

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM

**INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS PARA PROSPECÇÃO DE AQUIFEROS
FRATURADOS EM TRECHO DA BACIA HIDROGRÁFICA TAQUARI-ANTAS (RS)**

Pedro Antônio Roche Reginato

Tese para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia

Porto Alegre

2003

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM

**INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS PARA PROSPECÇÃO DE AQUÍFEROS
FRATURADOS EM TRECHO DA BACIA HIDROGRÁFICA TAQUARI-ANTAS (RS)**

Pedro Antônio Roche Reginato
Geólogo

Trabalho realizado no Laboratório de Modelagem Geológica e Ambiental (MODELAGE – DEMIN) da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa

Porto Alegre
2003

Esse trabalho foi julgado adequado como qualificação para tese de doutorado em Engenharia, área de concentração de Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Adelir Strieder

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Nelson A. Lisboa

Prof. Dr. Nelson L. Caicedo

Prof. Dr. Venerando E. Amaro

Prof. Dr. Carlos Artur Ferreira

Coordenador do PPGEM

Dedico esse trabalho

A minha esposa Joseni e a minha filha Pietra

Aos meus pais Sonia e João Carlos

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento e a elaboração dessa tese de doutorado só foi possível graças ao auxílio prestado por muitas pessoas e instituições. O autor registra seus sinceros agradecimentos a todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, em especial:

Ao Prof. Dr. Adelir José Strieder pela orientação dispensada em todas as etapas do trabalho, pela amizade, compreensão e pelo incentivo;

Ao colega e irmão geólogo Evandro Gottardo pelo auxílio nas diversas etapas de elaboração desse trabalho, pelas discussões, pelas motivações, e pelo apoio nos momentos de dificuldade;

À colega e geóloga Raquel B. Binotto pelo auxílio na obtenção dos dados e pelo incentivo;

À colega geóloga Débora G. Roldão pelo auxílio na etapa de interpretação dos dados estruturais, bem como, pelas matrículas realizadas;

Aos colegas professores da Universidade de Caxias do Sul, em especial aos Profs. Igino S. Damo, Bernardete S. Caprara, Sandro N. Soares, Vânia E. Schneider, Luciano A. Massoco, Odacir D. Graciolli, Ronaldo A. Wasun, Marcelo Rossato, Luciana Scur, Lademir L. Beal, Ana E. Costa, Paulo De Mori e Ivanira Falcade pelo incentivo prestado durante o desenvolvimento desse trabalho;

Aos colegas geólogos da CPRM Marcos A. de Freitas, José L. F. Machado pelo incentivo e discussões;

Ao colega geólogo Arnaldo Giardin pelo incentivo e discussões hidrogeológicas;

Ao amigo Eng. De Minas Fábio Boff, da FONTE NOVA, pelo incentivo, questionamentos e apoio no desenvolvimento desse trabalho;

Ao colega geólogo Paulo R. Zago, da HIDROPEL, pelas discussões, sugestões e incentivo;

Ao colega geólogo Cláudio Oliveira, da HIDROGEO, pelas discussões e incentivos;

Aos colegas do Laboratório de Modelagem Geológica e Ambiental pelo incentivo;

Aos bolsistas do Laboratório de Modelagem Geológica e Ambiental pelo auxílio nas etapas de digitalização;

A bióloga Juçara Bordin pelo auxílio e incentivo dispensados no decorrer do desenvolvimento desse trabalho;

Ao amigo Marcio Moretto pelo constante incentivo na elaboração desse trabalho;

A todos os familiares pelo incentivo, apoio e, principalmente, pela paciência na hora de suportar as tensões geradas com o desenvolvimento desse trabalho.

O autor manifesta ainda seus sinceros agradecimentos:

A Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade de Caxias do Sul pelos auxílios prestados para a elaboração desse trabalho;

A Companhia Riograndense de Saneamento, na pessoa do colega geólogo Carlos A. Heine pela cedência das fotografias aéreas e dados referentes aos poços tubulares;

Ao diretor do Programa de Açudes e Poços da Secretaria de Obras e Desenvolvimento do Estado do Rio Grande do Sul, pela cedência dos dados referentes aos poços tubulares;

Ao diretor do SAMAE pela cedência dos dados referentes aos poços tubulares;

A equipe de Agrometeorologia da FEPAGRO e do 8º Distrito de Meteorologia pela cedência dos dados climáticos;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Matérias (PPGEM), na pessoa de seu diretor Prof. Dr. Carlos A. Ferreira, pela oportunidade e pela compreensão;

A todas as pessoas da Secretaria do PPGEM e do DEMIN.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XV
LISTA DE MAPAS.....	XVII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XVIII
RESUMO.....	XIX
ABSTRACT.....	XXI
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Objetivos.....	2
1.2 – Localização da área de estudo.....	2
1.3 – Metodologia empregada.....	4
2 - ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DA REGIÃO.....	7
2.1 – Geomorfologia.....	7
2.2 – Vegetação.....	11
2.3 – Clima.....	13
2.4 – Ações antrópicas.....	16
3– GEOLOGIA REGIONAL.....	19
4– HIDROGEOLOGIA REGIONAL.....	23
4.1 - Hidrogeologia da bacia Taquari-Antas.....	25
4.1.1 – Formação Botucatu.....	25
4.1.2 – Formação Serra Geral.....	26
4.2 - Hidrogeologia da área de estudo.....	27
4.2.1 – Características gerais do sistema aquífero fraturado.....	30
4.2.2 – Hidrodinâmica do sistema aquífero fraturado.....	40
4.2.3 – Hidroquímica do sistema aquífero fraturado.....	63
5 – PROSPECÇÃO DE AQUÍFEROS FRATURADOS.....	76
5.1 - Conceituação de aquíferos fraturados.....	76
5.2 – Análise das pesquisas e métodos de prospecção.....	78
5.2.1 – Método da CORSAN.....	78
5.2.2 – Pesquisa de Takahashi.....	80
5.2.3 – Pesquisa de Mobus.....	81
5.2.4 – Pesquisa de Eilers.....	82
5.2.5 – Pesquisa de Martins.....	83
5.2.6 – Pesquisa da MAGNA.....	83
5.2.7 – Outros métodos e pesquisas.....	84
5.3 – Análise e discussão das pesquisas e métodos de prospecção.....	87

5.3.1 –Geologia estrutural.....	88
5.3.1.1 – Formação e caracterização de zonas de fraturas.....	88
5.3.1.2 – Evolução geomorfológica de zonas de fraturas.....	97
5.3.1.3 – Conceituação de lineamentos.....	102
5.3.1.4 – Extração de lineamentos.....	104
5.4.1.5 – Tratamento estatístico de lineamentos.....	106
5.3.2 – Dados geológicos e hidrogeológicos.....	112
6 – MÉTODO DE PROSPECÇÃO PROPOSTO PARA A ÁREA DE ESTUDO.....	114
6.1 - Fator padrão estrutural.....	115
6.1.1 – Geologia estrutural - dados de campo.....	115
6.1.1.1 - Análise geométrica.....	116
6.1.1.2 – Análise cinemática.....	139
6.1.1.3 – Análise dinâmica	145
6.1.2 – Geologia estrutural – análise dos lineamentos.....	150
6.1.2.1 – Extração dos lineamentos.....	150
6.1.2.2 – Tratamento estatístico dos lineamentos.....	152
6.1.2.3 – Análise dos resultados.....	163
6.2 - Fator relevo.....	164
6.3 - Fator litologia.....	167
6.4 - Fator solo.....	182
6.5 – Fator cadastro dos poços.....	184
7 - PROCESSOS DE INTEGRAÇÃO DE DADOS.....	186
7.1 – Conceitos gerais sobre integração de dados.....	186
7.1.1 – Modelo conceitual.....	188
7.1.2 – Banco de dados.....	190
7.1.3 – Processamento de dados.....	191
7.1.4 – Integração de dados.....	191
7.2 – O modelo conceitual para a área de estudo.....	193
7.3 – Estruturação do banco de dados.....	196
7.4 – Processamento e integração dos dados.....	208
7.4.1 – Processamento e geração de novos PIs.....	211
7.4.2 – Integração: medidas de classes e tabulações cruzadas.....	214
7.4.3 – Integração: análise e suporte à decisão.....	219
7.4.4 – Análise dos resultados da integração dos dados.....	233
8 – CONCLUSÕES.....	240
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	248

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo.....	3
Figura 2 – Fluxograma da metodologia empregada com as etapas de trabalho desenvolvidas e suas relações.....	4
Figura 3 – Regiões (A) e unidades geomorfológicas (B) do estado do Rio Grande do Sul e da área de estudo.....	8
Figura 4 – Províncias hidrogeológicas da Formação Serra Geral.....	24
Figura 5 – Janela de entrada do programa CADPO.....	32
Figura 6 – Dados de identificação dos poços tubulares.....	32
Figura 7 – Dados de localização dos poços tubulares.....	33
Figura 8 – Dados construtivos dos poços tubulares.....	33
Figura 9 – Dados hidrogeológicos dos poços tubulares.....	34
Figura 10 – Dados sobre perfil litológico dos poços tubulares.....	34
Figura 11 – Dados referentes à análise química das águas subterrâneas.....	35
Figura 12 – Janela da função consulta geral do programa CADPO.....	35
Figura 13 – Parte da janela de consulta geral referente aos dados técnicos, construtivos e hidrogeológicos do programa CADPO.....	36
Figura 14 – Janela de consulta geral referente aos dados sobre análise química do programa CADPO.....	36
Figura 15 – Caracterização das entradas de água: (a) número de entradas de água identificadas na análise dos poços tubulares; (b) relação entre o número de entradas de água com a profundidade.....	42
Figura 16 – Relação entre a localização do nível estático com a profundidade dos poços tubulares.....	43
Figura 17 – Dados hidrogeológicos da região de Antônio Prado: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.....	45
Figura 18 – Dados hidrogeológicos da região de Bento Gonçalves: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.....	47
Figura 19 – Dados hidrogeológicos da região de Caxias do Sul: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.....	48
Figura 20 – Dados hidrogeológicos da região de Cotiporã: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.....	50
Figura 21 – Dados hidrogeológicos da região de Farroupilha: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.....	51
Figura 22 – Dados hidrogeológicos da região de Flores da Cunha: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.....	53
Figura 23 – Dados hidrogeológicos da região de Monte Belo do Sul: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.....	54
Figura 24 – Dados hidrogeológicos da região de Nova Pádua: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.....	56

Figura 25 – Dados hidrogeológicos da região de Nova Roma do Sul: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.....	57
Figura 26 – Dados hidrogeológicos da região de São Marcos: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.....	59
Figura 27 – Dados hidrogeológicos da região de Veranópolis: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.....	60
Figura 28 – Relação entre os intervalos das vazões e as diferentes regiões de estudo.....	61
Figura 29 – Relação entre os valores de transmissividade média e as diferentes regiões de estudo.	62
Figura 30 – Relação entre os valores médios das capacidades específicas e as diferentes regiões de estudo.....	62
Figura 31 – Classificação das águas subterrâneas de toda a área de estudo. As diferentes colorações adotadas para as amostras correspondem às diferentes regiões (137 amostras).....	66
Figura 32 – Classificação das águas subterrâneas - região de Bento Gonçalves (37 amostras).....	68
Figura 33 – Classificação das águas subterrâneas - região de Caxias do Sul (6 amostras).....	69
Figura 34 – Classificação das águas subterrâneas - região de Cotiporã (4 amostras).	69
Figura 35 – Classificação das águas subterrâneas - região de Farroupilha (33 amostras).....	70
Figura 36 – Classificação das águas subterrâneas - região de Flores da Cunha (25 amostras).....	70
Figura 37 – Classificação das águas subterrâneas - região de Nova Pádua (9 amostras).....	71
Figura 38 – Classificação das águas subterrâneas - região de Nova Roma do Sul (6 amostras).....	71
Figura 39 – Classificação das águas subterrâneas - região de São Marcos (13 amostras).....	72
Figura 40 – Classificação das águas subterrâneas - região de Veranópolis (4 amostras).....	72
Figura 41 – Distribuição das análises químicas que apresentaram excesso de Ferro e Manganês e sua relação com as diferentes regiões de estudo.....	74
Figura 42 – Estágios de deformação que um maciço rochoso pode desenvolver (Hobbs <i>et al.</i> , 1976).....	89
Figura 43 – Mudança de comportamento dos materiais geológicos de acordo com as diferentes condições a que são submetidos os maciços rochosos (modificado de Hobbs <i>et al.</i> , 1976).....	89
Figura 44 – Condições de tensão durante a formação de fraturas: (a) fraturas de extensão, (b) fraturas de cisalhamento, (c) três classes de juntas híbridas. Os círculos seqüenciais de Mohr em (d) representa o processo de formação das fraturas (modificado de Dune & Hancock, 1994).....	91
Figura 45 – Sistemas de juntas neotectônicas: (a) um sistema simples de juntas de extensão vertical unidas por juntas cruzadas não sistemáticas (finas); (b) um conjunto de juntas sistemáticas compreendendo fraturas de extensão verticais e fraturas conjugadas com um ângulo diedro de menos que 45°; (c) um conjunto de juntas compreendendo fraturas de extensão vertical e fraturas conjugadas verticais com ângulo diedro menor que 45°.....	92
Figura 46 – Diferentes estágios de tensões que um corpo rochoso pode apresentar quando é soerguido por fenômenos epigenéticos ou isostáticos. Dois estágios de formação de fraturas são característicos: 1) a meia profundidade, quando a tensão máxima ainda está na horizontal e a falha resultante é do tipo transcorrente (cisalhamento), e 2) outro na zona mais superficial, onde há um alívio total de uma das tensões horizontais e são formadas as fraturas longitudinais.	94

Figura 47 – Representação do método dos diedros retângulos de Angelier & Mechler (1977). Em (a) está representado o traçado do plano de fratura, do indicador cinemático e sentido de movimento, o plano auxiliar e os quatro setores equivalentes (as regiões de compressão são pintadas de preto e as de extensão de branco). Em (b) a superposição dos diagramas de várias medidas possibilita uma determinação estatística das possíveis localizações dos eixos de tensão.....	95
Figura 48 – Padrões de traços de fraturas descritos por letras conforme Dunne & Hancock (1994).....	98
Figura 49 – Zonas de fratura: (a) larguras aparentes de zonas de fraturas identificadas por traços de fraturas impressos na superfície; (b) variações dos aspectos estruturais associados a zonas de fraturas (modificado de Schrader, 1992).....	98
Figura 50 – Drenagens retilíneas desenvolvidas sobre zonas de fratura (Schrader, 1992).....	99
Figura 51 – Esquema evolutivo de zonas de fraturas numa seqüência de derrames vulcânicos da Formação Serra Geral.....	100
Figura 52 - Mapa com as superfícies de tendência de terceiro grau calculadas para a densidade de lineamentos (Takahashi <i>et al.</i> , 1993).....	108
Figura 53 - Mapa com as superfícies de tendência calculadas para a orientação dos lineamentos (Takahashi <i>et al.</i> , 1993).....	108
Figura 54 - Análise de Vetores: (A) Representação de um ângulo θ formado pelo vetor unitário <i>OP</i> e pelo vetor <i>OPI</i> ; (B) Demonstração gráfica da magnitude de um vetor, onde vetores com direções próximas geram um vetor resultante longo; (C) Demonstração gráfica da magnitude de um vetor onde vetores com direções diferentes geram um vetor resultante menor; (D) decomposição de um vetor segundo o sistema de referências geográficas (Cunha 1996).....	110
Figura 55 – Histograma de freqüência circular das medidas dos planos de fraturas do setor São Marcos.....	117
Figura 56 – Histograma de freqüência circular das medidas dos planos de conjugados de fraturas do setor São Marcos.....	117
Figura 57 – Histograma de freqüência circular das medidas de fraturas com preenchimento de zeolitas do setor São Marcos.....	117
Figura 58 – Histograma de freqüência circular das medidas de fraturas com preenchimento com sílica do setor São Marcos.....	118
Figura 59 – Histograma de freqüência circular das medidas das zonas de fraturas do setor São Marcos.....	118
Figura 60 – Croqui com a geometria dos sistemas de veios encontrados no setor São Marcos (afloramento 3 - UTM490361mE e 6788183mN).....	118
Figura 61 – Geodo e sistemas de veios conectados no setor São Marcos (afloramento 3 - UTM490361mE e 6788183mN).....	120
Figura 62 – Croqui com a geometria dos sistemas de veios encontrados no setor São Marcos (afloramento 3 - UTM490361mE e 6788183mN).....	120
Figura 63 – Histograma de freqüência circular das medidas de planos de fraturas do setor Caxias do Sul.....	121
Figura 64 – Histograma de freqüência circular das medidas dos planos com preenchimento (zeolitas e sílica) do setor Caxias do Sul.....	121
Figura 65 – Histograma de freqüência circular das medidas das zonas de fraturas no setor Caxias do Sul.....	121
Figura 66 – Croqui com a geometria dos sistemas de veios e diques encontrados no Setor Caxias do Sul (afloramento Pedreira Guerra – UTM 479040mE e 6770126mN).....	122
Figura 67 – Histograma de freqüência circular das medidas dos planos formados por diques no setor Caxias do Sul.....	122

Figura 68 - Croqui com a geometria dos sistemas de veios e diques encontrados no Setor Caxias do Sul (afloramento Pedreira Guerra – UTM 478896mE e 6770124mN).....	122
Figura 69 – Croqui dos diques com brecha (afloramento Pedreira Guerra – UTM 478896mE e 6770124mN).....	123
Figura 70 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fratura do setor Antônio Prado.....	123
Figura 71 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fratura preenchidos (zeolita e sílica) do setor Antônio Prado.....	123
Figura 72 – Histograma de frequência circular das medias das zonas de fraturas do setor Antônio Prado.....	124
Figura 73 – Zona de Fratura no setor Antônio Prado (afloramento 5 – UTM 483093mE e 6797464mN).....	125
Figura 74 – Zona de fratura no setor Antônio Prado (afloramento 5 – UTM – 483160mE e 6797425mN).....	125
Figura 75 – Terceira zona de fratura no setor Antônio Prado (afloramento 5 – UTM – 483215mE e 6797331mN).....	126
Figura 76 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fraturas do setor Nova Roma.....	127
Figura 77 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fraturas preenchidos por zeolitas no setor Nova Roma.....	127
Figura 78 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fraturas preenchidos por sílica no setor Nova Roma.....	127
Figura 79 – Histograma de frequência circular das medidas de zonas de fraturas no setor Nova Roma.....	130
Figura 80 – Zona de fratura que limita as brechas vulcânicas e os riodaciotos no setor Nova Roma (afloramento 16 – UTM 460008mE e 6787270mN).....	130
Figura 81 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fratura do setor Farroupilha.....	131
Figura 82 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos ortogonais do setor de Farroupilha.....	131
Figura 83 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fratura preenchidos por zeolitas e quartzo do setor Farroupilha.....	131
Figura 84 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fraturas do setor Veranópolis.....	132
Figura 85 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fraturas preenchidos por zeolitas do setor Veranópolis.....	132
Figura 86 – Croqui com a geometria e orientação dos planos ortogonais do setor Veranópolis.....	132
Figura 87 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fraturas preenchidos por sílica do setor Veranópolis.....	133
Figura 88 – Histograma de frequência circular das medidas das zonas de fraturas do setor Veranópolis.....	133
Figura 89 – Zona de fratura do setor Veranópolis (afloramento 5 – UTM – 444875mE e 6788804mN).....	133
Figura 90 – Detalhe da zona de fratura do setor Veranópolis (afloramento 5 – UTM – 444875mE e 6788804mN).....	134
Figura 91 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos conjugados de veios no setor Veranópolis.....	134
Figura 92 – Croqui com a geometria dos sistemas de veios do setor Veranópolis (afloramento 3 – UTM 444898mE e 6788518mN).....	135

Figura 93 – Croqui com a geometria dos veios do setor Veranópolis (afloramento 6 – UTM 445435mE e 6790372mN).....	135
Figura 94 – Planos de fraturas e veios associados com brecha hidrostática do setor Veranópolis (Afloramento 1 – UTM 444940mE e 6787328mN e Afloramento 9 – UTM 445264mE e 6790645mN).....	136
Figura 95 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fraturas do setor Bento Gonçalves.....	137
Figura 96 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de veios do setor Bento Gonçalves.....	137
Figura 97 – Diques de arenito cortando os basaltos no setor Bento Gonçalves (Afloramento 1 – UTM 444531mE e 6786487mN).....	137
Figura 98 – Dique de diabásio cortando a seqüência de rochas vulcânicas ácidas no setor Bento Gonçalves.....	138
Figura 99 – Detalhe do contato do dique com a rocha encaixante.....	138
Figura 100 - Histograma de frequência das cinco medidas utilizadas e resultado da análise cinemática.....	140
Figura 101 - Histograma de frequência das medidas utilizadas e resultado da análise cinemática.....	141
Figura 102 - Histograma de frequência das medidas utilizadas e resultado da análise cinemática.....	142
Figura 103 - Histograma de frequência das medidas utilizadas e resultado da análise cinemática.....	143
Figura 104 - Histograma de frequência das medidas utilizadas e resultado da análise cinemática.....	144
Figura 105 – Histograma de frequência circular do total das medidas dos planos de fraturas do Perfil Caxias do Sul – São Marcos.....	147
Figura 106 - Histograma de frequência das medidas utilizadas e resultado da análise cinemática do campo tensional resultante 1.....	148
Figura 107 - Histograma de frequência circular com os 4154 lineamentos obtidos na fotointerpretação.....	152
Figura 108 - Histograma de frequência circular com os lineamentos do Grupo 1.....	154
Figura 109 - Histograma de frequência circular com os lineamentos de cada setor do Grupo 1.....	155
Figura 110 - Histograma de frequência circular com os lineamentos do Grupo 2.....	156
Figura 111 - Histograma de frequência circular com os lineamentos de cada setor do Grupo 2.....	157
Figura 112 - Histograma de frequência circular com os lineamentos do Grupo 3.....	159
Figura 113 - Histograma de frequência circular com os lineamentos de cada setor do Grupo 3.....	160
Figura 114 - Histograma de frequência circular com os lineamentos do Grupo 4.....	161
Figura 115 - Histograma de frequência circular com os lineamentos de cada setor do Grupo 4.....	162
Figura 116 – Modelo digital de elevação do relevo da área de estudo (elaborado por meio do mapa digital com o programa SPRING).....	165
Figura 117 – Basaltos da Formação Serra Geral: (a) rocha com bandamento mineralógico (afloramento 1 do perfil Bento Gonçalves-Veranópolis; (b) basalto vesicular a amigdalóide com orientação das estruturas (afloramento 1 do perfil Caxias do Sul – Antônio Prado – UTM 481597mE e 6798215mN).....	169
Figura 118 – Riodacitos da seqüência ácida (afloramento 15 do perfil Bento Gonçalves-Veranópolis).....	171

Figura 119 – Brecha hidrostática desenvolvida sobre rochas vulcânicas de estrutura maciça (afloramento 9 – Perfil Bento Gonçalves-Veranópolis).....	171
Figura 120 – Brechas vulcânicas associadas a porção basal e mediana da seqüência de rochas vulcânicas básicas. (a) afloramento 28 do perfil Farroupilha - Nova Roma; (b) afloramento 3 do perfil Caxias do Sul – Antônio Prado.....	172
Figura 121 – Brechas vulcânicas associadas às porções de topo da seqüência básica: (a) brecha associada a basalto vesicular a amigdalóide (afloramento 8 – perfil Caxias do Sul – São Marcos); (b) brecha com fragmentos de rocha vesicular a amigdalóide (afloramento 11 – Perfil Farroupilha – Nova Roma).....	173
Figura 122 – Vidros vulcânicos da seqüência de rochas vulcânicas ácidas: (a) na base há um pacote de vitrófiros e no topo ocorrem rochas vulcânicas com geodos centimétricos (afloramento 11 – Perfil Caxias do Sul – São Marcos); (b) intercalação de vidro vulcânico no topo, com arenitos recozidos na base (afloramento 14 – Perfil Farroupilha – Nova Roma)..	174
Figura 123 – Representação esquemática das colunas estratigráficas da seqüência básica e ácida dos setores ao norte do Rio das Antas.....	176
Figura 124 – Representação esquemática das colunas estratigráficas da seqüência básica e ácida dos setores ao sul do Rio das Antas.....	177
Figura 125 – Pacotes de rochas vulcânicas vesiculares e amigdalóides: (a) zona de rochas vulcânicas vesiculares a amigdalóides na base associadas a zona basal (afloramento 23 – perfil Farroupilha – Nova Roma); (b) zona vesicular a amigdalóide (grau médio de alteração) associada a zona basal maciça (basalto no canto superior direito – afloramento 3 – perfil Bento Gonçalves – Veranópolis).....	179
Figura 126 – Contato entre a zona de rochas vesiculares e amigdalóides com a zona maciça: (a) afloramento 15 do perfil Caxias do Sul – São Marcos; (b) afloramento 29 do perfil Farroupilha – Nova Roma.....	180
Figura 127 – Contato entre zonas vesiculares a amigdalóides: (a) Contato entre rochas com vesículas e amigdalas (base), rocha vesicular a amigdalóide (meio) e zona maciça (topo). Na camada do meio há a ocorrência de uma fonte (afloramento 3 – Perfil Caxias do Sul – Farroupilha); (b) contato entre zonas: na base ocorrem rochas vesiculares a amigdalóides, no meio camadas de brechas vulcânicas e no topo zona constituída por basaltos maciços.....	181
Figura 128 - Fluxograma com as etapas a serem seguidas no processo de implantação e desenvolvimento de uma ferramenta SIG.....	189
Figura 129 - Fluxograma com as etapas do modelo conceitual proposto para a área de estudo.....	195
Figura 130 – Janela contendo as informações do banco de dados ativos para trabalho no SPRING.....	198
Figura 131 – Janela com as informações sobre o projeto ativo, bem como os dados utilizados para georeferenciamento dos dados.....	199
Figura 132 – Janela com as informações sobre as categorias geradas e suas classificações (Temático, MNT, Imagem, etc.).....	199
Figura 133 – Janela do SPRING contendo as informações sobre os planos de informações existentes.....	200
Figura 134 – Janela do SPRING denominada de Painel de Controle onde são gerenciados os diferentes PIs.....	200
Figura 135 – Janela da rotina Suporte a Decisão (AHP) do programa SPRING.....	220
Figura 136 - Janela da rotina Suporte a Decisão (AHP) do programa SPRING.....	223

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Lista das espécies mais comuns associadas à vegetação de pinheiro (Vieira, 1984).....	12
Tabela II - Lista das espécies mais comuns associadas à Floresta Estacional Decidual (Vieira, 1984).....	12
Tabela III – Classificação climática da região nordeste, segundo Maluf (1999).....	13
Tabela IV– Dados meteorológicos utilizados para classificação climática (Maluf, 1999).....	14
Tabela V – Dados climáticos das quatro estações meteorológicas existentes na área de estudo. Os valores apresentados correspondem às médias obtidas na interpretação da série de 10 anos.....	15
Tabela VI - Dados hidrogeológicos para os aquíferos pertencentes à divisão hidrogeológica da Bacia do Paraná (Rebouças, 1988).....	23
Tabela VII – Análise química de dois poços cacimba da região de Nova Prata.....	29
Tabela VIII – Situação atual dos poços tubulares na região de estudo.....	37
Tabela IX – Distribuição em porcentagem das ocorrências de tipos diferentes de águas e suas relações com as diferentes regiões da área de estudo.....	68
Tabela X - Correlação entre os fatores condicionantes do aquífero fraturado e alguns parâmetros hidrogeológicos.....	78
Tabela XI - Resumo dos métodos de prospecção com os principais dados empregados e a fonte utilizada para a obtenção dos lineamentos.....	87
Tabela XII – Propriedades geométricas dos quadrantes e valores correspondentes de “q” que devem ser considerados no cálculo do azimute médio ($\bar{\alpha}_m$) de dados bidimensionais.....	111
Tabela XIII – Conjunto de fraturas com estrias utilizadas para análise cinemática e sua relação com os perfis e setores de levantamento.....	139
Tabela XIV – Fraturas e indicadores cinemáticos utilizados para análise (pedreira Guerra).140	
Tabela XV - Medidas utilizadas para análise cinemática (pedreira Codeca 1).....	141
Tabela XVI - Medidas utilizadas para análise cinemática (pedreira Codeca 2).....	142
Tabela XVII - Medidas utilizadas para análise cinemática (Tega).....	143
Tabela XVIII - Medidas utilizadas para análise cinemática (Veranópolis).....	144
Tabela XIX – Resumo da análise geométrica das estruturas identificadas nos perfis.....	146
Tabela XX - Orientação dos campos tensionais identificados na análise cinemática e relação dos dois campos resultantes.....	148
Tabela XXI - Fórmulas utilizadas na conversão de valores de azimute trigonométrico para valores de azimute geográfico.....	152
Tabela XXII – Resultado do tratamento estatístico vetorial dos lineamentos do grupo 1.....	154
Tabela XXIII – Resultado do tratamento estatístico vetorial dos lineamentos do grupo 2.....	158
Tabela XXIV – Resultado do tratamento estatístico vetorial dos lineamentos do grupo 3.....	159
Tabela XXV – Resultado do tratamento estatístico vetorial dos lineamentos do grupo 4.....	161
Tabela XXVI – Associações de classes de solo existentes na região e as unidades amostrais correspondentes.....	182
Tabela XXVII - Necessidades típicas das funções de geoprocessamento em diversas aplicações (Câmara, 1994).....	187
Tabela XXVIII - Planos de informações necessários para o desenvolvimento do estudo, com a divisão em dados a serem obtidos e suas respectivas fontes.....	194
Tabela XXIX – Categorias e diferentes planos de informações gerados no SPRING para desenvolvimento dos processos de integração.....	201
Tabela XXX – Área das diversas classes que constituem os diferentes PIs e sua distribuição em porcentagem com relação à área total.....	214

Tabela XXXI – Relação de ocorrência entre as classes do PI solo e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).....	216
Tabela XXXII – Relação de ocorrência entre as classes do PI Geologia e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).....	217
Tabela XXXIII – Relação de ocorrência entre as classes de declividade e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).....	217
Tabela XXXIV – Relação de ocorrência entre as classes do PI fraturas e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).....	218
Tabela XXXV – Relação de ocorrência entre o PI cruzamento e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).....	222
Tabela XXXVI – Relação de ocorrência entre as classes do PI prospecção4 e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).....	226
Tabela XXXVII – Relação de ocorrência entre as classes do PI arealocacao1 (estruturas nordeste) e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).....	231
Tabela XXXVIII – Relação de ocorrência entre as classes do PI arealocacao2 (estruturas noroeste) e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).....	231
Tabela XXXIX – Relação de ocorrência entre as classes do PI arealocacao3 (estruturas lesteoeste) e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).....	232
Tabela XL – Relação de ocorrência entre as classes do PI arealocacao4 (estruturas nortesul) e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).....	232
Tabela XLI – Correlação entre poços tubulares produtivos (diferentes vazões) e as orientações dos diferentes grupos de lineamentos.....	236
Tabela XLII – Correlação entre poços tubulares produtivos (diferentes vazões) e os comprimentos dos lineamentos.....	239

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 – MAPA GEOLÓGICO REGIONAL.....	22
Mapa 2 – MAPA DOS LINEAMENTOS.....	203
Mapa 3 – MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO.....	204
Mapa 4 – MAPA PEDOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO.....	206
Mapa 5 – MAPA DA LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS TUBULARES CADASTRADOS NA ÁREA DE ESTUDO.....	207
Mapa 6 – MAPA DA DRENAGEM DA ÁREA DE ESTUDO.....	209
Mapa 7 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS MUNICÍPIOS E SISTEMA VIÁRIO.....	210
Mapa 8 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	212
Mapa 9 – CLASSES DE DECLIVIDADE	213
Mapa 10 – MAPA DOS CRUZAMENTOS DE FRATURAS.....	221
Mapa 11 – MAPA DE FAVORABILIDADE À OCORRÊNCIA DE AQUÍFEROS FRATURADOS SEGUNDO OS CONDICIONANTES SECUNDÁRIOS.....	225
Mapa 12 – MAPA DE FAVORABILIDADE À OCORRÊNCIA DE AQUÍFEROS FRATURADOS PARA OS LINEAMENTOS NORDESTE.....	227
Mapa 13 – MAPA DE FAVORABILIDADE À OCORRÊNCIA DE AQUÍFEROS FRATURADOS PARA OS LINEAMENTOS NOROESTE.....	228
Mapa 14 – MAPA DE FAVORABILIDADE À OCORRÊNCIA DE AQUÍFEROS FRATURADOS PARA OS LINEAMENTOS LESTE OESTE.....	229
Mapa 15 – MAPA DE FAVORABILIDADE À OCORRÊNCIA DE AQUÍFEROS FRATURADOS PARA OS LINEAMENTOS NORTESUL	230

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Fig. – Figura
Tab. - Tabela
Fm - Formação
m – metro
cm – centímetro
mm – milímetro
km – quilômetro
km² – quilômetro quadrado
° C – graus Célcus
° - graus
% - porcentagem
Ma – milhões de anos
mg/l – miligramas por litro
m²/seg – metros quadrados por segundo
m/seg – metros por segundo
TDS – sólidos totais dissolvidos
UFC/ml – unidades de coliformes fecais por mililitro
UTM – sistema universal transversal de Mercator
CADPO – cadastro de poços
Tm – transmissividade média
q – capacidade específica
m³/h – metro cúbico por hora
m²/h – metro quadrado por hora
m³/h/m – metro cúbico por hora por metro
NE – nível estático
N – norte
S – sul
E – leste
W – oeste
NS – norte-sul
EO – leste-oeste
NO – noroeste
NE – nordeste
SE – sudeste
SW - sudoeste

RESUMO

A presente tese de doutoramento tem por objetivo determinar os condicionantes geológicos do sistema aquífero fraturado e a caracterização desse sistema, por meio da integração de dados em ambientes de Sistemas de Informações Georreferenciadas (SIGs). Além disso, busca introduzir uma nova perspectiva de levantamento, tratamento e análise de dados de estruturas deformacionais (zonas de fratura) aplicada à prospecção de aquíferos fraturados. A área de estudo localiza-se em parte da bacia hidrográfica Taquari-Antas, na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul.

O sistema aquífero fraturado da região de estudo está hospedado em rochas vulcânicas da Fm. Serra Geral (Bacia do Paraná) e é aproveitado para abastecimento público e para o desenvolvimento de atividades industriais, agrícolas e recreativas. O sistema aquífero fraturado consiste num sistema descontínuo, heterogêneo e anisotrópico, caracterizado pela ocorrência de vazões variáveis (72,1% dos poços tubulares apresentam vazões abaixo de 10 m³/h), transmissividade e capacidades específicas baixas. As características hidrogeoquímicas das águas subterrâneas desse sistema aquífero estão condicionadas pela litogeoquímica das rochas percoladas e secundariamente por controles tectônicos e morfoestruturais responsáveis pela comunicação entre diferentes sistemas aquíferos e a conseqüente mistura das águas subterrâneas.

O padrão de estruturas deformacionais (zonas de fratura) é o condicionante de maior importância. Esse padrão foi caracterizado por meio de lineamentos tipo 2, representados por fraturas, zonas de fraturas, veios e diques. Esse padrão resultou da atuação de dois campos paleotensionais distintos que apresentam orientação ortogonal entre si. Dessa forma, diferentes sub-regiões apresentam comportamentos distintos com relação ao padrão estrutural existente. Os fatores relevo, solos e litologia são condicionadores secundários do sistema aquífero fraturado. As relações apresentadas por esses fatores com o sistema aquífero fraturado estão associadas ao grau de dissecação do relevo, à declividade, aos tipos e espessuras de solos, bem como, aos tipos litológicos e estruturas primárias associadas.

A integração de dados envolveu o cruzamento dos diferentes condicionantes geológicos por meio de rotinas de tabulação cruzada, medidas de classes e técnicas de suporte à decisão disponíveis no programa SPRING. Com essa integração, foram obtidos mapas de favorabilidade à ocorrência de aquíferos fraturados. As áreas que apresentam lineamentos

associados a relevos com baixo grau de dissecação, baixas declividades (inferiores a 30%), solos de espessura média a alta do tipo Podzólico, Cambissolo e Litossolos, possuem as maiores correlações com poços tubulares produtivos. Com relação aos lineamentos, foi verificado que i) os lineamentos noroeste de orientações N30 – 40W e N50 – 60W estão associadas as maiores vazões (acima de 20 m³/h); ii) os lineamentos nordeste de orientações N20 - 30E e N40 - 50E também estão associados a vazões acima de 20 m³/h; iii) os lineamentos norte-sul de maiores vazões estão na orientação N00 – 14E; e iv) os lineamentos leste-oeste de maior produção estão orientados segundo N80 – 90W.

A análise dos condicionantes geológicos e dos produtos obtidos pela integração de dados mostra que as diferentes regiões que formam a área de estudo apresentam comportamentos diferenciados. Dessa forma, o modelo prospectivo proposto para a área de estudo pode ser dividido em duas etapas: i) levantamento estrutural da região e ii) caracterização dos condicionantes secundários. Com o desenvolvimento dessas duas etapas, há uma maior tendência da obtenção de poços tubulares produtivos.

ABSTRACT

The present doctoring thesis aims to determine the geologic contingents from the fractured aquiferous system and its characterization, through data integration in environments of Georelated Information Systems (GIS). Furthermore, wants to introduce a new survey perspective, treatment and analysis of deformed structures (fractured zones) applied to fractured aquiferous prospection. The area of study is located in the Taquari – Antas hydrographic basin, in the Northeast region of the state of Rio Grande do Sul.

The fractured aquiferous system of the area of study is hosted on volcanic rocks from Fm. Serra Geral (Paraná Basin) and it has been currently used for public provision and for recreational, agricultural and industrial activities development. The fractured aquiferous system consists of a discontinuous, heterogeneous and anisotropic system characterized by the occurrence of varied outflows (72,1% of tubular wells present outflows below 10 m³/h), transmissivity and specific capabilities. The hydrogeochemical characteristics of underground waters of this aquiferous system have been conditioned by the lithochemistry of percolated rocks and secondly by tectonic and morphstructural controls responsible for the communication between different aquiferous systems and the consequent mixture of underground waters.

The pattern of deforming structures (fractured zones) is the most important contingent. Such pattern has been characterized through lineaments type 2, represented by fractures, fracture zones, veins and dikes. This pattern has resulted from the action of two distinct paleontologic fields that present orthogonal orientation between them. Thus, different subregions present distinct behaviours in relation to the current structural pattern. Relief factors, soils and lithology are secondary contingents from the fractured aquiferous system. The connections presented by these factors to the fractured aquiferous system have been associated to the degree of relief dissection, to declivity, to soil types and density, as well as to lithologic types and associated primary structures.

Data integration have entwined the hybridization/ crossing of different geologic contingents through the practice of mixed tabulation, class measurements and support techniques to the decision available on SPRING program. Along with this integration propitiatory maps to the occurrence of fractured aquiferous have been obtained. Areas that present associated lineaments to reliefs with low degree of dissection, low declivity (inferior

to 30%), average to high density soils Podzolic, Cambissoil and Lithosoil types, hold the strongest correlation to productive tubular wells. In relation to lineaments it has been ascertained that i) northwest lineaments orientation N30 - 40W and N50 - 60W are associated to larger outflows (above 20 m³/h); ii) northeast lineaments orientation N20 - 30E and N40 - 50E are also associated to outflows above 20 m³/h; iii) north-south lineaments with major outflows are located in orientation N00 – 14E; and iv) east-west lineaments with major production are orientated according to N80 – 90W.

The geologic contingents and products obtained by data integration analysis shows that the different regions that form the area of study present distinguished behaviours. Thus, the proposed prospective model to the area of study may be divided into two stages: i) structural survey of the region and ii) characterization of the secondary contingents. By developing those two stages there is a greater tendency to obtaining productive tubular wells.

1 - INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos de uma região, superficiais e subterrâneos, caracterizam importantes reservas, imprescindíveis para o desenvolvimento populacional, econômico e industrial de qualquer município, estado ou país. Com o aumento populacional e o desenvolvimento de novas indústrias, faz-se cada vez mais necessária a utilização de maiores quantidades desses recursos que, devido ao desperdício e à poluição (ligada, principalmente às atividades de urbanização, desenvolvimento industrial, práticas agrícolas e extração mineral; Foster *et al.*, 1993), estão se tornando mais escassos. Desse modo, deve-se urgentemente desenvolver uma política de gestão de águas que vise à proteção desses recursos, pois a saúde, bem estar do homem, garantia de alimentos, desenvolvimento industrial e equilíbrio dos ecossistemas estão relacionados com a abundância ou a falta de água (Rocha, 1994).

Os recursos hídricos subterrâneos estão sendo mais utilizados, visto que há dificuldades, em algumas regiões, da disponibilidade de recursos superficiais, bem como de seu aproveitamento, devido a problemas com a estocagem e o tratamento dessas águas. Aliado a esses fatos, há o custo de produção, relativamente baixo, e a excelente qualidade das águas subterrâneas, que justificam a sua exploração para suprimento de água potável (Foster *et al.*, 1993). Outras vantagens estão associadas com o fato de que a exploração adequada dos aquíferos não provoca impacto ao meio ambiente e nem inunda áreas férteis, como acontece com a construção de barragens e com o desvio de rios para a captação de água superficial (Costa, 1995).

No Estado do Rio Grande do Sul, a situação não é diferente, pois muitos municípios utilizam a água subterrânea como fonte de abastecimento. Na região nordeste do estado, há sérios problemas com relação ao fornecimento de água potável, como acontece com os municípios de Caxias do Sul, Bento Gonçalves, Farroupilha e Veranópolis. Esses municípios utilizam, principalmente, as reservas de águas superficiais para esse fim e, constantemente, devido ao aumento do consumo, necessitam ampliar seus sistemas de tratamento e de abastecimento até o limite máximo; nesse caso, como não há maneira de ampliar os recursos superficiais, faz-se necessária a utilização da água subterrânea.

A escassez de reservas superficiais de água potável, faz com que muitos municípios utilizem os poços artesianos como fonte de abastecimento, como é o caso de Vila Flores e

Cotiporã (superficial e subterrânea), Fagundes Varela, Antônio Prado, Flores da Cunha (subterrânea), entre outros. Em face dessa situação, é necessário que se desenvolvam estudos de prospecção hidrogeológica, visando à determinação dos condicionantes geológicos que governam a distribuição e o comportamento dos aquíferos presentes na região. Esses estudos facilitariam o processo de locação de poços e diminuiriam a percentagem de poços nulos, ou com baixas vazões, o que atualmente ocorre em demasia devido à falta de critérios geológicos utilizadas para a prospecção.

1.1 – Objetivos

A proposta desse trabalho é o estudo hidrogeológico de parte da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (RS), com ênfase no processo de prospecção de água subterrânea, visando determinar os principais aquíferos e seu condicionamento geológico. Assim o objetivo geral é definir uma nova metodologia para a prospecção de aquíferos fraturados com base nas principais condicionantes geológicas relacionadas aos sistemas de falhas e fraturas que influenciam na distribuição e nas características hidrogeológicas dos aquíferos fraturados da Formação Serra Geral.

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- ⇒ determinar, com base nas condicionantes hidrogeológicas, os locais mais favoráveis para prospecção dos aquíferos fraturados;
- ⇒ caracterizar a atual exploração de recursos hídricos subterrâneos na região.

1.2 - Localização da área de estudo

A área de estudo localiza-se na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul e compreende parte da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas. A área selecionada envolve os municípios de Veranópolis, Bento Gonçalves, Farroupilha, Caxias do Sul, Flores da Cunha, São Marcos, Nova Pádua, Nova Roma do Sul e Monte Belo do Sul (Fig. 1). Os limites da área são representados pelas seguintes coordenadas geográficas:

⇒ longitudes: 51° 40' W e 51° 04' W

⇒ latitudes: - 28° 53' S e - 29° 11' S.

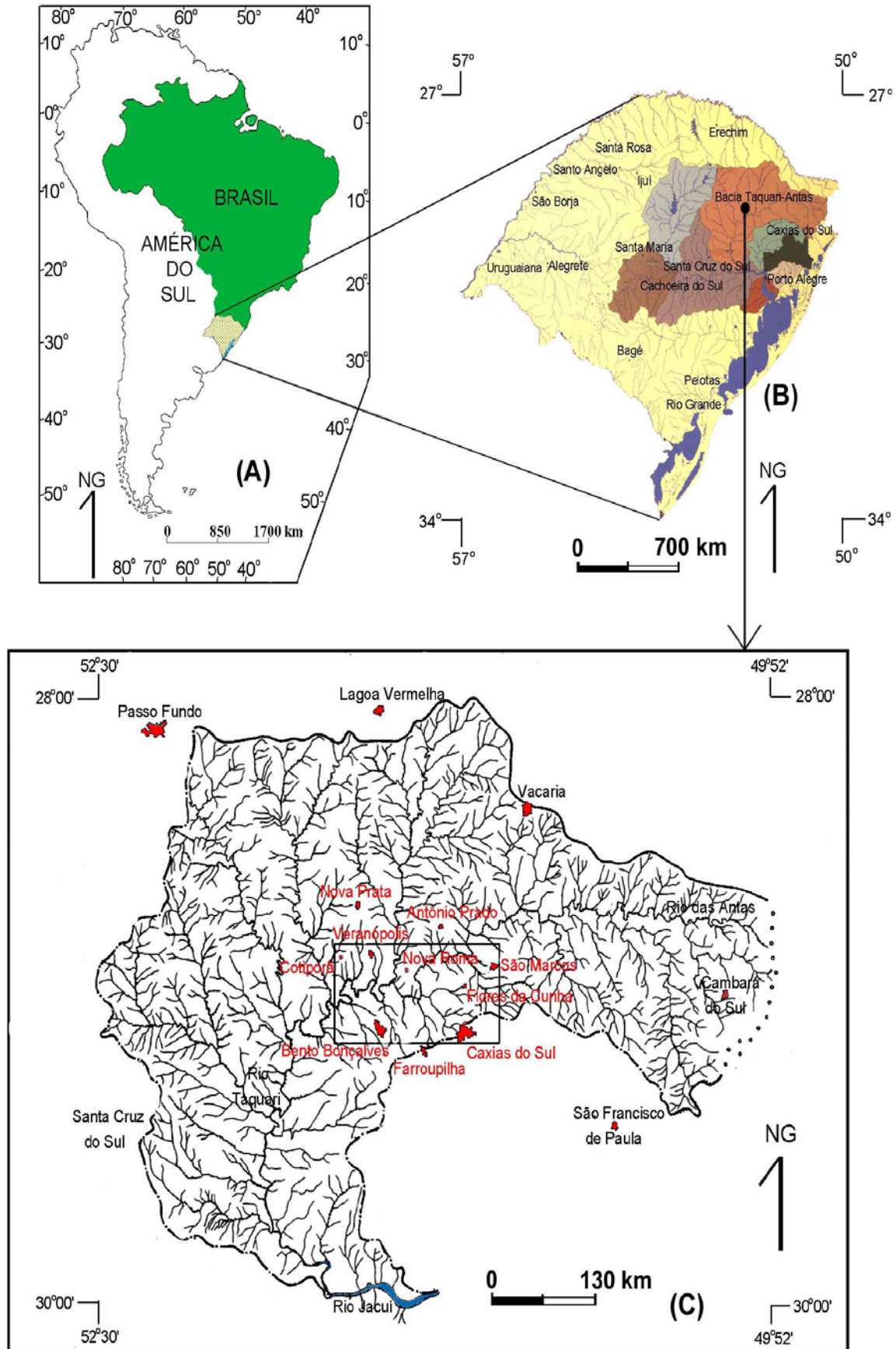


Figura 1 – Localização da Área de Estudo

1.3 – Metodologia empregada

A metodologia empregada para o desenvolvimento desse trabalho envolveu uma série de atividades como estudos de revisão bibliográfica, coleta de dados e mapeamentos. A obtenção desses dados foi necessária para a elaboração dos planos de informações e alimentação dos bancos de dados que foram utilizados nos processos de integração, visando à caracterização das condicionantes geológicas e hidrogeológicas dos aquíferos fraturados (Fig. 2).

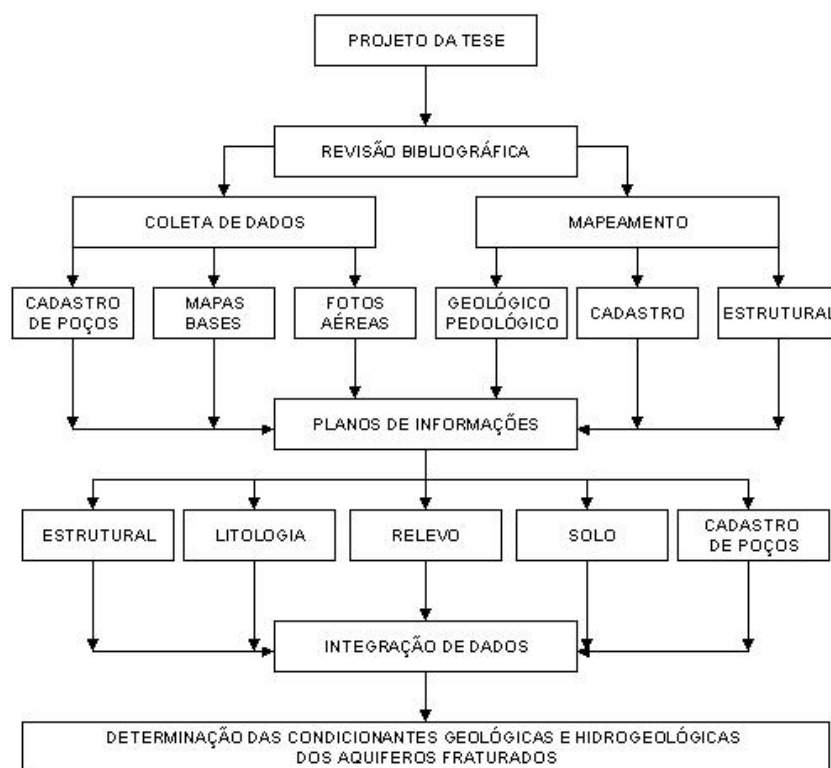


Figura 2 – Fluxograma da metodologia empregada com as etapas de trabalho desenvolvidas e suas relações.

Na etapa de revisão bibliográfica, foram efetuados levantamentos de dados geológicos e hidrogeológicos relacionados com a área de estudo, tanto em escala regional como local. Dessa forma, foram obtidas informações gerais sobre a geologia da região, bem como dados referentes a métodos de prospecção de aquíferos fraturados.

Na fase de coleta de dados, foram obtidas:

- ⇒ fotografias aéreas em escala 1:60.000, junto à CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento);
- ⇒ informações sobre os poços tubulares existentes na região. Esse cadastro foi realizado junto a órgãos públicos (PAP- Programa de Açudes e Poços e Secretaria da Agricultura do Governo do Estado do Rio Grande do Sul; CORSAN; Prefeituras Municipais) e empresas particulares de perfuração de poços tubulares;
- ⇒ dados meteorológicos. Para a caracterização climática da região e cálculo do balanço hídrico, foram obtidos dados climatológicos junto à FEPAGRO (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária) e ao 8º Distrito de Meteorologia do Ministério da Agricultura;
- ⇒ mapas base da região. Nesse caso, foram adquiridas as cartas topográficas em escala 1:50.000 do Serviço Geográfico do Exército (Folhas Nova Prata, Bento Gonçalves, Antônio Prado, Farroupilha, São Marcos e Caxias do Sul), que foram utilizadas para identificação do padrão de drenagem da região e estudos geomorfológicos. Esses mapas foram digitalizados no software AutocadTM e serviram de base para a elaboração dos planos de informações. Além disso, foi obtido o mapa geológico da região, em escala 1:250.000, elaborado pela CPRM (Companhia de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil).

Essas informações, junto às obtidas na revisão bibliográfica, foram utilizadas para a caracterização geral da região (aspectos fisiográficos, geologia regional, hidrogeologia, métodos de prospecção de aquíferos fraturados) e para a elaboração de planos de informações. Nesse caso, foi gerado um banco de dados dos poços tubulares existentes e suas características hidrogeológicas e, um mapa de lineamentos (obtidos da fotointerpretação).

Na etapa de mapeamento, foram realizados trabalhos de campo como:

- ⇒ mapeamento geológico. Foram realizados levantamentos ao longo de perfis e afloramentos isolados visando à identificação das litologias existentes na região, tipos e estruturação dos derrames;
- ⇒ levantamento pedológico. Foram analisados perfis de solos visando à identificação das características gerais e espessura do manto de alteração;
- ⇒ análise estrutural. Nesse caso, foram obtidas medidas de estruturas, como planos de fraturas, orientação de zonas de fraturas, veios, diques, indicadores cinemáticos, em cada um dos pontos analisados do perfil geológico e nos afloramentos isolados;

⇒ cadastramento de poços tubulares. Esse cadastro foi realizado por meio da utilização de GPS de navegação GARMIN, modelo 12XL, onde cada poço cadastrado na fase de coleta de dados foi identificado no campo por meio de suas coordenadas geográficas (X ,Y e Z). Os poços que não constavam no cadastro inicial também foram identificados e as suas informações hidrogeológicas (profundidade, vazão, entrada de água) foram coletadas com os proprietários dos mesmos (pessoas físicas, associações). Nesse caso, essas informações serviram somente para uma caracterização geral do poço tubular, pois não são precisas.

Os dados obtidos na fase mapeamento foram utilizados para a elaboração dos planos de informações denominados de fatores: estrutural, litologia, solos, relevo e cadastro (dos poços). Esses planos de informações foram gerados no software Autocad TM via digitalização, todos em escala 1:50.000.

Com os planos de informações gerados, foi desenvolvida a etapa de integração de dados, visando à identificação das condicionantes geológicas e hidrogeológicas dos aquíferos fraturados da região. Essa integração foi realizada com a utilização do software SPRING versão 3.6.03 do INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais).

2 – ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DA REGIÃO

2.1 - Geomorfologia

A área de estudo, no contexto regional, encontra-se inserida na Província Geomorfológica do Planalto (Carraro *et al.*, 1974). Nessa província estão inseridas as regiões geomorfológicas denominadas de Planalto das Araucárias, Planalto das Missões e Planalto da Campanha (RADAM/BRASIL, 1986). Por sua vez, o Planalto das Araucárias compreende as seguintes unidades geomorfológicas: Planalto dos Campos Gerais, Serra Geral, Patamares da Serra Geral e Planalto dissecado Rio Iguaçu-Rio Uruguai (Fig. 3).

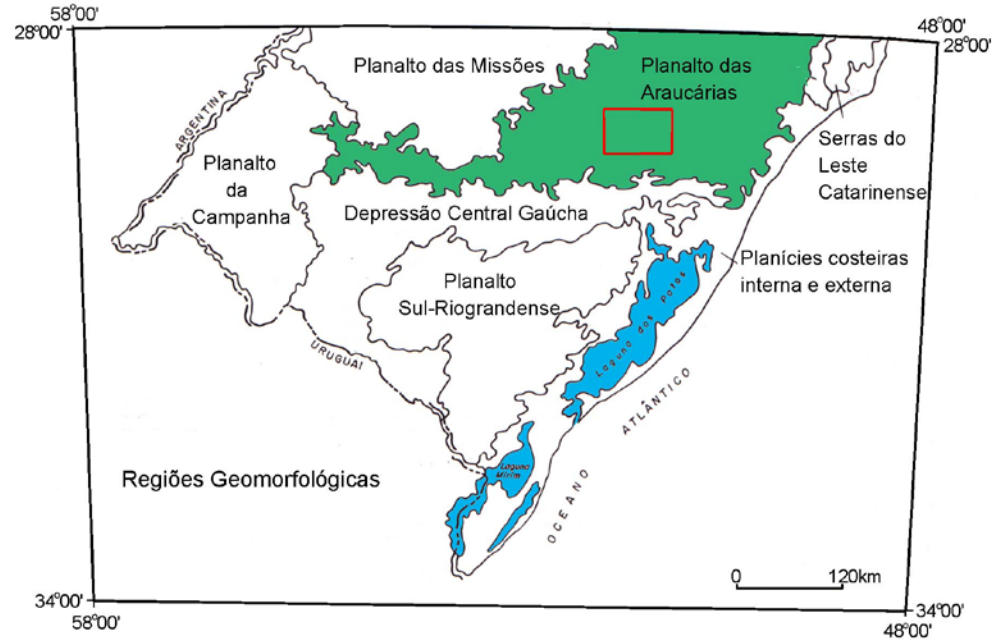
A região denominada de Planalto das Araucárias apresenta um relevo bastante heterogêneo, com variações morfológicas que englobam relevos amplos e aplainados, até relevos dissecados com profundo entalhamento (exemplo: Aparados da Serra). As características geomorfológicas das unidades do Planalto das Araucárias podem ser assim descritas:

1ª Unidade - Planalto dos Campos Gerais: constitui uma superfície média levemente inclinada para oeste, onde se registram as maiores cotas altimétricas. As formas de relevo dessa unidade foram geradas sobre rochas vulcânicas, em geral ácidas. As características principais da unidade são:

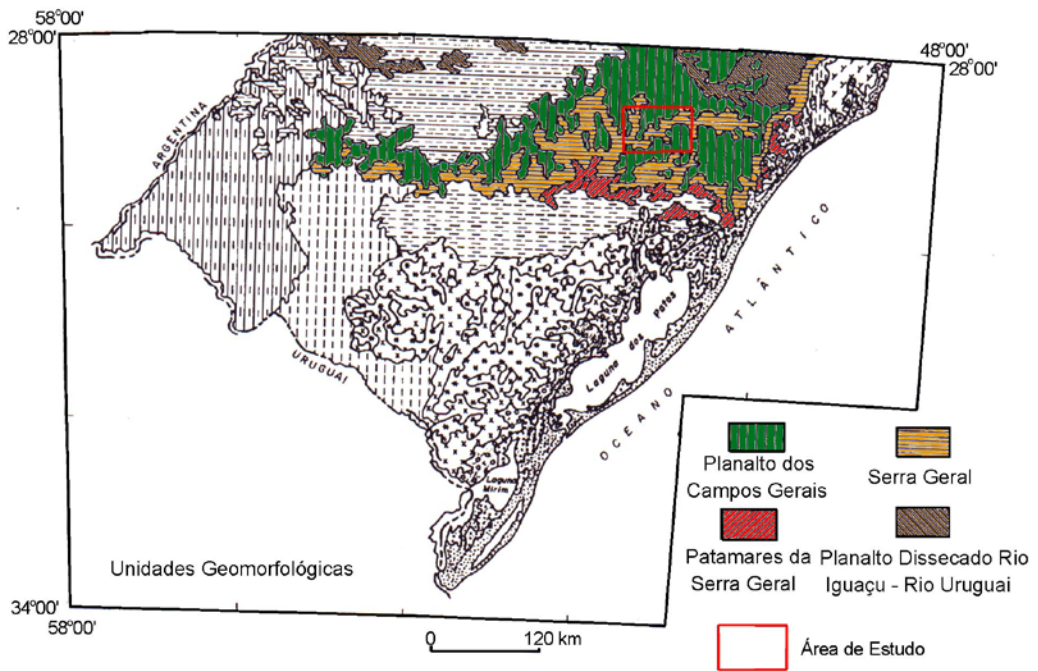
- região oeste: relevo plano e conservado, representado por superfícies de aplainamento desnudadas, retocadas e degradadas. A morfologia da região resultou de processo de dissecção, que promoveram a geração de áreas bastante conservadas, com forma planar, e de outras áreas caracterizadas pela presença de vales. As linhas estruturais são comuns em várias direções e constituem-se nas direções preferenciais adotadas pelos cursos de água;

- região leste: formas de relevo de dissecção diferencial, com profundos entalhamentos fluviais desenvolvidos sobre zonas de fratura. Na região de Caxias do Sul, o relevo é mais conservado e constitui-se no remanescente da antiga superfície de aplainamento retocada pelos processos erosionais atuantes na área.

2ª Unidade - Serra Geral: é representada por regiões escarpadas e fortemente dissecadas. As principais características são:



(A)



(B)

Figura 3 – Regiões (A) e unidades geomorfológicas (B) do estado do Rio Grande do Sul e da área de estudo (modificado de RADAMBRASIL, 1986).

- região leste: relevo escarpado (direção preferencial N-S, mas é comum a direção NNE - SSO), com desníveis acentuados de até 1000 m, onde está inserida a área denominada de Aparados da Serra. Essa área caracteriza-se pela presença de vales fluviais inseridos nos lineamentos estruturais da região;

- região oeste-sul: relevo escarpado de orientação geral E - O, paralelo aos traçados dos rios Jacuí e Vacacaí. O relevo escarpado é mais rebaixado que na região leste, com cotas altimétricas diminuindo na direção oeste. A morfologia é caracterizada por ampla e profunda dissecação, evidenciando um marcante controle estrutural (diversas orientações), no qual os cursos fluviais estão adaptados. Disseminados pela área, ocorrem cristas simétricas e relevos residuais isolados.

A erosão fluvial cortou os diferentes derrames de rochas vulcânicas e gerou, nas vertentes abruptas, uma sucessão de patamares estruturais (exemplos: eixos de drenagem dos rios Taquari, Antas, Caí e outros). Com relação aos cursos fluviais Caí e Taquari, observa-se um recuo das vertentes e o alongamento dos vales fluviais em amplas áreas planas, representadas por modelados de acumulação resultantes das movimentações dos leques coluvionares. Por outro lado, o Rio das Antas tem um traçado geral E - O mas, a partir da região de Bento Gonçalves, ele passa a infletir para sul e adota uma orientação geral SE - NO (a partir desse ponto, é denominado de rio Taquari). O Rio das Antas apresenta um vale em forma de "V" fechado e profundo e o seu curso é repleto de mudanças bruscas, que evidenciam o forte controle estrutural. Os tributários do Rio das Antas, em geral de pequenas extensões, possuem direções diferenciadas: os da margem direita tem orientação predominante N - S, enquanto os da margem esquerda são SE - NO.

Schuck *et al.* (1989) realizaram estudos de detalhe na região do Planalto (envolvendo a área de estudo), tendo sido identificada uma estrutura morfotectônica elíptica, com diâmetro de aproximadamente 32 km, denominada de “Abóbada do Lageado Grande”. Essa estrutura tem origem vulcano-tectônica e está relacionada com o processo original de extravasamento de lavas e com os movimentos verticais da crosta ocorridos durante o Cretáceo e Terciário. Com relação à geomorfologia, a “Abóbada Lageado Grande” corresponde a um alto com os sistemas de drenagem (afluentes da margem esquerda do rio das Antas, Caí e da margem direita, rio dos Sinos) definindo um padrão radial centrífugo. Além disso, essa estrutura apresenta como feições topográficas típicas a presença de morros testemunhos, superfícies aplainadas (pediplanos), pedimentos e vales com vertentes escalonadas (terraços de rocha).

Para sudoeste da “Abóbada Lageado Grande”, ocorre um alto topográfico denominado de “altiplano Caxias do Sul - Bento Gonçalves”, que consiste como um centro de drenagem radial centrífuga e apresenta um modelado de dissecação (Shuck *et al.*, 1989). Essas estruturas foram responsáveis pela compartimentação geomorfológica da região e estão relacionadas com:

- ⇒ a formação de duas escarpas de direção NE no “altiplano Caxias do Sul - Bento Gonçalves” e E-W no front da “Abóbada Lageado Grande”;
- ⇒ a configuração do sistema de drenagem. Essa configuração foi condicionada pelos sistemas de fraturas gerados quando dos processos de arqueamento, onde houve uma adaptação parcial dos canais de menor porte as estruturas.

Segundo Shuck *et al.* (1989), a formação dessas estruturas e da conseqüente compartimentação geomorfológica está associada a uma seqüência de eventos geológicos como:

- ⇒ 1º evento - mudança de clima úmido para semi-árido: responsável pela peneplanização, formação de encostas retilíneas e pedimentos;
- ⇒ 2º evento – epirogênese rápida e descontínua: surgimento na superfície aplainada das fraturas curvilíneas;
- ⇒ 3º evento – mudança de clima semi-árido para úmido: formação de vertentes convexas e espesso manto de alteração;
- ⇒ 4º evento - mudança climática de clima úmido para semi-árido: estabelecimento final da estrutura “Abóbada Lageado Grande”;
- ⇒ 5º evento - mudança do clima semi-árido para o clima atual.

Analisando as características geomorfológicas e os processos responsáveis pelo modelamento da região, pode-se observar que há uma relação entre o relevo e os aquíferos fraturados. Uma das relações corresponde às fraturas, pois o sistema de drenagem, na maior parte da área, está associado a essas estruturas. Isso fez com que essas regiões sofressem um processo de erosão mais acentuado, provocando a formação de vales e modelos de relevos dissecados (variável entre fraco, médio e forte). Essa relação é comprovada pelos padrões de drenagem (retangular) e pela morfologia dos canais fluviais (trechos retos com quebras forte na direção dos mesmos). Dessa forma, a presença de trechos retilíneos de drenagem associados a vales de portes variados é um indício da presença de fraturas e zonas de fraturas e, conseqüentemente, da existência de aquíferos fraturados.

Outra relação importante está associada ao grau de dissecção do relevo, pois essa estruturação possui um controle sobre as áreas de recarga e descarga dos aquíferos fraturados. Em geral, as regiões que se apresentam fortemente dissecadas tendem a ser áreas de descarga desses sistemas de aquíferos, enquanto que áreas com relevo mais ondulado tendem a ser áreas de recarga.

2.2 - Vegetação

A região do Planalto possui uma vegetação característica, que é representada pelas Floresta Ombrófila Mista, Floresta Estacional Decidual e Savana (RADAM/BRASIL, 1986). As características de cada uma dessas formações vegetais são descritas como:

→ Floresta Ombrófila Mista: é uma floresta caracterizada pela presença do pinheiro (*Araucária angustifolia*), que, devido a sua estruturação, forma uma floresta pouco densa, constituída por espécies de menor porte e arbustivas (Tab. I). Essa floresta pode ser considerada como um remanescente de um passado com clima mais frio e seco; as variações de composição são reflexo das flutuações climáticas porque passou a região ao longo do tempo geológico. Em geral, essa vegetação localiza-se em áreas com altitudes superiores a 600/800 metros e latitude superior a 24° S.

→ Floresta Estacional Decidual: caracteriza-se por uma floresta subtropical desenvolvida em áreas com elevados índices pluviométricos (acima de 1300 mm/ano). É constituída por cinco estratos: herbáceo, arbustivo, arvoretas, superior e emergente (MAGNA, 1997). As espécies nativas típicas dessa floresta estão descritas na tabela II. Ao longo dos rios Taquari e Antas, a floresta sofreu processo de desmatamento, gerado em função da expansão agrícola; isso resultou na formação de capoeiras após o abandono das áreas, bem como na regressão da floresta.

→ Savana: a vegetação de savana é caracterizada por herbáceas que ocorrem por amplas extensões; as gramíneas e as ciperáceas são as principais formas vegetais. Essa formação vegetal localiza-se na região do Planalto, onde estão as nascentes do Rio das Antas e é comum a presença de capões e de matas galerias. As matas galerias estão associadas a áreas de maior umidade, bem como nascentes e arroios.

Tabela I - Lista das espécies mais comuns associadas à vegetação de pinheiro (Vieira, 1984).

Nome Comum	Nome Científico
Camboatá	<i>Cupania vernalis</i>
Ipê	<i>Tecoma sp</i>
Louro	<i>Cordia trichotoma</i>
Erva-mate	<i>Ilex paraguayensis</i>
Açoita-Cavalo	<i>Ocotea puberula</i>
Jacarandá	<i>Dalbergia nigra</i>
Caviúna	<i>Machaerium sp</i>
Guabiroba-da-serra	<i>Britoa sellowianor</i>
Grapiapunha	<i>Apuleia praecox</i>

Tabela II - Lista das espécies mais comuns associadas à Floresta Estacional Decidual (Vieira, 1984).

Nome Comum	Nome Científico
Alecrim	<i>Holocalyx glaziovii</i>
Umbu	<i>Phytolacea dioica</i>
Cedro	<i>Cedrela fissilis</i>
Cangerana	<i>Cabralea oblongifoliola</i>
Louro	<i>Cordia trichotoma</i>
Angico	<i>Piptadenia rígida</i>
Grápia	<i>Apuleia praecox</i>
Guajuvira	<i>Patagonula americana</i>
Espinilho	<i>Fagara sp</i>
Guatambu	<i>Aspidosperma ramiflorum</i>
Tarumã	<i>Vitex montevidensis</i>
Timbaúva	<i>Enterolobium timbouva</i>
Jerivá	<i>Arecastrum romanzoffianum</i>
Palmito	<i>Enterpe edulis</i>
Bambu	<i>Bambusa sp</i>
Samambaias	

A cobertura vegetal de uma determinada região possui relação com o sistema de aquíferos fraturados. Segundo Costa e Braz Silva (2000), a vegetação tem uma influência pequena e direta sobre a quantidade e qualidade da água subterrânea. O papel da cobertura vegetal está relacionado aos processos de infiltração, escoamento e evapotranspiração. Assim, quanto maior a cobertura vegetal de uma determinada região, maior será a evapotranspiração, maior será a precipitação e haverá maiores condições de infiltração e menores de escoamento, favorecendo a elevação da taxa de recarga. Em áreas onde há pouca cobertura vegetal há uma tendência para diminuição da infiltração e, conseqüentemente, redução nas taxas de recarga. Esse fenômeno é observado, principalmente com os poços cacimbas, onde áreas que tiveram

sua cobertura vegetal destituída, com o passar dos anos, apresentaram diminuição da quantidade de água dos poços e fontes e, em alguns casos, poços secaram.

Conforme Costa e Braz Silva (2000), a influência da vegetação com relação à qualidade de água é muito pequena, pois somente em regiões encharcadas onde há a presença de ambientes redutores, poderá haver uma concentração da matéria orgânica, favorecendo a má qualidade da água.

2.3 - Clima

O clima do Rio Grande do Sul é do tipo mesotérmico superúmido, sem a ocorrência de um período seco definido e com a distribuição regular das chuvas. Segundo a classificação de Koppen (*in* Vieira, 1984), esse clima insere-se no tipo "CF" (temperado com chuva em todos os meses) e pode ser subdividido em dois:

→ "Cfa": subtropical, moderadamente chuvoso, com temperatura média das máximas superior a 22°C;

→ "Cfb1": temperado ou de faias, com a média das máximas inferior a 22°C e as mínimas oscilando entre -3°C e 18°C .

Em estudos mais recentes, Maluf (1999) efetuou uma nova classificação climática para o Estado do Rio Grande do Sul. Para essa área de estudo, essa nova classificação determina um tipo de clima Temperado e Perúmido (Tab. III e IV).

Tabela III – Classificação climática da região nordeste, segundo Maluf (1999).

Região Climática	Município Base	Localização Geográfica	Tipo Climático
Serra do Nordeste	Bento Gonçalves	Lat. 29°10'00'' Long. 51°25'00'' Altitude:619m	Temperado Perúmido
	Caxias do Sul	Lat. 29°10'25'' Long. 51°12'21'' Altitude: 740m	Temperado Perúmido

Tabela IV – Dados meteorológicos utilizados para classificação climática (Maluf, 1999).

Município	Temperatura	Temperatura	Precipitação	Deficiência	Excesso
Base	Média Anual	Média do Mês	pluvial anual	hídrica	hídrico
	(°C)	mais frio (°C)	(mm)	anual (mm)	anual (mm)
Bento Gonçalves	16,8	11,6	1599	0	478
Caxias do Sul	15,9	11,5	1663	0	693

Para a caracterização climática detalhada da área de estudo, foram analisados dados meteorológicos de quatro estações, pertencentes à FEPAGRO (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária) e ao 8º Distrito de Meteorologia do Ministério da Agricultura. Os dados analisados referem-se à precipitação, número de dias de chuva, temperaturas (máximas e mínimas), umidade relativa, evaporação e insolação e correspondem a uma série de 10 anos (Tab. V). Cabe salientar que os dados provenientes da estação meteorológica Caxias do Sul não foram utilizados para a caracterização climática, pois a série temporal de 10 anos apresentava-se incompleta (havia falta de pelo menos uma informação mensal para cada um dos parâmetros analisados).

Analisando-se os dados da tabela V, fica evidenciada a seguinte caracterização:

- ⇒ a variação nos índices de precipitação nos diferentes anos, fica entre 1639,5 mm até 1813,7 mm;
- ⇒ as temperaturas máximas médias apresentam valores da ordem de 22 a 23°C;
- ⇒ as temperaturas mínimas médias variaram entre 11,76°C e 13,35°C, sendo que no período de 1990 a 1999 houve um aumento da média;
- ⇒ a temperatura média geral da região é em torno de 17,3 a 17,5°C;
- ⇒ a umidade relativa do ar é variável entre 75,27% a 79,2%, sendo que o período de 1990-1999 foi o que apresentou a menor média;
- ⇒ a evaporação foi o parâmetro que apresentou as maiores variações, sendo que para o período de 1981-1990 ocorreu a evaporação de 592,6 mm, enquanto para o intervalo temporal de 1990-1999 foram evaporados 1229,2 mm, praticamente o dobro.

Tabela V – Dados climáticos das quatro estações meteorológicas existentes na área de estudo. Os valores apresentados correspondem às médias obtidas na interpretação da série de 10 anos.

Dados Climáticos	Estações Meteorológicas			
	Veranópolis	Bento Gonçalves	Farroupilha	Caxias do Sul *
Série Temporal	1985-1991 e 1994-1998	1990-1999	1981-1990	1990-1999
Precipitação (mm)	1639,5	1731,03	1813,7	1585,26
Número de Dias de Chuva	111,1	147,4	120,9	134,3
Temperatura (média das máximas) °C	22,58	22,58	22,36	19,44
Temperatura (média das mínimas) °C	12,38	13,35	11,76	13,17
Temperatura (média do ar)	17,45	-----	17,35	-----
Umidade Relativa do Ar (%)	77,7	75,27	79,2	81,44
Evaporação Piche (mm)	806,73	1229,2	592,6	692,32
Brilho Solar (horas e décimos)	2320,79	2222,0	2115,4	-----
* - série de dados não é completa				

O balanço hídrico da área de estudo foi realizado utilizando-se os dados meteorológicos das estações Veranópolis e Farroupilha, pois consistiam nas estações com maior variabilidade de dados, além de apresentar a série temporal (10 anos) completa. Para o cálculo do balanço hídrico, foi utilizado o programa Bhidrico GD V.3.2-2002 de D'Angiolella & Vasconcelos (2002), que utiliza a metodologia de Thornthwaite & Mather. A evapotranspiração potencial é calculada de cinco formas diferentes, segundo as metodologias de Thornthwaite 1948, Tanque Classe A, Penman-Monteith, Hargreaves & Samani e Blaney & Ciddle (D'Angiolella & Vasconcelos, 2002). Os resultados obtidos na utilização desse programa evidenciam que:

⇒ a evapotranspiração potencial é em torno de 765,4 mm (Veranópolis) e 760,3 mm (Farroupilha) pelo método de Thornthwaite 1948, enquanto que para o método de Penman-Monteith-FAO, os valores encontrados foram de 1008,4 mm (Veranópolis) e 960,6 mm (Farroupilha);

⇒ o excedente hídrico da região foi de 874,1 mm (Veranópolis) e 916,2 mm (Farroupilha) pelo método de Thornthwaite 1948, enquanto que pelo método de Penman-Monteith-FAO, os valores encontrados foram 631,1 mm (Veranópolis) e 816,2 mm (Farroupilha);

⇒ O balanço hídrico climatológico, calculado por ambos os métodos (Thornthwaite e Penman-Monteith-FAO), evidenciou que não há uma deficiência hídrica na região. O período

correspondente ao mês de março caracteriza-se por uma maior retirada, mas os meses restantes, são caracterizados por um excesso hídrico (setembro corresponde ao maior pico).

O clima apresenta uma relação com os recursos hídricos subterrâneos e a sua influência está associada à qualidade e quantidade de água. Segundo Costa e Braz Silva (2000), a influência principal está relacionada com a qualidade, pois, em regiões de elevada pluviosidade, os sais solúveis são lixiviados e tornam as águas subterrâneas com baixos teores desses elementos. Já em regiões de pluviosidade reduzida, há uma tendência de aumento considerável dos sais nas águas subterrâneas.

Com relação à quantidade, Costa e Braz Silva (2000) salientam que a influência é menor do que no caso da qualidade. Nesse caso, as regiões de grande precipitação tendem a ter mantos de alteração mais espessos, o que acarretaria em maiores taxas de infiltração e, conseqüentemente, maior tendência ao aumento da quantidade de água. No entanto, além da espessura, devem ser analisados os parâmetros físicos dos solos que permitiriam compreender melhor essa relação de recarga.

2.4 – Ações antrópicas

Na Bacia Hidrográfica Taquari-Antas, estão inseridos em torno de 110 municípios que constituem uma região econômica de amplo desenvolvimento. O Aglomerado Urbano do Nordeste, formado pelos municípios de Caxias do Sul, Farroupilha, Bento Gonçalves, entre outros, é uma das regiões mais desenvolvidas do Estado do Rio Grande do Sul e está inserido nessa Bacia Hidrográfica.

Em virtude do amplo desenvolvimento, a região apresenta elevado grau de urbanização, densidade demográfica de 40 hab/km² e taxas de crescimento populacional próxima à média do Estado (Leite & Haase, 1999). As atividades econômicas principais estão inseridas no setor industrial (exemplo: pólo metal-mecânico do estado) e setor agropecuário. Quanto às indústrias, dados de 1993 indicavam a existência de 8123 indústrias na Bacia do Taquari-Antas, que envolvem atividades nos ramos de vestuário/tecidos, metalurgia, madeira, produtos alimentares, mobiliário, calçados e minerais não-metálicos. O setor agropecuário é caracterizado por regiões; a atividade de criação extensiva de gado predomina na região das nascentes do Rio Taquari-Antas, enquanto que a atividade agrícola é mais importante na região média do rio, onde ocorrem, principalmente, pequenas propriedades com utilização

intensiva da área. A principal área agrícola concentra-se ao longo das drenagens dos rios Carreiro, Forqueta e das Antas, onde predominam as culturas de milho, soja, cítricos, viníferas, entre outros produtos.

Com base nas características sócio-econômicas da região e nos aspectos de crescimento econômico social, pode-se ressaltar os seguintes dados sobre a região:

→ presença de zonas intensamente urbanizadas, que, em muitos casos, apresentam problemas de estruturação;

→ riscos de ocorrência de enchentes nos municípios localizados no trecho inferior do Rio Taquari-Antas. Estes riscos são gerados e aumentam em função do crescimento populacional e urbano e em função de problemas ambientais (assoreamento do rio);

→ problemas com saneamento básico. Na maioria dos municípios, não há estações de tratamento de esgotos e todos os dejetos domésticos são liberados para cursos fluviais tributários do Rio Taquari-Antas. Com relação aos resíduos sólidos urbanos, industriais e hospitalares, não existem áreas adequadas para sua disposição. A maioria dos municípios também não possui coleta seletiva de lixo;

→ problemas com a agricultura. A área agrícola utilizada na bacia é superior a 1.000.000 de hectares (Leite & Haase, 1999) e as práticas adotadas são, em muitos casos, baseadas no emprego direto de adubos químicos e agrotóxicos. Além disso, há a ocupação de áreas de elevada declividade nas encostas dos rios das Antas, Prata, Carreiro, entre outros, e a prática da queimada;

→ problemas com zonas industrializadas. As regiões de altos índices de industrialização apresentam problemas relacionados à qualidade da água em função dos efluentes líquidos gerados nas indústrias. Já foram detectados metais pesados em barragens de captação de água do Município de Caxias do Sul, bem como contaminação de lençóis subterrâneos por metais pesados nesse mesmo município.

Analisando-se os dados referentes à atividade antrópica da região, observa-se que existem sérios problemas que podem comprometer a qualidade e a quantidade dos recursos hídricos. Com relação à qualidade, muitas são as fontes de poluição, as quais estão ligadas com:

⇒ zonas industrializadas. Nas regiões com maior ocupação urbana e desenvolvimento industrial, como o caso de Caxias de Sul, não são raros os poços com contaminação bacteriológica e por metais pesados;

- ⇒ disposição de resíduos sólidos. São raros os municípios que possuem uma situação regularizada quanto à disposição dos resíduos, o que acaba por promover a contaminação dos recursos;
- ⇒ postos de combustíveis. Já foram detectados casos de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos por compostos orgânicos derivados do petróleo;
- ⇒ cemitérios. As cidades de maior porte, como Caxias do Sul e Bento Gonçalves, apresentam grandes áreas ocupadas por cemitérios antigos e, como não há um controle ambiental sobre essas áreas, há problemas de contaminação da água subterrânea, principalmente dos aquíferos mais rasos;
- ⇒ utilização de poços tubulares desativados e abandonados para disposição de resíduos sólidos e líquidos;
- ⇒ ligação da água superficial com a água subterrânea. Nesse caso, as formas de ligação estão relacionadas com a não construção da laje sanitária e a colocação do revestimento, o que ocorre em muitos poços da região. Dessa forma, a água do aquífero superficial (existente no manto de alteração da rocha), que é de mais fácil contaminação, acaba sendo conectada com a água subterrânea do aquífero fraturado mais profundo, provocando, em muitos casos, contaminação. Outra forma está associada à ligação da água superficial (açudes, córregos) com os poços tubulares, quando os mesmos apresentam vazões baixas, o que ocasiona contaminação principalmente bacteriológica.

Com relação à quantidade, as influências que as atividades antrópicas possuem estão associadas basicamente com:

- ⇒ superexploração. Não são raros os casos de poços secos por exploração demasiada e pela falta de um projeto de bombeamento;
- ⇒ diminuição da capacidade de infiltração: relacionadas com o crescimento urbano e com a expansão agrícola.

3 - GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo situa-se na porção sul da Bacia do Paraná, a qual constitui uma bacia intracratônica que ocupa aproximadamente 1.200.000 km² no Brasil (distribuídos em parte dos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e Mato Grosso do Sul). Essa bacia é caracterizada por uma seqüência sedimentar e uma vulcânica, que foram governadas por um forte controle estrutural (falhas N-NE, N-NO e E-O; Zalan *et al.*, 1990). As principais litologias de interesse que ocorrem na área de estudo são representadas por arenitos de idade Jurássica pertencentes à Formação Botucatu (Campos, 1889) e, principalmente, por rochas vulcânicas que constituem a Formação Serra Geral (White, 1908). Essa última Formação representa o registro geológico de uma das maiores manifestações vulcânicas da história da Terra, ocorrida entre 137 e 127 Ma atrás (Renne *et al.*, 1992), resultado da separação dos continentes da América do Sul e África (abertura do Oceano Atlântico Sul).

A Formação Botucatu é caracterizada por arenitos de granulometria entre areia média e fina, de cor rosada a amarelada e friáveis, devido à pequena quantidade de matriz. A coloração e o cimento resultaram de pigmentações ferruginosas, que salientam as condições climáticas oxidantes existentes na época de sua deposição. A composição é quartzo-feldspática com níveis milimétricos de minerais pesados, marcando e salientando a estratificação presente nas rochas. As estruturas sedimentares estão representadas por estratificações cruzadas planares com superfícies de truncamento e acanaladas, de médio a grande porte. O ambiente de sedimentação dessas litologias é caracterizado como eólico, com a presença de desertos e amplas dunas.

Os arenitos, que estão em contato com as rochas vulcânicas da Fm. Serra Geral, sofreram metamorfismo de contato devido às altas temperaturas das lavas, originando camadas maciças com perda de seu aspecto friável. Além disso, é comum encontrar-se lentes e diques de arenito metamorfizado cortando as rochas basálticas. Por vezes, esses arenitos ocorrem intercalados com as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, quando são denominados de “*intertrapps*” e podem alcançar espessuras médias em torno de 10 metros.

Na área de estudo, não foram identificados afloramentos de litologias da Formação Botucatu, mas nas áreas próximas ao Rio das Antas, principalmente abaixo das cotas de 100 metros, há a ocorrência dessas litologias.

A Formação Serra Geral ocupa uma área, no Rio Grande do Sul, de 137.000 km², que equivale a aproximadamente 50% da área do Estado (Hausman, 1995). Essa Formação é caracterizada por uma seqüência vulcânica básica e ácida, onde as principais litologias são basaltos toleíticos, andesitos, riodacitos, riolitos e dacitos (RADAM/BRASIL, 1986; Roisenberg, 1990). A espessura da seqüência vulcânica é variável, alcançando um máximo de 1700 m. No Rio Grande do Sul, Leinz (1949) descreve uma espessura máxima de 1100 m na borda do Planalto com a Planície Costeira, próximo a Torres. Essa espessura diminui para oeste, em direção ao vale do Rio Uruguai, podendo alcançar até 100 m. Na área de estudo, a espessura varia em torno de 700 a 800 metros. Essa variação é explicada em função da paleosuperfície pré-derrame, dos movimentos tectônicos sin e pós evento vulcânico e pela erosão diferencial.

A Formação Serra Geral, na região de estudo, foi condicionada por um forte controle tectônico marcado pela presença de falhas e fraturas com direções preferencias N70 - 75E, N35 - 40E e N20 - 30W (MAGNA, 1997). Esse controle também é observado pela disposição da rede de drenagem que ocorre encaixada nos principais lineamentos estruturais e que, conseqüentemente, define um padrão característico de quebras bruscas para os cursos fluviais (exemplo: Rio das Antas).

Frasca & Lisboa (1993) realizaram estudos geológicos visando à compartimentação morfotectônica e morfoestrutural de parte da Bacia do Paraná (incluindo a Formação Serra Geral) e identificaram três grandes unidades: a Fachada Atlântica, a Abóbada Central e a Abóbada Oeste. A região de estudo está inserida na unidade morfotectônica Fachada Atlântica. Essa unidade apresenta como padrão morfoestrutural blocos poligonais com lineamentos de médio porte (podem estar associados a falhas provenientes do embasamento da bacia). As estruturas dessa unidade estão representadas por lineamentos cuja principal orientação é N40E, o que evidencia, segundo os autores, uma relação genética com os padrões estruturais do Cinturão Móvel Dom Feliciano e com o sistema de falhas NE - SW associado.

As estruturas geológicas primárias associadas aos derrames da Formação Serra Geral seguem um padrão relacionado com a taxa de resfriamento e a composição das litologias presentes. Essas estruturas estão dispostas em três zonas principais (Leinz, 1949; Roisenberg & Chies, 1987; Roisenberg, 1990):

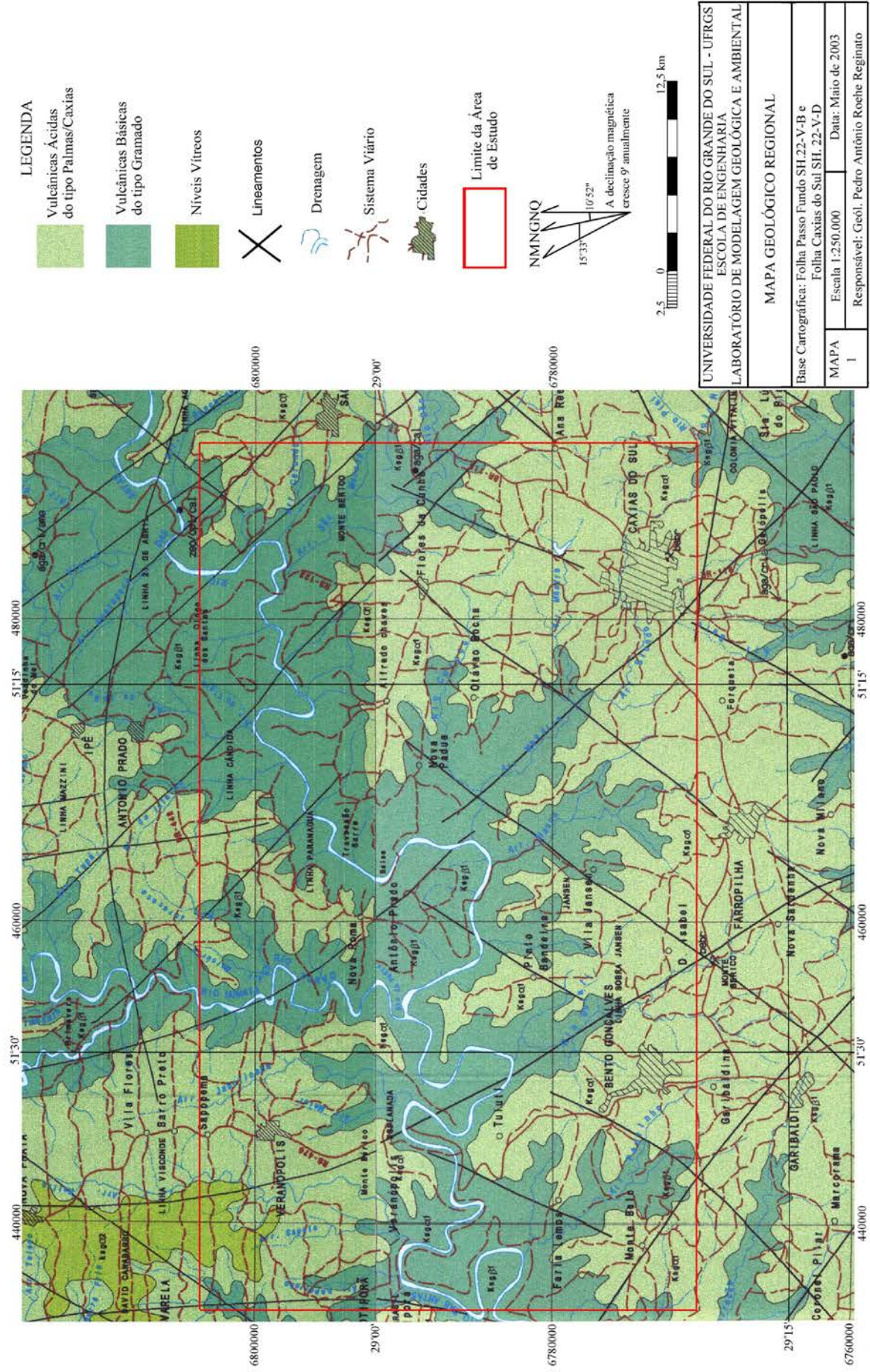
- zona basal: constituída por vidros vulcânicos (de coloração preta a vermelha), brechas e rochas maciças;
- zona central: é a mais espessa de um derrame e pode alcançar até 60 metros. Essa zona é caracterizada por dois tipos preferenciais de estruturas primárias: as juntas horizontais (planares e retilíneas, com espaçamento centi a decimétrico bastante regular) e as juntas verticais, que ocorrem sobrepostas às primeiras, mas que são menos regulares e que podem apresentar desde aspecto maciço, até porções intensamente fraturadas;
- zona superior: é composta por rochas vulcânicas vesiculares a amigdalóides (preenchidas por zeolitas, carbonatos e quartzo).

Cabe salientar que esse padrão de estruturação é bastante variável e está condicionado principalmente ao tipo de rocha vulcânica. Segundo Roisenberg & Chies (1987), os derrames básicos apresentam um amplo desenvolvimento das juntas verticais e pequeno das horizontais (zona central), bem como a presença de zonas amigdalóides e vesiculares; nos derrames ácidos, por outro lado, as juntas horizontais estão mais desenvolvidas que as verticais e a zona vítrea (basal) possui espessuras variáveis. Heemann (1997) detectou uma variação maior das estruturas e uma intercalação de derrames básicos e ácidos, o que evidencia a complexidade dos processos vulcânicos que originaram essa seqüência litológica.

Na área de estudo, segundo o levantamento realizado pela CPRM (1998), ocorrem dois tipos principais de litologias (Mapa 1):

- basaltos do tipo Gramado;
- vulcânicas ácidas do tipo Palmas/Caxias.

As primeiras litologias são mais comuns abaixo das altitudes de 500 metros, enquanto que as rochas vulcânicas ácidas são mais comuns acima dessa altitude.



4 - HIDROGEOLOGIA REGIONAL

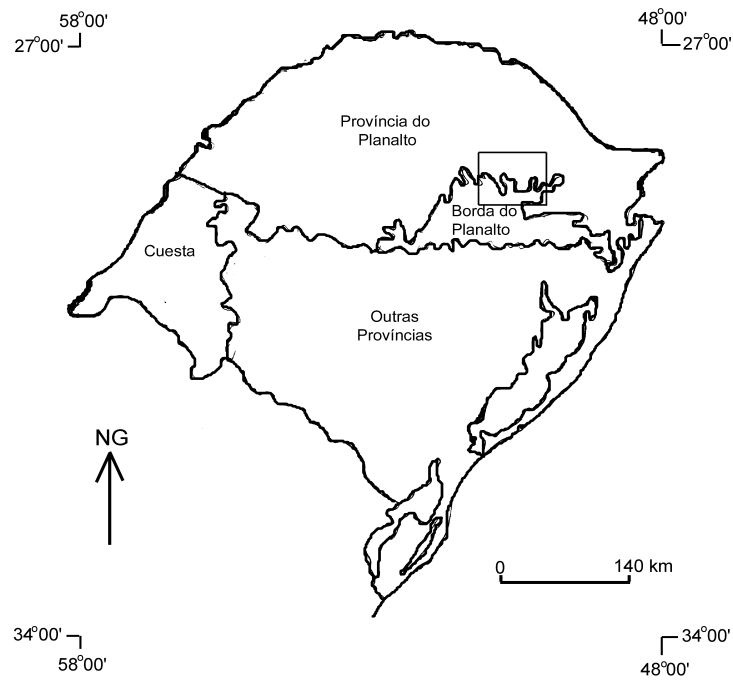
Em uma escala regional, a área de estudo localiza-se na divisão hidrogeológica denominada de Bacia do Paraná, cujos principais sistemas de aquíferos (Tab. VI) estão dispostos na Fm. Pirambóia, Fm. Botucatu e Fm. Serra Geral, onde o volume de água é estimado em 50.000 km³ (Rebouças, 1988).

Tabela VI - Dados hidrogeológicos para os aquíferos pertencentes à divisão hidrogeológica da Bacia do Paraná (Rebouças, 1988).

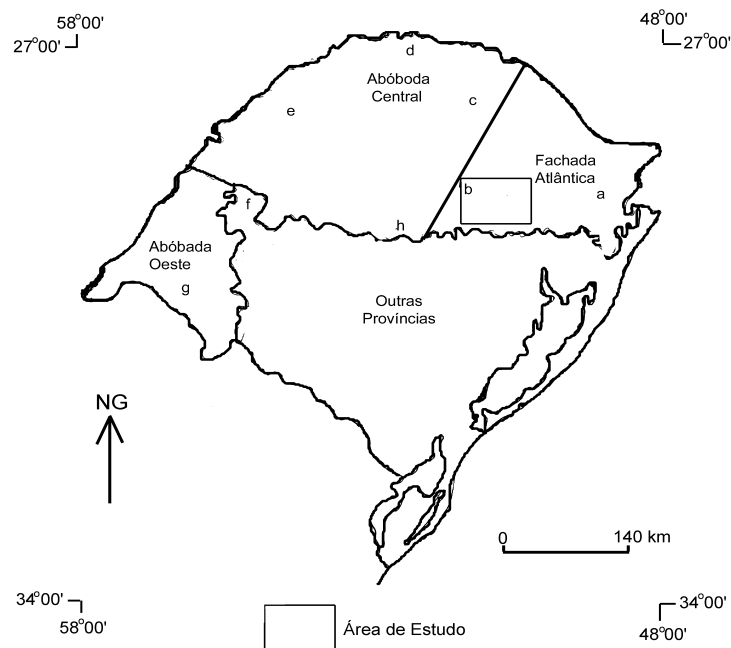
BACIA DO PARANÁ	
AQÜÍFERO BOTUCATU	Vazão específica: 10-150m ³ /h (não-confinado) 300 a 1000 m ³ /h (artesiano) Transmissividade: 1,5-7,0 x 10 ⁻³ m ² /seg Coeficiente de estocagem: 0,2 –0,05 (não-confinado) 10 ⁻³ a 10 ⁻⁶ (confinado)
AQÜÍFERO SERRA GERAL	Vazão específica: 3,5 x 10 ⁻³ a 37,7m ³ /h Profundidade dos poços: 31 a 190m Permeabilidade: 10 ⁻³ -10 ⁻⁷ m/seg TDS: <300mg/l (Fe 9,8mg/l; SiO ₂ 30mg/l)
AQÜÍFERO BAURU	Vazão específica: 0,03-6m ³ /h/m TDS: <200mg/l

Com relação ao Estado do Rio Grande do Sul, a área de estudo está localizada na província hidrogeológica denominada de "Província Basáltica". Essa província, em função das variações morfológicas, estruturais e espessura dos derrames, foi dividida em subprovíncias denominadas de: Planalto, Borda do Planalto e Cuesta (Hausman, 1995). Na classificação de Lisboa (1993), a região de estudo está inserida numa unidade morfotectônica denominada de Fachada Atlântica e nas seguintes unidades hidrogeológicas denominadas (Fig. 4):

⇒ "Ácidas Aplainadas": caracterizada pela presença de lineamentos de médio a pequeno porte com orientação principal para o quadrante nordeste. Essa região apresenta o relevo pouco dissecado e um manto de alteração de espessura média (variações entre 6 a 12 metros), que, aliado à estruturação, confere um bom potencial aquífero, principalmente quando associado a lineamentos de médio porte;



A – Classificação das províncias hidrogeológicas da Fm. Serra Geral (modificado de Hausman, 1995).



B – Províncias hidrogeológicas da Fm. Serra Geral. Unidades hidrogeológicas: “a” ácida aplainada; “b” ácida dissecada; “c” básicas mamelonadas; “d” básicas densamente dissecadas; “e” básicas dissecadas; “f” arenitos circundesnudados; “g” básicas aplainadas; “h” escarpas (modificado de Lisboa, 1993).

Figura 4 – Províncias hidrogeológicas da Formação Serra Geral

⇒ “Ácidas Dissecadas”: caracterizada pela presença de lineamentos de pequeno porte e médio porte, sendo os últimos fragmentados em função do forte grau de dissecção do relevo. A orientação preferencial das estruturas é para nordeste, o que reflete uma influência do Cinturão Don Feliciano. O relevo da região apresenta-se com forte grau de dissecção e espessura do manto de alteração baixa. Essas características tornam a área com baixo potencial hidrogeológico e os melhores locais estão situados em estruturas que sofrem recarga do Aquífero Botucatu.

Nessas regiões hidrogeológicas, as áreas que contêm água subterrânea estão representadas por aquíferos confinados que são condicionados por estruturas planares, como fraturas e falhas. Esses aquíferos possuem uma forte anisotropia, ou seja, uma acentuada variação no volume das vazões, pouca extensão lateral e são mais restritos aos pontos próximos às estruturas planares (Reginato & Gottardo, 1994).

Assim, é preciso desenvolver estudos com ênfase na identificação do tipo de estruturas, sejam elas de origem primária ou tectônica, com o objetivo de definir os melhores locais para locação dos poços, pois fora da área de influência dessas estruturas, os poços abertos resultam secos ou com baixas vazões específicas. Por outro lado, é importante conhecer a tipologia dessas estruturas (se distensivas ou compressivas), pois possuem forte ligação com a área de recarga dos aquíferos, bem como com as áreas prováveis de acúmulo de água.

4.1 - Hidrogeologia da bacia Taquari-Antas

A Bacia Taquari-Antas é caracterizada por unidades hidrogeológicas definidas com base em informações geológicas e geomorfológicas. Essas unidades são: Formação Rosário do Sul, Formação Botucatu e Formação Serra Geral (MAGNA, 1997). Na área de estudo, ocorrem somente as unidades hidrogeológicas da Formação Serra Geral e Botucatu.

4.1.1 - Formação Botucatu

O aquífero dessa unidade hidrogeológica tem suas características relacionadas com a litologia e com a estratigrafia. No primeiro caso, o grau de cimentação da rocha (o material

cimentante, em geral, é a argila) tem grande influência negativa na produtividade do aquífero. Segundo Hausman (1995), caso os arenitos apresentem um teor de argila menor de 40%, a circulação da água nessa litologia será preferencialmente intergranular, enquanto que, com teores superiores a 40%, a circulação intergranular praticamente inexistente; neste último caso, a circulação só existirá quando essa rocha possuir fraturas não preenchidas. No segundo caso, quando o arenito se encontra sotoposto às rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, há a formação de um confinamento responsável pelo aumento na circulação de água e pela maior produtividade dos poços.

As características hidrogeológicas dessa unidade indicam vazões significativas com capacidades específicas variáveis. Segundo MAGNA (1997) 56 poços foram analisados e os resultados encontrados indicaram que:

- 55% possuem capacidade específica entre 0,075 - 1,295 m³/h/m;
- 32% possuem capacidade específica entre 1,295 - 2,515 m³/h/m;
- 27% apresentaram vazão de exploração entre 3,744 - 12,904 m³/h;
- 16% apresentaram vazão de exploração entre 12,904 - 22,064 m³/h;
- 19% apresentaram vazão de exploração entre 40,384 - 49,544 m³/h.

4.1.2 - Formação Serra Geral

Essa unidade cobre cerca de 90% da área da bacia e é caracterizada pela presença de aquíferos fraturados, cuja circulação da água ocorre em estruturas tectônicas (fraturas e zonas de fraturas), que podem apresentar ou não influência das estruturas primárias. A variabilidade dessa circulação está condicionada pela existência de estruturas, preenchimento das fraturas, largura, extensão, cruzamento e conexão dos lineamentos, envergadura da zona fraturada e grau de dissecação do relevo. Com isso, poços produtivos devem ser localizados em regiões que apresentem sistemas estruturais propícios e que possuam baixos graus de dissecação de relevo. Além disso, a existência de fluxo de água subterrânea em profundidades superiores a 300m é possível se a rocha apresentar estruturação primária, caracterizada pelas disjunções verticais. Por outro lado, a existência de zonas vesiculares e amigdalóides em derrames vulcânicos pouca influência tem sobre a circulação da água subterrânea, a não ser que essas zonas sejam interceptadas e conectadas a sistemas de estruturas.

Nessa unidade, as características hidrogeológicas estão representadas por vazões extremamente variáveis (condicionadas ao controle tectônico) e por capacidades específicas baixas (indicativas de pequeno suprimento de água). Conforme MAGNA (1997), foram analisados dados provenientes de 227 poços que apresentaram as seguintes características:

- 88% possuem capacidade específica entre 0,016 - 2,556 m³/h/m;
- 44% apresentaram vazão de exploração entre 1,2 - 9,970 m³/h;
- 20% apresentaram vazão de exploração entre 9,970 - 18,740 m³/h;
- 16% apresentaram vazão de exploração entre 18,740 - 27,510 m³/h.

A qualidade das águas nessa unidade é boa e raramente apresentam restrições para o consumo humano, animal, para a utilização agrícola (irrigação) ou industrial (nesse caso, dependendo da indústria, faz-se necessário o tratamento da água).

4.2 – Hidrogeologia da área de estudo

Na região de estudo, há a ocorrência de dois sistemas de aquíferos, um denominado de livre ou freático e outro de fraturado.

O sistema aquífero livre ou freático está localizado no manto de alteração existente sobre as rochas vulcânicas. Esse manto é formado por material argiloso, com pequenas frações arenosas e com grau de permeabilidade baixo a médio. Em função disso, a zona não saturada, em geral, é bastante ampla e a zona saturada possui pequenas dimensões.

As águas subterrâneas desse sistema são captadas por meio de poços escavados (poços cacimba), ou em fontes (muito comuns na região, principalmente em áreas onde a topografia apresenta maiores declividades). Essas águas são utilizadas para abastecimento público, doméstico e no desenvolvimento de atividades agropecuárias, nas zonas rurais.

Os fatores condicionantes dos aquíferos livres estão relacionados com o tipo de solo (mais ou menos argiloso), espessura do manto de alteração, topografia, substrato rochoso e clima. Os solos que apresentarem menores proporções de argilas e maiores espessuras, em princípio, possuem as melhores condições de armazenar e circular a água subterrânea. A topografia tem uma influência direta no processo de circulação da água, pois a mesma acompanha as inclinações do terreno e do substrato rochoso. Assim, em regiões de

declividade mais acentuada, no contato entre o manto de alteração e o substrato rochoso, há a tendência de formação de fontes. Quanto ao substrato rochoso, o principal fator corresponde a estruturação dos derrames de lavas, pois, em zonas maciças, a circulação da água ocorrerá entre o contato da zona de alteração e da rocha sã. Já, quando o substrato for caracterizado por rochas vulcânicas com estruturas primárias representadas por disjunção vertical e horizontal, haverá uma circulação por essas juntas e, quando as mesmas forem interceptadas por fraturas tectônicas, haverá a recarga dos aquíferos fraturados. Da mesma forma, nas zonas vesiculares e amigdalóides poderá haver uma circulação maior, dependendo do grau de alteração que essas rochas apresentarem. Conforme Hausman (1966), o sistema de juntas de resfriamento das rochas vulcânicas forma um sistema de vasos comunicantes, onde o nível estático marca um nível de equilíbrio.

O clima possui uma relação direta com o volume de água que circula nesses aquíferos e também com a posição do nível estático. Dependendo do tamanho da área de recarga (micro-bacia) e da quantidade de precipitação sobre a mesma, haverá a formação e circulação de maiores ou menores quantidades de água subterrânea. Além disso, quando há variações significativas da precipitação, haverá mudanças na posição do nível estático, e em períodos de chuvas intensas, há um aumento da zona saturada que eleva esse nível, enquanto em períodos de estiagem o nível diminui.

Segundo Hausman (1966), as vazões associadas ao aquífero existente na zona de alteração das rochas vulcânicas, na maior parte, são inferiores a $1 \text{ m}^3/\text{h}$, mas podem, em alguns locais, alcançar até $18 \text{ m}^3/\text{h}$. As vazões sofrem influência do clima, pois, em períodos de estiagem, ocorrem diminuições significativas; na maioria dos casos, essa diminuição chega em média a 50% (muitas vezes, poços secam em função de estiagem prolongada).

Com relação à qualidade da água do aquífero livre ou freático, Hausman (1966) comenta que as mesmas não apresentam particularidades marcantes. Em geral, são águas que possuem pH variando entre 6 e 9,5, que apresentam baixos teores de sólidos totais, alcalinidade não muito elevada e dureza abaixo de 100. Outra característica está relacionada com a presença de ferro, que, em boa parte dos casos, apresenta-se em níveis acima do permitido. O teor desse elemento está relacionado com o tipo litológico e com o grau de alteração das rochas vulcânicas. Em outras situações, podem ser encontradas águas minerais contendo ou não flúor.

Numa análise de dois poços cacimba localizados na região de Nova Prata (Tab. VII), observou-se que há uma tendência química marcada pela relação cálcio>magnésio, oriunda dos processos de intemperismo químico das rochas vulcânicas.

Tabela VII – Análise química de dois poços cacimba da região de Nova Prata.

Parâmetro	Poço 1	Poço 2
pH	5,43	6,53
Dureza mg/l	12	34
Ferro mg/L	0,24	0,13
Manganês mg/L	0,047	0,026
Fluoretos mg/L	n.d.	n.d.
Cálcio mg/L	08	22
Magnésio mg/L	3,36	10,08

Quanto à contaminação bacteriológica, o sistema aquífero livre ou freático apresenta um alto grau de vulnerabilidade. Tedesco (2002) desenvolveu um estudo sobre a contaminação bacteriológica dos poços escavados/cacimba e fontes utilizadas pelas comunidades da zona rural, onde determinou que 70% dos poços apresentavam altos índices de coliformes fecais (36% até 3000 UFC/ml; 18% entre 3000 e 6000 UFC/ml e 16% acima de 6000 UFC/ml; alguns casos chegam a 42000 UFC/ml). Tedesco (2002) também identificou que a origem dessa contaminação está relacionada a atividades agrícolas (lixiviação de nutrientes orgânicos utilizados nas lavouras) e domésticas (lançamento de águas residuárias sem tratamento diretamente nos solos).

O sistema aquífero fraturado, por outro lado, está localizado nas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (basaltos, riolitos, riodacitos), e seu principal condicionante é o sistema estrutural. A formação e circulação de água nesse sistema está diretamente relacionada com a estruturação tectônica (presença de fraturas, zonas de fraturas) e, em segundo plano, com a estruturação primária da rocha. Dessa forma, esse aquífero é caracterizado por uma elevada anisotropia, responsável por vazões variáveis e por capacidades específicas, em geral, baixas. A forma de captação das águas subterrâneas desse aquífero ocorre por meio de poços tubulares, construídos por meio de sondas percursoras e rotopneumáticas.

Os dois sistemas de aquíferos, livre ou freático e fraturado, podem ou não apresentar conexão. No entanto, é clara a evidência que a recarga dos aquíferos fraturados tem relação com a circulação da água no manto de alteração, que, quando interceptado por sistemas de fraturas, capta essas águas, formando e alimentando o aquífero fraturado.

4.2.1 – Características gerais do sistema aquífero fraturado

A caracterização do sistema aquífero fraturado foi realizada com base na análise de dados de poços tubulares construídos pela CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento), pelo PAP/SDO (Programa de Açudes e Poços da Secretaria de Desenvolvimento e Obras do Estado do Rio Grande do Sul), pela Secretaria de Agricultura, pelo SAMAE (Sistema Autônomo Municipal de Águas e Esgotos de Caxias do Sul) e por empresas privadas de perfuração. Nesse levantamento, foram coletadas informações sobre os poços produtivos, abandonados e nulos.

Os poços identificados foram cadastrados em campo, onde foram obtidas coordenadas UTM da sua localização. Os dados técnicos obtidos com o cadastramento, mais as informações coletadas em campo, foram utilizadas para a alimentação de um banco de dados. Para isso, foi confeccionado um programa denominado de CADPO (Cadastro de Poços Tubulares), tendo como base o aplicativo ACCESSTM.

A ficha de entrada dos dados técnicos de cada um dos poços tubulares cadastrados nesse programa, foi elaborada baseada nos trabalhos de Fracalossi Jr & Sarmiento (1990) e Pessoa (1982). A estruturação da ficha cadastral contempla os seguintes dados (Fig. 5,6,7,8,9,10 e 11):

⇒ identificação. São descritas informações como código do poço, situação em que se encontra o poço (produtivo, ou não) e uso atual do mesmo;

⇒ localização. Com relação ao município em que se encontra, ao distrito, às coordenadas geográficas, às cartas topográficas e à micro-bacia;

⇒ dados técnicos. Referentes à empresa que efetuou a perfuração, responsável técnico, método de locação utilizado, tipo de aquífero alcançado e descrição geológica do local ;

⇒ dados construtivos. Envolvem as informações referentes ao método de perfuração, diâmetro do poço, revestimentos utilizados, filtros e pré-filtros, localização das entradas d'água, profundidade final, cimentação, bomba utilizada;

⇒ dados hidrogeológicos. Referentes ao teste de vazão, metodologia adotada para esse teste, vazão obtida e produzida, nível dinâmico e estático, transmissividade, permeabilidade, coeficiente de armazenamento e espaços para anexos referentes aos testes de vazão realizados;

⇒ perfil litológico. Descrição das litologias e espaço para anexar o perfil geológico elaborado pela empresa (quando existir);

⇒ análise química. Determinação da qualidade da água, presença de excesso de ferro e/ou manganês e existência dessas análises.

Esse programa foi elaborado visando à realização de consultas ao banco de dados (Fig. 12, 13 e 14). Nesse caso, pode-se efetuar consultas sobre:

⇒ identificação do Poço: código do poço, código do projeto, situação atual do poço, situação atual de uso;

⇒ localização: por município, distrito, localidade e proprietário, bacia hidrográfica, coordenadas UTM ou Geográficas, carta topográfica;

⇒ dados técnicos: tipo de aquífero;

⇒ dados construtivos: método de perfuração;

⇒ dados hidrogeológicos: tipo de teste de vazão e vazão obtida;

⇒ análise química: se existe ou não e resultados do laudo (potável, não-potável, mineral, excesso de ferro e manganês, contaminante, características especiais).

Com as possibilidades de consultas existentes nesse programa, pode-se efetuar uma análise da situação atual dos recursos hídricos subterrâneos na região como um todo e nos diferentes municípios.

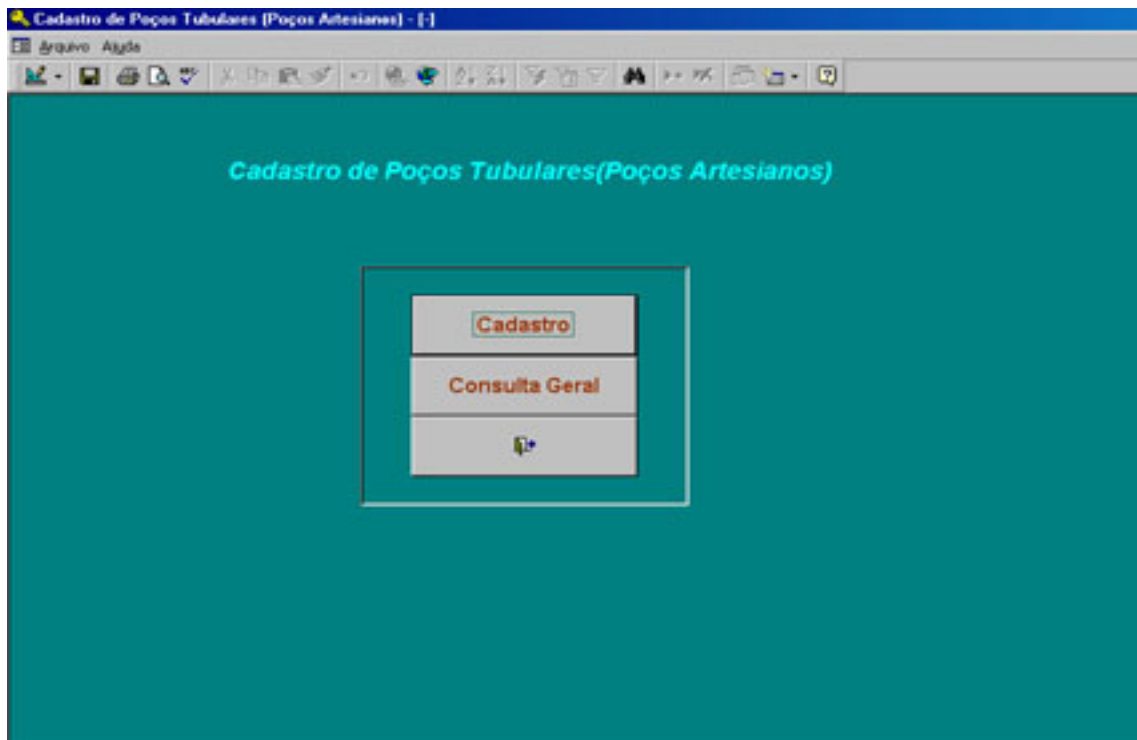


Figura 5 – Janela de entrada do programa CADPO.

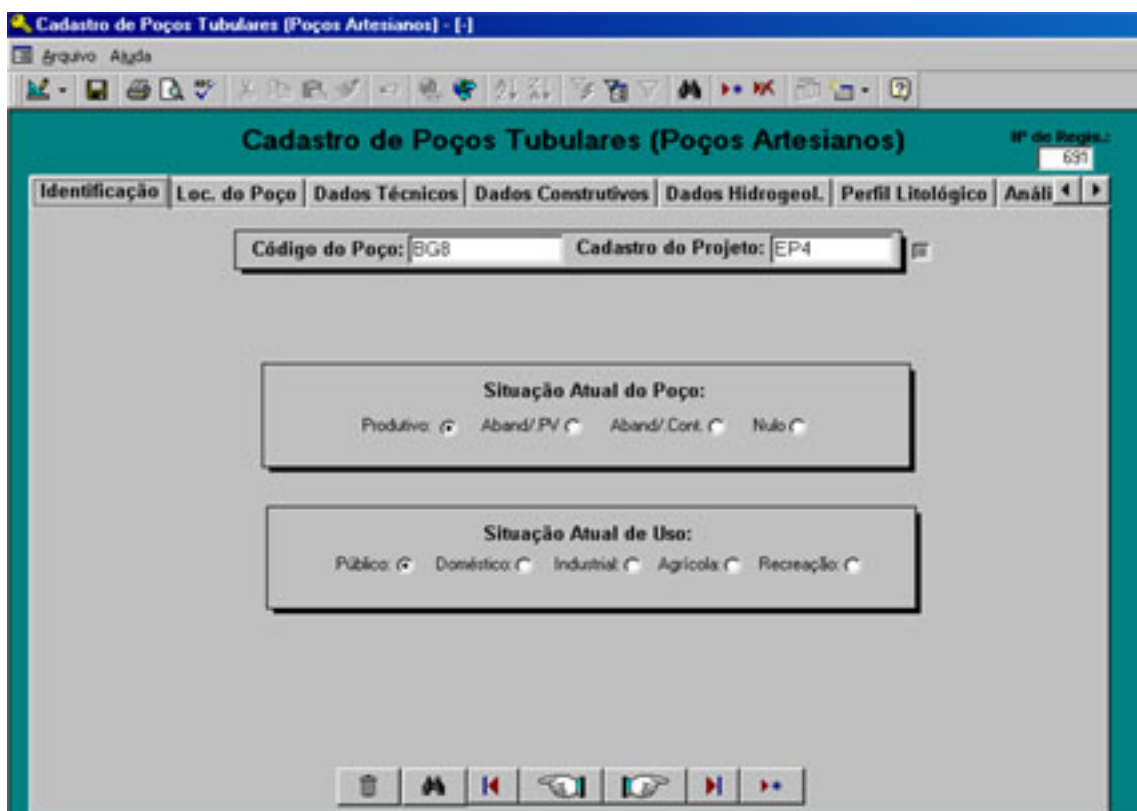


Figura 6 – Dados de identificação dos poços tubulares.

Cadastro de Poços Tubulares (Poços Artesianos) Nº de Regis.: 691

Identificação | Loc. do Poço | Dados Técnicos | Dados Construtivos | Dados Hidrogeol. | Perfil Litológico | Análi

Código do Poço: BG8 Cadastro do Projeto: EP4

Município: Bento Gonçalves
 Distrito: Linha 6 da Leopoldina
 Proprietário: Prefeitura Municipal
 Localidade/Endereço: Linha 6 da Leopoldina

Bacia Hidrográfica:
 Taquari Cal

Sub-Bacia:

Coordenadas:
 UTM: Geográficas:
 446278mE 6772299mN

Carta Topográfica:
 Nova Plata SH.22-V-B-V-4 Antônio Prado SH.22-V-B-V-3
 São Marcos SH.22-V-B-V-4 Casás do Sul SH.22-V-D-III-2
 Farroupilha SH.22-V-D-III-1 Bento Gonçalves SH.22-V-D-II-2

Figura 7 – Dados de localização dos poços tubulares.

Cadastro de Poços Tubulares (Poços Artesianos) Nº de Regis.: 691

Identificação | Loc. do Poço | Dados Técnicos | Dados Construtivos | Dados Hidrogeol. | Perfil Litológico | Análi

Código do Poço: BG8 Cadastro do Projeto: EP4

Método de Perfuração:
 Pito-Pneumática: Percussão:
 Outros:

Perfuração:
 12 pol: 6 pol: 4 pol:
 Outros:

Revestimento: 5.8
 Filtros e Pré-Filtros:
 Entrada d'água: 3470
 Profundidade: 140 Bomba: 102
 Cimentação:

Figura 8 – Dados construtivos dos poços tubulares.

Cadastro de Poços Tubulares (Poços Artesianos) Nº de Regis.: 691

Identificação | Loc. do Poço | Dados Técnicos | Dados Construtivos | Dados Hidrogeol. | Perfil Litológico | Anál. < >

Código do Poço: BG8 Cadastro do Projeto: EP4

Teste de Vazão:
 Compressor: Caçamba: 24h: 12h:
 Duração:

Vazão Obtida:
 <0,5 m 0,5-1 m /h 1-2 m /h 2-3 m /h 3-4 m /h 4-5 m /h 5-6 m /h 6-7 m /h 7-8 m /h 8-9 m /h 9-10 m /h 10-15 m /h 15-20 m /h >20 m /h

Anexo:
 Sim:
 Não:

Nível Dinâmico: 88,60 Nível Estático: 9,26
 Transmissividade: 0,08 Permeabilidade:
 Coef. de Armazenamento: 0,064

Figura 9 – Dados hidrogeológicos dos poços tubulares.

Cadastro de Poços Tubulares (Poços Artesianos) Nº de Regis.: 691

Identificação | Loc. do Poço | Dados Técnicos | Dados Construtivos | Dados Hidrogeol. | Perfil Litológico | Anál. < >

Código do Poço: BG8 Cadastro do Projeto: EP4

Perfil e Descrição em Anexo:
 Sim:
 Não:

Figura 10 – Dados sobre perfil litológico dos poços tubulares.

Cadastro de Poços Tubulares (Poços Artesianos) Nº de Regis.: 691

Loc. do Poço | Dados Técnicos | Dados Construtivos | Dados Hidrogeol. | Perfil Litológico | **Análise Química**

Código do Poço: BGB Cadastro do Projeto: EP4

Análise Química:
 Existe:
 Não Existe:

Empresa/Laboratório: CORSAN

Relat. em Anexo:
 Sim:
 Não:

Laudo:
 Potável:
 Não Potável:
 Mineral:
 Excesso de Ferro e Manganês:

Contaminante:

Características: Cor e Turbidez acima do padrão

Figura 11 – Dados referentes a análise química das águas subterrâneas.

Consulta Geral de Poços Tubulares (Poços Artesianos)

Código do Poço: Cadastro do Projeto:

Inicial

IDENTIFICAÇÃO:

Situação Atual do Poço:
 Produtivo: Aband./PV: Aband./Cont.: Nulo:

Situação Atual de Uso:
 Público: Doméstico: Industrial: Agrícola: Recreação:

LOCALIZAÇÃO DO POÇO

Município: Distrito: Proprietário: Localidade/Endereço:

Bacia Hidrográfica:
 Taquari: Cai:

Sub-Bacia:

Coordenadas:
 UTM: Geográficas:

Carta Topográfica:
 Nova Prata SH.22-V-B-V-4 Antônio Prado SH.22-V-B-VI-3
 São Marcos SH.22-V-B-VI-4 Casais do Sul SH.22-V-D-III-2
 Farroupilha SH.22-V-D-III-1 Bento Gonçalves SH.22-V-D-II-2

Figura 12 – Janela da função consulta geral do programa CADPO.

Cadastro de Poços Tubulares (Poços Artesianos) - [-]

Arquivo Ajuda

DADOS TÉCNICOS

Tipo de Aquífero:

Fraturado: Confinado: Não-Confinado:

DADOS CONSTRUTIVOS

Método de Perfuração:

Roto-Pneumática: Percussão:

Outros:

DADOS HIDROGEOLÓGICOS

Teste de Vazão:

Compressor: Caçamba: 24h: 12h:

Outros:

Vazão Obtida:

<0,5 m³/h: 0,5-1 m³/h: 1-2 m³/h: 2-3 m³/h: 3-4 m³/h:

4-5 m³/h: 5-6 m³/h: 6-7 m³/h: 7-8 m³/h: 8-9 m³/h:

9-10 m³/h: 10-15 m³/h: 15-20 m³/h: >20 m³/h:

Figura 13 – Parte da janela de consulta geral referente aos dados técnicos, construtivos e hidrogeológicos do programa CADPO.

ANÁLISE QUÍMICA

Análise Química:

Existe:

Não Existe:

Laudo:

Potável:

Não Potável: Contaminante:

Mineral: Características:

Excesso de Ferro e Manganês:

Figura 14 – Janela de consulta geral referente aos dados sobre análise química do programa CADPO.

Analisando os dados obtidos com o cadastro de poços tubulares e as informações coletadas com a utilização da ferramenta “Consulta Geral” do programa CADPO, pode-se determinar as principais características hidrogeológicas da região de estudo (Tab. VIII).

Tabela VIII – Situação atual dos poços tubulares na região de estudo

Situação Atual dos Poços	Produtivos	Abandonados Pouca Vazão	Abandonados Contaminação	Nulos	
Número de Poços Cadastrados = 690	569	11	5	105	
Situação Atual de Uso	Público	Doméstico	Indústrial	Agrícola	Recreação
Número de Poços Cadastrados = 690	420	49	175	35	11

Analisando os dados apresentados na tabela VIII, observa-se que o número de poços cadastrados é significativo para a região. Porém, isso não representa a realidade, pois há uma quantidade de poços tubulares perfurados por empresas privadas que não foram cadastrados, já que as informações sobre a existência dos mesmos não foram fornecidas por essas empresas. No entanto, pode-se ter uma visão geral da situação existente na região, pois ela é caracterizada por um grande número de poços produtivos e um número significativo de poços nulos, que evidenciam a complexidade da prospecção dos aquíferos fraturados. Além disso, pode-se observar que a maior parte dos poços perfurados é utilizada para abastecimento público (urbano e rural); em segundo lugar, está o ramo industrial (as regiões de Caxias do Sul, Bento Gonçalves, Flores da Cunha e Farroupilha caracterizam essa forma de utilização); em terceiro, o ramo doméstico (utilizados para abastecimento de famílias rurais e desenvolvimento de atividades); em quarto, o ramo agrícola e por fim o ramo de recreação. Além disso, fica evidenciado que os municípios de Monte Belo do Sul, Nova Pádua, Nova Roma, Flores da Cunha e Antônio Prado possuem abastecimento público exclusivo de poços tubulares, enquanto que, para outras localidades, essa forma de abastecimento é mais comum nas comunidades rurais.

Analisando-se a localização dos poços tubulares em cada município existente na área de estudo, identificou-se a seguinte distribuição:

- Antônio Prado: 32 poços;
- Bento Gonçalves: 94 poços;
- Caxias do Sul: 175 poços;
- Cotiporã: 17 poços;
- Farroupilha: 80 poços;
- Flores da Cunha: 122 poços;
- Monte Belo do Sul: 15 poços;
- Nova Pádua: 40 poços;
- Nova Roma do Sul: 35 poços;
- São Marcos: 43 poços;
- Veranópolis: 37 poços.

Com base nessa distribuição, observa-se que há municípios que apresentam um índice elevado de poços tubulares, enquanto outros apresentam pequenas quantidades, o que evidencia a necessidade do desenvolvimento de programas de gestão de águas subterrâneas. Isso é particularmente importante para os municípios que utilizam para seu abastecimento (coleta e distribuição através das redes de água), recursos subterrâneos e possuem um alto índice de poços tubulares, como o caso de Flores da Cunha. Nessa situação, os municípios podem ter suas reservas comprometidas, implicando, no futuro, no comprometimento do abastecimento público.

Ao analisarmos a localização dos poços tubulares nas folhas topográficas, que, de uma forma geral, coincidem com diferentes setores da região de estudo, observa-se a seguinte distribuição:

- Folha Nova Prata – SH.22-V-B-V-4 (MI-2935/4): 57 poços;
- Folha Bento Gonçalves – SH.22-V-D-II-2 (MI-2952/2): 109 poços;
- Folha Antônio Prado – SH.22-V-B-VI-3 (MI-2936/3): 83 poços;
- Folha Farroupilha – SH.22-V-D-III-1 (MI-2953/1): 135 poços;
- Folha São Marcos – SH.22-V-B-VI-4 (MI-2936/4): 60 poços;
- Folha Caxias do Sul – SH.22-V-D-III-2 (MI-2953/2): 246 poços.

Os dados técnicos referentes à forma de perfuração e à hidrogeologia (testes de vazão e análises químicas) foram obtidos somente para alguns poços tubulares, pois as informações levantadas com o cadastramento de campo e os dados dos poços perfurados por empresas privadas eram insuficientes, sem procedência garantida e, em geral, obtidos através de informação verbal. Assim, a caracterização da forma de construção dos poços tubulares, foi realizada com base nos dados de 427 poços. Desses, 396 poços foram perfurados por sondagem a percursão, enquanto, 31 poços foram perfurados por sondagens rotopneumáticas. Identificou-se, na fase de levantamento de campo, por meio de conversa com os proprietários dos poços tubulares, que há uma suposição sobre o método de sondagem. Para essas pessoas, a sondagem a percursão seria a melhor, pois ao longo da perfuração esse método promoveria um aumento das “fendas”, enquanto que, a sondagem rotopneumática, seria responsável pelo fechamento dessas “fendas”, tornando o poço nulo. Analisando essa hipótese levantada pelos moradores da região, verifica-se que o maior problema está na locação dos poços e não no método de sondagem, como será mostrado nesse trabalho.

Para a caracterização dos testes de vazão, foram utilizados dados de 295 poços, sendo que em 283 deles foram realizados testes de vazão de 24 horas, em 10 poços, testes de caçamba e em 2 poços, testes com compressor. O número elevado de testes de vazão com 24 horas deve-se ao fato de que as informações existentes sobre a forma do teste, só foram identificadas nos poços tubulares abertos pela CORSAN, PAP/SDO e alguns do SAMAE.

Com relação às vazões dos poços tubulares na região de pesquisa, obteve-se a seguinte proporção:

- $< 0,5\text{m}^3/\text{h}$: 1%;
- $0,5 - 1,0\text{ m}^3/\text{h}$: 1,9%;
- $1,0 - 2,0\text{ m}^3/\text{h}$: 6,6%;
- $2,0 - 3,0\text{ m}^3/\text{h}$: 8,2%;
- $3,0 - 4,0\text{ m}^3/\text{h}$: 7,8%;
- $4,0 - 5,0\text{ m}^3/\text{h}$: 14,1%;
- $5,0 - 6,0\text{ m}^3/\text{h}$: 8,6%;
- $6,0 - 7,0\text{ m}^3/\text{h}$: 3,2%;
- $7,0 - 8,0\text{ m}^3/\text{h}$: 7,6%;
- $8,0 - 9,0\text{ m}^3/\text{h}$: 3,2%;
- $9,0 - 10,0\text{ m}^3/\text{h}$: 9,9%;

- 10,0 – 15,0 m³/h: 12,7%;
- 15,0 – 20,0 m³/h: 5,9%;
- >20,0 m³/h: 9,3%.

Analisando-se essa distribuição, observa-se que 72,1% dos poços tubulares apresentam vazões abaixo de 10 m³/h (39,6% até 5 m³/h e 32,5% entre 5 e 10 m³/h), 12,7% possuem vazões entre 10,0 a 15,0 m³/h, 5,9% entre 15,0 e 20,0 m³/h e 9,3% apresentam vazões acima de 20 m³/h.

Com relação à análise química, identificou-se que 551 poços apresentaram análises químicas (nem todos tinham o laudo do laboratório disponível para verificação). Dessas análises, identificou-se que 479 poços possuíam águas potáveis, 11 poços possuíam águas não potáveis, 4 poços tinham águas minerais e 57 poços apresentaram excesso de ferro e manganês. Esse último dado comprova um problema com relação à qualidade da água subterrânea da região, pois, em muitas localidades, são perfurados poços tubulares que apresentam boas vazões (20 a 30 m³/h), mas acabam não sendo utilizados (em geral, são lacrados), pois há excesso desses elementos nas águas subterrâneas.

4.2.2 – Hidrodinâmica do sistema aquífero fraturado

A caracterização geral e hidrodinâmica do sistema aquífero fraturado foi realizada com base na interpretação dos dados hidrogeológicos dos poços perfurados pela CORSAN e PAP/SDO, pois os mesmos apresentam um maior número de informações, que foram obtidas por meio do desenvolvimento de metodologias semelhantes. Para essa caracterização geral, foram utilizadas dados provenientes de 238 poços tubulares.

O sistema aquífero fraturado é condicionado, principalmente, por estruturas representadas por lineamentos (fraturas e zonas de fraturas). A circulação da água subterrânea ocorre ao longo do sistema de fraturas que, quando conectadas, fazem com que a mesma seja difusa, caracterizando o sistema como anisotrópico.

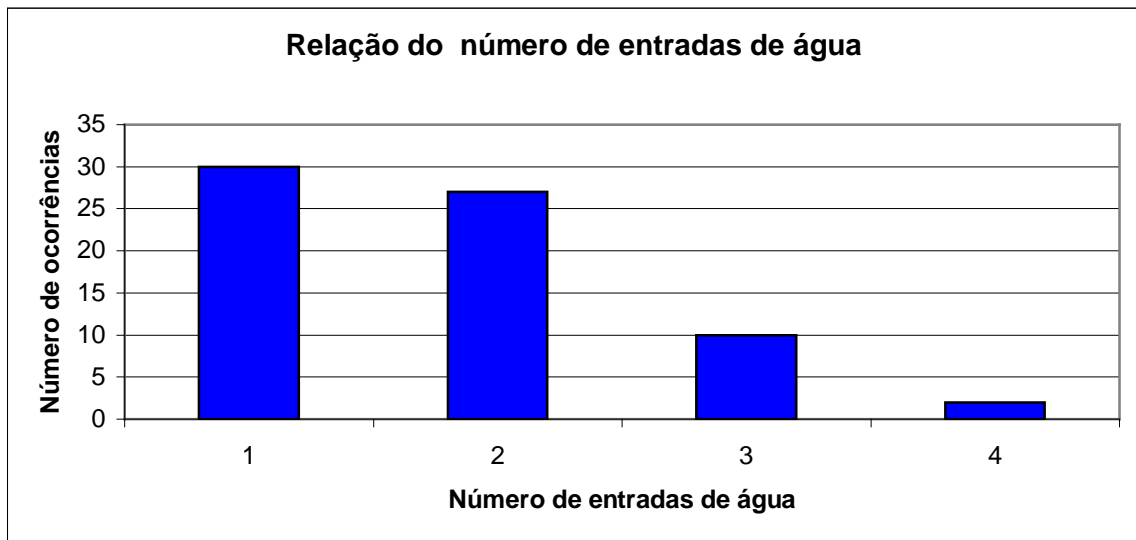
A recarga é realizada de duas formas principais. A primeira é feita através do manto de alteração, que proporciona a infiltração das águas pluviais e alimenta os sistemas de fraturas. Com isso, os aquíferos fraturados são formados e mantidos. A segunda forma de recarga

ocorre em regiões de relevo mais dissecado, caracterizado pela presença de vales profundos. Nessas regiões, há o favorecimento da circulação vertical das águas do aquífero Botucatu e das águas do aquífero fraturado. Isso ocorre se o sistema estrutural permite a conexão entre os aquíferos e, conseqüentemente, a circulação e a mistura de suas águas.

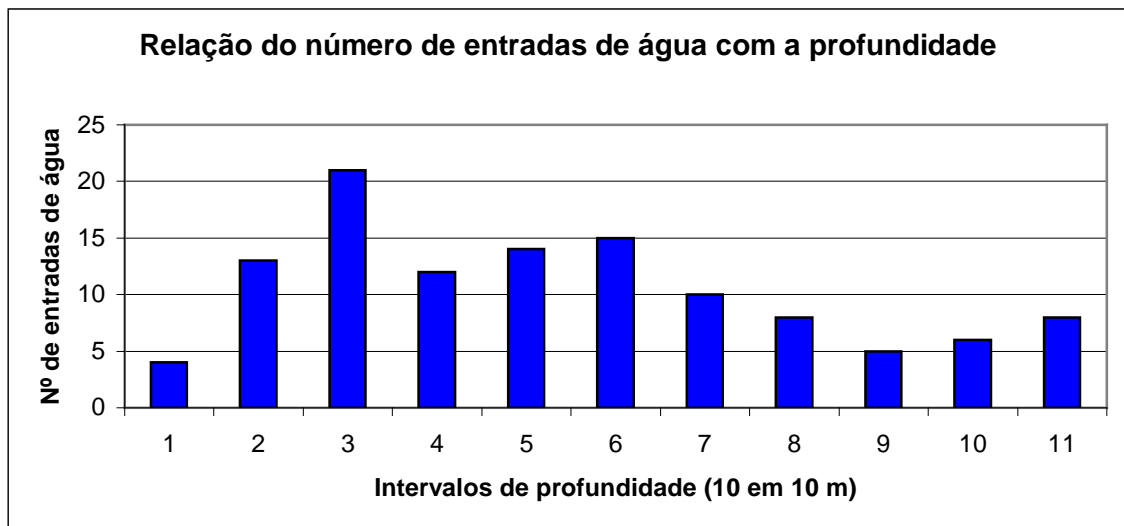
As características descritas nesse item referem-se a dados sobre profundidade dos poços produtivos e nulos, número de entradas de água, profundidade das entradas de água, posição do nível estático, valores de transmissividade e capacidade específica.

Como panorama geral, a profundidade média dos poços produtivos da região de estudo é de 110 metros, enquanto que os poços nulos apresentam profundidades médias em torno de 150 metros. Essa profundidade média evidencia os critérios adotados por profissionais que desenvolvem atividades voltadas à prospecção de poços tubulares. Por exemplo Giardin (1997) considera a profundidade de 120 metros como máxima durante os processos de perfuração (o aprofundamento do poço dependerá das condições geológicas). Já, Hausman (1995) considera que, em profundidades superiores a 300 metros, haverá uma dificuldade muito grande para circulação da água pelas fraturas, pois a pressão do maciço é elevada. Além disso, Hausman (1995) salienta que já há uma diminuição da circulação a partir dos 140 metros de profundidade em função dessas mesmas pressões. No entanto, observa-se, na região, a existência de poços produtivos com profundidades acima de 150 metros e, em alguns casos, acima de 200 metros.

A análise das entradas de água identificadas na perfuração dos poços tubulares (Fig. 15) mostra que a maior parte deles apresenta uma (43,5%), ou duas (39,1%) entradas de água. A ocorrência de três (14,5%), ou quatro (2,9%) entradas de água se dá em proporções menores. Além disso, a comparação entre a ocorrência de entradas de água com a profundidade mostra que, no intervalo de profundidade entre 10 e 70 metros, há o maior número de ocorrências de entradas de água; abaixo desse intervalo, há uma diminuição (Fig. 15b).



(a)



(b)

Figura 15 – Caracterização das entradas de água: (a) número de entradas de água identificadas na análise dos poços tubulares; (b) relação entre o número de entradas de água com a profundidade.

A localização das entradas de água nos poços tubulares construídos no sistema aquífero fraturado tem relação com o sistema estrutural. Dependendo do tipo de estrutura (se fraturas ou zonas de fraturas), dependendo do mergulho das fraturas e da posição do poço (locação) em relação às fraturas, haverá pontos diferentes onde ocorrerá a interceptação das fraturas pelos poços tubulares. Assim, haverá a possibilidade de ocorrer mais de uma entrada de água por poço em diferentes profundidades.

O nível estático identificado nos poços tubulares, na maior parte dos casos (em torno de 66,4%), está localizado no intervalo de profundidade entre 0 e 10 metros; em 16,4% deles, esse nível está no intervalo entre 10 e 20 metros; e abaixo dos 20 metros de profundidade, há uma menor ocorrência de níveis estáticos (Fig. 16). Essa relação evidencia que a circulação da água nos sistemas de fraturas ocorre sob pressão e que, ao se construir um poço tubular, há a tendência do nível de água sofrer uma elevação. Não é rara a ocorrência de artesianismo, onde os níveis estáticos ficam acima da superfície topográfica.

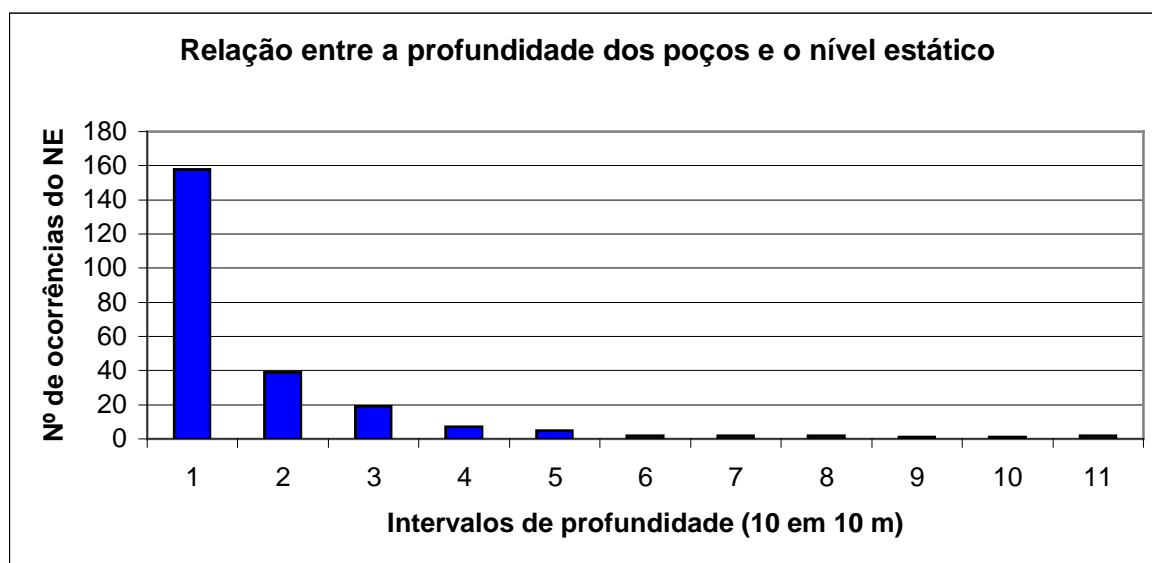


Figura 16 – Relação entre a localização do nível estático com a profundidade dos poços tubulares.

O sistema aquífero fraturado apresenta transmissividades médias (T_m) de $0,493 \text{ m}^2/\text{h}$ (mínima das médias = $0,133 \text{ m}^2/\text{h}$; máxima das médias = $1,458 \text{ m}^2/\text{h}$). O parâmetro capacidade específica (q) apresentou valores médios de $0,395 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (mínimo das médias = $0,106 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$; máximo das médias = $1,166 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$). A variabilidade encontrada nos valores de transmissividade e capacidade específica está de acordo com o tipo de aquífero (fraturado), pois esses parâmetros refletem a sua forte anisotropia.

Para uma melhor caracterização do sistema aquífero fraturado e para aprimorar o conhecimento desse tipo de aquífero nas diferentes regiões que constituem a área de pesquisa, será feita, a seguir, uma caracterização detalhada de cada município. Nem todas as unidades administrativas serão enfocadas, pois, em algumas delas, há falta de dados necessários para essa caracterização. As áreas abordadas correspondem aos municípios de Antônio Prado,

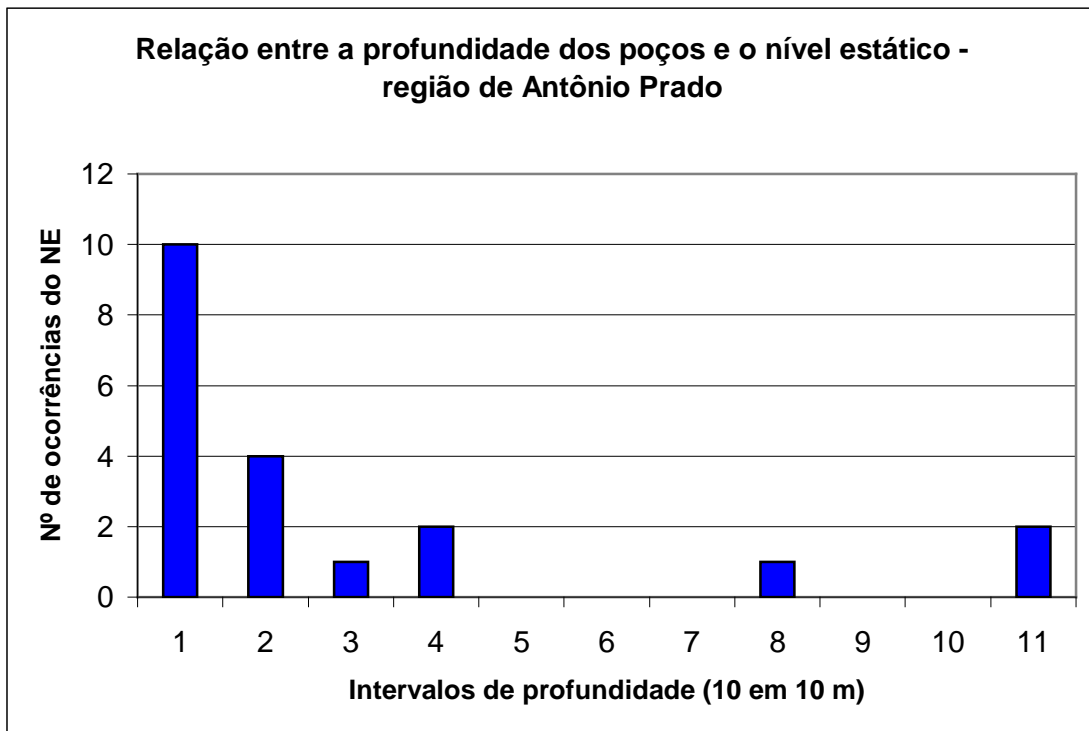
Bento Gonçalves, Caxias do Sul, Cotiporã, Farroupilha, Flores da Cunha, Monte Belo do Sul, Nova Pádua, Nova Roma do Sul, São Marcos e Veranópolis.

⇒ **Região de Antônio Prado**: foram analisados dados de 23 poços tubulares, referentes a profundidade, nível estático, vazão, transmissividade e capacidade específica. Os resultados são os seguintes:

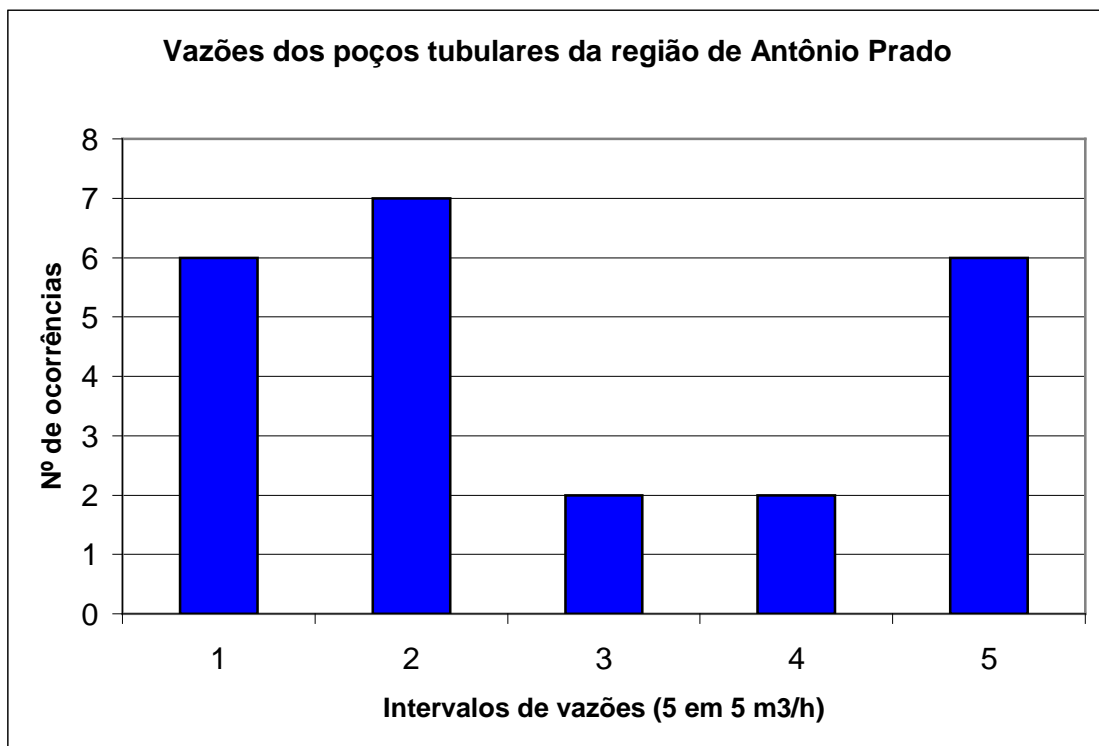
- profundidade média dos poços produtivos foi de 123,32 metros (menor profundidade encontrada foi de 40,5 metros e a maior foi de 264 metros);
- nível estático (NE): na maior parte dos casos (em torno de 56,5%), o nível estático está localizado no intervalo de 0 a 10 m, enquanto que em 17,4% situa-se no intervalo de 10 a 20 metros de profundidade (Fig. 17a);
- vazões: a maior parte das vazões dos poços tubulares (56,5%) está no intervalo entre 0,5 e 10 m³/h. Mas 26,1% dos poços mostram vazões acima de 20 m³/h (Fig. 17b);
- transmissividade média (Tm): 0,749 m²/h;
- capacidade específica (q): 0,599 m³/h/m.

⇒ **Região de Bento Gonçalves**: foram analisados dados de 59 poços tubulares, referentes a profundidade, entradas de água, nível estático, vazão, transmissividade e capacidade específica. Os resultados são os seguintes:

- profundidade média dos poços produtivos foi de 91,19 metros (menor profundidade foi de 36 metros e a maior foi de 160 metros). A média da profundidade encontrada em poços nulos foi de 157 metros (dados de cinco poços);
- entradas de água: nessa região, o número de entradas de água por poços mostra a seguinte proporção: 71,4% apresentaram duas entradas; 23,8% apresentaram uma única entrada de água, enquanto 4,8% tinham três entradas. A profundidade média da ocorrência dessas entradas situa-se entre 10 a 60 metros;
- nível estático (NE): na maior parte dos casos (em torno de 62%), o nível estático está localizado no intervalo de 0 a 10 metros. Porém, em 22% dos poços, o NE situa-se no intervalo de 10 a 20 metros de profundidade (Fig. 18a);
- vazões: a maior parte das vazões apresentadas pelos poços tubulares (72,9%) situa-se no intervalo entre 0,5 e 10 m³/h. Somente 16,9% dos poços possuem vazões acima de 20 m³/h (Fig. 18b);



(a)



(b)

Figura 17 – Dados hidrogeológicos da região de Antônio Prado: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.

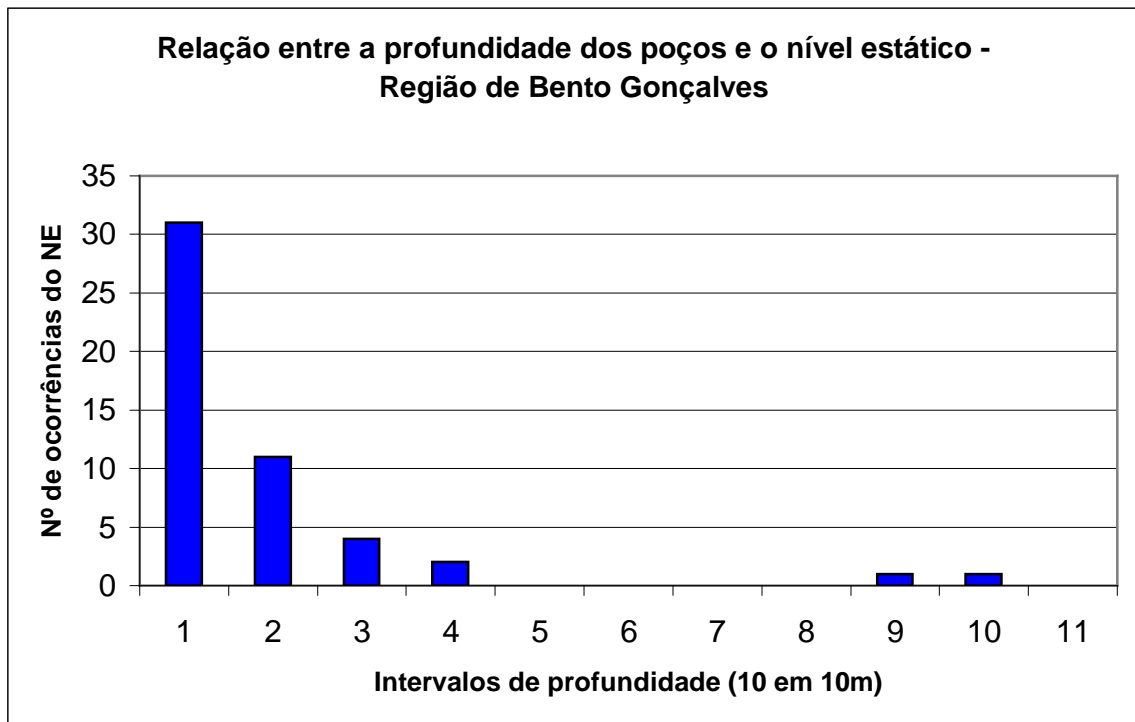
- transmissividade média (Tm): 0,774 m²/h;
- capacidade específica (q): 0,622 m³/h/m.

⇒ **Região de Caxias do Sul**: foram analisados dados de 22 poços tubulares (SAMAE, CORSAN e PAP/SDO), referentes a profundidade, a entradas de água, nível estático, vazão, transmissividade e capacidade específica. Os resultados são os seguintes:

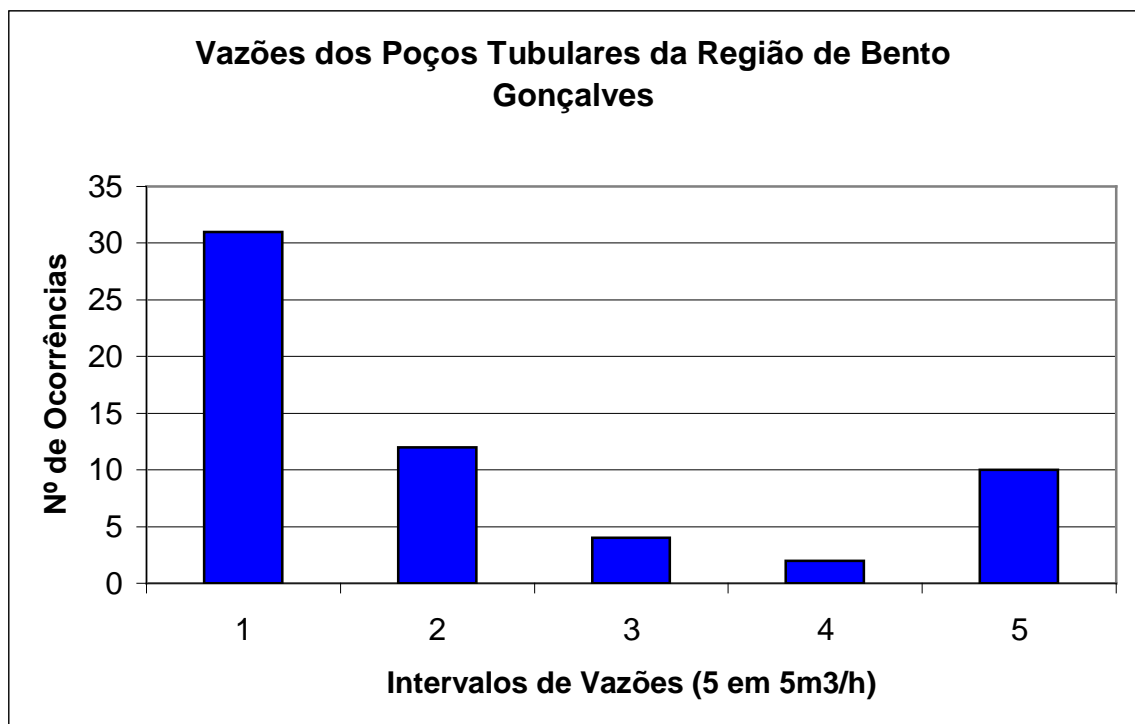
- profundidade média dos poços produtivos foi de 101,49 metros (menor profundidade de 41 metros e a maior de 178 metros). Com relação aos poços nulos, a média de profundidade encontrada foi de 139,9 metros (dados de quinze poços);
- entradas de água: nessa região, o número de entradas de água por poços distribuiu-se na seguinte proporção: 36,4% apresentaram uma entrada; 27,3% apresentaram duas entradas de água; 27,3% tinham três entradas; e 9% quatro entradas. A profundidade média da ocorrência das entradas de água foi no intervalo de 10 a 50 metros;
- nível estático (NE): na maior parte dos casos (em torno de 78,9%), o nível estático está localizado no intervalo de 0 a 10 metros, mas 10,5% dos poços, situa-se no intervalo de 10 a 20 metros de profundidade (Fig. 19a);
- vazões: a maior parte das vazões apresentadas pelos poços tubulares (77,3%) está no intervalo entre 0,5 e 10 m³/h, e apenas 4,5% dos poços possuem vazões acima de 20 m³/h (Fig. 19b);
- transmissividade média (Tm): 0,728 m²/h;
- capacidade específica (q): 0,582 m³/h/m.

⇒ **Região de Cotiporã**: foram analisados dados de 6 poços tubulares, referentes a profundidade, entradas de água, nível estático, vazão, transmissividade e capacidade específica. Os resultados são os seguintes:

- a profundidade média dos poços produtivos foi de 105 metros (menor profundidade foi de 52 metros e a maior foi de 192 metros). A profundidade média dos poços nulos foi de 156,2 metros (dados de cinco poços);
- entradas de água: nessa região, o número de entradas de água por poços distribuiu-se na seguinte proporção: 80% apresentaram uma entrada, enquanto que 20% têm três entradas. A profundidade média da ocorrência das entradas de água está no intervalo de 10 a 70 metros;
- nível estático (NE): 16,7% dos poços o nível estático está localizado no intervalo de 0 a 10 m, enquanto que em 50%, situa-se no intervalo de 10 a 20 m de profundidade (Fig 20 a);

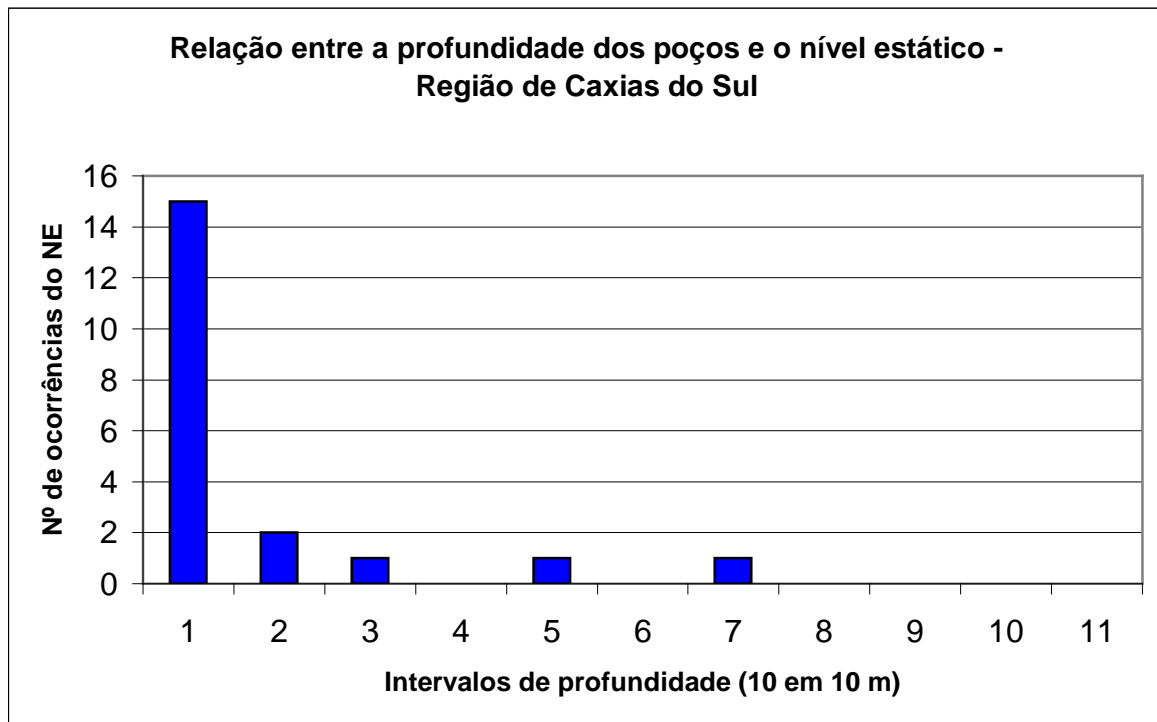


(a)

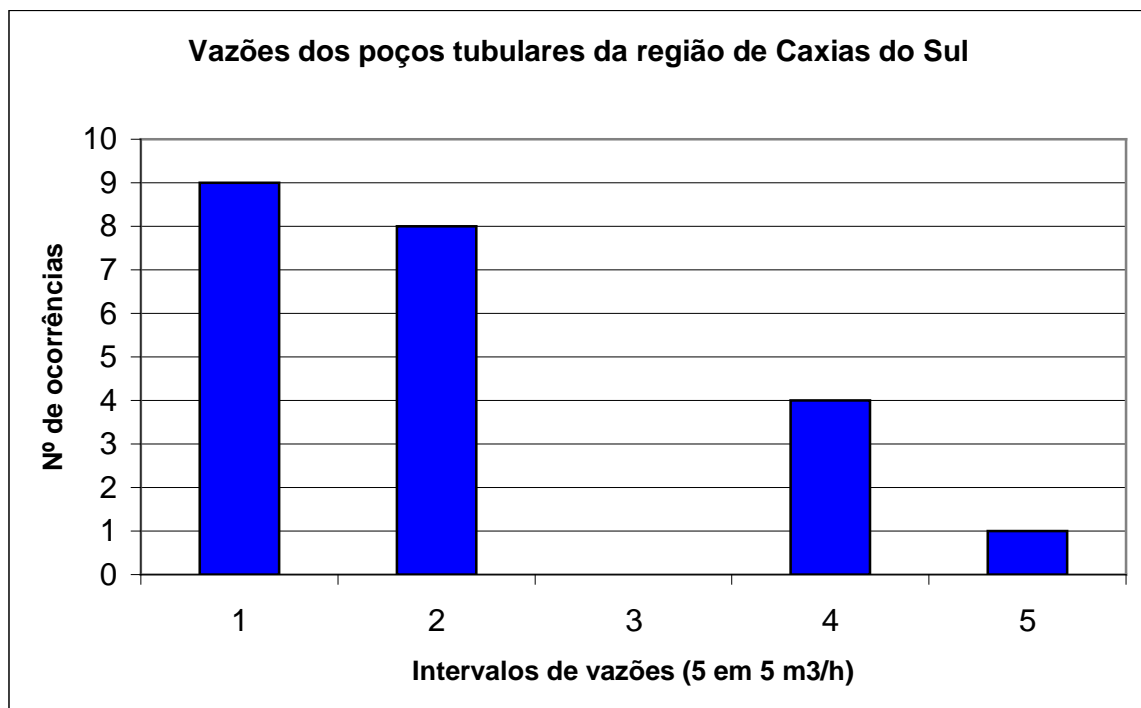


(b)

Figura 18 – Dados hidrogeológicos da região de Bento Gonçalves: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.



(a)



(b)

Figura 19 – Dados hidrogeológicos da região de Caxias do Sul: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.

- vazões: 100% dos poços apresentaram vazões abaixo de 10 m³/h (Fig. 20b);

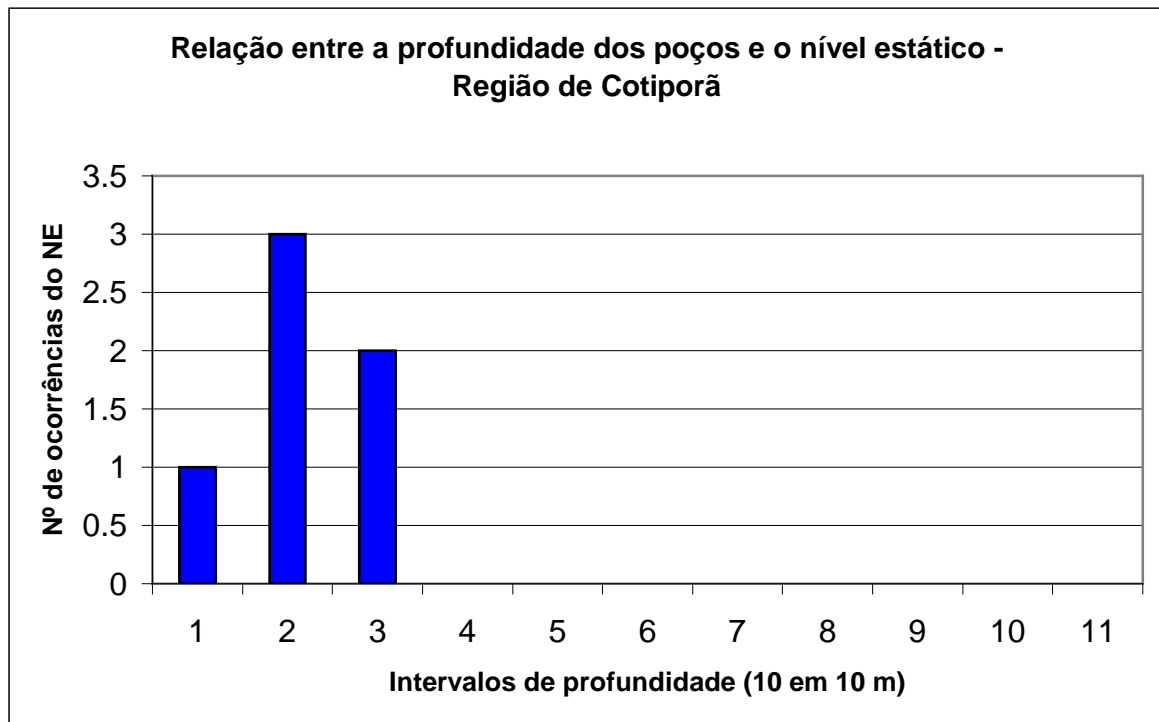
- transmissividade média (Tm): 0,218 m²/h;
- capacidade específica (q): 0,174 m³/h/m.

⇒ **Região de Farroupilha**: foram analisados dados de 40 poços tubulares, referentes a profundidade, entradas de água, nível estático, vazão, transmissividade e capacidade específica. Os resultados são os seguintes:

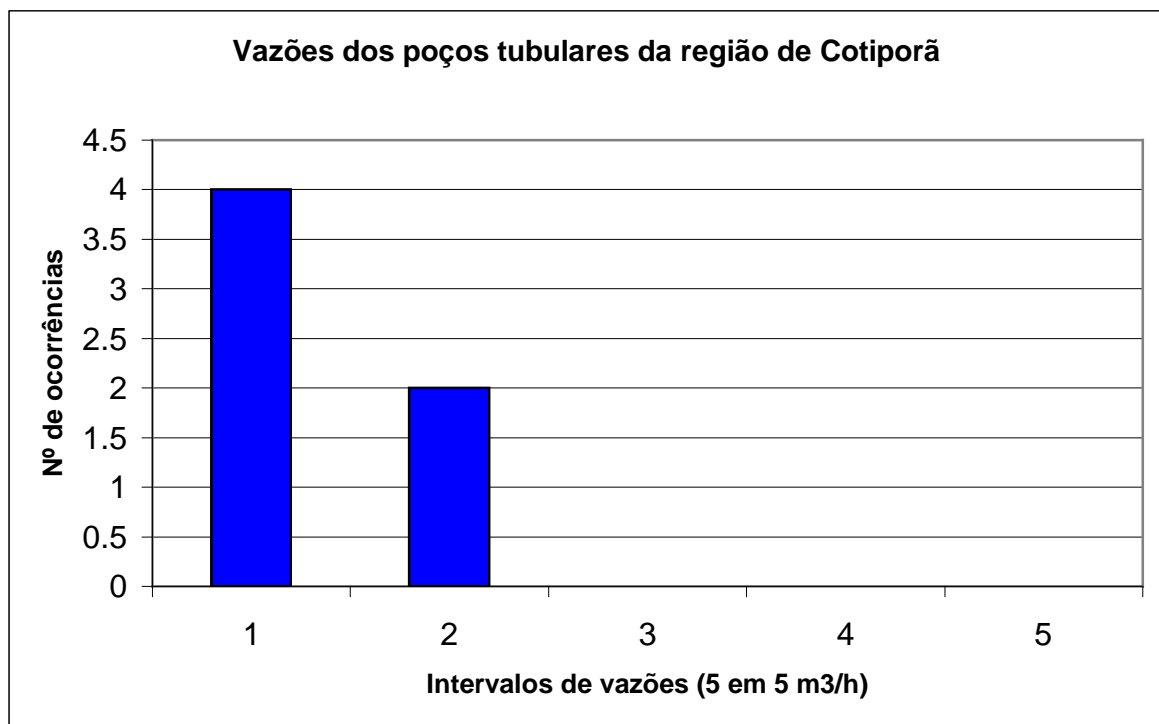
- a profundidade média dos poços produtivos foi de 117,44 metros (menor profundidade foi de 47 metros e a maior foi de 180 metros). A profundidade média dos poços nulos foi de 139,15 metros (dados de treze poços);
- entradas de água: nessa região, o número de entradas de água por poços distribui-se na seguinte proporção: 77,8% apresentaram uma entrada; 11,1% apresentaram duas entradas, enquanto que 11,1% tinham quatro entradas. A profundidade média da ocorrência das entradas de água foi no intervalo de 10 a 30 metros e de 40 a 60 metros, não tendo sido registrada nenhuma entrada de água no intervalo 30 a 40 metros;
- nível estático (NE): na maior parte dos casos (em torno de 71%), o nível estático está localizado no intervalo de 0 a 10 metros, enquanto que 13,2% dos poços possuem NE no intervalo de 10 a 20 metros de profundidade (Fig. 21a);
- vazões: 32,5% dos poços apresentaram vazões entre 0,5 e 10 m³/h e 40% estão relacionados com vazões acima de 20 m³/h (Fig. 21b);
- transmissividade média (Tm): 1,458 m²/h;
- capacidade específica (q): 1,166 m³/h/m.

⇒ **Região de Flores da Cunha**: foram analisados dados de 39 poços tubulares, referentes a profundidade, entradas de água, nível estático, vazão, transmissividade e capacidade específica. Os resultados são os seguintes:

- a profundidade média dos poços produtivos foi de 113,82 metros (menor profundidade foi de 42 metros e a maior foi de 181 metros). A profundidade média dos poços nulos foi de 147,57 metros (dados de sete poços);
- entradas de água: nessa região, o número de entradas de água por poços distribui-se na seguinte proporção: 50% apresentaram uma entrada; 31,3% apresentaram duas entradas, enquanto 18,7% tinham três entradas. A profundidade média da ocorrência das entradas de água está no intervalo de 10 a 70 metros;

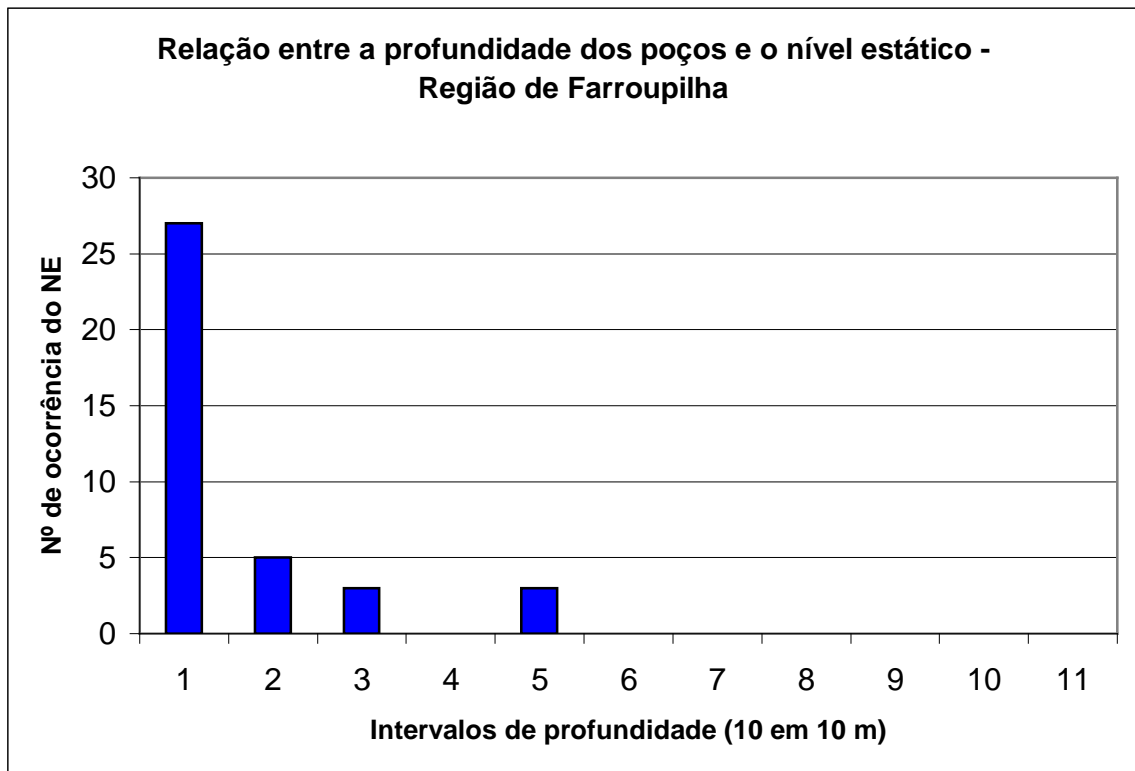


(a)

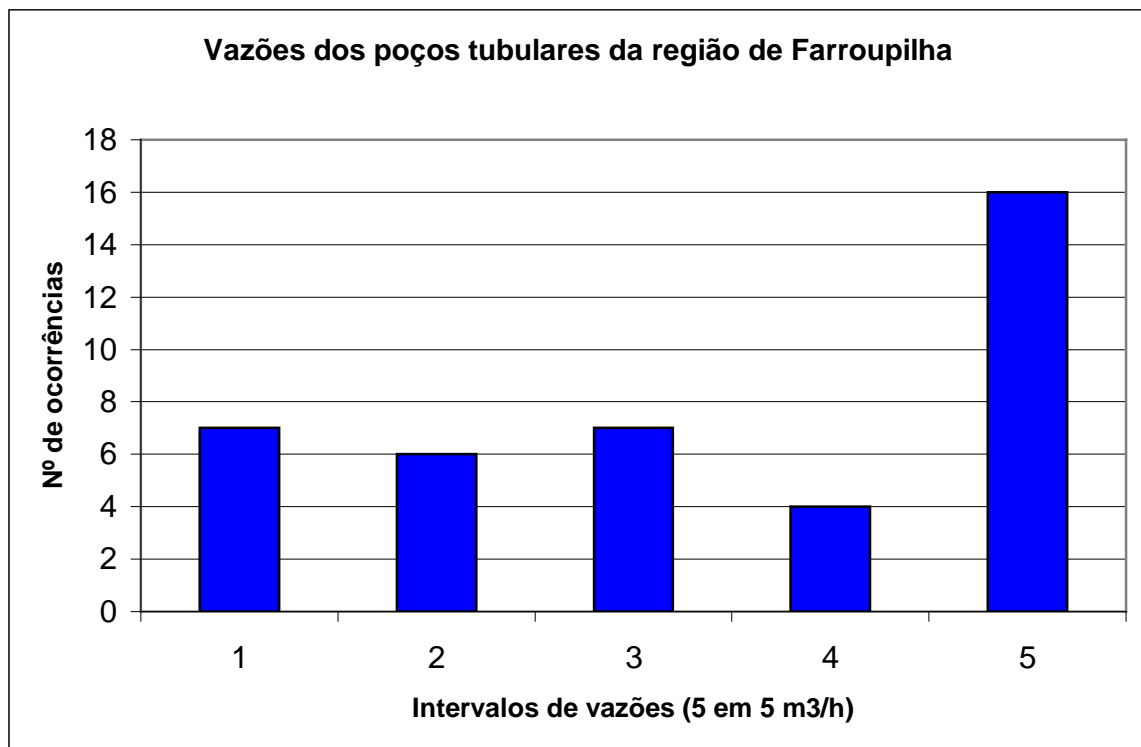


(b)

Figura 20 – Dados hidrogeológicos da região de Cotiporã: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.



(a)



(b)

Figura 21 – Dados hidrogeológicos da região de Farroupilha: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.

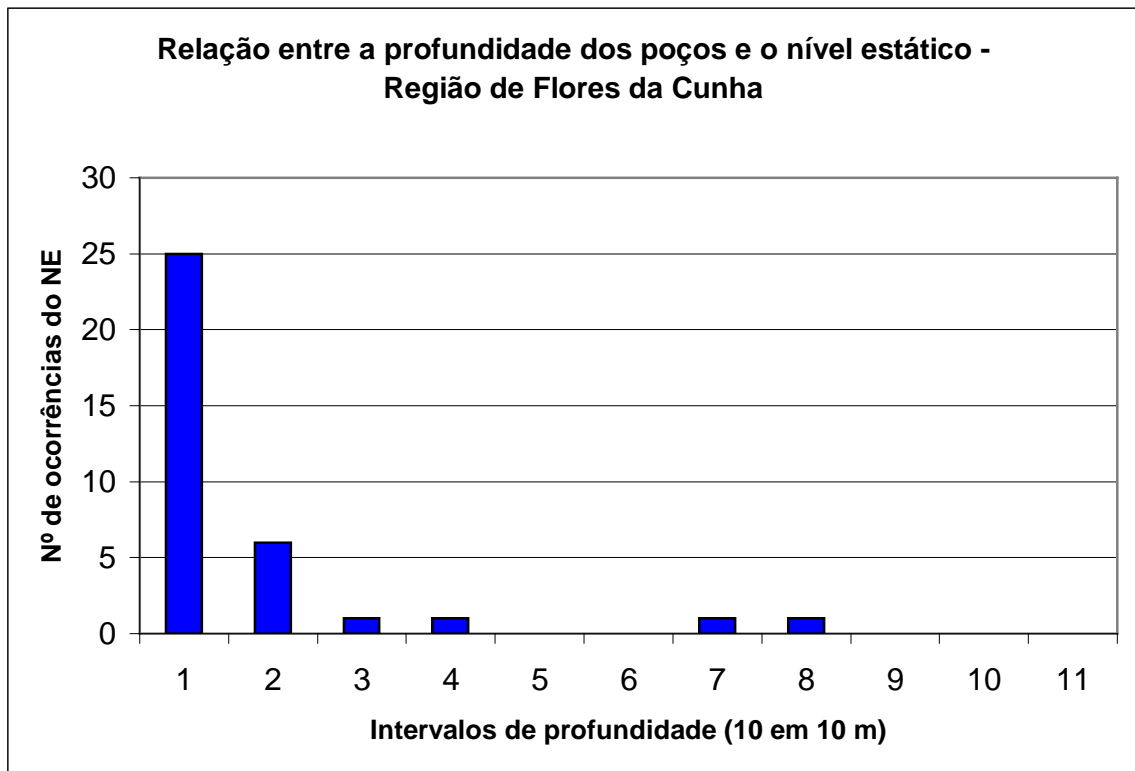
- nível estático (NE): na maior parte dos casos (em torno de 71,4%), o nível estático está localizado no intervalo de 0 a 10 metros, enquanto que 17,1% dos poços possuem intervalo de 10 a 20 metros de profundidade (Fig. 22a);
- vazões: a maior parte das vazões apresentadas pelos poços tubulares (51,3%) corresponde ao intervalo entre 0,5 e 10 m³/h, e 23,1% estão relacionados com vazões acima de 20 m³/h (Fig. 22b);
- transmissividade média (Tm): 0,429 m²/h;
- capacidade específica (q): 0,343 m³/h/m.

⇒ **Região de Monte Belo do Sul**: foram analisados dados de 8 poços tubulares, referentes a profundidade, nível estático, vazão, transmissividade e capacidade específica. Os resultados são os seguintes:

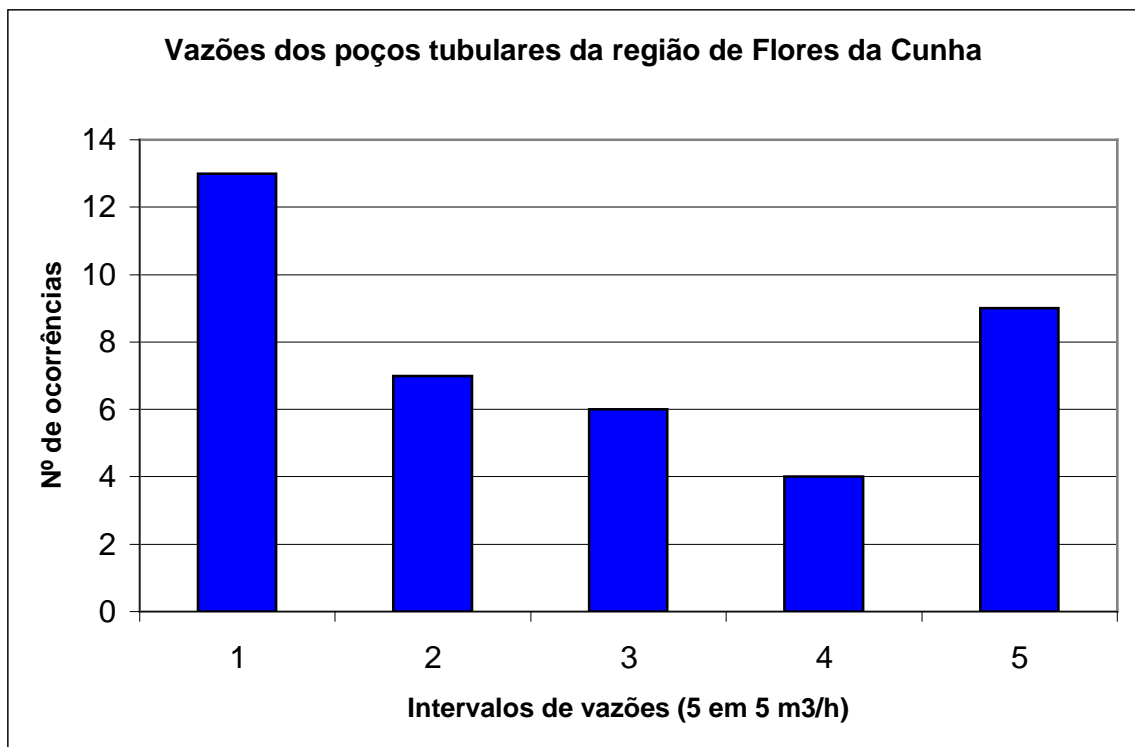
- a profundidade média dos poços produtivos foi de 116,57 metros (menor profundidade foi de 66 metros e a maior foi de 174 metros);
- nível estático (NE): na maior parte dos casos (em torno de 71,4%), o nível estático está localizado no intervalo de 0 a 10 metros, enquanto que em 14,6% dos poços, o NE está no intervalo de 20 a 30 metros de profundidade (Fig. 23a);
- vazões: a maior parte das vazões apresentadas pelos poços tubulares (62,5%), corresponde a intervalos entre 0,5 e 10 m³/h, e 37,5% estão compreendidas entre 10 e 15 m³/h (Fig. 23b);
- transmissividade média (Tm): 0,190 m²/h;
- capacidade específica (q): 0,152 m³/h/m.

⇒ **Região de Nova Pádua**: foram analisados dados de 13 poços tubulares, referentes a profundidade, nível estático, vazão, transmissividade e capacidade específica. Os resultados são os seguintes:

- a profundidade média dos poços produtivos foi de 111,08 metros (menor profundidade foi de 52 metros e a maior foi de 163 metros). Os poços nulos apresentaram uma profundidade média de 134,9 metros (dados de 10 poços);
- o nível estático (NE), na maior parte dos casos (em torno de 83,3%) está localizado no intervalo de 0 a 10 metros, enquanto que, em 8,6% dos poços, está no intervalo de 20 a 30 metros de profundidade (Fig. 24a);
- vazões: a maior parte das vazões apresentadas pelos poços tubulares (76,9%) corresponde ao intervalo entre 0,5 e 10 m³/h, e 7,7% estão compreendidas acima de 20 m³/h (Fig. 24b);

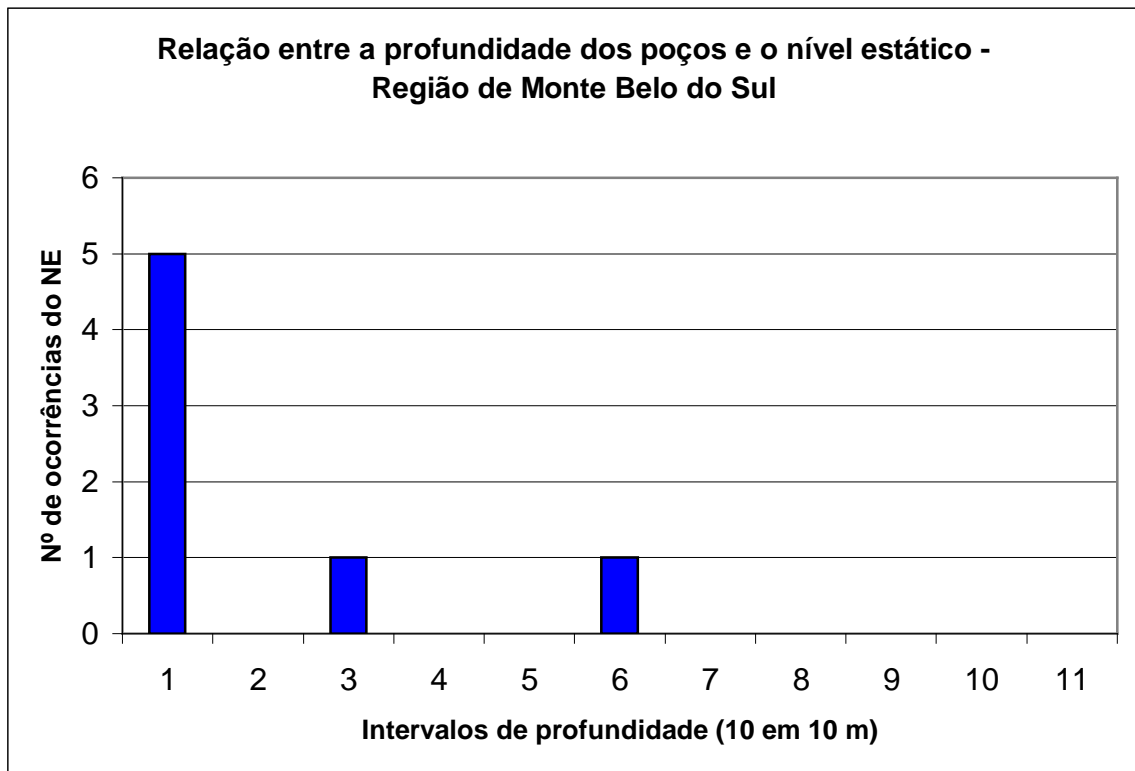


(a)

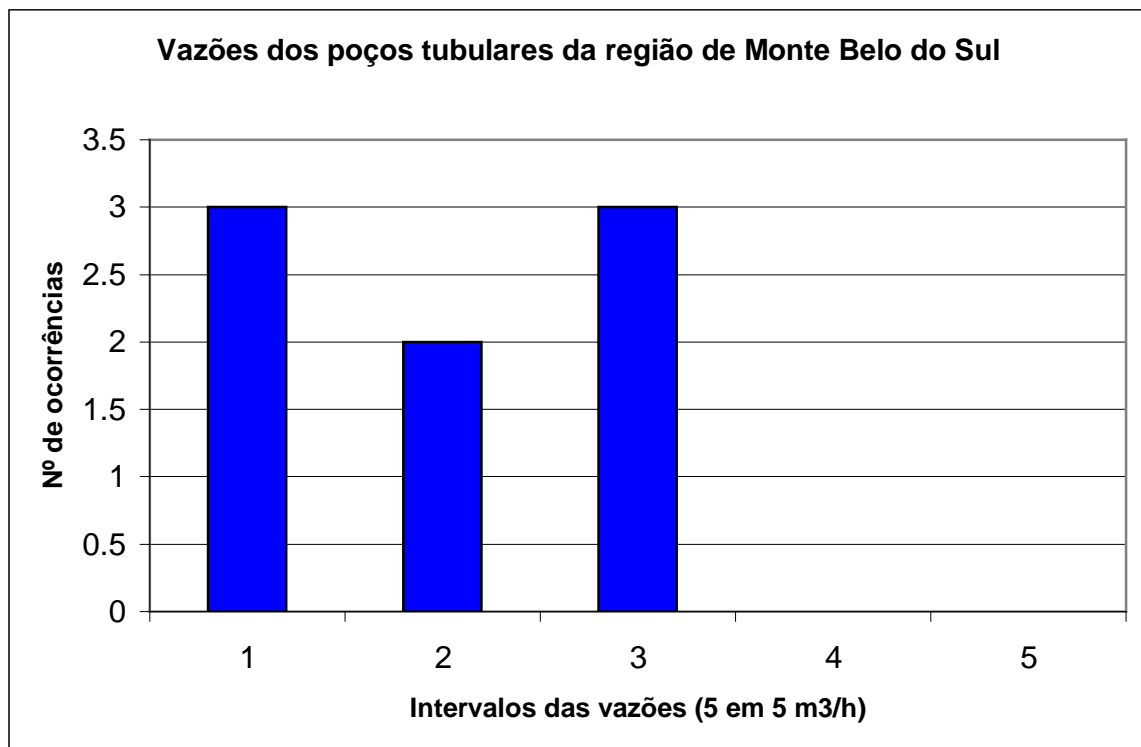


(b)

Figura 22 – Dados hidrogeológicos da região de Flores da Cunha: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.



(a)



(b)

Figura 23 – Dados hidrogeológicos da região de Monte Belo do Sul: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.

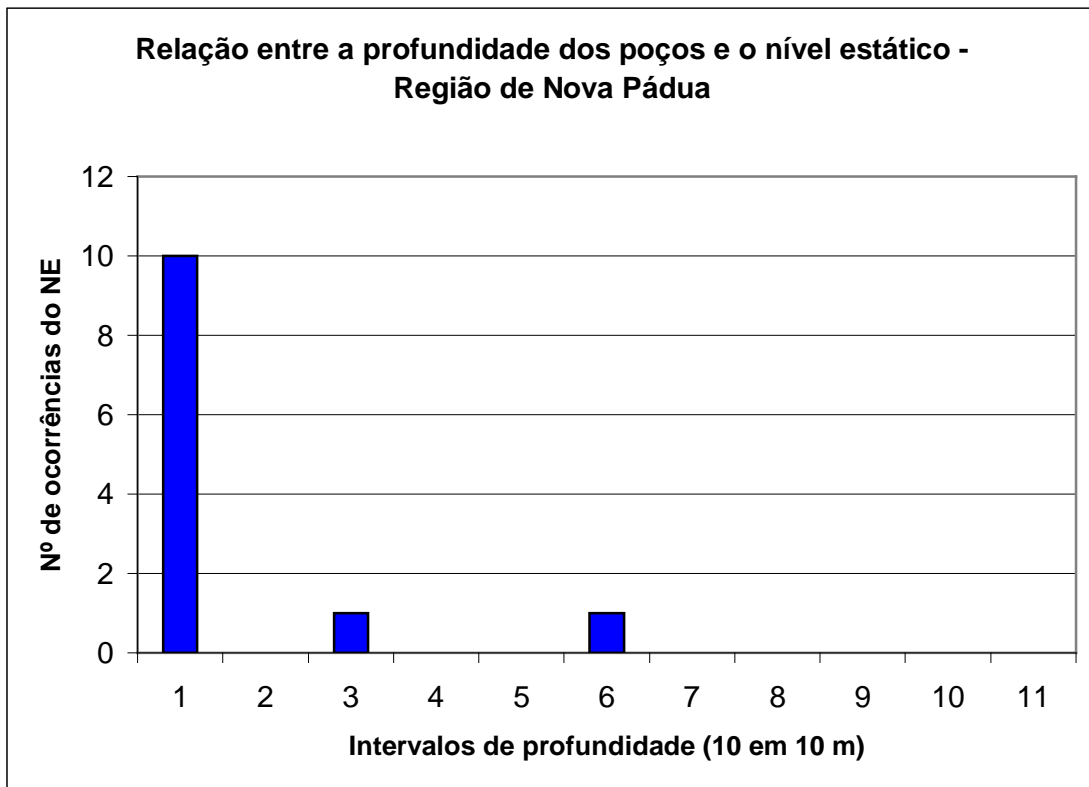
- transmissividade média (T_m): 0,149 m²/h;
- capacidade específica (q): 0,125 m³/h/m.

⇒ **Região de Nova Roma do Sul**: foram analisados dados de 8 poços tubulares, referentes a profundidade, nível estático, vazão, transmissividade e capacidade específica. Os resultados são os seguintes:

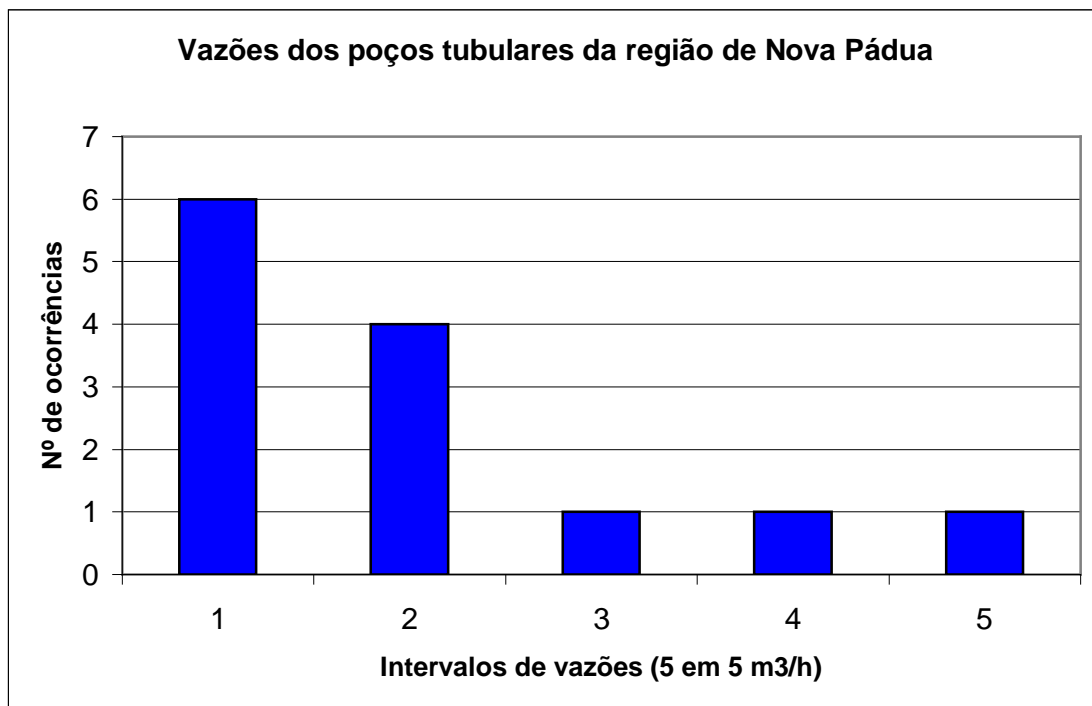
- a profundidade média dos poços produtivos foi de 101 metros (menor profundidade foi de 64 metros e a maior foi de 150 metros). A profundidade média dos poços nulos foi de 163,3 metros (dados de 3 poços);
- o nível estático (NE), em 75% dos poços, está localizado no intervalo de 0 a 20 metros (Fig. 25a);
- vazões: 37,5% dos poços apresentaram vazões entre 0,5 e 10 m³/h, enquanto 50% possuem vazões no intervalo 10 e 15 m³/h (Fig. 25b);
- transmissividade média (T_m): 0,242 m²/h;
- capacidade específica (q): 0,198 m³/h/m.

⇒ **Região de São Marcos**: foram analisados dados de 17 poços tubulares, referentes a profundidade, entradas de água, nível estático, vazão, transmissividade e capacidade específica. Os resultados são os seguintes:

- a profundidade média dos poços produtivos foi de 110,625 metros (menor profundidade foi de 30 metros e a maior foi de 195 metros). A profundidade média dos poços nulos foi de 144,75 metros (dados de quatro poços);
- as entradas de água nessa região apresentaram a seguinte ocorrência: 50% dos poços apresentaram uma entrada e 50% apresentaram duas entradas. A profundidade média da ocorrência das entradas de água foi no intervalo de 10 a 30 m e no intervalo de 40 a 50 m;
- o nível estático (NE), na maior parte dos casos (em torno de 87,5%) está localizado no intervalo de 0 a 10 metros, enquanto que, em 12,5% dos poços, o NE está no intervalo de 20 a 30 metros de profundidade (Fig. 26a);
- vazões: a maior parte das vazões apresentadas (82,4%) corresponde ao intervalo entre 0,5 e 10 m³/h, e 5,9% dos poços possuem vazões acima de 20 m³/h (Fig. 26b);
- transmissividade média (T_m): 0,353 m²/h;
- capacidade específica (q): 0,281 m³/h/m.

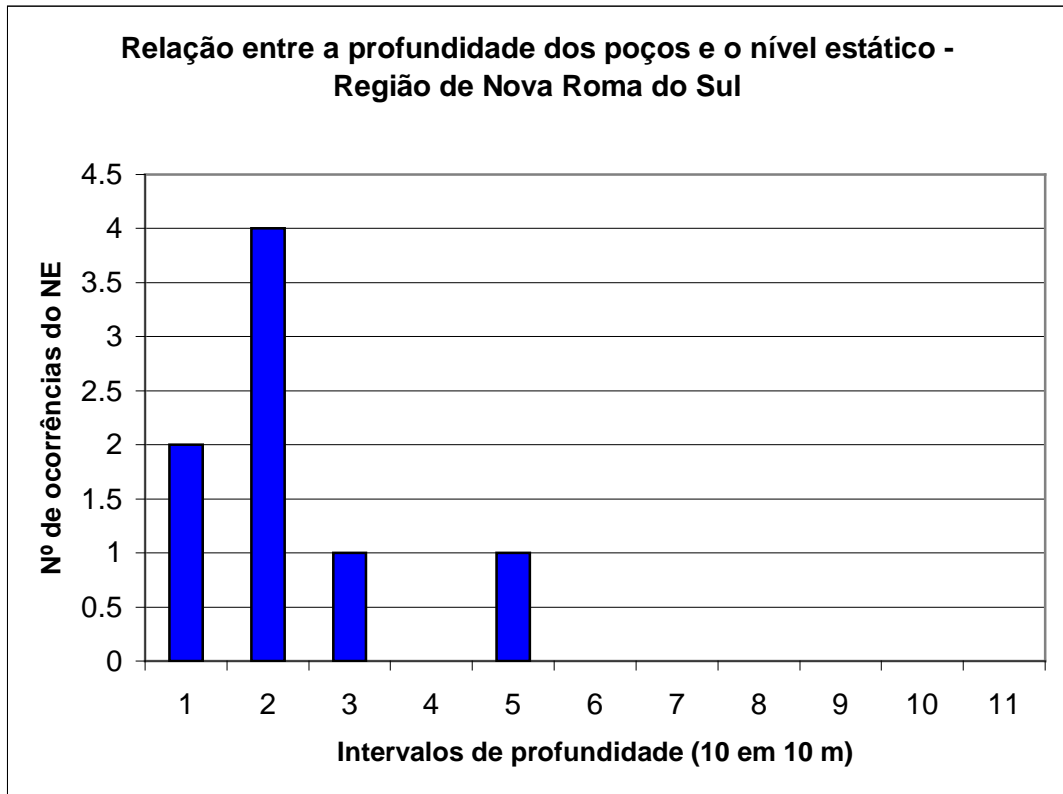


(a)

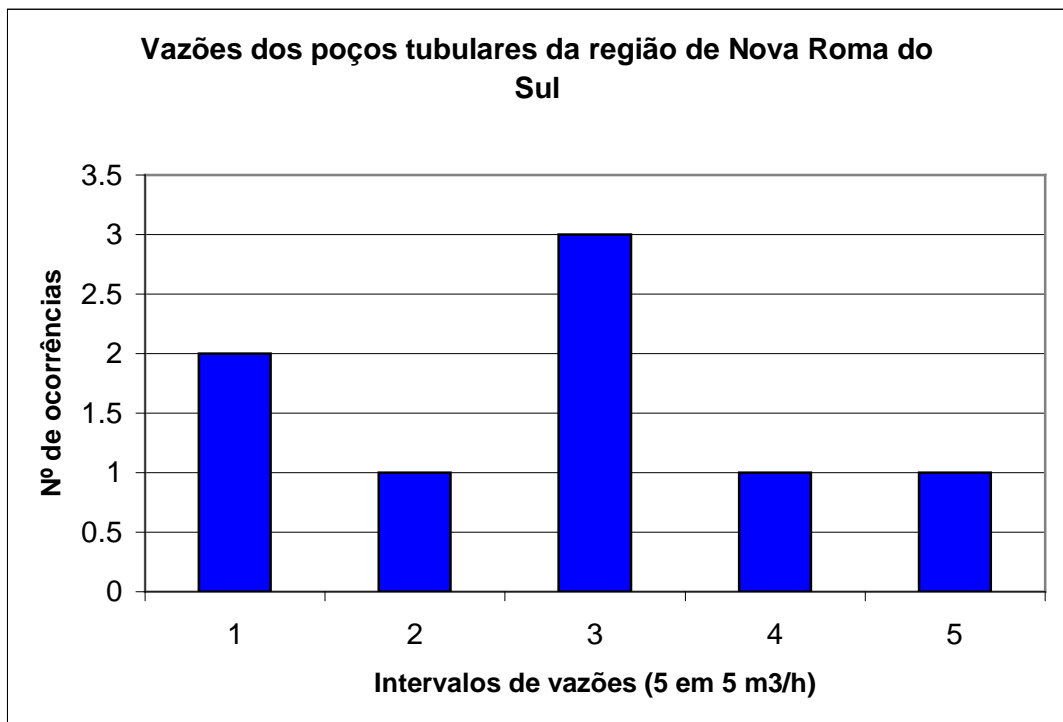


(b)

Figura 24 – Dados hidrogeológicos da região de Nova Pádua: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.



(a)



(b)

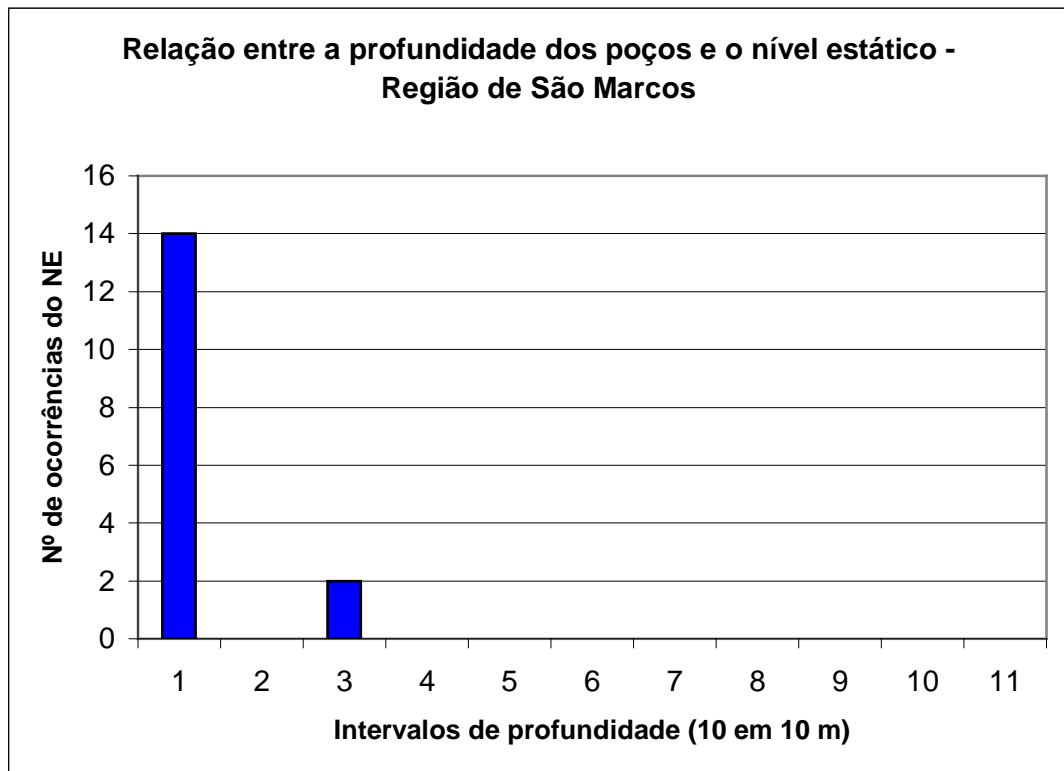
Figura 25 – Dados hidrogeológicos da região de Nova Roma do Sul: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.

⇒ **Região de Veranópolis:** foram analisados dados de 17 poços tubulares, referentes a profundidade, nível estático, vazão, transmissividade e capacidade específica. Os resultados são os seguintes:

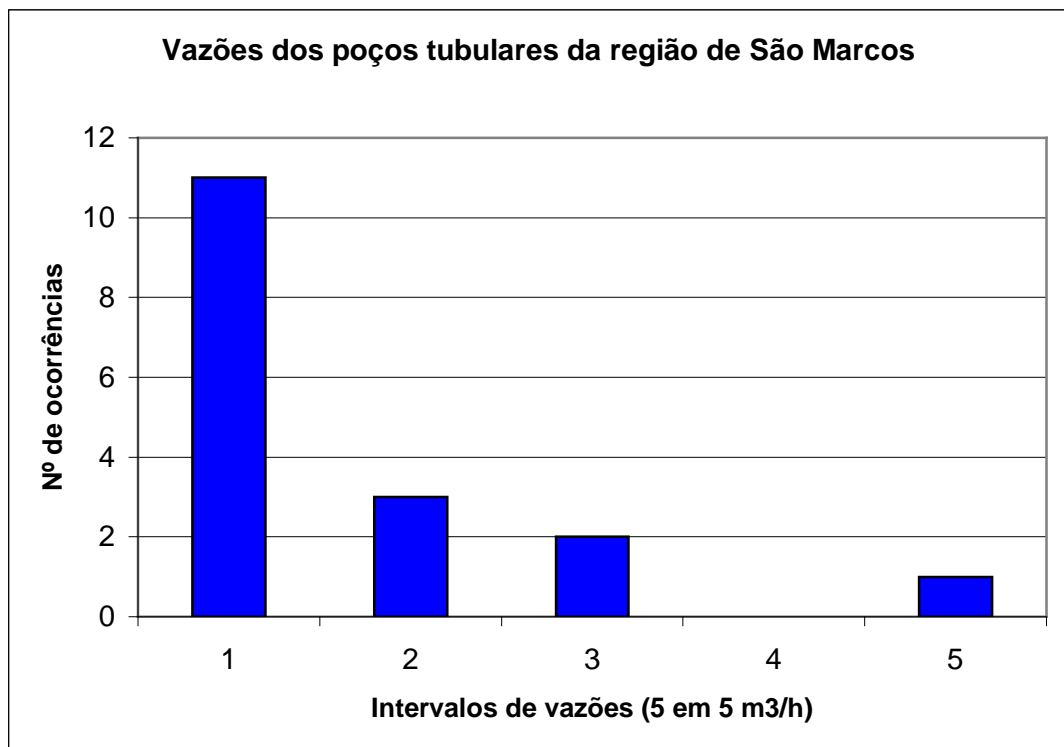
- a profundidade média dos poços produtivos foi de 110,26 metros (menor profundidade foi de 33,5 metros e a maior 172 metros). A profundidade média dos poços nulos foi de 161 metros (dados de três poços);
- o nível estático (NE), na maior parte dos casos (em torno de 68,4%), está localizado no intervalo de 0 a 10 metros, enquanto que em 15,8% dos poços, o NE está no intervalo de 10 a 20 metros de profundidade (Fig. 27a);
- vazões: 76,5% dos poços apresentaram vazões entre 0,5 e 10 m³/h, enquanto 23,5% estão relacionados com o intervalo 10 e 20 m³/h (Fig. 27b);
- transmissividade média (Tm): 0,132 m²/h;
- capacidade específica (q): 0,106 m³/h/m.

A caracterização hidrogeológica e hidrodinâmica existente nas diferentes regiões de estudo (representadas pelos municípios) mostra que os valores de profundidade média dos poços estão próximos da média geral da região. O número de entradas de água também apresenta relação com a média geral, exceções feitas a algumas regiões onde há um predomínio de duas entradas sobre uma. Além disso, ficou evidenciado que, em quase todas as regiões, o NE predominante está no intervalo de 0 a 10 metros, exceção feita para a região de Cotiporã e Nova Roma do Sul, onde o intervalo predominante desse nível foi dos 10 a 20 metros.

A análise dos dados hidrogeológicos relacionados às vazões, à transmissividade e à capacidade específica evidencia, no entanto, que existem diferenças importantes de uma região para outra. A figura 28 mostra que a região de Farroupilha apresenta a maior ocorrência de vazões acima de 20 m³/h. A região de Flores da Cunha, Bento Gonçalves e Antônio Prado também apresentaram um número considerável de ocorrências de vazões acima de 20 m³/h, apesar da predominância de vazões estar no intervalo de 0 a 10 m³/h. Nas demais áreas, o principal intervalo de ocorrência de vazões situa-se entre 0 e 10 m³/h; a exceção é a região de Nova Roma do Sul, onde o intervalo 10 a 20 m³/h tem um número de ocorrências um pouco maior.

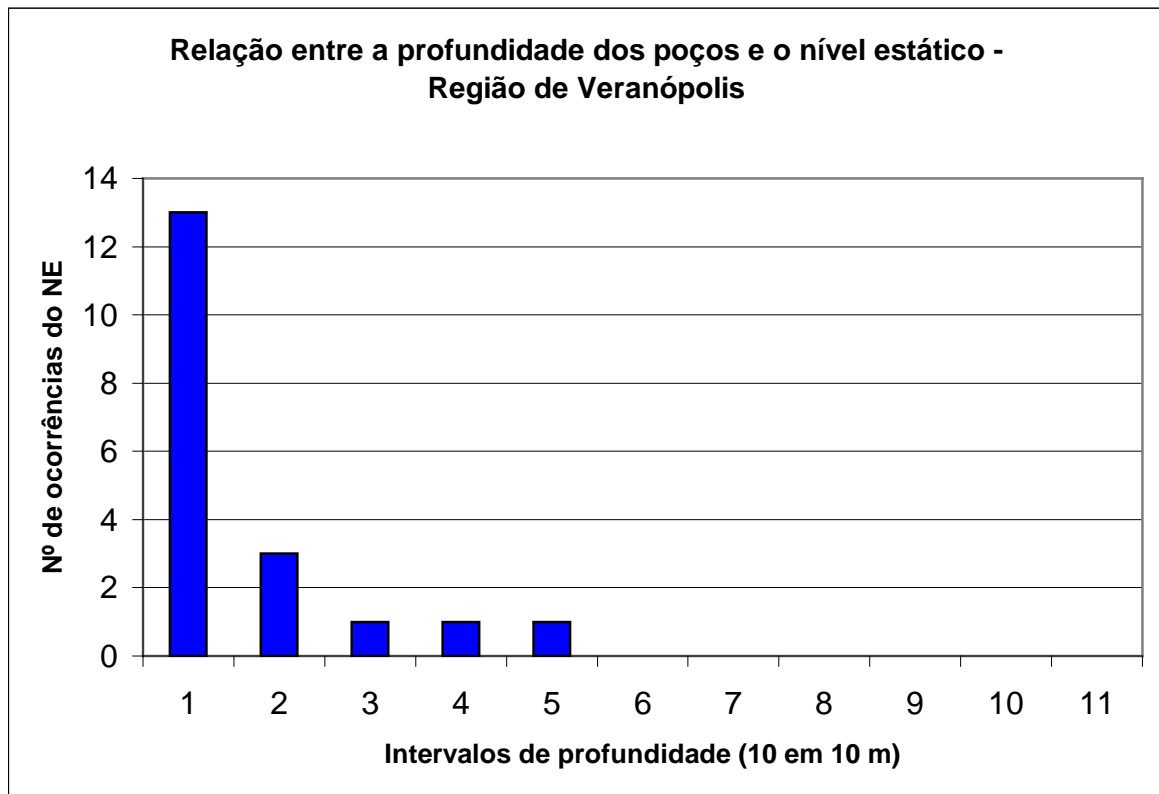


(a)

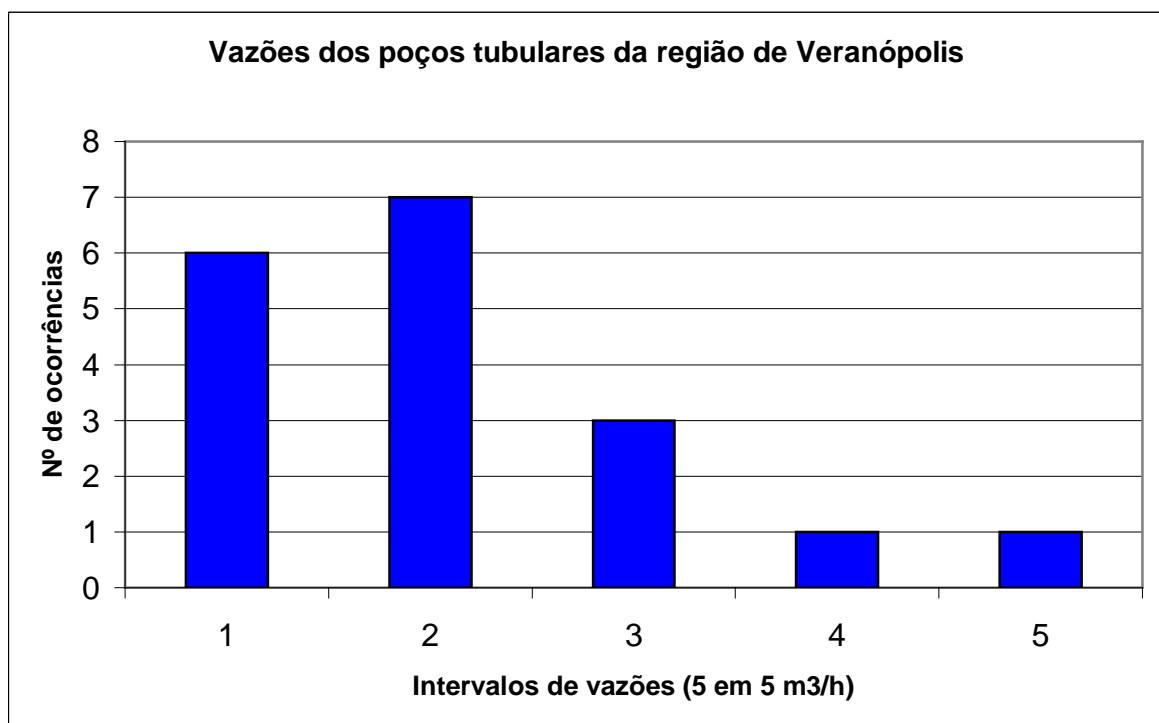


(b)

Figura 26 – Dados hidrogeológicos da região de São Marcos: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.



(a)



(b)

Figura 27 – Dados hidrogeológicos da região de Veranópolis: (a) relação entre o nível estático e a profundidade dos poços; (b) relação entre a ocorrência de vazões e o intervalo específico de vazões.

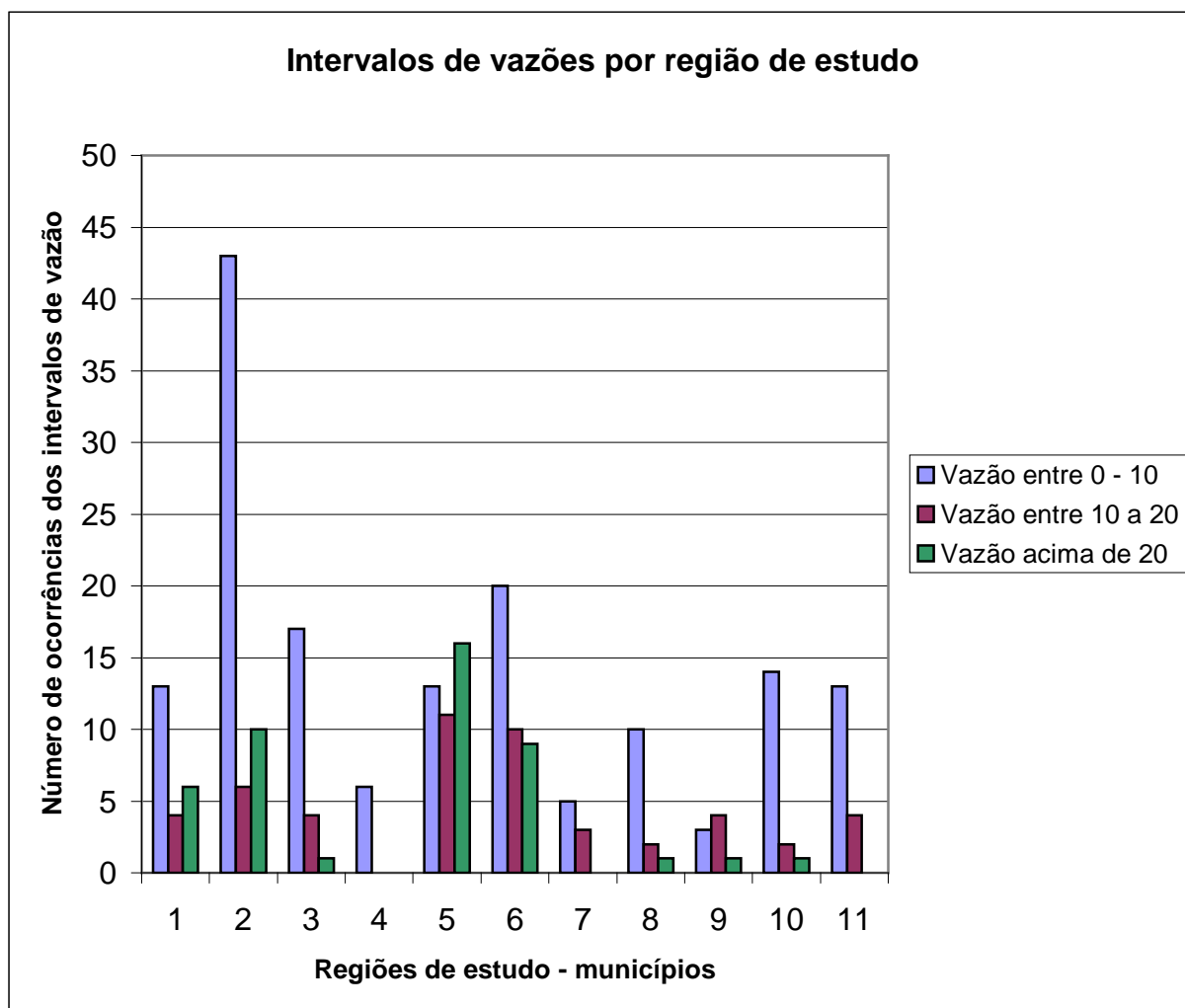


Figura 28 – Relação entre os intervalos das vazões e as diferentes regiões. As regiões representadas são: (1) Antônio Prado; (2) Bento Gonçalves; (3) Caxias do Sul; (4) Cotiporã; (5) Farroupilha; (6) Flores da Cunha; (7) Monte Belo do Sul; (8) Nova Pádua; (9) Nova Roma do Sul; (10) São Marcos e (11) Veranópolis. As vazões estão representadas em m^3/h .

A transmissividade, na região de Farroupilha apresenta os maiores valores; em ordem decrescente, vêm as regiões de Bento Gonçalves, Antônio Prado, Caxias do Sul, Flores da Cunha e São Marcos (Fig.29). Essa mesma seqüência pode ser identificada com relação aos valores de capacidade específica (q), onde a região de Farroupilha surge como a área com maiores valores desse parâmetro (Fig. 30).

Essa comparação entre os parâmetros hidrogeológicos e as diferentes regiões de estudo evidencia a existência de uma estruturação diferenciada do sistema aquífero fraturado para cada uma delas. Embora exista um número diferente de poços tubulares cadastrados para cada uma das áreas, há um tendência estatística forte de marcar essa diferenciação.

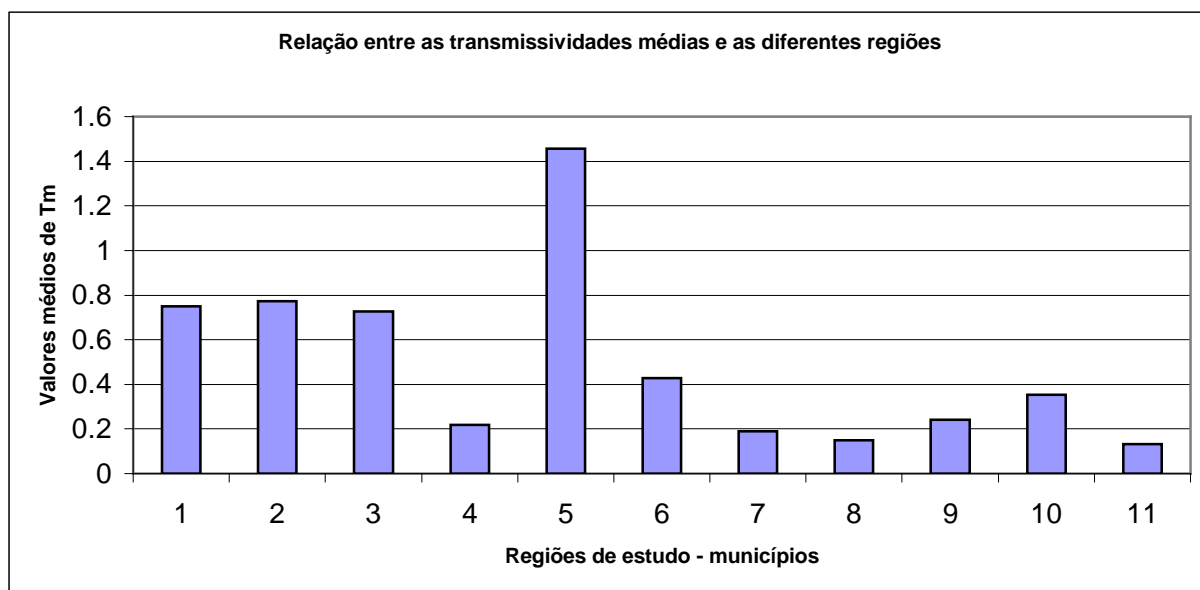


Figura 29 – Relação entre os valores de transmissividade média e as diferentes regiões de estudo. As regiões representadas são: (1) Antônio Prado; (2) Bento Gonçalves; (3) Caxias do Sul; (4) Cotiporã; (5) Farroupilha; (6) Flores da Cunha; (7) Monte Belo do Sul; (8) Nova Pádua; (9) Nova Roma do Sul; (10) São Marcos e (11) Veranópolis. As transmissividades estão representadas em m^2/h .

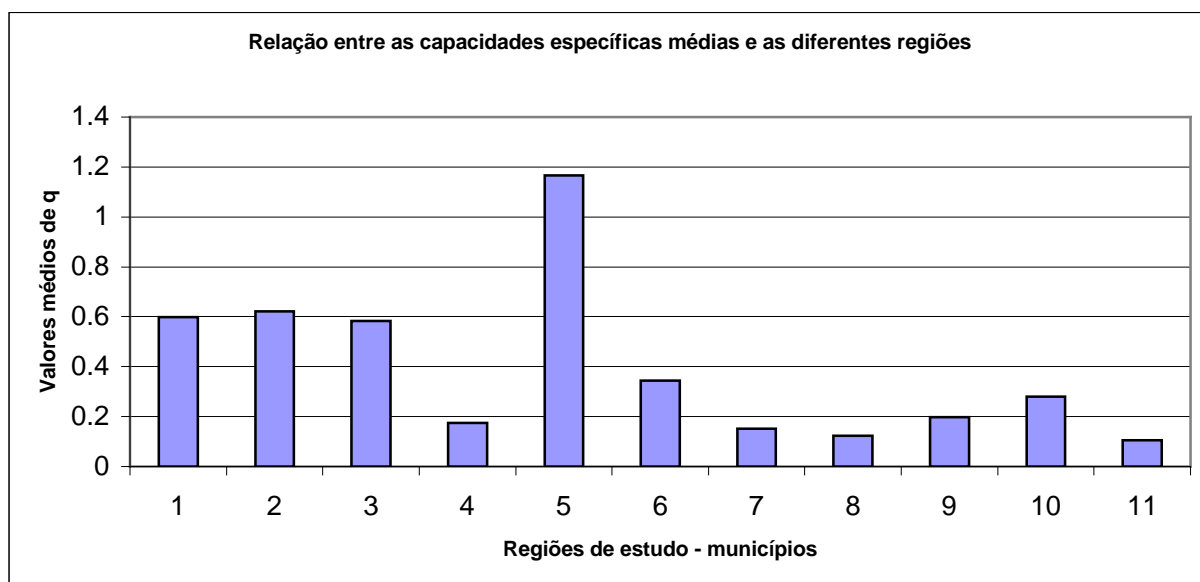


Figura 30 – Relação entre os valores médios das capacidades específicas e as diferentes regiões de estudo. As regiões representadas são: (1) Antônio Prado; (2) Bento Gonçalves; (3) Caxias do Sul; (4) Cotiporã; (5) Farroupilha; (6) Flores da Cunha; (7) Monte Belo do Sul; (8) Nova Pádua; (9) Nova Roma do Sul; (10) São Marcos e (11) Veranópolis. As capacidades específicas estão representadas em $m^3/h/m$.

4.2.3 – Hidroquímica do sistema aquífero fraturado

Estudos sobre hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral foram realizados por diferentes autores como Mobus (1987), Hausman (1995) e Lisboa (1993 e 1996).

Mobus (1987) desenvolveu estudos visando à correlação de alguns parâmetros químicos com dados hidrogeológicos e identificou uma relação entre o aumento do pH e o teor de sólidos totais com a profundidade da entrada de água. Esse trabalho envolveu parte da Formação Serra Geral, pois sua área de estudo está localizada na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

Hausman (1995) trabalhou com os aspectos da qualidade de água subterrânea dos aquíferos da Formação Serra Geral e identificou que existem variações hidroquímicas com a profundidade, tempo de circulação e tipo de mineralização secundária existentes nas fraturas. Segundo Hausman (1995), as águas subterrâneas dessa formação geológica possuem teores de sólidos totais dissolvidos não superiores a 200 ppm. Além disso, identificou que os elevados teores de CaCO_3 , bem como a ocorrência de flúor (parte dos casos), estão relacionados com as mineralizações de áreas fortemente tectonizadas (zonas de brechas vulcânicas com mineralizações representadas por calcitas, zeolitas e quartzo). Outra evidência de interesse está relacionada com as mineralizações secundárias: foram identificadas variações de parâmetros hidroquímicos com a orientação das estruturas (diferentes valores para pH, HCO_3^- , CaCO_3 e sólidos totais). Por fim, Hausman (1995) identificou correlações entre valores de pH com a profundidade; em poços com entradas de água até 150 metros foram encontrados valores de pH entre 6,5 e 7,9, enquanto que em poços com entradas de água entre 150 e 200 metros, os valores encontrados foram em torno de 9, podendo alcançar até 10,6.

Lisboa (1996) desenvolveu estudos visando à caracterização de fácies e estratificações hidrogeoquímicas em diferentes unidades hidrogeológicas que formam o sistema Aquífero Serra Geral. Conforme Lisboa (1996), o sistema aquífero Serra Geral apresenta dois campos hidrogeoquímicos principais: o “Campo das Águas Bicarbonatadas Cálcicas e Calcomagnesianas” e o “Campo das Águas Bicarbonatadas Sódicas”. Lisboa (1996) identificou que esse sistema aquífero apresenta uma estratificação hidrogeoquímica para as fácies intemperizadas. Essa estratificação é caracterizada por meio das fácies hidrogeoquímicas que mostram variações nos teores dos íons magnésio e cálcio. O

condicionador geológico principal dessa estratificação é o litoquímico, com influência secundária de outros condicionantes. Para as fácies mistas sódicas, a estratificação é controlada por condicionantes geotectônicos, morfotectônicos, morfoestruturais e geomorfológicos. Esses fatores são responsáveis pela geração de diferentes características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas pois condicionam a formação e a estruturação dos aquíferos das Formações Serra Geral e Botucatu.

Lisboa (1996) também realizou estudos detalhados de diferentes unidades hidrogeológicas que formam o Sistema Aquífero Serra Geral. No caso da unidade Fachada Atlântica Dissecada (onde está inserida a área de estudo), foram identificadas três fácies hidrogeoquímicas:

- fácies bicarbonatada calco-sódica-magnésiana ($\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg}$): 55,55%
- fácies mista bicarbonatada sódico-calco-magnésiana ($\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg}$): 32,11%
- fácies bicarbonatada calco-magnésiana-sódica ($\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na}$): 12,34%

A caracterização hidroquímica do sistema aquífero fraturado, na área de estudo, foi realizada visando à determinação das características gerais, e foi baseado no estudo de 177 amostras de análises químicas realizadas pela CORSAN (para poços tubulares construídos pelo programa PAP/SDO e pela própria CORSAN). Embora existam análises provenientes de outros laboratórios, optou-se por trabalhar somente com os dados da CORSAN, pois os mesmos apresentavam, em sua maioria, análises completas. Os dados provenientes de outros laboratórios possuíam análises voltadas para elementos específicos, o que dificultava seu uso para a classificação das águas.

As 177 amostras foram analisadas com base nos elementos químicos presentes nos laudos e na presença de erro de balanço iônico. Na falta de alguns elementos, como sódio (Na), potássio (K), magnésio (Mg), bem como a identificação de erro no balanço, as amostras eram descartadas. Dessa forma, foram selecionadas 137 amostras, utilizadas para a caracterização hidroquímica.

A análise hidroquímica dos dados foi realizada com a utilização do programa Qualigraf, desenvolvido pelo Hidrogeólogo Gilberto Möbus da FUNCEME, que possui distribuição livre. Esse programa foi desenvolvido para análises da qualidade de água com base nos seguintes elementos químicos: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} . Além disso, para algumas análises, são utilizados os dados de condutividade elétrica. Dessa forma,

esse programa foi utilizado na verificação do erro do balanço iônico, bem como na classificação das águas por meio da utilização de diagramas trilineares de “Piper”.

Como caracterização geral da área desse estudo, observou-se que as águas do sistema aquífero fraturado estão distribuídas em três campos principais (Fig. 31):

- águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas: 80,1%
- águas bicarbonatas sódicas: 18,4%
- águas sulfatadas cálcicas ou magnesianas: 1,4%

Com relação à análise dos cátions, pode-se verificar que as águas subterrâneas da região estão dispostas em três campos principais:

- águas cálcicas: 62%;
- águas mistas: 37,6%;
- águas sódicas: 18,4%;

O campo das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas corresponde à fácies bicarbonatada calco-sódica-magnesiana identificada por Lisboa (1996), onde a relação $Ca > Na > Mg$ é evidenciada como a principal. O campo das águas bicarbonatadas sódicas corresponde ao campo de águas mistas bicarbonatadas sódico-calco-magnesianas. Por fim, o terceiro campo, das águas sulfatadas cálcicas ou magnesianas, corresponde a uma nova ocorrência. Embora o número de amostras seja muito reduzido (2 para um universo de 137), essa ocorrência não pode ser ignorada, já que, em poços perfurados por empresas particulares, foram encontrados índices elevados de sulfatos. Além disso, trabalhos como o de Machado *et. al.*, (2002) já evidenciaram esse tipo de campo para os aquíferos fraturados do oeste catarinense.

O campo predominante das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas está de acordo com a composição química das litologias que hospedam o sistema aquífero fraturado. Essa relação evidencia que a fonte original dos cátions Ca^{+2} , Na^{+1} e Mg^{+2} está associada com a alteração dos silicatos que constituem as rochas vulcânicas da região (basaltos na base da seqüência e riodacitos do topo). Dessa forma, embora não tenham sido realizados estudos para verificação da estratificação hidrogeoquímica, supõem-se que essa distribuição vertical seja a mesma proposta por Lisboa (1996), que é caracterizada por um enriquecimento de cálcio e magnésio do topo para a base do aquífero, evidenciando a existência de um controle litoquímico.

O campo das águas bicarbonatadas sódicas, por outro lado, não possui relação com as composições químicas provenientes do intemperismo das rochas vulcânicas existentes na região, o que evidencia a existência de uma outra fonte. Conforme apresentado por Lisboa (1996), esse campo é caracterizado por fácies mistas de águas bicarbonatadas sódicas geradas através da mistura das águas do sistema aquífero Botucatu com as águas do sistema aquífero Serra Geral. Dessa forma, há um controle geotectônico e morfoestrutural que condiciona a mistura das águas desses dois aquíferos.

O campo das águas sulfatadas cálcicas ou magnesianas também não apresenta relação com os processos de intemperismo sobre as rochas vulcânicas, evidenciando, também, a existência de intercomunicação entre sistemas de aquíferos diferentes. Essa mistura só é possível se forem envolvidos controles morfotectônicos e morfoestruturais na região. Isso pode ser comprovado, pois os poços tubulares que apresentam águas com essas características estão localizados em regiões de baixas altitudes e lineamentos do tipo 2, de orientação noroeste.

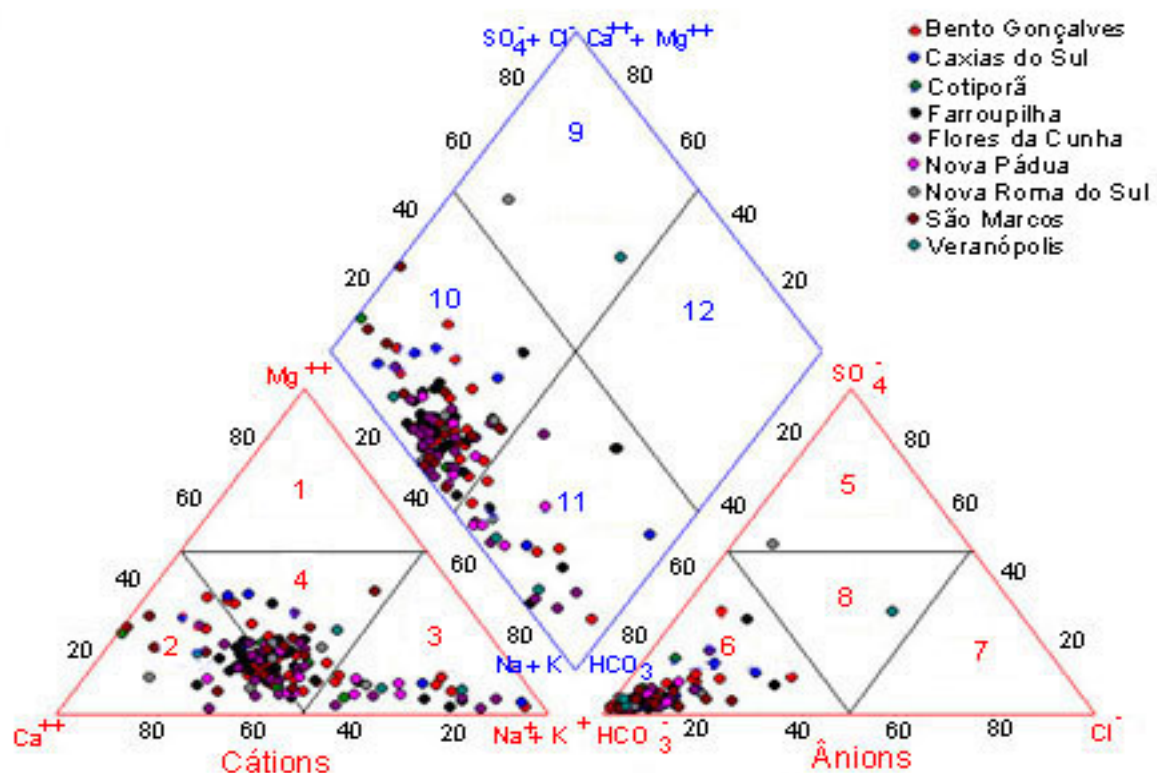


Figura 31 – Classificação das águas subterrâneas de toda a área de estudo. As diferentes colorações adotadas para as amostras correspondem às diferentes regiões (137 amostras).

Num estudo visando à localização das regiões de ocorrência de águas bicarbonatadas sódicas e a sua relação com aspectos geológicos, morfoestruturais e geomorfológicos, observou-se que:

- 80% das ocorrências de águas bicarbonatadas sódicas estão relacionadas a lineamentos do tipo 2 de orientação NE, enquanto 20% a estruturas com orientação NW;
- com relação aos lineamentos tipo 2 de orientação nordeste, 46% das ocorrências das águas bicarbonatadas sódicas estão associadas a lineamentos com orientação entre N40 - 50E, 26% a orientação N70 - 80E e o restante em orientações diversas dentro desse quadrante. A relação com tamanho de lineamentos não é evidenciada, pois as ocorrências de águas com essas características estão associadas a lineamentos de diferentes portes;
- a ocorrência de águas mistas bicarbonatadas sódicas está relacionada a diferentes altitudes (desde 150m até 800 metros), sendo o intervalo altimétrico de maior ocorrência é entre 500 e 600 metros (80% dos casos).

Conforme realizado no item anterior, serão apresentadas análises hidroquímicas para cada uma das diferentes regiões que constituem a área de estudo. No entanto, em função da falta de análises químicas, ou da existência de análises incompletas, somente serão avaliadas as regiões correspondentes aos municípios de Bento Gonçalves, Caxias do Sul, Cotiporã, Farroupilha, Flores da Cunha, Nova Pádua, Nova Roma, São Marcos, e Veranópolis. Os dados referentes a caracterização das diferentes regiões podem ser observados na tabela IX e nas figuras 32 a 40.

A tabela IX mostra que, na maior parte das regiões, há uma predominância do campo das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, onde uma proporção acima de 65% é evidenciada. Essa proporção está de acordo com a caracterização geral da área e indica que as composições químicas da maioria das águas subterrâneas da região estão relacionadas com os processos de intemperismo das rochas vulcânicas (Figs. 32, 33, 34, 35, 36, 38 e 39). Isso evidencia que para o campo das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas há um controle litoquímico. Isso pode ser observado se analisarmos a distribuição dos cátions que mostram a existência de duas fácies principais: a fácies cálcica (Fig. 33, 35 e 36) e a fácies mista (Fig. 32, 34, 38 e 39). Essa diferenciação deve ter relação com os diferentes tipos de litologia (basaltos, riolitos, vidros vulcânicos) e com a presença de zonas vesiculares e amigdalóides. No entanto, estudos mais detalhados devem ser realizados visando identificar melhor as correlações existentes entre os diferentes tipos litológicos e a hidroquímica das águas subterrâneas.

Tabela IX – Distribuição em porcentagem das ocorrências de tipos diferentes de águas e suas relações com as diferentes regiões da área de estudo.

Região	Águas Bicarbonatas Cálcica /Magnesianas	ou Bicarbonatas Sódicas	Águas Sulfatadas Cálcicas ou Magnesianas
Bento Gonçalves	83,8%	16,2%	0%
Caxias do Sul	83,3%	16,7%	0%
Cotiporã	75%	25%	0%
Farroupilha	87,9%	12,1%	0%
Flores da Cunha	76%	24%	0%
Nova Pádua	55,6%	44,4%	0%
Nova Roma do Sul	66,7%	16,7%	16,7%
São Marcos	100%	0%	0%
Veranópolis	25%	50%	25%

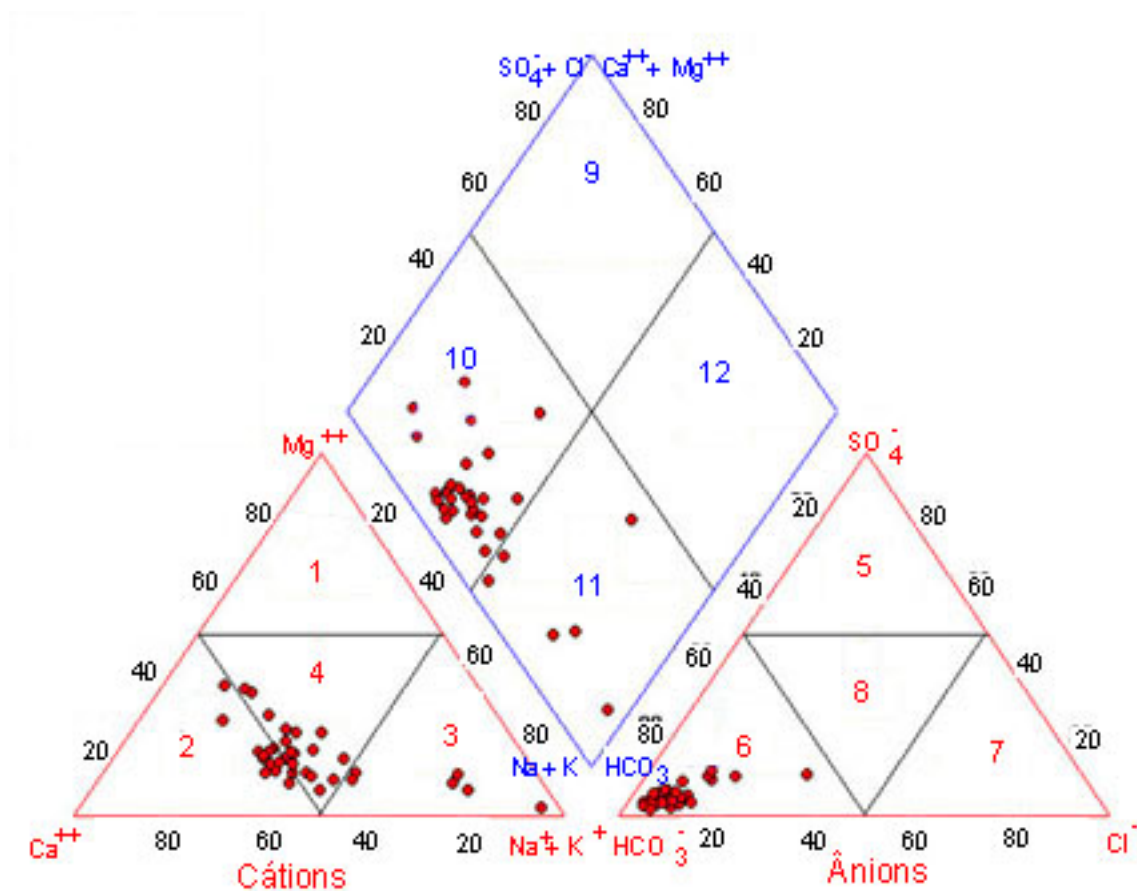


Figura 32 – Classificação das águas subterrâneas - região de Bento Gonçalves (37 amostras).

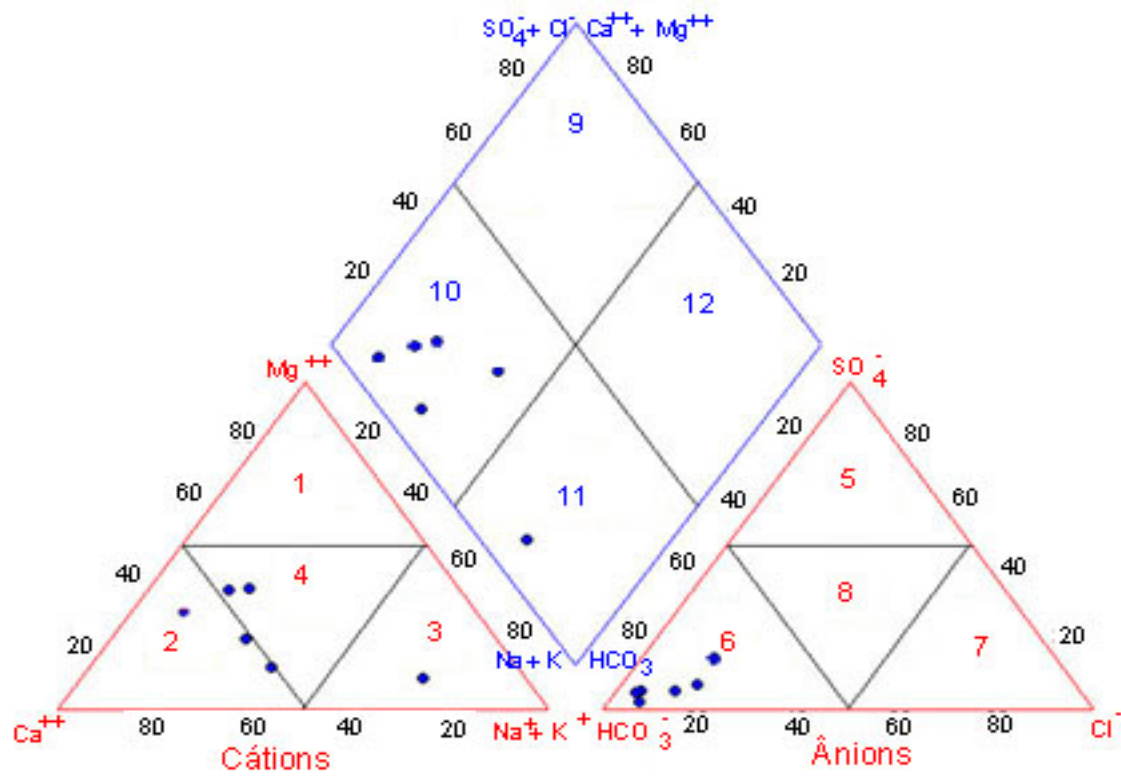


Figura 33 – Classificação das águas subterrâneas - região de Caxias do Sul (6 amostras).

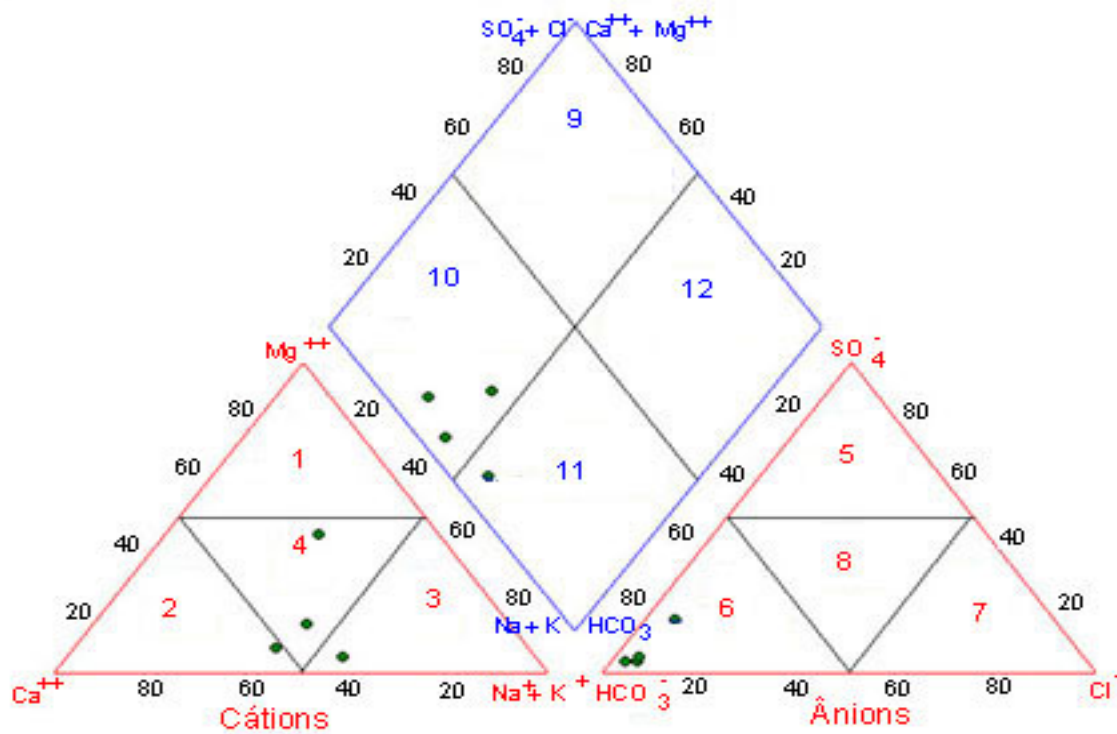


Figura 34 – Classificação das águas subterrâneas - região de Cotiporã (4 amostras).

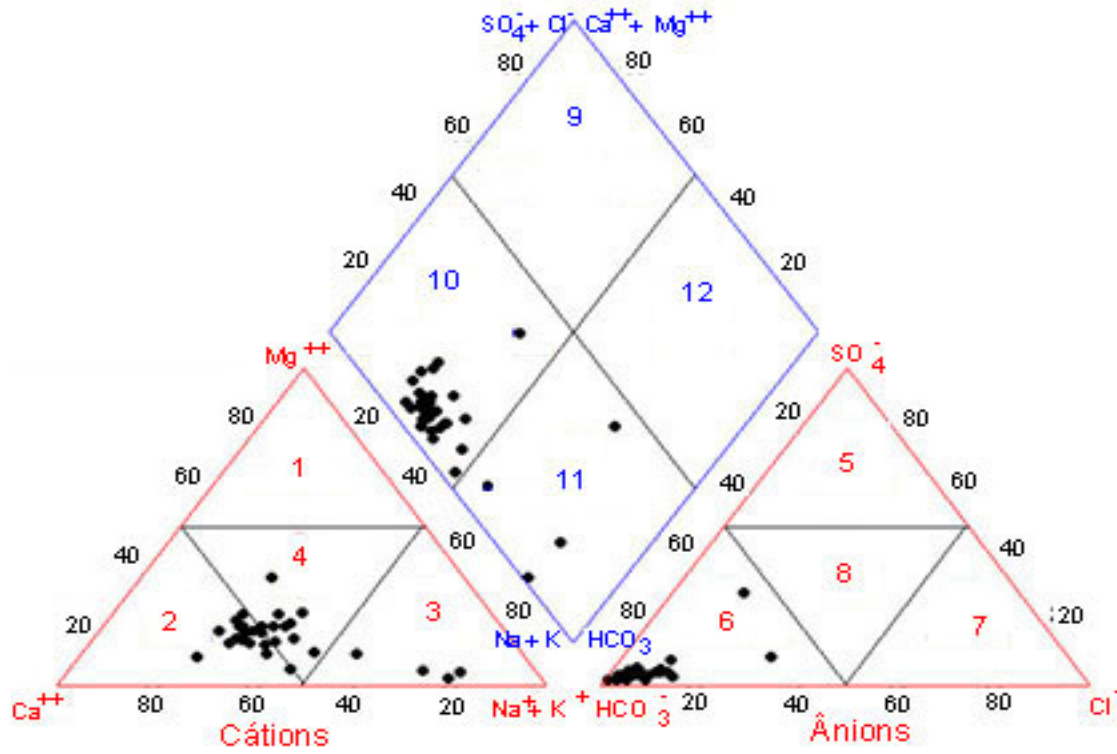


Figura 35 – Classificação das águas subterrâneas - região de Farroupilha (33 amostras).

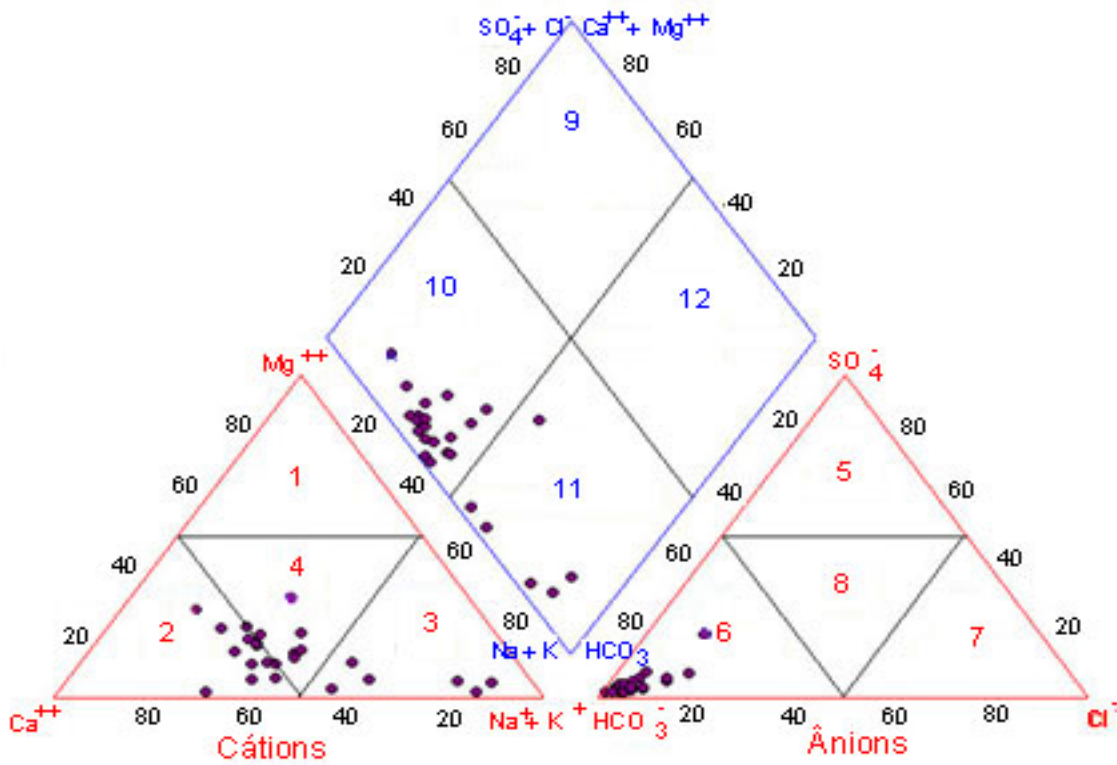


Figura 36 – Classificação das águas subterrâneas - região de Flores da Cunha (25 amostras).

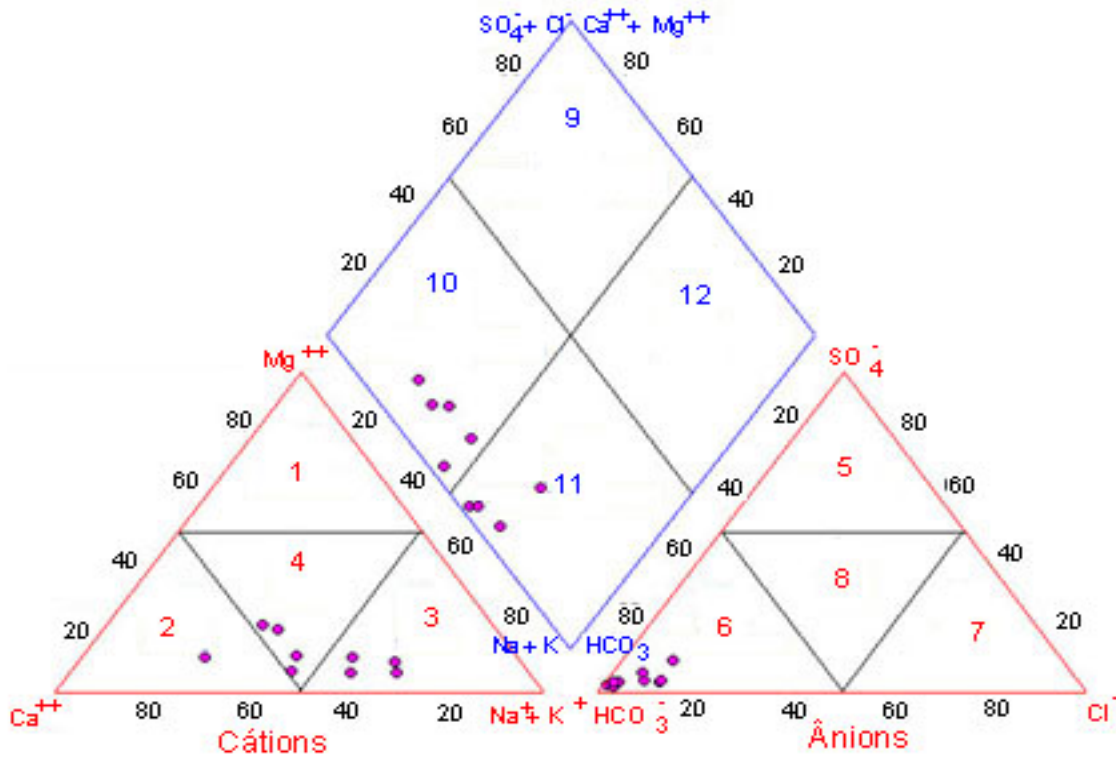


Figura 37 – Classificação das águas subterrâneas - região de Nova Pádua (9 amostras).

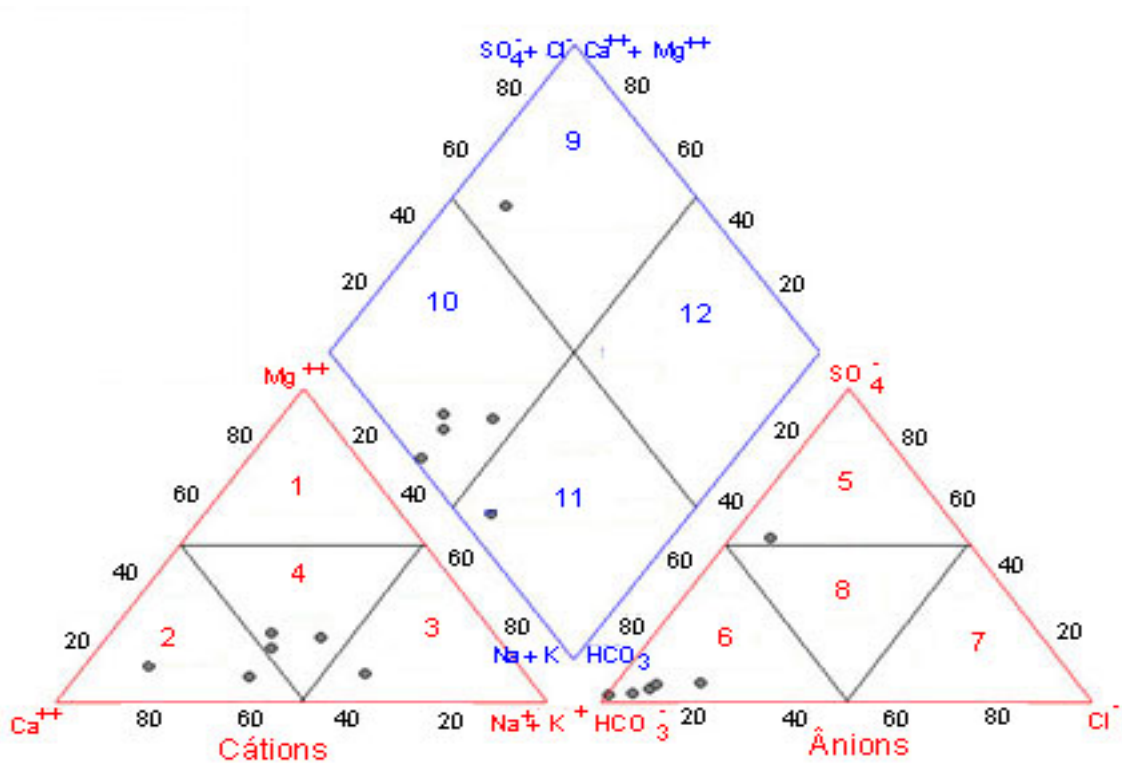


Figura 38 – Classificação das águas subterrâneas - região de Nova Roma do Sul (6 amostras).

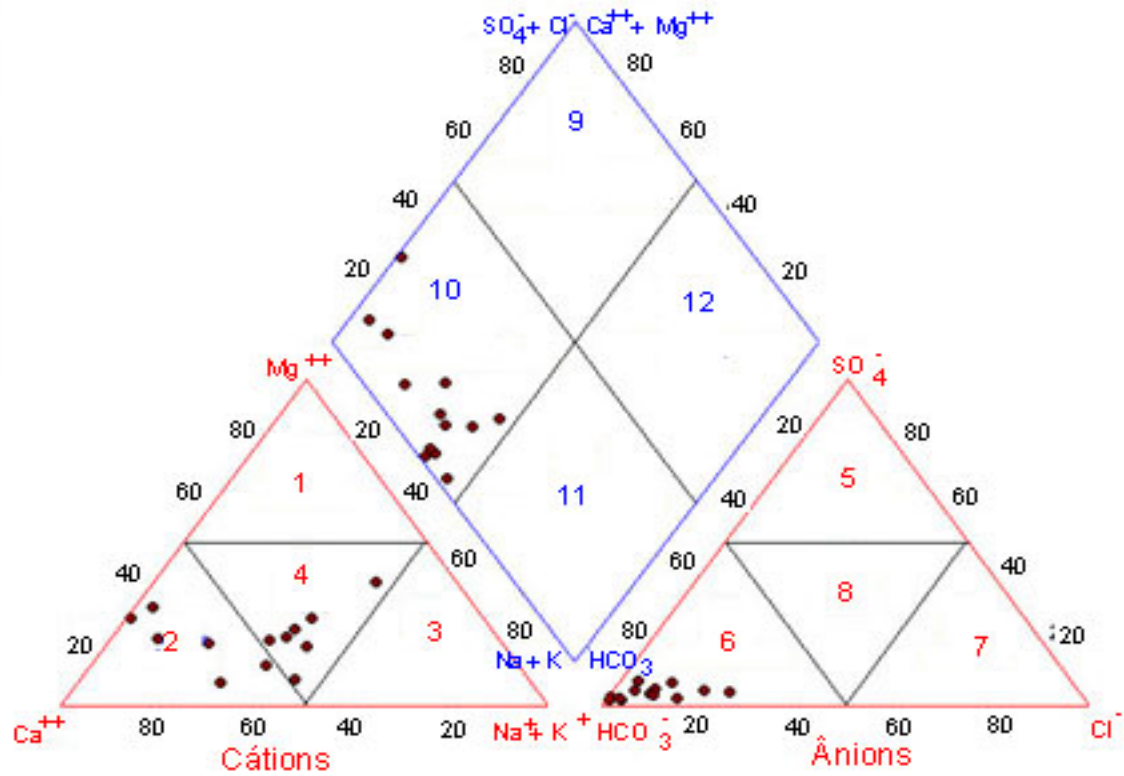


Figura 39 – Classificação das águas subterrâneas - região de São Marcos (13 amostras).

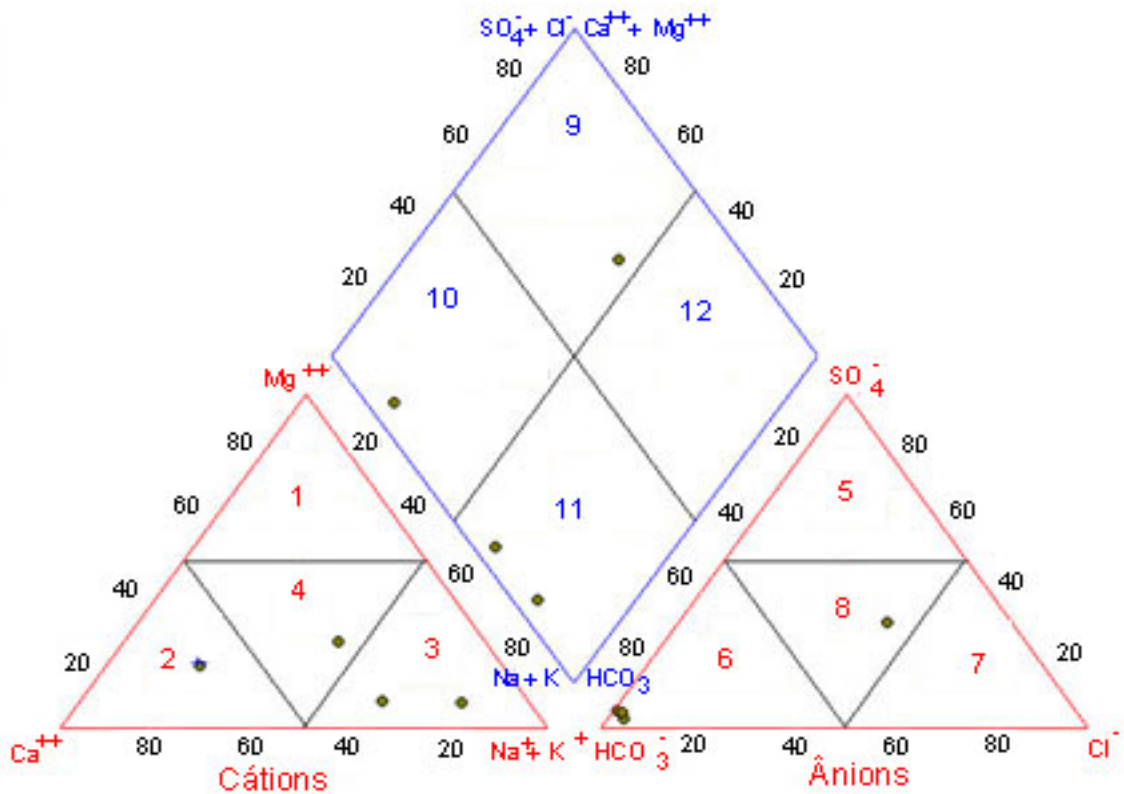


Figura 40 – Classificação das águas subterrâneas - região de Veranópolis (4 amostras).

A região de Nova Pádua (Fig. 37) é uma exceção, pois a proporção apresentada pelo campo das águas bicarbonatadas sódicas (44%) é próximo do campo das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas. Um outro fato que chama atenção, embora o número de amostras envolvidas seja muito reduzido, é a proporção encontrada para a região de Veranópolis (Fig. 40), onde há um predomínio do campo das águas bicarbonatadas sódicas. A relação encontrada nessas duas regiões poderia indicar uma estruturação tectônica diferenciada, o que favoreceria o contato entre as águas subterrâneas dos diferentes aquíferos, promovendo uma mistura das mesmas. Essa circulação poderia se dar em diferentes níveis altimétricos, dependendo do sistema estrutural existente. Assim, os principais condicionantes dessa diferenciação hidroquímica seriam os controladores geotectônicos, morfotectônicos e morfoestruturais.

As águas bicarbonatadas sulfatadas cálcicas ou magnesianas foram identificadas em Nova Roma do Sul (Fig. 38) e Veranópolis (Fig. 40). Em ambas as regiões, observou-se uma correlação dessas ocorrências com lineamentos de médio a grande porte (acima de 2 km), de orientação noroeste (N70 - 90W) e em áreas de relevo dissecado. Assim, esses lineamentos proporcionariam a ligação entre os sistemas de aquíferos Serra Geral e outros sistemas (por exemplo o Rio do Rastro), promovendo a circulação e misturas das diferentes águas. Isso é favorecido pelas condições de relevo dissecado, que seria também responsável pela circulação vertical das águas subterrâneas.

Analisando-se a presença de Ferro e Manganês, observa-se que em muitos pontos da região a água subterrânea possui teores desses elementos acima do padrão de potabilidade. Segundo Hausman (1995), a presença de altos teores desses elementos corresponde ao principal problema com relação ao aproveitamento dessas águas. Sua origem está associada aos processos de decomposição das rochas vulcânicas que possuem minerais ferro-magnesianos, os quais, quando quimicamente intemperizados acabam por fornecer os elementos Fe e Mn para os solos e, conseqüentemente, para as águas que circulam por eles.

Em geral, em todas as regiões há a ocorrência de águas subterrâneas que apresentam excesso de Ferro e Manganês. No entanto, observando-se a figura 41, percebe-se que, em algumas regiões, a ocorrência é maior e ultrapassa 50% dos casos. Isso é evidenciado ao se analisar a região de São Marcos onde, para um total de 13 laudos químicos, foi identificada a presença de excesso de Fe e Mn em 8 casos, indicando um percentual de 61,5%.

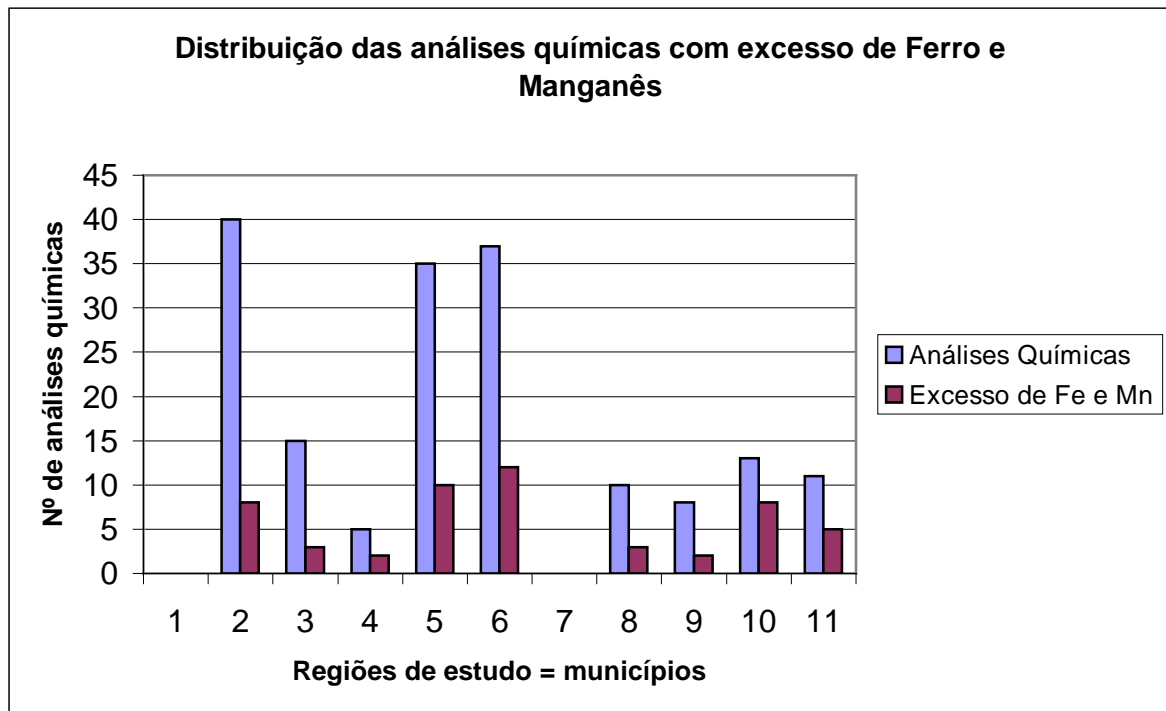


Figura 41 – Distribuição das análises químicas que apresentaram excesso de Ferro e Manganês e sua relação com as diferentes regiões de estudo. As regiões representadas são: (1) Antônio Prado; (2) Bento Gonçalves; (3) Caxias do Sul; (4) Cotiporã; (5) Farroupilha; (6) Flores da Cunha; (7) Monte Belo do Sul; (8) Nova Pádua; (9) Nova Roma do Sul; (10) São Marcos e (11) Veranópolis.

Numa avaliação da localização das regiões de ocorrência de águas subterrâneas com excesso de ferro e manganês e sua relação com diferentes condicionadores geológicos, observou-se que:

- 48,4% das ocorrências de águas subterrâneas com excesso de Fe e Mn estão associadas a lineamentos de portes variados, mas com orientação para o quadrante NW. Na seqüência, 24,1% dos casos estão relacionados com estruturas NE, 17,2% com E - W e 10,3% com N - S;
- as áreas de ocorrência dessas águas estão relacionadas com altitudes entre 600 e 700 metros (47,1%); 700 e 800 metros (23,5%); 500 e 600 (20,6%) e 400 e 500 metros (8,8%). Abaixo de 400 metros não foi identificado nenhum registro;
- há uma associação entre as ocorrências e os aspectos morfoestruturais e geomorfológicos. Os locais onde foram identificadas águas subterrâneas com excesso de ferro e manganês correspondem às seguintes áreas:

⇒ vales com vertentes e fundo côncavo;

⇒ altos topográficos representados por superfícies onduladas;

- há uma associação com regiões de solos do tipo Podzólicos, Cambissolos e Terra Bruna, bem como com a espessura do manto de alteração. Em geral essa associação de solos é caracterizada por uma espessura média e apresenta o horizonte B argiloso, com concentração de óxidos e hidróxidos de ferro. Assim, quando esses solos estão associados a relevos ondulados, há uma tendência de circulação de água mais restrita favorecendo a concentração do Fe e Mn. Além disso, nos casos dos vales com fundo côncavo há a tendência de formação de maiores espessuras de solos, bem como maior circulação da água pelo manto de alteração, favorecendo também a concentração desses dois elementos.

Dessa forma, se observa que o principal condicionador da ocorrência de águas subterrâneas com teores de Fe e Mn acima do padrão de potabilidade, tem relação com os aspectos morfoestruturais, geomorfológicos e pedológicos.

5 - PROSPECÇÃO DE AQUÍFEROS FRATURADOS

5.1 - Conceituação dos aquíferos fraturados

As rochas cristalinas, principalmente as ígneas, são litologias caracterizadas pela pequena e/ou inexistente porosidade intergranular. Nesse caso, a circulação e o armazenamento de água subterrânea só é possível quando da existência de superfícies e/ou planos de descontinuidades (porosidade secundária). Essas superfícies devem ter espessuras variáveis, entre 0,1 mm a dezenas de centímetros e extensões amplas, desde alguns metros até centenas de metros (Hausman, 1995). As rochas ígneas que apresentam esses planos caracterizam os aquíferos denominados de fraturados.

Os aquíferos fraturados apresentam características próprias (Hausman, 1995), como:

- são descontínuos, heterogêneos e anisotrópicos em sua maioria;
- a permeabilidade está relacionada com a abertura efetiva, rugosidade, intercomunicação, densidade e extensão das superfícies de descontinuidade;
- as concentrações químicas apresentam-se sob a forma de faixas alongadas;
- a quantificação dos aquíferos é complexa, em função da necessidade de inúmeros dados geológicos adicionais. O método de quantificação mais viável deve empregar medidas efetuadas no próprio poço (testes de bombeamento);
- avaliações de constantes hidrodinâmicas nem sempre são possíveis, devido à instabilidade da vazão, observada principalmente quando de bombeamentos contínuos e prolongados;
- os aquíferos fraturados nem sempre possuem comunicação entre si, o que é observado em várias localidades onde os níveis estáticos não apresentam coincidência entre a superfície piezométrica e a direção de circulação;
- o fluxo da água num sistema de fraturas é direcional e ocorre segundo os alinhamentos das superfícies de descontinuidades de maiores extensões e aberturas efetivas. Além disso, essas superfícies comportam-se como um sistema auxiliar, que tem reflexo no armazenamento, na instabilidade do fluxo e na interconexão do sistema;
- os reservatórios não podem ser considerados infinitos em extensão;
- as entradas de água no poço podem ocorrer em vários níveis e sob forma pontual;
- não há distribuição uniforme para as pressões. Os níveis estáticos são variáveis e não apresentam correlação com a superfície topográfica;

- as vazões e os rendimentos dos poços estão relacionados à pressão hidrostática e à intensidade/abertura efetiva das superfícies;
- a lei de Darcy, em geral, não pode ser aplicada. Os cones de interferência gerados quando do bombeamento estão alongados no sentido do eixo da superfície mais importante;
- os testes de vazão não permitem uma definição final das condições de bombeamento. Quando a exploração é muito intensa, podem ser geradas perdas de carga que não são mais compensadas pela pressão hidrostática e isso implica numa diminuição do fluxo e na queda de vazão;
- regiões que apresentam morfologia fortemente trabalhada pela erosão (regiões de vales com forte escarpamento e declividades) são caracterizadas por aquíferos limitados, incapazes de manter um armazenamento ou de nutrir estavelmente um campo de poços;
- em aquíferos fraturados contínuos (sistemas de fraturas amplo e muito interconectadas), as vazões em regime de bombeamento intensivo e contínuo apresentam-se estáveis;
- em aquíferos fraturados descontínuos (sistemas de fraturas com pequena intercomunicação), as vazões são instáveis e o fluxo de água subterrânea se dá ao longo de percursos mais complicados, o que implica em grandes perdas de carga;
- o aumento da vazão não é proporcional ao rebaixamento. As vazões aumentam até uma profundidade variável localizada acima da entrada d'água. Isso ocorre por que a vazão está relacionada à abertura efetiva das superfícies de descontinuidade. Assim, a capacidade específica é um parâmetro que não pode ser utilizado para cálculo da vazão máxima, pois podem ser determinadas vazões que não condizem com a capacidade de produção do aquífero interceptado pelo poço tubular;
- características hidrogeológicas que indicam a estabilidade e instabilidade dos poços podem ser identificadas utilizando-se o método de Hausman (1980), que é baseado na interpretação de curvas de campo obtidas pelos testes de bombeamento realizados no próprio poço.

Em geral, os fatores condicionantes da hidrogeologia de aquíferos fraturados (qualitativa e quantitativamente) estão relacionados com fatores exógenos e endógenos (Costa, 1965,1986). Os fatores exógenos são as características climáticas da região, a hidrografia, o relevo, a vegetação e os solos; o clima e a vegetação têm influências mais regionais do que locais. Os fatores endógenos estão representados pela litologia e pelo sistema estrutural predominante nas rochas. Costa (1986) estudou a influência dos fatores endógenos e exógenos sobre a hidrogeologia de aquíferos fraturados nos estados da Paraíba e Rio Grande

do Norte. Naquela região, Costa (1986) obteve uma correlação direta, inversa ou específica para os fatores e os parâmetros hidrogeológicos (Tab. X).

Tabela X - Correlação entre os fatores condicionantes do aquífero fraturado e alguns parâmetros hidrogeológicos

PARÂMETROS FATORES	VAZÃO ESPECÍFICA (l/h/m)	RESÍDUO SECO (mg/l)
Tipo de Rocha	Específica	Específica (Fraca)
Tipo de Fratura	Específica	Específica (Fraca)
Profundidade do Poço	Inversa	Direta (Incipiente)
Profundidade da Entrada d'água	Inversa (Incipiente)	Direta
Manto de Cobertura	Inversa (Incipiente)	Inexistente
Relevo/Hidrografia	Específica	Específica
Clima (precipitação)	Direta	Inversa

5.2 – Análise das pesquisas e métodos de prospecção

A prospecção de aquíferos fraturados é realizada de inúmeras maneiras, que estão relacionadas à utilização de métodos geológicos e /ou geofísicos, bem como ao emprego de técnicas empíricas ou da rdbdomância. Foi realizada uma revisão das pesquisas e métodos de prospecção desenvolvidos para os aquíferos fraturados. Salienta-se que a denominação adotada foi associada com o nome do autor do método, ou da pesquisa realizada sobre prospecção.

5.2.1 - Método da CORSAN

A Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) emprega um método de prospecção apresentado por Giardin (1997), baseado no desenvolvimento das seguintes etapas:

- 1ª - caracterização do sistema aquífero a ser explorado (poroso, fraturado, poroso controlado por estuturas);
- 2ª - inventário dos poços existentes com análise das características hidrogeológicas (caso existam): perfil litológico e construtivo, distribuição e densidade das entradas d'água,

relacionamento das entradas d'água com a litologia, produtividade das entradas e dos poços, níveis estáticos, capacidades específicas e transmissividade;

- 3ª - análise morfoestrutural fotogeológica regional e local;
- 4ª - levantamento de campo: análise da geologia local, cadastramento de poços existentes e localização das fontes potenciais de poluição;
- 5ª - integração dos dados de campo com a interpretação estrutural: nessa fase, é efetuada uma correlação da produtividade dos poços com os sistemas de fraturas, sendo que, na identificação de um padrão estrutural associado a poços produtivos, deve-se procurar padrões semelhantes para ser efetuada a locação do poço;
- 6ª - definição, no campo, dos pontos locados para perfuração, quando se deve levar em conta as condições de acesso. Nessa etapa, deve-se seguir as seguintes premissas:
 - ⇒ a locação de poços não deve ser efetuada a menos de 1000m (distância determinada pela experiência do autor) de uma quebra significativa da topografia (distância tomada a partir do traço da fratura), porque o volume de rocha fraturada entre o ponto da perfuração e a queda topográfica não será suficiente para garantir ao sistema um equilíbrio;
 - ⇒ deve-se considerar que fraturas de um mesmo sistema têm um mesmo comportamento hidráulico. Em campo, as fraturas paralelas são consideradas de um mesmo sistema. Assim, quando se identifica mineralização (preenchimento de fraturas), ou a não produtividade em um sistema de fraturas, deve-se excluir as fraturas paralelas que constituem esse sistema;
 - ⇒ priorização de locações sobre cruzamentos estruturais;
 - ⇒ a posição do poço em relação ao traço da fratura: em geral, o mais próximo;
 - ⇒ distância entre poços: a determinação da distância segura entre dois poços que caracteriza a inexistência de interferência entre eles, é complexa. Portanto, adota-se, como regra prática, uma distância superior a 600m (valor determinado pela observação de dados de campo e a experiência do autor);
 - ⇒ a profundidade máxima adotada é em torno de 120m (identificada em função da profundidade média dos poços observados pelo autor). A partir dessa marca, deve-se observar as condições geológicas para autorizar um maior aprofundamento. No caso da perfuração encontrar-se próxima do limite de dois derrames, opta-se pela continuidade da perfuração.

5.2.2 - Pesquisa de Takahashi

Takahashi (1991) e Takahashi *et al.* (1993) realizaram uma pesquisa visando a caracterização hidrogeológica de aquíferos em meio fraturado com base na análise e integração de dados morfoestruturais e hidrogeológicos. Esse estudo permitiu conhecer o padrão regional de ocorrência de lineamentos, a identificação de estruturas anômalas e a detecção de zonas com diferentes condições hidrogeológicas. Para isso, foram analisados parâmetros, representados por: densidade, orientação e comprimento dos lineamentos, grau de dissecação do relevo, espessura do regolito, vazões específicas e padrões de drenagem.

A identificação e extração de lineamentos foi efetuada sobre imagens de radar e fotografias aéreas (escala 1:100.000). O tratamento desses lineamentos, com a conseqüente geração de planos de informação relacionados à densidade, orientação e comprimento das estruturas, foi realizado com base na geração de superfícies de tendência. As superfícies de tendência são expressas por equações de ordem variável, que descrevem o comportamento de uma variável de interesse em função da localização de cada ponto.

O grau de dissecação do relevo foi originado com base no modelo numérico do terreno da região. Sobre uma matriz desse modelo, gerou-se uma janela móvel de dimensão 9 x 9, onde para cada posição da janela, foi estimada a variância das altitudes. Com esses dados, classificou-se o relevo das áreas em pouco dissecado, medianamente dissecado e muito dissecado.

A espessura do regolito foi determinada tendo como base os dados dos perfis de poços tubulares. Após o emprego de técnicas estatísticas tradicionais, gerou-se um plano de informações que descreve o comportamento espacial dessa variável.

A integração desses planos de informação proporcionou a geração de um mapa hidrogeológico para a região do Planalto Meridional do Rio Grande do Sul. Com disso, observou-se que a localização de poços artesianos com alta produtividade está relacionada com áreas de alta densidade de lineamentos, médias espessuras dos regolitos e baixos a médios graus de dissecação do relevo. No caso da inexistência de pelo menos duas dessas condições em uma localidade, a produtividade dos poços será baixa a nula.

5.2.3 - Pesquisa de Mobus

Mobus (1987) e Wrege & Mobus (1992) desenvolveram uma pesquisa para a avaliação da hidrogeologia da região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, que foi baseada no estudo da geologia estrutural e de dados hidrogeológicos. Essas informações foram processadas por meio do emprego de técnicas geomatemáticas (superfície de tendência, análise de agrupamento e análise de fatores).

Pela análise de superfície de tendência foram tratados os dados estruturais (distribuição espacial e orientações das fraturas), com o objetivo de determinar zonas com padrões estruturais semelhantes. Pelas análises multivariantes de agrupamento e de fatores, foram tratados os dados dimensionais, hidrodinâmicos e hidrofisicoquímicos, que visam conhecer a influência simultânea desses parâmetros em diversos locais da região, determinar zonas de mesma variabilidade e definir inter-relações entre os parâmetros dentro de cada grupo.

A integração dos dados estruturais e hidrogeológicos procurou obter uma interpretação hidrogeológica do conjunto de todas as informações. Os seguintes resultados foram alcançados por Mobus (1987) e Wrege & Mobus (1992):

- ficou caracterizada a existência de regiões com diferentes densidades de fraturamento;
- as áreas de alta densidade de fraturas configuram-se mais favoráveis sob o ponto de vista hidrogeológico;
- foram evidenciadas duas orientações preferenciais de fratura: $N50 \pm 5W$ e $N35 \pm 5E$. As fraturas noroeste são as controladoras dos cursos d'água superficiais principais da região, enquanto as nordeste constituem as orientações preferenciais dos cursos d'água secundários;
- ficou evidenciada uma relação dos aspectos hidrogeológicos (número de entradas de água, profundidade da última entrada, descarga específica, pH, razão cloretos/bicarbonatos, sólidos totais) com o controle estrutural e/ou geomorfológico. Como exemplo se pode citar que as áreas com densidade de lineamentos baixa e relevo fortemente acidentado apresentaram-se como desfavoráveis à ocorrência de aquíferos fraturados,
- há relação diretamente proporcional entre a espessura do manto de alteração e os teores dos elementos químicos,

5.2.4 - Pesquisa de Eilers

Eilers (1993) utilizou técnicas de sistemas de informação geográfica para estudos hidrogeológicos na região sudoeste do Rio Grande do Sul. Foi desenvolvida uma análise morfoestrutural dos dados de superfície como emprego de técnicas geomatemáticas de superfície de tendência, e uma análise estrutural dos dados de subsuperfície (informações obtidas de poços perfurados). Os resultados dessas análises foram integrados por meio do uso de um SIG, com o objetivo de inferir um modelo estrutural preliminar de interesse hidrogeológico para a área.

O estudo da rede de drenagem, geomorfologia e lineamentos (distribuição espacial e orientação) foi realizado com a utilização de imagens orbitais e de radar. Os dados estruturais foram analisados por meio de técnicas estatísticas tridimensionais de tendência, com o objetivo de determinar zonas com semelhantes padrões estruturais. Com as informações provenientes dos poços, foi estudado o comportamento estrutural dos pacotes litológicos e geradas superfícies com os aspectos estruturais e hidrogeológicos do aquífero.

A integração dos dados proporcionou a obtenção dos seguintes resultados:

- a análise da drenagem permitiu confirmar a presença de lineamentos de médio porte;
- a análise do relevo mostrou-se eficiente na identificação de morfoestruturas que influenciam o fluxo de água subterrânea, como bacias ou domos;
- os lineamentos de pequeno porte apresentam uma distribuição espacial diferenciada que tem relação com a presença de um relevo mais acidentado;
- há a predominância de lineamentos pertencentes ao quadrante NW, com destaque para a direção N40 - 50W;
- a correlação do aspecto do relevo (MNT), da distribuição espacial dos lineamentos e da superfície do topo do arenito gerada por meio da interpretação dos perfis dos poços evidenciou a existência de um bloco soerguido ao sul e um bloco abatido ao norte. Esses blocos são separados por um plano descontínuo de fratura, formado por uma componente de direção NW e outra de direção NE.

5.2.5 - Pesquisa de Martins

Martins (1979) pesquisou o aquífero das rochas basálticas da região sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, onde caracterizou três aquíferos distintos: 1) das rochas fraturadas, 2) da camada de alteração e 3) dos aluviões. Além disso, Martins (1979) evidenciou que a recarga deve ocorrer através da precipitação pluviométrica ou devido à alimentação advinda da Formação Botucatu sotoposta.

Martins (1979) enfatiza que os processos de locação e de exploração de água subterrânea nessa região devem ser realizados levando-se em conta os sistemas de fraturas e alinhamentos geológicos, bem como a topografia. No caso dos alinhamentos, ficou evidenciado, por meio do estudo de mapas hidroquímicos, uma direção preferencial noroeste.

Com relação à profundidade de perfuração, Martins (1979) mostra que devem ser considerados dois parâmetros: o primeiro considera que, à medida em que se aprofunda o poço, as fraturas existentes tendem a estar mais fechadas; o segundo considera que, em profundidade, a tendência é que o sistema de fraturas esteja mais amplamente conectado. Assim, para cada poço, deve existir uma profundidade ótima de exploração, que, no caso presente a experiência, mostra estar em torno de 60m.

5.2 6 - Pesquisa da MAGNA

MAGNA (1997) e Leão *et al* (1998) desenvolveram uma pesquisa voltada para a caracterização hidrogeológica regional da bacia hidrográfica Taquari-Antas. Essa caracterização foi realizada por meio de técnicas de Sistemas de Informação Geográfica, baseados na integração de dados referentes à distribuição espacial dos lineamentos, litologias e relevo.

Para o relevo foi gerada uma matriz, com resolução espacial 250 x 250m, e a mesma foi fatiada em três classes: 1) alta (cota acima de 750 m), 2) média (450 < cota < 750) e 3) baixa (cota abaixo de 450 m).

Os lineamentos e a litologia (polígonos) foram digitalizados e depois, convertidos para uma matriz com a mesma resolução do plano de informação relevo.

Esses dados, convertidos em planos de informações de mesma escala e resolução, foram integrados para gerar um mapa temático de pontencialidades. Esse mapa foi cruzado com as informações de produtividade de poços existentes na região visando determinar correlações. Com isso, ficou evidenciado que:

→ às potencialidades aquíferas dependem da envergadura da zona fraturada e da situação geomorfológica envolvida. Assim, poços tubulares locados sobre fraturas e, em especial, sobre cruzamentos de fraturas com comprimento superior a 10Km e nas zonas de relevo menos escarpados fornecem vazões elevadas (dezenas de metros cúbicos). Já se a locação for realizada em zonas de menor porte ou em fraturas simples os poços tubulares tenderão a apresentar vazões menores. Por fim, poços locados fora da zona de influência de zonas de fraturas ou simplesmente fraturas tendem a ser secos ou apresentar vazões abaixo de 0,5 m³/h.

5.2.7 - Outros métodos e pesquisas

Neste item serão descritos outros trabalhos que envolvem a pesquisa de aquíferos fraturados. Esses trabalhos constituem boas referências com relação a métodos de prospecção.

Rosa Filho *et al.* (1985), baseados em estudos geológicos (litologia, padrão estrutural) e hidrogeológico (características obtidas de poços existentes), caracterizaram hidrogeologicamente a região do Estado do Paraná pertencente à Província Hidrogeológica Mesozóica e sub-província Serra Geral (Formação Serra Geral). Os resultados obtidos foram:

→ as direções preferenciais dos alinhamentos estruturais, por onde as águas subterrâneas percolam, são na maioria das vezes, NW - SE (direção preferencial) e NE - SW; os mergulhos são praticamente verticais. Em geral, essas características coincidem com as drenagens de 2^a e 3^a ordem, de extensão superior a 300m;

→ em profundidades maiores que 110 m, as entradas d'água são menos freqüentes e os níveis de contribuição localizados entre 30 e 110 m correspondem até 80 a 95% das ocorrências;

→ as maiores vazões estão relacionadas a estruturas fraturadas associadas a níveis vesiculares.

Fraga (1986) realizou um trabalho de pesquisa voltado para o zoneamento do sistema aquífero Serra Geral, no Estado do Paraná. Esse trabalho baseou-se na morfogênese dos derrames basálticos e os efeitos da tectônica sobre os mesmos. A investigação resultou na determinação de dois grandes compartimentos hidrogeológicos: área norte e sul. A diferença de produtividade entre essas duas áreas é explicada por diferenças estruturais dos derrames. Na área norte, os derrames são profusamente vesiculares e possuem espessura menor, de modo que respondem por áreas mais produtivas. Na área sul, o modelado do relevo é mais irregular e caracteriza uma unidade geomorfológica mais dissecada. O processo de intenso dissecamento deve ter proporcionado o afloramento de derrames mais antigos e espessos o que implicou em menor produtividade.

Fraga (1986) propõe uma metodologia específica para prospecção de aquíferos, a qual é baseada em:

→ mapeamento geológico detalhado das áreas de interesse, com vista à determinação da estruturação regional dos derrames basálticos. Para isso, deve-se efetuar a delimitação e a caracterização geral das feições estruturais, buscando reconhecer a natureza dos corpos, sua variação litológica, sua distribuição espacial, bem como o levantamento altimétrico de horizontes-guias para a confecção de mapas de controle estrutural e a definição de perfis geológicos mais significativos;

→ aplicação de métodos de estudos de modelos de fraturamento, com vistas à determinação da relação entre as estruturas principais e secundárias;

→ um estudo hierarquizado, segundo a seguinte seqüência: feições estruturais aliadas à drenagem e à topografia, espessura dos derrames, tipo de rocha e espessura do solo.

Freitas & Mendes (1997) trabalharam com aquíferos fraturados em rochas granitóides na região de Porto Alegre (RS), com o objetivo de determinar as áreas potenciais de alimentação de aquíferos fraturados. Os dados utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa foram: sistema estrutural (índice de fraturamento), obtido por meio de fotointerpretação de fotografias aéreas em escala 1:60.000; declividade do terreno, fornecido pelo modelo digital do terreno; e uso do solo, caracterizado em imagem de satélite LANDSAT TM-5 pelo método de classificação maxverossimilhança. A integração desses dados foi

realizada com o emprego de modelos de Lógica Fuzzi e Booleano em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica. Os resultados obtidos foram:

→ pelo emprego do método Booleano, as áreas de recarga satisfizeram as condições pré-determinadas que foram: pertencer a áreas de rochas granitóides, a áreas com declividade menor que 18%, a áreas de rochas fraturadas e a áreas com cobertura vegetal. No entanto, o resultado obtido por este método não apresenta continuidade;

→ pelo método de Lógica Fuzzy, os resultados obtidos foram semelhantes ao do método Booleano, entretanto ficou evidenciada as incertezas envolvidas. Com isso, o mapa de áreas potenciais de recarga apresentou continuidade e uma classificação de potencialidade de áreas.

Coroliano (2002) faz uma análise sobre modelos de prospecção de água subterrânea em terrenos cristalinos, merecendo destaque os seguintes:

→ modelo riacho-fenda: esse método de locação leva em consideração que há uma coincidência da drenagem superficial com zonas densamente fraturadas do cristalino, o que acarretaria na existência de aquíferos associados. O reconhecimento de estruturas do tipo riacho-fenda é facilmente realizado com a fotointerpretação ou em campo, na identificação de trechos retilíneos e “ortogonais” ao longo do curso fluvial. Esse método não deve ser utilizado “cegamente”, pois nem sempre trechos retilíneos vão corresponder a zonas de fraturas, pois podem ser um reflexo da estruturação primária da rocha, como por exemplo, a foliação;

→ modelo calha-elúvio-aluvionar: esse modelo baseia-se na existência de morfologias semelhantes a pequenas bacias preenchidas por aluvião e regolito e controladas por algum tipo de anisotropia (por exemplo, foliação). Nesse caso, o intemperismo tenderia a aumentar a bacia, através da alteração das rochas, e sendo assim, as áreas mais favoráveis estariam relacionadas com os locais de maior alteração;

→ modelo bolsões de intemperismo: a formação de bolsões ocorre quando há litologias diferentes em contatos, sendo uma mais susceptível à ação do intemperismo do que a outra. Dessa forma, formam-se zonas de maior porosidade e permeabilidade associadas às camadas rochosas mais alteradas. Essas zonas consistem de bons locais para locação de poços, no entanto sua identificação, dificilmente é realizada com base em estudos de superfície.

5.3 - Análise e discussão das pesquisas e métodos de prospecção

Os métodos de prospecção de aquíferos fraturados envolvem a integração de diferentes planos de informações: dados estruturais, dados geológicos e hidrogeológicos (Tab. XI). O dado geológico de maior importância, conforme focado nos diferentes métodos está relacionado com o sistema estrutural. No entanto, as estruturas geológicas (zonas de fratura) são tratadas de maneira muito distinta pelos diferentes autores.

Tabela XI - Resumo dos métodos de prospecção com os principais dados empregados e a fonte utilizada para a obtenção dos lineamentos.

Método Autor / Empresa	Dados utilizados: geológicos e hidrogeológicos	Fonte para extração dos lineamentos
Giardin (1997) CORSAN	Inventário de poços Análise estrutural fotogeológica Levantamento geológico de campo Integração de dados: campo x estruturas Locação dos poços	Fotografia Aéreas Fotointerpretação Escala 1:60.000
Takahashi (1991)	Integração de parâmetros: → densidade, orientação e comprimento de lineamentos, → grau de dissecação do relevo → espessura do regolito → vazões específicas → padrões de drenagem	SLAR Fotografias Aéreas Escala: 1:250.000. 1:100.000 e 1:60.000
Mobus (1987)	Integração de dados: → estruturais: lineamentos → dados hidrogeológicos	Imagens de Satélite SLAR Fotografias Aéreas Escala: 1:250.000. 1:100.000 e 1:60.000
Eilers (1993)	Integração de dados em SIG → modelo estrutural → rede de drenagem → geomorfologia → dados estruturais e hidrogeológicos de subsuperfície obtidos de perfis de poços	Imagens de Satélite Imagens de Radar Escala: 1:500.000. 1:250.000
MAGNA (1997)	Integração de dados em SIG → distribuição espacial dos lineamentos → litologia → relevo	Imagens de Satélite Escala: 1:250.000. 1:100.000

De um modo geral, as zonas de fratura são identificadas a partir de fotografias aéreas ou de imagens de sensores remotos. Nessas imagens, as zonas de fratura são materializadas como “lineamentos”, ou seja, feições lineares observadas nas imagens são traçadas em *overlays* e, então, digitalizadas. O problema principal surge, conforme será visto, na qualificação das feições lineares extraídas das imagens. Diferentes observadores usualmente qualificam de modo bastante distinto as feições lineares, conforme foi exaustivamente discutido por O’leary *et al.* (1976) e Wise (1982). Os próprios trabalhos relacionados na tabela X mostram diferentes formas de qualificar as feições lineares, conforme será visto a seguir.

5.3.1 – Geologia estrutural

Nesse item, serão discutidos conceitos sobre a forma de abordagem do condicionante de maior importância para os aquíferos fraturados que consiste na geologia estrutural. Esses dados são tratados de formas diversas pelos diferentes autores, pois há variações na conceituação dos lineamentos, forma de extração e tipo de produto de sensoriamento remoto utilizado para isso, além do tipo de tratamento estatístico utilizado.

5.3.1.1 – Formação e caracterização de zonas de fraturas

Um maciço rochoso pode ser submetido a diferentes tipos de tensões (compressivas e/ou distensivas), em diferentes direções. O tipo de tensão atuante sobre o maciço determinará a orientação das estruturas deformacionais, enquanto a diferença de magnitude entre as direções de tensões implicará no padrão geométrico dessas estruturas.

Um maciço rochoso, quando submetido a um campo tensional, pode apresentar comportamentos diferenciados, que estarão relacionados com a composição litológica do maciço, pressão litostática, temperatura, entre outros fatores. Em geral, um maciço pode passar por um, ou por mais de um dos três estágios de deformação: frágil, frágil-dúctil e dúctil (Fig. 42).

No estágio frágil, as rochas submetidas a um campo tensional caracterizam-se por uma quebra da coesão, que resulta na formação de estruturas deformacionais como as fraturas. Além disso, se a rocha for submetida a uma pequena magnitude de tensão e a baixa pressão

confinante, haverá a formação de fraturas denominadas de trativas, que são paralelas à direção de compressão. À medida que se aumenta a magnitude da tensão aplicada, a pressão confinante e/ou a temperatura, essas rochas podem desenvolver um par conjugado de fraturas denominado de fraturas de cisalhamento (Fig. 43).

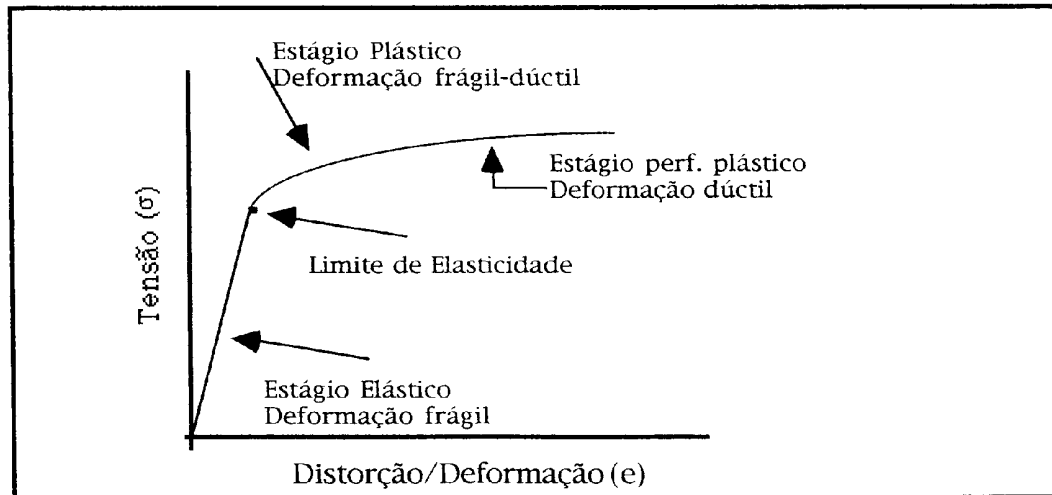


Figura 42 – Estágios de deformação que um maciço rochoso pode desenvolver (Hobbs *et al.*, 1976).

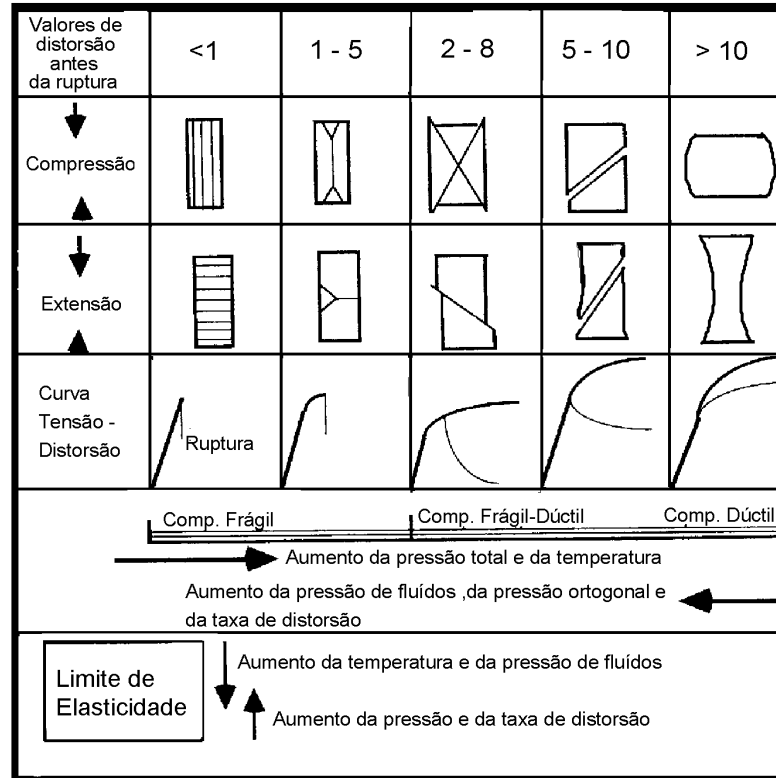


Figura 43 – Mudança de comportamento dos materiais geológicos de acordo com as diferentes condições a que são submetidos os maciços rochosos (modificado de Hobbs *et al.*, 1976).

Costa (1980) comenta que o comportamento de um maciço rochoso, quando submetido a um campo de tensões no estágio frágil, é idêntico ao comportamento de um bloco de rocha submetido a ensaios de compressão uniaxial e triaxial. Nesses ensaios, as estruturas geradas nos blocos são de dois tipos: estruturas trativas e de cisalhamento.

Dune & Hancock (1994) descrevem a formação de diferentes estruturas frágeis geradas num maciço rochoso submetido a diferentes campos tensionais. Esses autores descrevem a formação de três conjuntos de fraturas principais, representadas pelas fraturas denominadas de: extensão, cisalhamento e híbridas (Fig. 44).

As estruturas frágeis geralmente desenvolvidas em maciços rochosos correspondem principalmente às fraturas (juntas e falhas), às brechas de falha e às microfraturas. As fraturas são as descontinuidades disjuntivas presentes nas rochas e podem ser designadas de juntas, ou de falhas. A distinção de juntas e de falhas está vinculada a magnitude do deslocamento relativo dos blocos isolados; as falhas são fraturas que mostram um deslocamento superior a 5 mm, enquanto as juntas são fraturas cujo deslocamento dos blocos é inferior a 5 mm (Ramsay & Huber, 1987). Uma falha corresponde a uma estrutura planar, ou curvilinear por meio da qual a rocha foi deslocada numa direção, geralmente contida no plano de fratura (Park, 1982). Existem diferentes tipos de falhas e a classificação é efetuada de acordo com o mergulho do plano de falha e a direção de deslocamento relativo. Assim, pode-se classificar as falhas em três tipos principais: normais, reversas e de cavalgamento e transcorrentes. O processo de formação de falhas pode ser desenvolvido em qualquer profundidade na crosta terrestre e depende das condições de pressão confinante, da pressão tectônica e de fluidos e da temperatura.

As juntas consistem em estruturas planares, ou curvilineares onde não há deslocamento, ou o deslocamento é tão pequeno que dificulta a sua identificação e visualização (Park, 1982). Em geral, as juntas podem formar um conjunto de fraturas espaçadas regularmente, paralelas, mas, a tendência é que as juntas sejam menos regulares e sistemáticas. O processo de formação de juntas desenvolve-se em pequena profundidade da crosta terrestre, onde persistem condições físicas caracterizadas por baixa pressão confinante e temperatura. Assim, sob essas condições, em geral, há a formação de conjunto de fraturas com planos de descontinuidades mais ou menos regulares e fortemente concentrados em faixas

estreitas. A formação de juntas também está relacionada ao alívio de pressão de maciços rochosos e ao resfriamento de rochas ígneas (rochas vulcânicas como os basaltos).

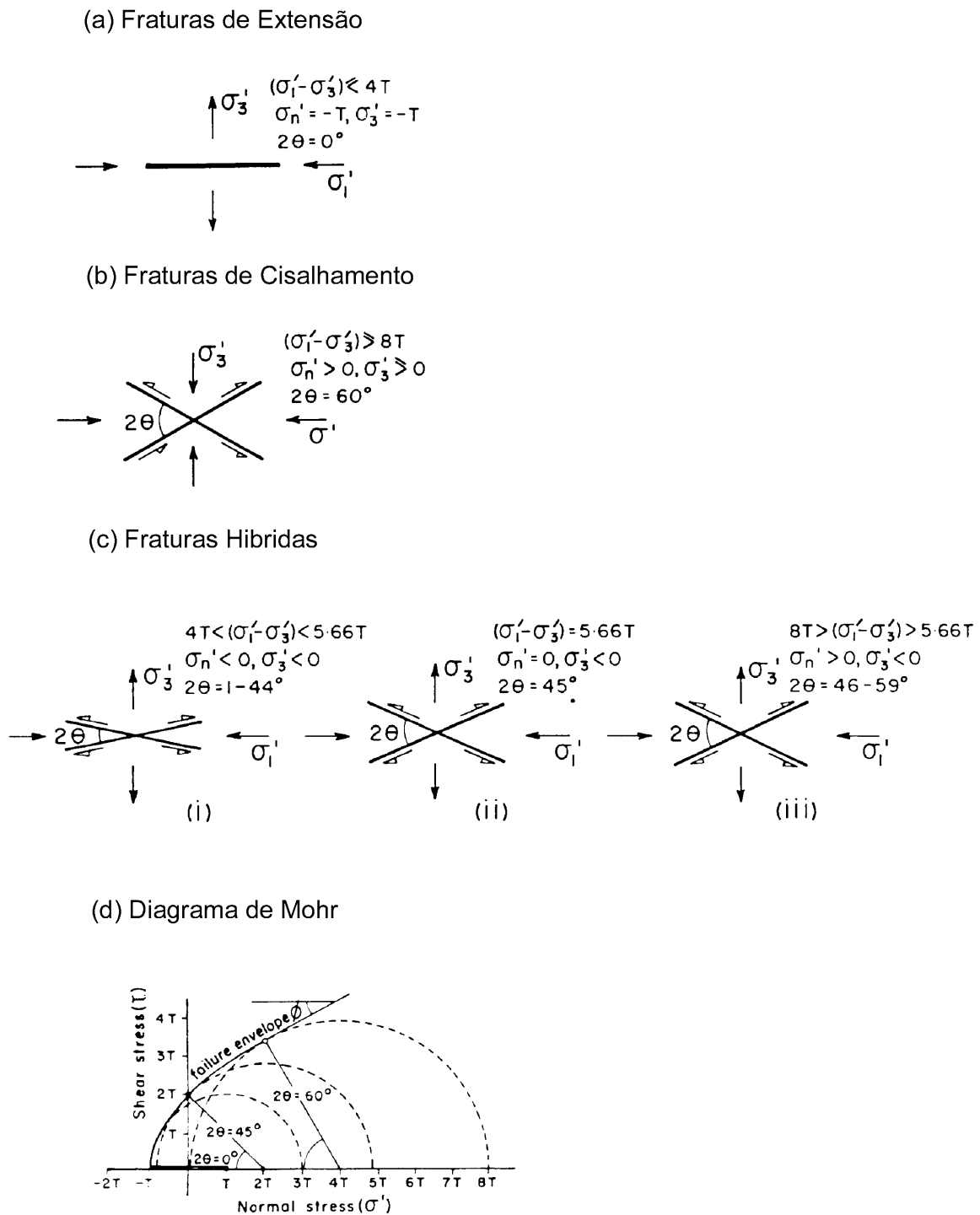


Figura 44 – Condições de tensão durante a formação de fraturas: (a) fraturas de extensão, (b) fraturas de cisalhamento, (c) três classes de juntas híbridas. Os círculos seqüenciais de Mohr em (d) representa o processo de formação das fraturas. (modificado de Dune & Hancock, 1994).

As brechas de falha são rochas compostas de fragmentos de tamanho e de formas variadas, que não apresentam estrutura planar penetrativa associada. Essas brechas desenvolvem-se em zonas de fraturas e formam-se devido a um aumento na taxa de distorção da deformação frágil.

Além dessas estruturas frágeis, um maciço rochoso pode desenvolver juntas neotectônicas. Segundo Hancock & Engelder (1989), as juntas neotectônicas consistem de um conjunto de fraturas de extensão verticais e, menos comumente, de fraturas conjugadas. Essas fraturas desenvolvem-se em profundidades menores do que 500 metros e sob um campo tensional que é caracterizado por uma direção de tração (σ_3) horizontal e $\sigma_1 - \sigma_3$ pequeno. Além disso, são pré-requisitos fundamentais para a formação dessas juntas, o alívio de pressão resultado da erosão do relevo, a erosão lateral e o soerguimento. A geometria dos conjuntos de juntas neotectônicas é apresentado na figura 45.

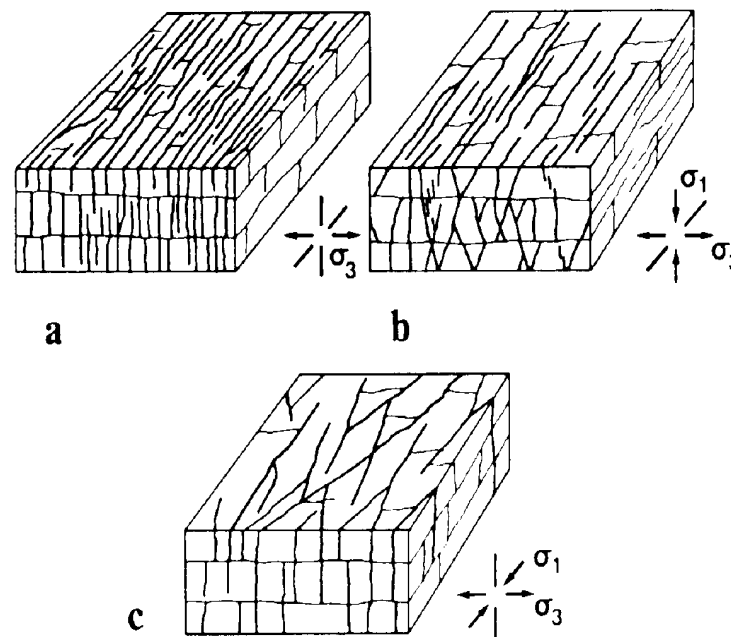


Figura 45 – Sistemas de juntas neotectônicas: (a) um sistema simples de juntas de extensão vertical unidas por juntas cruzadas não sistemáticas (finas); (b) um conjunto de juntas sistemáticas compreendendo fraturas de extensão verticais e fraturas conjugadas com um ângulo diedro de menos que 45°; (c) um conjunto de juntas compreendendo fraturas de extensão vertical e fraturas conjugadas verticais com ângulo diedro menor que 45°.

As estruturas frágeis de maior importância para a hidrogeologia consistem de fraturas e zonas de fratura. Segundo Costa (1980,1982), as melhores estruturas são as fraturas de tração, que tendem a serem abertas, enquanto as fraturas de cisalhamento, em geral, são estruturas planares fechadas.

Costa (1980,1982) também descreve a importância de fraturas longitudinais para hidrogeologia. Essas fraturas são geradas quando os maciços rochosos são soerguidos; isso faz com que as tensões de compressão, confinadas anteriormente no maciço, passem a funcionar na forma de tração (Fig. 46). Costa (1972) comenta que os maciços rochosos, ao sofrerem ruptura por tração próximo à superfície, podem sofrer deslocamentos em função do próprio peso, o que acarretaria na formação de falhas de gravidade. Isso explicaria a formação das falhas da Serra do Mar no Brasil, por exemplo.

As rochas submetidas à deformação frágil podem apresentar diferentes tipos de estruturas deformacionais, que podem ter, ou não, relação com a presença de aquíferos fraturados. Assim, faz-se necessário caracterizar adequadamente os tipos de estruturas frágeis, o que é possível se for identificado o campo tensional que atuou no maciço rochoso.

Existem diversas técnicas que visam à análise de paleotensões, sendo que as mesmas podem ser divididas em numéricas e gráficas. Nesse último caso, o método dos diedros retângulos de Angelier & Mechler (1977) consiste numa técnica que foi amplamente testada e recomendada por diversos autores e que permite a identificação dos campos de paleotensão. Para isso é necessária a utilização de medidas de planos de fratura e indicadores cinemáticos de movimentação, conforme a seqüência de etapas descrita abaixo (Fig. 47):

⇒ plotagem das atitudes das fraturas (direções e deslizamentos) em *overlays* sobre a rede estereográfica de Schmidt. Cada medida deve ser plotada em um *overlay* diferente;

⇒ traçado do plano de falha e da direção de deslizamento. O pólo do plano de falha constitui um ponto denominado de C e a posição da direção de deslizamento é um outro ponto, denominado de A. Ortogonalmente ao ponto A, ao longo do plano de fratura, localiza-se o ponto B. Unindo-se o ponto B e C forma-se um plano auxiliar (PA) que junto com o plano de fratura divide o estereograma em quatro setores equivalentes. Após isso, utilizando-se o sentido de movimento obtido com o indicador cinemático, são classificados os setores identificados. Por exemplo, numa situação onde há um falhamento do tipo normal o setor que

abrange o centro do diagrama e seu quadrante oposto são áreas de compressão (σ_1), e conseqüentemente, as áreas restantes são de extensão (σ_3). Em outra situação, onde há um falhamento do tipo inverso, ocorrerá a situação inversa;

⇒ de posse dos diversos planos de fraturas e seus respectivos setores é realizada uma superposição dos diagramas visando a redução das campos de compressão e extensão. Por fim, são determinadas as posições de σ_1 , σ_2 e σ_3 , e efetuadas as medidas.

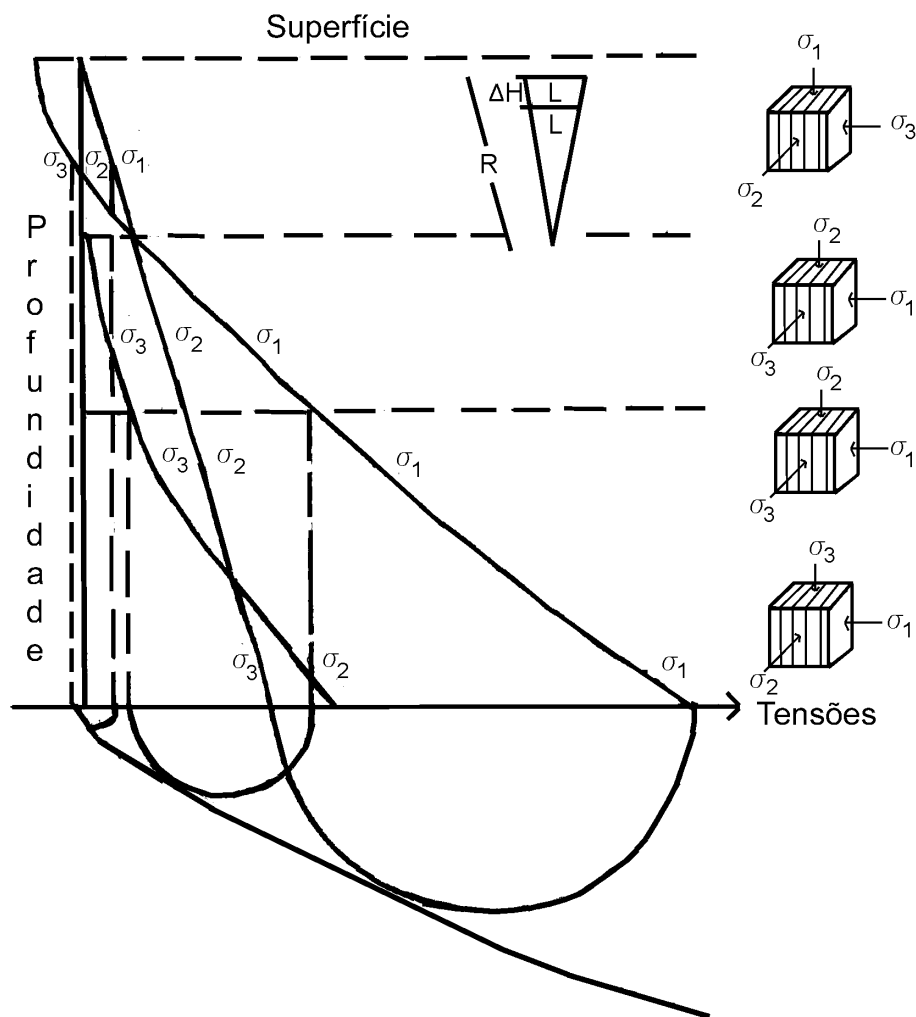


Figura 46 – Diferentes estágios de tensões que um corpo rochoso pode apresentar quando é soerguido por fenômenos epirogenéticos ou isostáticos. Dois estágios de formação de fraturas são característicos: 1) a meia profundidade, quando a tensão máxima ainda está na horizontal e a falha resultante é do tipo transcorrente (cisalhamento), e 2) outro na zona mais superficial, onde há um alívio total de uma das tensões horizontais e são formadas as fraturas longitudinais.

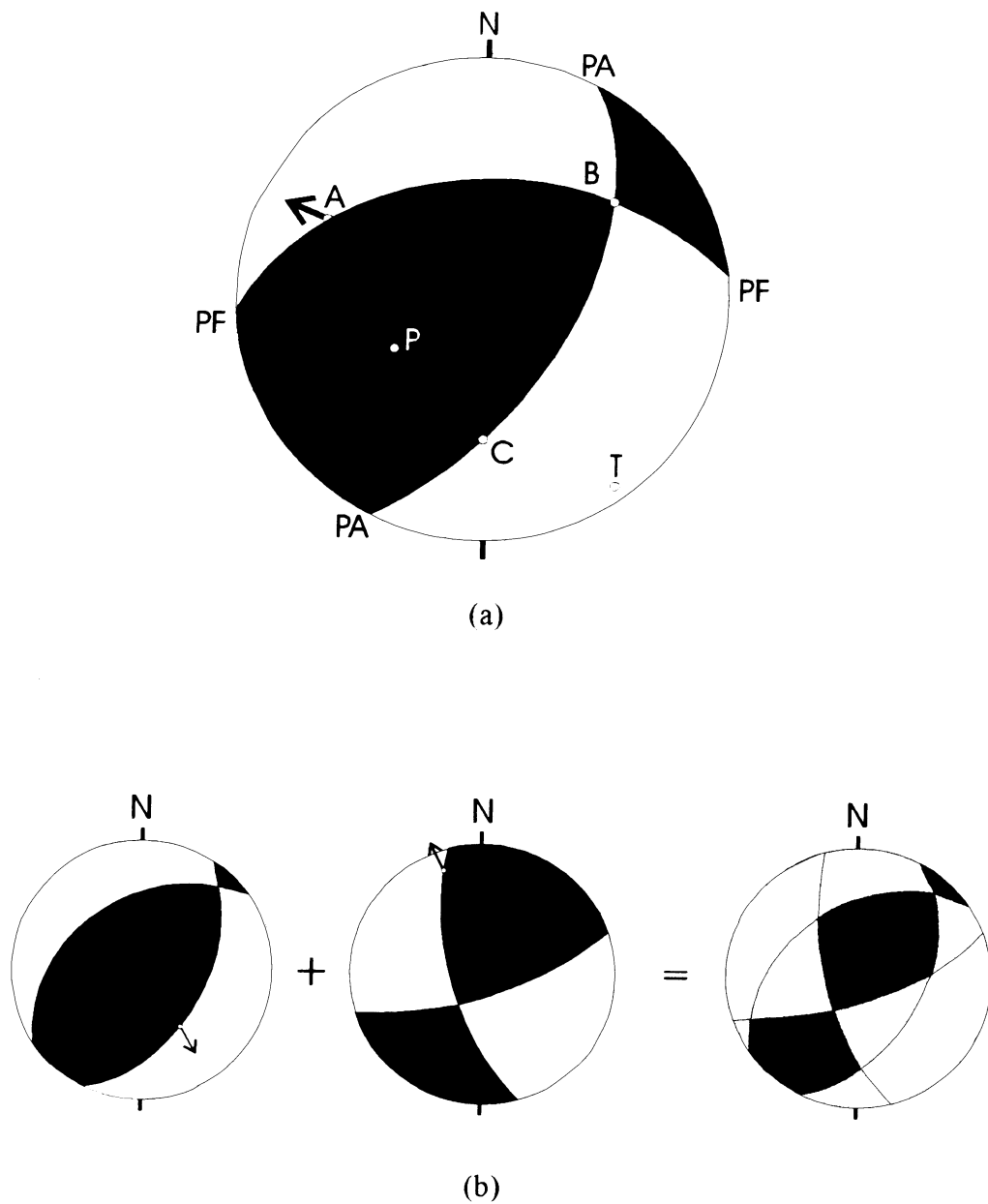


Figura 47 – Representação do método dos diedros retângulos de Angelier & Mechler (1977). Em (a) está representado o traçado do plano de fratura, do indicador cinemático e sentido de movimento, o plano auxiliar e os quatro setores equivalentes (as regiões de compressão são pintadas de preto e as de extensão de branco). Em (b) a superposição dos diagramas de várias medidas possibilita uma determinação estatística das localizações dos eixos de tensão.

A formação das fraturas, na medida em que esteja controlada pelo campo tensional imposto à crosta terrestre, também dependerá do regime tectônico. Assim, arranjos particulares de fraturas (extensão, cisalhamento simples, ou conjugado, híbridos) em

diferentes posições espaciais podem ser formados nos diferentes ambientes ou regimes tectônicos. Nessa situação, diversos arranjos e geometrias de fraturas podem ser registrados.

Hancock (1985) descreve uma série de análises que devem ser desenvolvidas visando à obtenção do campo paleotensional. Esse autor indica a utilização de indicadores cinemáticos e a interpretação de juntas (morfologia e estruturas associadas), pois muitas vezes essas estruturas consistem nas únicas feições capazes de serem analisadas. A interpretação da tipologia de juntas, se são fraturas de extensão, ou conjuntos conjugados de fraturas de cisalhamento, ou híbridas, pode ser feita por meio da integração das seguintes informações: características microscópicas; marcas superficiais; paralelismo, continuidade, ou simetria das fraturas aliadas a indicadores cinemáticos; refração de fraturas controladas pela litologia; geometria curvilinear; arquitetura do sistema de fraturas; ângulos diedros entre conjugados.

Um parâmetro interessante que pode ser utilizado para o estudo dos sistemas de fraturas corresponde à arquitetura desses sistemas, pois nem sempre é possível analisar indicadores cinemáticos, como quando se trabalha com a análise de lineamentos extraídos de produtos de sensoriamento remoto. Com relação a esse parâmetro Dunne & Hancock (1994), desenvolveram estudos sobre a morfologia dos sistemas de fraturas e compararam com letras do alfabeto Latim. Assim, dependendo da forma que o sistema de fraturas apresenta há a possibilidade de classificação do mesmo. Nesse caso as formas (Fig. 48):

- **K** correspondem a fraturas de extensão;
- **I** estão relacionadas com fraturas de extensão unidirecionais;
- **T** estão associadas a fraturas de extensão ortogonais;
- **H** estão relacionadas a fraturas cruzadas não sistemáticas, que podem ser geradas quando das fases finais de formação de juntas de extensão ortogonais;
- **V**, **Y**, ou **X** representam fraturas híbridas e de cisalhamento, sendo que a distinção entre essas estruturas é baseada no ângulo 2θ ;
- **A** são fraturas cruzadas relativamente regulares, não sistemáticas e superimpostas a juntas conjugadas mais antigas.

Conforme o exposto e analisando-se os métodos de prospecção, observa-se que um estudo detalhado da geologia estrutural não é realizado, ficando a análise estrutural voltada para o tratamento dos lineamentos (orientação, densidade, comprimento). Essa forma de tratar as estruturas é importante, mas é necessário que sejam desenvolvidos estudos mais

aprofundados sobre a tectônica rúptil de uma determinada área, para que com isso possamos conhecer os sistemas de fraturas.



Figura 48 – Padrões de traços de fraturas descritos por letras conforme Dunne & Hancock (1994).

5.3.1.2 – Evolução geomorfológica de zonas de fraturas

As zonas de fraturas são as principais estruturas deformacionais de interesse hidrogeológico. Essas zonas podem ter espessuras variáveis e serem compostas por fraturas e juntas verticais, ou inclinadas e são mais facilmente atacadas pelos processos intempéricos, uma vez que são zonas de alta permeabilidade secundária. Nessa situação, as zonas de fratura intemperizadas são facilmente erodidas e proporcionam a formação de linhas de drenagem retilíneas (Soares & Fiori, 1976). Essas linhas de drenagem podem ser interpretadas como traços de fratura quando identificados sobre faixas de concentração de fraturas (Fig. 49). Da mesma forma, esses traços podem ser bi a multidirecionais, pois o resultado do campo tensional aplicado sobre as rochas de uma região resulta na formação de fraturas em duas ou mais direções, conforme discutido no item anterior.

A relação existente entre zonas de fraturas e sistemas de drenagem é um fato de grande importância e muito utilizado para locação de poços, conforme o trabalho apresentado por Coriolano (2002) que descreve o método denominado de riacho-fenda, que está baseado nessa situação. Além disso essa relação está associada a tipologias de lineamentos, sendo um

exemplo as estruturas tipo 2 de Strieder & Amaro (1997) que, em geral, estão representadas por drenagens controladas por fraturas.

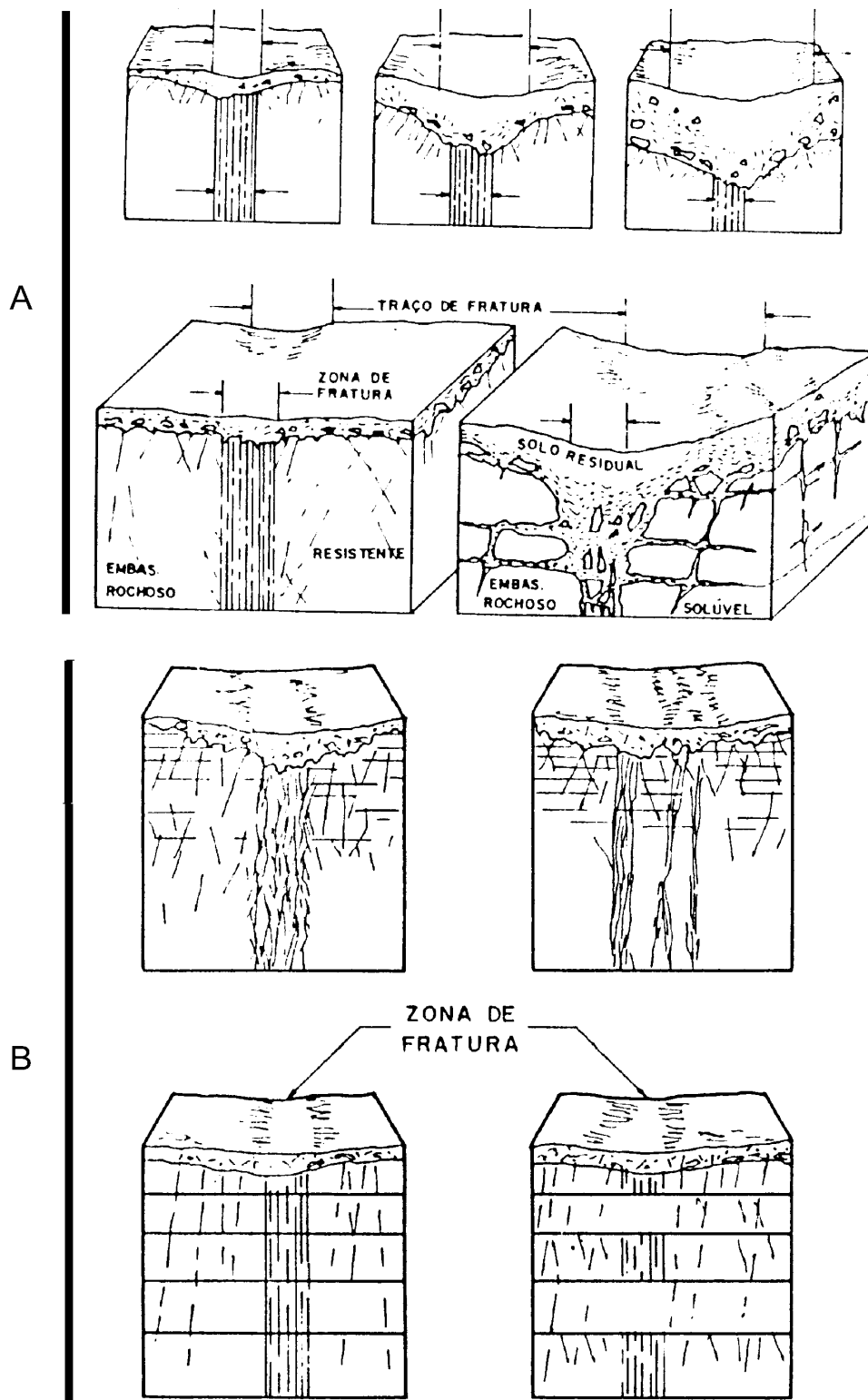


Figura 49 – Zonas de Fratura: (a) largas aparentes de zonas de fraturas identificadas por traços de fraturas impressos na superfície; (b) variações dos aspectos estruturais associados a zonas de fraturas (modificado de Schrader, 1992).

Schrader (1992) descreve que as zonas de fratura apresentam uma grande variabilidade que está relacionada com: número de estruturas presentes, extensão da zona e inclinação das fraturas. Essa variabilidade tem reflexo na morfologia externa das zonas, pois as mesmas consistem de locais preferenciais de alteração intempérica (Fig. 50).

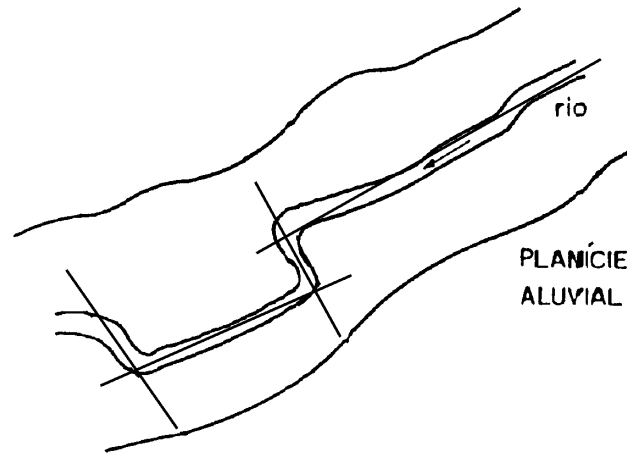


Figura 50 – Drenagens retilíneas desenvolvidas sobre zonas de fratura (Schrader, 1992).

A Formação Serra Geral é caracterizada por derrames de rochas vulcânicas que apresentam diferentes estruturas deformacionais (juntas, falhas e zonas de fraturas) e estruturas primárias geradas pelo fluxo e resfriamento da lava. Todas essas estruturas constituem locais preferenciais para a erosão e geram um relevo distinto e característico para a região.

A evolução geomorfológica das zonas de fratura nos derrames da Formação Serra Geral pode estar associada a formação de vales. Neste caso, é proposto um esquema dessa evolução (com base nas observações de campo), que está representado pela seqüência de seções da figura 51. A seção 1 mostra uma seqüência hipotética de derrames de lava que são cortados por uma zona de fratura. A água meteórica cai sobre a superfície, escoar e tende a infiltrar na zona de fratura, pois é o local de maior permeabilidade e susceptibilidade aos processos de erosão. Assim, há uma erosão descendente, principalmente basal, que proporciona a formação de um pequeno vale em “V”. À medida que o tempo geológico passa, os processos de erosão continuam agindo e há um aprofundamento maior do vale na parte basal do que na lateral. Além disso, são gerados movimentos de massa, responsáveis pela

formação de depósitos nas encostas e sopés das elevações, modificando assim a morfologia da região.

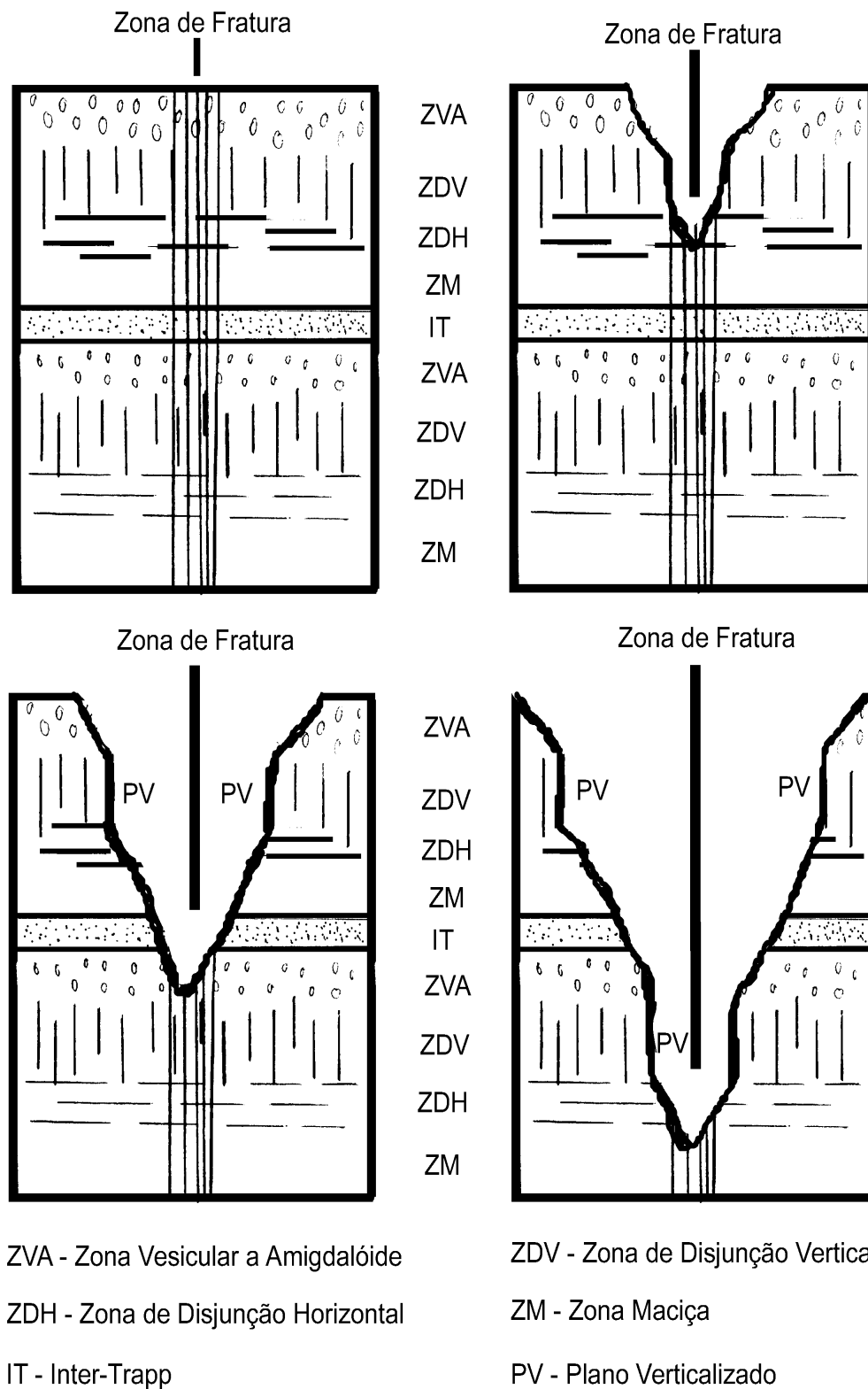


Figura 51 – Esquema evolutivo de zonas de fraturas numa seqüência de derrames vulcânicos da Formação Serra Geral.

As estruturas primárias têm um papel importante na evolução geomorfológica. Essas estruturas são, em geral, as feições típicas de um derrame de lavas conforme descrito por Leinz (1949) e consistem de zonas maciças pouco fraturadas, zonas de disjunção horizontal, zona de disjunção vertical e zona vesicular/amigdalóide. Os processos de erosão se desenvolvem sobre as zonas de fratura e, à medida que o corte erosional atinge as diferentes estruturas primárias, formam diferentes morfologias de escarpa, pois as estruturas primárias darão respostas diferenciadas. Assim, surge uma forma característica para a região, que são os vales escalonados, onde as zonas de disjunções tabulares dão origem a escarpas abruptas, verticalizadas, enquanto as zonas planares e maciças geram escarpas de pequena inclinação. Cabe salientar que o padrão retilíneo e a simetria de escarpas, em ambos os lados do vale, não é comum, pois as estruturas dos derrames de lavas não estão exatamente no mesmo nível topográfico e além disso, há a formação de colúvios provenientes dos movimentos de massa, que ao serem depositados, podem encobrir pequenos patamares.

Assim, a evolução geomorfológica gera diferentes tipos de estruturas lineares como as escarpas verticais e os alinhamentos de cristas, mas as feições estruturais de conotação tectônica encontram-se localizadas no vale, pois correspondem às zonas de fraturas.

As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, possuem, então, estruturas lineares que podem ser identificadas em fotografias aéreas e em imagens de sensoriamento remoto. Essas estruturas, em geral, são caracterizadas como lineamentos que possuem conotação genética variada. Assim, os lineamentos estão associados a feições topográficas negativas, e são caracterizados, principalmente, por vales fluviais e linhas de drenagem retilínea. Dessa forma, as outras estruturas lineares geradas quando do processo de evolução geomorfológica, como cristas e alinhamentos de escarpas, não constituem estruturas tectônicas e não possuem relação com os aquíferos fraturados.

Os lineamentos da Formação Serra Geral, em função da evolução geomorfológica, imprimem feições lineares características no relevo, o que, em parte, é observado pela análise da rede de drenagem. O padrão retangular dessas redes evidencia o forte controle estrutural que a região apresenta. Além disso, o traço dos lineamentos observado na superfície forma diferentes padrões, que podem ser descritos conforme proposição de Dunne & Hancock (1994). Esses padrões estão relacionados diretamente com o campo tensional imposto a essas rochas e que originou os lineamentos.

5.3.1.3 - Conceituação de lineamentos

As estruturas lineares analisadas nos diferentes métodos de prospecção são genericamente caracterizadas como lineamentos segundo uma definição variada:

- Takahashi *et al.* (1993) faz uma distinção entre morfoestrutura e litoestrutura, sendo que, na interpretação dessas estruturas em produtos de sensoriamento remoto, os critérios adotados foram: elementos topográficos retilíneos como linhas ou segmentos de escarpas, alinhamentos de cristas, vales, trechos de rios e depressões alongadas;
- Eilers (1993) considera lineamento como uma feição mapeável, simples ou composta, contínua ou descontínua cujas partes estão alinhadas em um arranjo retilíneo ou suavemente curvo e que difere dos padrões adjacentes. Os critérios utilizados por esse autor para a extração de lineamentos em produtos de sensoriamento remoto foram os mesmos adotados por Takahashi *et al.* (1993);
- Mobus (1987) descreve lineamento como toda feição retilínea, ou curva, composta por elementos de drenagem e/ou relevo, que apresenta um comprimento igual, ou superior a 1 quilômetro.

Nos outros trabalhos, como os da MAGNA (1997) e Giardin (1997), não são feitas considerações sobre os tipos de estruturas lineares identificadas nos levantamentos de interpretação estrutural.

Percebe-se, nesses trabalhos, que a conceituação adotada para lineamentos envolve qualquer feição linear da superfície terrestre e nem sempre possui relação com zonas de fratura. Outro fato considerável é a definição prévia do comprimento dos lineamentos. A definição de comprimentos de lineamentos e sua relação com zonas mais favoráveis à presença de água subterrânea nem sempre é observada, pois muitos poços secos estão associados a lineamentos de grande extensão, enquanto poços com boa produtividade estão relacionados com estruturas de médio porte.

Conceitualmente, lineamento corresponde a uma feição linear mapeável da superfície terrestre, que pode ser simples, ou composta, alinhada de modo retilíneo, ou levemente encurvada. Além disso, essa feição difere distintamente dos padrões das feições adjacentes e, em geral, reflete fenômenos de sub-superfície (O'leary *et al.* 1976).

Os aquíferos fraturados são controlados por zonas de fratura. As zonas de fraturas são faixas de espessura variável, onde as rochas apresentam um grande número (alta densidade: fraturas/m) de rupturas planares e curvilineares não coesivas. Esses planos de ruptura são, então, estruturas que originam a porosidade secundária, importantíssima principalmente em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares de alto grau de cimentação (porosidade primária fechada). Nesse aspecto, portanto, a qualificação de segmentos de escarpas, alinhamento de cristas, depressões alongadas e alguns segmentos de rios/drenagens, nem sempre estão relacionados com zonas de fratura. Tais feições são mais frequentemente relacionadas com estruturas geológicas penetrativas, de caráter coesivo, sem condições de controlar aquíferos fraturados.

Strieder & Amaro (1997) descrevem os lineamentos como uma expressão topográfica, na superfície do terreno, de estruturas tridimensionais presentes na crosta terrestre. Esses lineamentos podem ser considerados como altos (lineamentos positivos), ou baixos topográficos (lineamentos negativos). Os lineamentos também podem ser marcados por bandamento tonal em imagens pancromáticas, ou em algumas imagens coloridas derivadas da combinação RGB de bandas espectrais; o bandamento tonal deriva da justaposição de litologias com distintos padrões de reflectância. Strieder & Amaro (1997) enfatizam que existem diferentes tipos de lineamentos, pois falhas e juntas produzem arranjos diferentes daqueles desenvolvidos por estratos dobrados e cavalgados, gerando, assim, padrões morfológicos distintos. Dessa forma, Strieder & Amaro (1997) distinguem dois tipos principais de lineamentos:

⇒ **Tipo 1:** estão associados a estruturas regionalmente penetrativas, que representam a erosão diferencial de feições estruturais coesivas associadas ao tipo de litologia. Podem ser considerados como lineamentos compostos, pois são caracterizados por um bandamento tonal relacionado à componente litológica. Em pequena escala, esses lineamentos tendem a modelar formas estruturais, como dobras e/ou zonas de cisalhamento, e podem ser designados como lineamentos de forma estrutural;

⇒ **Tipo 2:** estão associados a estruturas rúpteis e são expressos por feições geomorfológicas negativas, que em geral truncam os limites litológicos (caso das falhas, ou das juntas). Em geral, esses lineamentos são retilíneos e estão representados principalmente por drenagens controladas por fraturas, que possuem distribuição espacial, orientação azimutal e comprimento bem definidos. Além disso, esse tipo de lineamento caracteriza estruturas

disjuntivas com padrões específicos, de acordo com o mecanismo deformacional que lhe deu origem.

A conceituação de lineamento é de fundamental importância, portanto, para a prospecção de aquíferos fraturados, visto que os aquíferos na Formação Serra Geral estão condicionados pelas estruturas geológicas. Assim, faz-se necessário efetuar uma distinção bem clara entre as estruturas lineares observadas na área selecionada para estudo.

5.3.1.4 - Extração de lineamentos

Outro ponto a ser observado nos métodos de prospecção de aquíferos fraturados é a forma de extração de lineamentos. Conforme apresentado na tabela X, a fonte para obtenção das morfoestruturas consiste em imagens de satélite, imagens de radar e fotografias aéreas.

No caso de imagens de satélites, a visualização dos lineamentos é feita por meio de técnicas de tratamento digital (geração de composição colorida, filtragens direcionais, entre outras). Sobre as imagens tratadas são, então, demarcadas as feições lineares que constituirão o mapa de lineamentos. Eilers (1993), por exemplo utilizou uma imagem LANDSAT MSS Banda 7 e uma imagem composição colorida bandas 4R, 5G, 7B, em escala 1:500.000.

As imagens de radar são amplamente utilizadas em pesquisa geológica, em função das informações sobre o relevo que as mesmas apresentam. Takahashi (1991), Eilers (1993) e Mobus (1987) utilizaram as imagens de radar para a obtenção de lineamentos. No entanto, Eilers (1993) comenta que a identificação de lineamentos é influenciada por fatores como: especificações técnicas do sistema sensor, condições da superfície imageada e qualidade da imagem. Além disso, devem ser levados em conta, no processo de análise de lineamentos, os seguintes aspectos:

- **sombreamento diferenciado:** acentua as feições topográficas mais próximas da antena, o que resulta numa falsa diferenciação de padrões morfológicos;
- **tonalidades:** em imagens de radar, as tonalidades correspondem a oito tons de cinza, que são reflexos do efeito da rugosidade do terreno e da constante dielétrica dos materiais. Assim, a análise dessas tonalidades deve ser efetuada com enfoque diferente do que aquele utilizado na fotointerpretação de fotografias aéreas e imagens de satélite;

- diferenciação do realçamento: feições lineares dispostas perpendicularmente à linha de vô não são realçadas. Da mesma forma, lineamentos com orientação paralela ao sentido de vô são mal caracterizados em função do processo de montagem dos mosaicos.

No caso das fotografias aéreas, o processo de identificação dos lineamentos ocorre por meio da fotointerpretação de estereopares. Takahashi (1991) e Mobus (1987) utilizaram as aerofotos como ferramenta de apoio para complementação de seus mapas de lineamentos. Por outro lado, todo o processo de análise de lineamentos desenvolvido pela CORSAN (Giardin, 1997) é efetuado sobre fotografias aéreas em diferentes escalas (1:110.000 e 1:60.000).

Para ambas as fontes (imagens de satélite, imagens de radar e fotografias aéreas), os lineamentos são analisados, identificados e traçados sobre a imagem ou sobre um *overlay* transparente. O material resultante (imagem ou *overlay* com os lineamentos) é utilizado para a elaboração do mapa de lineamentos. Deve-se salientar que o processo é, a princípio, simples e depende principalmente do conhecimento e da experiência do profissional que executa a tarefa.

Além da experiência do profissional, no entanto, deve-se observar detalhadamente a qualificação de lineamentos utilizada em relação a fonte de extração.

Cada fonte de informação (imagens de satélite, radar ou fotografias aéreas) fornecerá feições lineares de distintas características texturais e tonais. A mesma observação vale para o caso de imagens derivadas da manipulação de dados digitais. Nesse sentido, muito controle deve ser tomado ao se compor um mapa de lineamentos extraídos de diferentes fontes, ou de diferentes manipulações de dados digitais. A questão principal a ser seriamente considerada pelo profissional (observador) é: em que medida os lineamentos extraídos das diferentes fontes e os lineamentos representados por diferentes feições morfológicas texturais e tonais podem ser considerados zonas de fratura? A resposta a essa questão exige necessariamente uma qualificação mais apurada do que sejam lineamentos realmente associados com zonas de fratura.

Outro aspecto, deve ser salientado: a delimitação e o traçado de lineamentos não deve ser inferido, ou seja, não se deve unir uma seqüência de lineamentos de mesma direção, quando essa direção não é contínua. A inferência no traçado de estruturas, apesar de não referida explicitamente, tem sido muito utilizada em todas as áreas da geologia, mas deveria

ser descartada em função que, o prolongamento dos lineamentos, principalmente para o caso de zonas de fratura, provavelmente não deverá corresponder à continuidade das estruturas geológicas que ocorrem numa determinada área.

5.3.1.5 - Tratamento estatístico dos lineamentos

O tratamento estatístico dos lineamentos, conforme aplicado para aquíferos fraturados por Eilers (1993), Takahashi (1991) e Mobus (1987), tem sido realizado por meio de técnicas denominadas de superfície de tendência. A descrição do método está detalhada nos trabalhos de Takahashi (1991) e Takahashi *et al.* (1993). Takahashi (1991) efetuou a análise de lineamentos com o objetivo de determinar a densidade e a orientação dos mesmos; para tanto, definiu uma superfície de tendência por meio da equação linear:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2$$

Onde, (x_1, x_2) são as coordenadas que definem a posição de um ponto no terreno; Y é a variável associada a esse ponto (por exemplo, densidade de lineamentos); b_0, b_1, b_2 são os coeficientes estimados a partir de amostras.

A avaliação dos resultados é efetuada com base em métodos estatísticos (coeficiente de determinação, análise dos resíduos, etc...), pois os mesmos permitem determinar o grau de ajuste entre a superfície obtida e os dados observados. Takahashi (1991) comenta que a aplicação do método dos mínimos quadrados permite a estimação dos coeficientes de regressão múltipla que podem ser utilizados para definir mais adequadamente a superfície que melhor se ajusta ao conjunto de pontos observados. Assim, estar-se-ia estimando coeficientes para cada superfície de grau desejada, pois a mesma pode ser expandida para uma superfície de grau qualquer. Takahashi (1991) enfatiza que no tratamento de dados característicos de uma distribuição aleatória, o ajuste melhora na medida em que o grau de polinômio aumenta. No entanto, não se aconselha expandir o polinômio além do sexto grau em função da complicação de cálculos matemáticos que é gerada e do aumento de tempo de processamento.

Segundo Takahashi (1991), com essa técnica de tratamento estatístico, os dados estruturais podem ser descritos como compostos por duas componentes:

→ uma fornecida pela superfície de tendência (componente regional); e

→ outra obtida pelas discrepâncias entre o valor observado e o fornecido pela superfície de tendência (variações locais, ou anomalias).

As componentes podem apresentar valores distintos que dependem do modelo (equação) empregado no cálculo da superfície de tendência. Assim, é aconselhável que sejam efetuadas testes com o emprego de diferentes modelos (equações) e sejam observados os diferentes resultados.

Takahashi *et al.* (1993) apresentam o resultado dessa técnica. A extração de lineamentos foi efetuada em imagens de radar e eles foram delimitados em uma carta topográfica. Essa carta topográfica foi discretizada em células regulares com média de 18 km². Para cada célula, foi calculada a densidade de lineamentos por meio da equação:

$$DL = \frac{\sum L}{A}$$

Onde, DL é a densidade de lineamentos; $\sum L$ é o somatório do comprimento dos lineamentos na célula; e A é a área total da célula.

Takahashi *et al.* (1993) efetuaram uma normalização dos valores de DL, visando a adequação dos valores numéricos pela fórmula:

$$DL^* = \frac{DL - DL_{Min}}{DL_{Máx} - DL_{Min}}$$

Onde, (DL_{Min} , DL_{Máx}) são valores mínimos e máximos, respectivamente, que ocorrem nos conjuntos de células.

Os valores de DL* são associados às posições geográficas (x₁ , y₁) e definidos para o centro da célula. A densidade de lineamentos foi usada posteriormente como planos de informações (Fig. 52).

Takahashi *et al* (1993) utilizaram o mesmo procedimento para obtenção de um plano de informações sobre a orientação de lineamentos. Como no caso abordado, a tendência geral da orientação dos lineamentos era entre os azimutes 90° e 180°, e a superfície de tendência gerada foi para esse intervalo. O resultado se encontra na figura 53.

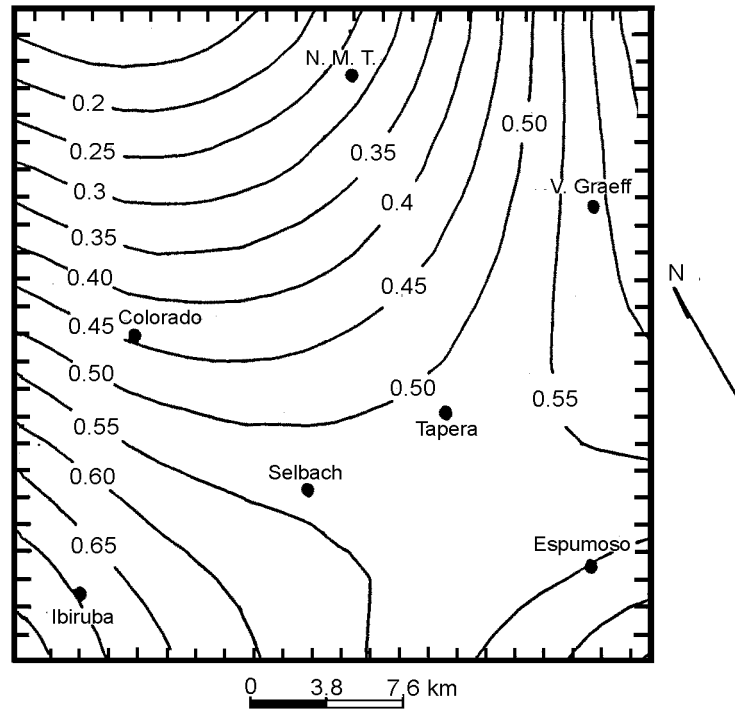


Figura 52 - Mapa com as superfícies de tendência de terceiro grau calculadas para a densidade de lineamentos (Takahashi *et al.*, 1993).

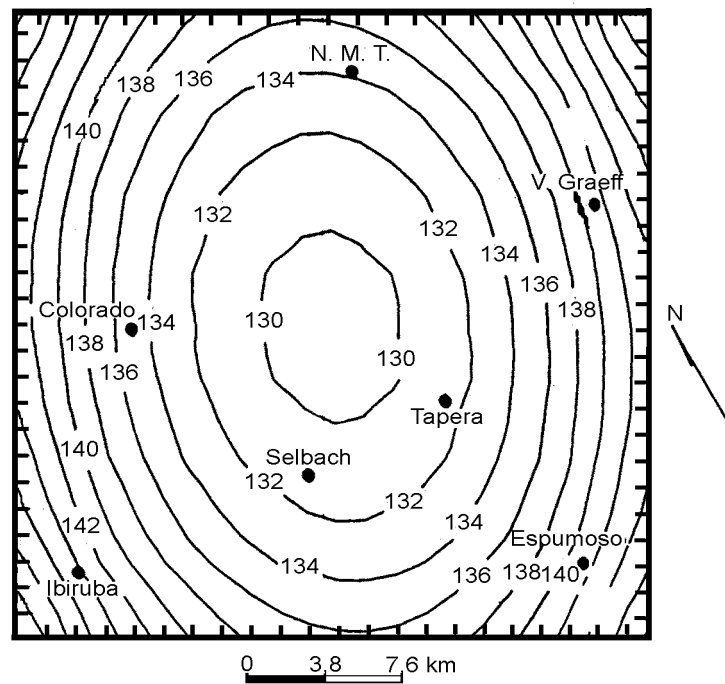


Figura 53 - Mapa com as superfícies de tendência calculadas para a orientação dos lineamentos (Takahashi *et al.*, 1993)

A técnica de superfície de tendência empregada na análise de dados estruturais é questionável em função dos seguintes pontos:

- natureza dos dados: os lineamentos são dados vetoriais e não escalares;
- definição do espaçamento da malha e das celas de áreas equivalentes: a variação do espaçamento da malha regular e da área de cada célula resulta na obtenção de valores diferenciados. Como não existem critérios para se definir o espaçamento e o tamanho de células, esse método fica prejudicado;
- utilização da estatística escalar: a média e o desvio padrão não representam valores significativos, pois essas duas grandezas são obtidas considerando-se uma distribuição disposta de forma linear. Os vetores têm uma distribuição circular (azimute), onde a origem e o ponto final estão relacionados.

Cunha (1996) considera os lineamentos como grandezas vetoriais, pois essas estruturas possuem uma orientação no espaço geográfico. Em imagens 2D (sensores remotos orbitais, radares, fotografias aéreas, por exemplo), os lineamentos podem ser representados por dois valores:

→ o primeiro corresponde ao azimute (ou rumo) e representa o lineamento no plano horizontal;

→ o segundo valor representa o comprimento do lineamento (magnitude).

Observa-se, então, que o tratamento dos lineamentos deve ser efetuado por meio de técnicas de estatística vetorial em função da natureza dos dados. Além disso, o processo de tratamento, pode levar em consideração: 1) a região como um todo, ou domínios separados segundo critérios estruturais; 2) a tipologia dos lineamentos (tipo 1 e tipo 2); 3) o padrão geométrico associado aos tipos de lineamentos.

A análise dos lineamentos por meio da estatística vetorial permite determinar parâmetros estruturais quantitativos como: orientações preferenciais, comprimento de lineamentos, dispersão angular, entre outros fatores. Por meio dessa técnica, os lineamentos tipo 2 são tratados como vetores que possuem uma orientação espacial (azimute geográfico) e uma magnitude (comprimento), parâmetros básicos para a representação bidimensional dessas feições.

A metodologia empregada para o tratamento de lineamentos obtidos de produtos de sensoriamento remoto é descrita por Cunha (1996) e segue os seguintes passos:

- decomposição de vetores: são geradas duas componentes, uma norte-sul e outra leste-oeste, para cada vetor, por meio da multiplicação do comprimento (C) do vetor pelo cosseno e pelo seno do ângulo $2\theta_i$ respectivamente (Fig. 54).

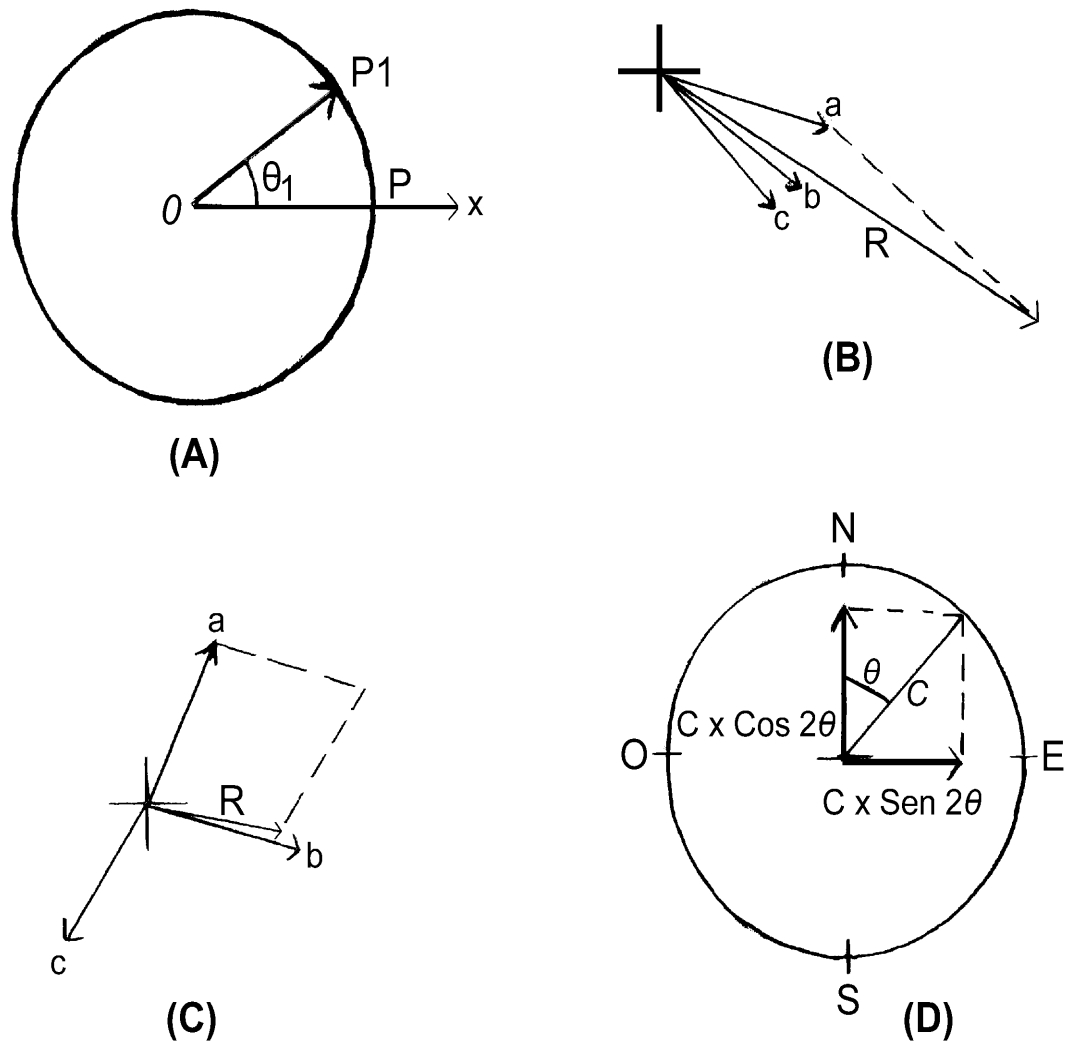


Figura 54 - Análise de Vetores: (A) Representação de um ângulo θ formado pelo vetor unitário OP e pelo vetor $OP1$; (B) Demonstração gráfica da magnitude de um vetor, onde vetores com direções próximas geram um vetor resultante longo; (C) Demonstração gráfica da magnitude de um vetor onde vetores com direções diferentes geram um vetor resultante menor; (D) decomposição de um vetor segundo o sistema geográfico (Cunha 1996).

- cálculo do vetor resultante: soma-se as componentes de todos os vetores:

$$\text{componente N-S} = \sum c \cdot \cos 2\theta_i$$

$$\text{componente E-W} = \sum c \cdot \text{sen } 2\varnothing_i$$

- cálculo do azimute médio do vetor resultante: obtido pelo arco tangente da divisão entre a componente E - W pela componente N - S do vetor resultante, mais um valor q (ângulo responsável pela adaptação das propriedades geométricas de cada quadrante à representação segundo azimutes geográficos – Tab. XII):

$$\varnothing_m = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{(\sum c \cdot \text{sen } 2\varnothing_i)}{(\sum c \cdot \text{cos } 2\varnothing_i)} + q$$

- cálculo da magnitude do vetor resultante: é obtida pela seguinte fórmula:

$$R = [(\sum c \cdot \text{cos } 2\varnothing_i)^2 + (\sum c \cdot \text{sen } 2\varnothing_i)^2]^{1/2}$$

Essa magnitude é transformada em porcentagem (intervalo de 0 a 100%) por meio da utilização da seguinte fórmula:

$$S_v = R / (\sum c) \quad 0 < S_v < 1$$

onde S_v varia entre 0 e 1 e indica o grau de dispersão dos dados; valores altos indicam pequena dispersão, enquanto valores baixos representam alta dispersão. Essa medida de dispersão é designada de significância do vetor (S_v) e constitui-se numa sensível medida de dispersão, comparável ao desvio padrão, ou a variância.

Tabela XII – Propriedades geométricas dos quadrantes e valores correspondentes de “q” que devem ser considerados no cálculo do azimute médio (\varnothing_m) de dados bidimensionais.

	Quadrante 1	Quadrante 2	Quadrante 3	Quadrante 4
Sen	Positivo	Positivo	Negativo	Negativo
Cos	Positivo	Negativo	Negativo	Positivo
Q	zero	90°	90°	180°

- cálculo do comprimento médio (C_m): obtido pela divisão de R pelo número de amostras analisadas:

$$C_m = R / n$$

Efetuada esses cálculos, pode-se interpretar a direção do vetor resultante como sendo uma medida de tendência central da distribuição, enquanto a significância do vetor é considerada uma medida de dispersão. A análise estatística vetorial dos lineamentos é mais adequada, pois leva em conta que os lineamentos possuem uma distribuição circular (a origem e ponto final são os mesmos) e mostram variação nos valores obtidos para média e desvio padrão, conforme a escolha do ponto que represente a origem da distribuição.

A análise estatística deve ser realizada para uma região como um todo ou para domínios separados por critérios estruturais. No caso dos domínios, essa separação é feita por meio de análise de um histograma circular de frequência onde podem ser observadas as principais famílias de lineamentos existentes numa determinada região.

5.3.2 - Dados geológicos e hidrogeológicos

Outros dados devem ser utilizados pelos métodos de prospecção de aquíferos fraturados e é de suma importância que sejam estudados, pois a existência de aquíferos em meio fraturado não depende exclusivamente das estruturas deformacionais existentes. Assim, os dados geológicos (litologias, estruturação dos derrames, padrões de drenagem), geomorfológicos (compartimentação do relevo, modelos digitais de elevação), pedológicos (tipologia e espessura dos solos) e hidrogeológicos (dados referentes a poços tubulares: vazão, capacidade específica, análises químicas, etc.) devem ser utilizados, pois também se constituem em fatores condicionantes dos aquíferos fraturados. Isso é evidenciado, por exemplo, na análise dos métodos desenvolvidos por Takahashi (1991) e Eilers (1993), que utilizaram muitos desses dados para o desenvolvimento de estudos de prospecção de água subterrânea em meio fraturado.

Os dados geológicos, como tipos litológicos e estruturação primária associada, possui uma importância grande, pois se analisarmos os derrames de rochas vulcânicas, veremos que existem diferentes tipos de rochas que podem estar associadas a diferentes tipos de estruturas primárias. Essas estruturas podem estar conectadas com sistemas de fraturas, influenciando no fluxo da água subterrânea. Além disso, as litologias possuem relação com a composição química das águas subterrâneas.

Por outro lado, a análise do sistema de drenagem permite identificar padrões que são resultado, por exemplo, de um controle estrutural, auxiliando com isso, na compreensão do sistema de fraturas existentes na área. Além disso, se levarmos em conta que os lineamentos do tipo 2, que são estruturas rúpteis, representados em geral por drenagens controladas por fraturas, o estudo das mesmas tornará mais fácil a identificação dessas estruturas.

As informações geomorfológicas como o estudo da estruturação do relevo e sua divisão, em classes de declividade permite que sejam identificadas áreas com morfologias distintas. Essas áreas tem importância com relação a recarga e descarga, tendo reflexo direto na quantidade de água disponível no aquífero fraturado.

Os dados referentes a pedologia como tipos de solos e espessura também apresentam relação com os aquíferos fraturados. Dependendo do tipo de solo haverá condições diferentes de infiltração e escoamento, tendo reflexo direto na circulação da água e recarga. Além disso, as espessuras de solos apresentam relação direta com a química da água subterrânea, principalmente, aquela localizada no manto de alteração. Essa relação foi evidenciada no trabalho de Mobus (1987).

Por fim, as informações hidrogeológicas obtidas de poços existentes na região também possuem grande importância, pois fornecem subsídios para compreensão da dinâmica dos aquíferos e da relação com os sistemas de fraturas e outros planos de informações.

6 – MÉTODO DE PROSPECÇÃO PROPOSTO PARA A ÁREA DE ESTUDO

A análise dos diversos métodos de pesquisa hidrogeológica utilizados para os aquíferos fraturados da Formação Serra Geral torna claro que os dados de geologia estrutural são de grande importância e necessitam de um tratamento especial. Esses dados devem estar relacionados com o estudo da tectônica rúptil da região, visando à compreensão dos sistemas de fraturas existentes. Além disso, outras informações devem ser integradas para a prospecção dos aquíferos fraturados, como dados geológicos, geomorfológicos, pedológicos e hidrogeológicos. Dessa forma, torna-se necessária a elaboração de um modelo conceitual para a prospecção dos aquíferos fraturados.

Segundo Reginato & Strieder (1999), o modelo conceitual deverá abordar os fatores condicionantes dos aquíferos fraturados, como: padrão estrutural da região, a morfologia (relevo), a litologia (tipo de rocha e estruturação do derrame), o solo (tipologia) e a hidrogeologia. Assim, utilizando-se esse modelo conceitual e promovendo-se a integração dos fatores condicionantes em Sistemas de Informações Georeferenciados (SIGs), será possível compreender melhor a estruturação dos aquíferos fraturados da Formação Serra Geral.

O método de prospecção proposto para a área está baseado no estudo dos fatores condicionantes dos aquíferos fraturados. Cada um desses fatores é considerado como um plano de informação, que será utilizado nos processos de integração de dados. O que difere o método proposto dos demais é o aprofundamento dos estudos de geologia estrutural, visando uma melhor compreensão do condicionante principal, e a forma da integração dos dados (por meio de SIG), o que facilita uma melhor visualização dos diferentes planos de informações e, conseqüentemente, uma melhor análise.

No caso dos estudos de geologia estrutural, a ênfase é voltada para a caracterização e geometria dos sistemas e zonas de fraturas, no sentido de identificar zonas com maior, ou com menor potencial de acúmulo de água. Para isso, foi necessário efetuar levantamento de dados de campo (realização de perfis para coleta de dados estruturais) e extração de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto.

6.1 – Fator padrão estrutural

Na pesquisa hidrogeológica de aquíferos fraturados, a análise estrutural da região é de fundamental importância e as estruturas de maior interesse consistem de feições estruturais geradas quando do fraturamento das rochas. O estudo desse fator foi realizado com base na análise de estruturas provenientes de levantamentos de campo e da interpretação de lineamentos extraídos de fotografias aéreas.

6.1.1 – Geologia estrutural – dados de campo

As zonas de fraturas existentes na região são caracterizadas por conjuntos de lineamentos do tipo 2. Esses lineamentos estão associados à rede de drenagem e às estruturas morfológicas da região. A caracterização dessas zonas, em campo, foi realizada com base no estudo de estruturas existentes em afloramentos (pedreiras e cortes de estrada, principalmente). Os aspectos observados nesses levantamentos foram:

- tipologia de estruturas existentes: como as rochas vulcânicas da região possuem estruturas primárias representadas por juntas de resfriamento (diaclasses horizontais e verticais, por exemplo) e estruturas tectônicas (fraturas e zonas de fraturas), foi necessário efetuar a separação dessas diferentes feições. Para tanto, o critério adotado foi a estruturação geral do derrame; toda a feição discordante foi analisada em detalhe. Nesse caso, foi observada a continuidade e a repetição da estrutura, a existência ou não de preenchimento e a presença de indicadores cinemáticos, como estrias de deslizamento, além de obter a orientação dessas fraturas;
- presença de veios e diques: foi efetuado levantamento da geometria dos sistemas de veios e diques, identificação do tipo de preenchimento e obtenção das principais orientações;
- zonas de fratura: foram identificadas zonas de fratura existentes nas rochas vulcânicas da região. Em cada uma delas, foi efetuado levantamento de dados referentes a presença ou não de preenchimento, orientação principal, dimensão, número de planos existentes em cada uma delas e presença de indicadores cinemáticos.

Para essa caracterização foram realizados quatro perfis, denominados de Caxias do Sul - São Marcos; Caxias do Sul - Antônio Prado; Farroupilha - Nova Pádua; Bento Gonçalves -

Veranópolis, que abrangeram as regiões ao sul e ao norte do Rio das Antas (drenagem de maior porte da região, que divide área em dois blocos).

6.1.1.1 – Análise geométrica

A caracterização das fraturas e zonas de fraturas foi realizada com base nos dados de campo e descrita por meio da análise geométrica das estruturas de cada um dos quatro perfis.

⇒ Perfil Caxias do Sul - São Marcos. Nesse perfil, foram investigadas duas pedreiras (Guerra e Codeca) na região de Caxias do Sul e 18 afloramentos do tipo corte de estrada ao longo da BR116 (estrada que liga Caxias do Sul a Vacaria, passando por São Marcos). Esse perfil foi dividido em dois setores principais, denominados de São Marcos (ao norte) e Caxias do Sul (ao sul), tendo o eixo do Rio das Antas como limite.

As estruturas identificadas no setor São Marcos estão representadas por fraturas e zonas de fraturas verticais a sub-verticais. Foram identificados 23 planos de fraturas cuja orientação preferencial foi de N70 – 80E e, secundariamente, N20 – 30W (Fig. 55). Além disso, foram identificados conjugados de planos de fraturas de espessura milimétrica, de orientação NW (N10 – 20W e N50 - 70W), formando um ângulo aproximado de 45 - 50 entre eles (Fig. 56).

As fraturas com preenchimento estão seladas com sílica (na forma de quartzo microcristalino e calcedônia). Nesse setor a orientação dos planos preenchidos por zeolitas foi, preferencialmente, N00 - 010E, tendo como orientações secundárias N70 - 80W e N00 - 20W (Fig. 57). Os planos preenchidos por sílica apresentaram orientações semelhantes (Fig. 58), evidenciando um controle estrutural desses preenchimentos (embora haja um número pequeno de medidas).

As zonas de fraturas, em escala de afloramento do Setor São Marcos estão representadas por conjuntos de planos verticais a sub-verticais, com espaçamento centimétrico e com extensão aproximada de 2 metros. Boa parte desses planos apresentam-se preenchidos (N60 - 70E principalmente). A orientação geral dessas zonas é N50 - 90E e a direção preferencial é N70 - 80E (Fig. 59).

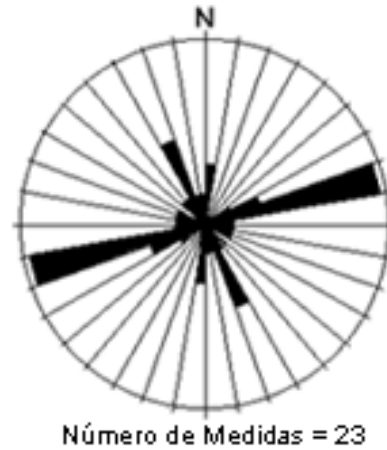


Figura 55 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fraturas do setor São Marcos.

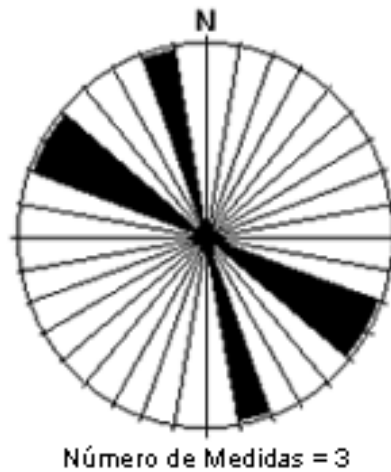


Figura 56 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de conjugados de fraturas do setor São Marcos.

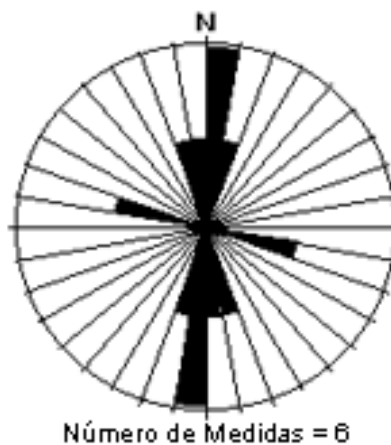


Figura 57 – Histograma de frequência circular das medidas de fraturas com preenchimento de zeolitas do setor São Marcos.

Os veios apresentam espessura milimétrica, estão preenchidos por zeolitas e sílica (quartzo e calcedônia) e possuem orientações diversas. Em alguns pontos, formam sistemas conjugados e ramificações, cuja orientação preferencial é N20 - 60W (Fig. 60). Alguns veios apresentam-se conectados a geodos de dimensões centimétricas a decimétricas; a direção desses veios é marcada pelo rumo N10E (Fig. 61 e 62).

No setor Caxias do Sul, as estruturas identificadas estão representadas por fraturas, zonas de fraturas, veios e diques. Foram efetuadas medidas em 20 planos de fraturas verticais a sub-verticais, cuja orientação principal é N70 - 80E e N20 - 30W (Fig. 63), direções semelhantes àquelas do setor São Marcos.

Os planos de fraturas que apresentavam preenchimento (zeolitas e sílica na forma de quartzo e calcedônia) possuem direção preferencial N70 - 80E, correspondente à orientação secundária do setor São Marcos (Fig. 64).

As zonas de fraturas no setor Caxias do Sul estão representadas por conjunto de planos (5 a 12 planos), com espaçamento decimétrico (20 a 50 cm) verticais a sub-verticais. Nesse setor, as zonas de fratura apresentam orientações diversas; mas direção preferencial é N00 - 10E (Fig. 65), diferente daquela encontrada no setor São Marcos (N70 - 80E).

Os veios e diques correspondem a planos preenchidos por diversos tipos de materiais, como: carbonatos, arenitos e sílica. Tais veios e diques estão dispostos em diversas direções e formam conjugados ou ramificações ortogonais (Fig. 66). A orientação dessas estruturas é para nordeste, mas variam no intervalo N20 - 70E (Fig. 67 e 68). Alguns diques apresentam-se preenchidos por brechas; nesses casos, a orientação preferencial é N14E (Fig. 69).

⇒ Perfil Caxias do Sul – Antônio Prado. Nesse perfil, foram analisados 13 afloramentos do tipo corte de estrada ao longo da rodovia que liga os municípios de Caxias do Sul, Flores da Cunha e Antônio Prado. Esse perfil não foi dividido em setores, pois a área ao norte do eixo do Rio das Antas é de pequena dimensão. Assim, os dados foram tratados em conjunto.

As principais estruturas analisadas nesse perfil estão representadas por fraturas e zonas de fraturas. Foram efetuadas medidas em 15 planos de fraturas verticais a sub-verticais; a orientação geral foi de N80 - 90E (Fig. 70). As fraturas preenchidas (em geral, zeolita e sílica) apresentam orientação principal de N00 - 10E, que é igual àquela encontrada no Setor São Marcos (Fig. 71).

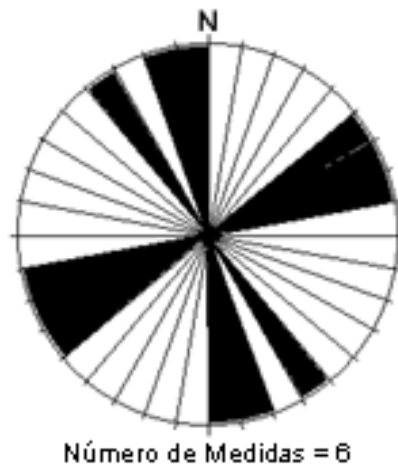


Figura 58 – Histograma de frequência circular das medidas de fraturas com preenchimento com sílica do setor São Marcos.

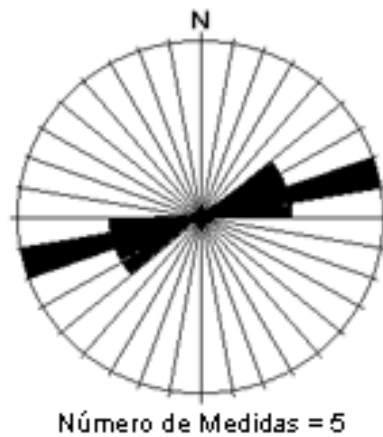


Figura 59 – Histograma de frequência circular das medidas das zonas de fraturas do setor São Marcos.

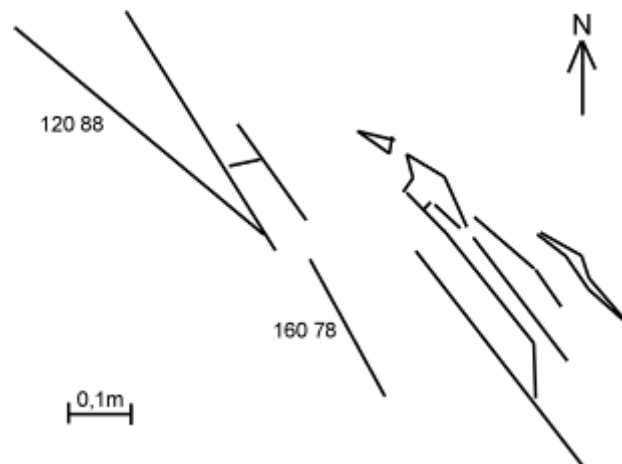


Figura 60 – Croqui com a geometria dos sistemas de veios encontrados no setor São Marcos (afloramento 3 - UTM490361mE e 6788183mN).



Figura 61 – Geodo e sistemas de veios conectados no setor São Marcos (afloramento 3 - UTM490361mE e 6788183mN).

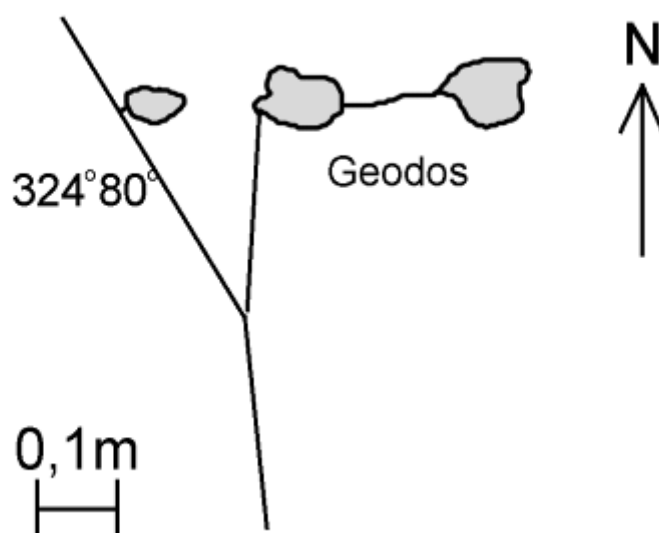


Figura 62 – Croqui com a geometria dos sistemas de veios encontrados no setor São Marcos (afloramento 3 - UTM490361mE e 6788183mN).

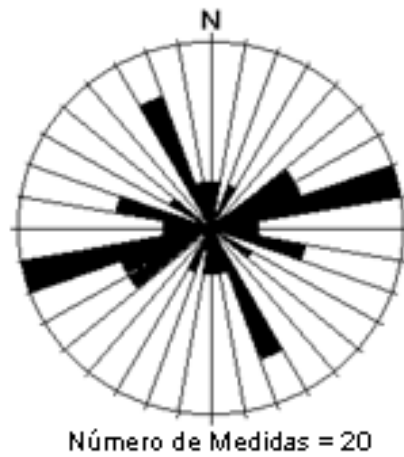


Figura 63 – Histograma de frequência circular das medidas de planos de fraturas do setor Caxias do Sul.

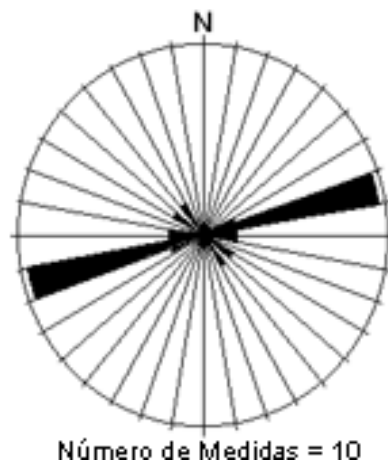


Figura 64 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos com preenchimento (zeolitas e sílica) do setor Caxias do Sul.

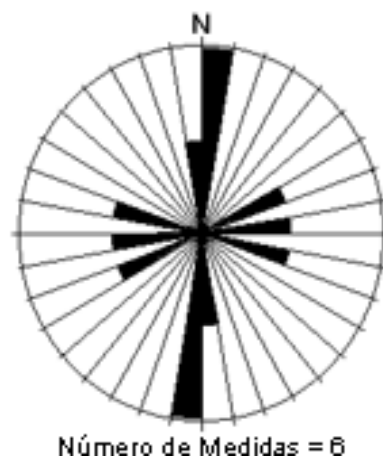


Figura 65 – Histograma de frequência circular das medidas das zonas de fraturas no setor Caxias do Sul.

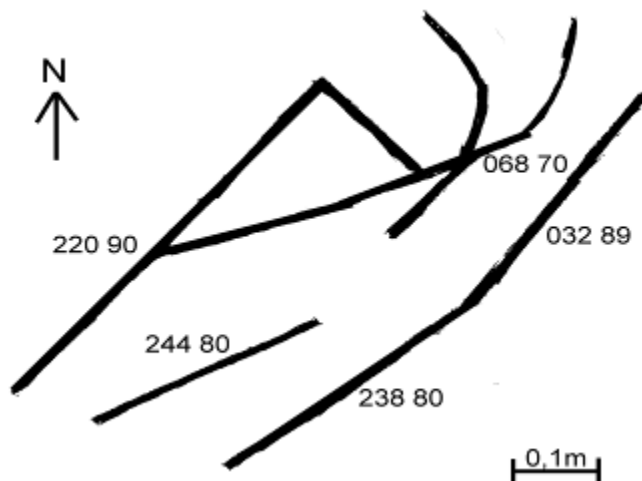


Figura 66 – Croqui com a geometria dos sistemas de veios e diques encontrados no Setor Caxias do Sul (afloramento Pedreira Guerra – UTM 479040mE e 6770126mN).

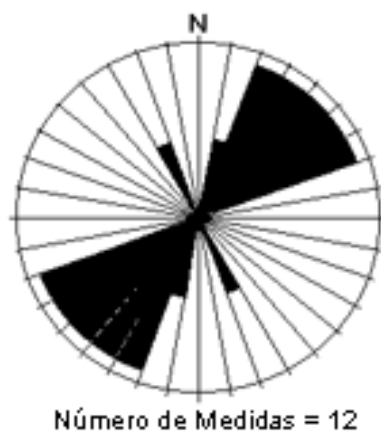


Figura 67 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos formados por diques no setor Caxias do Sul.

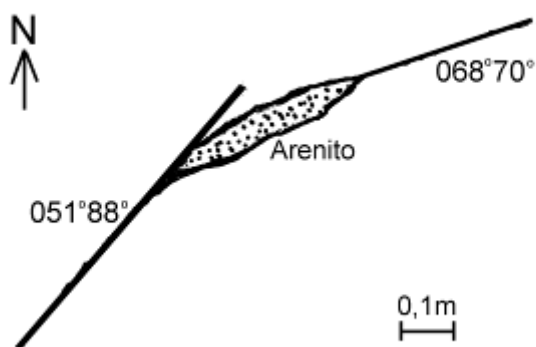


Figura 68 - Croqui com a geometria dos sistemas de veios e diques encontrados no Setor Caxias do Sul (afloramento Pedreira Guerra – UTM 478896mE e 6770124mN).

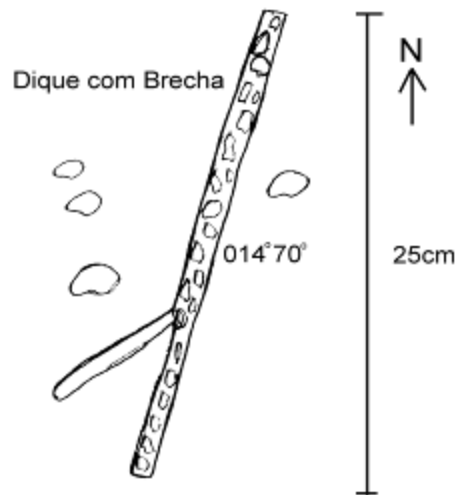


Figura 69 – Croqui dos diques com brecha (afloramento Pedreira Guerra – UTM 478896mE e 6770124mN).

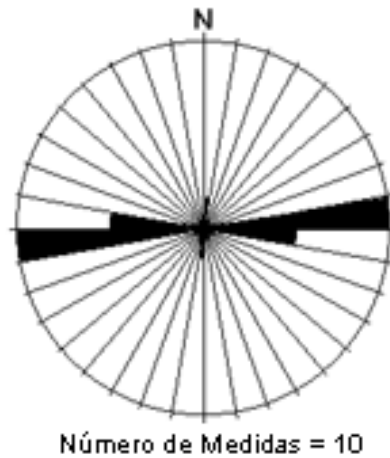


Figura 70 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fratura do setor Antônio Prado.

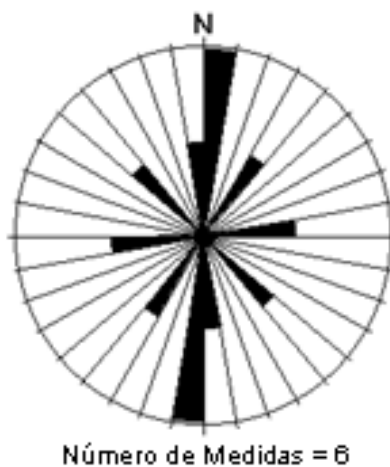


Figura 71 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fratura preenchidos (zeólita e sílica) do setor Antônio Prado.

As zonas de fraturas constituem-se nas feições estruturais mais características desse perfil. Elas são representadas por conjunto de fraturas com espaçamento entre 10 a 50 cm, de orientação N80 - 90E (Fig. 72), com extensões entre 2,0 a 5,0 metros (Fig. 73 e 74) e, em geral, fortemente alteradas. A zona de maior dimensão (Fig. 75) possui uma drenagem encaixada e limita dois blocos de rochas, representados por rochas vesiculares a amigdalóides (ao norte) e basaltos fraturados (ao sul).

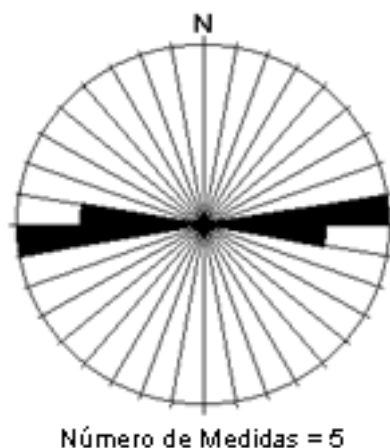


Figura 72 – Histograma de freqüência circular das medias das zonas de fraturas do setor Antônio Prado.

⇒ Perfil Farroupilha - Nova Roma: Nesse levantamento, foram observados 38 afloramentos representados por cortes de estrada e pedreiras, ao longo da rodovia (e arredores) que liga os municípios de Farroupilha a Nova Roma. Como no caso do perfil Caxias do Sul - São Marcos, foi realizada uma divisão da área com base no eixo do Rio das Antas, o que resultou em dois setores: Nova Roma e Farroupilha.

O setor de Nova Roma é caracterizado pela predominância de fraturas e zonas de fraturas verticais a sub-verticais. Para análise das fraturas, foram utilizadas 16 medidas, que estão orientadas no intervalo N60 - 90E. A direção principal tem rumo N70 - 80E (Fig. 76).

As fraturas com preenchimento também possuem zeolitas e sílica, e estão orientadas em direções semelhantes. No caso das estruturas preenchidas por zeolita, identificou-se uma orientação principal para N70 - 90E e uma secundária para N00 - 10E (Fig. 77). Os planos com preenchimento de sílica mostram uma orientação preferencial que é N80 - 90E (Fig. 78).



Figura 73 – Zona de Fratura no setor Antônio Prado (afloramento 5 – UTM 483093mE e 6797464mN).

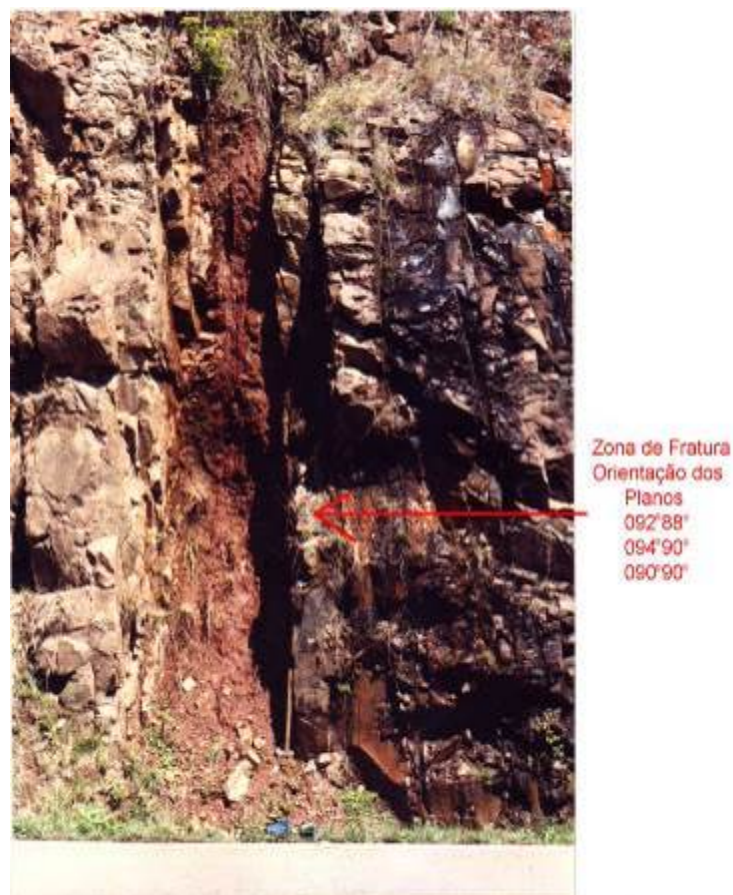


Figura 74 – Zona de fratura no setor Antônio Prado (afloramento 5 – UTM – 483160mE e 6797425mN)



Figura 75 – Terceira zona de fratura no setor Antônio Prado (afloramento 5 – UTM – 483215mE e 6797331mN).

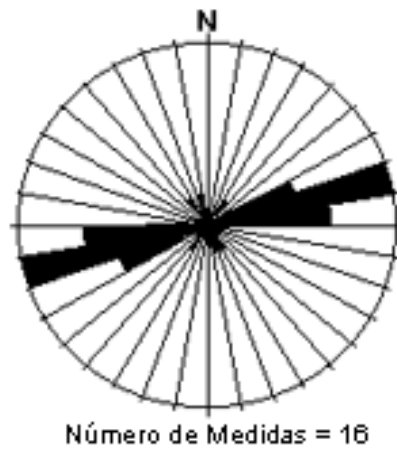


Figura 76 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fraturas do setor Nova Roma.

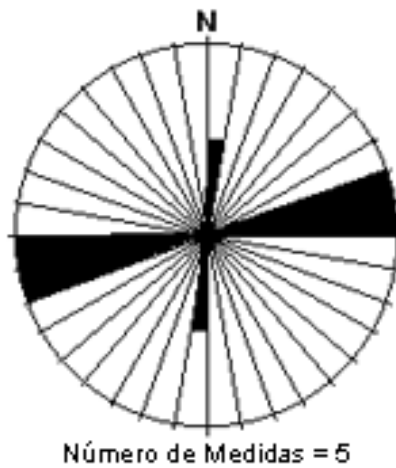


Figura 77 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fraturas preenchidos por zeolitas no setor Nova Roma.

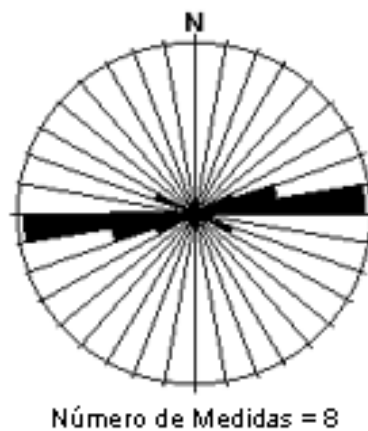


Figura 78 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fraturas preenchidos por sílica no setor Nova Roma.

As zonas de fraturas nesse setor são caracterizadas por conjunto de fraturas verticais a sub-verticais de espessuras decimétricas a métricas (0,2 m até 2 m), com orientação principal N60 - 80E (Fig. 79). Algumas dessas zonas possuem geometria sigmoidal e apresentam orientação N75E. No afloramento 16 (UTM 460008mE; 6787270mN) pode-se observar uma dessas zonas, com direção N40E, que limita dois tipos principais de litologias: brechas vulcânicas e riódacitos (Fig. 80).

No setor Farroupilha, os estudos foram baseados em fraturas, pois zonas não foram identificadas ao longo do perfil. Os planos de fraturas são verticais a sub-verticais, com orientação variada, mas com predominância para a direção N70 - 90E (Fig. 81). Além disso, planos de fraturas ortogonais não preenchidos foram identificados no campo, e as suas orientações foram N00 - 10E e N70 - 90W (Fig. 82).

As fraturas que apresentam preenchimento possuem mineralizações representadas por zeolitas e quartzo e têm orientações variáveis. No caso dos planos preenchidos por zeolitas, as direções preferências são N00 - 10W, N40 - 50E, N60 - 70E e N80 - 90E (Fig. 83). Os planos com sílica possuem orientação N60 - 70E.

⇒ Perfil Bento Gonçalves - Veranópolis: Nesse perfil, foram analisados 28 afloramentos, representados por cortes de estrada e pedreiras, localizados ao longo da RST470, rodovia que liga os Municípios de Bento Gonçalves e Veranópolis.

Como nos perfis anteriores (exceção ao perfil Caxias do Sul - Antônio Prado), houve uma divisão, com base no eixo principal do Rio das Antas. Com isso, foram gerados dois setores, denominados de Veranópolis e Bento Gonçalves.

No setor Veranópolis, as estruturas identificadas consistiram de fraturas, zonas de fraturas e veios. Em geral, essas estruturas são verticais a sub-verticais.

As fraturas sem preenchimento apresentam uma orientação N20 - 30E, N40 - 50W e N80 - 90W (Fig. 84).

As estruturas com preenchimento são caracterizadas por mineralizações de zeolitas e quartzo e apresentam orientações variáveis. Para o caso das fraturas preenchidas por zeolitas, as direções predominantes são N40 - 50W; N60 - 70W e N80 - 90W, com N00 - 10E e N40 - 50E como direções secundárias (Fig. 85). Alguns desse planos apresentam um padrão

ortogonal, com dois arranjos de orientações preferências: N05W – N85E e N42E – N48W (Fig. 86). No caso das estruturas com preenchimento de sílica, as direções são extremamente variáveis, sendo as orientações N30 - 40W e N50 - 70W as principais (Fig. 87).

As zonas de fraturas estão representadas por planos verticais a sub-verticais com dimensões decimétricas a métricas (30 cm a 2 m). A orientação preferencial é N70 - 90W, mas direções N50 - 60W e N00 - 20W e N00 - 10E são secundárias (Fig. 88). Uma dessas zonas (afloramento 5 – UTM 444875mE e 6788804mN) possui dimensão de 1 metro, é formada por planos com espaçamento de 10 a 20 cm e limita as litologias representadas por brechas vulcânicas (Fig. 89 e 90).

As estruturas representadas pelos veios consistem de planos milimétricos a centimétricos preenchidos por sílica (quartzo microcristalino e calcedônia). Esses veios apresentam orientações variadas para o quadrante NW, mas têm direção principal N30 - 40W (Fig. 91). A geometria desses veios está representada por planos conjugados (com variações angulares) de maior porte e ramificações ortogonais; a principal orientação é para o quadrante NW (Fig. 92 e 93). Alguns veios estão associados a planos de fraturas, que possuem brecha hidráulica na base; nesse caso, a orientação preferencial é N60W (Fig. 94).

No setor Bento Gonçalves foram identificados planos de fraturas, veios e diques, como principais estruturas, mas não foram identificadas zonas de fratura nos afloramentos observados. As fraturas são verticais a sub-verticais, com orientação variada; as direções N70 - 80E, N80 - 90W são as principais e N50 - 60E, N30 - 40W são secundárias (Fig. 95).

Os veios são planos preenchidos preferencialmente por sílica e estão dispostos com orientação N00 - 10W (Fig. 96). Nesse setor, não foram identificados planos conjugados, ramificados e/ou ortogonais de veios.

Com relação aos diques, há dois tipos principais. O primeiro é representado por estruturas milimétricas a centimétricas, preenchidas por arenitos endurecidos (metamorfismo de contato), comuns na base dos derrames basálticos, próximos às cotas de 150 a 200 metros. Nesse caso, as orientações principais são N20 - 30E e N50 - 60E (Fig. 96 e 97). O segundo tipo é representado por estruturas decimétricas a métricas que cortam os derrames de rochas ácidas e são constituídos por diabásios. A direção predominante desses diques é N50 - 60E (Fig. 98 e 99).

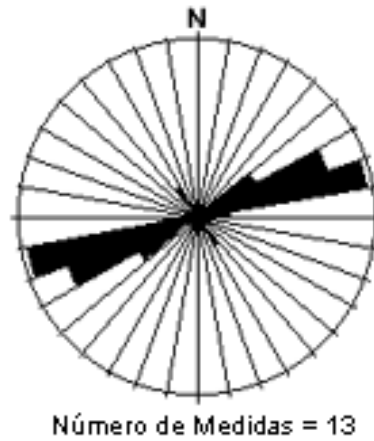


Figura 79 – Histograma de frequência circular das medidas de zonas de fraturas no setor Nova Roma.

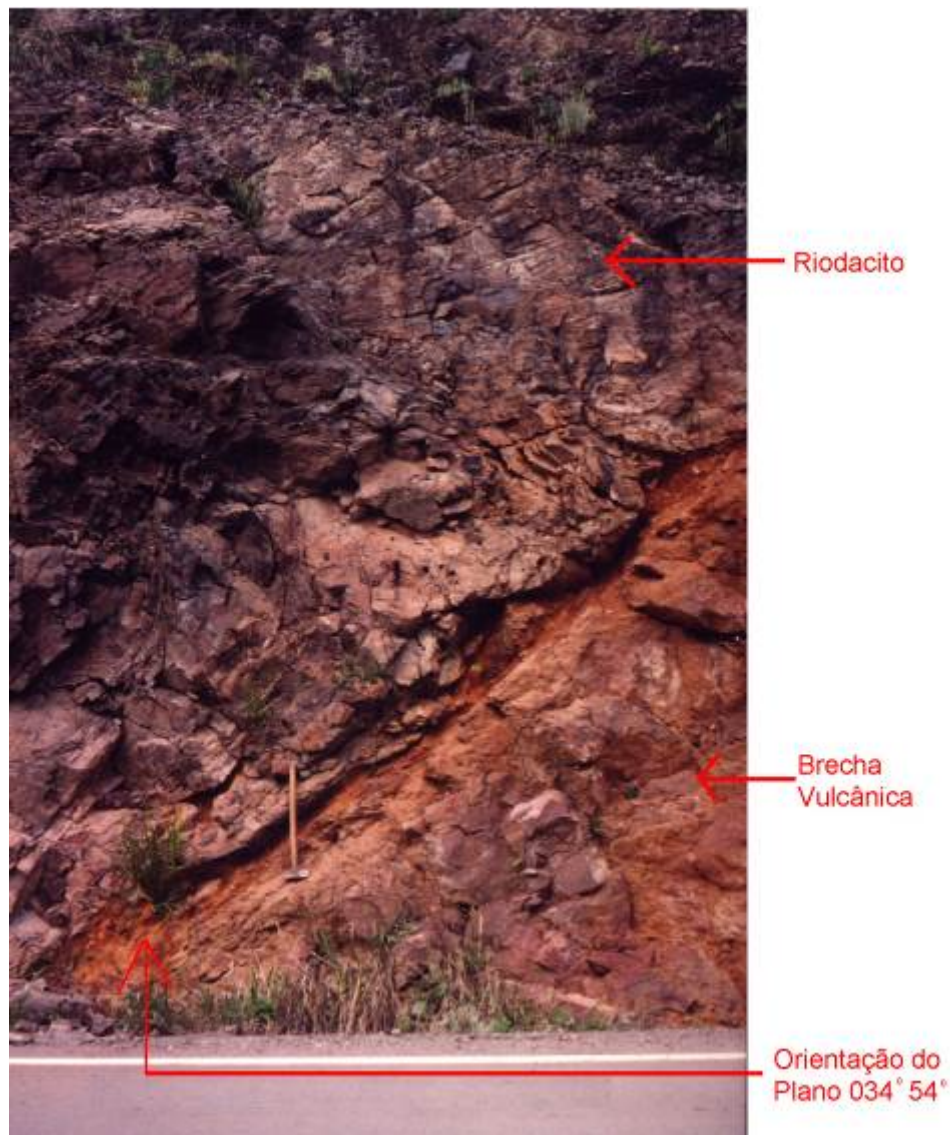


Figura 80 – Zona de fratura que limita as brechas vulcânicas e os riodacitos no setor Nova Roma (afloramento 16 – UTM 460008mE e 6787270mN).

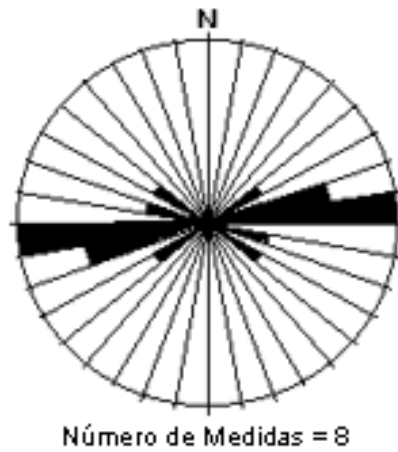


Figura 81 – Histograma de freqüência circular das medidas dos planos de fratura do setor Farroupilha.

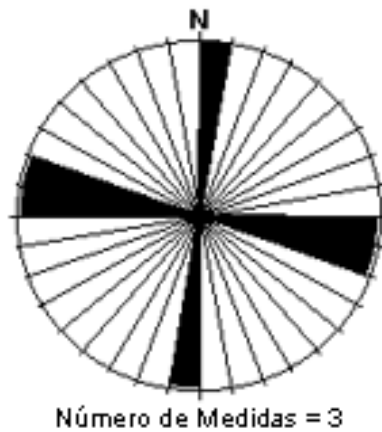


Figura 82 – Histograma de freqüência circular das medidas dos planos ortogonais do setor de Farroupilha.

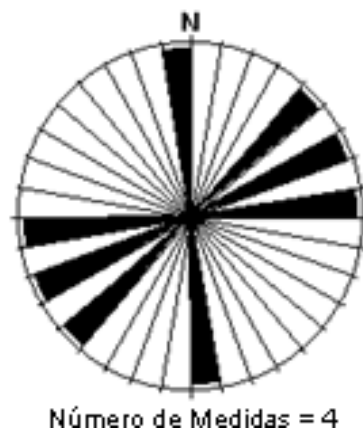


Figura 83 – Histograma de freqüência circular das medidas dos planos de fratura preenchidos por zeolitas e quarto do setor Farroupilha.

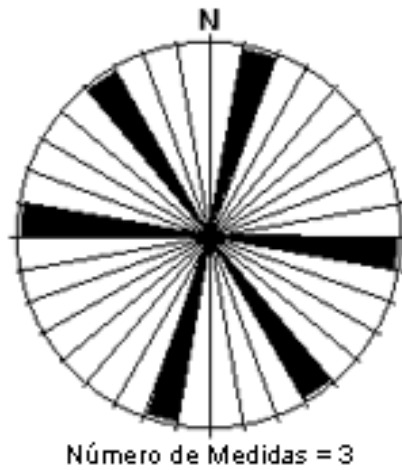


Figura 84 – Histograma de freqüência circular das medidas dos planos de fraturas do setor Veranópolis.

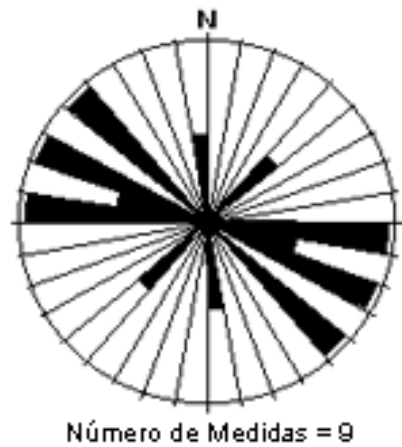


Figura 85 – Histograma de freqüência circular das medidas dos planos de fraturas preenchidos por zeolitas do setor Veranópolis.

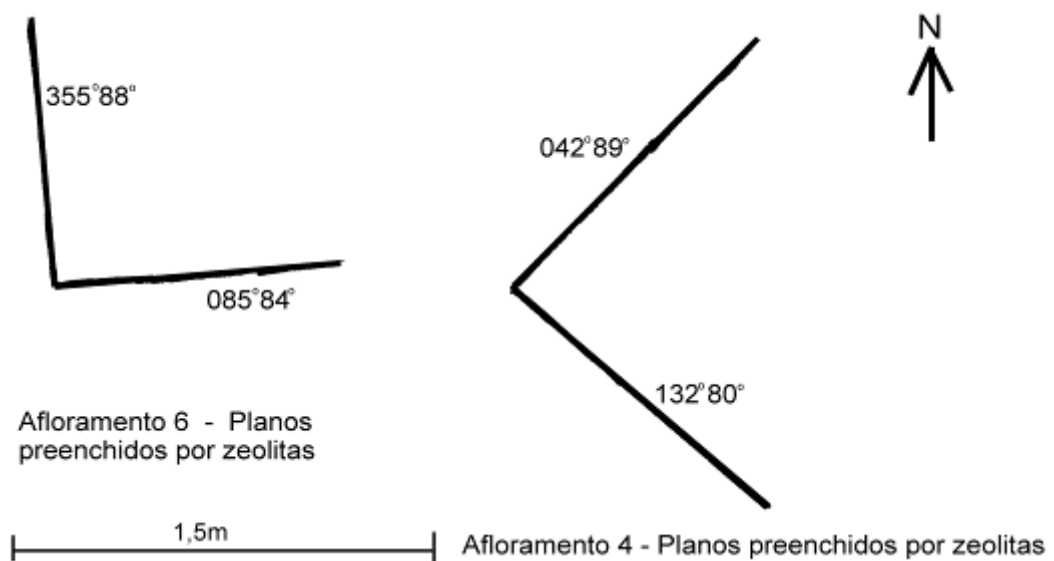


Figura 86 – Croqui com a geometria e orientação dos planos ortogonais do setor Veranópolis.

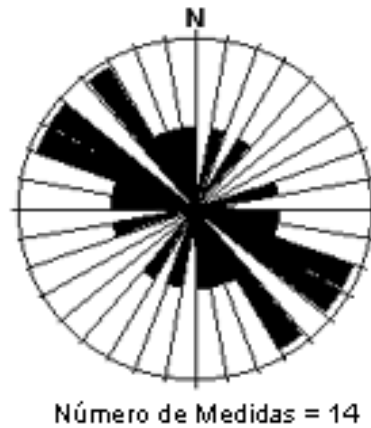


Figura 87 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fraturas preenchidos por sílica do setor Veranópolis.

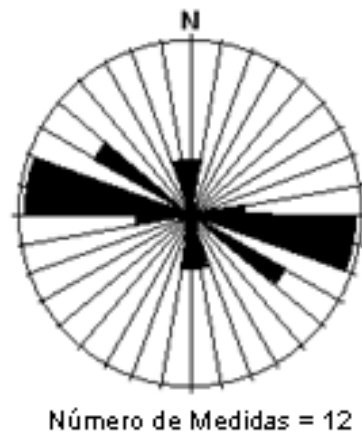


Figura 88 – Histograma de frequência circular das medidas das zonas de fraturas do setor Veranópolis.



Figura 89 – Zona de fratura do setor Veranópolis (afloramento 5 – UTM – 444875mE e 6788804mN).

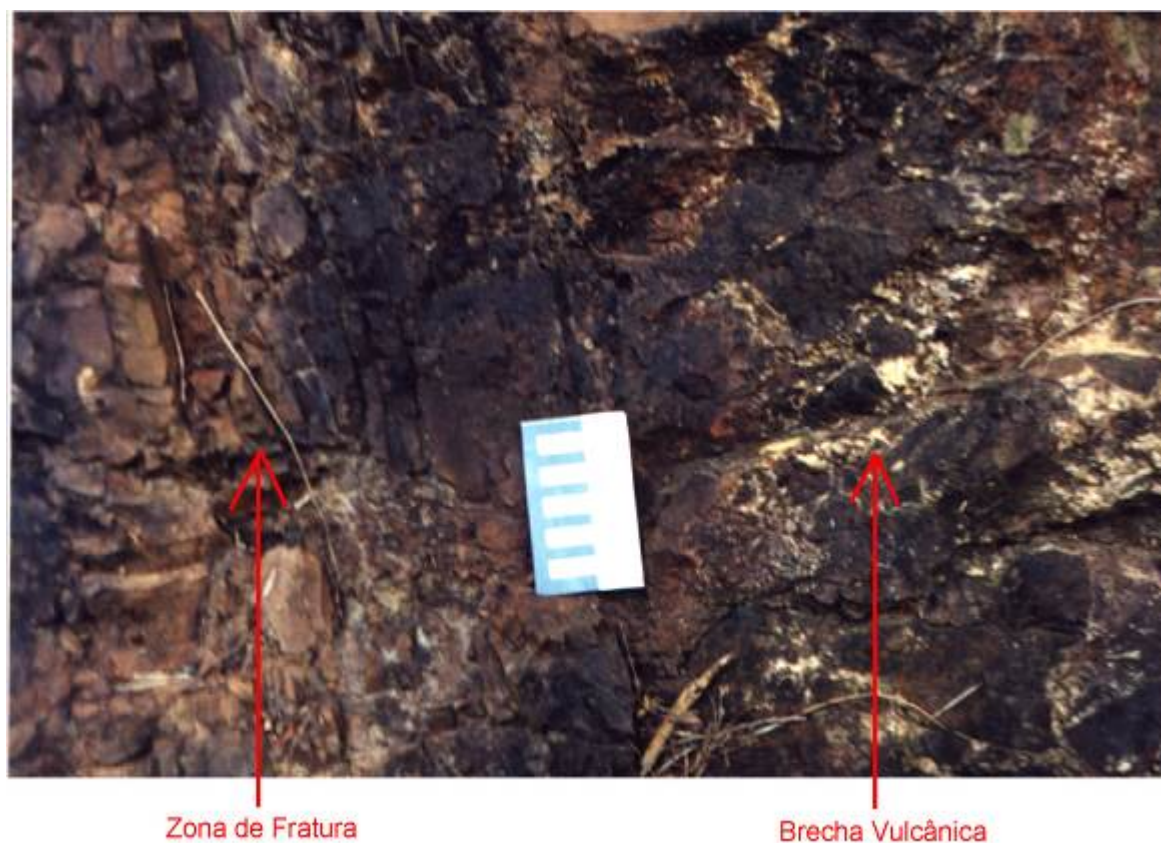


Figura 90 – Detalhe da zona de fratura do setor Veranópolis (afloramento 5 – UTM – 444875mE e 6788804mN).

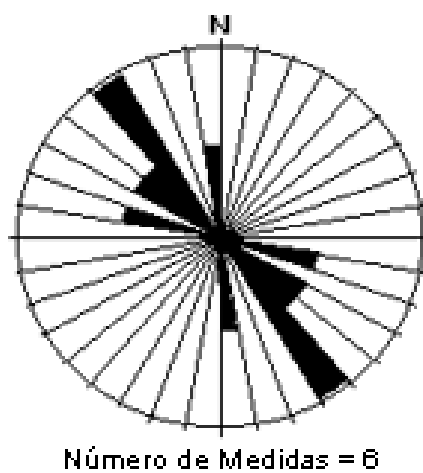


Figura 91 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos conjugados de veios no setor Veranópolis.

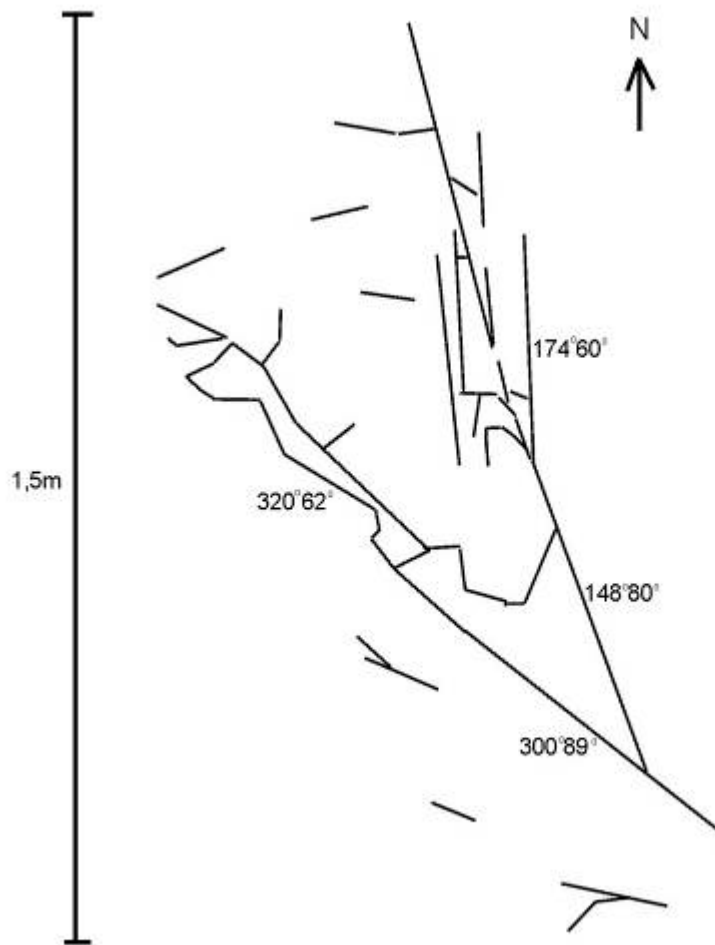


Figura 92 – Croqui com a geometria dos sistemas de veios do setor Veranópolis (afloramento 3 – UTM 444898mE e 6788518mN).

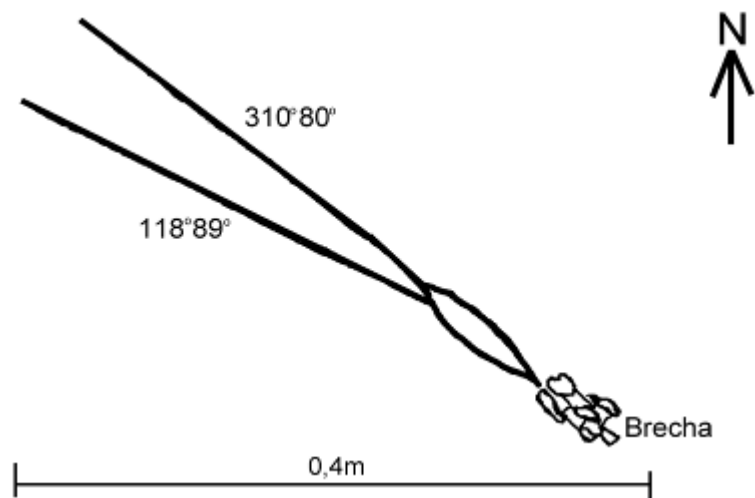


Figura 93 – Croqui com a geometria dos veios do setor Veranópolis (afloramento 6 – UTM 445435mE e 6790372mN).



Figura 94 – Planos de fraturas e veios associados com brecha hidráulica do setor Veranópolis (Afloramento 1 – UTM 444940mE e 6787328mN e Afloramento 9 – UTM 445264mE e 6790645mN).

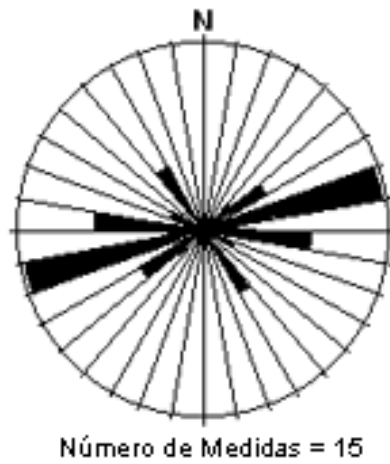


Figura 95 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de fraturas do setor Bento Gonçalves.

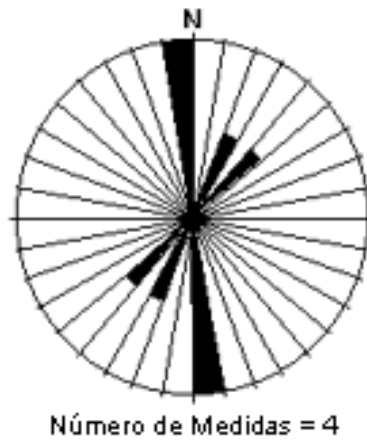


Figura 96 – Histograma de frequência circular das medidas dos planos de veios do setor Bento Gonçalves.



Figura 97 – Diques de arenito cortando os basaltos no setor Bento Gonçalves (Afloramento 1 – UTM 444531mE e 6786487mN).



Figura 98 – Dique de diabásio cortando a seqüência de rochas vulcânicas ácidas no setor Bento Gonçalves.

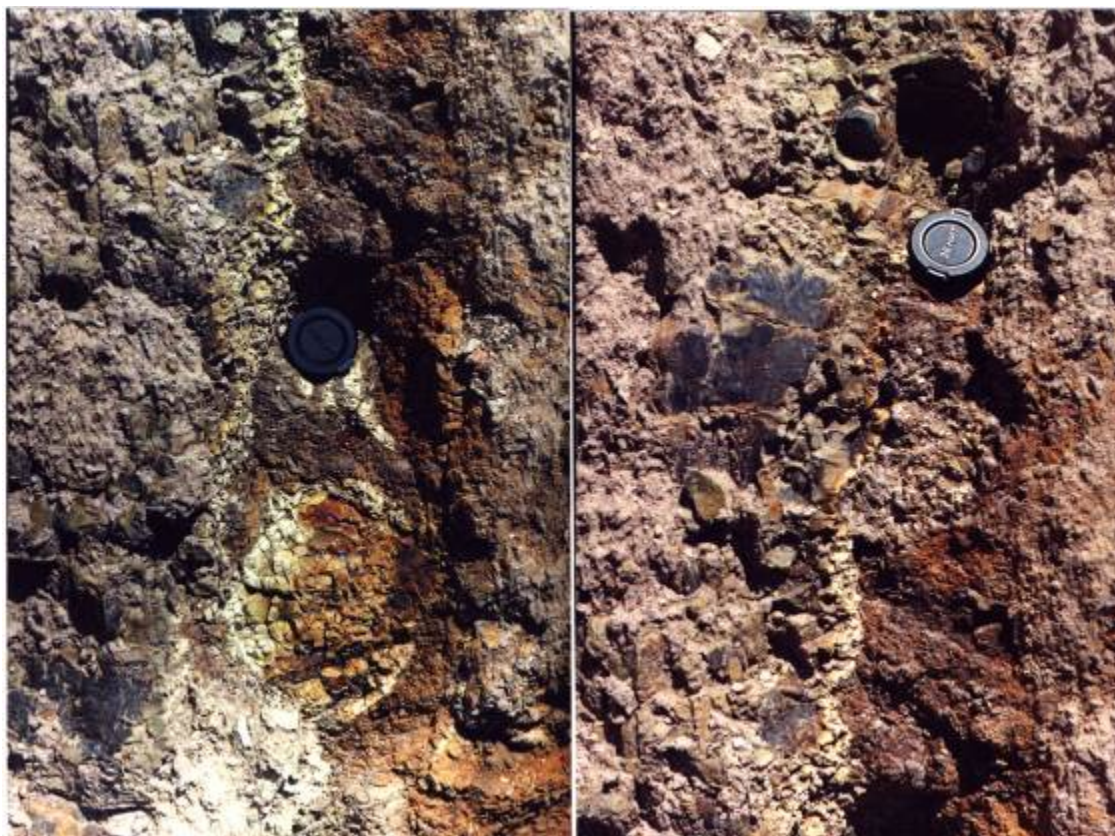


Figura 99 – Detalhe do contato do dique com a rocha encaixante.

6.1.1.2 – Análise cinemática

A análise cinemática foi realizada a partir de fraturas que continham indicadores de movimento, identificados nos diferentes afloramentos dos quatro perfis. As estruturas identificadas em campo, que indicaram o sentido de movimento, são caracterizadas por estrias. Para a identificação dos campos paleotensionais, foi adotado o método dos Diedros Retângulos de Angelier & Mechler (1977), descrito no capítulo 5. As diversas fraturas com estrias foram agrupadas em conjuntos distintos, dependendo do perfil e do setor em que se localizavam. A relação desse arranjo é apresentada na tabela XIII.

Tabela XIII – Conjunto de fraturas com estrias utilizadas para análise cinemática e sua relação com os perfis e setores de levantamento.

Perfil	Setor	Conjuntos	Nº de Estruturas
Perfil Caxias do Sul – São Marcos	São Marcos		00
	Caxias do Sul	Pedreira Guerra	05
		Pedreira Codeca 1	04
		Pedreira Codeca 2	09
		Barragem	03
		Tega	07
Perfil Caxias do Sul – Antônio Prado			00
Perfil Farroupilha - Nova Roma	Nova Roma	Nova Roma	03
	Farroupilha		
Perfil Bento Gonçalves – Veranópolis	Veranópolis	Veranópolis	06
	Bento Gonçalves		

A análise cinemática utilizou conjuntos de dados agrupados pelos setores Pedreira Guerra, Pedreira Codeca, Tega e Veranópolis; foram descartados os conjuntos Barragem e Nova Roma em função da pequena quantidade de medidas identificadas em campo. Para uma melhor compreensão dessa análise, cada um dos conjuntos selecionados, será abordado em separado.

⇒ Pedreira Guerra. A análise cinemática desse conjunto utilizou cinco planos de fraturas (Tab. XIV). Foi definido um campo tensional cujos eixos máximo e mínimo são horizontais e apresentam a seguinte orientação:

$$\sigma_1 = 10^\circ 074^\circ$$

$$\sigma_2 = 80^\circ 256^\circ$$

$$\sigma_3 = 03^\circ 346^\circ$$

Tabela XIV – Fraturas e indicadores cinemáticos utilizados para análise (pedreira Guerra).

Plano	Plano de Fratura	Indicador Cinemático	Sentido de Movimento
P1	242° 82°	Estria – 08° 244°	Dextrógiro
P2	046° 89°	Estria – 00° 224°	Dextrógiro
P3	078° 88°	Estria – 08° 246°	Levógiro
P4	130° 86°	Estria – 08° 306°	Levógiro

A figura 100 apresenta o histograma circular de freqüência, com as medidas obtidas e o resultado da análise cinemática pelo método de Angelier & Mechler (1977).

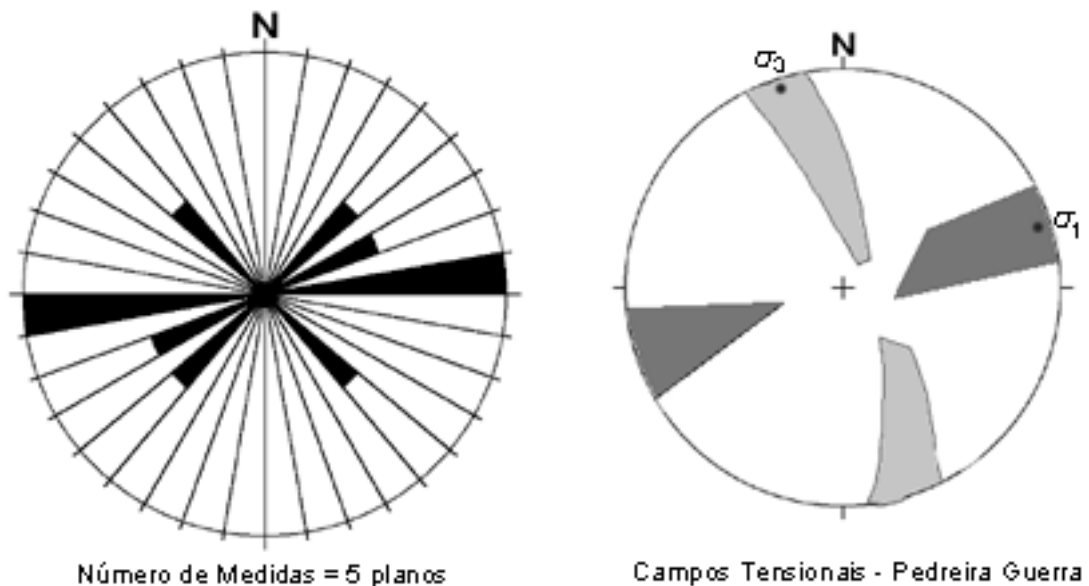


Figura 100 - Histograma de freqüência das cinco medidas utilizadas e resultado da análise cinemática.

⇒ Pedreira Codeca 1. A análise cinemática desse conjunto utilizou quatro estruturas que continham indicadores cinemáticos, representadas por estrias (Tab. XV). Na análise cinemática, foi definido um campo tensional, cujos eixos máximo e mínimo são horizontais e apresentam a seguinte orientação:

$$\sigma_1 = 01^\circ 174^\circ$$

$$\sigma_2 = 86^\circ 084^\circ$$

$$\sigma_3 = 04^\circ 264^\circ$$

Tabela XV - Medidas utilizadas para análise cinemática (pedreira Codeca 1).

Plano	Plano de Fratura	Indicador Cinemático	Sentido de Movimento
P1	144° 89°	Estria – 09° 140°	Dextrógiro
P2	122° 90°	Estria – 10° 130°	Dextrógiro
P5	140° 80°	Estria – 06° 320°	Dextrógiro
P6	210° 90°	Estria – 08° 202°	Levógiro

A figura 101 mostra o histograma circular de frequência, com as medidas obtidas e o resultado da análise cinemática pelo método de Angelier & Mechler (1977).

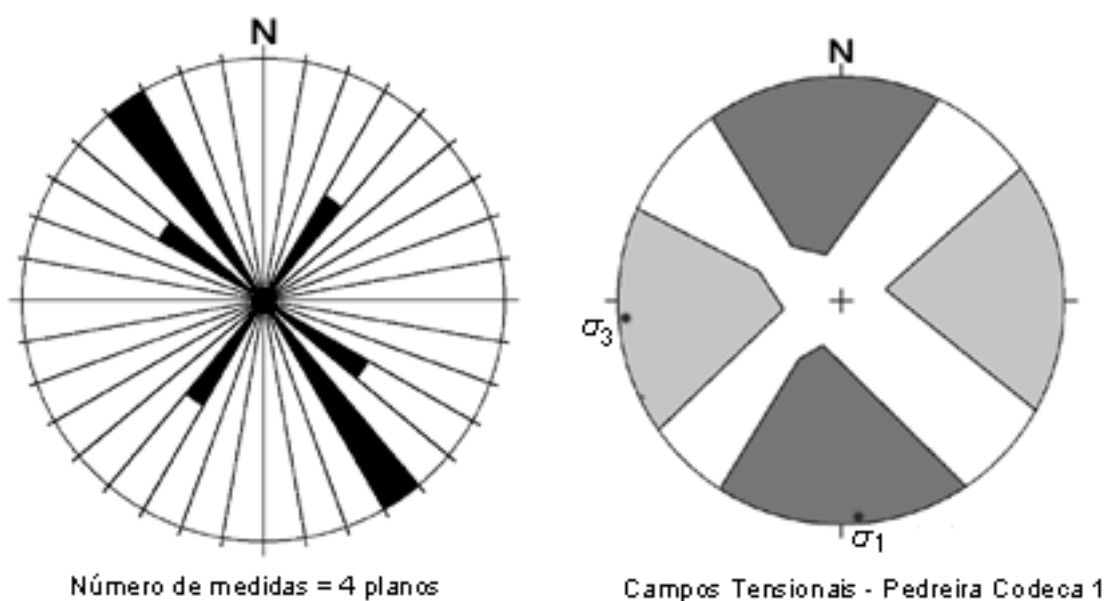


Figura 101 - Histograma de frequência das medidas utilizadas e resultado da análise cinemática.

⇒ Pedreira Codeca 2. A análise desse conjunto utilizou 9 planos de fraturas com estrias (Tab. XVI). A análise cinemática definiu um campo tensional horizontal (eixos máximo e mínimo) com a seguinte orientação:

$$\sigma_1 = 03^\circ 263^\circ$$

$$\sigma_2 = 88^\circ 092^\circ$$

$$\sigma_3 = 02^\circ 357^\circ$$

Tabela XVI - Medidas utilizadas para análise cinemática (pedreira Codeca 2).

Plano	Plano de Fratura	Indicador Cinemático	Sentido de Movimento
P4	208° 78°	Estria – 06° 220°	Dextrógiro
P7	104° 86°	Estria – 02° 100°	Levógiro
P8	114° 90°	Estria – 04° 116°	Levógiro
P9	110° 89°	Estria – 06° 286°	Levógiro
P10	098° 76°	Estria – 02° 278°	Levógiro
P11	108° 88°	Estria – 06° 292°	Levógiro
P12	102° 88°	Estria – 06° 278°	Levógiro
P13	108° 87°	Estria – 08° 284°	Levógiro
P14	110° 88°	Estria – 08° 288°	Levógiro

A figura 102 apresenta o histograma circular de freqüência, com as medidas obtidas e o resultado da análise cinemática pelo método de Angelier & Mechler (1977).

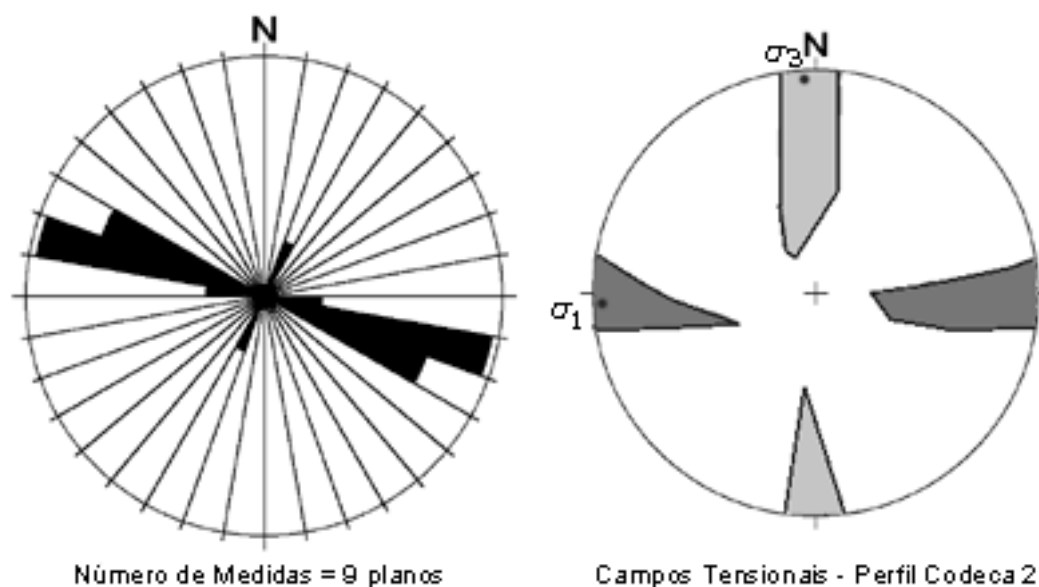


Figura 102 - Histograma de freqüência das medidas utilizadas e resultado da análise cinemática.

⇒ Tega. O estudo desse conjunto utilizou 6 planos de fraturas que continham estrias, como indicadores cinemáticos (Tab. XVII). A análise cinemática resultou na identificação de um campo tensional cujos eixos máximo e mínimo são horizontais e cujas orientações são:

$$\sigma_1 = 15^\circ 073^\circ$$

$$\sigma_2 = 72^\circ 270^\circ$$

$$\sigma_3 = 04^\circ 165^\circ$$

Tabela XVII - Medidas utilizadas para análise cinemática (Tega).

Plano	Plano de Fratura	Indicador Cinemático	Sentido de Movimento
P1	088° 90°	Estria – 18° 092°	Levógiro
P2	150° 88°	Estria – 10° 150°	Levógiro
P3	144° 80°	Estria – 16° 140°	Levógiro
P4	088° 72°	Estria – 08° 092°	Levógiro
P6	088° 90°	Estria – 02° 268°	Levógiro
P7	118° 90°	Estria – 10° 300°	Levógiro

A figura 103 apresenta o histograma circular de freqüência, com as medidas obtidas e o resultado da análise cinemática pelo método de Angelier & Mechler (1977).

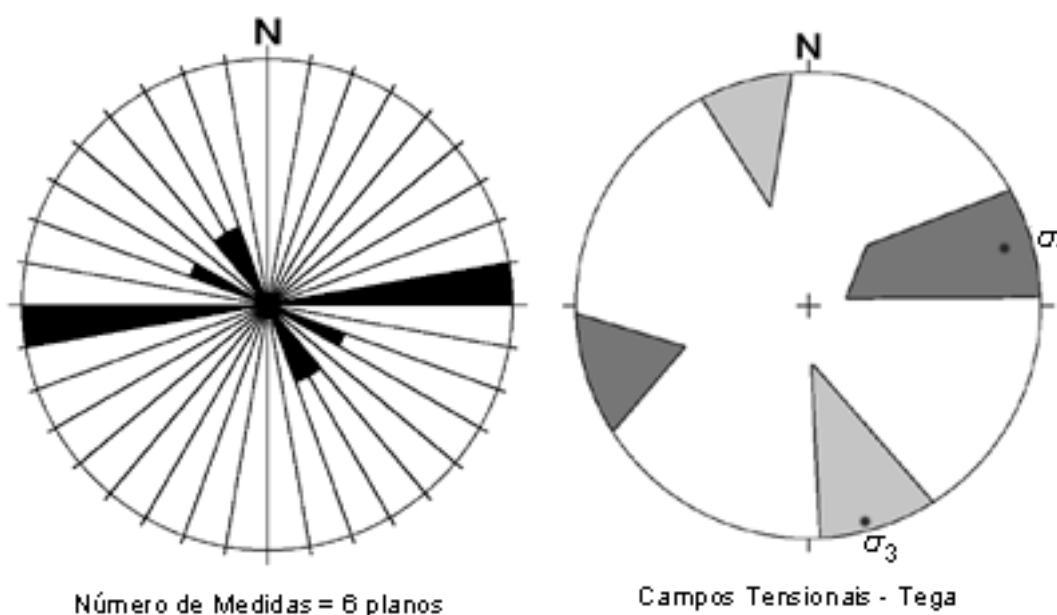


Figura 103 - Histograma de freqüência das medidas utilizadas e resultado da análise cinemática.

⇒ Veranópolis. A análise cinemática desse conjunto utilizou cinco planos de fraturas que continham estrias (Tabela XVIII). Por meio da análise cinemática dessas estruturas, pode-se identificar um campo tensional cujos eixos máximo e mínimo são horizontais e cuja orientação é representada por:

$$\sigma_1 = 10^\circ 068^\circ$$

$$\sigma_2 = 80^\circ 248^\circ$$

$$\sigma_3 = 02^\circ 158^\circ$$

Tabela XVIII - Medidas utilizadas para análise cinemática (Veranópolis).

Plano	Plano de Fratura	Indicador Cinemático	Sentido de Movimento
P2	040° 89°	Estria – 12° 218°	Dextrógiro
P3	296° 84°	Estria – 32° 114°	Levógiro
P4	270° 89°	Estria – 10° 088°	Levógiro
P5	282° 78°	Estria – 10° 100°	Levógiro
P6	092° 84°	Estria – 10° 092°	Levógiro

A figura 104 mostra o histograma circular de freqüência, com as medidas obtidas e o resultado da análise cinemática pelo método de Angelier & Mechler (1977).

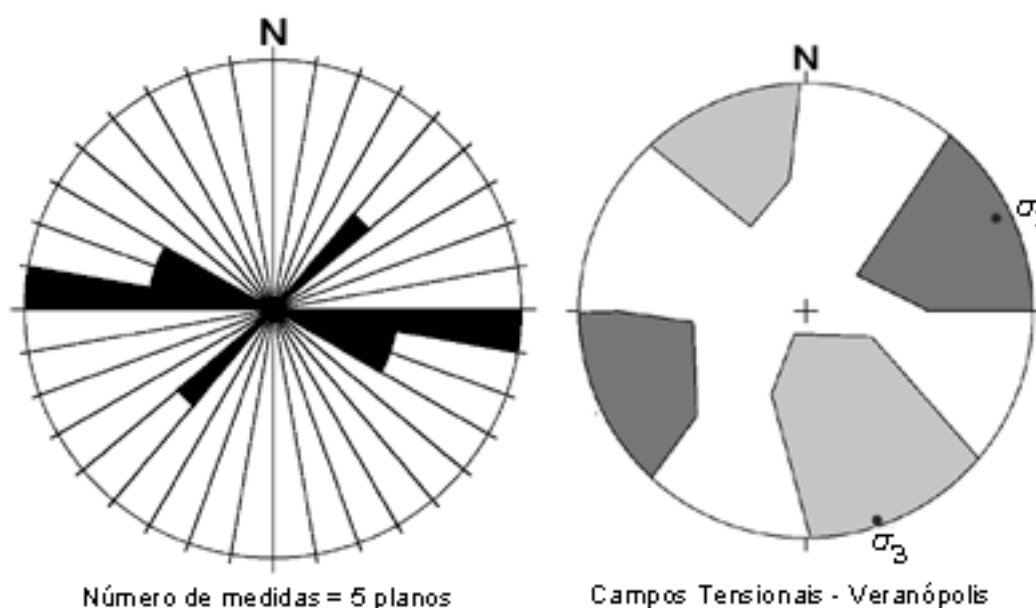


Figura 104 - Histograma de freqüência das medidas utilizadas e resultado da análise cinemática.

6.1.1.3 – Análise dinâmica

As principais estruturas existentes na área de estudo estão representadas por fraturas, zonas de fraturas, veios e diques. Salvo algumas exceções, os planos e as zonas de fraturas são verticais a sub-verticais e, quando preenchidos, apresentam mineralizações de zeolitas e sílica (quartzo microcristalino e calcedônia, principalmente). Com relação às mineralizações, observa-se que fraturas com preenchimento de zeolitas são mais comuns nos basaltos e andesitos (em geral, porções inferiores dos derrames básicos), enquanto os planos preenchidos por quartzo são mais comuns nos riolitos, riodacitos, dacitos (parte dos derrames ácidos).

O resumo geral da análise das estruturas identificadas nos quatro perfis de levantamento está disposto na tabela XIX, onde são mostrados os seguintes resultados:

- Fraturas: a orientação geral desses planos é para o quadrante NE; a direção principal, identificada em todos os perfis é representada pelos rumos N70 - 80E e N80 - 90E. Nos setores Caxias do Sul e Veranópolis, podem ser observadas direções secundárias para planos de fraturas; N20 - 30W é o rumo identificado no setor São Marcos e N80 - 90W, no setor Veranópolis. Considerando as direções principais e secundárias desses setores, pode-se identificar um padrão de fraturas com estruturação ortogonal (Fig. 105). Esse padrão identificado na análise dos dados gerais também é verificado em campo, como pode ser observado nas figuras 82 (setor Farroupilha) e 86 (setor Veranópolis).
- Fraturas com preenchimento: esses planos possuem orientações diversas; as direções preferenciais estão representadas pelos rumos N70 - 80E, N00 - 10E, N10 - 20W, N60 - 90W. Além disso, parece haver uma tendência para que os planos com preenchimento de zeolitas tenham uma orientação preferencial próxima a N - S, enquanto que os planos preenchidos por sílica teriam direções preferenciais para NE.
- Zonas de Fraturas: observa-se que a orientação das zonas de fraturas é variada, mas as direções preferenciais estão marcadas pelos rumos N70 - 90E, N00 - 10E e N70 - 90W. Essa geometria é semelhante àquela apresentada pelos planos de fraturas e pelos planos com preenchimento, o que evidencia a presença de um sistema, aproximadamente ortogonal.
- Veios: o sistema de veios é caracterizado por planos que formam conjugados e ramificações. A orientação preferencial é N20 - 60W, que pode estar associada a planos de cisalhamento (ver geometria dos veios nos diferentes setores – figuras 60, 92). Por outro lado, há uma orientação secundária, próxima a Norte-Sul, que corresponde a planos considerados como alimentadores de geodos (ver as figuras 61 e 63).

Tabela XIX – Resumo da análise geométrica das estruturas identificadas nos perfis.

Perfil	Setores	Tipo de Estrutura	Orientação Quadrante	Direção principal
Caxias do Sul – e São Marcos	Caxias do Sul	Fraturas	NE e NW	N70 - 80E N20 – 30W
		Fraturas com Preenchimento	N-S e NE	N70 - 80E N0 - 10E N0 - 20W N70 – 80W
	São Marcos	Zonas de Fraturas	N-S e NE	N60 - 90E N00 – 10E
	Veios	NW	N20 – 60W	
	Diques	NE	N20 – 70E	
Caxias do Sul – Antônio Prado		Fraturas	NE	N80 – 90E
		Fraturas com preenchimento	N-S	N00 – 10E
		Zonas de Fraturas	NE	N80 – 90E
Farroupilha – e Nova Roma	Nova Roma	Fraturas	NE	N70 – 90E
		Fraturas com preenchimento	N-S NE	N00 - 10E N00 - 10W N80 – 90E
	Farroupilha	Fraturas Ortogonais	NE NW	N00 - 10E N80 - 90E N70 – 90W
	Zonas de Fraturas	NE	N60 – 80E	
Bento Bonçalves – e Veranópolis	Bento Gonçalves	Fraturas	NE	N70 - 80E N80 – 90W
		Fraturas com preenchimento	NW	N60 - 70W N80 – 90W
		Fraturas Ortogonais	NE NW	N05W – N85E N42E – N48W
	Veranópolis	Zonas de Fraturas	NW	N70 - 90W
		Veios	NW	N30 - 60W N00 – 10W
		Diques	NE	N20 - 30E N40 – 50E

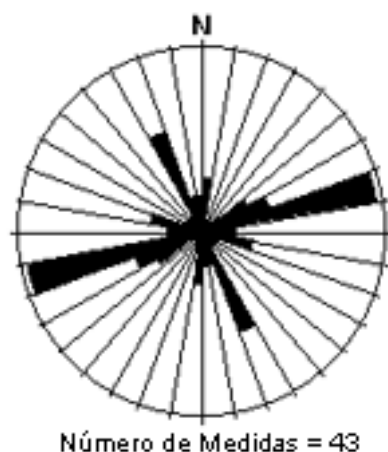


Figura 105 – Histograma de frequência circular do total das medidas dos planos de fraturas do Perfil Caxias do Sul – São Marcos.

- diques: essas estruturas são caracterizadas pela presença de planos de dimensões variadas, preenchidos por arenitos e diabásios, com orientação preferencial marcada pelo rumo N20 - 70E. Observa-se que as direções N20 - 30E estão associadas aos diques de dimensões milimétricas a centimétricas preenchidos por arenitos, enquanto a direção N50 - 60E está relacionada com os diabásios.

Essa análise evidencia que, na região, há um padrão aproximadamente ortogonal de fraturas com orientação próxima a Norte-Sul e Leste-Oeste; esse padrão é marcado pelas orientações dos planos de fraturas, que apresentam preenchimento e zonas de fraturas. Porém, observou-se que há variações nesse padrão, dependendo dos setores de levantamento. Isso pode ser observado, por exemplo, pela análise geométrica dos diferentes setores (exemplo: Caxias do Sul - São Marcos e Bento Gonçalves - Veranópolis).

As estruturas geradas com orientações diferentes do padrão ortogonal, provavelmente correspondem a planos de cisalhamento, onde se alojam os veios e diques. Isso pode ser evidenciado pelo padrão geométrico apresentado pelos sistemas de veios e pela orientação dos sistemas de conjugados de fraturas identificados em campo.

A análise cinemática permitiu identificar que, na região, atuaram dois campos tensionais principais. O primeiro campo tensional foi identificado utilizando-se os dados de quatro conjuntos (Fig. 106 e Tab. XX) e caracteriza-se por apresentar uma direção de compressão σ_1 horizontal de orientação 082° e uma direção de tração σ_3 horizontal de orientação 352° .

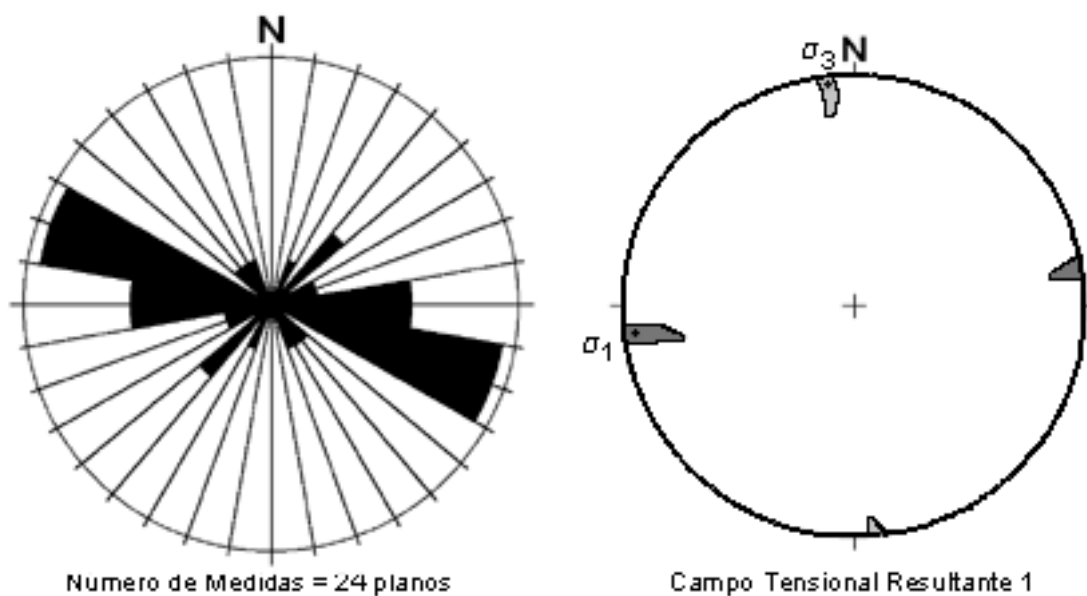


Figura 106 - Histograma de freqüência das medidas utilizadas e resultado da análise cinemática do campo tensional resultante 1.

Tabela XX - Orientação dos campos tensionais identificados na análise cinemática e relação dos dois campos resultantes.

Conjuntos de Estudo	Campos Tensionais Identificados	Campo Tensional Resultante 1	Campo Tensional Resultante 2
Pedreira Guerra	$\sigma_1 = 10^\circ 074^\circ$ $\sigma_2 = 80^\circ 256^\circ$ $\sigma_3 = 03^\circ 346^\circ$	$\sigma_1 = 07^\circ 262^\circ$ $\sigma_2 = 80^\circ 126^\circ$ $\sigma_3 = 04^\circ 352^\circ$	
Afloramento Tega	$\sigma_1 = 15^\circ 073^\circ$ $\sigma_2 = 72^\circ 270^\circ$ $\sigma_3 = 04^\circ 165^\circ$		
Afloramento Veranópolis	$\sigma_1 = 10^\circ 068^\circ$ $\sigma_2 = 80^\circ 248^\circ$ $\sigma_3 = 02^\circ 158^\circ$		
Pedreira Codeca 2	$\sigma_1 = 03^\circ 263^\circ$ $\sigma_2 = 88^\circ 092^\circ$ $\sigma_3 = 02^\circ 357^\circ$		
Pedreira Codeca 1	$\sigma_1 = 01^\circ 174^\circ$ $\sigma_2 = 86^\circ 084^\circ$ $\sigma_3 = 04^\circ 264^\circ$		$\sigma_1 = 01^\circ 174^\circ$ $\sigma_2 = 86^\circ 084^\circ$ $\sigma_3 = 04^\circ 264^\circ$

Para esse primeiro campo tensional, as estruturas paralelas e sub-paralelas a σ_1 (262°) são denominadas de fraturas trativas (T), enquanto que as estruturas oblíquas a essa direção compressiva principal seriam fraturas híbridas e de cisalhamento, dependendo do ângulo

diedro com as fraturas T. Nesse caso, as fraturas trativas, em geral, apresentam preenchimento, enquanto que as oblíquas podem ou não apresentar. O preenchimento das fraturas depende de dois fatores: i) existência de espaço de dilatação e ii) circulação de fluidos com carga iônica. Assim, as duas condições foram cumpridas para o caso das fraturas T. No caso das fraturas oblíquas, a existência de dilatação depende da formação de ramificações transtrativas. Esse parece ter sido o caso em algumas situações, pois boa parte das fraturas oblíquas (dependendo da direção) correspondem a planos onde estão alojados os veios e diques.

O segundo campo tensional foi caracterizado a partir dos dados do conjunto denominado de Pedreira Codeca 1 (Tab. XIX e Fig. 101), onde foi definida uma direção de compressão σ_1 horizontal orientada 174° e de tração σ_3 horizontal orientada 264° . No caso desse campo, as fraturas trativas são as estruturas paralelas e sub-paralelas à direção σ_1 (174°) e se apresentam, em geral, com preenchimento. Da mesma forma, as estruturas oblíquas, entre os eixos de compressão σ_1 e de tração σ_3 , correspondem a fraturas híbridas e de cisalhamento. Em parte dessas estruturas, há o alojamento de veios, como pode ser identificado no campo.

Esses dois campos atuaram na região como um todo, pois, dependendo do setor e perfil observado, podem ser identificados os dois, ou somente um dos campos tensionais. Isso implica na necessidade de estudos locais adicionais para a caracterização do regime predominante e da sua ordem temporal. Porém, analisando-se os dois campos, verifica-se que eles são ortogonais entre si, o que corrobora os dados de campo, visto que o padrão de fraturamento marcado pela geometria das fraturas e zonas de fraturamento já indicava essa situação.

Essas orientações ortogonais de fraturas já foram identificadas em outros pontos da Bacia do Paraná, como pode ser observado no trabalho desenvolvido por Fernandes (1997) para a região de São Paulo. Nesse trabalho, a autora encontrou as seguintes orientações preferenciais: N75 - 90W e N80 - 90E para as componentes EW; NS e N05E para as componentes NS; N40 - 50W e N15 - 30W para as componentes NW e, por fim, N25 - 40E e N15 - 35E para as componentes NE. Essas estruturas e suas respectivas orientações foram resultantes de vários eventos, relacionados a regimes transcorrentes, e foram denominadas de Ts1NE, Ts1EW, Ts1NW, Ts1NS, Ts1NNE (onde T corresponde ao regime transcorrente; s1

ao principal esforço compressivo; NE, EW, NW, NS e NNE à posição aproximada do esforço compressivo principal).

Heemann & Strieder (1999) identificaram a presença de padrão ortogonal de esforço para as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, ao analisar estruturas como diques, orientação de geodos e estrias de deslizamento, na região de Salto do Jacuí no estado do Rio Grande do Sul. Esse padrão é representado por orientações, aproximadas NS e EW, o que corrobora os resultados encontrados na área desse estudo, visto que a pesquisa foi realizada nas rochas vulcânicas e em área próxima.

6.1.2 – Geologia estrutural – análise dos lineamentos

Nesse item, a análise estrutural está relacionada com os lineamentos do tipo 2 extraídos de produtos de sensoriamento remoto.

6.1.2.1 – Extração de lineamentos

A extração de lineamentos foi realizada com base na análise de produtos de sensoriamento remoto (fotografias aéreas e imagens de satélite). Para a região desse estudo, as fotografias aéreas consistiram no produto onde os melhores resultados foram obtidos. Isso é compreensível, pois as estruturas existentes na região correspondem a lineamentos do tipo 2, caracterizados por feições geomorfológicas negativas e representados, em geral, por drenagens controladas por fraturas. Dessa forma, as fotografias aéreas resultaram no melhor material para extração de lineamentos, em função da possibilidade de observação estereoscópica do relevo da região e, conseqüentemente, do sistema de drenagem, facilitando com isso a identificação desses lineamentos.

As observações monoscópicas em imagens de satélite e radar, embora nesse último caso o relevo seja bem mais ressaltado que no primeiro, ficaram prejudicadas em função da ausência do elemento profundidade. Reginato & Strieder (2001) realizaram um trabalho de comparação sobre a extração de lineamentos com diferentes produtos de sensoriamento remoto (imagens LANDSAT e fotografias aéreas). Nesse caso, foi muito comum identificar, nas imagens de satélite, feições lineares que não possuem conotação estrutural, mas estão

relacionadas a outros fatores, como feições antrópicas (alta densidade de limites de pequenas propriedades).

Cabe salientar, no entanto, que as outras fontes (imagens de satélite e de radar) para obtenção de lineamentos não devem ser descartadas. Elas são e sempre serão ferramentas de grande valor para a geologia estrutural. Isso significa apenas que, para a região em investigação, as fotografias aéreas demonstraram maior acuracidade na extração de lineamentos, pois houve a eliminação de falsos lineamentos produzidos pelos limites de propriedades (imagens de satélite) e dos lineamentos devidos às escarpas de vales (imagens de radar).

A análise do padrão estrutural foi então realizada por meio de fotointerpretação em fotografias aéreas de escala 1:60.000 (escala próxima a 1:50.000 que foi adotada como base nesse estudo). Cada estereopar foi observado em estereoscópios de espelhos, marca WILD, e os lineamentos tipo 2 (zonas de fraturas) foram demarcados e delimitados em um *overlay*. Essas estruturas foram delimitadas com base na extensão de segmentos lineares de drenagem. Nessa delimitação, procurou-se não prolongar a extensão dos lineamentos para além das suas linhas de drenagem visíveis nas fotografias aéreas, mesmo que dois segmentos paralelos estivessem alinhados em suas terminações. Após essa demarcação, os lineamentos foram transferidos para um mapa topográfico base, em escala 1:50.000, do Serviço Geográfico do Exército (SGE), por meio de interpretação morfológica.

Para a área de estudo foram identificados, com a fotointerpretação, 4154 lineamentos do tipo 2. Esses lineamentos foram separados em quatro grupos principais (Fig. 107):

- Grupo 1 – corresponde a 663 lineamentos de orientação entre N00 - 14E e N00 - 14W;
- Grupo 2 – é constituído por 1751 lineamentos com orientação entre N15 - 84E;
- Grupo 3 – representado por 1316 lineamentos com orientação entre N15 - 75W;
- Grupo 4 – formado por 424 lineamentos com orientação entre N85 - 90E e N75 - 90W.

Para cada um dos quatro grupos, foi realizado o tratamento estatístico vetorial (descrito anteriormente no capítulo 5, item 5.3.1.5) que será apresentado adiante.

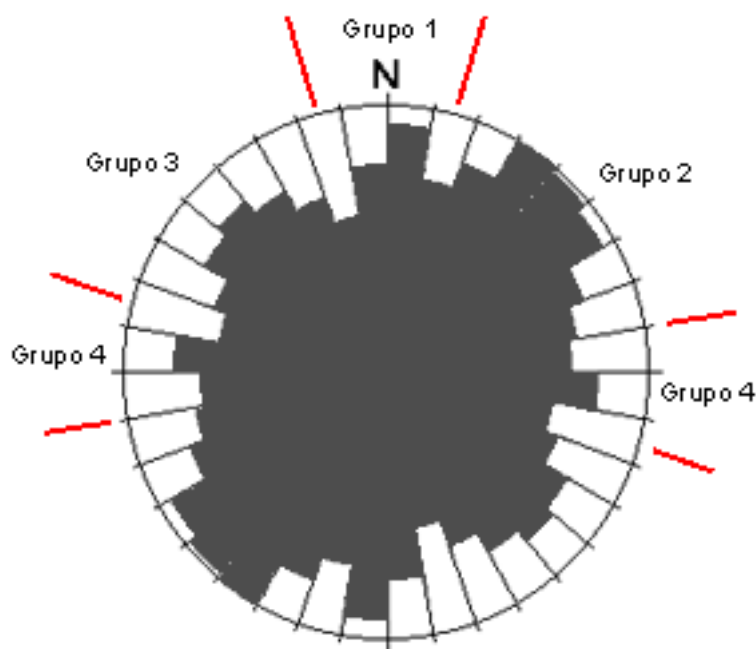


Figura 107 - Histograma de frequência circular com os 4154 lineamentos obtidos na fotointerpretação.

6.1.2.2 – Tratamento estatístico dos lineamentos

O tratamento estatístico dos lineamentos foi realizado para os quatro grupos descritos anteriormente e para cada um dos setores (denominação adotada no item 6.1.1 – Geologia Estrutural – Dados de Campo) utilizando-se a estatística vetorial, na seguinte ordem de passos:

- determinação do azimute e comprimento dos lineamentos: para isso foi utilizado o programa *AutoCad*TM;
- conversão do azimute trigonométrico obtido no *AutoCad*TM para azimute geográfico. Para essa conversão foram utilizadas as fórmulas apresentadas na tabela XXI;

Tabela XXI - Fórmulas utilizadas na conversão de valores de azimute trigonométrico para valores de azimute geográfico.

	Azimute Trigonométrico (α)	Azimute Geográfico (β)
Range	000 – 090	$\beta = 90 - \alpha$
Range	270 – 360	$\beta = (360 - \alpha) + 90$

- c) multiplicação do comprimento do lineamento pelo seno do azimute, resultando na componente leste-oeste:

$$\text{Componente E-O} = \text{comprimento} \times \text{Sen Az}$$

- d) multiplicação do comprimento do lineamento pelo cosseno do azimute, resultando na componente norte-sul:

$$\text{Componente N-S} = \text{comprimento} \times \text{Cos Az}$$

- e) cálculo da magnitude do vetor resultante (R) para cada um dos quatro grupos, considerando, em cada um deles, o somatório dos valores dos componentes leste-oeste e norte-sul:

$$R = [(\sum \text{Comprimento} \times \text{Sen Az})^2 + (\sum \text{Comprimento} \times \text{Cos Az})^2]^{1/2}$$

- f) cálculo do comprimento médio (C_m) do azimute médio (θ_m) e da significância do vetor (S_v) resultante para cada um dos quatro grupos:

$$C_m = R / n$$

$$\theta_m = \tan^{-1} [(\sum \text{Comprimento} \times \text{Sen Az}) / (\sum \text{Comprimento} \times \text{Cos Az})] + q$$

$$S_v = R / \sum \text{comprimentos} \quad 0 < S_v < 1$$

Os resultados encontrados para cada um dos grupos e setores são apresentados na seqüência:

⇒ Grupo 1: corresponde a lineamentos com orientação entre N00 - 14E e N00 - 14W; as direções preferências são N00 - 10E e, secundariamente N00 - 10W (Fig. 108). Para esse grupo foram, analisados seis setores, denominados de São Marcos, Caxias do Sul, Antônio Prado, Farroupilha, Veranópolis e Bento Gonçalves. O resultado da estatística vetorial é apresentado na tabela XXII.

Analisando-se os histogramas de frequência circular dos lineamentos do Grupo 1 para cada setor, observa-se que as direções preferências são mantidas na maior parte deles. Exceção são o setor Farroupilha, onde há uma inversão na preferência (rumo N00 - 10W é

mais importante), e o setor São Marcos, que não apresenta distinção entre as direções N00 - 10E e N00 - 10W (Fig. 109).

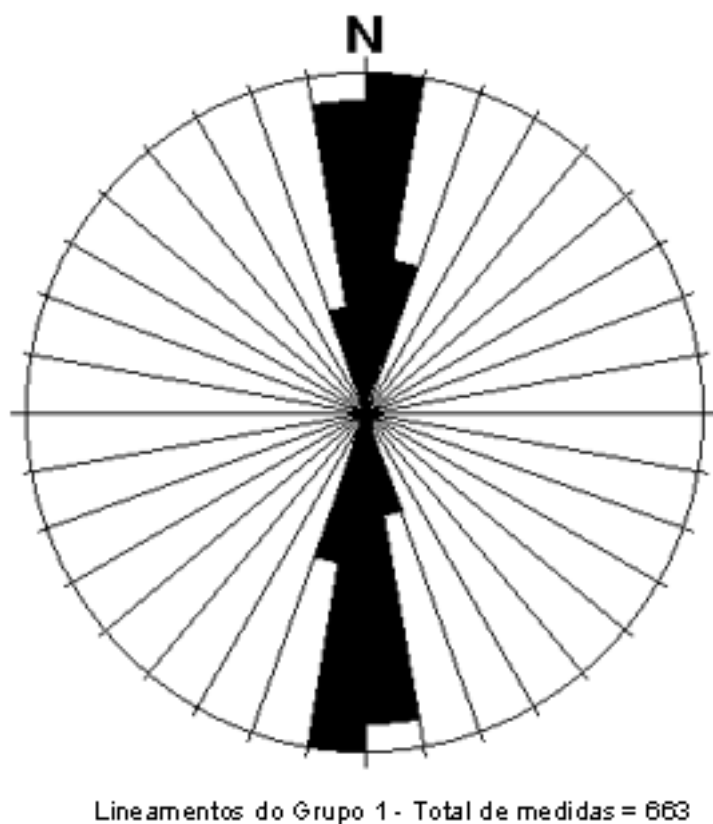


Figura 108 - Histograma de frequência circular com os lineamentos do Grupo 1.

Tabela XXII – Resultado do tratamento estatístico vetorial dos lineamentos do grupo 1.

Setores	Nº de Medidas	R (m)	C _m (m)	θ _m (graus)	S _v
Todos	663	567037,077	855,2595	6,905231	0,996983
São Marcos	81	69483,078	857,9158	6,999131	0,996731
Caxias do Sul	123	118977,835	967,2994	7,536302	0,997875
Antônio Prado	112	75376,742	673,0066	6,441930	0,997044
Farroupilha	106	105015,672	990,7139	5,789012	0,997374
Veranópolis	107	67459,540	630,4630	6,649257	0,996605
Bento Gonçalves	134	130763,552	975,8474	7,576658	0,996452

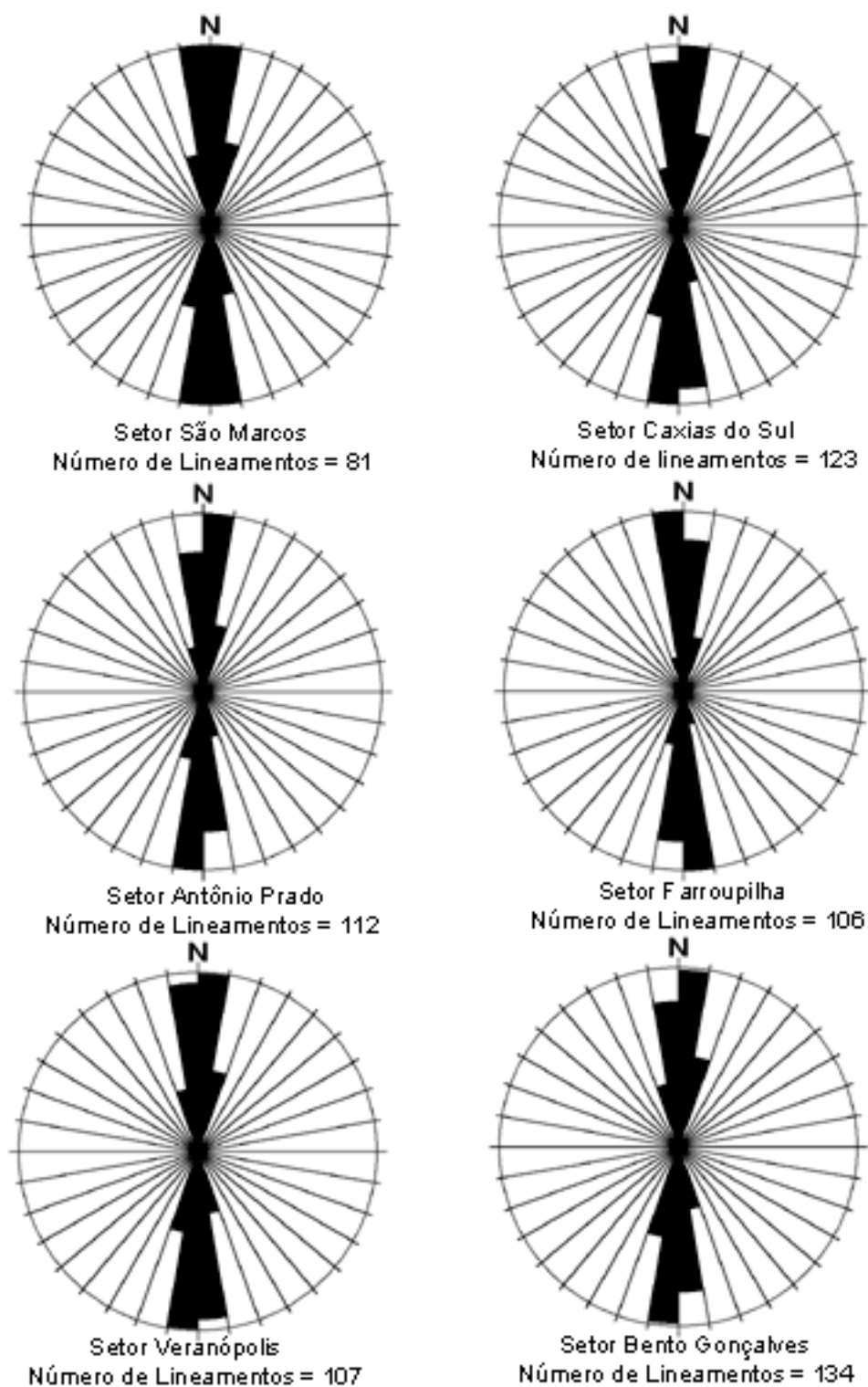


Figura 109 - Histograma de freqüência circular com os lineamentos de cada setor - Grupo 1.

⇒ Grupo 2: é constituído por lineamentos com orientação nordeste entre N15 - 84E; as direções preferências estão no intervalo N30 - 60E (Fig. 110). Como no grupo anterior, foram analisados seis setores, denominados de São Marcos, Caxias do Sul, Antônio Prado, Farroupilha, Veranópolis e Bento Gonçalves.

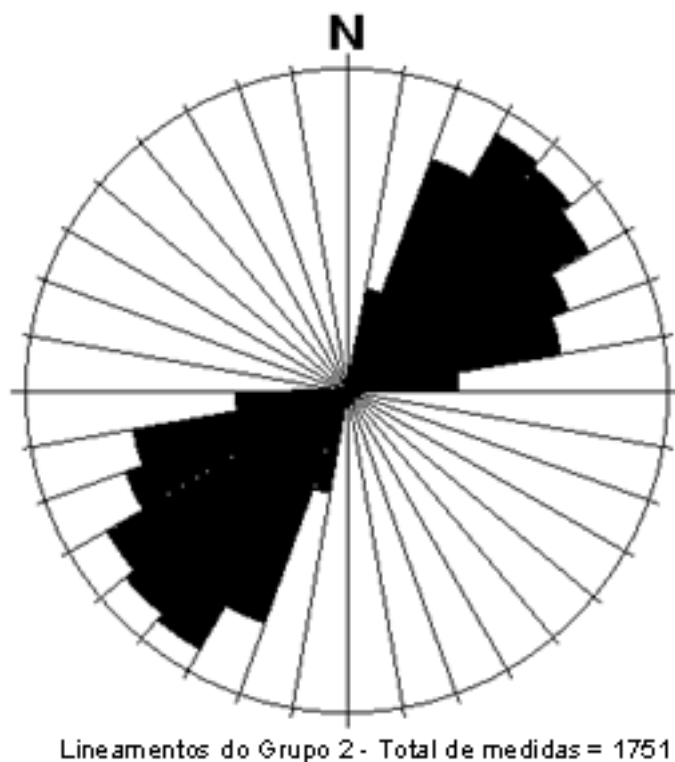


Figura 110 - Histograma de frequência circular com os lineamentos do Grupo 2.

Analisando-se o histograma de frequência circular dos lineamentos do grupo 2 (Fig. 111), observa-se que, dependendo do setor, há uma orientação preferencial. No caso, o rumo N40 - 50E é predominante nos setores Farroupilha e São Marcos e secundário nos outros. As orientações principais dos demais setores são:

- Antônio Prado: N30 - 40E;
- Bento Gonçalves: N20 - 40E;
- Caxias do Sul: N50 - 60E; N60 - 70E e N30 - 40E;
- Veranópolis: N50 - 60E e N30 - 40E

Os histogramas por setor ainda mostram que se pode distinguir duas modas (sub-grupos) para o caso dos setores Caxias do Sul, Antônio Prado e Veranópolis: N15 - 45E e N45 - 80E. Esses subgrupos estão misturados no setor Bento Gonçalves, apesar do predomínio do primeiro. No caso dos setores São Marcos e Farroupilha, os dados parecem pertencer ao segundo sub-grupo. O resultado da estatística vetorial é apresentado na tabela XXIII.

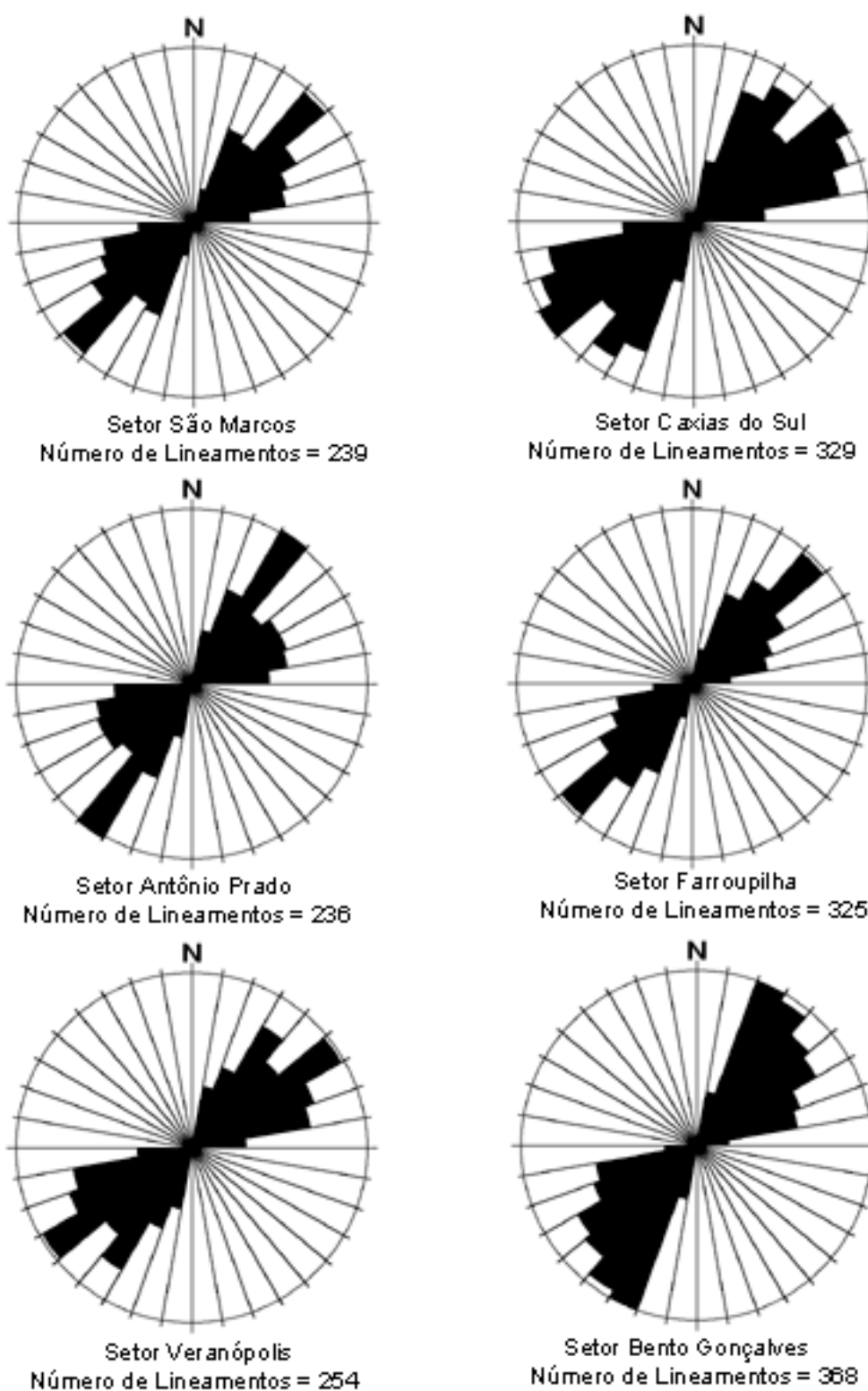


Figura 111 - Histograma de frequência circular com os lineamentos de cada setor - Grupo 2.

Tabela XXIII – Resultado do tratamento estatístico vetorial dos lineamentos do grupo 2.

Setores	Nº de Medidas	R (m)	C _m (m)	θ _m (graus)	S _v
Todos	1751	1519173,11	867,6031	48,770435	0,942977
São Marcos	239	207644,019	868,8034	50,255952	0,941826
Caxias do Sul	329	309287,552	940,0837	50,009335	0,938936
Antônio Prado	236	173173,020	733,7840	49,788025	0,935096
Farroupilha	325	318180,503	979,0169	48,351671	0,949570
Veranópolis	254	171635,899	675,7319	51,728125	0,944950
Bento Gonçalves	368	340349,187	924,8619	45,118894	0,947359

⇒ Grupo 3: é representado por lineamentos noroeste com orientação entre N15 - 75W, que apresentam direções preferências em N40 - 50W e, secundárias, N30 - 40W e N50 - 60W (Fig. 112). Como no grupo anterior, foram analisados seis setores, denominados de São Marcos, Caxias do Sul, Antônio Prado, Farroupilha, Veranópolis e Bento Gonçalves (Fig. 113).

Analisando-se o histograma de frequência circular dos lineamentos do Grupo 3, observa-se que a orientação preferencial do grupo todo (N30 - 40W) é evidenciada nos setores Antônio Prado, Caxias do Sul, Farroupilha, São Marcos e Veranópolis. O setor de Bento Gonçalves, no entanto, apresenta uma orientação preferencial N50 - 60W, que é evidenciada como secundária na maioria dos outros setores.

Como no caso do Grupo 2 de lineamentos, os diagramas circulares de frequência por setor (Fig. 59) mostram, claramente, a existência de dois sub-grupos (N15 - 45W e N45 - 75W) nos setores Antônio Prado, Farroupilha, Veranópolis e Bento Gonçalves. No setor Farroupilha, o limite dos sub-grupos está no rumo N35W. Nos setores São Marcos e Caxias do Sul, os lineamentos predominantes parecem pertencer ao segundo sub-grupo. O resultado da estatística vetorial é apresentado na tabela XXIV.

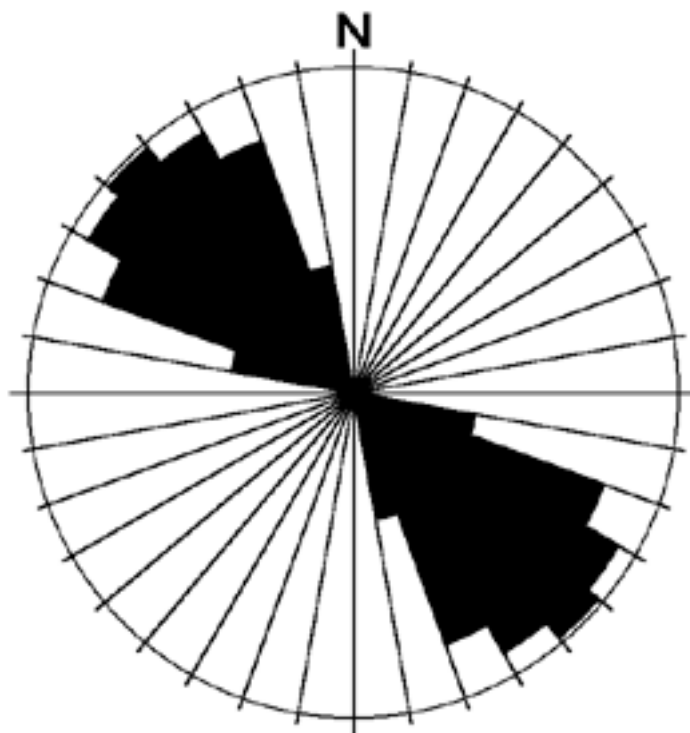


Figura 112 - Histograma de frequência circular com os lineamentos do Grupo 3.

Tabela XXIV – Resultado do tratamento estatístico vetorial dos lineamentos do grupo 3.

Setores	Nº de Medidas	R (m)	C _m (m)	θ _m (graus)	S _v
Todos	1316	1174478,49	892,4608	315,5513	0,957205
São Marcos	136	132593,314	974,9508	314,4286	0,961119
Caxias do Sul	259	258148,142	996,7109	315,7071	0,961593
Antônio Prado	192	154912,734	806,8372	313,3577	0,953894
Farroupilha	214	212636,087	993,6266	314,60523	0,960278
Veranópolis	251	161198,497	642,2251	316,94248	0,953329
Bento Gonçalves	264	255314,136	967,0990	317,21761	0,953914

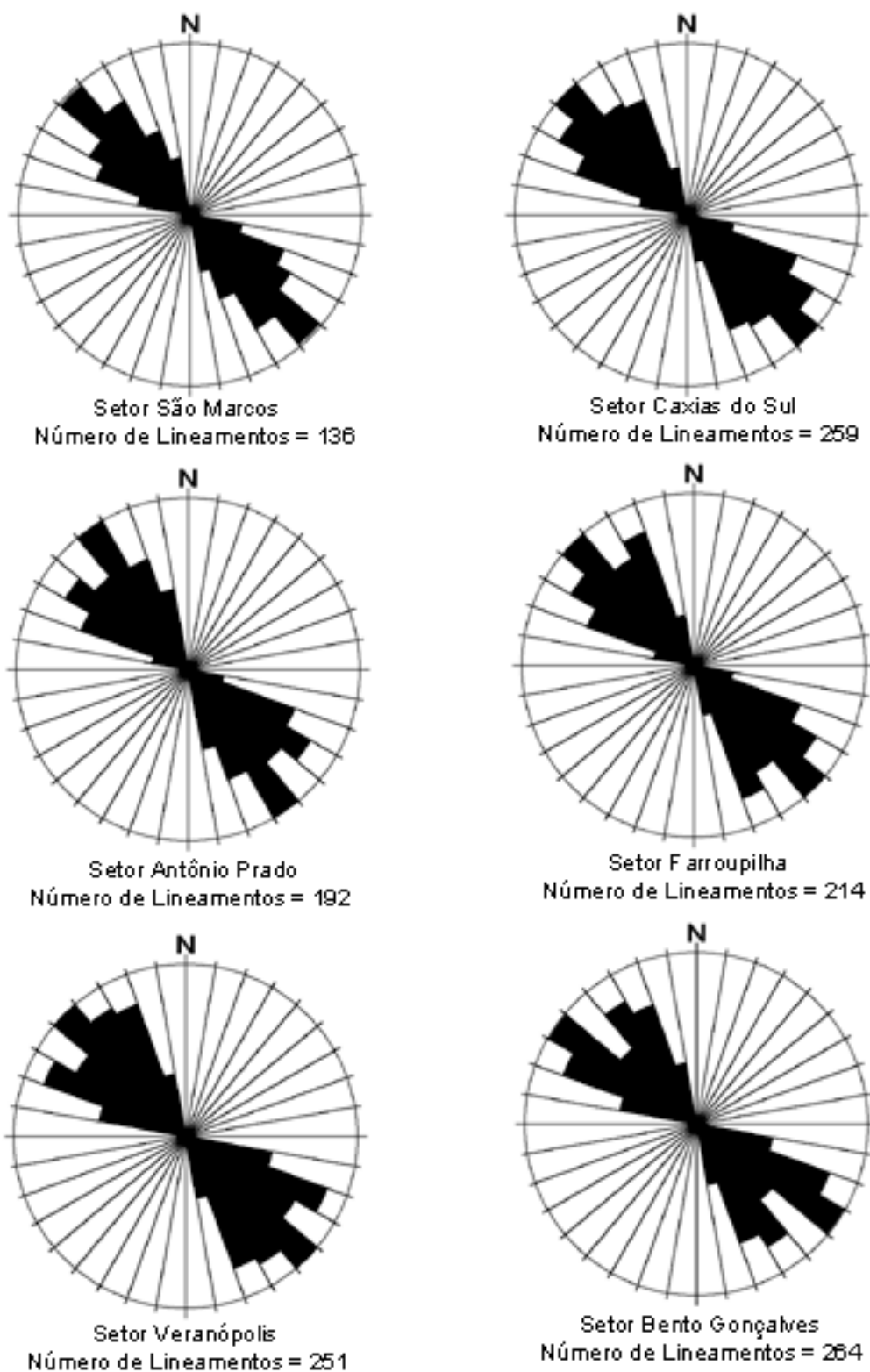


Figura 113 - Histograma de frequência circular com os lineamentos de cada setor - Grupo 3.

⇒ Grupo 4: é formado por lineamentos leste-oeste com orientação entre N85 - 90E e N75 - 90W, cuja direção preferencial é N80 - 90W (Fig. 114). Como no grupo anterior, foram analisados seis setores, denominados de São Marcos, Caxias do Sul, Antônio Prado, Farroupilha, Veranópolis e Bento Gonçalves (Fig. 115), que apresentaram a mesma tendência para a orientação principal. O resultado da estatística vetorial é apresentado na tabela XXV.

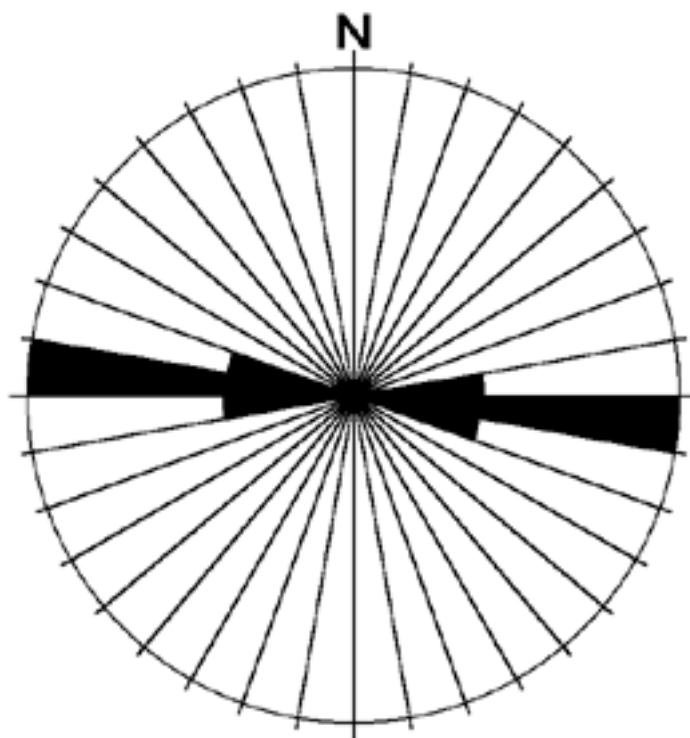


Figura 114 - Histograma de frequência circular com os lineamentos do Grupo 4.

Tabela XXV – Resultado do tratamento estatístico vetorial dos lineamentos do grupo 4.

Setores	Nº de Medidas	R (m)	C _m (m)	θ _m (graus)	S _v
Todos	424	394581,029	930,6156	84,314563	0,996232
São Marcos	81	49525,8431	1010,7314	84,753053	0,998102
Caxias do Sul	66	59915,1668	907,8056	85,136244	0,998121
Antônio Prado	69	66879,5147	969,2683	84,170834	0,997400
Farroupilha	93	86770,1878	933,0128	83,464187	0,991445
Veranópolis	49	60087,2391	741,8178	84,109135	0,996686
Bento Gonçalves	66	71422,1745	1082,1542	84,661724	0,997997

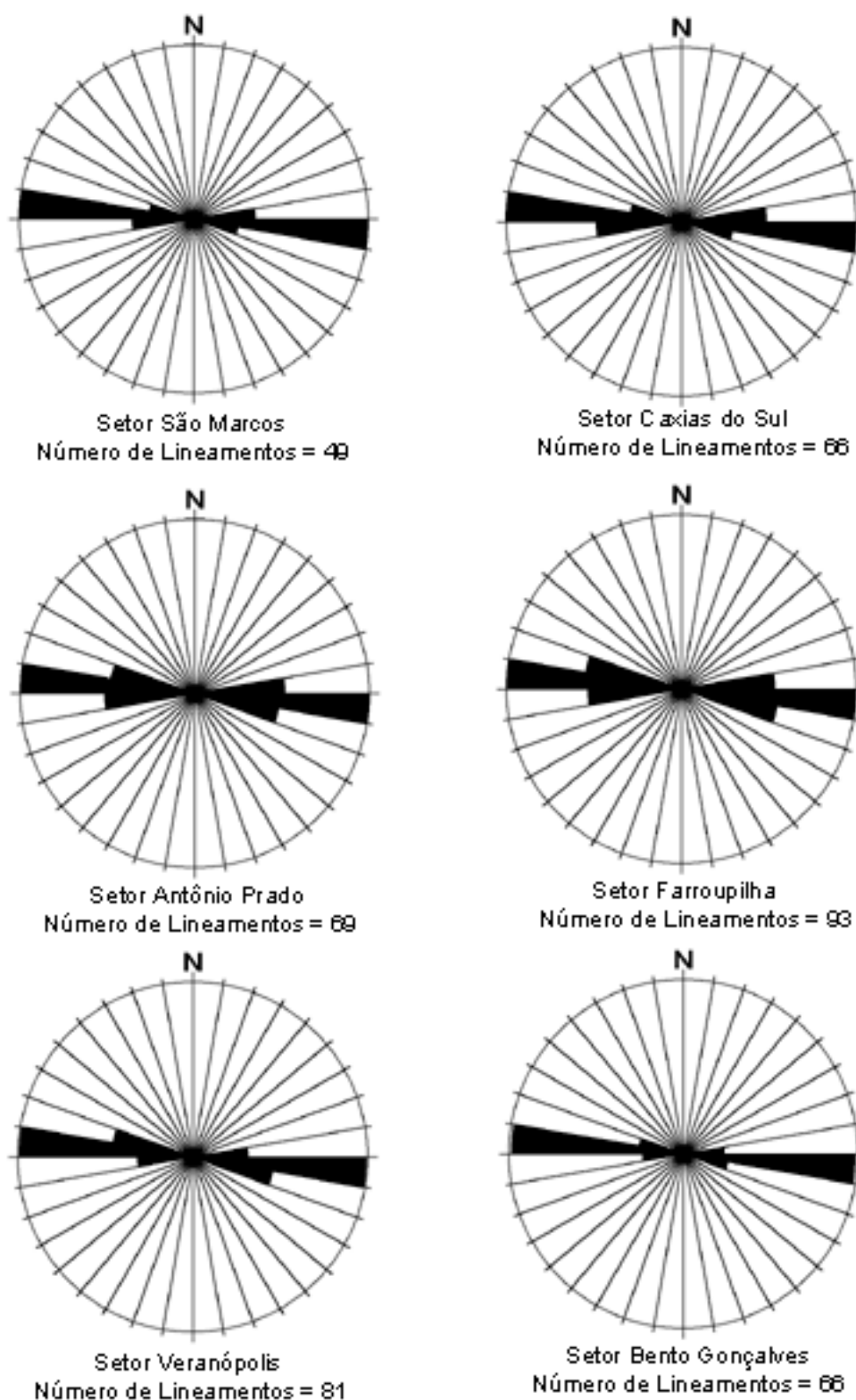


Figura 115 - Histograma de frequência circular com os lineamentos de cada setor - Grupo 4.

6.1.2.3 – Análise dos resultados

O tratamento estatístico vetorial proporcionou uma caracterização para os lineamentos dos diferentes grupos e setores. Em geral, a significância do vetor resultante ($>0,93$) indica uma pequena dispersão dos dados e fortalece a confiança desse tratamento estatístico.

Na análise dos quatro grupos, sem levar em conta os setores, observa-se que os comprimentos médios dos vetores estão próximos e variam entre 855 a 892 metros. Somente o grupo dos lineamentos leste-oeste apresenta um comprimento um pouco superior aos outros, na faixa de 930 metros. Com relação aos azimutes médios de cada um dos grupos, verifica-se que os mesmos estão associados às orientações preferenciais e secundárias identificadas em campo. Por outro lado, ao analisar os setores de cada um dos quatro grupos, observa-se que ocorrem variações mais significativas com relação aos comprimentos médios dos vetores e menores com relação aos valores dos azimutes médios. Isso comprova as evidências de campo, que mostram a existência de uma variação do comportamento estrutural para cada região.

Os resultados encontrados para cada um dos quatro grupos são:

- Grupo 1: observa-se que o comprimento médio dos lineamentos é variável, dependendo do setor. O valor máximo é 990,7139 metros para o setor Farroupilha e o mínimo é 630,463 metros para Veranópolis. O azimute médio dos lineamentos, apresentou pouca variação, entre $5,7890^\circ$ e $7,57566^\circ$;
- Grupo 2: verifica-se que os setores apresentam variações nos valores para comprimento médio dos lineamentos entre 675,7319 metros no setor Veranópolis até 979,0169 metros no setor Farroupilha. Além disso, para as regiões de Bento Gonçalves, Farroupilha e Caxias do Sul, foram encontrados valores acima de 920 metros para esses comprimentos. Com relação ao azimute médio, houve pequenas variações, com valores entre $45,1189^\circ$ e $51,7281^\circ$. As regiões de São Marcos, Caxias do Sul e Veranópolis apresentaram valores de azimute em torno de 50° ;
- Grupo 3: os valores encontrados para o comprimento médio dos lineamentos também indicaram pequenas variações, entre 642,2251 metros (Veranópolis) até 974,9508 metros (São Marcos). Como no caso do grupo 2, as regiões de Bento Gonçalves, Farroupilha, Caxias do Sul e São Marcos apresentaram valores aproximados para esse comprimento. Os azimutes médios encontrados variaram entre $313,3577^\circ$ até $317,2176^\circ$;

- Grupo 4: nesse grupo foram encontrados os maiores valores para os comprimentos médios dos lineamentos, que variaram entre 741,8178 metros (Veranópolis) até 1082,1542 metros (Bento Gonçalves). As regiões de São Marcos e Bento Gonçalves caracterizaram-se por comprimentos acima de 1000 metros. No caso dos azimutes médios, houve uma tendência na orientação 84° , apresentada pela maioria dos setores.

Essa análise mostra que o Setor Veranópolis, para cada um dos quatro grupos, possui os menores valores para comprimento médio dos lineamentos e que os lineamentos leste-oeste são às estruturas de maior porte na região, levando-se em conta os valores da média.

A análise cinemática realizada no item Geologia Estrutural – Dados de Campo (6.1.1), especialmente a análise dinâmica do fraturamento (item 6.1.1.3), são a base para o entendimento das relações espaciais dos lineamentos (fraturas). O trabalho desenvolvido por Dunne & Hancock (1994), que se baseia no estudo da arquitetura dos sistemas de juntas, permite inferir o tipo de estrutura que existe numa determinada área. Assim, a análise do mapa estrutural da região permite identificar padrões de fratura na forma de “Y”, “X” com direções variadas para os quadrante NE e NW. Essa arquitetura está relacionada com fraturas híbridas e de cisalhamento, o que está de acordo com o que foi identificado com base nos dados de campo. Além disso, pode-se verificar o padrão “T” para a região, com orientações próximas a norte-sul e leste-oeste e, secundariamente, com orientações para NE e NW. Esse padrão evidencia a presença de fraturas ortogonais, fato determinado na análise dos histogramas de frequência circular das fraturas, bem como no estudo dos campos tensionais.

6.2 – Fator relevo

O fator relevo corresponde a um dos condicionantes dos aquíferos fraturados, por conta principalmente do grau de dissecação. Conforme Hausman (1995), os processos de erosão que atuam na região do Planalto são responsáveis pela exposição de sistemas de fraturas que acabam sendo interceptadas pela superfície. Com isso, nesses locais, há a formação de fontes (regiões de descarga), prejudicando a formação de zonas de acumulação de água que serviria de recarga para os aquíferos fraturados. Outra relação há com o sistema de drenagem; os processos de erosão são mais fortes ao longo de zonas de fraturas, promovendo a formação de vales e a adaptação da drenagem a essas estruturas. Assim, ocorre a formação do relevo.

Numa análise sobre o mapa topográfico gerado a partir da digitalização das folhas topográficas em escala 1:50.000, do Serviço Geográfico do Exército, observa-se que a área, em geral, apresenta um relevo dissecado com algumas áreas com relevo ondulado (médio a forte) e raras regiões planas. A configuração geral da região evidencia a existência de um alto topográfico na região de Caxias do sul, apresentando mergulhos para norte e noroeste em direção à calha do Rio das Antas. Levando em consideração o eixo desse rio o mergulho geral da área é para o sentido leste-oeste a sudoeste (Fig. 116).

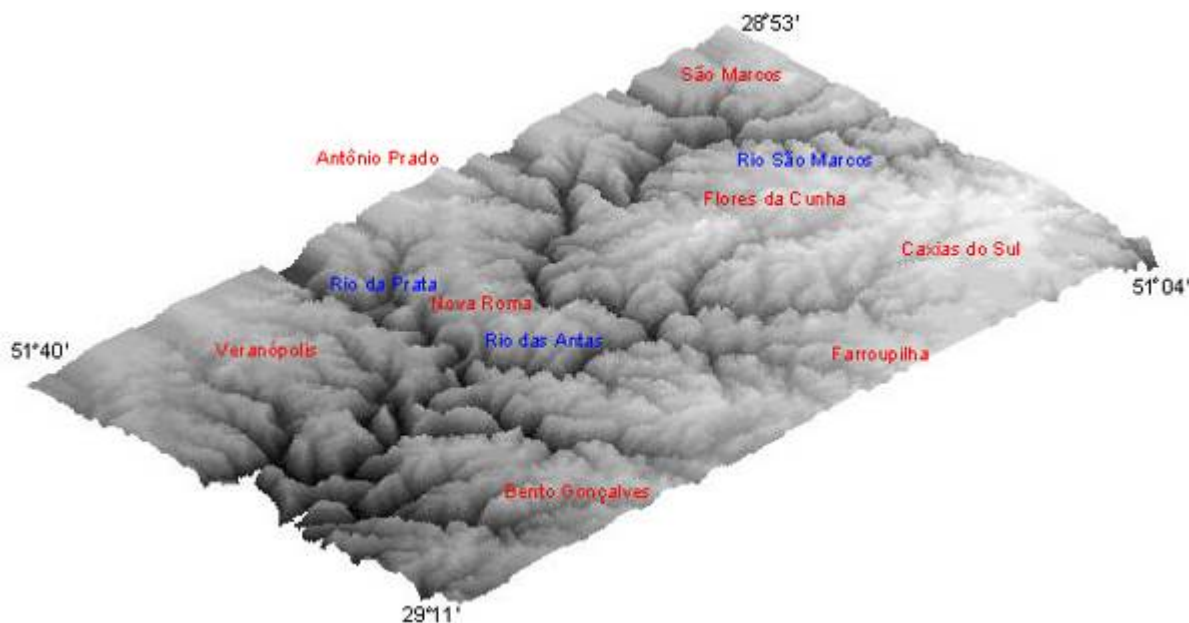


Figura 116 – Modelo digital de elevação do relevo da área de estudo (elaborado por meio do mapa digital com o programa SPRING)

Com relação ao grau de dissecação do relevo, observa-se a existência de três grandes regiões, associadas às principais drenagens (a determinação do grau de dissecação foi realizada com base na observação da rugosidade apresentada no modelo digital de elevação, bem como na análise das classes de declividade). A primeira das regiões corresponde à calha do Rio das Antas, que é caracterizada pela presença de um modelo de dissecação forte. Essa morfoestrutura tem orientação principal para leste-oeste e é marcada por um vale amplo (com largura de 1000 metros em média e desníveis de aproximadamente 450 metros) na forma de “V”, com vertentes retilíneas e íngremes, vertentes convexas-côncavas, escarpas e terraços escalonados.

O Rio das Antas, ao longo do vale é marcado por trechos retilíneos e sinuosos (com a formação de “ferraduras”); em alguns pontos, esses segmentos fluviais marcam um padrão ortogonal. Os afluentes do lado sul estão associados a vales com grau de dissecação forte a

médio e a orientação preferencial desses cursos fluviais é noroeste (alguns apresentam orientação norte-sul). Já os afluentes do lado norte, são de menor porte (exceção deve ser feita com relação ao Rio da Prata) e possuem orientação norte-sul e noroeste-sudeste.

A segunda região, com relevo dissecado, corresponde ao vale do Rio da Prata. Essa morfoestrutura possui orientação preferencial norte-sul e está associada a um vale na forma de “V”. Esse vale é amplo (em média 800 metros de largura, com desníveis de aproximadamente 400 metros) e é caracterizado pela presença de vertentes retilíneas, íngremes, convexas-côncavas, escarpas e terraços escalonados.

O Rio da Prata apresenta trechos retilíneos e sinuosos com alguns segmentos evidenciando um padrão ortogonal. Os afluentes do lado direito (leste) são de maior porte e constituem arroios com orientação leste-oeste e nordeste; à esquerda (lado oeste), os afluentes são de menor porte e apresentam orientação noroeste-sudeste.

A terceira região corresponde ao vale do Rio São Marcos, que é caracterizada por um menor grau de dissecação que as outras duas regiões. Essa morfoestrutura possui duas orientações preferenciais: i) o sentido leste-oeste é evidenciado na região próxima a Ana Rech e ii) o sentido noroeste é observado a partir da região próxima à ponte da BR116. Esse vale apresenta, em média, 400 metros de largura e é caracterizado pela presença de vertentes retilíneas e íngremes, vertentes convexas e côncavas, escarpas e terraços escalonados. O Rio São Marcos apresenta uma predominância de trechos retilíneos (em alguns pontos, evidenciam um padrão ortogonal, como na região de confluência do Arroio Faxinal com o Rio São Marcos) e sinuosos.

A orientação preferencial das morfoestruturas observadas nas regiões descritas acima, bem como a geometria do sistema de drenagem, evidenciam a presença de um forte controle tectônico, responsável pela estruturação do relevo e pela disposição do sistema de drenagem.

Na região de estudo, há áreas que apresentam modelados de relevo com baixos graus de dissecação. Isso é observado, principalmente, nas regiões de Caxias do Sul e Farroupilha.

No setor de Caxias do Sul, o relevo é marcado por superfícies com grau de ondulação suaves a fortes; para norte, em direção ao vale do Rio São Marcos, há a passagem para um relevo mais dissecado. A região de Farroupilha é marcada por superfícies onduladas (grau forte) com a formação de blocos diferenciados no sentido Farroupilha - Caxias do Sul. O setor

de Veranópolis é caracterizado pela presença de superfícies onduladas (grau médio a forte) e por alguns altos topográficos (região de Sapopema). A região de Nova Roma está inserida num alto topográfico com forma de “crista”, limitado pelos vales do Rio da Prata e Rio das Antas; a superfície é marcada por um relevo fortemente ondulado.

Analisando-se as características morfoestruturais da região, observa-se que as áreas com modelados dissecados de relevo (graus médios a fortes de dissecação) são áreas menos favoráveis para a ocorrência de água subterrânea, pois há uma tendência dessas áreas serem regiões de descarga, caracterizadas pela formação de fontes.

Esse fator corresponde a um plano de informação e será utilizado para a realização de uma análise detalhada do relevo. Para isso, será gerado o modelo numérico do terreno e efetuado um fatiamento visando à obtenção de um mapa de classes de declividade. Com isso, as regiões com diferentes graus de dissecação poderão ser melhor analisadas e individualizadas.

6.3 – Fator litologia

O fator litologia também é num dos condicionantes dos aquíferos fraturados, embora tenha um grau de importância menor quando comparado com os outros. A relação principal está associada com a estruturação dos derrames de lavas, visto que as estruturas primárias podem influenciar a circulação de água, quando conectadas a sistemas de fraturas. Outra relação ocorre com a hidroquímica, onde as rochas básicas e ácidas influenciam nas características químicas da água subterrânea.

O mapeamento geológico foi realizado por meio de fotointerpretação e de levantamentos de campo. Nesse caso, foram realizados quatro perfis na região, analisados 107 afloramentos e coletadas amostras das diferentes litologias. A descrição das rochas foi principalmente macroscópica; para algumas amostras, foi realizada uma análise microscópica. Os dados obtidos com a fotointerpretação e o levantamento de campo serviram para a elaboração de um plano de informação, em escala 1:50.000, que será utilizado na etapa seguinte referente à integração de dados.

Na área de estudo, foram identificadas duas grandes seqüências de rochas vulcânicas: uma básica e outra ácida. Em geral, a seqüência básica tem uma ocorrência relacionada com a

altitude, pois predomina abaixo dos 500 metros (aproximadamente); a seqüência ácida é identificada principalmente acima da altitude de 500 metros. Cabe salientar que, em função da escala de trabalho, bem como das análises realizadas nas amostras (principalmente observações macroscópicas), não foi possível identificar intercalações das duas seqüências vulcânicas.

A seqüência vulcânica básica é representada principalmente por basaltos e andesitos. Macroscopicamente, os basaltos apresentam textura afanítica e fanerítica (fina a muito fina), com colorações variadas entre o cinza escuro a médio, cinza esverdeado, marrom acinzentado, marrom avermelhado e castanho. As cores de alteração são marcadas principalmente por tonalidades avermelhadas a alaranjadas. Algumas amostras apresentam bandamento mineralógico (ressaltado quando intemperizadas) e outras uma textura mosqueada, marcada por diferenças de tonalidades (em geral, basaltos de coloração cinza com pontos castanho a bordô). Normalmente, os basaltos podem apresentar vesículas e amígdalas de tamanho milimétrico a centimétrico, preenchidas principalmente por sílica (quartzo e calcedônia) e zeolitas (Fig. 117). Microscopicamente, os basaltos são caracterizados pela presença de piroxênio na forma de auxita e plagioclásio; como minerais acessórios, ocorrem esfeno e opacos (óxidos de ferro).

Os andesitos são rochas que apresentam textura fanerítica fina a muito fina, com colorações variadas entre os tons de cinza. Macroscopicamente, sua individualização dos basaltos é difícil e é geralmente necessária a análise microscópica. Nesse caso, os andesitos são caracterizados pela presença mineralógica de plagioclásio, feldspato, piroxênio e quartzo (pequena percentagem); os acessórios são representados por esfeno, apatita e opacos (óxidos de ferro).

A seqüência ácida é representada por riodacitos, dacitos e riolitos; os riodacitos são mais comuns (Fig. 118). Macroscopicamente, essas rochas apresentam textura afanítica e fanerítica (fina a muito fina) e possuem colorações cinza (tonalidade claras a médias) e marrom avermelhadas. Quando alteradas, os plagioclásios e feldspatos são ressaltados, o que fornece um aspecto mosqueado para a rocha, caracterizado pela presença de pontos brancos a cinza esbranquiçado imersos numa matriz mais acinzentada. Algumas litologias apresentam estrutura de fluxo evidenciada tanto em rochas sãs como alteradas. Na análise microscópica, as litologias ácidas apresentam mineralogia baseada em quartzo, feldspato, plagioclásio e piroxênio; os acessórios são basicamente esfeno, zircão e opacos.



(a)



(b)

Figura 117 – Basaltos da Formação Serra Geral: (a) rocha com bandamento mineralógico (afloramento 1 do perfil Bento Gonçalves-Veranópolis); (b) basalto vesicular a amigdalóide com orientação das estruturas (afloramento 1 do perfil Caxias do Sul – Antônio Prado – UTM 481597mE e 6798215mN).

Associada às rochas vulcânicas ácidas e básicas, ocorrem litologias representadas por brechas vulcânicas (mais comuns na seqüência básica) e por níveis de vidro vulcânico (mais comuns na seqüência ácida).

As brechas vulcânicas são litologias que apresentam características variadas, mas três tipos principais são mais comuns. Um desses tipos é representado pelas brechas hidráulicas localizadas em diferentes partes dos derrames vulcânicos e nas fraturas. Essas litologias são caracterizadas por fragmentos angulosos da própria rocha envoltos por minerais de sílica (quartzo e calcedônia) e carbonato. As brechas hidráulicas ocorrem em ambas as seqüências, básicas e ácidas (Fig. 119).

Um segundo tipo é representado por brecha de coloração marrom avermelhada contendo fragmentos centimétricos e angulosos de basaltos com vesículas e amígdalas e arenitos metamorfizados. Em geral, o material que envolve os fragmentos corresponde a arenitos e zeolitas (Fig. 120). Essa litologia é mais comum de ser encontrada na base e no meio da seqüência básica.

O terceiro tipo é uma brecha de coloração variada caracterizada pela presença de fragmentos de rochas vulcânicas (basaltos maciços, basaltos vesiculares a amigdalóides), angulosos a arredondados de tamanhos centimétricos (Fig. 121). O material que envolve os fragmentos, em geral, é mineral como zeolitas. Esse tipo litológico é mais comum no topo da seqüência básica e em partes da seqüência ácida.

Os vidros vulcânicos são caracterizados por textura afanítica, com leve brilho vítreo, de coloração preta a avermelhada (Fig. 122). Em geral, são maciços, mas podem apresentar vesículas e amígdalas esparsas. Nesse caso, o preenchimento é dado por sílica (quartzo e calcedônia, principalmente). Os vidros vulcânicos ocorrem em níveis intercalados na seqüência de rochas vulcânicas ácidas.

Em escala regional, há um nível litológico que marca a passagem das seqüências básicas para ácidas, o qual está representado por camadas de vidro vulcânico (vitrófiro) de coloração preta e avermelhada e camadas de arenitos recozidos de coloração avermelhada (*intertraps*). A espessura desse nível é variável, mas a média está em 5 metros. Essa seqüência pode ser considerada como um balizador estratigráfico, pois foi observada em todos os perfis realizados, sempre próxima à altitude de 500 a 550 metros (Fig. 123, 124).



Figura 118 – Riodacitos da seqüência ácida (afloramento 15 do perfil Bento Gonçalves-Veranópolis).



Figura 119 – Brecha hidráulica desenvolvida sobre rochas vulcânicas de estrutura maciça (afloramento 9 – Perfil Bento Gonçalves - Veranópolis).



(a)

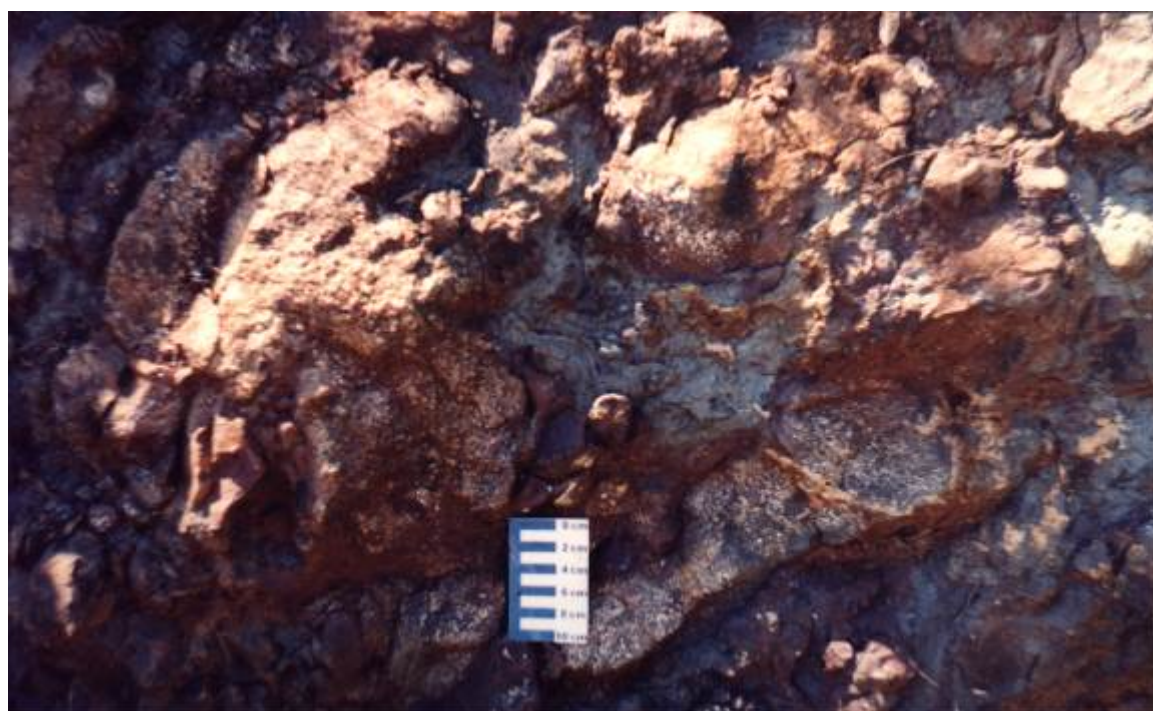


(b)

Figura 120 – Brechas vulcânicas associadas à porção basal e mediana da seqüência de rochas vulcânicas básicas: (a) afloramento 28 do perfil Farroupilha-Nova Roma; (b) afloramento 3 do perfil Caxias do Sul – Antônio Prado.



(a)



(b)

Figura 121 – Brechas vulcânicas associadas às porções de topo da seqüência básica: (a) brecha associada a basalto vesicular a amigdalóide (afloramento 8 – perfil Caxias do Sul – São Marcos); (b) brecha com fragmentos de rocha vesicular a amigdalóide (afloramento 11 – Perfil Farroupilha – Nova Roma).



(a)



(b)

Figura 122 – Vidros vulcânicos da seqüência de rochas vulcânicas ácidas: (a) na base do perfil há um pacote de vitrófiros e, no topo, ocorrem rochas vulcânicas com geodos centimétricos (afloramento 11 – Perfil Caxias do Sul – São Marcos); (b) intercalação de vidro vulcânico no topo, com arenitos metamorfizados na base (afloramento 14 – Perfil Farroupilha – Nova Roma).

A observação das características estruturais dos derrames, na região permitiu identificar 6 derrames principais para a seqüência de rochas vulcânicas básicas e três para a seqüência ácida, conforme pode ser observado nas colunas estratigráficas elaboradas a partir dos dados obtidos no levantamento de campo (Fig. 123, 124). O critério de separação de derrames adotado foi litológico, mas também levou em consideração a estruturação proposta por Leinz (1949) e Roisenberg (1990). Nesse caso, a ocorrência de zonas vesiculares a amigdalóides correspondem a feições de topo de derrame que podem ou não estar associadas a zonas de brechas. No entanto, deve-se ter atenção especial para as zonas brechadas, pois, quando elas estão associadas a litologias com estruturação maciça, indicam provavelmente a base de derrames. Para a seqüência de rochas ácidas, o critério de separação de derrames adotado foi a ocorrência de níveis de vidro vulcânico e zonas brechadas.

Os derrames identificados na seqüência de rochas vulcânicas básicas são caracterizados por apresentarem as seguintes características:

- espessura: em geral, são menos espessos (30 a 50 metros) na base da seqüência e mais espessos (80 a 120m) a partir do meio em direção do topo do pacote;
- estruturação: as principais estruturas primárias estão representadas por amplas zonas basais (constituída por rochas maciças com ou sem vesículas e amígdalas), de disjunção vertical, e por zonas vesiculares a amigdalóides. As camadas com brechas vulcânicas ocorrem associadas às zonas vesiculares a amigdalóides e, menos freqüente, às maciças. As zonas de disjunção horizontal são pequenas e ocorrem somente em alguns derrames.

Os derrames individualizados na seqüência de rochas ácidas apresentam as seguintes características:

- espessura: em geral, apresentam uma espessura mais ou menos regular, pois não há grandes variações (média de 50 metros);
- estruturação: as estruturas primárias principais são as zonas basal, de disjunção horizontal, e as zonas vesiculares a amigdalóides. A zona basal é caracterizada pela presença de níveis de vidro vulcânico e, secundariamente, por camadas de rochas maciças. Já a zona de disjunção horizontal é ampla e, em geral, representa a maior parte do derrame; o espaçamento dos planos de disjunção é variável (centimétrico, decimétrico a métrico). As zonas vesiculares a amigdalóides são de pequena espessura e não ocorrem em todos os derrames identificados. Já as zonas de disjunção vertical são pouco representativas, pois são identificadas somente em alguns derrames, quando apresentam pequena espessura.

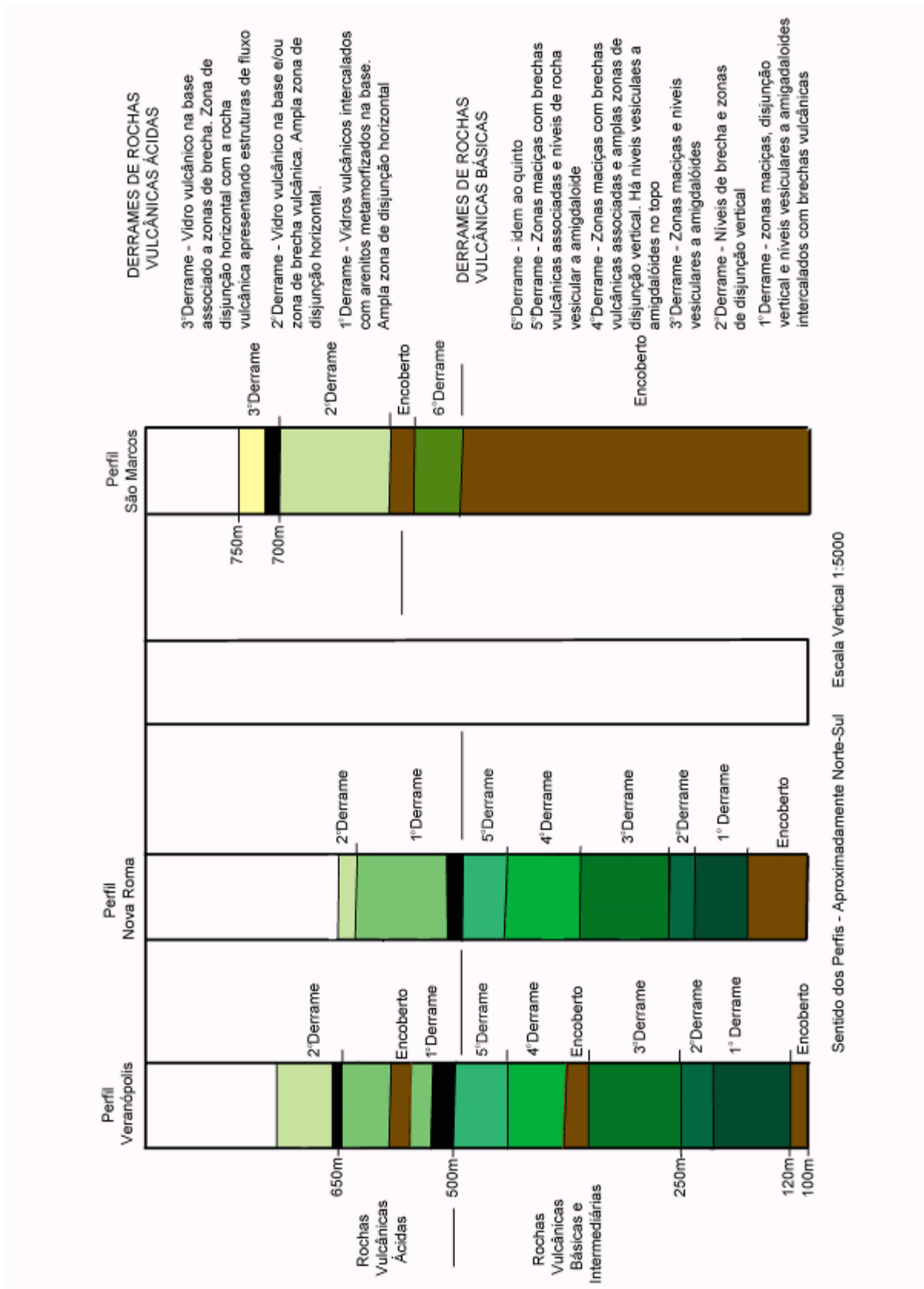


Figura 123 – Representação esquemática das colunas estratigráficas da seqüência básica e ácida dos setores ao norte do Rio das Antas.

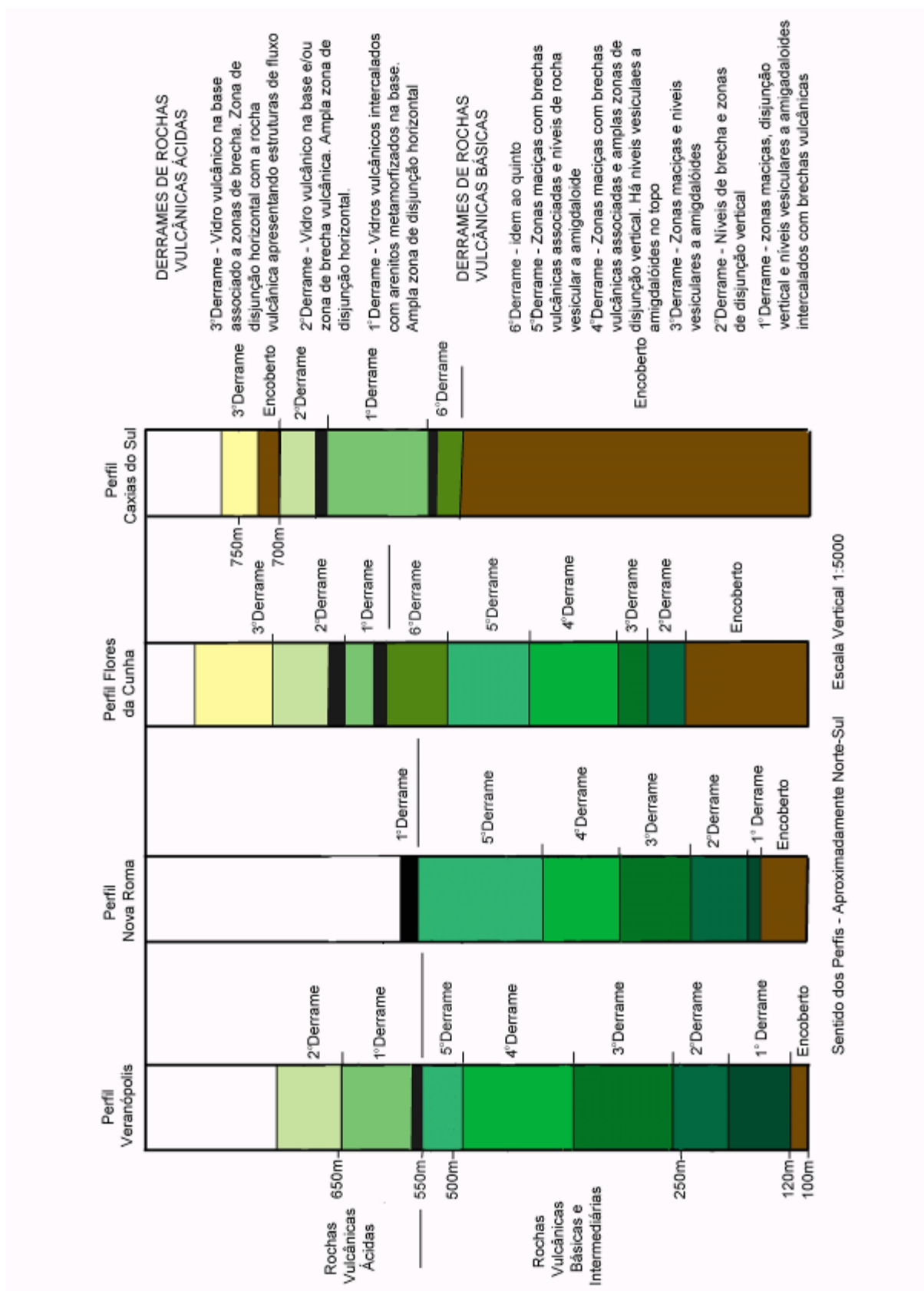


Figura 124 – Representação esquemática das colunas estratigráficas da seqüência básica e ácida dos setores ao sul do Rio das Antas.

A análise da estruturação identificada e da sua relação com os aquíferos fraturados, mostra que a estrutura primária de maior importância está associada às zonas vesiculares a amigdalóides. Nesse caso, deve-se fazer uma distinção entre rochas que apresentam vesículas e amígdalas com esse tipo de zona. Nesse último caso, as litologias pertencentes a essas zonas possuem uma porcentagem elevada de vesículas e amígdalas e formam pacotes espessos (Fig. 125); nas rochas, por outro lado, há pequenas porcentagens dessas estruturas. Assim, as zonas vesiculares por apresentarem essas características, estão mais sujeitas aos processos de intemperismo, que facilitam a abertura e a conexão dos vazios existentes na rocha e que auxiliam no processo de circulação da água. Cabe salientar que a zona vesicular, por si só, não constitui num bom aquífero; mas, quando associada ou conectada a estruturas tectônicas, apresenta grandes chances de encontrar bons volumes de água subterrânea. Rosa Filho *et al.* (1985), confirmam a relação existente entre fraturas e níveis vesiculares a amigdalóides com grandes vazões obtidas em poços tubulares.

Outro ponto importante associado a essas estruturas está relacionado com o contato entre as zonas vesiculares a amigdalóides com zonas maciças e camadas de brecha vulcânica (Fig. 126 e 127). Nesse contato, há a formação de planos que, quando intemperizados, tornam-se mais abertos e facilitam o processo de circulação da água. Esse fato foi observado no campo, onde, após um período de chuvas, formaram-se fontes nesses planos (Fig. 127a).

As outras estruturas primárias apresentam pequena influência na circulação da água subterrânea. Hausman (1995) salienta que a circulação associada às estruturas primárias é de caráter local e possuem pequeno intercâmbio. Isso ocorre devido à dificuldade de circulação, principalmente ao longo das disjunções horizontais, provocada pela pressão do pacote de rochas. Já no caso das estruturas verticais, há melhores condições para circulação da água. No entanto, quando as estruturas primárias estão associadas e conectadas a estruturas tectônicas há uma grande chance da ocorrência de aquíferos fraturados.

Com base nas características do fator litologia, pode-se salientar que o plano de informação geologia, a ser utilizado na fase de integração de dados, é importante principalmente com relação às áreas de ocorrência dos derrames básicos, pois estes apresentam zonas vesiculares a amigdalóides espessas. Além disso, o fator litologia pode ser utilizado nos trabalhos de perfuração, pois, ao analisar as amostras e identificar a posição do poço no derrame, pode-se optar pela desistência ou continuidade da perfuração (nesse caso, visando à interceptação de um novo derrame). Esse critério é utilizado por Giardin (1997).



(a)



(b)

Figura 125 – Pacotes de rochas vulcânicas vesiculares e amigdalóides: (a) zona de rochas vulcânicas vesiculares a amigdalóides na base associadas à zona basal (afloramento 23 – perfil Farroupilha – Nova Roma); (b) zona vesicular a amigdalóide (grau médio de alteração) associada à zona basal maciça (basalto no canto superior direito – afloramento 3 – perfil Bento Gonçalves – Veranópolis).



(a)



(b)

Figura 126 – Contato entre a zona de rochas vesiculares e amigdalóides com a zona maciça: (a) afloramento 15 do perfil Caxias do Sul – São Marcos; (b) afloramento 29 do perfil Farroupilha – Nova Roma.



(a)



(b)

Figura 127 – Contato entre zonas vesiculares a amigdalóides: (a) Contato entre rochas com vesículas e amígdalas (base), rocha vesicular a amígdalóide (meio) e zona maciça (topo). Na camada do meio há a ocorrência de uma fonte (afloramento 3 – Perfil Caxias do Sul – Farroupilha); (b) Contato entre zonas: na base, ocorrem rochas vesiculares a amígdalóides, no meio, camadas de brechas vulcânicas e, no topo, zona constituída por basaltos maciços.

6.4 – Fator solo

O fator solo também pode ser considerado como um condicionante dos aquíferos fraturados; a sua influência está associada ao tipo e espessura. Essas duas características têm influência nos processos de infiltração e, conseqüentemente, nos processos de recarga dos aquíferos, fortalecendo, assim, a importância de seu estudo.

Os estudos pedológicos da região foram embasados na análise de mapas existentes, nos dados coletados quando da realização dos quatro perfis geológicos e na interpretação de perfis de poços tubulares. Os trabalhos de mapeamento pedológicos utilizados foram de escala regional (1:750.000 e 1:250.000) RADAM/BRASIL (1986) e Brasil (1973) e, de escala de detalhe (1:50.000) Falcade & Mandelli (1999). Esses dados foram utilizados para a elaboração de uma mapa de solos em escala 1:50.000.

Para a área de estudo, identificou-se três grandes associações de classes de solo, conforme pode ser observado na tabela XXVI.

Tabela XXVI – Associações de classes de solo existentes na região e as unidades amostrais correspondentes.

Associação de Solos	Tipos de Solos	Unidades Amostrais
Litólicos e Cambissolos	Litossolos	Caxias
	Camissolos Brunos	Bom Jesus
Podzólicos e Cambissolos	Podzólicos Bruno	Oásis
	Acinzentados	
	Cambissolo Bruno	Farroupilha
Terra Bruna	Terra Bruna Estruturada	Carlos Barbosa

A primeira associação, denominada de solos litólicos e cambissolos, ocorre em regiões com relevos de forte a fraco grau de dissecação e estão associados as rochas vulcânicas básicas e ácidas.

Os solos litólicos são solos rasos, imaturos, caracterizados pela seqüência de horizontes A-D e, em alguns casos, A-C-D. O horizonte A tem espessura média de 30 cm,

com colorações preta ou bruno-acinzentada muito escura. Já o horizonte C, quando existente, é pouco espesso e é caracterizado por rochas alteradas e semi-alteradas. Esses solos, em função de sua pequena espessura e da sua associação a relevos fortes, são de baixa fertilidade e possuem restrições a seu uso. Com relação à infiltração, os solos litólicos apresentam velocidades médias de infiltração em torno de 174 mm/h (MAGNA, 1997).

Os solos denominados de Cambissolos Brunos são solos minerais, não hidromórficos, que apresentam uma seqüência de horizontes marcada pela transição A-B-C. Em geral, são solos pouco profundos, mas, em alguns locais, apresentam profundidades maiores, com colorações brunadas. O horizonte A é argiloso de coloração bruno a bruno escuro, com espessura média de 25 cm. O horizonte B é incipiente, imaturo, com textura argilosa e espessuras médias de 50 cm. Por fim, o horizonte C é caracterizado pela presença de seixos, blocos e matações de rochas imersos em uma matriz argilosa e rocha alterada. A velocidade de infiltração nos Cambissolos Brunos pertencentes à unidade amostral Bom Jesus apresentaram valores baixos; 21,65 mm/h foi a velocidade média encontrada (MAGNA, 1997).

A segunda associação é caracterizada pela presença de solos do tipo Podzólicos Bruno Acinzentados e Cambissolos Brunos (em alguns locais). Essa associação ocorre em regiões de relevo com baixo grau de dissecação, representados por superfícies fortemente a medianamente onduladas. Em geral, ocorrem associadas às rochas vulcânicas ácidas.

Os solos Podzólicos Bruno-Acinzentados são solos minerais, não hidromórficos, caracterizados por um perfil com transição de horizontes A-B-C. São solos pouco a muito profundos, de coloração brunada. No topo do horizonte B, há um escurecimento da camada, dado pelo acúmulo da matéria orgânica. O horizonte A é argiloso, plástico, com espessura média de 25 cm. Já o horizonte B é argiloso com colorações avermelhadas, estrutura em blocos e espessuras entre 50 a 150 cm. O horizonte C é caracterizado por rochas alteradas e pela presença de blocos e matações alterados envoltos por matriz argilosa. Esses solos apresentam velocidades de infiltração médias da ordem de 185,635 mm/h (MAGNA, 1997).

Os Cambissolos brunos dessa associação apresentam características semelhantes aos descritos anteriormente, mas a velocidade de infiltração é muito mais elevada do que no caso anterior; os valores médios são da ordem de 253,38 mm/h (MAGNA, 1997). Esse aumento está provavelmente relacionado com as condições de relevo, já que, nessa associação, os cambissolos ocorrem em regiões com baixo grau de dissecação do relevo.

A terceira associação é caracterizada pela presença de solos do tipo Terra Bruna Estruturada, que ocorrem em regiões com baixo grau de dissecação, caracterizadas por relevos ondulados (suaves a médios). Os solos do tipo Terra Bruna Estruturada são minerais, não hidromórficos, profundos, com textura argilosa e colorações bruno-avermelhadas a vermelha-amareladas. Esse solo apresenta um perfil caracterizado pela seqüência de horizontes A-B-C e por espessuras superiores a 2 metros. O horizonte A possui colorações avermelhadas escuras, textura argilosa e espessura média de 35 cm. O horizonte B possui coloração vermelho-amarelada, textura muito argilosa e espessuras em torno de 1 metro. Em geral, esses solos estão associados a altitudes acima de 700 metros e desenvolvem-se sobre rochas vulcânicas ácidas. Os valores de infiltração identificados nos testes de campo apresentaram média da ordem de 501,74 mm/h (MAGNA, 1997).

A análise das características do fator solo e das suas relações com os aquíferos fraturados, mostra que a associação de solos Terra Bruna possui as maiores espessuras e velocidades de infiltração. Isso faz com que as áreas de ocorrência desse tipo de solo possuam maior importância para a prospecção dos aquíferos fraturados. Em segundo lugar, vem a associação de solos Podzólicos e Cambissolos que possuem espessuras e velocidades de infiltração menores. Por fim, aparece a associação de solos Litólicos e Cambissolos, que apresentam importância menor, pois, além de terem pequena espessura e baixos a médios valores de infiltração, estão associados a relevos com forte a médio grau de dissecação. No entanto, em função da grande distribuição em área da associação solos Litólicos/Cambissolos, deve-se levar em conta que a ocorrência dessa associação em regiões com relevo menos dissecado, faz com que a mesma tenha um grau de importância maior para a prospecção de aquíferos fraturados.

O fator solo foi utilizado para a elaboração de um plano de informações, em escala 1:50.000, que será utilizado na etapa de integração de dados visando à identificação dos condicionantes geológicos e hidrogeológicos dos aquíferos fraturados.

6.5 – Fator cadastro dos poços

Esse fator não corresponde a um condicionante específico, mas servirá para verificar as relações existentes entre os diferentes fatores e os aquíferos fraturados. Com os dados obtidos do cadastramento de poços tubulares existentes na região, foi elaborado um plano de

informação denominado poços. Esse plano foi estruturado da seguinte forma: para cada um dos poços cadastrado, foi gerado um ponto a partir das coordenadas obtidas em campo com o GPS. Associado a cada um desses pontos, foi definido um código que contém as seguintes informações:

- proprietário do poço: CORSAN (C), PAP (E), SAMAE (S) ou PARTICULAR (P);
- situação: produtivo (P) ou seco (S);
- vazão: valor correspondente a vazão.

Dessa forma, um poço da Corsan, produtivo, com vazão de 10 m³/h teria a codificação **CP10**. No caso de um poço particular, produtivo, sem vazão informada, o código seria **PP0**. Por fim, no caso de um poço perfurado pelo PAP com resultado negativo (seco), o código seria **ES**.

Cabe salientar que se optou trabalhar com o parâmetro vazão em detrimento do parâmetro capacidade específica, pois, para a maioria dos poços tubulares, não foi possível ter acesso aos testes de bombeamento (somente os poços perfurados pelo PAP apresentavam esses dados). Além disso, para os poços particulares com vazões informadas verbalmente, foram utilizadas somente as informações de localização e situação.

Esse plano de informação será utilizado na etapa de integração de dados, visando à análise dos fatores anteriormente descritos, da seguinte forma:

- ⇒ fator padrão estrutural: cruzar a ocorrência de poços tubulares com sistemas de fraturas e verificar qual sistema está associado a situação do poço (produtivo ou seco) e vazão (quais lineamentos estão associados às maiores vazões e quais às menores);
- ⇒ fator relevo: cruzar as diferentes classes de declividade com a ocorrência de poços tubulares e identificar, com isso, a relação existente entre o relevo e a situação e produção dos poços;
- ⇒ fator litologia: verificar se há associação entre os tipos litológicos e as estruturas dos derrames com a situação e vazão de poços;
- ⇒ fator solo: identificar se existe relação entre as associações de solos com a situação e vazão dos poços.

Esse plano de informação e sua integração com os demais auxiliará na determinação das condicionantes hidrogeológicas dos aquíferos fraturados.

7 - PROCESSOS DE INTEGRAÇÃO DE DADOS

Nesse capítulo, serão abordados: i) os conceitos e técnicas básicas associados aos processos de integração de dados; ii) o procedimento adotado para a realização da integração dos dados geológicos e hidrogeológicos visando à determinação dos condicionantes dos aquíferos fraturados e iii) os resultados obtidos.

7.1 – Conceitos gerais sobre integração de dados

A integração de dados consiste num conjunto de técnicas e tarefas a serem aplicadas e executadas para o cruzamento de dados básicos, que resultarão em novas informações a serem utilizadas para a resolução de um problema relacionado com esses dados. Segundo Valente (1999), a integração de dados consiste na combinação de informações diversas numa única base cartográfica com o objetivo de analisá-las e visualizá-las para, a partir daí, elaborar novas informações.

A integração de dados é possível quando se trabalha com Sistemas de Informações Georreferenciadas (SIG's). Esses sistemas podem ser definidos como um conjunto de procedimentos destinado à aquisição, ao armazenamento, à recuperação e à análise de dados georreferenciados. Os SIG's têm por funções:

- integrar informações espaciais de dados cartográficos, censitários e de cadastramento, imagens de satélites, redes e modelos numéricos de terreno, numa única base de dados;
- cruzar informações por meio de algoritmos de manipulação, para gerar mapas derivados; e
- consultar, recuperar, visualizar e permitir saídas gráficas para o conteúdo da base de dados.

O conjunto básico de funções dos SIG's podem ser agrupadas segundo os tipos de dados e não se precisa utilizar todas essas funções, pois suas aplicações dependem do objetivo do trabalho a ser desenvolvido (Tab. XXVII). São cinco as funções básicas (Câmara, 1994) :

→ **Análise geográfica (ANG):**

Objetivo: combinação de informações temáticas geograficamente distribuídos

Funções: superposição de polígonos, ponderação de temas, medidas (área, perímetro), mapas de distância, tabulação cruzada e consulta ao banco de dados.

→ **Processamento digital de imagens (PDI):**

Objetivo: tratamento de imagens de satélite e de *scanners*

Funções: realce por modificação de histograma, filtragem espacial, classificação estatística, rotação espectral, etc.

→ **Modelagem de redes (RED):**

Objetivos: estruturas de linhas interligadas armazenam dados sobre recursos de diferentes áreas. Os nós e os arcos têm características próprias, armazenadas no banco de dados.

Funções: cada aplicação tem características próprias e depende do contexto cultural em que é utilizado.

→ **Produção cartográfica (MAP):**

Objetivo: produção de cartas com recursos sofisticados de apresentação gráfica

Funções: definição interativa de áreas de plotagem, colocação de legendas, textos explicativos e notas de crédito. Uma biblioteca de símbolos é atributo fundamental.

→ **Modelagem Numérica do Terreno (MNT):**

Objetivos: cálculo de declividades, volumes e cortes transversais. Fundamental para aplicações em engenharia e arquitetura

Funções: determinação do modelo a partir de pontos esparsos, ou de linhas, geração de mapas de contorno (isolinhas), mapas de declividade e aspecto, visualização 3D (com imagens e temas), cálculo de volumes e análises de perfis.

Tabela XVII - Necessidades típicas das funções de geoprocessamento em diversas aplicações (Câmara, 1994).

APLICAÇÃO	ANG	PDI	MNT	RED	MAP
Urbanismo	NN	NN	NN	NN	NN
Geologia	NN	NN	NN	UNN	NN
Agronomia	NN	NN	NN	UNN	NN
Floresta	NN	NN	UNN	NUE	NN
Água/Esgoto	NN	NUE	NN	NN	NN
Eletricidade	UNN	UNN	NN	NN	NN
Cartografia	UNN	NN	NN	UNN	NN
NN - normalmente necessário		NUE - necessário para fins específicos		UNN - usualmente não necessário	

Licht *et al.*, (1996) comentam que a aplicação de SIG's na geologia e na mineração faz-se cada vez mais necessária, pois ela abrange desde as etapas de prospecção até a produção. No desenvolvimento dessas etapas, é preciso realizar a coleta, a manipulação e a representação gráfica de dados georreferenciados espacialmente, o que é melhor realizado com o emprego desses sistemas.

Lich *et al.* (1996) destacaram dois problemas básicos dos dados geológicos a serem utilizados em SIG's: 1) a referência espacial dos dados coletados diretamente em campo (precisão do posicionamento) e 2) as bases cartográficas (escalas disponíveis). Além disso, enfatizam que os dados utilizados são provenientes de diferentes origens, o que implica na necessidade de armazenamento diferenciado para os mesmos. Assim, arquivos vetoriais poderiam conter informações sobre a topografia, rede hidrográfica, vias de acesso, situação legal das áreas de pesquisa e seções verticais, ou horizontais de corpos mineralizados. Já, arquivos *raster* podem conter informações sobre levantamentos gamaespectrométricos, magnetométricos, gravimétricos, sísmicos, de radar e temáticos multiespectrais. Por fim, arquivos tabulares podem conter dados e informações georreferenciadas sobre afloramentos de rochas, ou de mineralizações, distribuição de teores de elementos, ou substâncias.

O emprego de Sistemas de Informações Georreferenciados em qualquer área do conhecimento requer o desenvolvimento de etapas gerais que são imprescindíveis para o sucesso desse trabalho. Segundo Wright & Carter (1996), essas etapas consistem de:

- Elaboração de um Modelo conceitual;
- Construção de um banco de dados;
- Processamento de dados;
- Integração de dados;

O fluxograma da figura 128 evidencia essa seqüência de etapas envolvida na aplicação de um SIG para a resolução de um problema.

7.1.1 – Modelo conceitual

O modelo conceitual define o arranjo geométrico, a dimensão (área, volume), a descrição dos processos envolvidos e as condições de limite de um determinado estudo. Segundo Valente (1999), a elaboração de modelos tem por meta representar a complexidade

da natureza com base no maior número possível de informações que possuem interrelações espaciais e temporais. Já segundo Kleiner (1999), a confecção de modelos conceituais parece ser uma tarefa muito abstrata, mas ela é de extrema importância, pois norteia o planejamento da implantação de um processo de integração de informações georreferenciadas, visto que se pode observar quais os dados necessários para constar no banco de dados gráfico e não-gráfico.

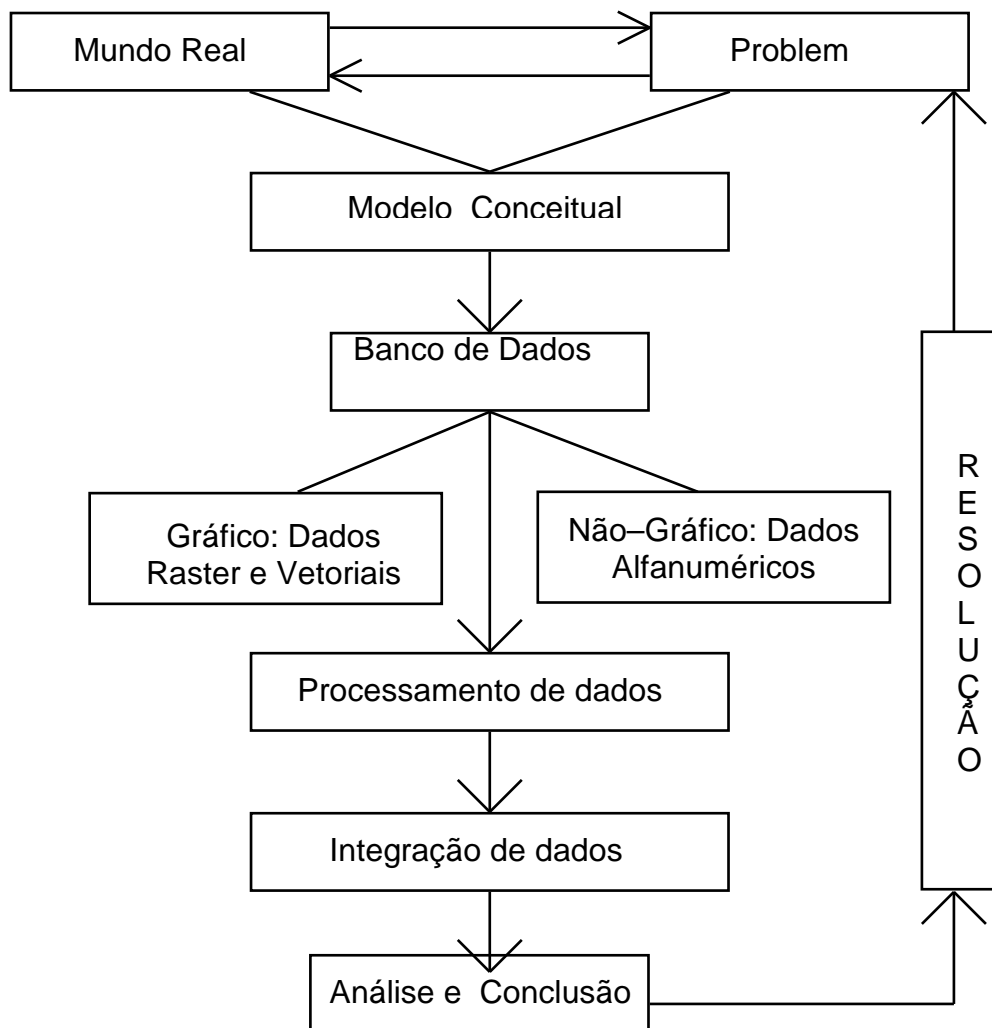


Figura 128 - Fluxograma com as etapas a serem seguidas no processo de implantação e desenvolvimento de uma ferramenta SIG.

O planejamento do modelo conceitual deve estar relacionado com o problema a ser solucionado. Dessa forma, é necessário que as diferentes informações e dados a serem utilizados estejam distribuídos em níveis diferenciados, denominados de planos de

informações (PI). Esses planos serão integrados visando à resolução da situação. Segundo Valente (1999), os PI podem ser classificados em diferentes categorias:

- temática: estão inseridas as informações planimétricas que serão agrupadas por temas, ou por classes. Por exemplo: mapas de solo, geológico, rede de drenagem, mapas estruturais, entre outros;
- modelo numérico do terreno (MNT): informações plani-altimétricas do terreno, que proporcionam a geração de um modelo 3D do relevo;
- imagens: referem-se às imagens não temáticas (exemplo, imagens de satélites).

7.1.2 – Banco de dados

No banco de dados, está inserido um conjunto de informações gráficas e não-gráficas georreferenciadas, que possuem relação com os planos de informações e, conseqüentemente, que representam principalmente a realidade simulada para a resolução do problema proposto. As informações gráficas referem-se à base cartográfica e representam diferentes entidades passíveis de serem mapeadas como: hidrografia, solos, geologia, fraturas, entre outros dados. Essas informações são representadas em duas formas distintas: matricial (raster) ou vetorial. Já os dados não gráficos são descritivos ou atributos que caracterizam quantitativamente ou qualitativamente as entidades contidas na base de dados gráfica.

A manipulação de um banco de dados em um SIG permite, então, a combinação do conjunto de informações disponíveis. Cada atributo ou informação não gráfica é associada a uma feição geográfica por meio do uso de um identificador de feição comum (Valente, 1999). Em geral, a conexão entre o banco de dados e os planos de informação pode ser efetuada de duas maneiras:

- conexão mapa-banco de dados: estabelece a conexão dos locais consultados na imagem com os registros do banco de dados;
- conexão banco de dados-mapa: nesse caso, é possível realizar a visualização dos dados não-gráficos do banco na forma de mapas.

7.1.3 – Processamento de dados

Essa etapa caracteriza-se pelo tratamento das informações armazenadas nos bancos de dados e nos planos de informações com a conseqüente geração de novas informações. Valente (1999) descreve as seguintes operações que podem ser realizadas nessa etapa:

- agrupamento, ou reclassificação de classes temáticas;
- tratamento digital de imagens (processamento, classificação),
- modelagem numérica do terreno

7.1.4 – Integração de dados

Na integração, serão combinadas as informações armazenadas nos banco de dados e nos planos de informações com aquelas geradas na etapa de processamento de dados, visando estabelecer as bases para o processo de tomada de decisões. Valente *et al.* (1998) descrevem dois tipos de processos de tomada de decisões: o dirigido pelo conhecimento (lógica **Booleana**, Sobreposição Indexada e Lógica Fuzzy) e o dirigido pelos dados (Pesos de Evidência e Análise Multivariada). Moreira (2001) descreve vários métodos de inferência espacial utilizados em estudos visando à integração de dados: **Booleano**, Média Ponderada, Lógica **Fuzzy**, Bayes e Redes Neurais Artificiais; os mais utilizados são os três primeiros.

As principais características de cada um dos principais métodos são:

• Método **Booleano**: esse método é semelhante às técnicas de sobreposição de *overlays* realizada de forma analógica durante muito tempo para estudos geológicos. Esse método envolve a combinação lógica de mapas binários, onde os diferentes planos de informações são combinados segundo uma seqüência, visando a análise de uma hipótese ou proposição pré-definida. Para a integração de planos de informações binários, a álgebra **Booleana** utiliza os ponderadores lógicos “E”, “OU”, “Exclusivo OU (XOR)” e “NÃO”, que tem a função de determinar se uma hipótese satisfaz ou não a condição proposta.

Conforme Moreira (2001), esse método é prático, mas não é o mais adequado, pois há problemas relacionados aos pesos e à utilização de mapas binários. Na maior parte dos casos, trabalha-se com mais de duas classes dentro de um plano de informações e as mesmas

possuem pesos distintos e diferenciados, que devem ser levados em conta. Isso não pode ser realizado se esse método for utilizado.

- Média Ponderada: nesse método, para cada plano de informação e classes, é atribuído um peso diferenciado, resultando na formação de um mapa com áreas que representam os diferentes graus de importância. Para o desenvolvimento desse método, é necessário que cada plano de informação seja ponderado e, após, sejam somados de forma ponderada.

Segundo Moreira (2001), esse método permite uma maior flexibilidade dos dados quando comparado com o *Booleano*; mas, a desvantagem existente está relacionada com o caráter linear de adição das evidências, apresentado pelo método.

- Método Fuzzy: o método é uma forma de caracterização de classes que resultam em conjuntos denominados *Fuzzy*. A utilização desse método é indicada em situações onde há ambigüidade, abstração e ambivalência em modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos empíricos (Moreira, 2001). Para cada conjunto *Fuzzy*, são atribuídos valores e, após, esses valores são combinados segundo análises multi-critérios, definidas pelos operadores *Fuzzy* (Mínimo, Máximo, Média, Ponderado - Técnica AHP e Gama).

O operador *Fuzzy* Mínimo assemelha-se ao operador *Booleano* “E” e leva em consideração os valores mínimos atribuídos aos planos de informações de entrada. Esse operador é indicado para situações onde duas ou mais evidências são estritamente necessárias para satisfazer uma determinada hipótese.

O operador *Fuzzy* Máximo assemelha-se ao operador *Booleano* “OU”, onde os valores de saída para um determinado ponto serão os maiores valores dados aos planos de informações na hora de entrada dos dados. Esse operador é indicado em situações onde apenas uma evidência é suficiente para satisfazer uma determinada hipótese.

O operador *Fuzzy* Média é caracterizado pela distribuição uniforme de valores para todas as evidências. Assim, os valores atribuídos aos planos de informações na hora da entradas dos mesmos não vão apresentar uma importância hierarquizada, já que foi calculado um valor médio.

O operador *Fuzzy* Ponderado leva em consideração que os pesos atribuídos a cada plano de informação são definidos empiricamente ou por processos estatísticos. A

determinação do peso depende da importância do plano de informação, o que resulta numa ordenação das evidências.

Segundo Moreira (2001), há uma série de técnicas desenvolvidas para a utilização do operador *Fuzzy* ponderado. A técnica do Processo Analítico Hierárquico (AHP) é a que melhores resultados fornece. Segundo Moreira (2001), a aplicação dessa técnica deve seguir os seguintes passos:

- elaboração de uma relação de importância relativa entre as evidências;
- a relação serve para a elaboração de uma matriz de comparação par a par (nessa matriz, são calculados os autovalores e autovetores da matriz);
- os pesos de cada conjunto *Fuzzy* irão corresponder aos autovetores obtidos na matriz.

O operador *Fuzzy* Gama resulta de dois termos, um produto algébrico e uma soma algébrica *Fuzzy*. Esse operador caracteriza-se pela multiplicação dos diferentes planos de informações; o valor de saída de um plano de informação é sempre menor ou igual ao valor do menor conjunto *Fuzzy*.

Na fase de integração de dados, observa-se que existem inúmeras maneiras de realizarmos esses estudos. Após promovida essa etapa, os resultados devem ser criteriosamente analisados, visando, com isso, à resolução do problema inicialmente proposto.

7.2 - O modelo conceitual para a área de estudo

Reginato & Strieder (1999) comentam que o modelo conceitual visando à prospecção de aquíferos fraturados deve ter relação com os fatores que condicionam estes aquíferos em rochas cristalinas, particularmente, em rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Ou seja, o modelo conceitual para integração de dados deve prever o comportamento espacial e a assinatura característica das variáveis (dados) disponíveis; além disso, o modelo conceitual deve ressaltar as (cor)relações entre as variáveis consideradas dentro dos objetivos propostos de integração.

Dessa forma, o modelo conceitual definido para área de estudo é caracterizado pela presença dos fatores condicionantes, que constituíram diferentes planos de informações, todos em escala 1:50.000 (Tab. XXVIII), definidos para simular a realidade e fornecer respostas à

proposição que é a prospecção de aquíferos (Fig. 129). Esse modelo conceitual está representado pelos seguintes planos de informações (PIs):

- **Estrutural**: representa planos de informações do tipo temáticos, em escala 1:50.000, que estão associados a diferentes grupos ou famílias de estruturas. A elaboração desse plano foi feita com base em estudos de fotointerpretação de fotografias aéreas (escala 1:60.000) e análises estruturais de dados de campo;
- **Litologia**: esse plano corresponde a um mapa geológico da região, em escala 1:50.000, onde estão individualizadas as áreas de ocorrência das diferentes litologias (básicas e ácidas). Corresponde a um plano temático e foi obtido por meio de mapeamento geológico e fotointerpretação;

Tabela XXVIII - Planos de informações necessários para o desenvolvimento do estudo, com a divisão em dados a serem obtidos e suas respectivas fontes.

Fatores Condicionantes	Tipos de Planos	Atributos/Dados	Fonte
Estrutural Escala 1:50.000	Temático	Fraturas (Grupos) Análise Estrutural	Fotografia aéreas em escala 1:60.000
Litologia Escala 1:50.000	Temático	Estrutura dos Derrames Litologia	Mapeamento geológico Fotointerpretação
Relevo Escala 1:50.000	Numérico	Curvas de Nível e pontos cotados	Mapas topográficos em escala 1:50.000 da DSG Fatiamento do MNT
Solos Escala 1:50.000	Temático	Tipos de Solo	Mapas de Solos existentes (RADAM e EMBRAPA). Levantamentos de campo
Cadastro Escala 1:50.000	Temático	Situação do Poço Localização do Poço Vazão	Relatórios técnicos das empresas de perfuração

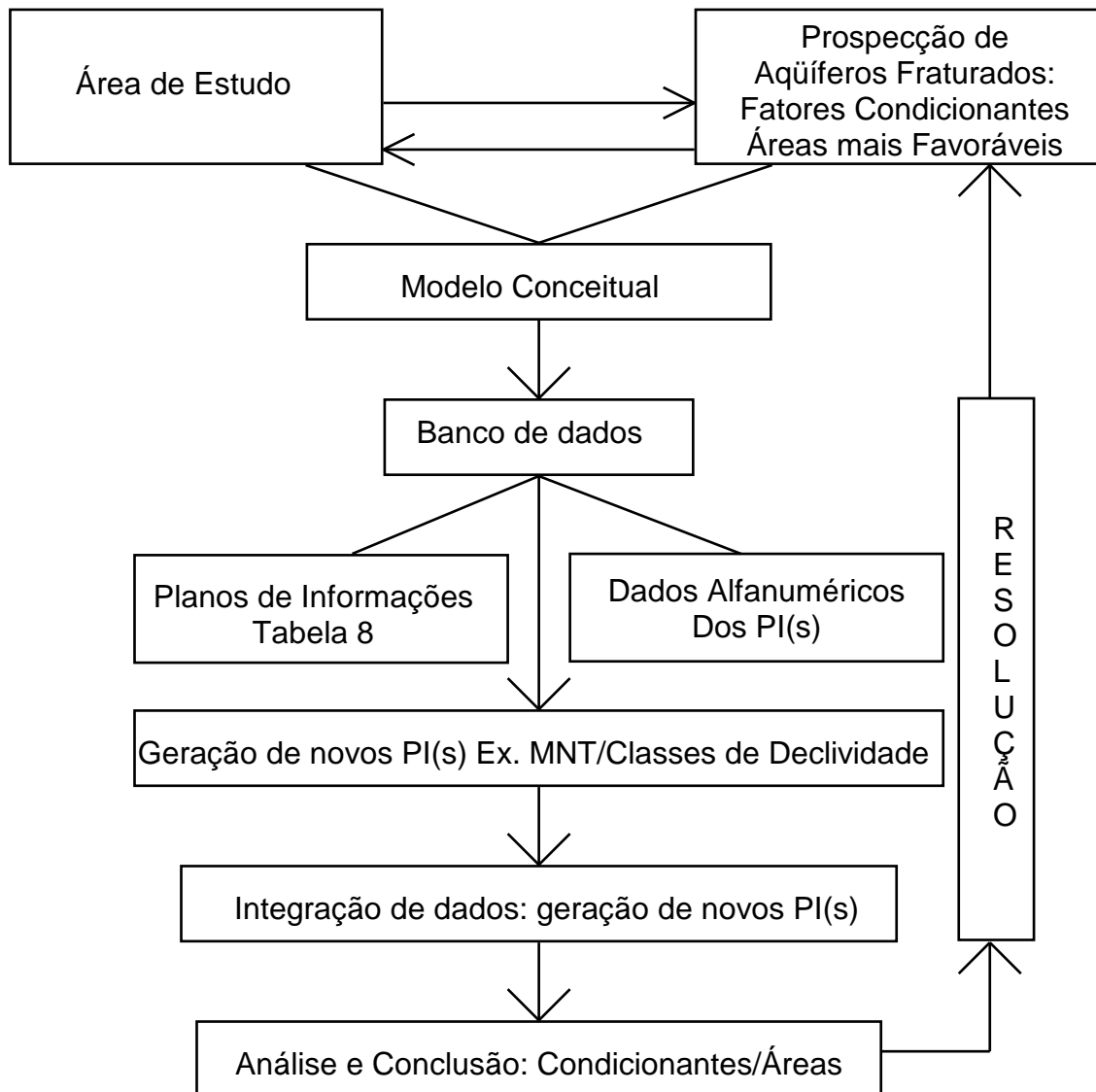


Figura 129 - Fluxograma com as etapas do modelo conceitual proposto para a área de estudo.

- **Relevo**: corresponde a planos de informações de caráter numérico e temático. O PI numérico terá como fonte as curvas de nível e os pontos cotados existentes nas folhas topográficas, em escala 1:50.000 do DSG, que servirão para a elaboração do modelo numérico do terreno. Com o modelo numérico do terreno, será construído o plano de informação temático, representado por um mapa contendo diferentes classes de declividade;
- **Solos**: formam um plano de informação temático, em escala 1:50.000, que conterà as diferentes classes de solos. Esse plano foi elaborado tendo como base os mapas pedológicos existentes na região (RADAM/BRASIL, 1986; Brasil, 1973; Falcade & Mandelli, 1999), bem como os levantamentos de campo;

- **Cadastro:** consiste de um plano temático, em escala 1:50.000, onde estão representadas as informações sobre a localização geográfica do poço, bem como atributos descritivos referentes à situação (produtivo, abandonado, nulo) e à vazão. Esse plano foi elaborado tendo como base as informações do cadastro dos poços.

Com os planos de informações, serão geradas integrações visando a determinar as condicionantes geológicas de maior importância, as áreas mais favoráveis à prospecção de aquíferos fraturados e melhorar os métodos prospectivos. Como proposta inicial prevista no modelo conceitual, pretende-se efetuar as seguintes integrações:

⇒ entre os PI(s) do fator estrutural: serão cruzados os planos correspondentes aos diferentes grupos de estruturas, visando determinar as áreas que representam intersecção de fraturas (novo PI, denominado de Cruzamento). Essa relação é importante, pois, em muitos métodos prospectivos, o cruzamento de estruturas corresponde a um critério forte para a locação de poços tubulares;

⇒ entre os PI(s) do fator estrutural e o PI cadastro: com isso estará sendo identificada a relação existente entre a localização de poços tubulares e sua situação com os diferentes grupos de estruturas;

⇒ entre os PI Cruzamento e o PI cadastro: visam a identificar a relação existente entre cruzamento de estruturas e a localização dos poços tubulares;

⇒ entre os PI Classes de Declividade, Solos, Geologia: esses diferentes planos serão integrados visando à identificação de áreas mais favoráveis, à ocorrência de aquíferos fraturados, levando em consideração as informações obtidas para os diferentes fatores condicionantes (descritas no capítulo 6). Com isso, será gerado um novo PI denominado de “prospecção”;

⇒ entre o PI Prospecção e o PI fraturas: esse cruzamento é necessário para avaliar se as áreas identificadas como favoráveis possuem relação com as estruturas;

⇒ entre o PI Prospecção e o PI cadastro: esse cruzamento é necessário para avaliar se as áreas identificadas como favoráveis possuem ocorrências de poços tubulares produtivos.

7.3 – Estruturação do banco de dados

A etapa de integração dos planos de informações foi realizada com o emprego do *software* SPRING do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A escolha da

utilização desse programa está embasada nas características gerais e operacionais do sistema, além de ser um programa de domínio público, o que facilita sua utilização por pesquisadores diversos.

Esse programa consiste num sistema de informações georreferenciados de 2ª geração, baseado num modelo de dados orientados a objetos, desenvolvido para ambientes UNIX e Windows. As suas principais características são:

- opera com banco de dados geográficos sem fronteiras e suporta uma grande quantidade de dados;
- trabalha com dados de origem vetorial e matricial e com produtos de sensoriamento remoto;
- possui um ambiente amigável pela combinação de menus e janelas com uma linguagem espacial passível de programação pelo usuário (LEGAL- Linguagem Espaço-Geográfica baseada em Álgebra).

O SPRING trabalha com um banco de dados onde estão inseridas todas as informações de um determinado projeto, sejam elas de características gráficas (mapas raster ou vetoriais) ou não-gráficas (dados alfanuméricos). Os projetos são armazenados em sub-diretórios junto com os arquivos de dados representados por pontos, linhas, imagens orbitais e aéreas, imagens temáticas, textos, grades e objetos.

Para a utilização desse programa é necessário que se tenha conhecimento de como os dados são estruturados. Primeiramente, deve-se ativar um banco de dados que conterà um determinado projeto. Esse projeto é dividido em categorias, onde são inseridos os planos de informações (uma categoria poderá ter mais de um plano de informação). Cada categoria é classificada segundo o tipo de dado que representa (temático, numérico, imagem, rede, cadastral ou objeto). As categorias e os planos de informações de característica temática poderão ter classes temáticas. Durante a utilização do programa, podem ser geradas novas categorias, novos planos e novas classes, dependendo da necessidade.

Para a integração dos dados na área de estudo, foi criado um banco de dados denominado de TESE (Fig. 130). Esse banco de dados possui um projeto (Fig. 131), também denominado de TESE, que foi georreferenciado da seguinte forma:

- sistema de projeção: UTM/Córrego Alegre. Optou-se por esse sistema de projeção pois as bases cartográficas do DSG foram elaboradas segundo esse sistema cartográfico. Como os

mapas que representam os diferentes fatores condicionantes têm como base as cartas topográficas do DSG, o sistema adotado foi o mesmo;

- retângulo envolvente: esse retângulo refere-se às dimensões da área de estudo, que é limitada pelas coordenadas UTM:

- 434000 mE e 492000 mE;
- 6770000 mN e 6804000 mN

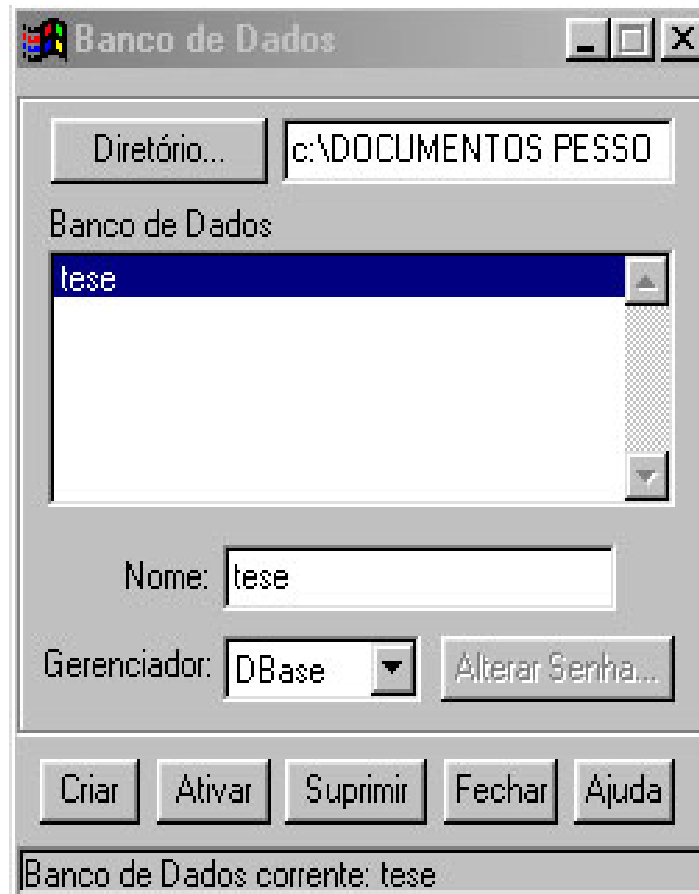


Figura 130 – Janela contendo as informações do banco de dados ativos para trabalho no SPRING

Para o projeto TESE, foram definidas diferentes categorias (Fig. 132) que representam os fatores condicionantes dos aquíferos fraturados e seus respectivos planos de informações (Fig. 133) previstos na etapa de modelamento conceitual. O gerenciamento desses planos de informações (ativa ou desativa) é realizado no painel de controle (Fig. 134).

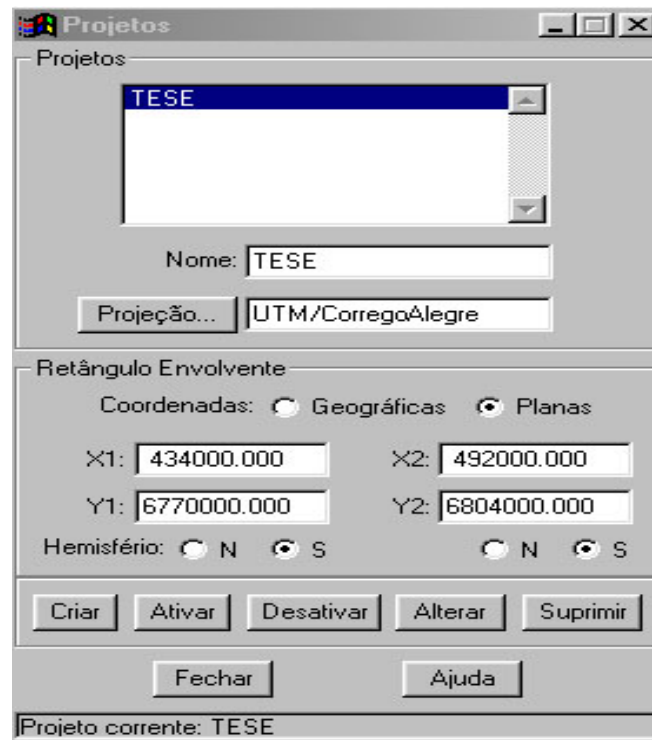


Figura 131 – Janela com as informações sobre o projeto ativo, bem como os dados utilizados para georeferenciamento dos dados.

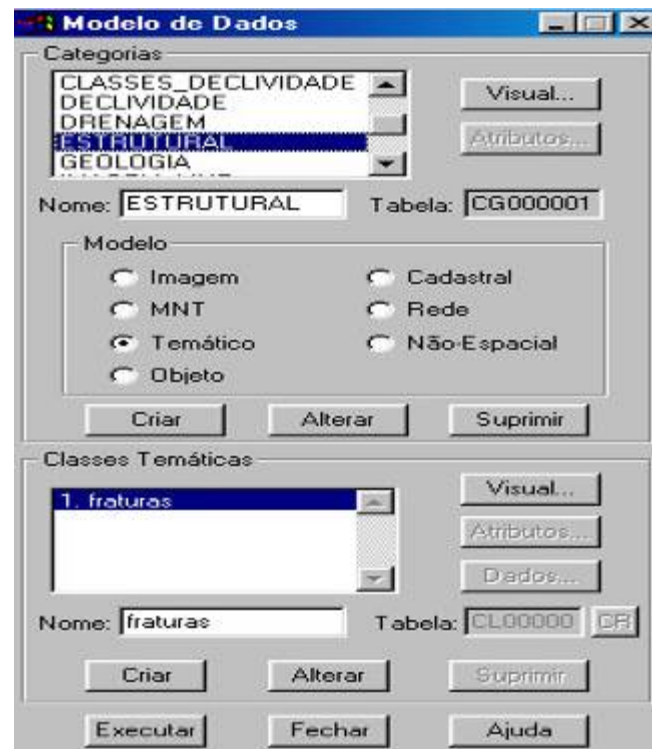


Figura 132 – Janela com as informações sobre as categorias geradas e suas classificações (Temático, MNT, Imagem, etc.).

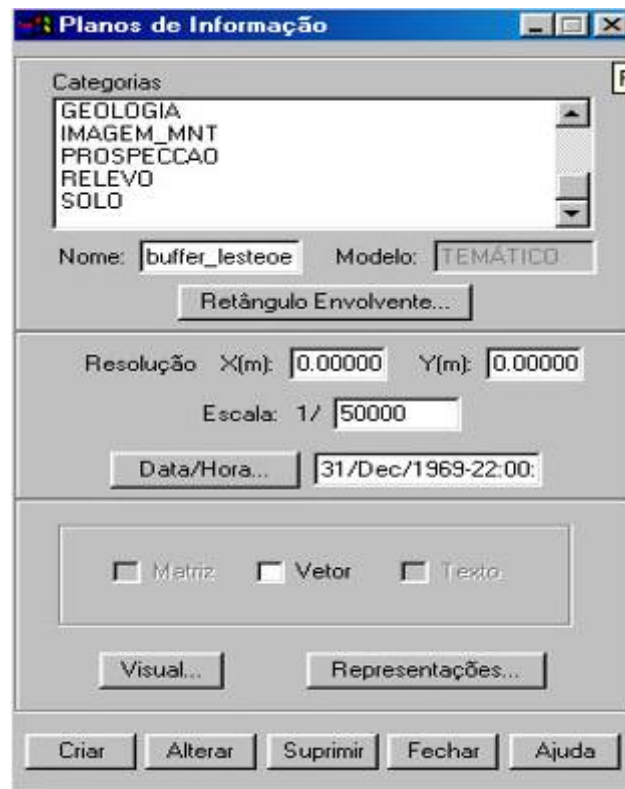


Figura 133 – Janela do SPRING contendo as informações sobre os planos de informações existentes.



Figura 134 – Janela do SPRING denominada de Painel de Controle onde são gerenciados os diferentes PIs.

Para o Banco de Dados e Projeto TESE, a organização dos dados foi realizada pela criação de oito categorias e diferentes planos de informação, conforme pode ser observado na tabela XXIX.

Tabela XXIX – Categorias e diferentes planos de informações gerados no SPRING para desenvolvimento dos processos de integração.

	Categorias	Classificação	Classes	PIs	Novos PIs
Banco de Dados e Projeto TESE	Estrutural	Temático	Fraturas	Lesteoste nordeste noroeste nortesul	buffer_lesteoste buffer_nordeste buffer_noroeste buffer_nortesul
	Relevo	Numérico	_____	curvas	
	Solo	Temático	Litosolo Podzólico Terra_bruna	solo	
	Geologia	Temático	Ácida básica	Geologia	
	Cadastro	Temático	Vazão5 Vazão10 Vazão20 Vazão30 seco	Cadastro	buffer_vazao5 buffer_vazao10 buffer_vazao20 buffer_vazao30 buffer_seco
	Base	Temático	Estradas Cidades	Base	
	Drenagem	Temático	_____	Drenagem	
	Limite	Temático	_____	limite	

Os planos de informações foram gerados com base nos dados digitais referentes aos diferentes fatores condicionantes dos aquíferos fraturados, que estavam disponíveis em AutoCADTM. O procedimento adotado para cada um dos planos de informações foi o seguinte:

⇒ Estrutural: para cada grupo de estruturas (nordeste, noroeste, norte-sul e leste-oeste), foram definidos planos de informações (Mapa 2). A sua importação para o programa SPRING foi realizada da seguinte maneira:

- importação da camada que continha as linhas correspondentes à distribuição dos diferentes grupos de lineamentos do tipo 2 a partir de um arquivo *.dxf georreferenciado. Cada grupo de estruturas foi importado para planos de informações específicos conforme apresentado na tabela XXIX;

- visando-se evitar erros provenientes de imprecisões cartográficas e da fotointerpretação, foi utilizada a ferramenta de elaboração de mapas de distâncias (*buffer analysis*) para obter-se um corredor de 150 metros a partir do eixo das linhas que representam os lineamentos. Há, entretanto, que se observar que os lineamentos tipo 2 representam zonas de fraturas com espessura definida; no caso das zonas de fratura da região de estudo, verificou-se uma espessura média entre 50 e 75m. Dessa forma, foram gerados novos planos de informações contendo o termo buffer (exemplo: buffer_lesteeoste);

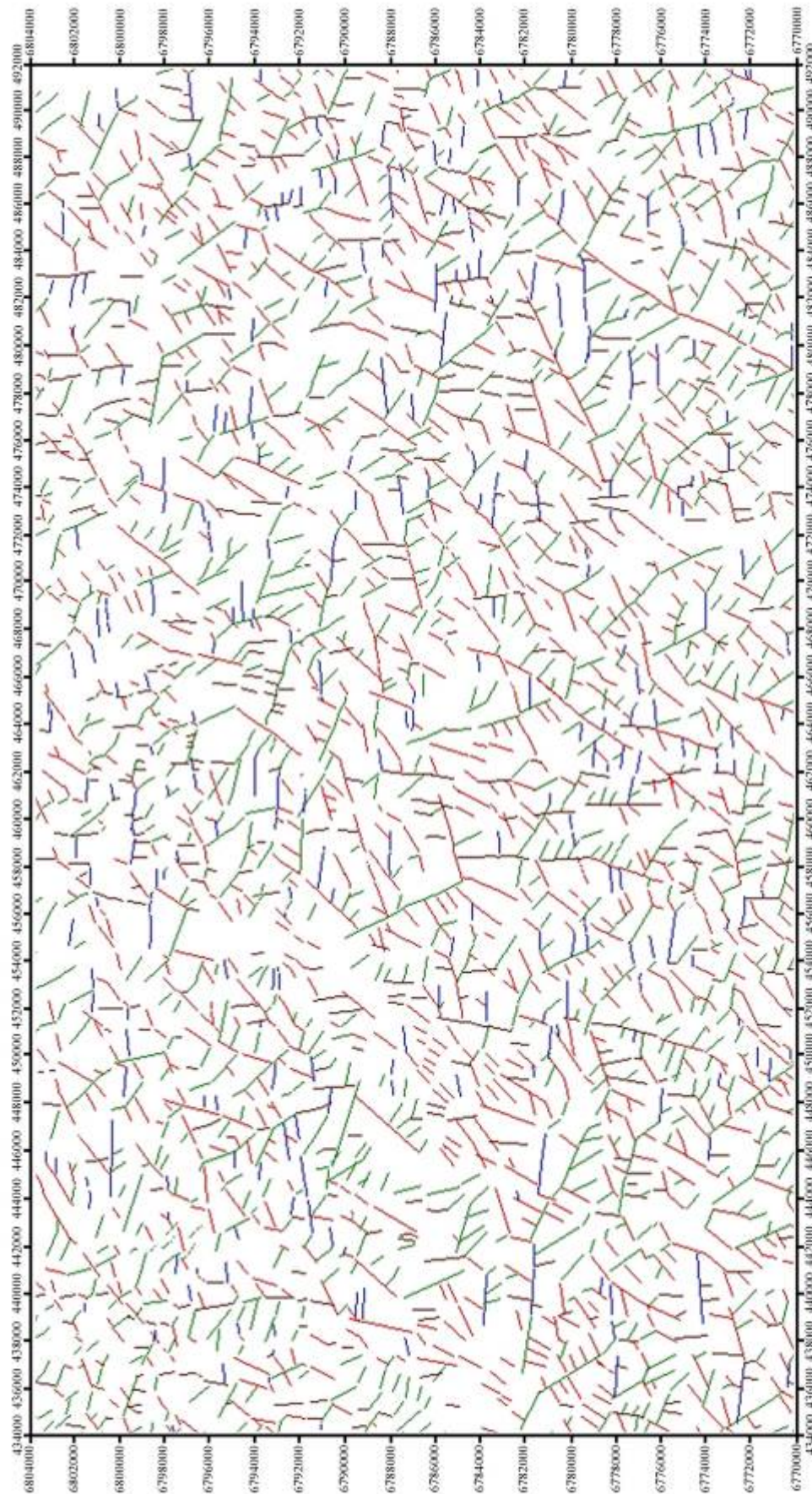
- transformação das linhas, representadas como dados vetoriais para o formato matriz por meio do comando temático vetor-raster. Essa conversão foi necessária, pois para o desenvolvimento da etapa de integração de dados no programa SPRING, há a necessidade dos planos de informações estarem no formato matriz.

⇒ Relevo: essa categoria contém um plano de informação numérico, denominado de relevo, que foi utilizado para elaboração do mapa de declividade do terreno, bem como do modelo digital de elevação (modelo numérico do terreno – MNT) nas etapas de integração de dados. A importação desse plano foi realizada da seguinte forma:

- importação do arquivo *.dxf contendo as informações sobre curvas de nível para o plano de informação relevo. Para evitar erros da digitalização, foi realizada uma edição vetorial para verificação das linhas e pontos, segundo rotina disponível no SPRING.

⇒ Geologia: essa categoria possui um plano de informação temático denominado de litologia, que possui duas classes distintas referentes aos dois tipos principais de rochas existentes na região (classe ácida e básica – Mapa 3). A geração dessa categoria e de seu respectivo plano de informação foi realizada da seguinte forma:

- elaboração do mapa geológico no AutoCADTM contendo diferentes polígonos que correspondem às diferentes unidades litológicas;



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS
 ESCOLA DE ENGENHARIA
 LABORATÓRIO DE MODELAGEM GEOLÓGICA E AMBIENTAL

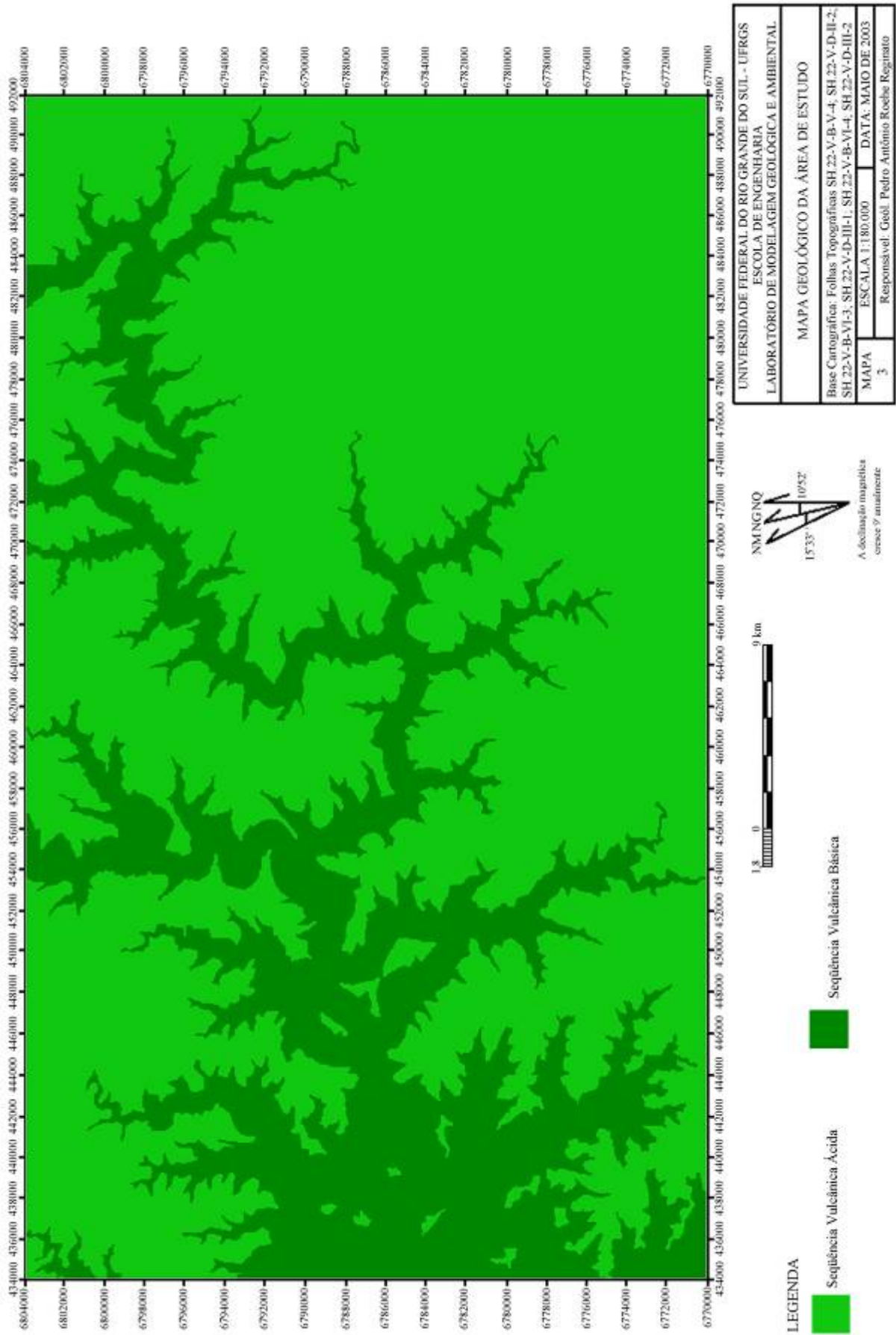
MAPA DOS LINEAMENTOS

Base Cartográfica: Folhas Topográficas SH 22-V-B-V-4; SH 22-V-D-II-2, SH 22-V-B-VI-3; SH 22-V-D-III-1; SH 22-V-B-VI-4; SH 22-V-D-III-2

MAPA	ESCALA 1:180.000	DATA: MAIO DE 2003
Responsável: Geol. Pedro Antônio Roehbe Reginato		2

NM/NGNQ
 15°33' 10" S
 A declinação magnética cresce 9" anualmente

- LEGENDA
- ||| Grupo 1 - Lineamentos Norte-Sul
 - ||| Grupo 2 - Lineamentos Nordeste
 - ||| Grupo 3 - Lineamentos Noroeste
 - ||| Grupo 4 - Lineamentos Leste-Oeste



- formação de limites (*boundaries*) em cada contato, com a finalidade de gerar polígonos perfeitamente fechados.;
- verificação de fechamento, superposição e consistência dos polígonos gerados;
- importação dos polígonos para os planos de informações e suas respectivas classes;
- transformações das áreas compreendidas pelas diferentes classes para o formato matriz, por meio do comando temático vetor-raster.

⇒ Solos: essa categoria contém o plano de informação temático denominado de solos e as classes correspondentes a cada uma das associações de solos identificadas na área de estudo (Mapa 4). O procedimento adotado para a elaboração dessa categoria e plano de informação foi o mesmo da categoria litologia, apresentado acima.

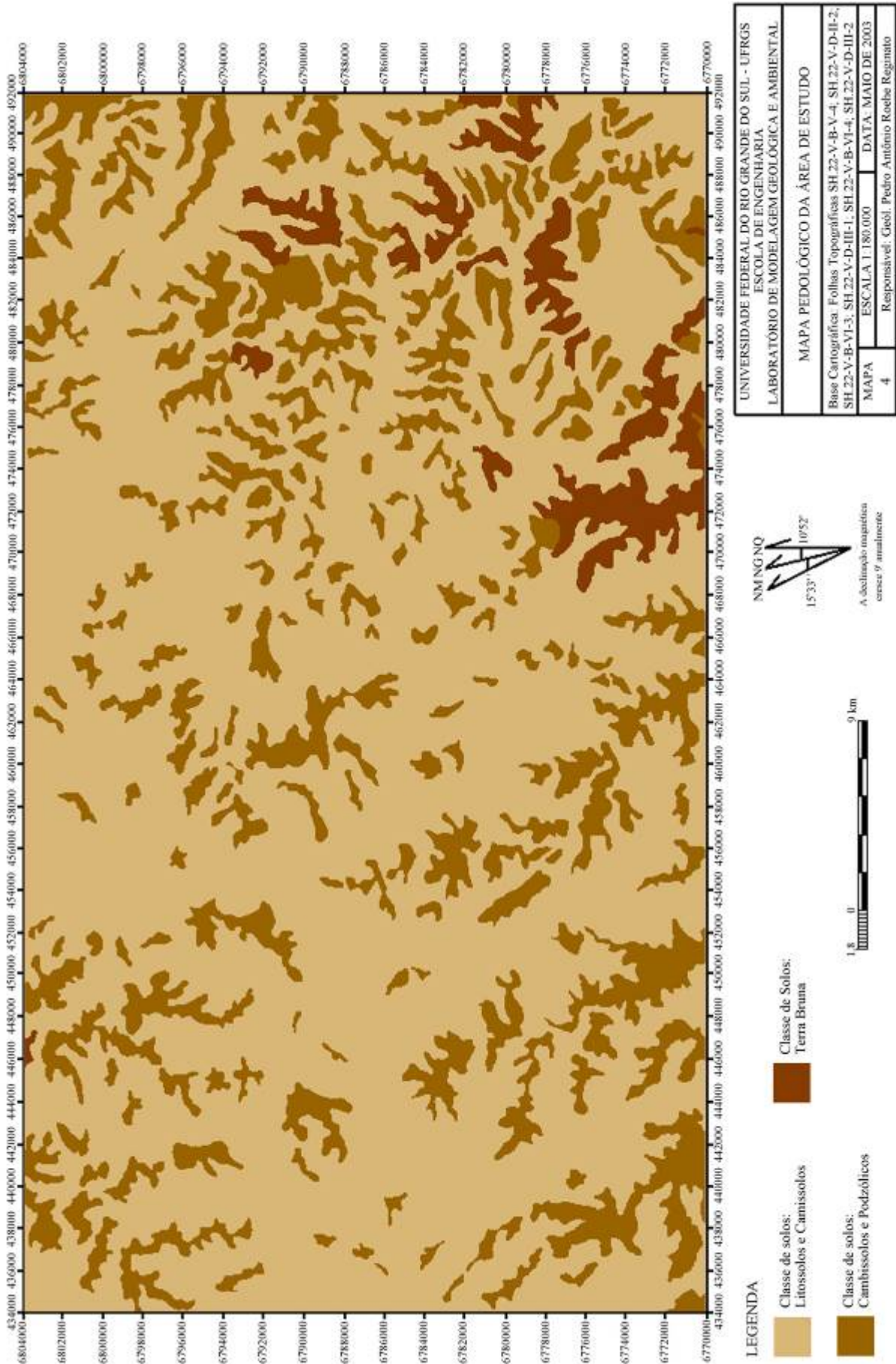
⇒ Cadastro: essa categoria contém os planos de informação referentes à localização dos poços tubulares (Mapa 5). Esses PIs foram elaborados da seguinte forma:

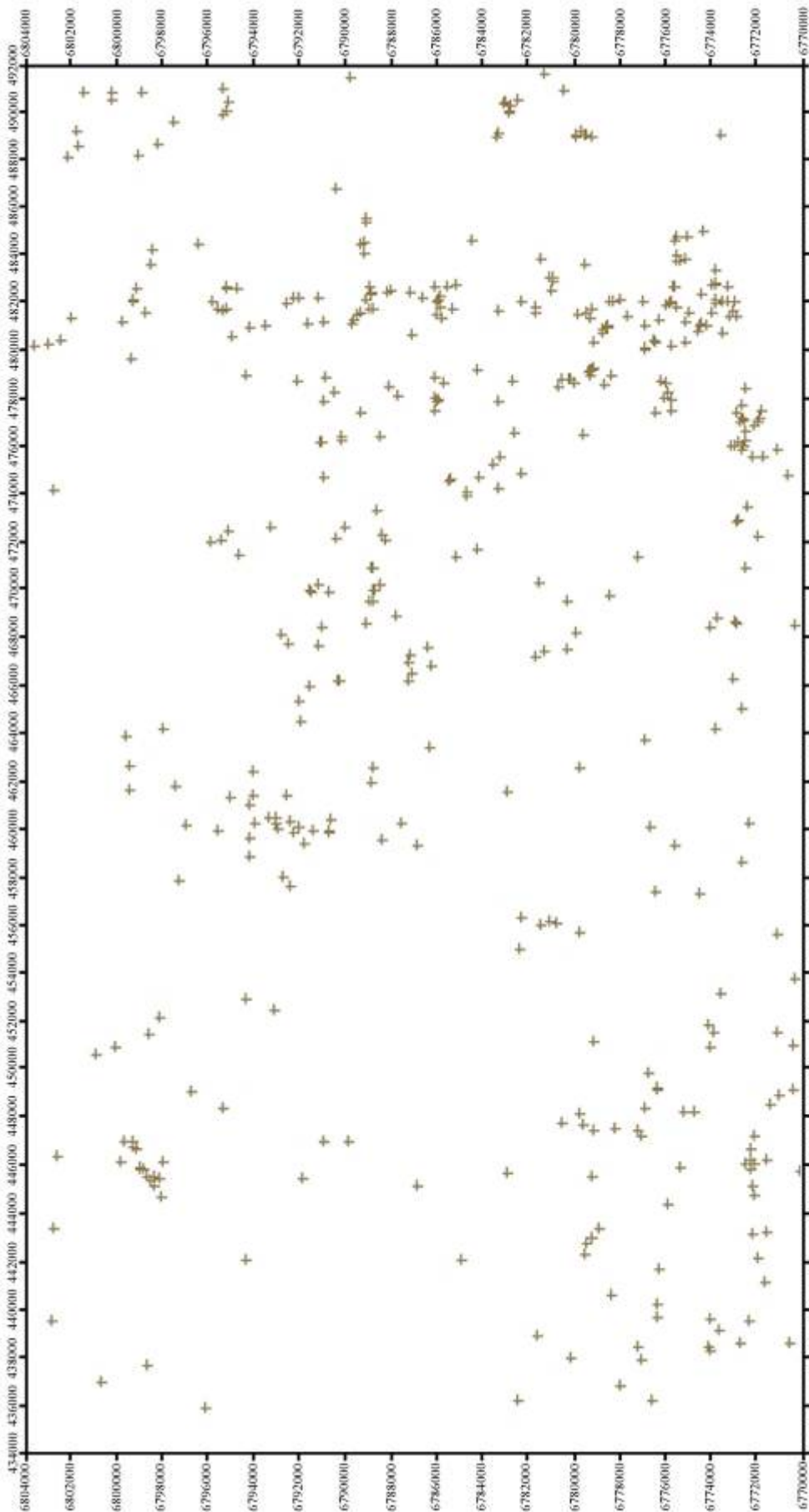
- geração de um arquivo no formato ASCII, que contém as informações referentes às coordenadas UTM Leste e Norte, para cada um dos grupos de poços tubulares cadastrados em campo, bem como um código de referência (os poços foram separados em grupos segundo as vazões que apresentam e foram codificados conforme metodologia apresentada no Capítulo 6);

- o arquivo foi transformado para o padrão texto do MS-DOS e sua extensão foi renomeada para *.spr (formato específico para importação de dados ASCII no SPRING);

- o arquivo foi importado para o programa SPRING, o que possibilitou a geração de um plano contendo pontos que representam a localização georreferenciada dos poços tubulares. Os códigos de cada um dos grupos de poços tubulares foram importados seguindo o mesmo procedimento, só que no formato texto;

- após a importação, foram gerados mapas de distâncias, com raio de 50 metros a partir do centro de cada um dos poços tubulares, resultando na formação de novos PIs com a denominação buffer (exemplo: buffer_vazão0 – ver tabela XXIX). A adoção dessa medida está relacionada com a precisão do equipamento GPS Garmin 12XL utilizado para cadastramento dos poços. Como a precisão desse equipamento é da ordem de 20 metros (sistema S/A desligado) e como há imprecisão cartográfica na hora da plotagem do ponto, optou-se por estender essa medida até os 50 metros, evitando-se, assim, erros de localização dos poços tubulares;





UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS
 ESCOLA DE ENGENHARIA
 LABORATÓRIO DE MODELAGEM GEOLÓGICA E AMBIENTAL

MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS TUBULARES
 CADASTRADOS NA ÁREA DE ESTUDO

Base Cartográfica: Folhas Topográficas SH.22-V-B-V-4; SH.22-V-D-II-2;
 SH.22-V-B-VI-3; SH.22-V-D-III-1; SH.22-V-B-VI-4; SH.22-V-D-III-2

MAPA	ESCALA 1:180.000	DATA: MAIO DE 2003
5	Responsável: Geol. Pedro Antônio Roehle Regimato	



- LEGENDA**
- Localização dos poços tubulares

- conversão desse plano para o mapa matricial, visando à sua utilização na etapa de integração dos dados.

⇒ Drenagem: a categoria drenagem (Mapa 6) possui o plano de informação de mesmo nome, que foi gerado da seguinte forma:

- digitalização, no programa AutoCADTM da rede de drenagem representada nas cartas topográficas em escala 1:50.000 da DSG e geração de um arquivo *.dxf;

- importação do arquivo que contém as polilinhas que representam as drenagens para o programa SPRING.

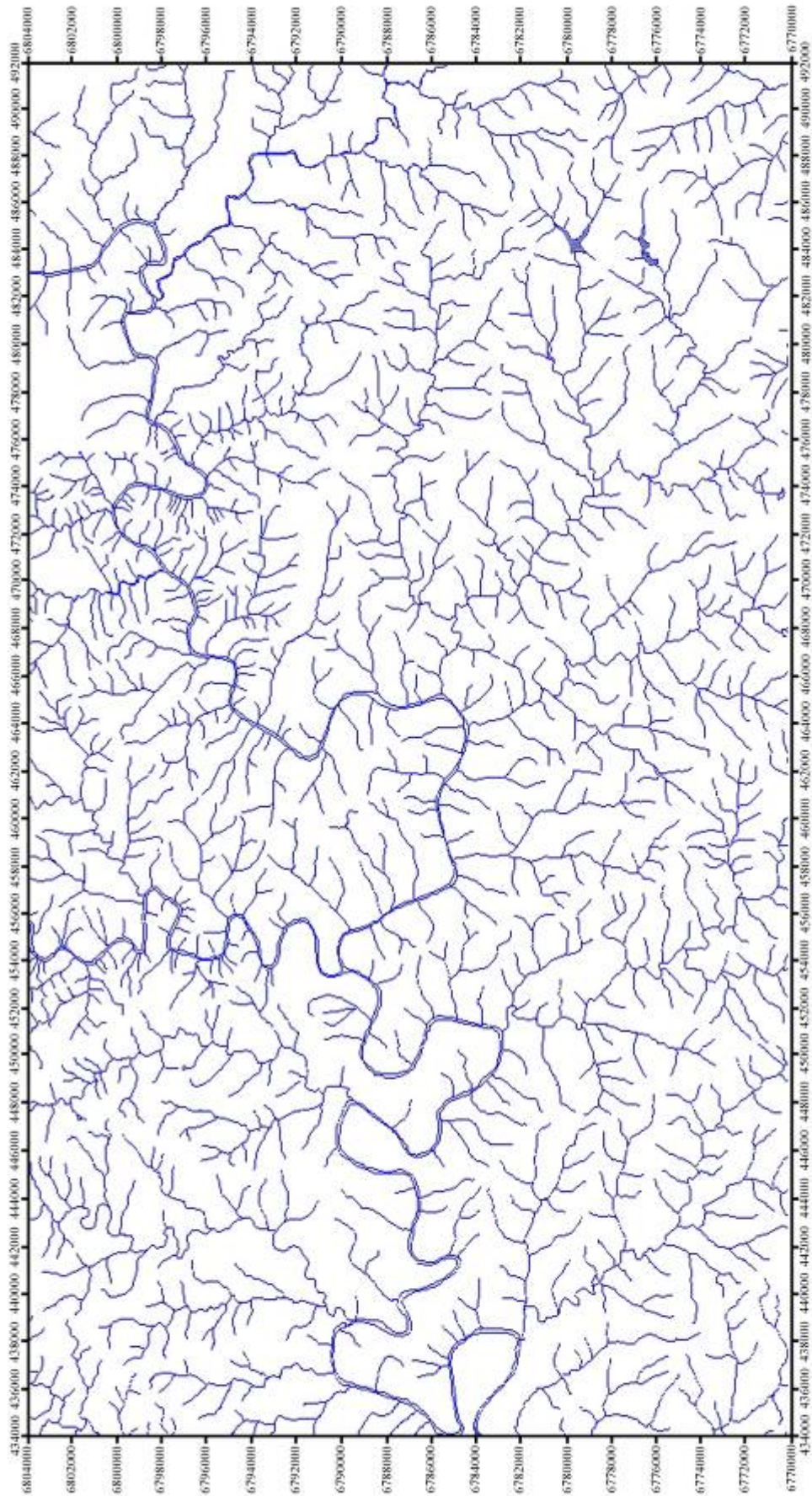
⇒ Base: a categoria base contém planos de informações referentes às principais estradas e localidades existentes na região (Mapa 7). Sua elaboração seguiu o mesmo procedimento adotado para a geração da categoria drenagem, sendo que as informações foram separadas nas diferentes classes: estradas e cidades.

⇒ Limite: essa categoria contém uma moldura que representa o retângulo envolvente que delimita a área de estudo. O procedimento adotado para sua elaboração foi o mesmo que o anterior.

7.4 – Processamento e integração dos dados

Na etapa de integração dos dados, foram realizados processamentos visando à determinação de características de cada um dos planos de informações, como a área compreendida pelas diferentes classe, geração de novas categorias, planos de informações e a integração entre os PIs. Para isso, foram utilizadas as seguintes rotinas disponíveis no SPRING:

- Temático – Medida de Classes: determina a área abrangida em cada uma das classes que constituem uma determinada categoria e o seu respectivo plano de informação;
- Temático – Tabulação Cruzada: essa ferramenta permite determinar a área comum às diversas classes que pertencem a planos de informações diferentes (nesse caso, os PIs só podem ser relacionados 2 a 2);



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS	
ESCOLA DE ENGENHARIA	
LABORATORIO DE MODELAGEM GEOLOGICA E AMBIENTAL	
MAPA DA DRENAGEM DA ÁREA DE ESTUDO	
Base Cartográfica: Folhas Topográficas SH.22-V-B-V-4; SH.22-V-D-II-2; SH.22-V-B-VI-3; SH.22-V-D-III-1; SH.22-V-B-VI-4; SH.22-V-D-III-2	
MAPA	ESCALA 1:180.000 DATA: MAIO DE 2003
6	Responsável: Geol. Pedro Antônio Roehle Regimato



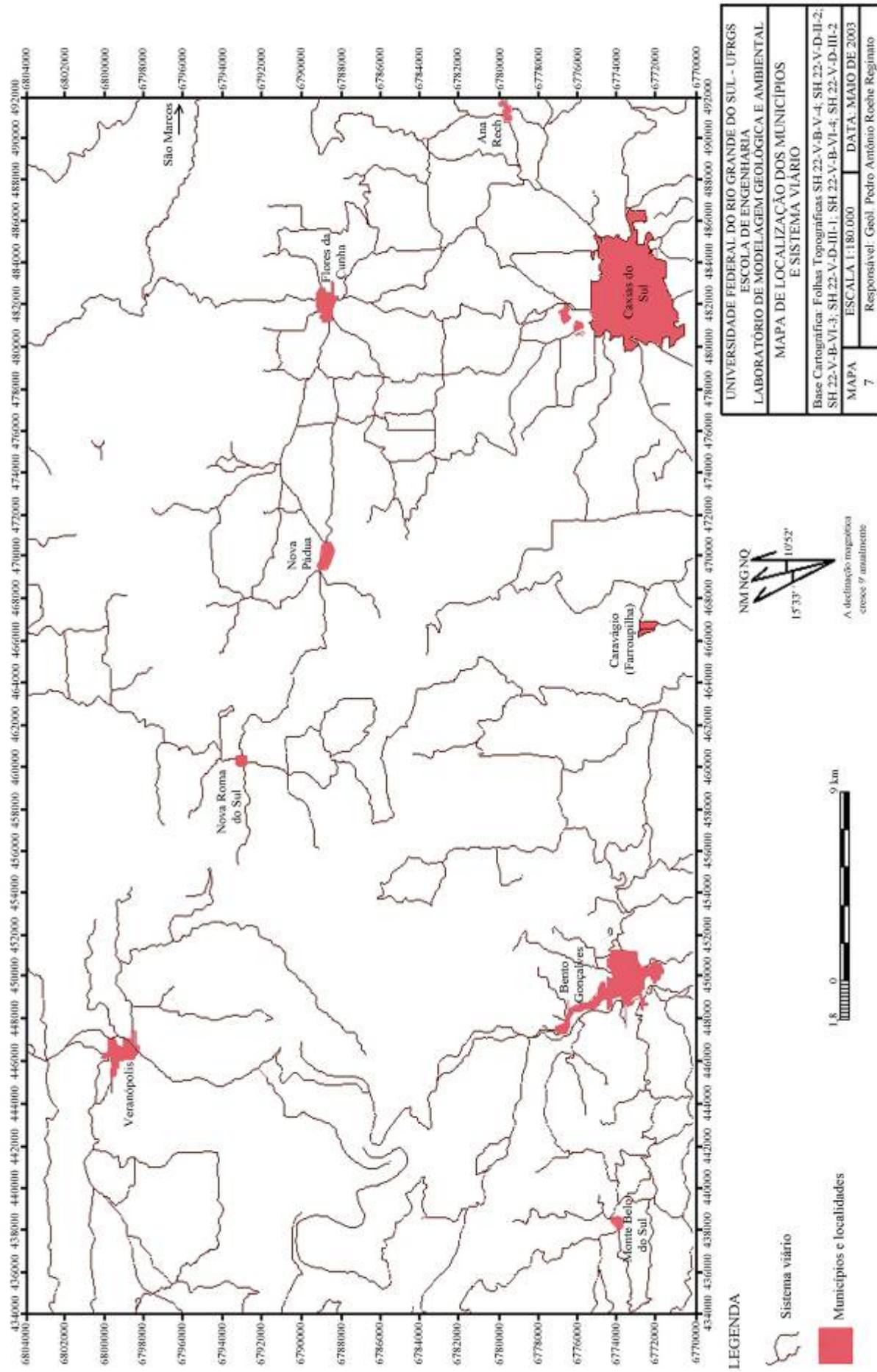
A declinação magnética
respeito 0' anualmente



LEGENDA



Rede de drenagem



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS
 ESCOLA DE ENGENHARIA
 LABORATÓRIO DE MODELAGEM GEOLÓGICA E AMBIENTAL

MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS MUNICÍPIOS
 E SISTEMA VIÁRIO

Base Cartográfica: Folhas Topográficas SH 22-V-B-V-4; SH 22-V-D-II-2; SH 22-V-B-VI-3; SH 22-V-D-III-1; SH 22-V-B-VI-4; SH 22-V-D-III-2
MAPA ESCALA 1:180.000 DATA: MAIO DE 2003
7
Responsável: Geol. Pedro Antônio Roehle Reginaldo

NM15°33' NQ
 10°52'
 A declinação magnética
 cresce 9' anualmente

LEGENDA

Sistema viário

Municípios e localidades

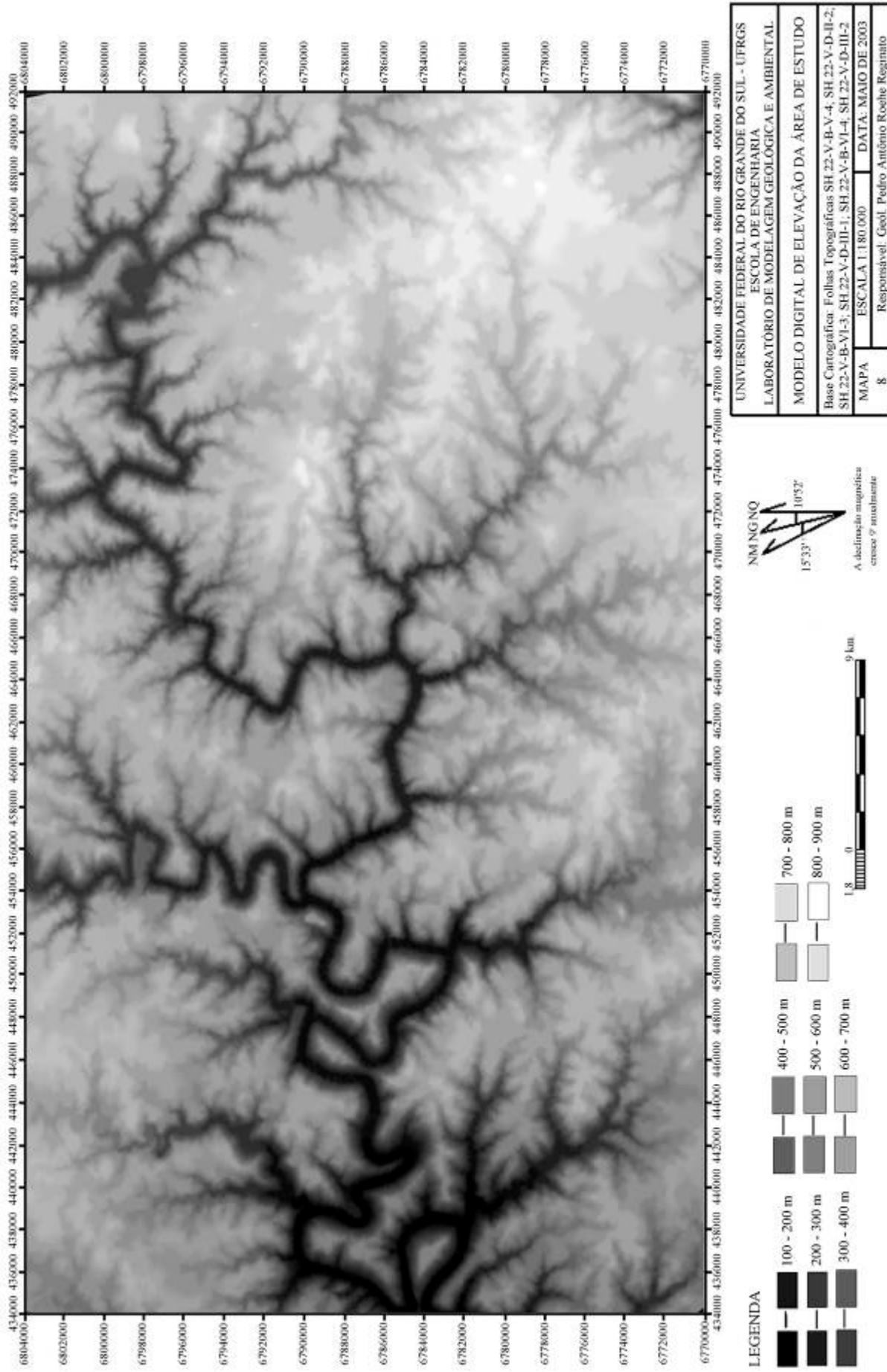
- **Análise – Suporte à Decisão e Legal:** a ferramenta de suporte à decisão disponível no SPRING que foi utilizada denomina-se “Processo Analítico Hierárquico – AHP”. Esse método foi desenvolvido por Saaty (1980). Segundo Moreira (2001), a técnica AHP é uma ferramenta multi-critério que permite melhores condições de aplicação de integração em ambientes SIG. As características principais dessa técnica estão relacionadas com a estrutura hierárquica dos dados, com a lógica de comparação dois a dois e com o cálculo de consistência. Esse último ponto é de extrema importância, pois fornece uma idéia sobre a forma de estruturação e a distribuição dos pesos dados pelo operador. Segundo Saaty (1980), o limite de consistência deve ficar em torno de 10%; valores superiores indicam que deve ser realizada nova estruturação da lógica de comparação dos pares de dados.

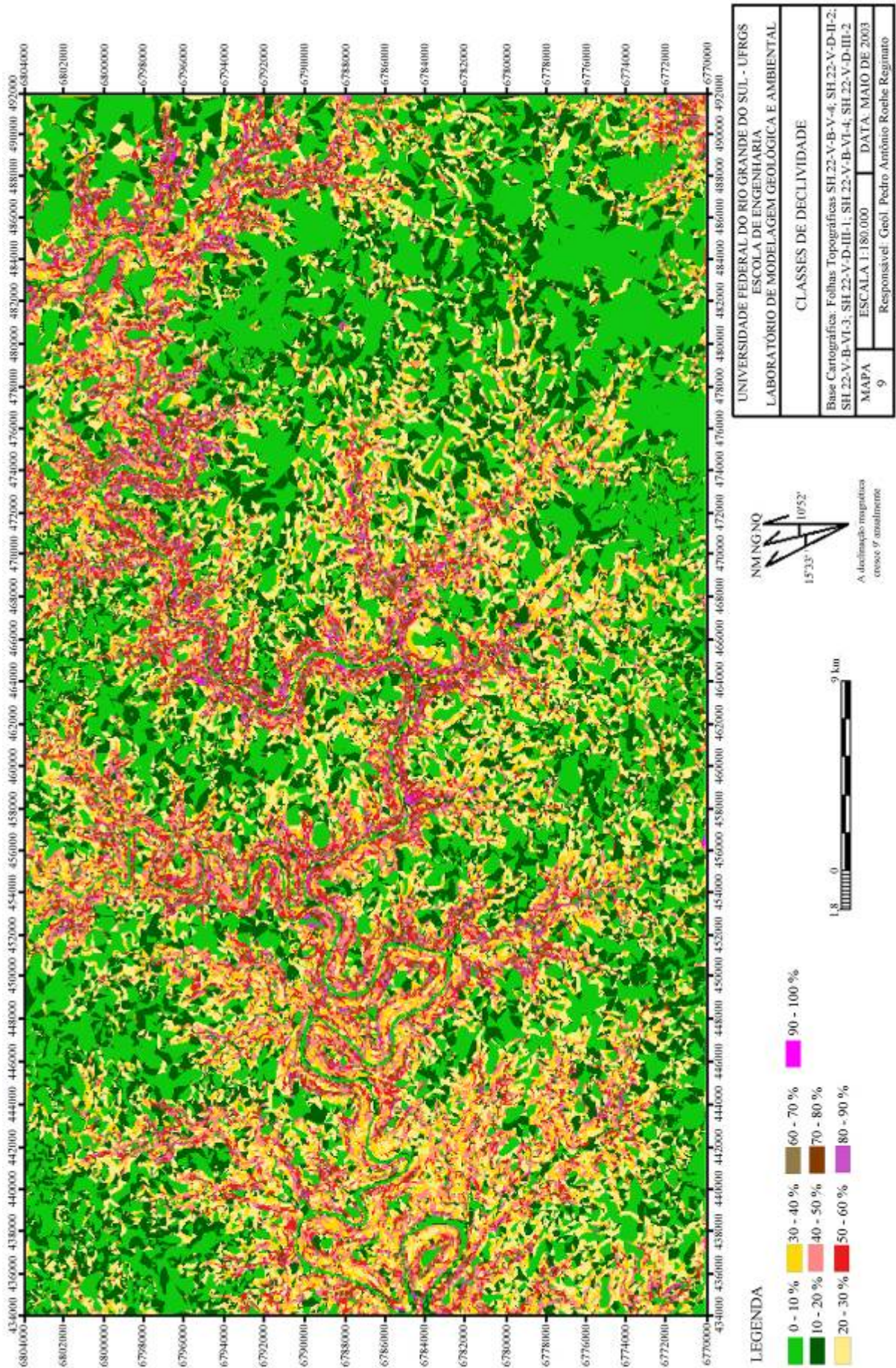
A escolha dessa técnica para a integração dos dados nessa pesquisa deve-se ao fato de que numa comparação de diferentes métodos, visando estudos de prospecção geológica, a técnica AHP apresentou os melhores resultados, conforme pode ser evidenciado no trabalho de Moreira (2001).

7.4.1 – Processamento e geração de novos PIs

Após a geração das categorias e dos PIs correspondentes, foi desenvolvida a primeira etapa de processamento e integração dos dados. Nessa etapa, foram gerados novos planos de informações por meio de rotinas de processamento disponíveis no SPRING. Os planos de informações gerados consistem do modelo numérico do terreno (modelo digital de elevação – Mapa 8) e do mapa de classes de declividade (Mapa 9). A geração desses PIs foi realizada de acordo com os seguintes passos:

- com os dados altimétricos existentes no PI curvas, foi gerada uma grade triangular de dados para determinação matemática da conformação da superfície do terreno, conforme rotina disponível no SPRING. Para isso, foi gerada uma categoria e um novo plano de informação denominado de “declividade”, onde foram armazenados esses dados;
- após a criação da grade triangular, foi gerado um mapa de declividades em percentuais (variação de 0 a 100%);
- com o mapa de declividades, foi gerada uma nova categoria e um novo plano de informação, denominado de “classes de declividade”, onde foi armazenado o mapa referente às diferentes classes de declividade;





- geração de uma grade regular, que permitiu a representação do relevo em 3D;
- sobreposição da grade regular com o mapa de declividades e uma imagem em tons de cinza gerada pelo programa SPRING, resultando uma imagem do modelo digital de elevação em tons de cinza. Para isso, foi necessária a criação de uma nova categoria e de um novo plano de informação denominado de “Imagem_MNT”.

7.4.2 – Integração: medidas de classes e tabulações cruzadas

A segunda etapa do processamento e integração de dados foi realizada utilizando as rotinas temáticas denominadas de “Medidas de Classes” e “Tabulação Cruzada”. Com a primeira rotina, pode-se determinar a área compreendida pelas diversas classes que constituem os diferentes PIs, conforme pode ser observado na tabela XXX.

Tabela XXX – Área das diversas classes que constituem os diferentes PIs e sua distribuição em porcentagem com relação a área total.

	Categorias	Classes	PIs	Tamanho da Área	Porcentagem
				197.200 ha	da Área
Banco de Dados e Projeto TESE	Solo	Litosolo	Solo	148405,84	75,26%
		Podzólico		41202,42	20,89%
		Terra_Bruna		7591,74	3,85%
	Geologia	Ácida	Geologia	143.338,89	72,69%
		Básica		53.861,11	27,31%
	Classes de Declividade	0 – 10	Classes de declividade	60.324,915	30,59%
		10 – 20		38.883,295	19,72%
		20 – 30		32.953,415	16,71%
		30 – 40		22.980,975	11,65%
		40 – 50		16.497,685	8,37%
50 – 60		11.059,865		5,61%	
60 – 70		6.942,955		3,52%	
70 – 80		4.019,105		2,04%	
80 – 90		2.211,605		1,12%	
90 – 100	1.326,185	0,67%			

A análise da tabela XXX mostra que, para a categoria solo, a classe Litossolo (associação de solos Litólicos e Cambissolos) abrange a maior parte da área do projeto e corresponde a 75,26% da superfície. Na categoria geologia a classe de rochas ácidas abrange 72,69% da área total, enquanto a classe de rochas básicas compreende 27,31%. Por fim, observa-se que, para as classes de declividade, 67,02% da superfície está relacionada com declividades entre 0 e 30%.

Com a utilização da Tabulação Cruzada, pode-se identificar áreas comuns entre PIs diferentes. Isso consistiu numa informação importante utilizada na etapa de integração dos dados, quando da definição dos pesos a serem determinados para os diferentes planos de informações. Para tanto, foram efetuadas tabulações entre os seguintes PIs:

- geologia x solo: nessa tabulação observou-se que a classe de litologias ácidas possui a maior ocorrência das diferentes classes de solos, perfazendo um total de 72,63%, enquanto que, na classe de rochas básica, estão associados 27,37% dos solos. Na classe de rochas ácidas, há a relação entre as diferentes classes na seguinte proporção: litossolos (66,68%), podzólico (28,05%) e terra_bruna (5,27%). Na classe de rochas básicas, há somente a ocorrência das classes de solos litólicos e podzólicos.
- classes de declividade x solos: com essa tabulação pode-se observar que, para o intervalo de declividade entre 0 e 30%, há uma coincidência de 97,83% da classe terra_bruna, 93,89% da classe podzólico e 58,38% da classe litossolo. Essa relação evidencia que, nas áreas de menor declividade, ocorrem as associações de solos cambissolos-podzólicos e terra_Bruna, que possuem maiores espessuras;
- classes de declividade x geologia: com essa tabulação identificou-se que as áreas com declividade entre 0 e 30% apresentam a ocorrência de 80,27% da classe de rochas ácidas, enquanto para a classe de rochas básicas há uma ocorrência de apenas 32,45%. Já nas áreas onde a declividade aumenta há uma inversão de coincidência de classes;
- solo x cadastro: nessa tabulação, foram cruzados o plano de informação solo com as diferentes classes existentes no PI cadastro; o resultado é apresentado na tabela XXXI.

A análise dos dados da tabela XXXI permite observar que a maior parte dos poços produtivos está localizada em áreas onde há a ocorrência da associação de solos litólicos e

cambissolos (60,93%). Além disso, observa-se que poços que apresentam vazões acima de 20 m³/h estão relacionados com regiões constituídas por solos litólicos/cambissolos e cambissolos/podzólicos e não ocorrem nas áreas formadas por solos do tipo Terra Bruna.

Tabela XXXI – Relação de ocorrência entre as classes do PI solo e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).

PI Cadastro ↓	PI Solo ⇒	Classe litossolo	Classe podzólico	Classe terra_bruna
buffer_vazão5 (139 poços) Intervalo de vazão 0 a 5m ³ /h		97 poços	27 poços	15 poços
buffer_vazão10 (121 poços) Intervalo de vazão 5 a 10m ³ /h		83 poços	26 poços	12 poços
buffer_vazão20 (64 poços) Intervalo de vazão 10 a 20m ³ /h		48 poços	8 poços	8 poços
buffer_vazão30 (21 poços) Intervalo de vazão > 20m ³ /h		20 poços	1 poço	nenhuma ocorrência
buffer_seco (62 poços) poços tubulares nulos		47 poços	15 poços	nenhuma ocorrência

- geologia x cadastro: com essa tabulação, pode-se observar áreas de coincidência entre as classes do PI Geologia e as classes do PI cadastro. Os resultados desse cruzamento encontram-se na tabela XXXII.

Com base nos dados apresentados na tabela XXXII, pode-se verificar que a classe de rochas ácidas possui as maiores ocorrências de poços tubulares produtivos (79,12%); o intervalo de vazão entre 0 e 10 m³/h é o que apresenta a maior associação. Já para a classe das rochas básicas, observa-se uma menor ocorrência de poços tubulares e a associação de poços tubulares com vazões acima de 10 m³/h diminui significativamente.

- classes de declividade x cadastro: a partir dessa tabulação, pode-se identificar a relação existente entre as diferentes classes de declividades com a ocorrência de poços tubulares. O resultado da tabulação encontra-se disposto na tabela XXXIII; porém, para uma melhor organização e visualização, as diferentes classes de declividade foram agrupadas.

A análise dos dados da tabela XXXIII mostra que a maior ocorrência de poços tubulares está associada às classes de declividade entre 0 e 30%; acima de 30% de declividade

há uma redução significativa da ocorrência de poços tubulares produtivos. Além disso, observa-se que poços com vazões acima de 10 m³/h não estão associados a áreas com declividade acima de 60%.

Tabela XXXII – Relação de ocorrência entre as classes do PI Geologia e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).

PI Cadastro ↓	PI Geologia ⇒	Classe: Rochas Ácidas	Classe: Rochas Básicas
buffer_vazão5 (139 poços) Intervalo de vazão 0 a 5m ³ /h		125 poços	14 poços
buffer_vazão10 (121 poços) Intervalo de vazão 5 a 10m ³ /h		114 poços	7 poços
buffer_vazão20 (64 poços) Intervalo de vazão 10 a 20m ³ /h		63 poços	1 poço
buffer_vazão30 (21 poços) Intervalo de vazão > 20m ³ /h		20 poços	1 poço
buffer_seco (62 poços) poços tubulares nulos		57 poços	5 poços

Tabela XXXIII – Relação de ocorrência entre as classes de declividade e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).

PI Cadastro ↓	PI Classes Declivid. ⇒	Classes 0 a 30%	Classes 30 a 60%	Classes >60%
buffer_vazão5 (139 poços) Intervalo de vazão 0 a 5m ³ /h		130 poços	8 poços	1 poço
buffer_vazão10 (121 poços) Intervalo de vazão 5 a 10m ³ /h		116 poços	4 poços	1 poço
buffer_vazão20 (64 poços) Intervalo de vazão 10 a 20m ³ /h		63 poços	1 poço	nenhuma ocorrência
buffer_vazão30 (21 poços) Intervalo de vazão > 20m ³ /h		20 poços	1 poço	nenhuma ocorrência
buffer_seco (62 poços) poços tubulares nulos		55 poços	6 poços	1 poço

- fraturas x cadastro: com essa tabulação cruzada, pode-se determinar a relação existente entre os diferentes grupos de estruturas e os poços tubulares; os resultados do cruzamento estão apresentados na tabela XXXIV.

Com os dados apresentados na tabela XXXIV, pode-se determinar que, para os grupos de lineamentos nordeste e noroeste, há uma associação de poços tubulares praticamente igual. No entanto, observa-se que, para o intervalo de vazões de 10 a 20 m³/h, há uma associação um pouco maior de poços tubulares com o grupo de lineamentos nordeste. Por outro lado, observa-se que a ocorrência de vazões acima de 20 m³/h possui uma relação maior com lineamentos noroeste.

A análise dos lineamentos do grupo lesteoeste e nortesul mostra uma ocorrência menor de poços tubulares nessas estruturas. No entanto, quando se compara diferentes intervalos de vazões, torna-se evidente uma maior relação com os lineamentos nortesul.

Tabela XXXIV – Relação de ocorrência entre as classes do PI fraturas e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).

PI Cadastro ↓	PI Fratura ⇒	Noroeste	Nordeste	lesteoeste	nortesul	sem relação
buffer_vazão5 (139 poços) Intervalo de vazão 0 a 5m ³ /h		50 poços	48 poços	8 poços	10 poços	23 poços
buffer_vazão10 (121 poços) Intervalo de vazão 5 a 10m ³ /h		36 poços	36 poços	14 poços	16 poços	19 poços
buffer_vazão20 (64 poços) Intervalo de vazão 10 a 20m ³ /h		18 poços	21 poços	9 poços	9 poços	7 poços
buffer_vazão30 (21 poços) Intervalo de vazão > 20m ³ /h		8 poços	6 poços	2 poços	4 poços	1 poço
buffer_seco (62 poços) poços tubulares nulos		13 poços	16 poços	3 poços	3 poços	27 poços

Com relação aos poços tubulares nulos, observa-se que eles possuem associação com os diferentes grupos de lineamentos (as estruturas nordeste apresentam maior correlação). Isso evidencia a existência de estruturas que apresentam comportamentos diferenciados quanto à

ocorrência de água subterrânea. A variabilidade desse comportamento está relacionada às diferentes orientações que os lineamentos de um determinado grupo possuem.

A análise dos poços que não possuem relações com os diferentes grupos de lineamentos, mostra que existem locações de poços realizadas a diferentes distâncias dessas estruturas. Assim, poços locados mais distantes dos lineamentos tendem a apresentar vazões baixas ou serem nulos. Isso é evidenciado pelo grande número de poços nulos (27) que não possuem relação com os diferentes grupos de estruturas. Além disso, observa-se que o maior número de poços produtivos que não apresentam relação com os lineamentos estão relacionados ao intervalo de vazões entre 0 e 10 m³/h.

7.4.3 – Integração: análise e suporte a decisão

Com as informações existentes nos diferentes PIs e com os dados obtidos na segunda etapa de processamento e integração dos dados, desenvolveu-se a terceira etapa da integração, cujo objetivo é a geração de mapas de favorabilidade à ocorrência de aquíferos fraturados. Para isso, foi utilizada a técnica AHP (Processo Analítico Hierárquico) disponível no SPRING e a programação LEGAL para definição dos mapas de favorabilidade.

O primeiro produto gerado com o emprego da técnica AHP e programação LEGAL foi o mapa de cruzamento de lineamentos. A sua elaboração foi realizada da seguinte forma:

- definição das variáveis a serem utilizadas na rotina “Suporte à Decisão (AHP)”: para isso, foram escolhidos os planos de informações referentes aos diferentes grupos de lineamentos (nordeste, noroeste, lesteoeste e nortesul);
- definição dos pesos: como o objetivo era determinar a área comum aos diferentes grupos foi determinado o mesmo peso para cada um dos grupos de estruturas (Fig. 135);
- cálculo dos pesos de cada uma das variáveis: rotina disponível no programa (Fig. 135);
- programação LEGAL: nesse programa, são definidos os pesos para cada uma das classes que compõem as categorias e os planos de informações, definição do dado de saída e criação do plano que contém o dado de saída. Assim, foram definidos pesos iguais para cada um dos grupos de lineamentos, determinada a categoria AHP de classificação numérica (exigência do programa) e definido o plano de informação “ahp” (denominação escolhida para o PI) como dado de saída;

- criação do PI “ahp”: após rodar o programa LEGAL, é gerado um plano de informação denominado de “ahp”, conforme a programação realizada. Esse plano consiste em uma grade que contém valores resultantes do processo de ponderação;
- elaboração de um PI temático denominado cruzamento: para visualização e utilização do PI “ahp” nos processos de integração, foi gerado um novo plano de informação de classificação temática. Para isso, foi realizado um fatiamento da grade de modo que os valores encontrados foram associados a uma única classe para gerar um mapa com a localização das áreas onde ocorrem cruzamentos de lineamentos. Para que esse plano pudesse ser utilizado nos processos de integração, ele foi convertido em matriz (Mapa 10), conforme rotina disponível no SPRING.



Figura 135 – Janela da rotina Suporte a Decisão (AHP) do programa SPRING.

Com o mapa de cruzamentos, foram realizadas integrações por meio da tabulação cruzada para determinação das áreas de coincidência entre os planos de informação cruzamento e cadastro. Os resultados se encontram dispostos na tabela XXXV.

A análise da tabela XXXV mostra que há uma coincidência pequena de poços tubulares com cruzamento de fraturas (33 poços). Isso indica não ser esse o principal fator a ser seguido na hora da locação de poços tubulares profundos. No entanto, pode-se evidenciar uma correlação entre poços tubulares com vazões entre 0 e 5 m³/h e acima de 10 m³/h com os cruzamentos de fraturas. Da mesma forma, identifica-se uma correlação entre poços tubulares nulos e cruzamento de fraturas.

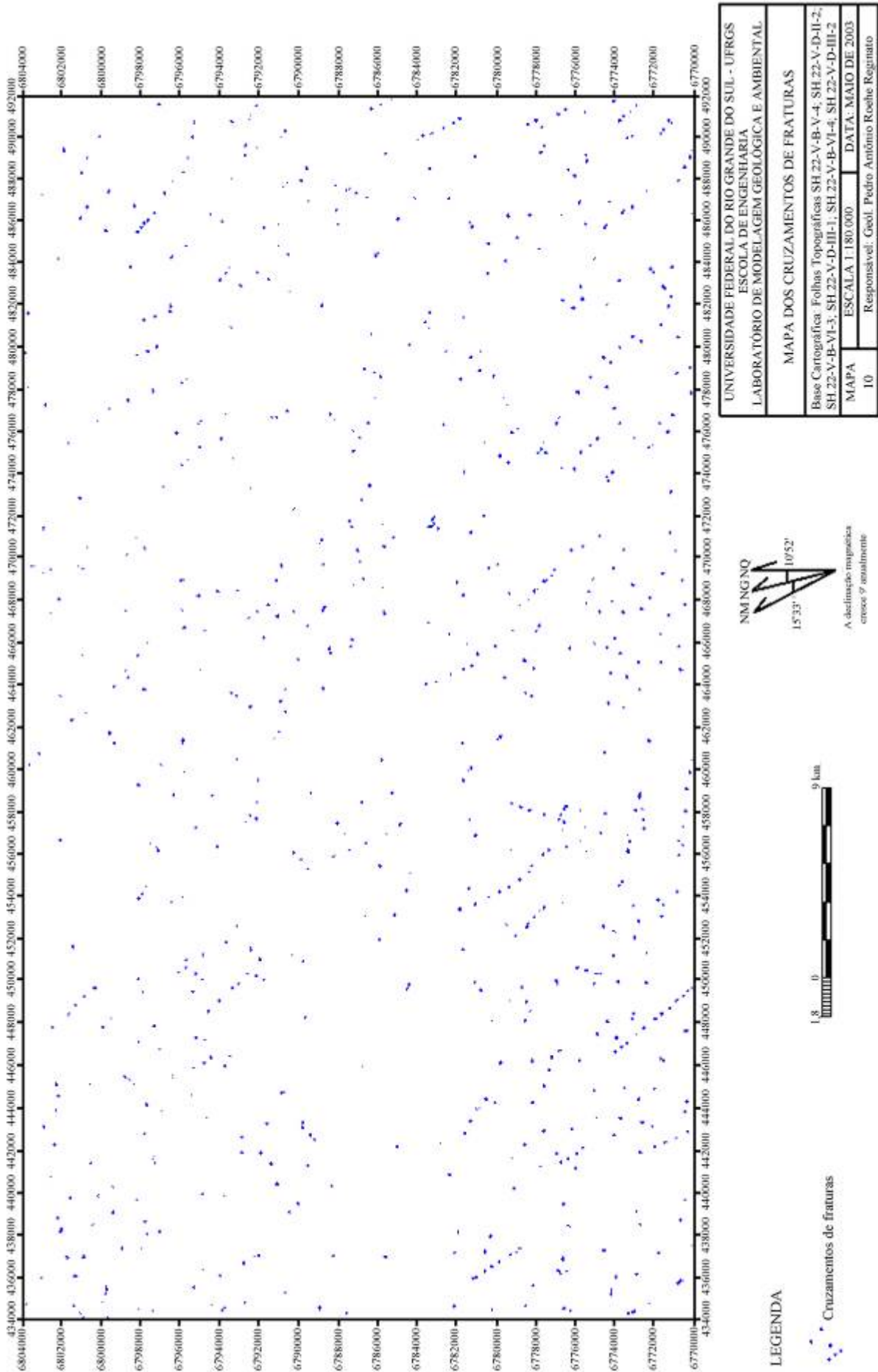


Tabela XXXV – Relação de ocorrência entre o PI cruzamento e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).

PI Cadastro ↓	PI Cruzamento ⇒	Classe Cruzamento
buffer_vazão5 (139 poços) Intervalo de vazão 0 a 5m ³ /h		10 poços
buffer_vazão10 (121 poços) Intervalo de vazão 5 a 10m ³ /h		5 poços
buffer_vazão20 (64 poços) Intervalo de vazão 10 a 20m ³ /h		7 poços
buffer_vazão30 (21 poços) Intervalo de vazão > 20m ³ /h		7 poços
buffer_seco (62 poços) poços tubulares nulos		4 poços

O segundo produto gerado com a utilização da técnica AHP e programação LEGAL foi o mapa de favorabilidade à ocorrência de aquíferos fraturados, denominado como PI “prospecção”. Esse mapa resultou do cruzamento dos seguintes planos de informações: geologia, solos e classes de declividade, fatores esses identificados como condicionadores dos aquíferos. Cabe salientar que o fator principal, estruturas, não foi utilizado para a elaboração desse plano, pois possui um peso muito grande de importância, o que provocaria distorções com relação ao mapa resultante do processo de integração. Dessa forma, o plano de informação estruturas foi cruzado posteriormente com o plano de informação “prospecção” para definição de novos PIs, que representam as áreas mais favoráveis à locação de poços tubulares para a região de estudo.

Para a geração do plano de informação favorabilidade, foram seguidos os seguintes passos:

- definição dos pesos: como o objetivo era determinar as áreas mais favoráveis à ocorrência de aquíferos fraturados tendo como base os condicionantes secundários (geologia, solos e classes de declividade), foram determinados pesos diferenciados para cada um dos planos (Fig.136). Cabe salientar que a definição dos pesos seguiu critérios definidos nos levantamentos de campo, bem como na análise dos resultados da tabulação cruzada. Com isso, pode-se verificar que as classes de declividade possuíam um peso maior com relação aos

PIs geologia e solos, assim com se pode determinar que o PI solo possui um maior grau de importância quando relacionado com o plano de informação geologia;

- cálculo dos pesos de cada uma das variáveis: rotina disponível no programa (Fig.136);
- programação LEGAL: nesse programa, são definidos os pesos para cada uma das classes que compõem as categorias e planos de informações, definição do dado de saída e criação do plano que contém o dado de saída. Assim, foram definidos pesos diferenciados para os diferentes PIs (classes de declividade > solos> geologia), bem como para as diferentes classes. Nesse caso, para as classes de declividade até 30% foram definidos os maiores pesos, enquanto que para o PI solo, as classes podzólico e terra_Bruna receberam valores diferenciados dos valores da classe litossolo. A categoria que contém o plano de saída foi definida como AHP3, de classificação numérica, e o plano de informação que contém os dados de saída foi denominado de ahp3;

Critério	Peso	Critério
CLASSES_DECL 6	Bem Melhor	GEOLOGIA
CLASSES_DECL 5	Melhor	SOLO
SOLO 3	Algo Melhor	GEOLOGIA
	Igual	
	Igual	
	Igual	
	Igual	
	Igual	
	Igual	
	Igual	
	Igual	

Razão de Consistência: 0.081

Figura 136 - Janela da rotina Suporte a Decisão (AHP) do programa SPRING.

- criação do PI ahp3: após rodar o programa LEGAL, é gerado um plano de informação denominado de ahp3, conforme a programação realizada. Esse plano consiste em uma grade que contém valores resultantes do processo de ponderação;
- elaboração de um PI temático denominado “prospecção4”: para visualização e utilização do PI “ahp3” nos processos de integração, foi gerado um novo plano de informação de classificação temática, denominado de prospecção4. Para isso, foi realizado um fatiamento da grade, de forma que os valores encontrados foram associados a três classes denominadas: muito favorável, favorável e pouco favorável. Para que esse plano pudesse ser utilizado nos processos de integração, ele foi convertido em matriz (Mapa 11), conforme rotina disponível no SPRING.

Como o PI prospecção4 possui três classes temáticas, foi efetuado cálculo da área compreendida pelas diferentes classes por meio da rotina “Temático/Medida de Classes”. Dessa forma, foram determinados os seguintes valores:

⇒ classe muito favorável: 80043,37 ha (40,59%);

⇒ classe favorável: 76881,88 ha (38,99%);

⇒ classe pouco favorável: 402,7475 ha (20,42%).

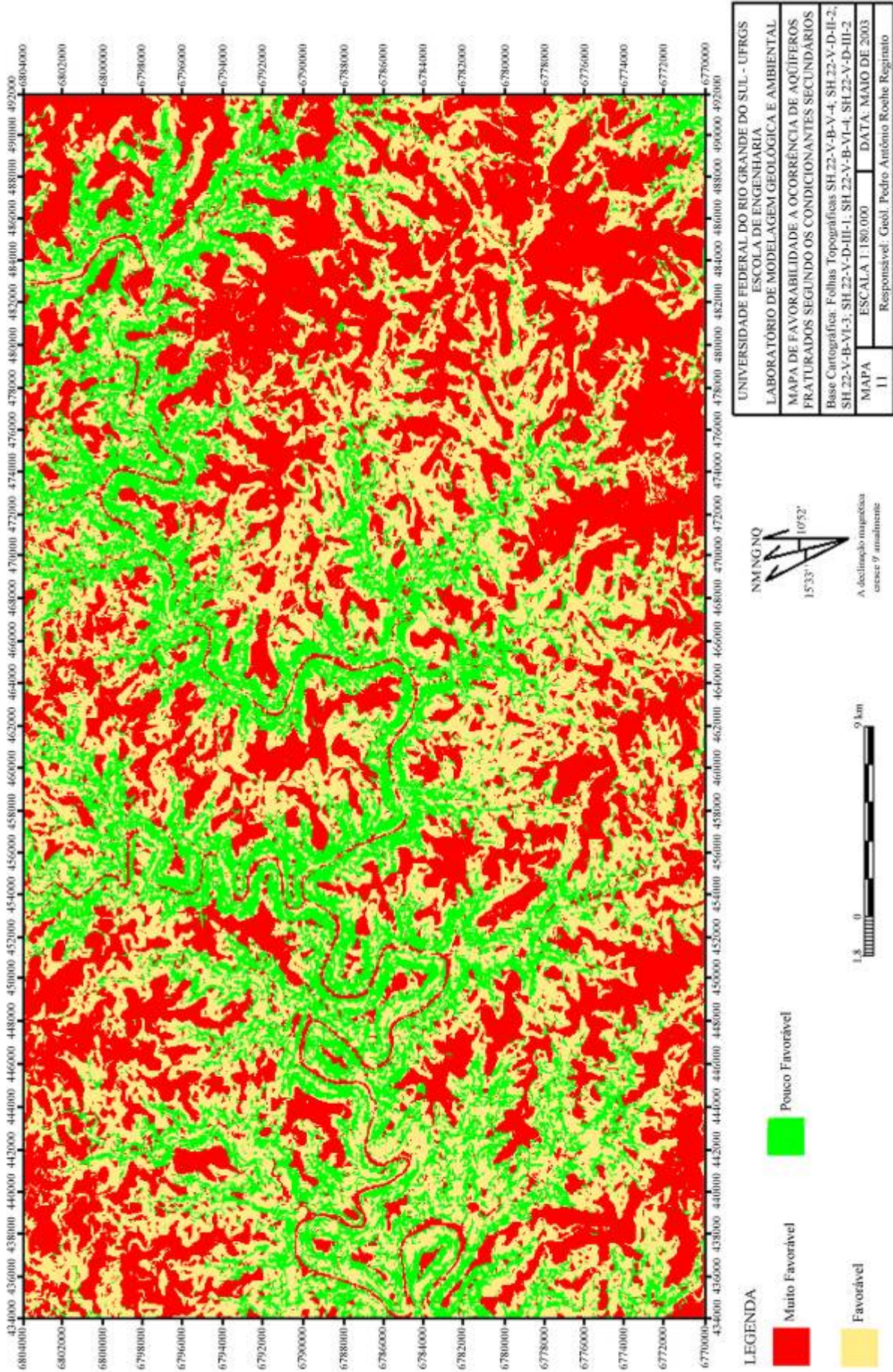
Para determinar a relação existente entre as diferentes classes e a localização dos poços tubulares produtivos, foi realizada uma tabulação cruzada entre os PIs prospecção 4 e cadastro. O resultado desse cruzamento está representado na tabela XXXVI.

A análise dos dados provenientes da tabulação cruzada mostra uma grande área de coincidência dos poços tubulares produtivos com as áreas definidas pelas classes muito favorável e favorável, evidenciando a validade do produto gerado. Além disso, verifica-se que há índices altos de áreas de coincidência entre os poços tubulares nulos e as diferentes classes, comprovando a importância dos lineamentos como condicionantes dos aquíferos fraturados, pois mesmo que a área seja considerada como muito favorável, nesse plano de informação, a locação deve ser realizada sobre lineamentos.

O terceiro e último produto gerado com a utilização da técnica AHP e programação LEGAL consistiu na elaboração de quatro planos de informação denominado de:

⇒ “arealocacao1”: relação entre as estruturas nordeste e o PI prospeccao4;

⇒ “arealocacao2”: relação entre as estruturas noroeste e o PI prospeccao4;



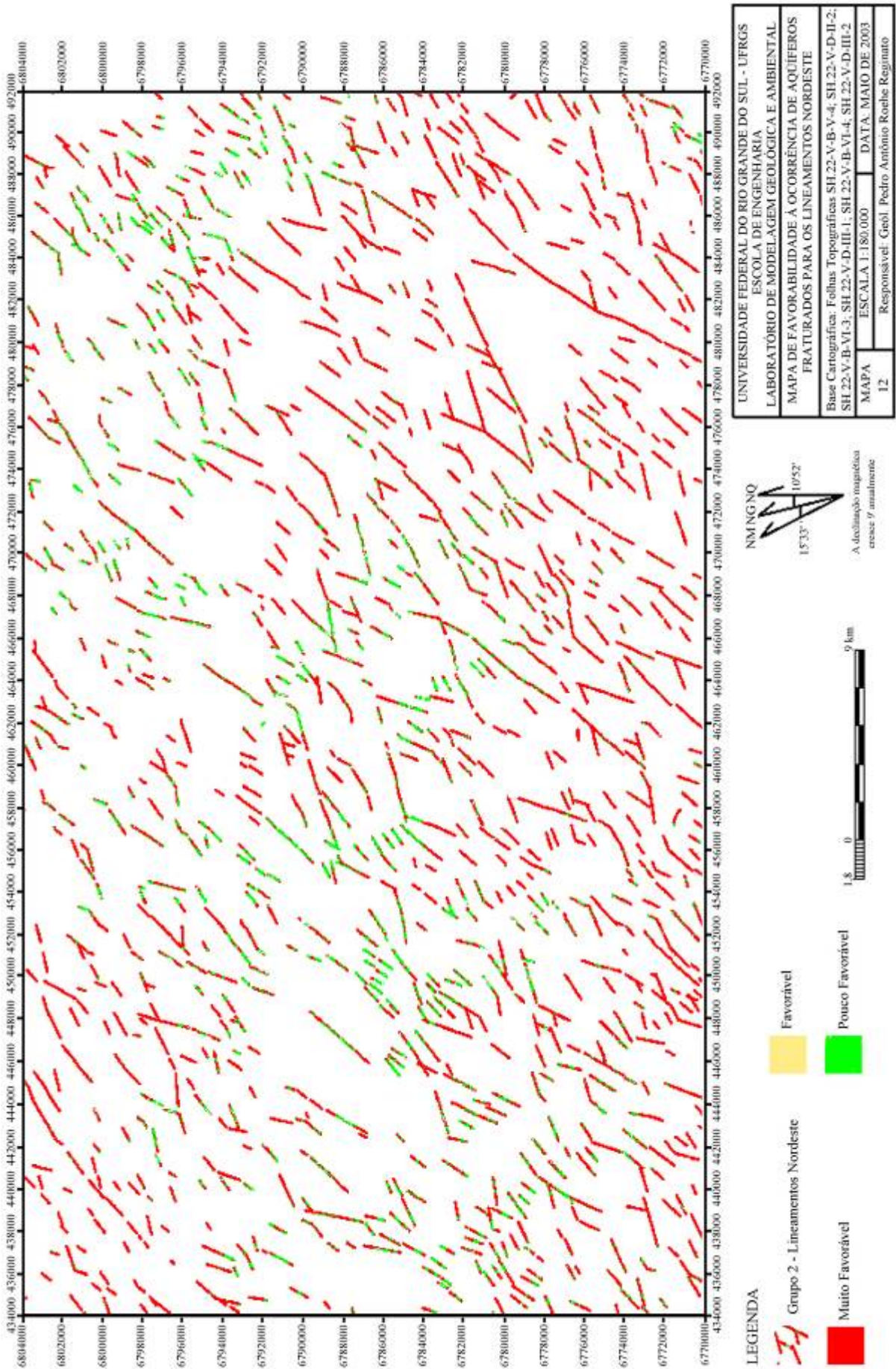
⇒ “arealocacao3”: relação entre as estruturas lesteoeste e o PI prospeccao4;

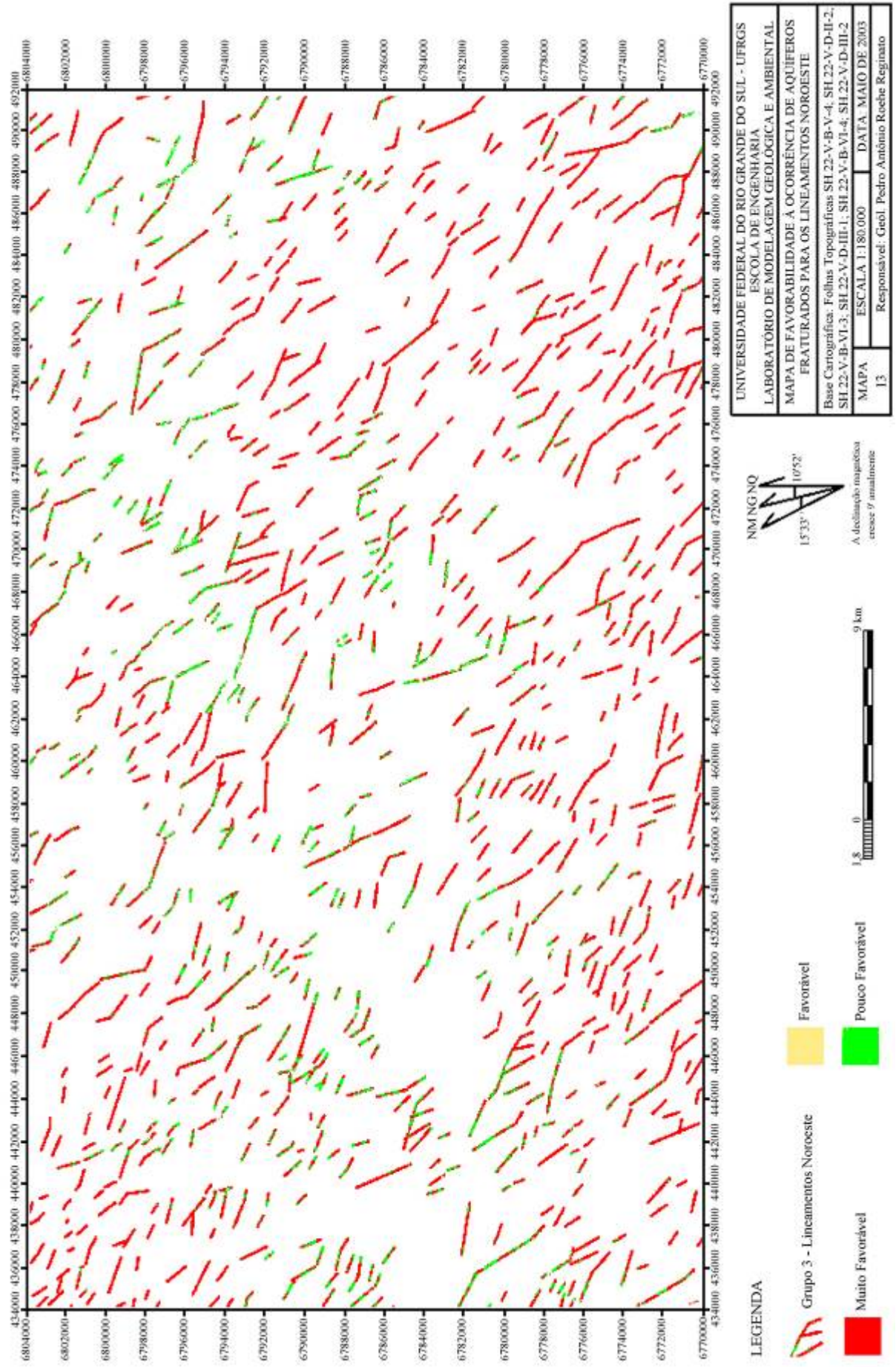
⇒ “arealocacao4”: relação entre as estruturas nortesul e o PI prospeccao4;

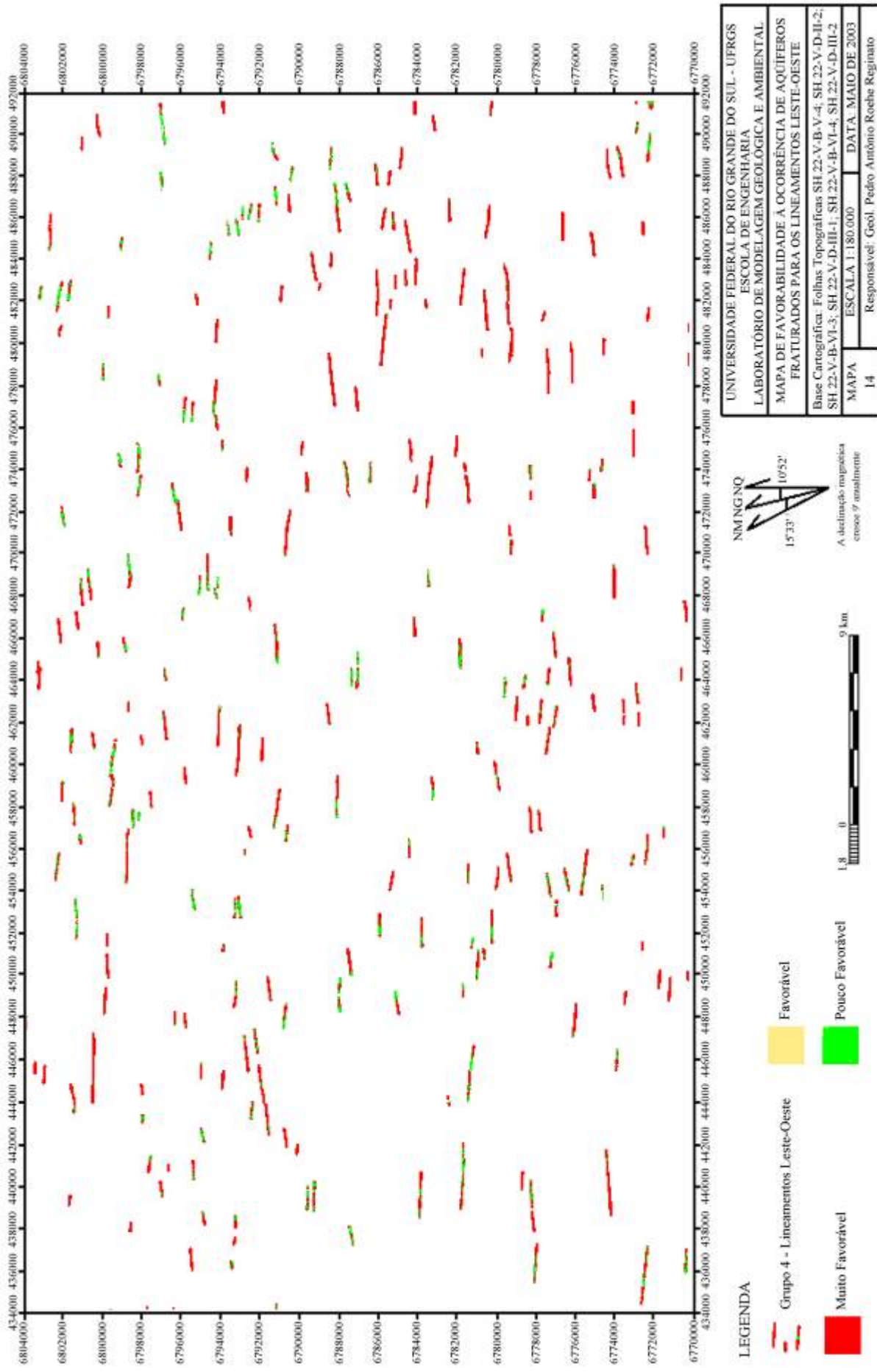
Tabela XXXVI – Relação de ocorrência entre as classes do PI prospecção4 e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).

PI Cadastro ↓	PI prospecção4 ⇒	Classe Muito Favorável	Classe Favorável	Classe Pouco Favorável
buffer_vazão5 (139 poços) Intervalo de vazão 0 a 5m ³ /h		82 poços	54 poços	3 poços
buffer_vazão10 (121 poços) Intervalo de vazão 5 a 10m ³ /h		84 poços	36 poços	1 poço
buffer_vazão20 (64 poços) Intervalo de vazão 10 a 20m ³ /h		45 poços	19 poços	nenhuma ocorrência
buffer_vazão30 (21 poços) Intervalo de vazão > 20m ³ /h		10 poços	10 poços	1 poço
buffer_seco (62 poços) poços tubulares nulos		31 poços	27 poços	4 poços

Esses planos foram gerados por meio do cruzamento entre os PIs prospecção4 e fraturas, de acordo com os passos apresentados para a geração dos dois produtos descritos anteriormente. Cabe salientar que, na hora de definição dos pesos das classes do PI prospeccao4, foi determinado um peso maior para a classe muito favorável e favorável e um peso menor para a classe pouco favorável. Além disso, da mesma forma que nos produtos anteriores, após serem elaborados os diferentes PIs (pelo programa LEGAL), foram gerados os PIs temáticos com nomes arealocacao 1, 2, 3 e 4. Para isso, foram realizadas operações de fatiamento das grades, onde os valores encontrados foram associados a três classes denominadas: muito favorável, favorável e pouco favorável. Para que esses planos pudessem ser utilizados nos processos de integração, eles foram convertidos em matriz (Mapa 12, 13, 14 e 15), conforme rotina disponível no SPRING. Para verificar a coincidência entre os PIs arealocacao 1, 2, 3 e 4, e o PI cadastro, foi efetuada a tabulação cruzada e os resultados são apresentados nas tabelas XXXVII, XXXVIII, XXXII e XL, respectivamente.







UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS	
ESCOLA DE ENGENHARIA	
LABORATÓRIO DE MODELAGEM GEOLÓGICA E AMBIENTAL	
MAPA DE FAVORABILIDADE À OCORRÊNCIA DE AQUIFEROS FRATURADOS PARA OS LINEAMENTOS LESTE-OESTE	
Base Cartográfica: Folhas Topográficas SH 22-V-B-V-4; SH 22-V-D-II-2; SH 22-V-B-VI-3; SH 22-V-D-III-1; SH 22-V-B-VI-4; SH 22-V-D-III-2	
MAPA	ESCALA 1:180.000
14	DATA: MAIO DE 2003
Responsável: Geól. Pedro Antônio Roehbe Rogatino	

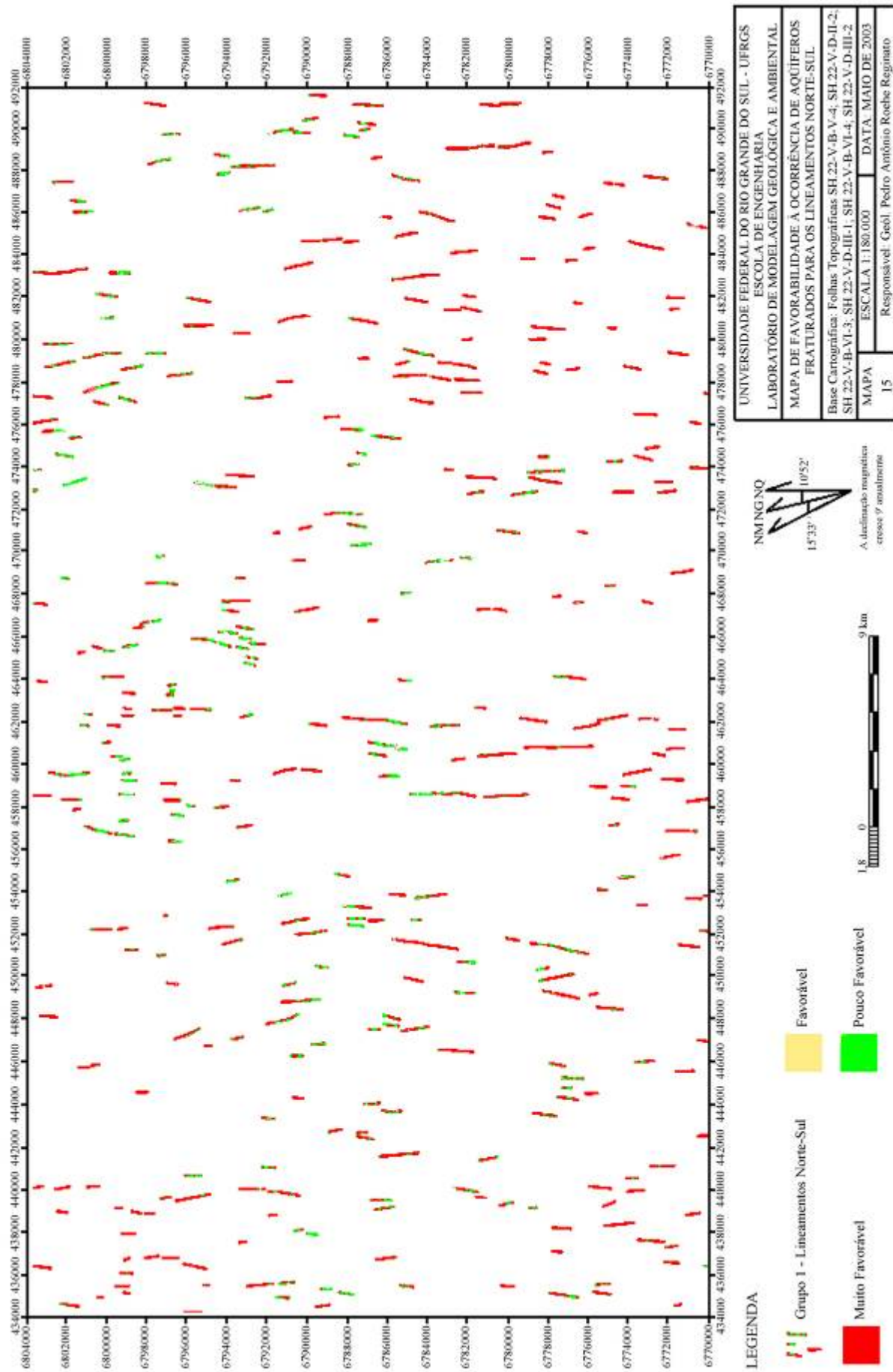


Tabela XXXVII – Relação de ocorrência entre as classes do PI arealocacao1 (estruturas nordeste) e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).

PI Cadastro ↓	PI Arealocacao1 ⇒	Classe Muito Favorável	Classe Favorável	Classe Pouco Favorável
buffer_vazão5 (139 poços) Intervalo de vazão 0 a 5m ³ /h		46 poços	2 poços	nenhuma ocorrência
buffer_vazão10 (121 poços) Intervalo de vazão 5 a 10m ³ /h		36 poços	nenhuma ocorrência	nenhuma ocorrência
buffer_vazão20 (64 poços) Intervalo de vazão 10 a 20m ³ /h		21 poços	nenhuma ocorrência	nenhuma ocorrência
buffer_vazão30 (21 poços) Intervalo de vazão > 20m ³ /h		5 poços	1 poço	nenhuma ocorrência
buffer_seco (62 poços) poços tubulares nulos		15 poços	nenhuma ocorrência	1 poço

Tabela XXXVIII – Relação de ocorrência entre as classes do PI arealocacao2 (estruturas noroeste) e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).

PI Cadastro ↓	PI Arealocacao2 ⇒	Classe Muito Favorável	Classe Favorável	Classe Pouco Favorável
buffer_vazão5 Intervalo de vazão 0 a 5m ³ /h		48 poços	2 poços	nenhuma ocorrência
buffer_vazão10 Intervalo de vazão 5 a 10m ³ /h		35 poços	1 poço	nenhuma ocorrência
buffer_vazão20 Intervalo de vazão 10 a 20m ³ /h		18 poços	nenhuma ocorrência	nenhuma ocorrência
buffer_vazão30 Intervalo de vazão > 20m ³ /h		8 poços	nenhuma ocorrência	nenhuma ocorrência
buffer_seco poços tubulares nulos		12 poços	1 poço	nenhuma ocorrência

Tabela XXXIX – Relação de ocorrência entre as classes do PI arealocacao3 (estruturas lesteoeste) e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).

PI Cadastro ↓	PI Arealocacao3 ⇒	Classe Muito Favorável	Classe Favorável	Classe Pouco Favorável
buffer_vazão5 Intervalo de vazão 0 a 5m ³ /h		8 poços	nenhuma ocorrência	nenhuma ocorrência
buffer_vazão10 Intervalo de vazão 5 a 10m ³ /h		14 poços	nenhuma ocorrência	nenhuma ocorrência
buffer_vazão20 Intervalo de vazão 10 a 20m ³ /h		9 poços	nenhuma ocorrência	nenhuma ocorrência
buffer_vazão30 Intervalo de vazão > 20m ³ /h		2 poços	nenhuma ocorrência	nenhuma ocorrência
buffer_seco poços tubulares nulos		3 poços	nenhuma ocorrência	nenhuma ocorrência

Tabela XL – Relação de ocorrência entre as classes do PI arealocacao4 (estruturas nortesul) e o número de poços do PI cadastro (número total de poços = 407).

PI Cadastro ↓	PI Arealocacao4 ⇒	Classe Muito Favorável	Classe Favorável	Classe Pouco Favorável
buffer_vazão5 Intervalo de vazão 0 a 5m ³ /h		8 poços	2 poços	nenhuma ocorrência
buffer_vazão10 Intervalo de vazão 5 a 10m ³ /h		16 poços	nenhuma ocorrência	nenhuma ocorrência
buffer_vazão20 Intervalo de vazão 10 a 20m ³ /h		9 poços	nenhuma ocorrência	nenhuma ocorrência
buffer_vazão30 Intervalo de vazão > 20m ³ /h		4 poços	nenhuma ocorrência	nenhuma ocorrência
buffer_seco poços tubulares nulos		2 poços	1 poço	nenhuma ocorrência

A análise dos resultados apresentados nas diferentes tabelas mostra uma forte coincidência na localização de poços tubulares sobre estruturas situadas em áreas

consideradas como muito favoráveis, evidenciando uma boa confiabilidade do produto gerado com os processos de integração. Além disso, observa-se que os poços tubulares nulos possuem também áreas de coincidência com as classes muito favorável e favorável, o que evidencia a existência de comportamentos diferenciados dos lineamentos que compõem os diferentes grupos de estruturas.

7.4.4 – Análise dos resultados da integração dos dados

A análise dos produtos obtidos com os diferentes processos de integração evidencia a importância dos diferentes fatores condicionantes dos aquíferos fraturados. Esses fatores apresentam graus de prioridade diferenciados, que devem ser levados em consideração nos processos de locação dos poços tubulares.

As principais características e relações que se tornam evidentes são:

⇒ a associação de solos Litossolos/Cambissolos possui a maior correlação com poços tubulares produtivos que apresentam diferentes vazões. Além disso, observa-se que solos da classe terra_Bruna possuem correlações com poços tubulares que apresentam vazões de até 20 m³/h; para vazões superiores, ou para poços nulos, não houve identificação de correlação. A associação de solos Cambissolo/Podzólico também possui correlação com poços tubulares produtivos que possuem vazões entre 0,5 até mais de 20 m³/h;

⇒ quanto à geologia da área de estudo, observa-se que a maior ocorrência de poços tubulares produtivos está associada às regiões compreendidas pelas rochas vulcânicas ácidas;

⇒ a maior ocorrência de poços tubulares produtivos está relacionada com as regiões que apresentam as classes de declividade entre 0 e 30%. Acima dos 30%, há uma redução significativa da ocorrência de poços produtivos, e acima de 60%, há baixa correlação e não há associação de poços com vazões acima de 20 m³/h;

⇒ há uma forte correlação dos poços tubulares com os lineamentos. Numa análise dos diferentes grupos de estruturas, se verifica que os lineamentos dos grupos nordeste e noroeste apresentam associações semelhantes com poços produtivos. No entanto, para o intervalo de vazões entre 10 a 20 m³/h há pequenas variações, pois foram identificados 21 poços

associados às estruturas nordeste e 18 aos lineamentos noroeste. Já para casos de vazões acima de 20 m³/h, há uma pequena inversão, onde a maior ocorrência está relacionada às estruturas de orientação noroeste (8 poços = 38,1%). Além disso, os grupos lesteoeste e nortesul possuem ocorrências em proporções variadas de poços tubulares, sendo que os lineamentos do grupo nortesul possuem maior correlação com poços produtivos (para quase todos os intervalos de vazão, com exceção do intervalo 10 a 20 m³/h onde houve distribuição semelhante, há maior ocorrência desse grupo de estruturas com poços produtivos). Por outro lado, quando analisamos a distribuição dos poços nulos, identifica-se uma relação com os diferentes grupos de estruturas (maior para os lineamentos nordeste). Isso evidencia que as estruturas representantes dos diferentes grupos apresentam comportamentos diferenciados quanto à ocorrência de água subterrânea;

⇒ os cruzamentos de lineamentos possuem uma pequena relação com a ocorrência de poços tubulares produtivos (33 ocorrências de um total de 407 poços), sendo que os intervalos de vazões que apresentaram maior coincidência foram os de 0 a 5 m³/h (10 poços de um total de 29 poços produtivos); 5 a 10 m³/h (5 poços de um total de 29 poços produtivos); 10 a 20 m³/h (7 poços de um total de 29 poços produtivos) e acima de 20 m³/h (7 poços de um total de 29 poços produtivos). Além disso, foi evidenciada correlação entre poços secos e áreas com cruzamentos de estruturas (4 poços identificados). Essa correlação entre os poços tubulares produtivos, os diferentes grupos de lineamentos e as áreas de cruzamento de estruturas evidencia que, além de haver graus de importância diferenciados para cada um dos grupos (noroeste>nordeste>nortesul>lesteoeste), há estruturas dentro de cada grupo que apresentam graus de correlação variados com a ocorrência de aquíferos fraturados. Essa distinção deve estar relacionada com a orientação dos lineamentos e sua relação com os campos paleotensionais;

⇒ os poços tubulares que não apresentaram correlações com os grupos de lineamentos ou áreas de cruzamento de fraturas consistem de poços nulos (27 de um total de 62 poços nulos), poços com vazões entre 0 e 5 m³/h (23 de um total de 139 poços) e poços com vazões entre 5 e 10 m³/h (19 de um total de 36 poços). Essa ocorrência de poços produtivos sem correlação com lineamentos é explicada em função da localização do poço. Quando a locação for realizada a uma distância muito grande (em geral, acima de 150 metros da estrutura) há uma tendência grande de o poço apresentar baixas vazões ou então ser nulo. Há exceções, quando as zonas de fraturas possuem dimensões maiores ou então há conexão entre essas fraturas e as estruturas

primárias dos derrames de rochas vulcânicas. Nesses casos os poços tubulares poderão apresentar vazões maiores;

⇒ o mapa de favorabilidade à ocorrência de aquíferos fraturados, elaborado com base nos condicionantes secundários (geologia, solos, declividade), apresentou bons resultados, pois houve uma coincidência grande da ocorrência de poços tubulares produtivos com as áreas classificadas como muito favoráveis e favoráveis. Dessa forma, ficou evidente que as regiões de menores declividades (abaixo de 30%), que estão associadas às classes de solos cambissolo/podzólico e litossolo/cambissolo, possuem as maiores correlações com poços tubulares produtivos. No entanto, há a necessidade da ocorrência, nessas áreas, de lineamentos, pois foi identificada uma correlação entre poços tubulares secos e essas diferentes classes;

⇒ os mapas denominados de “arealocacao”, que foram gerados por meio do cruzamento entre os PIs prospecção⁴ e estrutural, apresentaram bons resultados, pois há uma forte correlação entre a ocorrência de poços tubulares produtivos e as classes denominadas de muito favoráveis e favoráveis. Isso evidencia a importância dos lineamentos na prospecção dos aquíferos fraturados. No entanto, pode-se observar, também, que houve coincidência de poços tubulares nulos com essas áreas, evidenciando que, dentro de cada grupo de lineamentos, há orientações preferenciais que devem ser seguidas para a locação dos aquíferos fraturados.

Em função da identificação da existência de correlações diferenciadas entre os lineamentos que constituem cada um dos diferentes grupos, foi realizada uma análise entre a localização de cada um dos poços tubulares (produtivos e nulos) e as orientações das estruturas. Essa análise foi realizada por meio da interpretação visual dos PIs estrutural e cadastro e os resultados são apresentados na tabela XLI.

Em termos gerais, observou-se que os poços tubulares produtivos possuem uma distribuição semelhante com relação ao grupo de lineamentos noroeste e nordeste. Analisando-se as diferentes orientações existentes dentro de cada grupo (separadas por intervalos), observa-se que:

- Grupo 3 (lineamentos noroeste): a localização dos poços tubulares produtivos está associada, com proporções variadas, a diferentes intervalos de orientação, representados pelos rumos N20W até N70W. Dentro desse intervalo, verifica-se que as orientações N30 - 60W

(N50 – 60W = 22,56%) constituem as preferenciais. A área de ocorrência dos poços tubulares produtivos com vazões acima de 10 m³/h, por outro lado, apresenta uma correlação maior com os lineamentos que possuem as seguintes orientações:

⇒ vazões entre 10 e 20 m³/h: N40 - 50W (29,63%); N30 - 40W (18,5%); N20 - 30W (18,5%);

⇒ vazões acima de 20 m³/h: N30 - 40W (37,5%); N50 - 60W (25%); N60 - 70W (18,75%);

Tabela XLI – Correlação entre poços tubulares produtivos (diferentes vazões) e as orientações dos diferentes grupos de lineamentos.

Grupo 1 – Lineamentos de orientação N-S								
Range °	N0 - 10E		N10 - 14E		N10 - 14W		N00 - 10W	
%	24,39		24,39		2,44		48,78	
Grupo 2 – Lineamentos de orientação NE								
Range °	15 a 20	20 a 30	30 a 40	40 a 50	50 a 60	60 a 70	70 a 80	80 a 84
%	2,41	22,58	12,90	24,20	8,87%	5,65%	18,55%	4,84%
Grupo 3 – Lineamentos de orientação NW								
Range °	15 a 20	20 a 30	30 a 40	40 a 50	50 a 60	60 a 70	70 a 75	
%	3,75	15,04	18,8	18,05	22,56	12,78	9,02	
Grupo 4 – Lineamentos de orientação E-O								
Range °	N85 - 90E		N80 - 90W		N75 - 80W			
%	24,39%		51,22%		24,39%			

• **Grupo 2 (lineamentos nordeste):** nesse grupo de estruturas, observa-se que as orientações N40 - 50E; N20 - 30E e N70 - 80E estão associadas à maior ocorrência de poços tubulares produtivos. Porém, se for analisada a relação existente entre as diferentes vazões e os lineamentos, verifica-se que:

⇒ vazões entre 10 a 20 m³/h estão associadas aos rumos N20 - 30E (33,33%); N40 - 50E (19,05%);

⇒ vazões acima de 20 m³/h possuem relação com os rumos N20 - 30E (43,75%) e N40 - 50E (25%);

- Grupo 1 (lineamentos Norte-Sul): nesse grupo, a maior ocorrência de poços tubulares produtivos está relacionada com as orientações N00 - 10W e N00 - 14E. Já, se forem comparadas as diferentes vazões com as estruturas, observa-se que há a seguinte relação:

⇒ vazões entre 10 a 20 m³/h: N00 - 10W (50%); N10 - 14E (40%);

⇒ vazões acima de 20 m³/h: N10 - 14E (100%);

- Grupo 2 (lineamentos Leste-Oeste): os lineamentos que possuem maior relação com poços tubulares produtivos correspondem às orientações N80 - 90W. Com relação à ocorrência de poços tubulares com diferentes vazões e suas relações com a orientação das estruturas, verifica-se o seguinte:

⇒ vazões entre 10 a 20 m³/h: N80 - 90W (70%);

⇒ vazões acima de 20 m³/h: N80 - 90W (66,67%);

Essas correlações identificadas entre os poços tubulares produtivos e as orientações dos diferentes lineamentos evidencia a existência de estruturas que apresentam comportamentos diferenciados (abertas ou fechadas). No entanto, cabe salientar que, dependendo de como é feita a locação dos poços (proximidade dos lineamentos e relação com mergulho), uma estrutura de determinada orientação pode ter resultados diferenciados: produtivo ou nulo. Essa relação pode ser utilizada para se comprovar o comportamento diferenciado, mas deve ser empregada com cautela na hora da locação de poços tubulares, pois cada região pode apresentar características diferenciadas com relação aos sistemas de estruturas, conforme foi apresentado na descrição do fator estrutural (Capítulo 6).

A observação da correlação entre os poços tubulares nulos com a orientação dos lineamentos que pertencem aos diferentes grupos, mostra que:

- 20,54% dos poços tubulares nulos não possuem relações com nenhum tipo de estrutura;
- 36,99% dos poços tubulares nulos apresentam relação com os lineamentos do grupo 2 (nordeste), com orientações principais em N30 - 40E e N50 - 60E;
- 17,81% dos poços tubulares nulos estão associados a lineamentos noroeste (grupo 3), com orientação principal N40 - 50W;
- 13,7% dos poços tubulares nulos estão associados a estruturas do grupo 1 (norte-sul), com rumo principal N00 - 10E;

- 10,96% dos poços tubulares nulos possuem relação com estruturas do grupo 4 (leste-oeste), com principal orientação marcada pelo rumo N75 – 80W.

Da mesma forma que os poços produtivos, as relações identificadas servem para verificar que existem estruturas com comportamentos diferenciados. Deve-se, porém, analisar esses dados com cautela, pois, dependendo de como foi realizada a locação do poço (relação entre a proximidade do poço e do lineamento, bem como mergulho da estrutura), poderá haver dois tipos de resultados para os poços: produtivos ou nulos. Isso é correto na medida em que os poços tubulares nulos estão associados a lineamentos que também possuem correlação com poços produtivos.

Para identificar a existência de relações entre a ocorrência de poços tubulares produtivos e/ou nulos com o comprimento dos lineamentos, foi realizado mesmo procedimento de análise entre os PIs “estrutural” e “cadastro”. Os resultados obtidos dessa análise encontram-se dispostos na tabela XLII.

A tabela XLII mostra que há uma relação entre os poços tubulares produtivos de vazões abaixo de 10 m³/h com lineamentos que possuem comprimentos entre 500 a 1500 metros. Para os poços tubulares com vazões entre 10 a 20 m³/h, os lineamentos com comprimentos entre 500 a 1500m continuam mantendo a maior correlação; mas, há um aumento significativo da ocorrência desses poços com as estruturas de dimensões entre 1500 a 2500 metros e acima de 2500 metros. Já, poços que possuem vazões acima de 20 m³/h possuem relações iguais entre os lineamentos de comprimento 500-1500 metros e 1500-2500 metros; além disso, para os poços que apresentam essas vazões, há um aumento da relação dos mesmos com as estruturas de dimensões entre 3500 a 4500 metros.

A correlação entre os poços produtivos e os diferentes comprimentos de lineamentos mostra que, para o fator comprimento, não devem ser atribuídos os maiores pesos, quando da definição de áreas para locação de poços tubulares. Além da análise do comprimento do lineamento, deve ser observada a relação geométrica entre fraturas vizinhas, o tamanho das zonas de fraturas e suas relações com as áreas de maior favorabilidade a ocorrência de água subterrânea.

Tabela XLII – Correlação entre poços tubulares produtivos (diferentes vazões) e os comprimentos dos lineamentos.

Poços tubulares produtivos com vazões entre 0,5 até 5m³/h						
Comprimento	0 a 500m	500 a	1500 a	2500 a	3500 a	>4500m
Lineamentos		1500m	2500m	3500m	4500m	
Porcentagem	2,56%	61,55%	29,91%	5,98%	0%	0%
Poços tubulares produtivos com vazões entre 5 até 10m³/h						
Comprimento	0 a 500m	500 a	1500 a	2500 a	3500 a	>4500m
Lineamentos		1500m	2500m	3500m	4500m	
Porcentagem	0,87%	65,21%	25,22%	6,96%	0,87%	0,87%
Poços tubulares produtivos com vazões entre 10 até 200m³/h						
Comprimento	0 a 500m	500 a	1500 a	2500 a	3500 a	>4500m
Lineamentos		1500m	2500m	3500m	4500m	
Porcentagem	1,47%	52,95%	32,35%	11,76%	1,47%	0%
Poços tubulares produtivos com vazões acima de 20m³/h						
Comprimento	0 a 500m	500 a	1500 a	2500 a	3500 a	>4500m
Lineamentos		1500m	2500m	3500m	4500m	
Porcentagem	0%	40%	40%	7,5%	12,5%	0%

8 – CONCLUSÕES

Com base no desenvolvimento desse estudo, pode-se determinar que, para parte da bacia hidrográfica Taquari-Antas, há dois sistemas de aquíferos principais: i) o sistema aquífero livre ou freático, localizado no manto de alteração existentes sobre as rochas vulcânicas, e ii) o sistema aquífero fraturado, localizado nas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Ambos os sistemas são utilizados na região para abastecimento público, desenvolvimento de atividades industriais, agrícolas e recreativas. Nesse caso, o sistema aquífero fraturado é o que possui maior importância.

Na região, foram cadastrados 690 poços tubulares localizados em 11 municípios. A análise das características hidrogeológicas e hidrodinâmicas mostra que há comportamentos diferenciados para cada uma das 11 áreas. Porém, a região de Farroupilha possui a maior ocorrência de poços tubulares com vazões acima de 20 m³/h. Na seqüência, surgem as áreas de Bento Gonçalves, Flores da Cunha e Antônio Prado. Com base nos parâmetros de transmissividade e de capacidade específica, os maiores valores foram encontrados para a área de Farroupilha; na seqüência, estão as áreas de Bento Gonçalves, Antônio Prado e Caxias do Sul.

A análise hidroquímica permitiu identificar a ocorrência de três campos principais: i) águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (80,1%); ii) águas bicarbonatadas sódicas (18,4%) e iii) águas sulfatadas cálcicas ou magnesianas (1,4%). O campo das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas está relacionado com os processos de intemperismo das rochas vulcânicas, evidenciando a existência de um controle litoquímico. O campo das águas bicarbonatadas sódicas não possui relação com os procesos de intemperismo das rochas vulcânicas. Esse campo é gerado por meio da mistura entre as águas do sistema aquífero Botucatu com as águas do sistema aquífero fraturado, evidenciando a existência de um controle tectônico e morfoestrutural responsável pela comunicação entre os diferentes sistemas de aquíferos. Nesse caso, os lineamentos que apresentaram relação com a ocorrência de águas pertencentes a esse campo foram principalmente aqueles de orientação nordeste (80%) e, secundariamente, aqueles de orientação noroeste (20%). O terceiro campo, das águas sulfatadas cálcicas ou magnesianas, também não possui relação com os processos de intemperismo das rochas vulcânicas, evidenciando a existência de intercomunicação entre sistemas de aquíferos diferentes. A relação existente entre as águas pertencentes a esse campo

e os lineamentos permitiu identificar que estruturas de grande porte, de orientação noroeste, associadas a áreas de baixa altitude, apresentam forte correlação com esse campo.

Como no caso das características hidrogeológicas e hidrodinâmicas, há regiões que apresentam predominância de diferentes campos. Nesse caso, as regiões de maior ocorrência do campo das águas bicarbonatas sódicas são Nova Pádua e Veranópolis.

A análise da existência de águas subterrâneas com excesso de ferro e manganês mostra que, em todas as regiões, há ocorrência das mesmas; mas, São Marcos foi a área de maior proporção (61,5%). Os condicionadores responsáveis pela ocorrência de águas subterrâneas com excesso de ferro e manganês são morfoestruturais, geomorfológicos e pedológicos. Assim, as áreas caracterizadas por vales com fundo côncavo, altos topográficos, presença de solos do tipo Podzólicos, Cambissolos e Terra-Bruna, de média a grande espessuras, têm grande tendência à ocorrência de águas com essas características químicas. Observou-se, também, uma relação com lineamentos de orientação noroeste (48,4%).

O sistema aquífero fraturado é condicionado pelos seguintes fatores geológicos: sistema estrutural, padrão de relevo, tipologia e espessuras dos solos e a litologia.

A análise do condicionante estrutural foi realizada com base em levantamentos de campo e interpretação de produtos de sensoriamento remoto. A análise dos dados de campo mostra que a região de estudo é caracterizada pela presença de estruturas do tipo 2, representadas por fraturas, zonas de fratura, veios e diques. Essas estruturas, salvo algumas exceções, são verticais a sub-verticais e, quando preenchidas, apresentam mineralizações de zeolitas e de sílica.

A análise cinemática identificou dois campos tensionais principais. O primeiro campo possui direção de compressão σ_1 horizontal de orientação 082° e uma direção de tração σ_3 horizontal de orientação 352° . O segundo campo tensional mostra uma direção de compressão σ_1 horizontal de orientação 174° e uma direção de tração σ_3 horizontal de orientação 264° . Em ambos os campos paleotensionais, as fraturas paralelas a sub-paralelas à σ_1 são trativas, enquanto as estruturas oblíquas (entre os eixos de compressão e tração) são as fraturas híbridas e de cisalhamento. Essas características indicam que o sistema estrutural da região é representado por um padrão ortogonal com orientação próxima a Norte-Sul e Leste-Oeste. As estruturas que apresentam orientações diferentes do padrão ortogonal correspondem a planos de cisalhamento que podem ou não apresentar preenchimentos por veios ou diques. Nesse

caso, identificou-se que as estruturas trativas, em geral, apresentam preenchimento, enquanto as oblíquas podem ou não apresentar preenchimento. Os dois campos paleotensionais atuaram na região como um todo e fornecem características diferenciadas para cada uma das sub-regiões (fato observado na análise geométrica dos diferentes setores que constituem a região, bem como na caracterização hidrogeológica, hidrodinâmica e hidroquímica). Isso implica na necessidade de estudos locais adicionais para a caracterização do regime predominante, da sua ordem temporal e da sua relação com as características hidrogeológicas gerais dos aquíferos fraturados.

A análise dos lineamentos obtidos da interpretação de fotografias aéreas foi realizada sobre um total de 4154 lineamentos interpretados como do tipo 2. Esses lineamentos foram separados em quatro grupos principais: i) grupo 1 (663 lineamentos de orientação entre N14E e N14W); ii) grupo 2 (1751 lineamentos com orientação entre N15 - 84E); iii) grupo 3 (1316 lineamentos com orientação entre N15 - 75W); e iv) grupo 4 (424 lineamentos com orientação entre N85 - 90E e N75 - 90W). A análise estatística desses grupos de estruturas mostra que, para os diferentes setores, há variações significativas com relação aos comprimentos médios dos vetores (lineamentos) e aos valores dos azimutes médios. Isso comprova a existência de comportamentos estruturais diferenciados para cada sub-região, conforme evidenciado com os dados de campo. Além disso, com base na análise da geometria dos lineamentos, observou-se padrões na forma de “Y” e “X”, que sugerem a presença de fraturas híbridas e de cisalhamento. Outra geometria identificada foi o padrão “T”, com orientações próximas a norte-sul e leste-oeste; esse padrão de lineamentos está de acordo com um sistema ortogonal de estruturas, conforme identificado pelos estudos dos campos paleotensionais e pela análise dos histogramas de frequência.

O segundo condicionante corresponde ao padrão de relevo da região. A análise dos dados altimétricos mostra que as regiões que possuem relevos dissecados (graus médios a fortes de dissecção) são áreas menos favoráveis à ocorrência de água subterrânea, pois há uma forte tendência dessas áreas serem regiões de descarga. As regiões que possuem relevos menos dissecados, por outro lado, tendem a apresentar maiores chances de ocorrência de água subterrânea.

O terceiro condicionante está relacionado com os tipos e espessuras de solos. A análise dos dados gerais permitiu identificar que os solos dos tipos Terra-Bruna, Podzólicos, Cambissolos e Litossolos possuem importância variada. No entanto, a ocorrência desses tipos

de solos, associados a espessuras médias a grandes e a regiões de relevo menos dissecado tornam a área mais favorável à ocorrência de água subterrânea.

O quarto condicionante consiste no fator litologia. Esse fator possui relação principalmente com a hidroquímica das águas subterrâneas, pois o campo das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas está diretamente relacionado com os processos intempéricos que atuam sobre as rochas vulcânicas da região. Por outro lado, as estruturas primárias existentes nos diferentes derrames de rochas vulcânicas também possuem relação com a ocorrência de água subterrânea. A estrutura primária de maior importância está associada às zonas vesiculares e amigdalóides, pois essas zonas estão mais sujeitas aos processos de intemperismo, os quais facilitam a abertura e a conexão dos vazios existentes na rocha e favorecem a circulação da água subterrânea. No entanto, a zona vesicular a amigdalóide, por si só, não constitui um bom aquífero; mas, quando associada às estruturas tectônicas, possui relação com bons volumes de água subterrânea. A análise dos dados de campo mostra que as zonas vesiculares a amigdalóides estão mais associadas aos derrames de rochas básicas.

A integração dos condicionantes dos aquíferos fraturados foi realizada com o programa SPRING. A análise dos resultados permitiu identificar que os condicionantes (estrutural, relevo, solos e litologia) possuem diferentes graus de importância a serem levados em conta nos processos de prospecção dos aquíferos fraturados. Os resultados encontrados foram:

⇒ estrutural: há uma forte correlação entre os lineamentos e a ocorrência de poços tubulares produtivos. Nesse caso, as estruturas de orientação nordeste e noroeste são as principais. O intervalo de vazão 10 a 20 m³/h possui maior correlação com os lineamentos de orientação nordeste, enquanto que vazões acima de 20 m³/h possuem maior relação com lineamentos noroeste. Por outro lado, foi identificada uma correlação entre poços tubulares nulos e os diferentes grupos de estruturas (predominância para o grupo nordeste). Isso evidencia que as estruturas que constituem os diferentes grupos apresentam comportamentos diferenciados com relação à ocorrência de água subterrânea;

⇒ relevo: a maior ocorrência de poços tubulares produtivos (329 poços de um total de 407) está relacionada a regiões que apresentam declividades inferiores a 30%;

⇒ solos: a maior ocorrência de poços tubulares produtivos (248 poços de um total de 407) está associada a solos do tipo Litossolos e Cambissolos. No entanto, as maiores vazões estão associadas a solos dos tipos Cambissolos Brunos, Podzólicos e Terra-Bruna;

⇒ litologia: a maior ocorrência de poços tubulares produtivos (322 poços de um total de 407) está relacionada com a classe das rochas vulcânicas ácidas.

A integração dos diferentes condicionantes por meio de técnicas de análise e suporte à decisão, disponível no programa SPRING, permitiu que fossem gerados mapas de favorabilidade à ocorrência de aquíferos fraturados na região de estudo. O primeiro produto gerado foi o mapa de favorabilidade elaborado com base nos condicionantes secundários (geologia, solos, declividade). A análise desse mapa mostra que as regiões que possuem menores declividades (abaixo de 30%), estão associadas às classes de solos Litossolo/Cambissolo e Cambissolo/Podzólico e, a classe de rochas vulcânicas ácidas, possuem as maiores correlações com poços tubulares produtivos. O segundo produto resultou da integração do mapa de favorabilidade elaborado com os condicionantes secundários e os diferentes grupos de estruturas deformacionais (zonas de fratura). A análise desse produto mostra uma forte correlação entre as estruturas, as áreas consideradas como favoráveis a muito favoráveis e a ocorrência de poços tubulares produtivos. Por outro lado, também foi observado que há correlação entre poços tubulares nulos com estruturas localizadas em áreas consideradas como favoráveis a muito favoráveis; essa associação evidencia a complexidade de trabalho com os aquíferos fraturados, pois mostra que, dentro de cada grupo de lineamentos, há orientações preferenciais que devem ser seguidas para a locação dos poços tubulares.

A análise das orientações de cada grupo de lineamentos e a sua correlação com a ocorrência de poços tubulares produtivos mostra que:

⇒ as orientações N30 - 60W constituem as estruturas preferenciais do grupo 3. As maiores vazões (acima de 20 m³/h) estão associadas a lineamentos com orientação N30 - 40W e N50 - 60W;

⇒ as orientações N20 - 30E, N40 - 50E e N70 - 80E são as estruturas preferenciais do grupo 2. Nesse caso, às maiores vazões (acima de 20 m³/h) possuem relação com lineamentos de orientação N20 - 30E e N40 - 50E;

⇒ as orientações N00 – 14E correspondem às estruturas principais do grupo 1 e estão associadas às maiores vazões (acima de 20 m³/h);

⇒ as orientações N80 - 90W constituem as estruturas preferenciais do grupo 4 e estão associadas às maiores vazões (acima de 20 m³/h).

A análise dos poços tubulares nulos mostra que grande parte deles não possui nenhuma relação com lineamentos, evidenciando a importância das zonas de fratura (vistas como lineamentos tipo 2) como condicionantes dos aquíferos fraturados. Por outro lado, foi identificada a correlação de poços nulos com diferentes grupos de lineamentos. Assim, quando a locação for realizada distante das estruturas deformacionais (lineamentos tipo 2), há uma grande tendência de o poço tubular apresentar baixas vazões ou, então, ser nulo. A relação existente entre os poços tubulares nulos e os diferentes grupos de lineamentos mostra que:

⇒ a maior ocorrência (36,99%) está relacionada às estruturas nordeste, cujas orientações principais são N30 – 40E e N50 – 60E;

⇒ uma menor ocorrência (17,81%) está associada às estruturas noroeste com orientações principais segundo N40 – 50W;

⇒ a relação de poços nulos com lineamentos norte-sul é pequena (13,7%) e está situada em lineamentos de orientação N00 – 10E;

⇒ a menor relação de poços nulos e lineamentos (10,96%) está presente no grupo de lineamentos leste-oeste, principalmente na orientação N75 - 80W.

A análise dos fatores condicionantes e dos produtos e resultados dos processos de integração de dados permite determinar um modelo prospectivo para aquíferos fraturados na área de estudo. Esse modelo tem como premissa maior que cada região possui comportamentos distintos com relação aos diferentes condicionantes geológicos. A prospecção de aquíferos fraturados e o processo de locação dos poços tubulares deve ser realizada de acordo com as seguintes etapas:

1º - levantamento estrutural da região. Esse levantamento visa à caracterização dos sistemas de fraturas e das zonas de fraturas existentes, bem como a identificação do campo tensional que predominou na região. Além disso, devem ser efetuados levantamentos de sistemas de

fraturas que apresentam preenchimento e entendida sua organização geométrica, dentro das ramificações usuais presentes nas fraturas cisalhantes. Os lineamentos mais favoráveis são as estruturas oblíquas (entre os eixos σ_1 e σ_3) classificadas como híbridas ou de cisalhamento, já que as estruturas paralelas a sub-paralelas ao eixo σ_1 (fraturas trativas), em geral, apresentam preenchimento. No entanto, deve ser dada atenção especial às diferentes orientações apresentadas pelos lineamentos de classificação híbrida ou de cisalhamento, pois há estruturas com comportamentos diferenciados em relação à ocorrência de maiores ou menores vazões. Essas variações de comportamentos das estruturas, com relação à ocorrência de poços tubulares com diferentes produtividades, estão associadas ao campo tensional que predominou em determinada região;

2º - caracterização dos condicionantes secundários. Nesse caso, devem ser realizados estudos referentes ao relevo (grau de dissecação e declividade), aos solos (tipos e espessura), bem como aos tipos litológicos. As regiões que apresentarem declividades menores que 30%, estejam associadas a relevos com grau de dissecação baixo e, as áreas com solos do tipo Terra-bruna, Podzólicos, Cambissolos e Litossolos (espessura média a alta), são favoráveis à ocorrência de bons aquíferos fraturados. Quando da ocorrência dessa situação, o condicionante litológico não terá grande influência; mas, ao serem efetuadas locações sobre regiões onde há ocorrência de rochas vulcânicas básicas, deve ser dada atenção especial à presença de zonas vesiculares amigdalóides. Nesse caso, as zonas vesiculares a amigdalóides devem ser utilizadas como critério de campo nos momentos de definição sobre um maior aprofundamento do poço tubular.

O desenvolvimento dessa metodologia, embora necessite de um tempo maior para definição das áreas mais favoráveis a ocorrência de aquíferos fraturados, aumenta as chances de serem obtidos poços tubulares produtivos com boas vazões.

9 – RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento desse trabalho de pesquisa permitiu a identificação da necessidade de realização de novos trabalhos, visando o aprofundamento dos estudos dos aquíferos fraturado na Formação Serra Geral. Recomenda-se que sejam efetuados trabalhos nas seguintes áreas:

⇒ Geologia estrutural: aprofundamento e detalhamento do fator estrutural nas diferentes regiões (setores específicos), visando a determinação dos campos paleotensionais predominantes, bem como o comportamento das diferentes estruturas com relação a ocorrência de poços tubulares produtivos (diferentes vazões) e nulos;

⇒ Hidroquímica: realização de estudos detalhados sobre a estratificação hidroquímica na seqüência de rochas vulcânicas ácidas da Formação Serra Geral. Esse estudo é recomendado pois existem diferentes tipos litológicos que constituem a seqüência de rochas vulcânicas ácidas, bem como há brechas vulcânicas com diferentes graus de mineralizações. Isso tem influência na caracterização hidroquímica e na ocorrência de tipos diferenciados de águas subterrâneas;

⇒ Gestão de águas subterrâneas: recomenda-se que sejam realizados estudos e projetos de gestão na bacia-hidrográfica Taquari-Antas, principalmente nos municípios cujo abastecimento público é realizado por poços tubulares. Foi observado com esse trabalho que regiões como Flores da Cunha apresentam um índice elevado de poços tubulares produtivos que captam água subterrânea do sistema aquífero fraturado. A captação diária de água subterrânea é alta, pois o uso da mesma está relacionado com o abastecimento público e, principalmente, com o desenvolvimento de atividades industriais e agrícolas. Como não há nenhum projeto de gestão a capacidade de recarga e de fornecimento de água pelo sistema aquífero fraturado pode estar próxima do limite, o que poderia provocar uma queda na produção dos poços tubulares, e conseqüentemente, comprometer todo o sistema de abastecimento do município;

⇒ Aquífero livre: aprofundamento de estudos referentes à caracterização hidrodinâmica e hidroquímica do sistema aquífero livre. Essa caracterização é de extrema importância para a compreensão desse aquífero e para o desenvolvimento de estudos e projetos ambientais, visto que esse sistema possui maior grau de vulnerabilidade ambiental a poluição por diferentes tipos de compostos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELIER, J. & MECHLER, P. 1977. Sur une methode graphique de recherché des contraintes principales egalment utilisable en tectonique et sen seismologie: la methode des diedres droits. **Bull. Soc. Geól. France.**, v.19, p. 1309-1318.
- BRASIL. 1973. **Levantamento e Reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul.** Ministério da Agricultura/Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária/Divisão de Pesquisa Pedológica. Rio de Janeiro, 431p. (Boletim Técnico, 30).
- CAMARA, G. 1994. Anatomia de um SIG. Revista **Fator GIS** nº4 p. 11-15.
- CAMPOS, L.F.G.DE. 1889. **Relatório da Comissão Geográfica e Geológica da Província de São Paulo.** São Paulo. p.21-34.
- CARRARO, C.C.; GAMERMANN, N.; JOST, H.; EICK, N.C.; BORTOLUZZI, C.A.; PINTO, J.F. 1974. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, Fundação de Ampara a Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências. Escala 1:1.000.000.
- CORIOLOANO, A.C.F. 2002. **Reavaliação de critérios estruturais na hidrogeologia de terrenos cristalinos, com ênfase na neotectônica e sensoriamento remoto.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. UFRN, Natal (RN). 300p. (inédito)
- COSTA, J. 1995. A água Oculta: para fugir à escassez e aos altos custos de produção de águas superficiais o Brasil fura cada vez mais poços tubulares. **Ciência Hoje**, v.19, nº110, p.87-89, junho de 1995.
- COSTA, W.D. 1965. Análise dos Fatores que Influenciam na Hidrogeologia do Cristalino. **Água Subterrânea**, Ano 1, Set-Dez, nº 4. p. 14-47.
- COSTA, W.D. 1972. **Contribuição da Mecânica das Rochas à Evolução Estrutural da Serra do Mar.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XXVI. SBG. **Anais.** p.375-378.
- COSTA, W.D. 1980. **A Hidrogeologia do Cristalino a Luz da Mecânica das Rochas.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, I. Recife, Pernambuco. ABAS, **Anais**, p.375-379
- COSTA, W.D. 1982. **Hidrogeologia do Aquífero Fissural.** Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Geologia. Apostila de Curso de Atualização. 120p. (inédito).
- COSTA, W.D. 1986. **Análise dos Fatores que Atuam no Aquífero Fissural.** CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, IV. Brasília. ABAS, **Anais.** p.289-302.

- COSTA, W.D. & BRAZ DA SILVA, A.B. 2000. Hidrogeologia dos meios anisotrópicos. In: Feitosa, F.A.C. e Manoel Filho, J., (eds.) **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. CPRM, LABHID-UFPE, 133-174.
- CPRM. 1998. **Mapeamento geológico integrado da bacia hidrográfica do Guaíba: carta geológica: FolhaSH.22-V-B – Passo Fundo**. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. . Porto Alegre (Brasil), 1 mapa color. Escala 1:250.000. Material cartográfico.
- CPRM. 1998. **Mapeamento geológico integrado da bacia hidrográfica do Guaíba: carta geológica: FolhaSH.22-V-D – Caxias do Sul**. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. . Porto Alegre (Brasil), 1 mapa color. Escala 1:250.000. Material cartográfico.
- CUNHA, F.S.S. da. 1996. **Análise Estrutural e Estatística de Lineamentos Aplicada à Pesquisa Mineral: O Caso da Região de Porto Nacional (TO)**. Dissertação de Mestrado (PPGEM-EE-UFRGS). Porto Alegre, RS. 110p. (Inédito).
- D'ANGIOLELLA, G. & VASCONCELLOS, V.L.D. 2002. **Cálculo do balanço hídrico climatológico com diferentes métodos para estimativa da evapotranspiração potencial, em planilhas ExcellTM**. XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Foz do Iguaçu, Paraná. Setembro de 2002.
- DUNNE, W.M. & HANCOCK, P.L. 1994. Palaeostress analysis of small-scale brittle structures. In: Hancock, P. L. (ed). **Continental Deformation**. Pergamon Press. New York, p. 101-120.
- EILERS, V.H.M. 1993. **Análise Hidrogeológica da Região Sudoeste do Rio Grande do Sul Através de Técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/Recursos Hídricos e Saneamento, IPH/UFRGS. 143p. (inédito).
- FALCADE, I. & MANDELI, F. (ORG). 1999 **Vale dos Vinhedos – caracterização geográfica da região**. Caxias do Sul: EDUCS. 144p. il.
- FERNANDES, A. J. 1999. **Tectônica cenozóica na borda leste da bacia do Paraná e sua aplicação à hidrogeologia**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. USP. 340p.
- FOSTER. S.; VENTURA, M.; HIRATA, R. 1993. **Poluição das águas subterrâneas: um documento executivo da situação da América Latina e Caribe com relação ao abastecimento de água potável**. São Paulo. Instituto Geológico (Séries Manuais). 55p.
- FRACALOSSI, M. Jr. & SARMENTO. F.J. 1990. **Sistemas de Informações Hidrogeológicas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA, 6. Porto Alegre, ABAS. Anais.
- FRAGA, C.G. 1986. **Introdução ao Zoneamento do Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Paraná**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. 125p. (inédito).
- FRASCA, A.A.S. & LISBOA, N.A. 1993. **Contribuição do sensoriamento remoto na compartimentação morfotectônica e morfoestrutural da bacia do Paraná “Grupo São Bento”, RS, e suas relações com as estruturas regionais do embasamento**. In:

- VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Anais. Curitiba. p. 211-220
- FREITAS, M.A. & MENDES, C.A.B. 1997. **Comparação entre Modelo Booleano e Lógica Fuzzy na Determinação de Áreas de Proteção de Aquíferos Fraturados, Através de Geoprocessamento.** SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XII. P.719-725.
- GIARDIN, A. 1997. **Hidrogeologia das Rochas Fraturadas.** DNPM/ABAS. Florianópolis. Apostila. 43p.
- HANCOCK, P.L. 1985. Brittle Microtectonics: principles and practice. **Journal of Structural Geology.** Vol. 7. Nº3/4 p. 437-457.
- HANCOCK, P.L. & ENGELDER, T. 1989. Neotectonic Joints. **Geological Society of America Bulletin.** V.101. p.1197-1208.
- HAUSMAN, A. 1966. Comportamento do freático nas áreas basálticas do Rio Grande do Sul. **Boletim Paranense de Geografia.** Nº18/20 p. 177-215.
- HAUSMAN, A. 1980. **Avaliação Qualitativa de Aquíferos Fissurados.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 1º, Recife, Pernambuco. Anais p.537 a 544.
- HAUSMAN, A. 1995. Províncias Hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul, RS. Estudos Tecnológicos: **Acta Geológica Leopoldensia**, Série Mapas. Nº 2. P-1-127.
- HEEMANN, R. 1997. **Análise Geométrica de Estruturas da Sucessão Vulcânica Associada aos Depósitos de Ágata do Distrito Mineiro de Salto do Jacuí.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais (PPGEM), UFRGS. (inédito).
- HEEMANN, R. & STRIEDER, A. 1999. **Análise geométrica de estruturas da sucessão vulcânica associada aos depósitos de ágata do distrito mineiro de Salto do Jacuí (RS).** In: VII SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS. Bahia. SBG/BA.ABGP. Sessão 6 p. 14-16.
- HOBBS, B.E.; MEANS, W.D. & WILLIAMS, P.F. 1976. **An Outline of Structural Geology.** Wiley, New York.
- KLEINER, R. 1999. **GIS: Implantação em Ambiente Genérico.** Sagres Editora. 30p. (Apostila de curso ministrado durante o GISBRASIL 99).
- LEÃO, M. I.; CAICEDO, N.O.L.; RISSO, A. 1998. **Hidrogeologia da Bacia do Rio Taquari-Antas.** CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, X. ABAS, São Paulo,
- LEINZ, V. 1949. Contribuição à Geologia dos Derrames Basálticos do Sul do Brasil. **Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras.** Universidade de São Paulo, v.3, nº 5. 61p.

- LEITE, E.H. & HAASE, J.F. (Coord). 1999. **Qualidade das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas e Rio Taquari**. Fundação de Proteção Ambiental (FEPAM) do Estado do RS. Relatório Técnico. 55p.
- LICH, O.A.B.; SALAZAR Jr. O.; FREITAS, J.P.T.1996. O SIG no Subsolo. **Revista Fator GIS**, nº11, p. 36-38.
- LISBOA, N.A. 1993. **Compartimentação Hidrogeológica e Diferenciação Hidrogeoquímica em Aquíferos do Extremo Sul do Planalto Meridional do Rio Grande do Sul**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS 10^o, Gramado/RS, 1993. Anais. p. 539-548.
- LISBOA, N.A. 1996. **Fácies, estratificações hidrogeoquímicas e seus controladores geológicos, em unidades hidrogeológicas do sistema aquífero Serra Geral, na bacia do Paraná, Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Tese de doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 135p. il. (Inédito).
- MACHADO, J.L.F.; FREITAS, M.A.de; CAYE, B.R. 2002. **Evolução Hidrogeoquímica dos aquíferos no oeste catarinense**. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Florianópolis, 2002. Resumos. p.68.
- MAGNA., 1997. **Avaliação Quali-Quantitativa das Disponibilidades e Demandas de Água na Bacia Hidrográfica do Sistema Taquari-Antas**. Magna Engenharia Ltda. Departamento dos Recursos Hídricos e Saneamento. Porto Alegre. Relatório Final
- MALUF, J. R. T. 1999. **Nova classificação climática do estado do Rio Grande do Sul**. [on line]. (Passo Fundo). http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_pa08.HTM. (ISSN1517-638-X).
- MARTINS, J.C.S. 1979. **Pesquisa Sobre o Aquífero Basáltico da Região Sudoeste do Rio Grande do Sul**. Tese de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/Recursos Hídricos e Saneamento, IPH/UFRGS, 75p. (inédito)
- MENDES, C.A.B. 1996. Integração de Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informações Geográficas: fundamentos. **Separata da Revista Brasileira de Engenharia (Caderno de Recursos Hídricos)**, 14(1).
- MOBUS, G. 1987. **Análise Estrutural e Hidrogeológica do Aquífero Fraturado da Formação Serra Geral Região Noroeste do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/Recursos Hídricos e Saneamento, IPH/UFRGS 124p. (inédito)
- MOREIRA, F. R. da S. 2001. **Uso e avaliação de técnicas de integração e análise espacial de dados em pesquisa mineral aplicadas ao planalto de poços de caldas**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 200p.
- O'LEARY, D.W.; FRIEDMAN, J.D. & POHN, H.A. 1976. Lineament, linear and lineation: some proposed new standarts for old terms. **Geol. Soc. Am. Bull.**, 87:1463-1469.

- PARK, R.G. 1982. **Foundations of Structural Geology**. Blackie & Son Limited. 135p.
- PESSÔA, M.S. 1982. **Banco de Dados Hidrogeológicos e Análise Estatística da Vazão dos Poços do Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/Recursos Hídricos e Saneamento, IPH/UFRGS 193p. (inédito)
- QUADROS, T.F.P. 1997. **Integração de Dados para Pesquisa Mineral de Ouro na Ilha Cristalina de Rivera – Uruguai**. Monografia para Exame de Qualificação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais (PPGEM), UFRGS. 70p.
- RADAM/BRASIL. 1986. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação, Uso Potencial da Terra**. 1986. Rio de Janeiro: IBGE 796p. (Levantamento de Recursos Naturais, v..33).
- RAMSAY, J.G. & HUBER, M.I. 1987. **The techniques of modern structural geology**. Academic Press Ltda. Oxford (UK). 2 vols. 700p.
- REBOUÇAS, A. da C. 1988. Groundwater in Brazil. **Episodes**, v.11, n^o3, p.209-214, september de 1988.
- REGINATO, P.A.R. & GOTTARDO, E. 1994. **Mapeamento Hidrogeológico do Município de Veranópolis**. Secretaria da Agricultura - Prefeitura Municipal de Veranópolis/RS (relatório técnico de estágio). (inédito).
- REGINATO, P.A.R. & STRIEDER, A. J. 1999. **Integração De Dados Na Prospecção De Aquíferos Fraturados Em Parte Da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (Rio Grande Do Sul)**. In: CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO DA AMÉRICA LATINA, V (GISBRASIL 99), Salvador, Bahia. Anais CD-ROM.
- REGINATO, P.A.R. & STRIEDER, A. J. 2001. **Extração de Lineamentos visando a prospecção de aquíferos fraturados – fotografias aéreas ou imagens de satélite?** In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA. XXCBC. Porto Alegre-Anais. CdRoom.
- RENNE, P.R.; ERNESTO, M.; PACCA, I.G.; COE, R.S.; GLEN, J.M.; PRÉVOT, M.; PERRIN, M.1992. The Age of Paraná Flood Volcanism, Rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous Boundary. **Science**. vol.258, 975-979p.
- ROCHA, G.A. 1994. **Administração de Recursos Hídricos: a importância dos comitês de bacias**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA 38^o, Balneário Camboriú, 1994, Boletim de Resumos Expandidos, Camboriú: SBG, p.14-15
- ROISENBERG, A. 1990. **Petrologia e Geoquímica do Vulcanismo Ácido Mesozóico da Província Meridional da Bacia do Paraná**. Porto Alegre, Tese de doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (Inédito).

- ROISENBERG, A. & CHIES, J.O. 1987. **Vulcanismo Basalto-Riolítico da Formação Serra Geral e Mineralizações Associadas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA 1^o, Porto Alegre, 1987. Roteiro das Excursões... Porto Alegre:SBG, p.38-54.
- ROSA FILHO, E.F.; SALAMUNI, R.; BITTENCOURT, A.V.L. 1985. **Contribuição ao Estudo das Águas Subterrâneas nos Basaltos no Estado do Paraná**. Superintendência dos Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Estado do Paraná. 34p.
- SAATY, T. L. 1980. **The analytic hierarchy process**. New York: McGraw-Hill. 200p.
- SCHRADER, G.O. 1992. Traços de Fratura: uma técnica de análise aplicada a Hidrogeologia e Geotecnia. **Imprensa Universitária**. Fortaleza. 64p. il.
- SCHUCK, M.T.G. DE O.; LISBOA, N.A.; HAERTEL, V.; DANI, N. 1989. **Correlação de dados morfotectônicos e geomorfogenéticos com espessura do manto de alteração do planalto sul-riograndense através de técnicas de sensoriamento remoto**. In: IV SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Bariloche. V. Iip. 657-687.
- SOARES, P.C. & FIORI, A.P. 1976. Lógica e Sistemática na Análise e Interpretação de Fotografias Aéreas em Geologia. **Not. Geomorfol.**, Campinas. 16(32):71-104
- STRIEDER, A.J. & AMARO, V.E. 1997. Estruturas de Lineamentos Extraídos de Imagens de Sensores Remotos. EGATEA. **Revista da Escola de Engenharia**, Porto Alegre. v. 25, nº 4, julho-agosto de 1997. p.109-117
- TAKAHASHI, H.A. 1991. **Caracterização Morfoestrutural e Hidrogeológica de Aquíferos em Meio Fraturado Através de Técnicas de Sensoriamento Remoto e Análise Estatística, Em Setor do Planalto Meridional-RS**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/Recursos Hídricos e Saneamento, IPH/UFRGS 126p. (inédito)
- TAKAHASHI, H.A.; HAERTEL, V.; LISBOA, N.A. 1993. **Caracterização Morfoestrutural e Hidrogeológica de Aquíferos em Meio Fraturado através de Técnicas de Sensoriamento Remoto e Análise Estatística em Setor do Planalto Meridional/RS**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO 7^o, Curitiba, 1993, Anais. p. 332-350.
- TEDESCO, M. 2002. **A contaminação da água usada para abastecimento por compostos orgânicos e biológicos na zona rural do município de Veranópolis**. Monografia. Curso de Pós-Graduação em Desenvolvimento Urbano e Gestão Ambiental, Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE. 70p. (inédito).
- VALENTE, A.L.S. 1999. **Integração de Dados por meio de Geoprocessamento, para Elaboração de Mapas Geotécnicos, Análise do Meio Físico e suas Interações com a Mancha Urbana: o caso de Porto Alegre (RS)**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais (PPGEM), UFRGS, 391p. (inédito)

- VALENTE, A.L.S.; KOPPE, J.C.; STRIEDER, A.J.; QUADROS, T.F.P. 1998. **Considerações sobre procedimentos para a integração de dados por meio de sistemas de informações geográficas (SIG) visando a análise do meio físico e estudos geotécnicos.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA, 3., Florianópolis, SC. Anais.
- VIEIRA, E.F. 1984. **Rio Grande do Sul: geografia física e vegetação.** Editora Sagra, Porto Alegre, 184p.
- WHITE, I.C. 1908. **Relatório Final Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil.** Rio de Janeiro. v.1, 300p.
- WISE, D.U. 1982. Linesmanship and practice of linear geo-art. **Geol. Soc. Am. Bull.** V. 93, p.886-888.
- WREGE, M.L.D. & MOBUS, G. **Análise de Agrupamento em Aquífero Fraturado.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 7°. Belo Horizonte-MG, 1992. ABAS, Anais. p175-180.
- WRIGHT, D.F. & CARTER, G.F.B. 1996. Favourability mapping with GIS-based integration models, Chisel Lake-Anderson Lake area in EXTECH In: A Multidisciplinary Approach to Massive Sulphine Research in the Rusty Lake-Snow Lake Greenstone Belts, Manitoba, (ed). G.F. Bonham-Carter, A. G. Galley, and G.E.M. Hall; **Geological Survey of Canada Bulletin** 426. P. 339-376, 387-401.
- ZALAN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J., MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A. 1990. Bacia do Paraná. In: RAJA GABAGLIA, G.P. & MILANI, E.J. (Coords.) **Origem e Evolução das Bacias Sedimentares.** Rio de Janeiro:PETROBRÁS, p.135-168.