfanumérica para

layers de modelos, ambientes deposicionais, profundidade de ocorrência, acrônimos, e por fim, condições hidrológicas, tais como confinados ou livres. Na coluna hidroestratigráfica da Figura 5.10, tem-se um bom exemplo de mescla de diferentes nomenclaturas para os sistemas aquíferos, que são denominados de acordo com a litologia, a litoestratigrafia e a cronoestratigrafia, dificultando sua interpretação.

Graphic log	Rock unit	Wisconsin	Illinois	
	Pleistocene	Glacial deposits	Glacial deposits	
	Silurian	Dolomite aquifer	Shallow dolomite aquifer	
	Maquoketa	Aquiclude		
	Ordovician	Sandstone aquifer	Cambrian-Ordovician aquifer	
				Galena-Platteville
				St. Peter
				Prairie du Chien
				Trempealeau
				Franconia
	Cambrian	Aquiclude	Mt. Simon aquifer	
				Galesville
				Eau Claire
	Mt. Simon			

Figura 5.10 Sistemas aquíferos denominados segundo a litologia, litoestratigrafia e cronoestratigrafia em uma coluna hidroestratigráfica para os estados de Illinois e Wisconsin (EUA) (Fetter, 1980).

5.10 Discussão sobre o delineamento das unidades hidroestratigráficas e sistemas aquíferos

Neste trabalho adota-se a definição de unidade hidroestratigráfica como um conjunto de camadas de sedimentos ou rochas de qualquer natureza, caracterizada por sua porosidade e permeabilidade. Adiciona-se a essa definição as condições de fluxo de água subterrânea que podem ser distintas tanto em condições naturais ou de bombeamento. Assim, uma unidade hidroestratigráfica pode ser distinguida de outras através do padrão de fluxo, incorporando os dois conceitos emitidos por Maxey (1964) e Seaber (1988), que são complementares do ponto de vista hidrogeológico.

Desse modo, considera-se que uma unidade hidroestratigráfica não é restrita a ambiente geológico particular, o que mais se aproxima das idéias de Seaber (1988), mas também baseia-se nas propriedades do fluxo de água subterrânea, mais de acordo com a definição de Maxey (1964). Na tese, consideramos um sistema aquífero sendo composto por uma ou mais unidades hidroestratigráficas. Aquíferos ou aquíclides espessos podem ser definidos como unidades hidroestratigráficas de acordo com suas distintas características de fluxo de água subterrânea. Aquíferos e aquíclides pouco espessos, que formem camadas contínuas lateralmente significantes, que limitam comunicação hidráulica, podem ser elementos importantes para definir limites de unidades hidroestratigráficas.

Apesar de serem coerentes os conceitos emitidos por Maxey (1964) e Seaber (1988), quando transportados para as definições hidroestratigráficas no SAG, deve-se levar em consideração as dimensões regionais, nacionais e internacionais que o mesmo possui, o que contraria em parte a afirmação de Maxey (1964) de que essas unidades seriam independentes da escala.

Nessas conceituações de unidades hidroestratigráficas verifica-se que não existem menções ao efeito escala sobre as referidas unidades. No entanto, constata-se que pelas heterogeneidades litológicas e arquiteturas que elas podem apresentar, existe uma componente dimensional no delineamento dessas unidades hidroestratigráficas. A delimitação de unidades em uma aluvião heterogêneo na escala de trabalho 1:2.000 ou 1:5.000, levará a

conclusões diferentes daquelas para a escala de 1:100.000, quando ele então se comportaria como uma única unidade hidroestratigráfica.

Embora no delineamento das unidades hidroestratigráficas ainda sejam usados nomes ligados a unidades litoestratigráficas, o que em alguns casos pode resultar em um sucesso limitado, devido ao conhecimento geológico atual e a escala de estudo regional (1:1.000.000) do SAG, esta é a proposta utilizada nesta tese. Ela tem como um das suas metas principais a definição do arcabouço hidroestratigráfico, que é primordialmente uma revisão da nomenclatura hidrogeológica do SAG.

Por suas dimensões continentais, o SAG não pode cumprir uma exigência fundamental dos sistemas aquíferos, que seria uma continuidade hidráulica das unidades hidroestratigráficas que o compõem. Desse modo, como já existe uma designação informal para todo o conjunto litológico e litoestratigráfico que compreende desde os Grupos Rosário do Sul e São Bento no Brasil, Formações Tacuarembó, Misiones, San Cristóbal, Buena Vista, etc, nos países limítrofes onde ocorrem, a designação proposta por Petit *et al.* (2003) de Grande Sistema Aquífero, é a mais apropriada, tendo em vista o SAG ser composto por vários sistemas aquíferos. As denominações para estes outros sistemas aquíferos deverão seguir a proposta apresentada por Laney & Davidson (1986), pelo fato de existirem designações litoestratigráficas definidas formalmente.

6 ELEMENTOS ESTRUTURAIS CONDICIONANTES DO SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI NO RIO GRANDE DO SUL

6.1 A estruturação tectônica do Sistema Aqüífero Guarani na Bacia do Paraná – uma síntese

A evolução estrutural do SAG está intimamente relacionada com a da Bacia do Paraná. O embasamento desta Bacia data da criação do Supercontinente Gondwana com a Orogenia Pan-Africana ou Ciclo Brasileiro, um evento tectono-magmático com colisão de muitas placas e micropalacas.

De acordo com Zalán *et al.* (1991), durante o Paleozóico, três seqüências sedimentares transgressivo-regressivas foram depositadas fortemente influenciadas por zonas de fraqueza, instaladas nas rochas do embasamento. Essas zonas de fraqueza, geralmente alinhadas segundo as direções dominantes NE e NW, freqüentemente foram reativadas. Uma síntese da localização das principais estruturas compiladas da bibliografia pode ser visualizada na Figura 6.1.

Duas outras seqüências foram depositadas durante o Mesozóico: uma seqüência sedimentar e uma seqüência vulcânica. Foram influenciadas pela separação dos continentes e nesta época um terceiro elemento estrutural foi criado, com direção E-W.

6.1.1 Falhas e lineamentos

As zonas de falhamentos NW-SE são correlacionadas por Fúlfaro *et al.* (1982) a aulacógenos pré-Silurianos de uma fase rift que afetou o embasamento. Esses aulacógenos formam locais preferenciais de deposição e são caracterizados pela grande espessura dos depósitos sedimentares. São detectados em superfície pelos alinhamentos associados com sua direção. A origem dos lineamentos noroeste ainda não está muito clara, as evidências, entretanto, apontam que esses lineamentos são provavelmente mais velhos que os lineamentos de direção nordeste de idade Brasileira.

Segundo Zalán *et al.* (1991) as falhas de direção NW são mais abertas do que as de direção NE e são abundantemente intrudidas por diques de diabásio. Essas intrusões podem imprimir grande deformação. As falhas NW apresentam aberturas irregulares, mostrando alargamentos e estreitamentos, ao contrário das aberturas relativamente constantes das falhas NE.

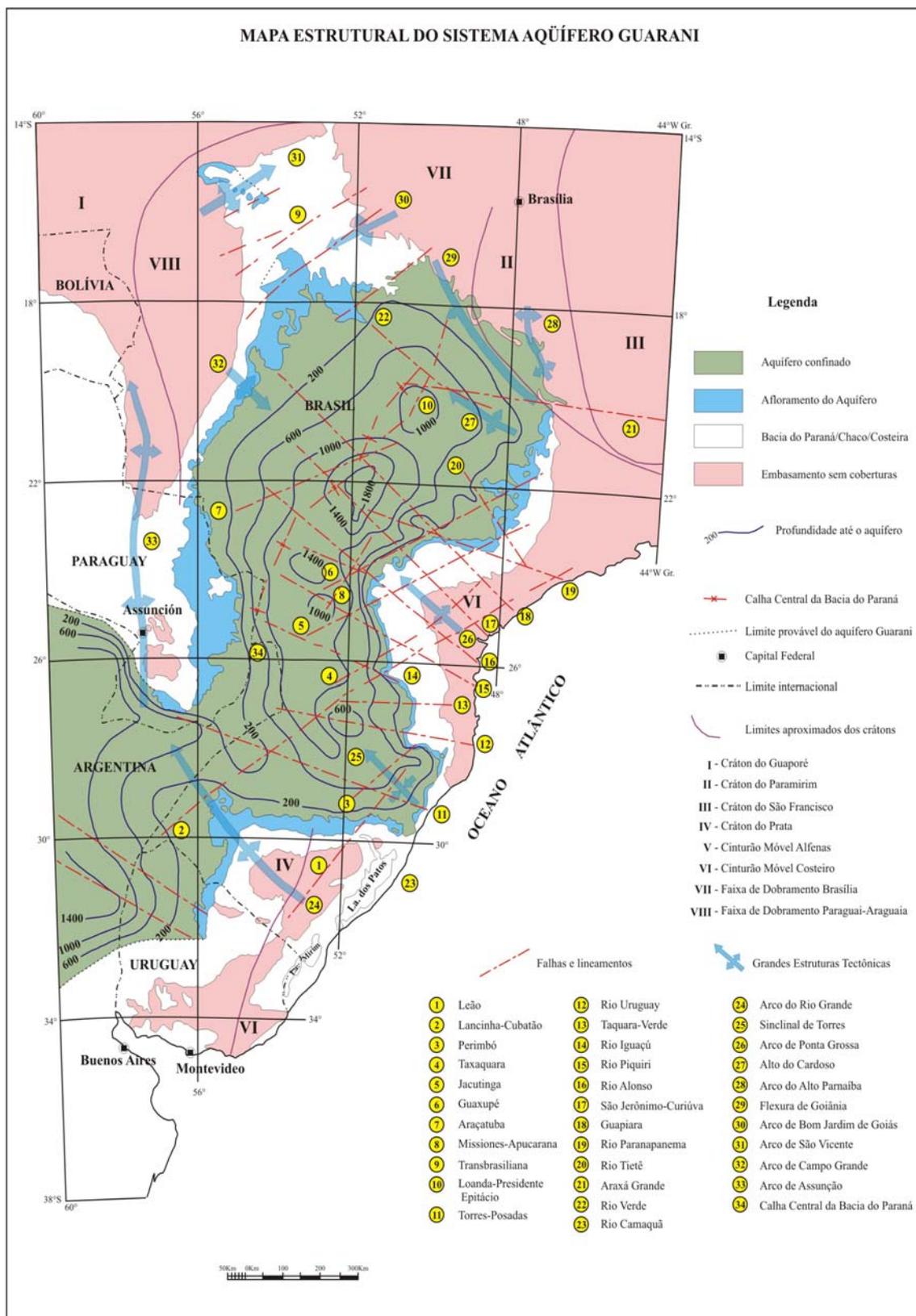


Figura 6.1 Mapa Estrutural do SAG no contexto do Cone Sul modificado de Araújo *et al.*, 1999, Paulipetro (1982) e Zalán *et al.* (1986).

Ainda segundo Zalán *et al.* (1991), os lineamentos de direção E-W originados no Triássico são provavelmente relacionados com a abertura do Oceano Atlântico. Até agora não foram encontradas deformações associadas a essas estruturas.

Vários trabalhos tanto em nível de pesquisa local como de caráter regional têm dado grande atenção ao contexto tectônico que controlou a sedimentação da Bacia do Paraná e por extensão as litologias que constituem o SAG e que correspondem aos seus últimos estágios de deposição.

Soares *et al.* (1982) através de um levantamento sistemático de lineamentos em imagens LANDSAT e de RADAR mostram que os lineamentos designados de Médio Ivaí, com direção $N45^{\circ} \pm 5^{\circ}W$, são os mais freqüentes alcançando uma porcentagem de 30% em relação às outras direções.

A “Linha Tectônica Torres-Posadas” foi proposta por Leinz (1949), segundo uma linha imaginária que une as cidades de Torres (BR) e Posadas (AR), com um rumo em torno de $N50^{\circ} - 70^{\circ}W$. Segundo o autor a estrutura prolonga-se para o Oceano Atlântico e seria o duto de extrusão das lavas da Formação Serra Geral, que admitiria possuir mais de 1000 metros de espessura entre o norte do Rio Grande do Sul e o sul de Santa Catarina”.

6.1.2 Arcos

Sanford & Lange (1960) lançam a denominação de “Sinclinal de Torres” definindo-a com um *trend* NW, situado na depressão entre os Arcos de Rio Grande e Ponta Grossa. Northfleet *et al.* (1969) concluem que a Sinclinal de Torres só começa a ser notada nos mapas de isópacas da Formação Rio do Rasto, tratando-se, portanto, de um evento bastante novo na história da bacia conforme pode ser visualizada na Figura 6.2, extraída de Fúlfaro *et al.* (1982).

Entre os principais arcos crustais que influenciaram na deposição das litologias do SAG temos: o Arco de Assunção, o Arco de Ponta Grossa e o Arco de Rio Grande.

Na porção oeste da Bacia do Paraná, a partir do Mato Grosso do Sul em direção N-S passando pelo Paraguai e atingindo a Argentina, existe uma importante estrutura representada pelo Arco de Assunção. Segundo Zalán *et al.* (1991), representa uma estrutura flexural originada no Devoniano, com várias reativações durante o Paleozóico e Mesozóico. Devido à presença do

Arco de Assunção, o SAG é ligeiramente assimétrico, com mergulhos na borda oeste variando entre 1° e 4° enquanto na porção leste varia entre $0,5^\circ$ e 1° .

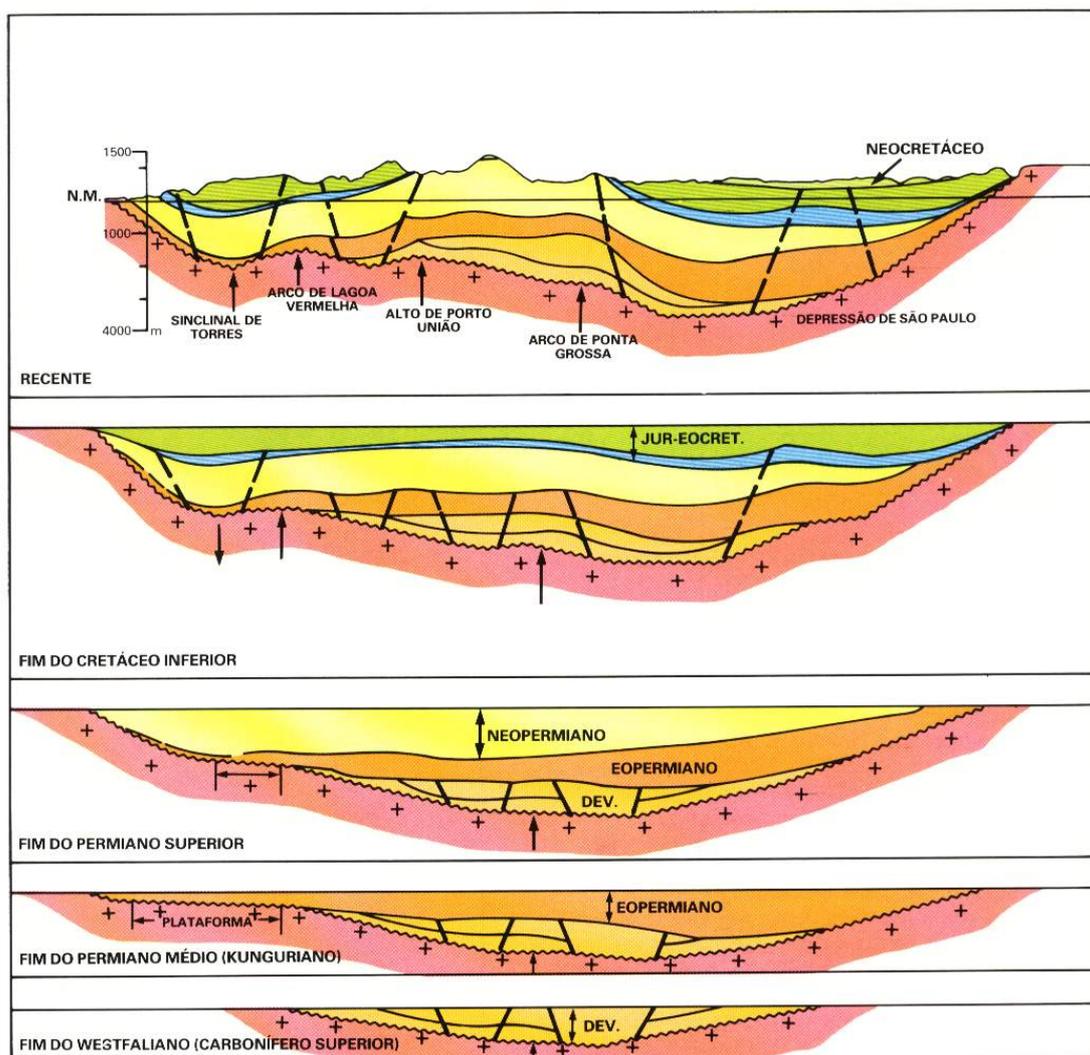


Figura 6.2 Evolução estrutural do SAG e seu contexto na Bacia do Paraná. (Fúlfaró *et al.*, 1982).

Os Arcos de Ponta Grossa e Rio Grande, de direção noroeste, originam duas grandes reentrâncias semi-elípticas na margem leste da bacia e que apresentam igual configuração no SAG. Esses arcos constituem sítios preferenciais para a ocorrência de enxame de diques e outras intrusões ígneas e alcalinas.

O Arco de Rio Grande (Sanford & Lange, 1960) originado no Paleozóico teve sua forma atual transformada durante o Mesozóico. Segundo Almeida (1986) ele possui um eixo de arqueamento NW e intersecciona muitas

estruturas NE de seu embasamento. A orientação similar desses arcos (NW) reflete um controle tectônico de zonas de fraqueza antigas, sendo esse um dos *trends* estruturais mais importantes da bacia (Zalán *et al.*, 1991).

O Arco de Goiânia/Alto Paranaíba encontra-se no limite da borda norte e também possui diques de diabásio em profundidade, além de kimberlitos.

Devido a um evento tectônico relacionado com a Serra do Mar, que iniciou no Cretáceo com muitas recorrências no Terciário, a costa sul foi elevada apresentando cotas variando entre 800 –1200 metros, decrescendo novamente em direção oeste e noroeste (Zalán *et al.*, 1991).

6.2 Considerações preliminares sobre a proposição de compartimentação do SAG no RS

Embora muitos trabalhos tenham visado o estudo do SAG no estado (mais propriamente os aquíferos correspondentes à Formação Botucatu e ao Grupo Rosário do Sul de maneira independente), o único mapa que apresenta o contorno estrutural do topo deste sistema deve-se a Araújo *et al.* (1995), no qual para ele sugerem o nome de Aquífero Gigante do Mercosul. Por esse mapa, apesar da pequena escala de apresentação (1:5.000.000), tem-se a idéia de um aquífero homogêneo. Essa mesma concepção permaneceu no Mapa Hidrogeológico do Aquífero Guarani de Campos (2000), devido à escala utilizada. As primeiras informações sobre as heterogeneidades tanto estratigráficas como estruturais relacionadas com as formações aquíferas que compõem o grande SAG são devidas a Hausmann (1965, 1966) e são ampliadas por Hausmann (1995).

A atual estruturação do SAG está condicionada aos eventos tectônicos que afetaram as formações geológicas no estado, do escudo pré-cambriano aos derrames basálticos, tendo o sistema aquífero se estruturado de acordo com as sucessivas reativações que ocorreram principalmente do final do Permiano até o Cretáceo, como pode ser visualizado nos mapas que apresentam os efeitos desses sistemas de falhas no arcabouço hidroestratigráfico, tanto no Rio Grande do Sul, quanto no Estado de Santa Catarina, na região do Domo de Lages (Figuras 6.3, 6.4 e 6.5).

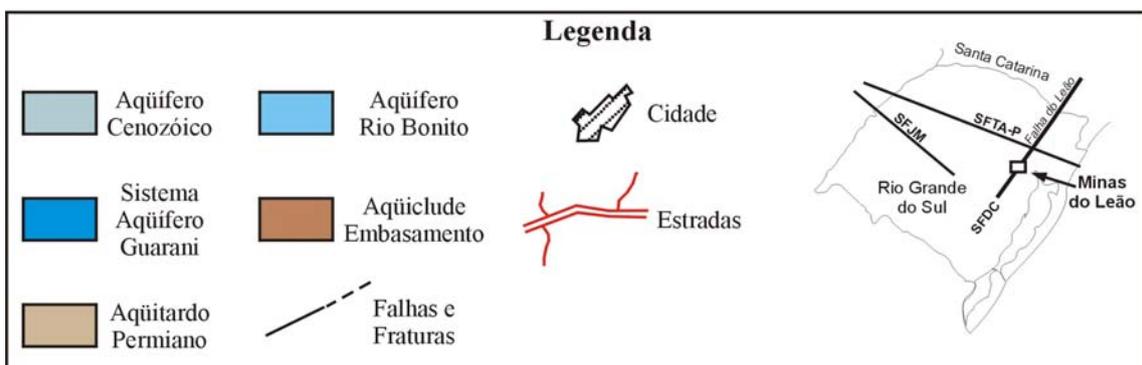
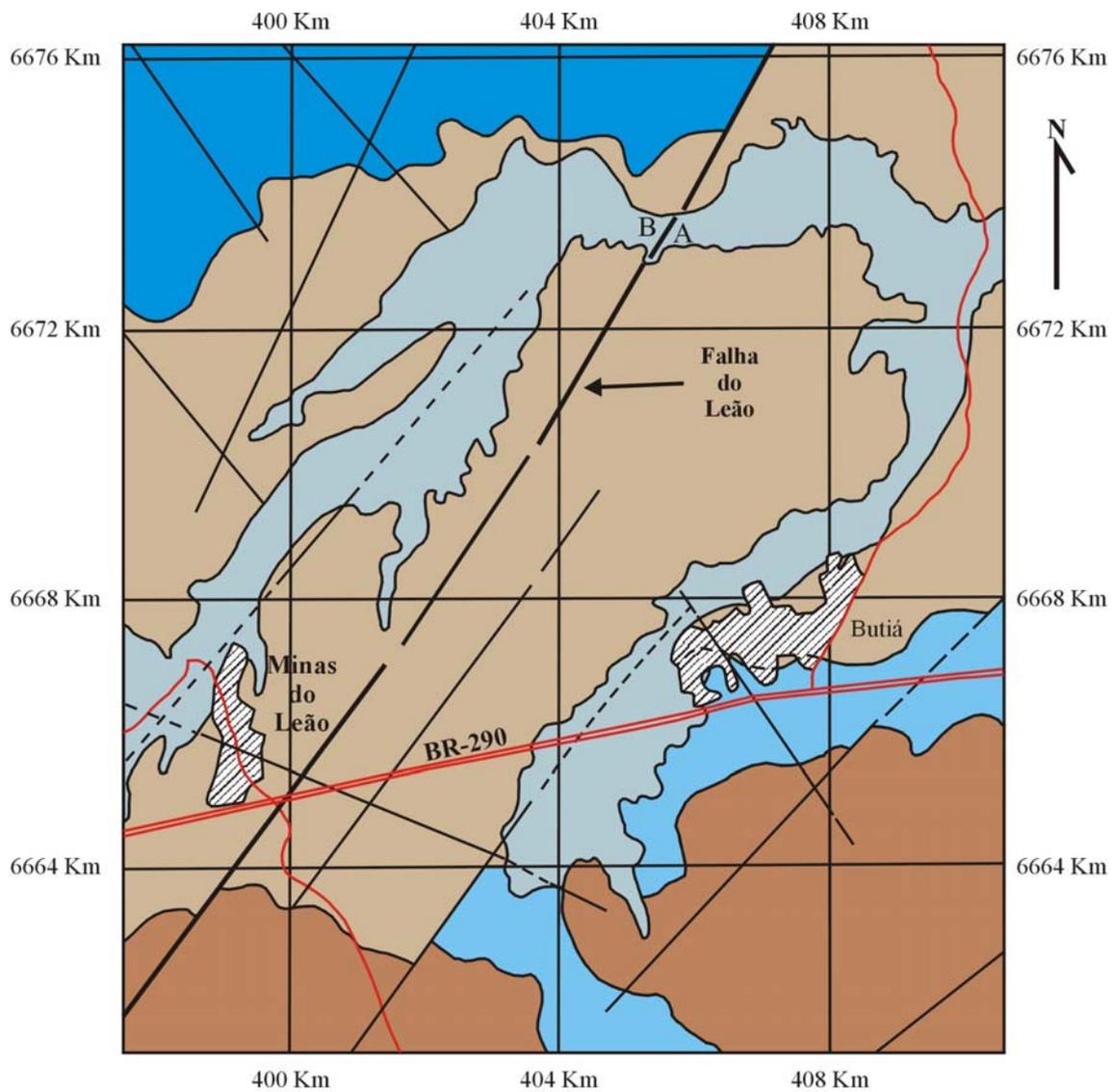


Figura 6.3 Mapa da região de Minas do Leão, com a localização da Falha do Leão e a base do SAG, modificado de Aboarrage & Lopes (1986).

Mapa do Sistema Aquífero Guarani na região do Domo de Lages (SC)

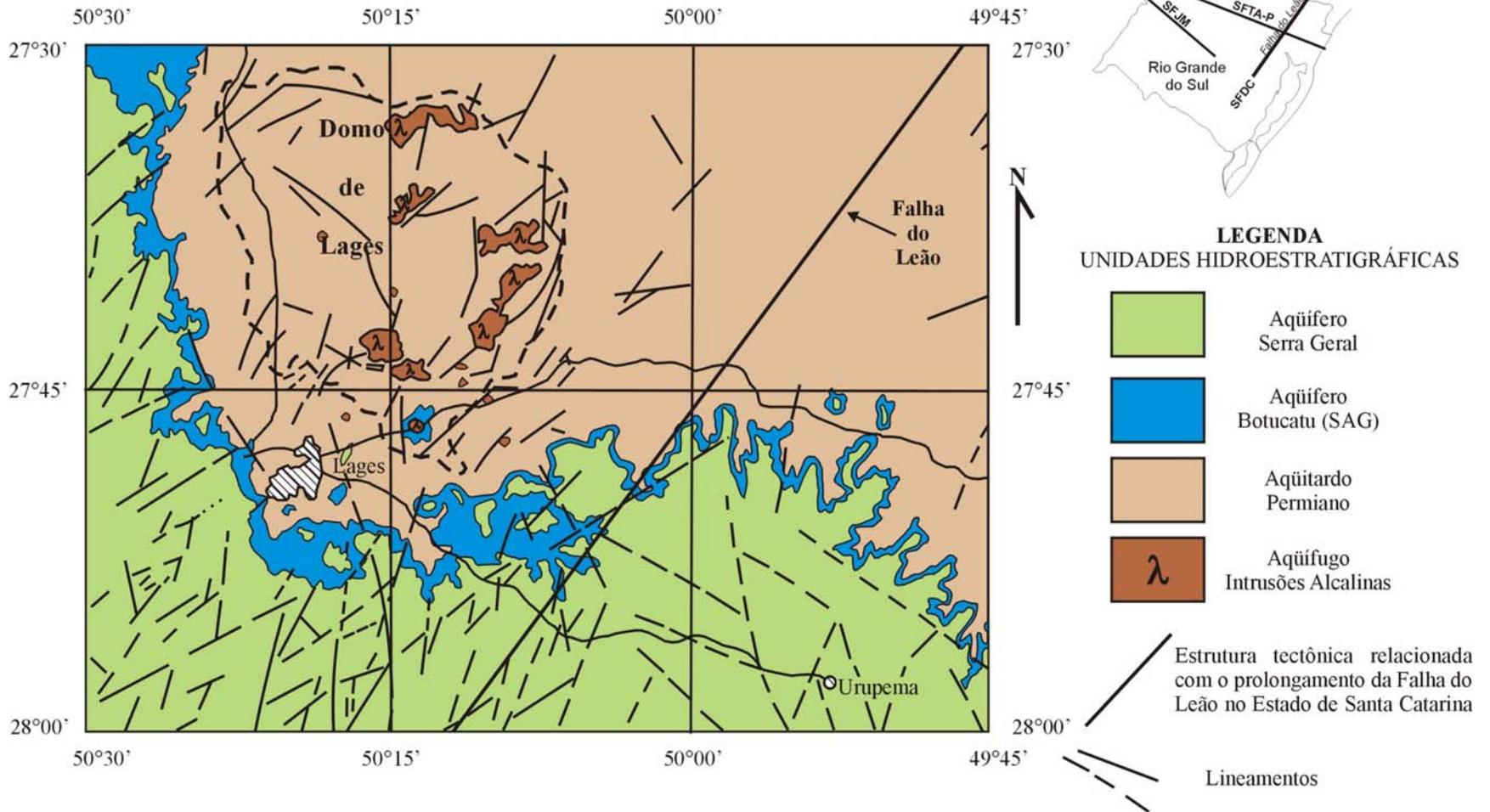


Figura 6.4 Variação no condicionamento dos afloramentos do SAG na região de Lages, em Santa Catarina, devido à estrutura de grande porte relacionada com a Falha do Leão, que muda suas condições hidrogeológicas. Mapa modificado de DNPM (1986).

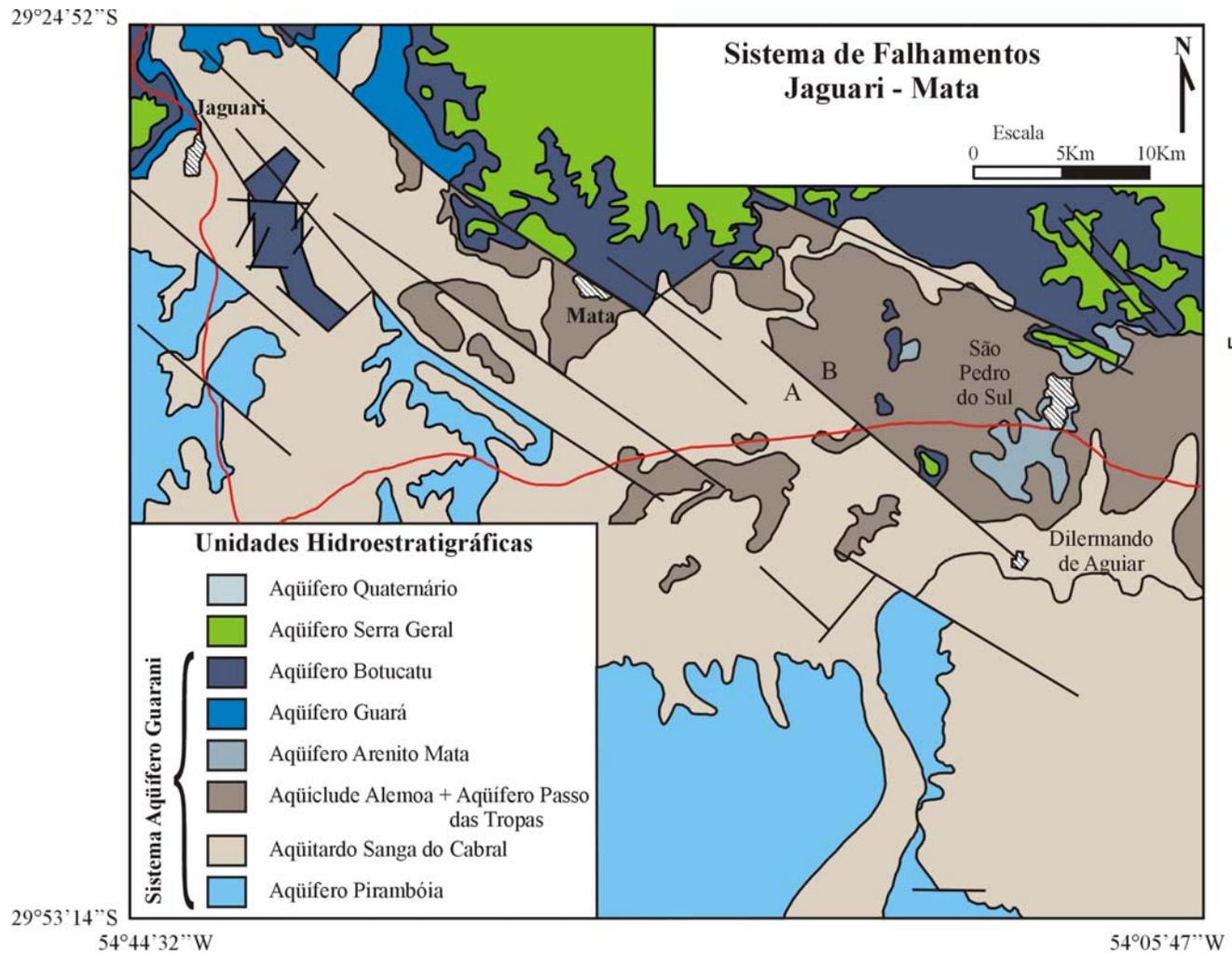
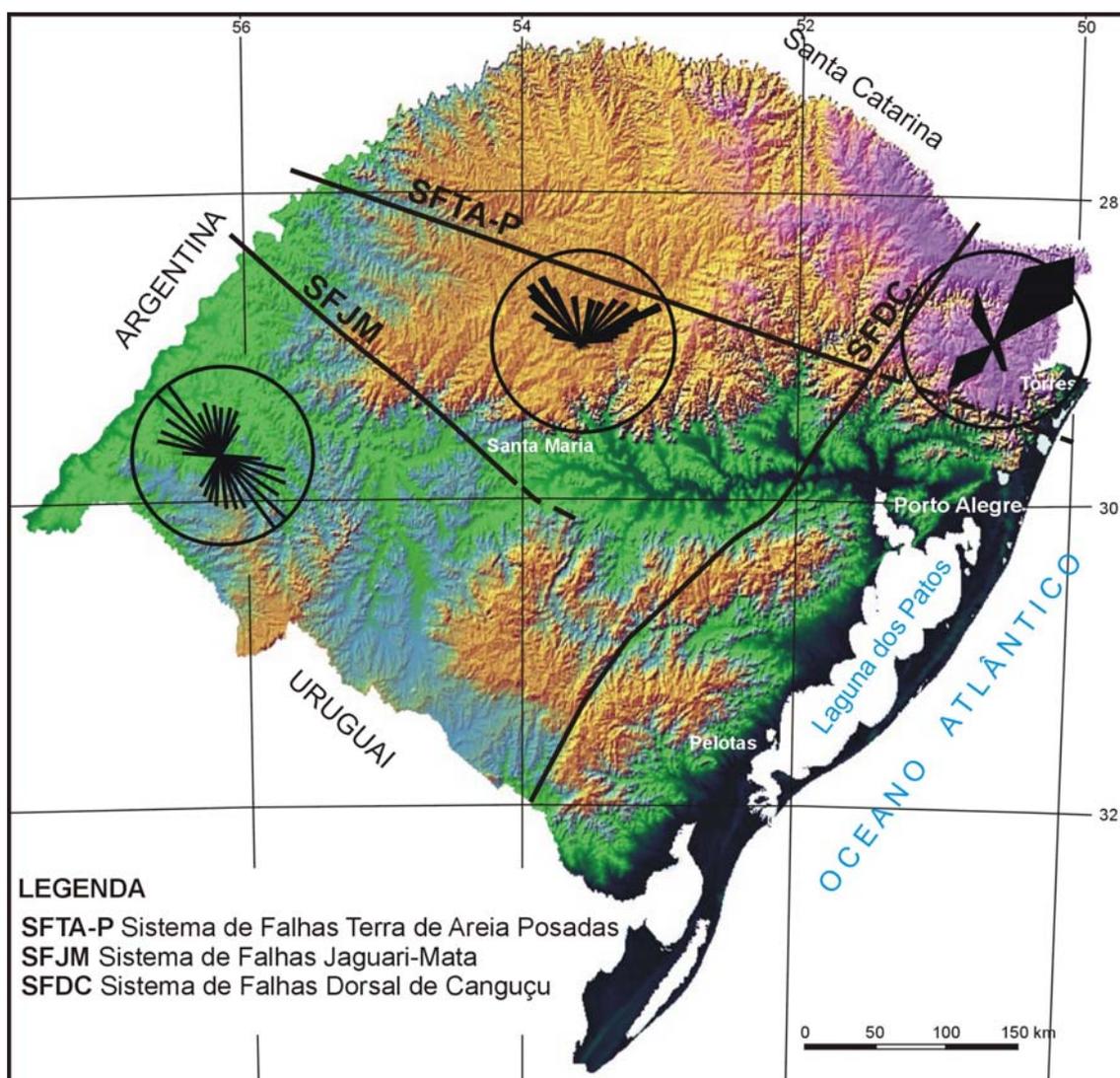


Figura 6.5 Mapa geológico entre os municípios de São Pedro do Sul e Jaguari onde podem ser visualizadas as estruturas que compõem o Sistema de Falhas Jaguari - Mata, de direção noroeste, modificada de Zerfass *et al.* (2003).

Os trabalhos de Eilers (1993), Eilers *et al.* (1993), Frasca e Lisboa (1993), Frasca (1996), Lisboa (1993, 1996), Lisboa *et al.* (1985), Takahashi (1991), Takahashi *et al.* (1993) e *Agrar und Hidrotechnik* (1969, 1970) em áreas específicas de ocorrência do SAG no Rio Grande do Sul, estudando detalhadamente as linhas estruturais que ocorrem no Aquífero Serra Geral, demonstram que o aquífero basáltico apresenta controles tectônicos bem definidos (Figura 6.6).



Base: modelo de digital de elevação altimétrica (DEM), falsa cor, a partir de interferometria de radar (SRTM).
 Fonte: <http://srtm.usgs.gov/data/obtainingdata.html>; <http://seamless.usgs.gov/>

Figura 6.6 Principais sistemas de falhas que compartmentam o Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul e as rosetas que definem as principais direções de falhamentos, modificado de Lisboa (1996).

Na região leste do estado, no basalto as fraturas tendem a predominar na direção nordeste, enquanto na região oeste o predomínio é dos

fraturamentos noroeste. Na porção central do estado, segundo Lisboa (1996), ambas a direções se entrelaçam proporcionando o aparecimento de feições geomorfológicas mamelonares, devido ao efeito da erosão sobre os cruzamentos de fraturas. A região que apresenta feições mamelonares, descritas por Lisboa (1996), foi estudada em parte por Takahashi (1991) e Takahashi et al. (1993), baseando-se na análise de 561 lineamentos obtidos de fotos aéreas 1:110.000 e mosaico de Radar em escala 1:1.000.000, que plotados em diagrama de rosetas mostraram a bidirecionalidade das estruturas, confirmando o intenso cruzamento de fraturas. Da região central do estado em direção ao oeste, as falhas noroeste, como o Sistema de Falhas Jaguari – Mata de Faccini (2000), apresentam maiores rejeitos, enquanto que do centro ao leste, as falhas nordeste, como o Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu, apresentam maior importância, sendo os rejeitos mais significativos nas proximidades do litoral.

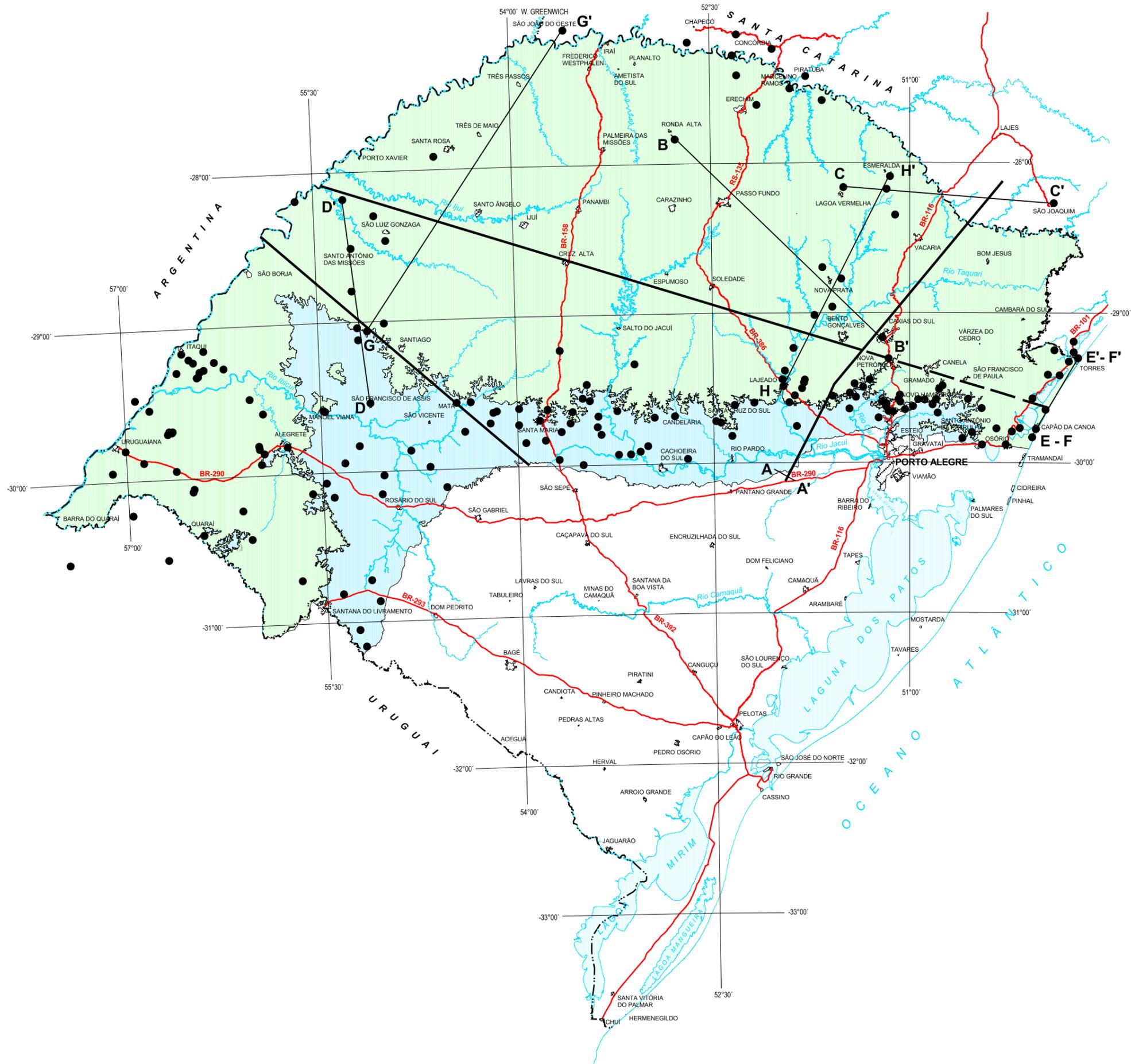
Este trabalho documenta, a partir de oito seções esquemáticas (Figura 6.7), a compartimentação do SAG do RS em pelo menos quatro áreas de maior hierarquia, com características estruturais e hidrogeológicas bem definidas: Compartimentos Leste, Oeste, Central – Missões e Norte – Alto Uruguai.

6.3 Compartimentos estruturais do SAG no Rio Grande do Sul

6.3.1 Compartimento Leste

Área de influência do Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu – SFDC (Falha do Leão)

A estrutura que representa o prolongamento do Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu (SFDC) na região gonduânica é conhecida como Falha do Leão que delimita a porção ocidental do Compartimento Leste (Figuras 6.8, 6.9 e 6.10). Na região leste do Estado, estudos baseados na interpretação de fotografias aéreas 1:60.000, concluíram após uma ordenação em mapa de 996 medições de falhas e fraturas na bacia hidrográfica do rio Caí, que na parte norte da região, ocorre a predominância de fraturamentos N 70° - 75° E e, secundariamente N 35° - 40° E. Na parte sul, próximo ao município de Montenegro, o máximo principal orienta-se N 45° - 50° E e o secundário entre N 70° - 75° E. Na bacia hidrográfica do rio dos Sinos 761 medições indicam



LEGENDA

- Área confinada do SAG
- Área aflorante do SAG
- Sistema de falhas que limita os compartimentos
- A ——— A' Seções
- Poço tubular
- Cidades
- Rodovias
- Rios

ESCALA 1 : 3.000.000

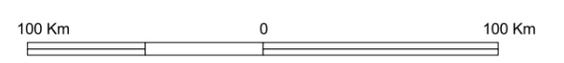


Fig. 6.7
MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES UTILIZADAS NA COMPARTIMENTAÇÃO DO SISTEMA AQUIFERO GUARANI

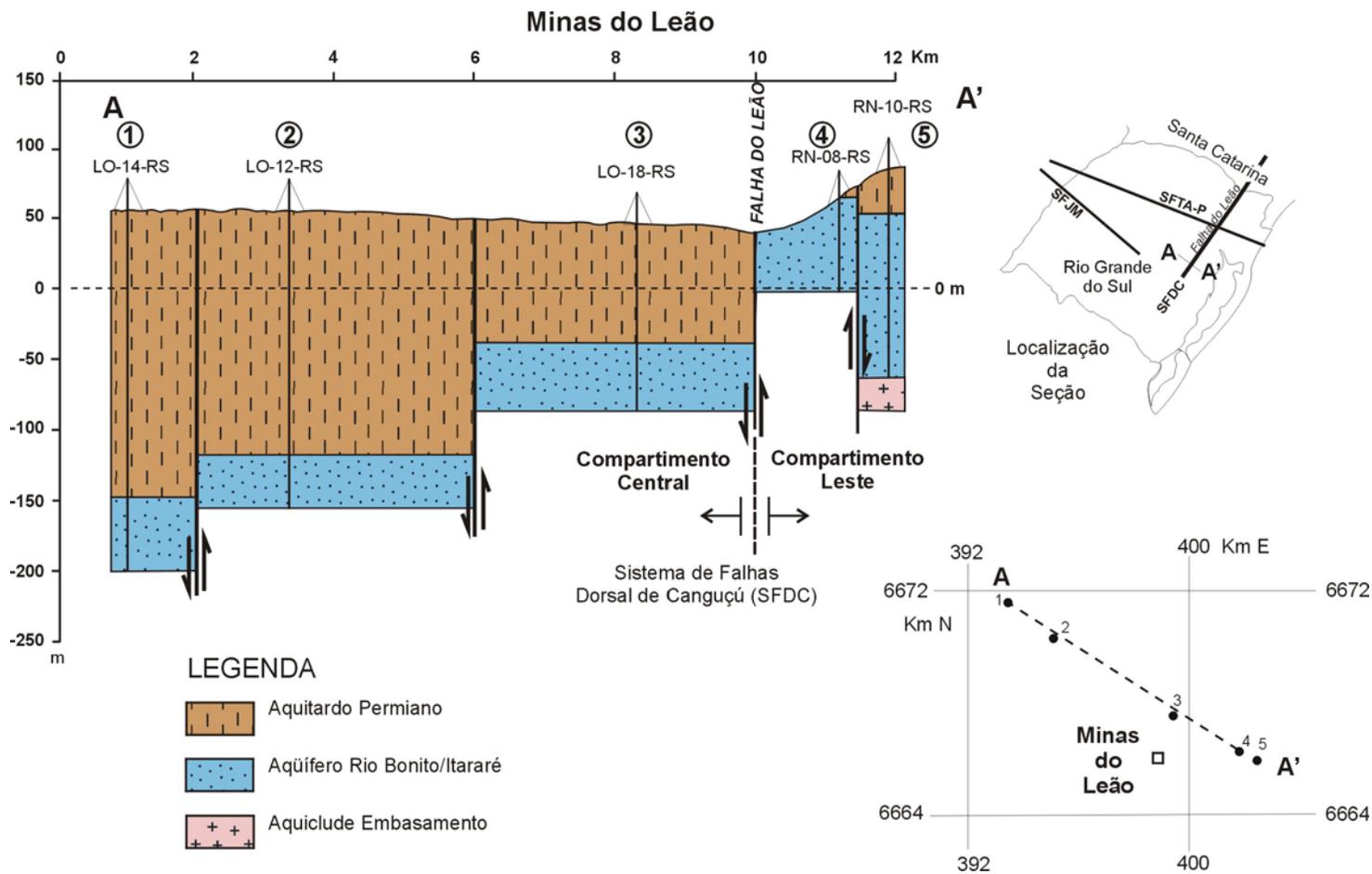


Figura 6.8 Seção geológica esquemática nas Minas do Leão, em que estão representadas as estruturas relacionadas com o prolongamento, a partir do Escudo, do Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu, que compartimentam mais a norte os setores Leste e Central do SAG.

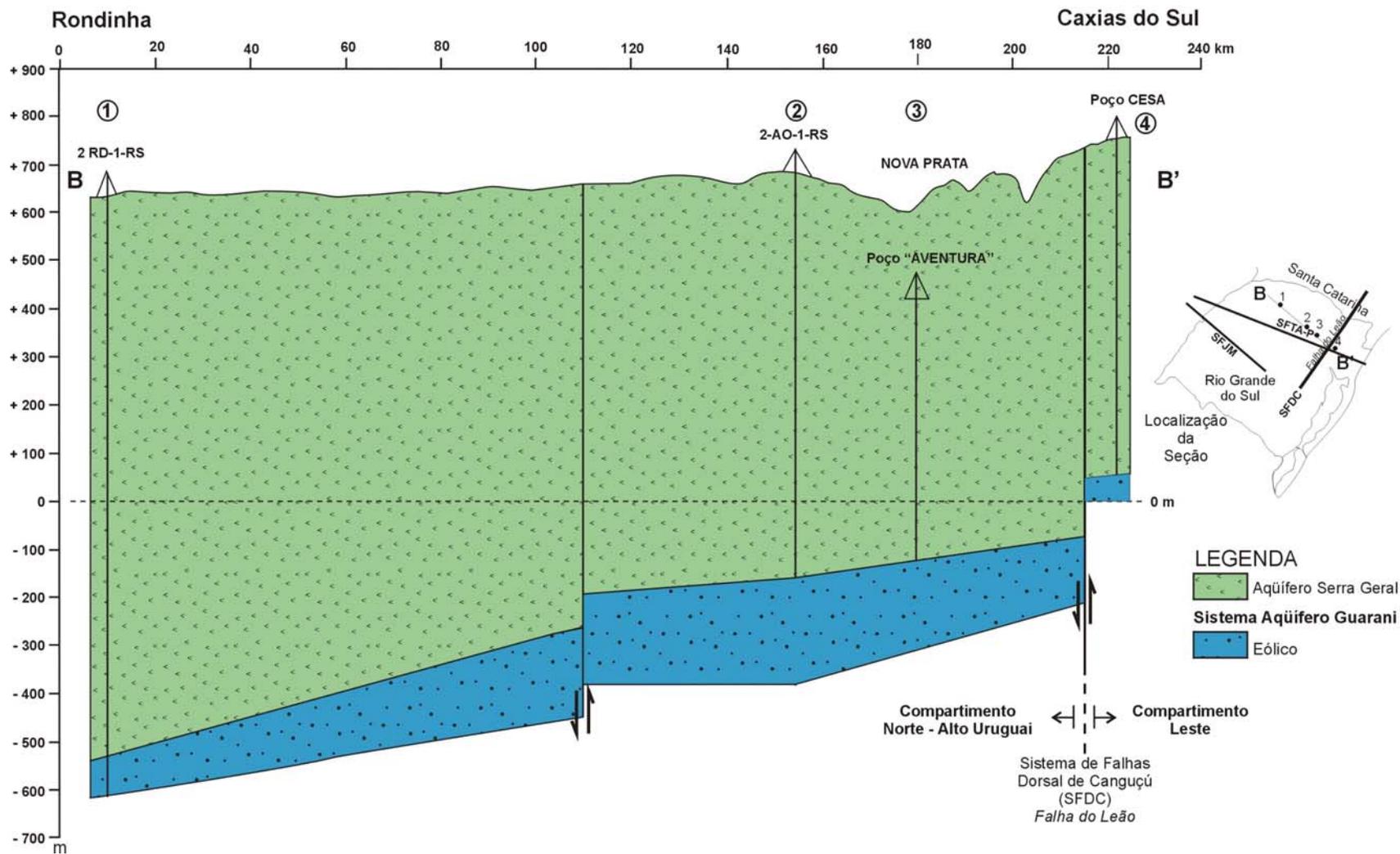


Figura 6.9 Seção geológica esquemática ilustrando o efeito do Sistema de Falhas da Dorsal de Canguçu (SFDC) sobre o SAG, causando a elevação das cotas do topo do SAG no Compartimento Leste, em relação ao compartimento Norte-Alto Uruguai.

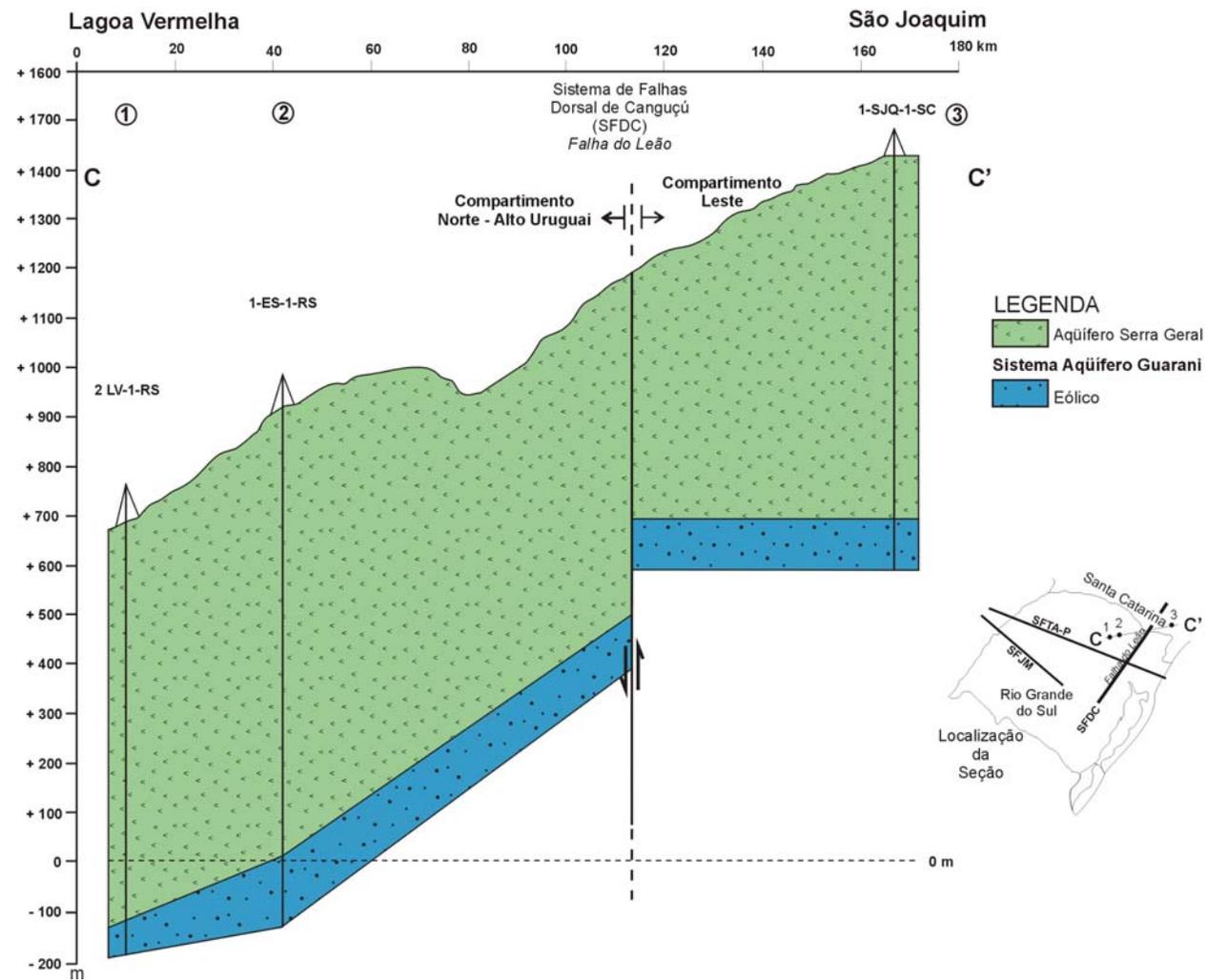


Figura 6.10 Seção geológica esquemática entre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, notando-se a grande diferença entre as cotas do topo do SAG nos dois estados, devido a compartimentação Leste e Norte - Alto Uruguai.

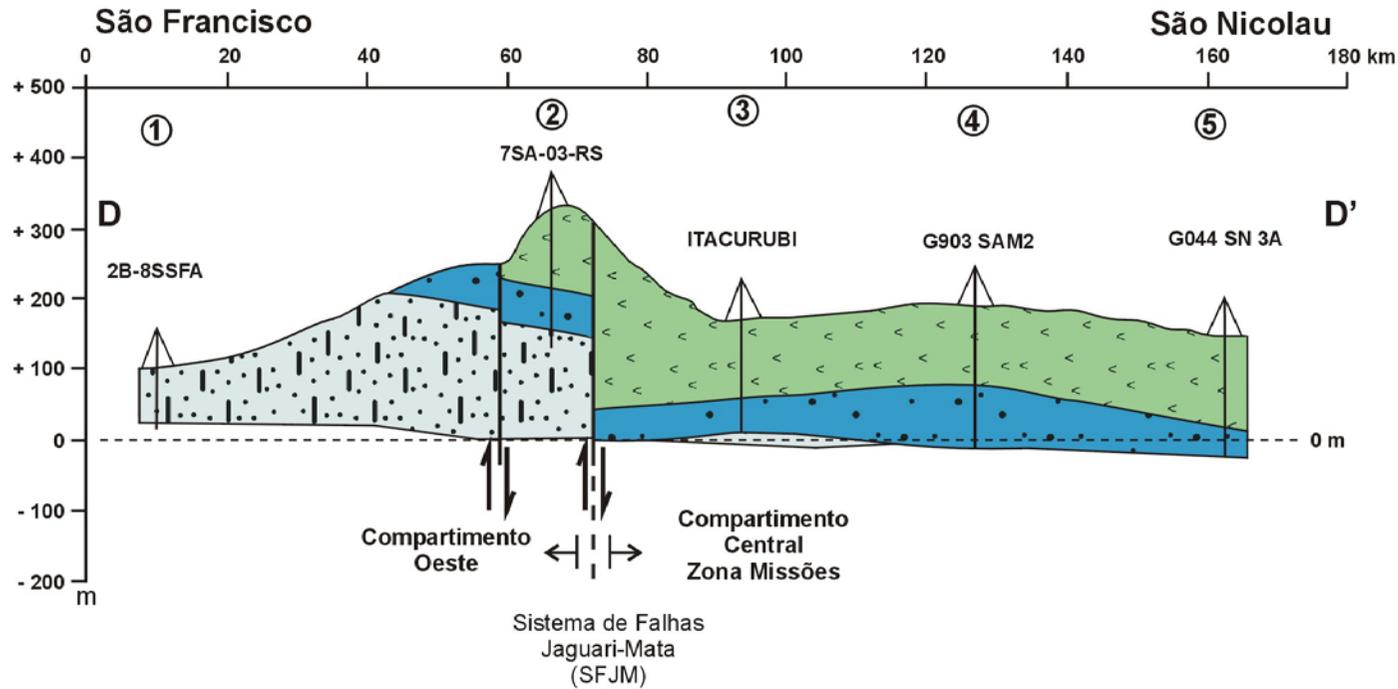
predominância da direção N 60° - 70° E, estando o segundo pico entre N 40° - 50° E (Agrar und Hydrotechnik, 1969,1970). Lisboa *et al.* (1985) utilizando mosaico de Radar em escala 1: 250.000, identificaram lineamentos em duas regiões denominadas de Lajeado Grande (51°00` W a 50°30` W) e Tainhas (50°30` W a 50°00` W), ambas situadas entre as latitudes (29°00`S e 29°30`S), na região da Fachada Atlântica (Lisboa, 1996). Nesta área os lineamentos orientam-se na direção N 30° - 40° E.

O Compartimento Leste apresenta dois condicionamentos estruturais. Na porção litorânea, as falhas nordeste estão com rejeitos escalonados em direção ao oceano, segmentando o topo do SAG que alcança valores negativos de cota inferiores a 200 m. Da região de Taquara até as proximidades de São Sebastião do Caí, possui variações menores nos valores das cotas do topo e somente a partir de Caxias do Sul as cotas voltam a alcançar valores positivos maiores, que chegam a + 680 m no poço 1 - SJO - 01 - RS da Petrobrás, em São Joaquim (SC).

6.3.2 Compartimento Oeste

Área de Influência do Sistema de Falhas Jaguari – Mata (SFJM).

Eilers (1993) e Eilers *et al.* (1993), a partir da tomada de direção de 316 lineamentos na região de Alegrete, mapeados em imagens LANDSAT MSS/Canais 4,5,7 (1:500.000) e Radar banda X (1:250.000), construíram diagrama de rosetas onde predominaram as direções N 40° -50° W. Frasca *et al.* 1993) e Frasca (1996) estudando as áreas entre os municípios de São Francisco de Assis, Manoel Viana e as localidades de Unistalda e Vila Kramer no oeste do Estado, região com aproximadamente 7000 Km², verificaram, através do estudo de imagens LANDSAT, que em 1633 medidas de lineamentos houve a dominância das orientações noroeste, confirmando as observações de Eilers (1993) para a região de Alegrete. Esse compartimento apresenta mergulhos das camadas quase que homogêneos para NW, em direção principalmente à fronteira da Argentina e, em parte, SW para o Uruguai (Figura 6.11). Devido à escala utilizada nos trabalhos e à não interferência no arcabouço hidroestratigráfico do SAG, essas falhas de menor amplitude não estão representados na seção.



LEGENDA

-  Aquífero Serra Geral
- Sistema Aquífero Guarani**
-  Eólico
-  Fluvial



Figura 6.11 Seção geológica esquemática em que aparece o Sistema de Falhas Jaguari - Mata e a compartimentação Oeste e Central - Missões do SAG. Nota-se a estruturação dômica devido a falhamentos secundários (não representados).

6.3.3 Compartimento Norte – Alto Uruguai

Área de Influência do Sistema de Falhas Terra de Areia – Posadas (SFTA – P).

A compartimentação anteriormente descrita (Oeste e Leste), no entanto, não explica totalmente o modo de distribuição do SAG no estado, pois poços tubulares profundos e furos estratigráficos feitos pela Petrobrás e Paulipetro mostram um aquífero com comportamento estratigráfico e estrutural muito diferenciado das áreas já delimitadas pela reativação dos sistemas de falhamento herdados dos grandes eventos tectônicos ocorridos no embasamento cristalino rio-grandense.

O exame da seção geológica Tramandaí - Torres (Figura 6.12) mostra que existe uma descontinuidade geológica nas proximidades do município de Terra de Areia, ao norte do furo 7 GT-7-RS da CPRM, no qual o SAG, representado pelas formações Botucatu/Pirambóia, apresenta drástica diminuição de espessura, devido a um falhamento que se origina no embasamento e afeta todo o pacote de formações gonduânicas. Na Figura 6.13 é mostrada a seção modificada de Fabrício (1980), cuja interpretação não leva em consideração a estruturação do terreno, gerando desse modo uma sinclinal.

A inclusão de estruturas rúpteis de direção E – W e noroeste, dá uma visão diferenciada da linha tectônica e da sinclinal originalmente propostas por Leinz (1949) e Sanford & Lange (1960), seguida posteriormente pela maioria dos autores (Almeida, 1981; Paulipetro, 1982; Zalán *et al.*, 1990). Nesse caso, a sinclinal trata-se de um graben escalonado, que gera o espaço de acomodação onde se instalaram as formações geológicas formadoras do SAG. A superimposição de falhas nordeste, relacionadas com a abertura do Atlântico, produz alterações no registro estratigráfico e variações anômalas da espessura das formações, dificultando as correlações entre os dados de sondagem entre blocos separados por essas falhas.

É a partir desse graben escalonado que, nas proximidades do furo 7 GT-7-RS, origina-se o sistema de falhamentos que com direção N 70° W atravessa quase perpendicularmente o Rio Grande do Sul, alcançando e atravessando o rio Uruguai, na altura da foz do rio Ijuí, onde também alcança seu maior rejeito, como pode ser visualizado na seção hidrogeológica da Figura 6.14. Também é a partir daí que, no litoral, começa a inversão de mergulho das camadas gonduânicas em direção ao Estado de Santa Catarina.

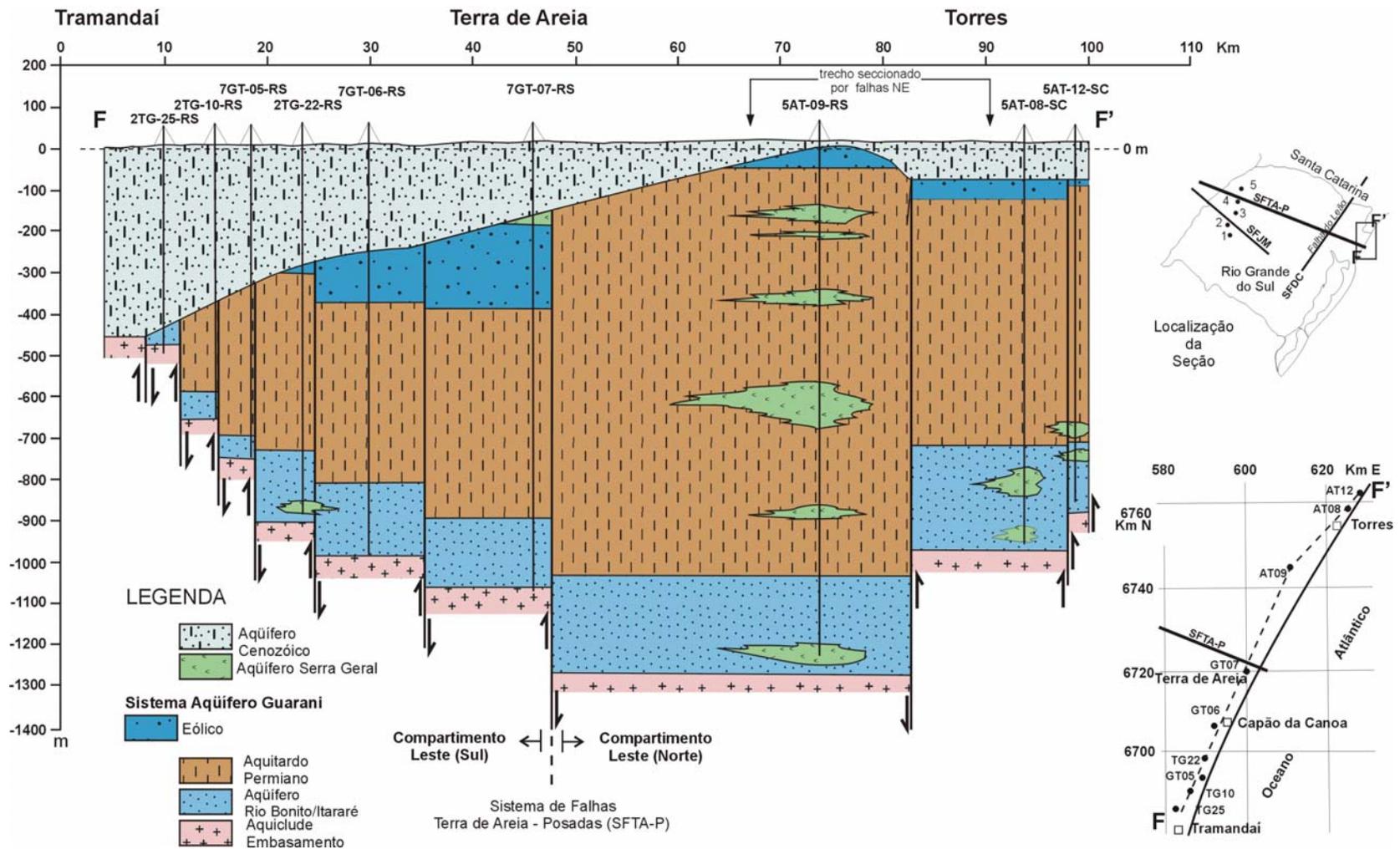


Figura 6.12 Seção geológica esquemática onde se visualiza o Sistema de Falhas Terra de Areia - Posadas delimitando os Compartimentos Central - Missões e Norte - Alto Uruguai.

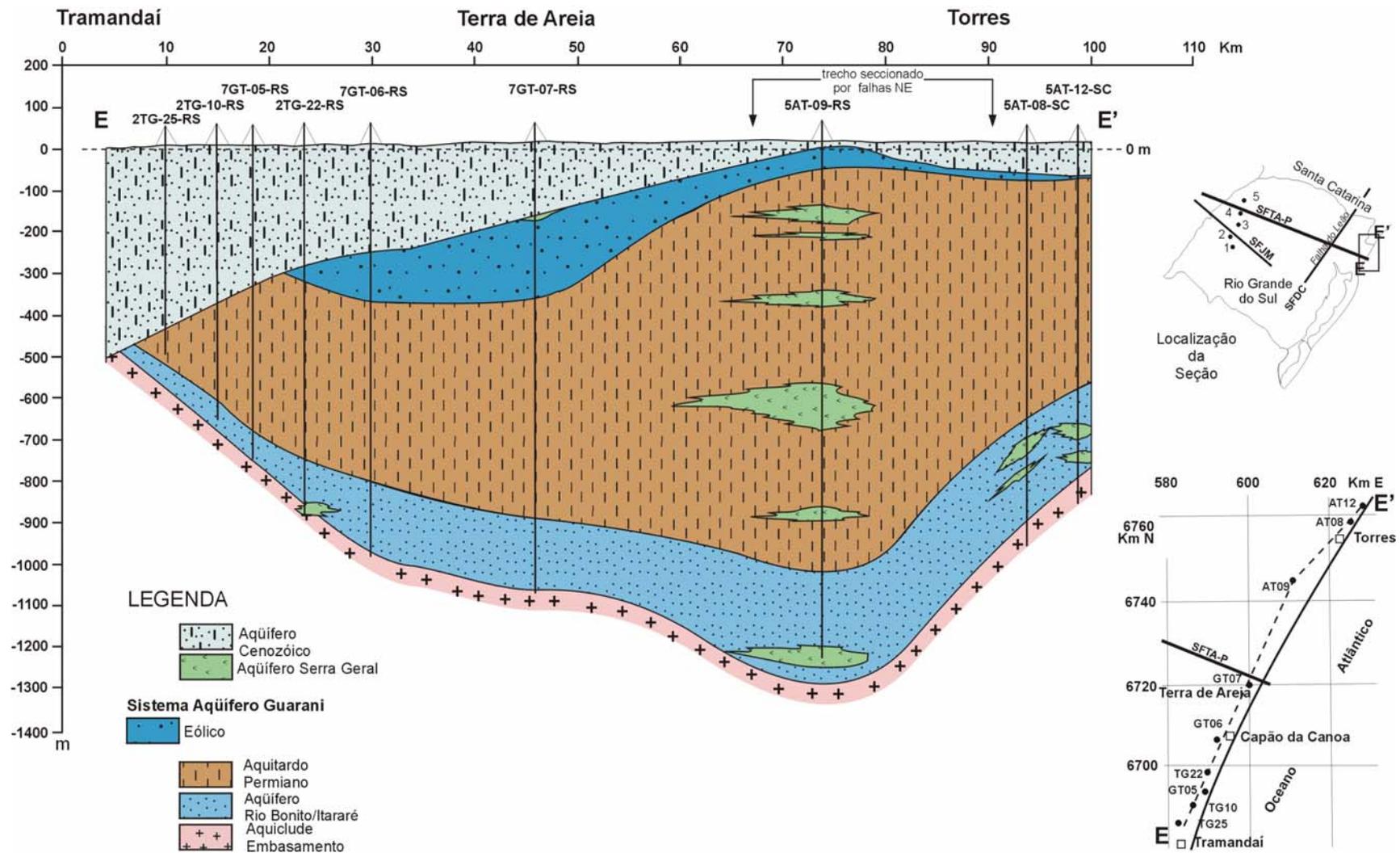


Figura 6.13 Seção geológica esquemática Tramandaí - Torres, não levando em consideração a estruturação tectônica, aparentando uma sinclinal, modificado de Fabrício (1980).

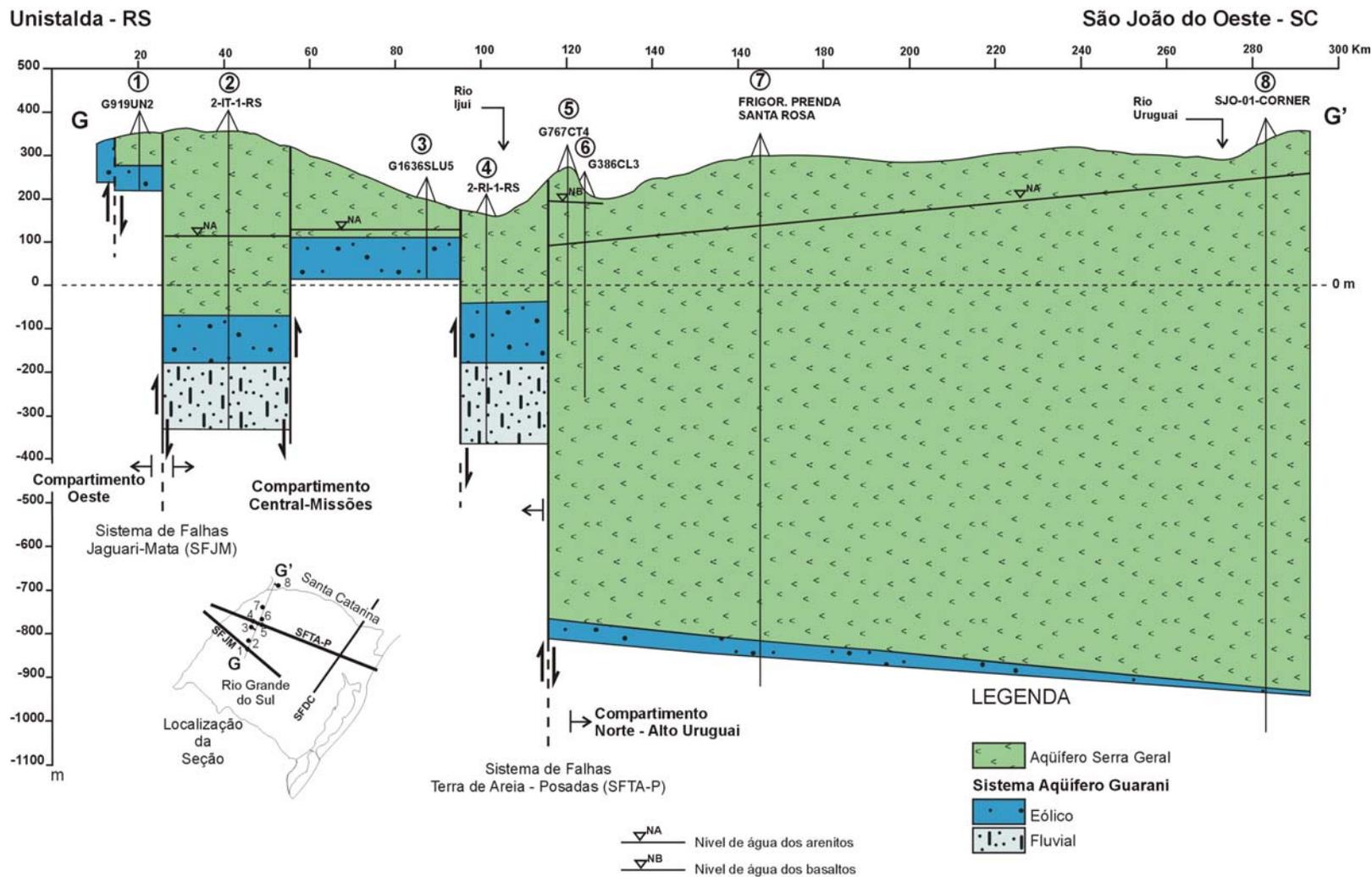


Figura 6.14 Seção hidrogeológica esquemática onde se visualiza o Sistema de Falhas Terra de Areia - Posadas limitando os Compartimentos Norte - Alto Uruguai e Central - Missões e o Sistema de Falhas Jaguarí - Mata limitando os Compartimentos Central - Missões e Oeste.

O traçado desse sistema de falhas, apesar de sua amplitude, não é facilmente seguido nas imagens de satélite e radar, sendo que em muitos locais é mais facilmente detectado pelas características hidrogeológicas dos poços. Assim, é de grande importância a detecção de diferenças potenciométricas e hidroquímicas nos poços que captam tanto o SAG quanto o Aquífero Serra Geral nessa zona de falhamento que, além da estratigrafia, condiciona também a ocorrência de áreas de recarga, circulação e descarga de parte da porção transfronteiriça do SAG.

6.3.4 Compartimento Central – Missões

Área de Influência Sul do Sistema de Falhas Terra de Areia – Posadas (SFTA – P).

Os mapeamentos geológicos, poços tubulares e furos de sonda estudados permitem que, em escala regional, os sistemas de falhas Jaguari - Mata e Dorsal de Canguçu (mais propriamente sua extensão representada pela Falha do Leão) sejam consideradas como os limites dos blocos oeste e leste do SAG dentro do Estado, delimitando dois arcabouços hidroestratigráficos distintos para cada uma dessas áreas e formando um compartimento maior que engloba a região Central e a região das Missões. A seção geológica da Figura 6.15 ilustra bem o condicionamento estrutural desse compartimento.

Dentro do Compartimento Central - Missões, a região abrangida pelas Missões apresenta uma estrutura dômica para o topo do SAG a partir do limite do Sistema de Falhas Jaguari - Mata, com sentidos de mergulho para norte, noroeste e nordeste, estando o topo do aquífero quase aflorante nas proximidades do Rio Uruguai e em cotas negativas nas imediações do rio Ijuí.

A região Central caracteriza-se por um intenso fraturamento, com as mudanças de sentido das falhas nordeste e noroeste a partir das regiões próximas ao município de Santa Maria. Mais para leste, nas proximidades do limite com o Compartimento Leste, as estruturas tectônicas promovem o aparecimento de cotas negativas para o topo do SAG já nas proximidades das áreas de afloramento. Em toda a região Central o mergulho das camadas do SAG é exclusivamente para norte e, com exceção de áreas próximas à Nova Palma e ao rio Taquari em Estrela o topo do SAG apresenta-se alçado na topografia, em cotas superiores a 200 m.

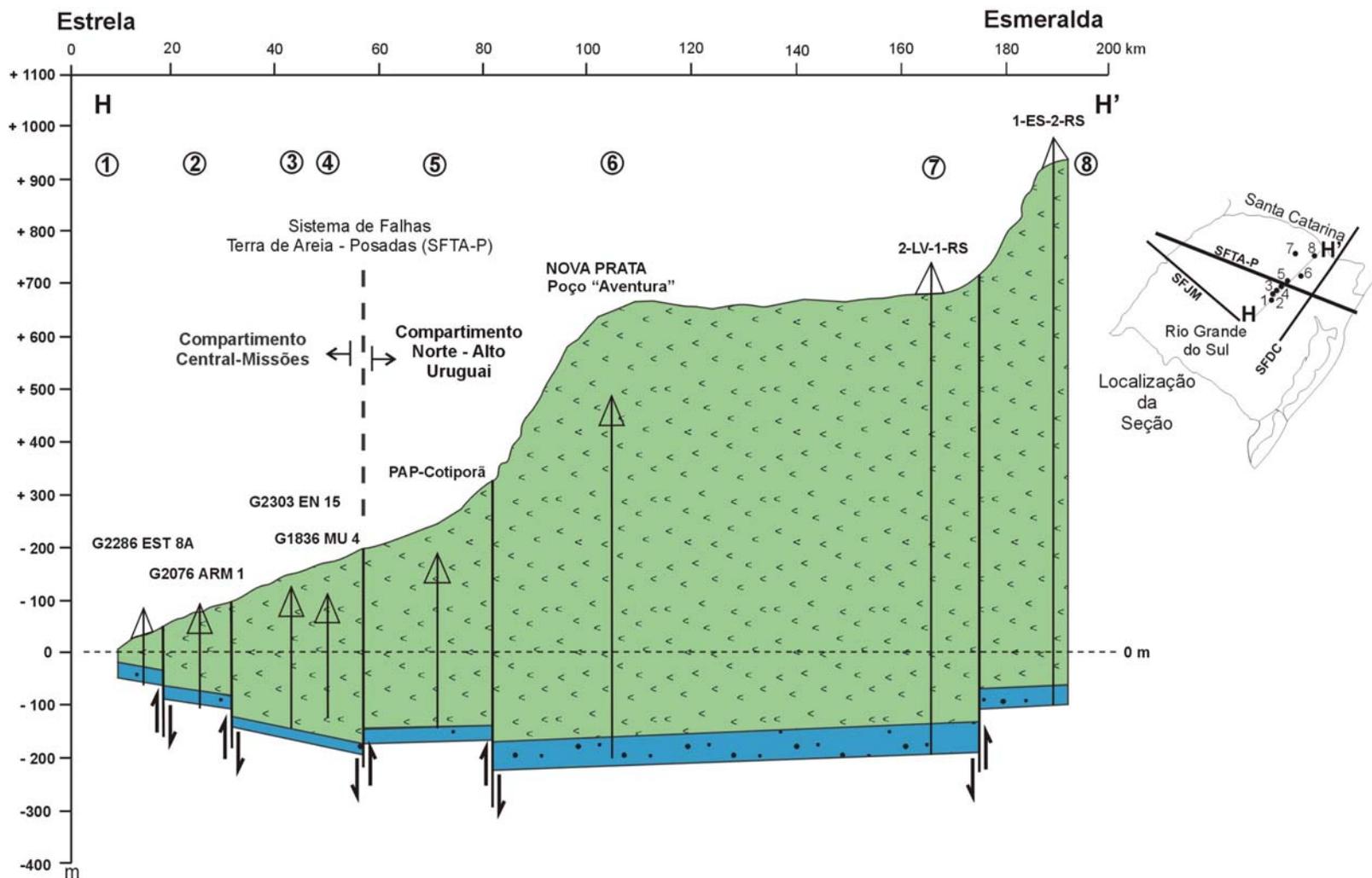


Figura 6.15 Seção geológica esquemática mostrando o Sistema de Falhas Jaguari - Mata (SFJM) delimitando os compartimentos Oeste e Central – Missões, e o Sistema de Falhas Terra de Areia – Posadas (SFTA-P) que delimita os compartimentos Central – Missões e Norte - Alto Uruguai.

7 UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS RELACIONADAS COM O SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI NO RIO GRANDE DO SUL

7.1 Considerações preliminares

O Sistema Aqüífero Guarani subdivide-se em diversos blocos estruturais, porém como foi exposto no Capítulo 6, na escala considerada quatro compartimentos estruturais são suficientes para explicar seu funcionamento. Isto se deve ao fato de que, no espaço territorial do Rio Grande do Sul, o SAG apresenta um conjunto litológico heterogêneo, que examinado do ponto de vista hidrogeológico, resulta em uma seqüência de novas unidades hidroestratigráficas com características hidrodinâmicas, hidráulicas e hidroquímicas bem distintas.

A interpretação do reflexo das condições estruturais no SAG e a conseqüente implementação de uma compartimentação, exigem um conhecimento aprofundado das variáveis hidrogeológicas que controlam o fluxo hidrodinâmico. No caso específico do SAG, ele conforma um ambiente geológico heterogêneo, o que torna difícil a compreensão dos fenômenos de fluxo em pequenas escalas. Desse modo, um arcabouço hidrogeológico básico deve ser estabelecido, para que possa ser desenhada a evolução das variáveis em cada unidade que compõe o grande sistema aqüífero.

Um problema relacionado com o SAG é a sua condição de sistema aqüífero heterogêneo, onde uma abordagem somente litoestratigráfica para a determinação da sua hidroestratigrafia não é definitiva, porque é difícil determinar a continuidade física dos depósitos. Para alcançar o objetivo de delinear unidades hidroestratigráficas, demonstra ser de grande importância a estratigrafia de seqüências, que estuda as unidades relacionadas geneticamente e que são agrupadas em seqüências. Cada seqüência é delimitada acima e abaixo por discordâncias (Van Wagoner *et al.*, 1990). Através da delimitação das seqüências, padrões de previsão da distribuição de fácies são determinados.

Os modelos de estratigrafia de seqüências podem ser utilizados nas áreas com baixa densidade de dados, para a previsão dos padrões de fácies, como ocorre com o SAG no Rio Grande do Sul. Essa distribuição de fácies

pode ajudar no estabelecimento de um arcabouço que permita a correlação das propriedades hidráulicas com a litologia (Anderson & Woessner, 1992).

O delineamento de unidades hidroestratigráficas é grandemente facilitado pelos resultados de investigações regionais prévias, para o Rio Grande do Sul, importantes estudos versando sobre a estratigrafia de seqüências, de utilidade para a definição das unidades hidroestratigráficas do SAG, podem ser encontrados em Faccini (2000), Scherer (1998) e Nowatski (1996). Para o mapeamento das unidades hidroestratigráficas foi utilizada a geologia do estado (Figura 7.1), compilada pelo SGB-CPRM (Ramgrab *et al* (2003), Silva *et al* (2003) e Perrotta *et al* (2003)) e modificado para atender as necessidades desse trabalho.

Através do Capítulo 4, podemos constatar que a permeabilidade é uma função do tipo de rocha. A permeabilidade de conglomerados, arenitos e argilitos pode variar em várias ordens de magnitude (Freeze & Cherry, 1979), mas a amplitude de permeabilidade desses materiais raramente se sobrepõe. A porosidade efetiva e a permeabilidade em arenitos são várias vezes maiores do que aquela dos siltitos e argilitos.

Os principais dados usados para definir as unidades hidroestratigráficas são obtidos de:

- 1) Descrições litológicas de testemunhos e amostras de calha;
- 2) Perfis geofísicos de poços;
- 3) Dados interpretados de testes de bombeamento;
- 4) Medidas de nível de água nos poços;
- 5) Cotas do topo das formações geológicas;
- 6) Mapeamentos geológicos;
- 7) Variação da qualidade e tipo químico das águas.

A análise hidroestratigráfica é um método sistemático de integrar conjuntos de dados independentes, para definir e verificar as correlações das unidades hidroestratigráficas. A metodologia consiste das sete etapas seguintes (Noyes *et al*):

- 1) Selecionar um conjunto de dados apropriados, avaliar a qualidade e construir um *grid* de seções;
 - 2) Definir limites de unidades hidroestratigráficas em poços específicos, usando múltiplos e independentes conjunto de dados;
-

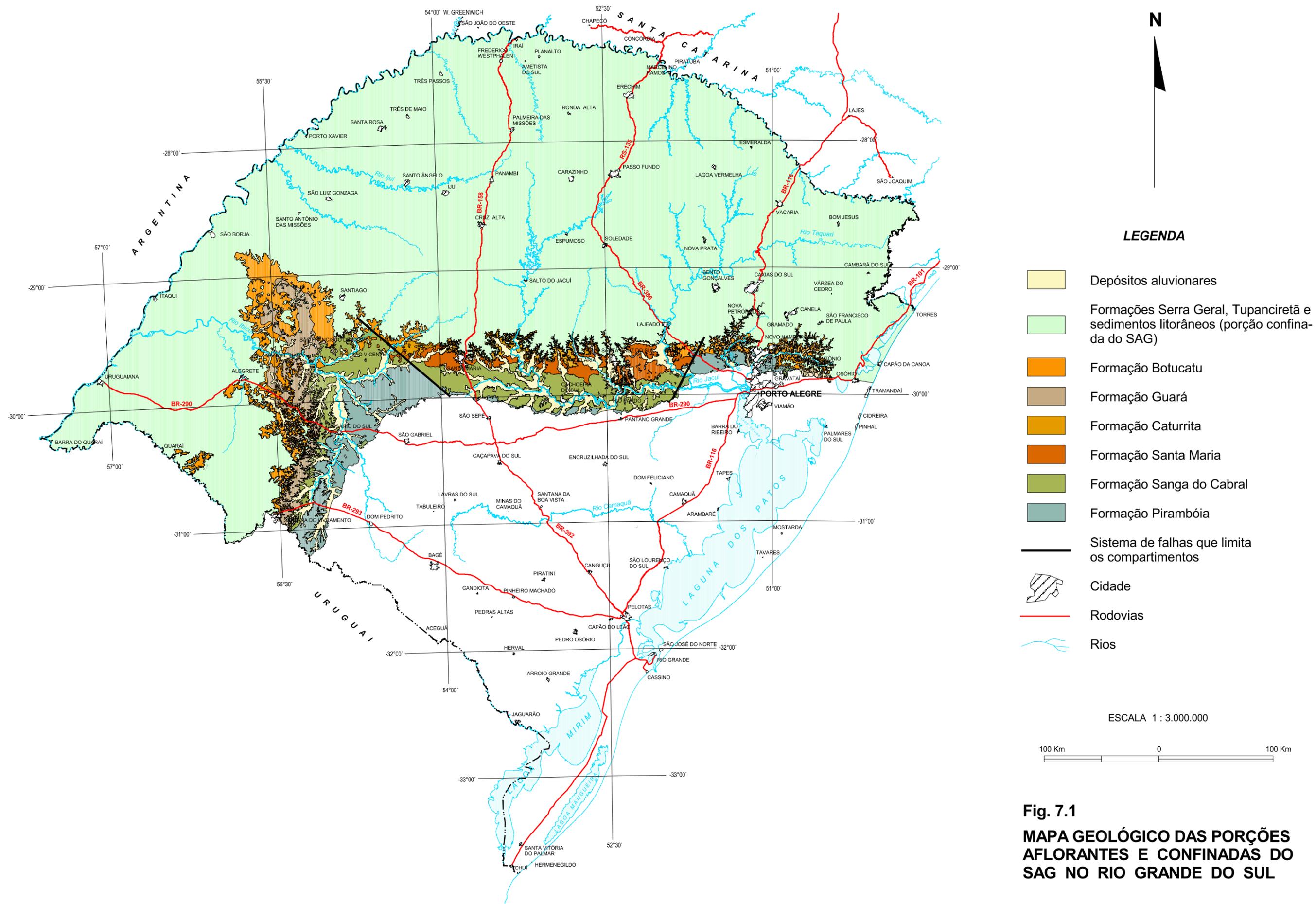


Fig. 7.1
MAPA GEOLÓGICO DAS PORÇÕES AFLORANTES E CONFINADAS DO SAG NO RIO GRANDE DO SUL

-
- 3) Correlacionar os limites das unidades hidroestratigráficas através da área de estudo utilizando o *grid* de seções;
 - 4) Resolver discrepâncias nas correlações de unidades hidroestratigráficas no *grid* de seções;
 - 5) Construir mapas de estrutura, potenciométrico, isópacas e isoconcentrações para cada unidade que apresentar dados suficientes para tal;
 - 6) Reavaliar os mapas para identificar anomalias e inconsistências nas correlações;
 - 7) Revisar as correlações e repetir passos de 2 até 6 de uma maneira interativa.

Após todas as compilações e interpretações de dados, levando em consideração a escala de trabalho de 1:1.000.000, obteve-se como resultado que, as unidades confinantes no topo e na base do SAG seriam respectivamente as Unidades Hidroestratigráficas Serra Geral e Rio do Rasto.

As unidades identificadas para compor o arcabouço hidroestratigráfico do SAG no Rio Grande do Sul, foram definidas como:

- Unidade Hidroestratigráfica Botucatu
- Unidade Hidroestratigráfica Guará
- Unidade Hidroestratigráfica Arenito Mata
- Unidade Hidroestratigráfica Caturrita
- Unidade Hidroestratigráfica Alemoa
- Unidade Hidroestratigráfica Passo das Tropas 1
- Unidade Hidroestratigráfica Passo das Tropas 2
- Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral
- Unidade Hidroestratigráfica Pirambóia

A seguir será realizada uma descrição sucinta de todas essas unidades, desde o ponto de vista geológico, até as características mais marcantes de potencialidade aquífera, com exemplos relacionados com seu modo de ocorrência nas áreas aflorantes, sua caracterização em subsuperfície através de perfis geofísicos e litológicos, além de sua distribuição dentro dos compartimentos, de acordo com os conhecimentos atuais.

7.2 Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral

Esta unidade hidroestratigráfica corresponde ao teto do conjunto litológico intergranular que compõe o SAG, possuindo enorme importância pelo seu caráter confinante de todos os aquíferos de origem sedimentar do SAG.

A Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral constitui-se de rochas vulcânicas correspondentes às Eruptivas Serra Geral (White,1908) e representa uma das maiores manifestações vulcânicas encontradas no registro geológico da história da Terra, resultantes da separação dos continentes da América do Sul e África. Estes derrames de lavas segundo Renne *et al* (1992) apresentam idade de 131 ± 4 Ma. A característica principal dessa unidade quando confrontada com as demais unidades hidroestratigráficas que compõem o SAG é que, sendo constituída por uma seqüência de derrames básicos e ácidos, com litologias basálticas toleíticas, andesitos, riolitos, dacitos e riodacitos (IBGE,1986, Roisemberg, 1990) apresenta uma porosidade exclusiva por fraturas.

No Estado do Rio Grande do Sul ela ocupa aproximadamente 50% da área (Hausmann, 1995) correspondendo a 137.000 km². Sua espessura apresenta grande variação e é principalmente controlada pelos eventos tectônicos que determinam a área de ocorrência do SAG, tendo sido posteriormente esculpida pela erosão diferencial que agiu principalmente nas áreas enfraquecidas pelas movimentações tectônicas. As menores espessuras ocupam as áreas da fronteira oeste do estado, com 100 m ou menos nas proximidades das janelas aflorantes do SAG e cerca de 1200 m no extremo noroeste do estado, junto ao rio Uruguai. Na região de Torres, próximo à divisa com o Estado de Santa Catarina, as espessuras são próximas de 700 m.

As estruturas geológicas primárias relacionadas com as taxas de resfriamento dos derrames foram propostas por Leinz (1949). Segundo Roisemberg & Chies (1987) um grande desenvolvimento de juntas verticais e zonas amigdalóides ou vesiculares é associado com os derrames básicos. As juntas horizontais bem desenvolvidas são características dos derrames ácidos e as zonas vítreas, de espessura variável, correspondem à porção basal dos derrames. Essa unidade hidroestratigráfica é marcada por um forte controle

tectônico, com presença de falhas e fraturas com direções principais NE e NW como se visualiza na Figura 6.6.

No estudo de escala regional de Rebouças (1988) são apresentados alguns dados hidrogeológicos gerais sobre a Unidade Hidrogeológica Serra Geral:

Capacidade específica = $3,5 \times 10^{-3}$ a $37,7 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$

Profundidade dos poços = 31 a 190 m

Permeabilidade = $10^{-3} - 10^{-7} \text{ m/s}$

Totais de sais dissolvidos (TDS) < 300 mg/L

Segundo Reginato (2003), o sistema aquífero fraturado caracteriza-se pela descontinuidade, heterogeneidade e anisotropia. Em sua área de estudo, parte da bacia hidrográfica do rio Taquari – Antas, este sistema caracteriza-se pelas vazões variáveis, em que 72% dos poços tubulares têm produção abaixo de $10 \text{ m}^3/\text{h}$, com transmissividades e capacidades específicas baixas.

De acordo com Magna (1997), 227 poços tubulares perfurados na Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral apresentam as seguintes características:

- A capacidade específica de 88% dos poços varia entre 0,016 e $2,556 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

- A vazão de exploração de 44% dos poços varia entre 1,2 e $9,97 \text{ m}^3/\text{h}$.

- A vazão de exploração de 20% dos poços varia entre 9,97 e $18,74 \text{ m}^3/\text{h}$.

- A vazão de exploração de 16% dos poços situou-se entre 18,74 e $27,51 \text{ m}^3/\text{h}$.

É importante salientar-se que, embora a Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral, comporte-se como um aquífero confinante em relação ao SAG, ela localmente apresenta excelentes características aquíferas, com poços captando vazões que alcançam a quase $100 \text{ m}^3/\text{h}$. Mesmo áreas escassamente produtoras, como as regiões de escarpas e aquelas densamente dissecadas, não invalidam o seu potencial aquífero. Essa unidade hidroestratigráfica é o principal recurso hídrico, de baixo custo de captação e com excelente qualidade para abastecimento público na região geomorfológica do Planalto do Rio Grande do Sul. As Figuras 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 apresentam o

comportamento em afloramento, as Figuras 7.6 e 7.7 em poço e distribuição regional dessa unidade hidroestratigráfica.



Figura 7.2 Diaclasamento colunar dos basaltos da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral, na região de Rolante.



Figura 7.3 Basaltos da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral com aspecto maciço, em afloramento na estrada Santana do Livramento - Quaraí.



Figura 7.4 Áreas de alteração de basalto da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral propícias para infiltração de águas superficiais, nas proximidades de Santo Antônio da Patrulha.



Figura 7.5 Derrame basáltico da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral ocupando uma depressão nos arenitos eólicos da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu na região de Santo Antônio da Patrulha.

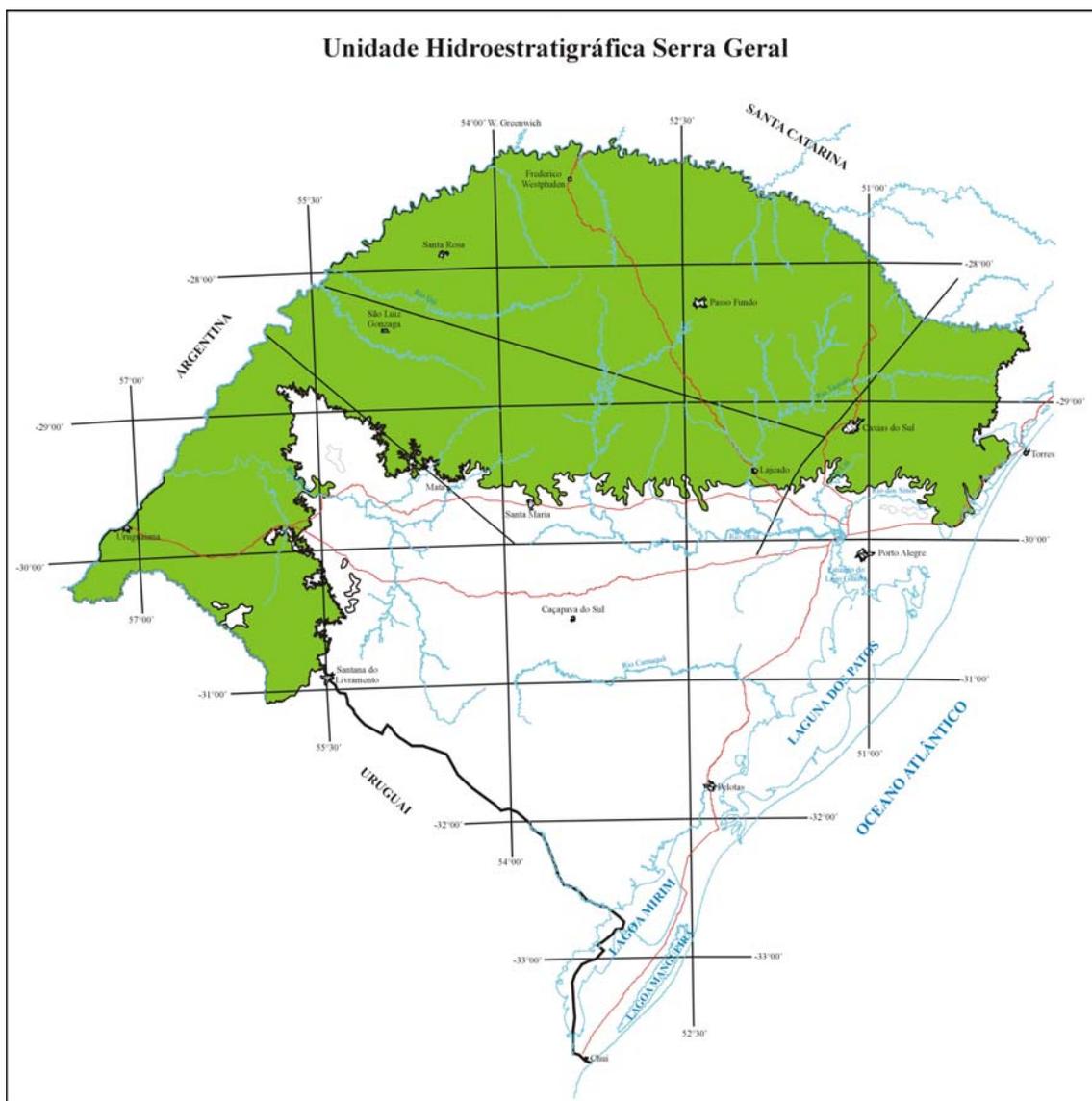


Figura 7.7 Área de ocorrência das litologias da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral nos quatro compartimentos do SAG.

A evolução hidrogeoquímica da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral foi tratada por Machado *et al.* (2002) (Figura 7.8) para uma região do oeste catarinense limítrofe com o Estado do Rio Grande do Sul. Ela é marcada pelos tipos bicarbonatados cálcicos e/ou magnesianos das águas subterrâneas encontradas nos derrames vulcânicos, oriundos das recargas diretas pela precipitação. A troca dos cátions cálcio e magnésio por sódio em geral revelam influências de águas do SAG, que por diferença de pressão hidrostática, ascendem pelas fraturas até níveis em que se misturam com águas provenientes da recarga através da precipitação pluviométrica. Águas de tipos

químicos cloretados e sulfatados podem eventualmente estar relacionadas com as unidades hidroestratigráficas permianas.

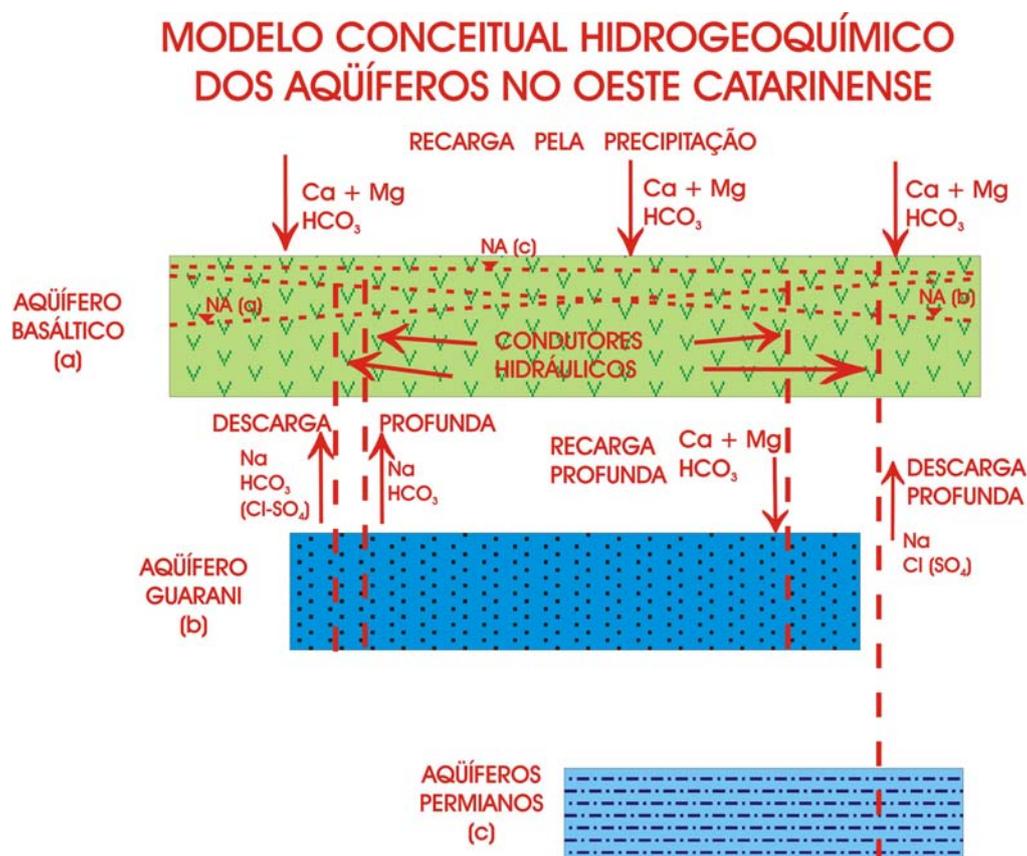


Figura 8.8 Modelo conceitual de evolução hidrogeoquímica da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral e sua relação com o SAG e unidades permianas (Machado *et al*, 2002).

7.3 Unidade Hidroestratigráfica Botucatu

Esta unidade hidroestratigráfica englobada o que Hausmann (1995) denomina de Sub-Província Botucatu, compreendendo todos os afloramentos contínuos de Arenito Botucatu ao longo do contato com o Grupo Rosário do Sul, estendendo-se abaixo dos derrames da Formação Serra Geral.

É constituída basicamente por arenitos finos a médios, quartzosos e localmente feldspáticos, bem selecionados com cores em tons avermelhados, subordinadamente amarelados. As estruturas primárias mais representativas são a laminação plano-paralela e as estratificações cruzadas do tipo tabular e acanalada, de pequeno a muito grande porte. No interior das lâminas podem ocorrer fluxos de areia e ondulações cavalgantes transladantes. No topo, os arenitos intercalam-se concordantemente com as rochas vulcânicos da Formação Serra Geral, sendo comuns as ocorrências recorrentes da

sedimentação eólica, formando os arenitos “*intertrapps*”, com espessura e distribuição muito irregular.

A ocorrência da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu no estado está longe de ser homogênea quanto à litologia e dimensões, pois desde a região da fronteira oeste até o litoral, ela por vezes mantém espessuras que variam entre 50 e 100 m, que logo chegam à completa ausência como na região entre Venâncio Aires e Estrela. Na região onde aflora no município de Montenegro, apresenta uma espessura que ultrapassa a 100 m e que corresponde a apenas uma única duna eólica. A litologia nas regiões em que o aquífero está confinado, como na *cuesta* basáltica da fronteira uruguaio-argentina, apresenta-se muito porosa e com grande homogeneidade granulométrica (boa classificação). Os poços para a utilização na irrigação apresentam capacidades específicas que variam de 5,14 a 10,55 m³/h/m, para um tempo de bombeamento de 24 horas, quando bem construídos e completados.

Outros poços apresentam capacidades específicas de 0,5 a 2 m³/h/m, podendo esses valores estarem relacionados com o efeito de penetração parcial. A transmissividade (T), representando a capacidade do aquífero em transmitir água, mostra valores médios altos que oscilam entre 169 m²/dia e 567 m²/dia, nos poços profundos utilizados na irrigação. A condutividade hidráulica (K) varia entre 2,25 m/dia e 10,3 m/dia. Os valores de coeficiente de armazenamento (S) variam segundo Grehs *et al.* (1973) de $1,0 \times 10^{-3}$ a $3,2 \times 10^{-6}$ para poços-teste perfurados na porção confinada do aquífero no município de Alegrete. Machado(1988) sugere que seja usado o valor médio de 5×10^{-4} , típico de condições artesianas.

Machado (1988) também cita a ocorrência de poços na região entre os municípios de Alegrete, Uruguaiana e Itaqui, com possibilidades de fornecer vazões superiores a 500 m³/h. Nesse artigo estimou os parâmetros hidráulicos (T,K e S) dos poços na fronteira oeste. Hausmann (1995) cita os seguintes valores: transmissividade entre 2,2 e 5,7 m²/h, capacidade específica entre 0,98 e 6,2 m³/h/m e condutividade hidráulica variando de $1,4 \times 10^{-5}$ e $0,1 \times 10^{-4}$ m/s. Os poços perfurados apenas nos arenitos são sempre menos produtivos, quando comparados com aqueles poços em que os arenitos estão confinados pelos derrames da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral.

No vale do rio Taquari, entre os municípios de Estrela, Encantado e Teutônia, as produções oscilam entre 20 m³/h a 70 m³/h, dependendo da espessura, confinamento e penetração no aquífero. As capacidades específicas estão próximas de 2 m³/h/m, indicando as boas condições de permeabilidade do aquífero.

No Compartimento Leste, do município de Feliz até Dois Irmãos, as vazões variam de 10 a 70 m³/h e as capacidades específicas de 0,5 a 2,0 m³/h/m. Na região de Novo Hamburgo as vazões variam de 4 até 7 m³/h, chegando em Taquara a apenas 2 m³/h. No município de Torres a capacidade específica é de apenas 0,056 m³/h/m.

Em Santo Antônio da Patrulha os arenitos possuem altos teores de argila e estão endurecidos. Neste caso a circulação se dá preferencialmente através das fraturas não preenchidas e secundariamente pelos poros. Quando os arenitos estão silicificados e/ou ferrificados, em especial nas áreas aflorantes, funcionam como aquíferos fraturados. Em Santo Antônio da Patrulha as vazões variam de nulas até cerca de 60 m³/h. Os poços com o aquífero confinado pelo basalto apresentam vazões da ordem de 17 a 60 m³/h e capacidade específica entre 1,20 e 3,35 m³/h/m. A condutividade hidráulica é da ordem de 8×10^{-6} a $1,6 \times 10^{-5}$ m/s segundo Hausmann (1995).

O aquífero, que na fronteira oeste do estado comporta-se como um clássico aquífero granular, na região de Santo Antônio da Patrulha libera a água para os poços principalmente através das fraturas tectônicas. Finalmente, o condicionamento topo-estrutural varia de uma condição extremamente favorável na região de *cuesta*, e gradativamente na porção central ocupa cotas altimétricas que comprometem a potencialidade do aquífero como reservatório.

Com relação ao rendimento dos poços, não restam dúvidas de que a Unidade Hidroestratigráfica Botucatu é um dos maiores produtoras de água do estado. Mesmo com todas as variações litológicas, de cimentação, fraturamento e confinamento, ele está entre os que apresentam maior potencialidade para a captação de água.

Quanto à aptidão de uso das águas da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, elas geralmente não oferecem objeção para emprego com fins

industriais e agrícolas. Ocasionalmente teores de ferro em excesso interferem na potabilidade.

Devido a grande extensão que ocupa este aquífero, ocorrem acentuadas variações na química das águas. De Torres para São Francisco de Assis e a região de afloramento no Compartimento Oeste elas passam de cloretadas sódicas para bicarbonatadas cálcicas. Nas áreas aflorantes à oeste os valores de pH são ácidos variando entre 5,9 e 6,3. Quando está confinado por basalto apresenta-se de neutro a alcalino variando entre 7,1 e 7,7. Também neste caso existe um predomínio do cátion sódio. Segundo Machado (1998) existe uma tendência de que o aquífero em maiores profundidades apresente um tipo químico bicarbonatado sódico, porém nos poços termiais de grande profundidade no Compartimento Norte – Alto Uruguai existe um incremento dos teores de cloretos e localmente as águas podem ser sulfatadas.

As litologias dessa unidade hidroestratigráfica caracterizam-se pelas grandes estratificações cruzadas e uniformidade litológica, conforme se pode visualizar nas Figuras 7.9, 7.10, 7.11, 7.12 e 7.13. Nas Figuras 7.14 a 7.18 podemos ver seu comportamento litológico e geofísico em subsuperfície. A sua área de ocorrência está na Figura 7.19.



Figura 7.9 Grandes sets de estratificações cruzadas de dunas eólicas da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, expostos em pedreira no município de Santo Antônio da Patrulha.



Figura 7.11 Afloramento da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu em uma condição topo-estrutural desfavorável à ocorrência de águas subterrâneas. A altitude deste afloramento é superior a 200 metros estando as litologias endurecidas por fenômenos diagenéticos. Em geral, as melhores exposições dessa unidade estão em regiões onde ela não é aquífera. Este afloramento situa-se próximo da cidade de Taquari.



Figura 7.10 Afloramento de grandes sets de estratificações cruzadas em cotas elevadas dificultando o armazenamento de águas subterrâneas. Afloramento na região de Unistalda, próximo ao Sistema de Falhas Jaguari - Mata.



Figura 7.12 *Meseta* conhecida como Cerro Palomas, cujo topo está protegido da erosão pela presença de camadas endurecidas da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, capeando as litologias da Unidade Hidroestratigráfica Guará. O afloramento situa-se próximo da cidade de Santana do Livramento.



Figura 7.13 A Unidade Hidroestratigráfica Botucatu caracteriza-se por sua uniformidade litológica conforme se pode ver nos afloramentos, feição confirmada pelos perfis geofísicos de poços e sondagens. Este afloramento com aspecto de muralha, pertence a uma pedreira no município de Santo Antônio da Patrulha.

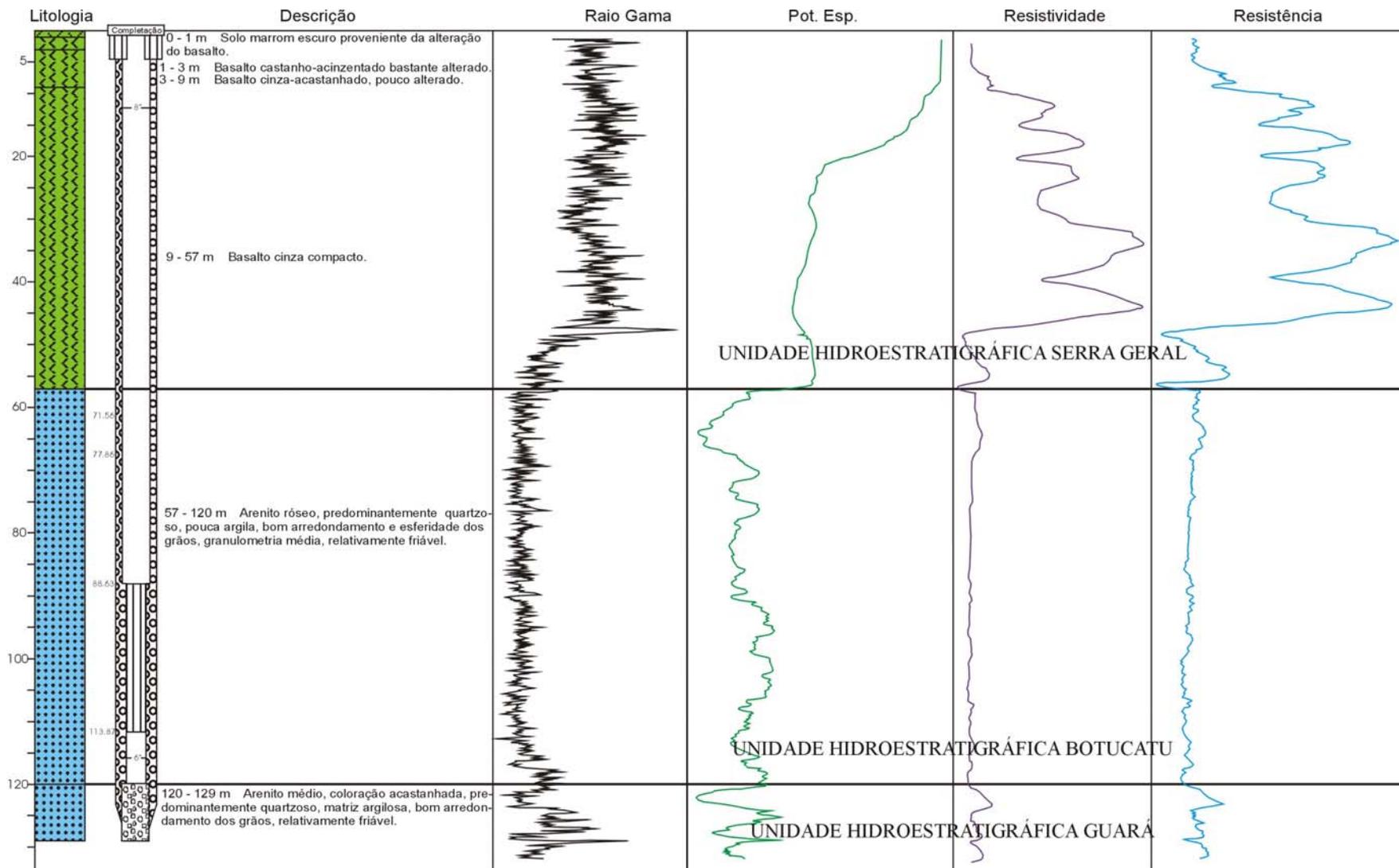


Figura 7.14 Poço tubular 9 QA - 01 – RS, em Quaraí, captando a Unidade Hidroestratigráfica Botucatu e mostrando a sua relação de teto e base com as Unidades Hidroestratigráficas Serra Geral e Guarani.

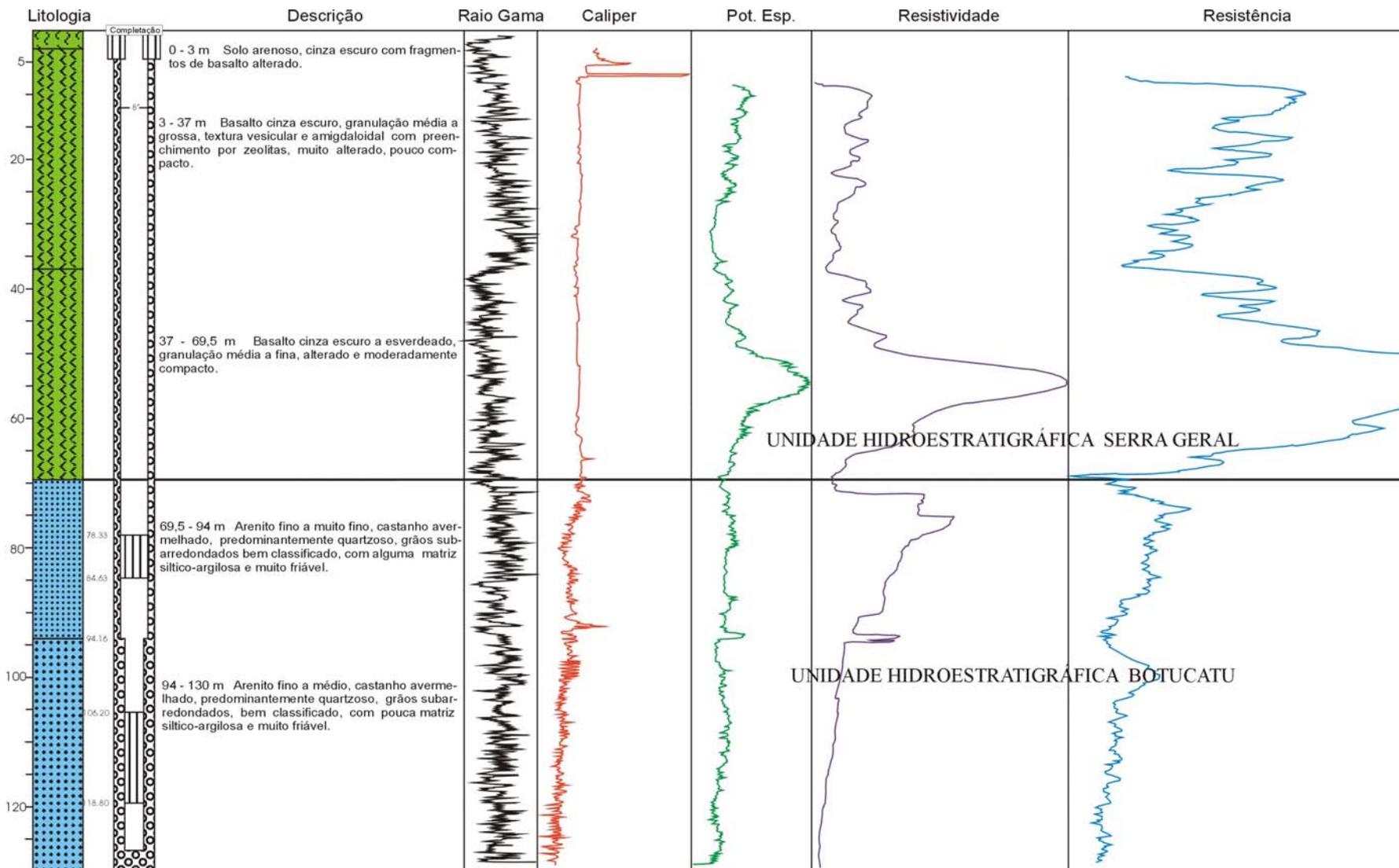


Figura 7.15 Poço tubular 9 TE - 02 - RS em Teutônia, captando a Unidade Hidroestratigráfica Botucatu mostrando a diferenciação na granulometria dos arenitos eólicos.

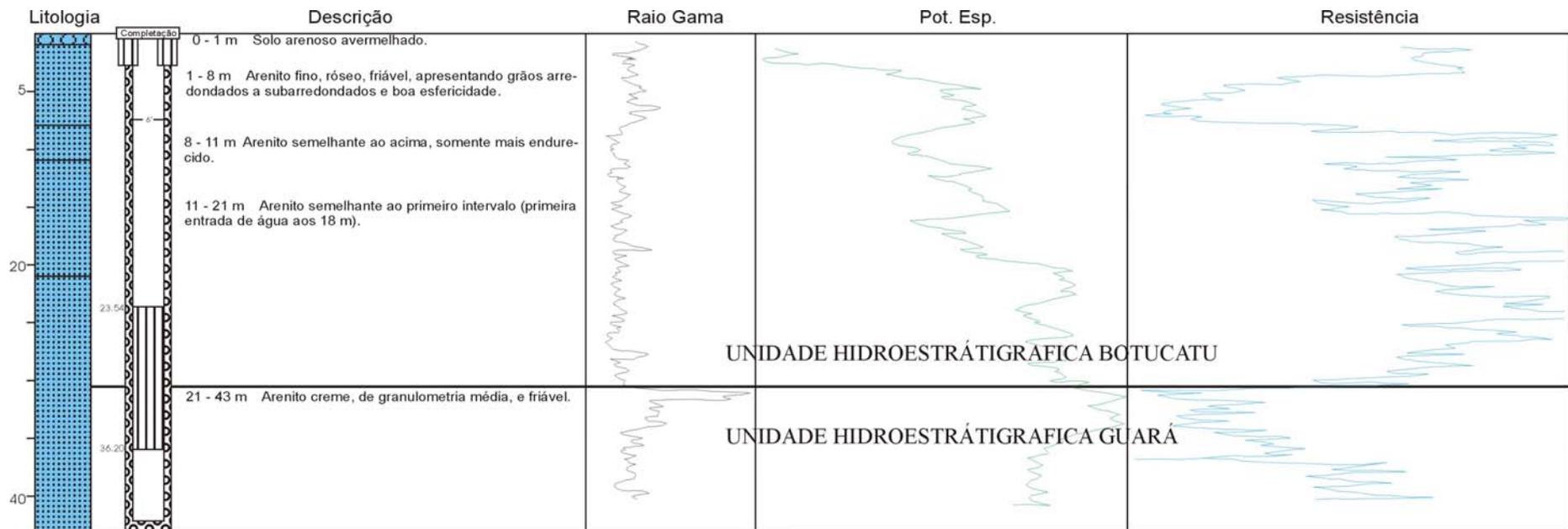


Figura 7.16 Poço tubular 7 SA - 01 - RS na vila Ernesto Alves de Santiago, captando as Unidades Hidroestratigráficas Botucatu e Guará, onde nota-se a maior porcentagem de argilas na segunda unidade.