

INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS NA PROSPECÇÃO DE AQUÍFEROS FRATURADOS NA FORMAÇÃO SERRA GERAL

INTEGRATION OF GEOLOGIC DATA IN THE PROSPECTION OF FRACTURATED AQUIFER AT THE SERRA GERAL FORMATION

Pedro Antônio Roehé Reginato¹ e Adelir José Strieder²

Recebido em: 20/04/2005; aceito em: 12/07/2006

RESUMO O aquífero fraturado na Formação Serra Geral, constituído por derrames basálticos J-K da Bacia Sedimentar do Paraná, Brasil, possui grande importância, pois é um recurso muito utilizado, tanto nas atividades de abastecimento, como no desenvolvimento de atividades industriais, agrícolas e recreativas. Esse sistema é caracterizado por uma forte anisotropia, evidenciada através de suas características hidrodinâmicas, e condicionado por diferentes fatores geológicos (estruturas, relevo, litologia e solos). Em função dessas características, cada região onde ocorre pode apresentar graus de potencialidades diferenciados, o que implica na necessidade de uma análise e integração dos diferentes fatores geológicos. A integração desses dados foi realizada com o emprego do programa SPRING e de rotinas de processamento denominadas de medidas de classes, tabulação cruzada e a técnica AHP (Processo Analítico Hierárquico). Com a integração e análise dos fatores condicionantes, pode-se identificar que o fator principal corresponde ao sistema estrutural, e que os condicionantes secundários são a litologia, relevo e solos. Além disso, pode-se evidenciar que regiões apresentando lineamentos (orientações N30-40W, N50-60W, N20-30E e N40-50E) associadas a relevos com baixo grau de dissecação, baixa declividade (abaixo de 30%), solos do tipo Neossolo, Cambissolo, Podzólicos e rochas vulcânicas ácidas possuem maiores chances para ocorrência de aquíferos fraturados. Por fim, com a integração dos dados sugere-se, um modelo prospectivo baseado em duas etapas: a primeira etapa é caracterizada pelo levantamento estrutural, enquanto a segunda é marcada pela análise dos fatores secundários (relevo, litologia e solos).

Palavras Chave: Aquíferos Fraturados, Prospecção de Aquíferos, Formação Serra Geral.

ABSTRACT The fractured aquifer at the Serra Geral Formation, constituted of basaltic lava flow J-K of the Parana Sedimentary Basin, Brazil possesses a great importance, since it is a commonly used resource, be it for supplying activities or for the development of industrial, agricultural and entertainment activities as well. Such system is characterized by a powerful anisotropy manifested by its hydrodynamic features and subjected to different geological factors (structures, relief, lithology and soil). Due to these characteristics each region may present differential potentiality degrees which imply the necessity of an analysis and an integration of the different geological factors. Such data integration was carried out using SPRING program and processing routines named class measurements, crossed tabulation and AHP technique (Analytic Hierarchic Process). With the integration and the analysis of the contingent factors one may identify that the main factor corresponds to the structural system and that secondary contingents are lithology, relief and soils. Furthermore, one may make it evident that the regions which present lineaments (orientations N30-40W, N50-60W, N20-30E and N40-50E) associated to reliefs with a low level of dissection, low declivity (below 30%), Neosol, Cambisol, Podzolic soil types and acid volcanic rocks, are more likely to have fractured aquifers. Finally, with data integration it is suggested a prospective model based on two stages: the first one being characterized by the structural survey while the second one marked by the analysis of the secondary factors (relief, litholgy and soils).

Keywords: fractured aquifers, aquifers prospecting, Serra Geral Formation.

INTRODUÇÃO

Os aquíferos fraturados consistem em sistemas hidrogeológicos governados por diferentes fatores geológicos, sendo a principal condicionante aquela representada pelas estruturas que uma determinada litologia possui. Além disso, existem outros condicionantes relacionados aos fatores exógenos, como clima, hidrografia, relevo, vegetação e solos, e aos fatores endógenos, como tipo litológico (COSTA, 1965, 1986).

A Formação Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul é caracterizada pela presença de aquíferos fraturados, associados à seqüência de rochas vulcânicas ácidas e básicas. Dessa forma,

para o estudo desses aquíferos é necessário trabalhar com a análise dos diferentes condicionantes, o que é possível quando se utilizam técnicas de integração de dados.

Nesse trabalho, pretende-se apresentar as técnicas de integração de dados geológicos e os resultados encontrados com o desenvolvimento de um projeto de pesquisa, cujo objetivo era à prospecção de aquíferos fraturados na Formação Serra Geral.

A área de estudo localiza-se na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, em parte da bacia hidrográfica Taquari-Antas e envolve a região compreendida por onze municípios (Figura 1).

¹Universidade de Caxias do Sul (UCS) - Centro de Ciências Biológicas e da Saúde (CCBS) - Departamento de Ciências Biológicas (DCBI) (*parregin@ucs.br*)

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) - Escola de Engenharia (EE) - Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) (*adelir@ufrgs.br*)

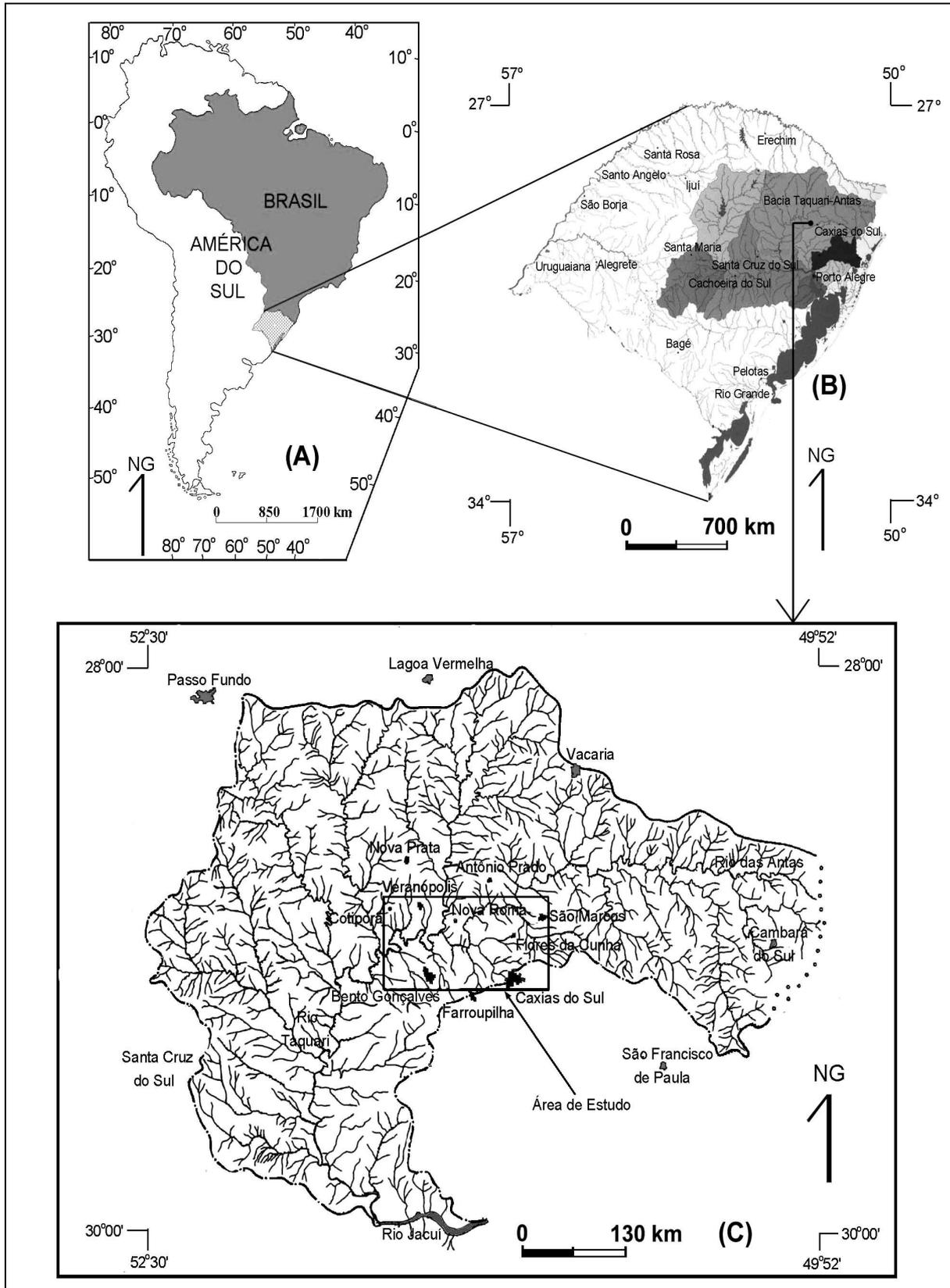


Figura 1- Localização da Área de Estudo
Figure 1- Localization of the Area of Study

CONTEXTO GEOLÓGICO

A Formação Serra Geral ocupa no Estado do Rio Grande do Sul uma área de 137.000 km², o que equivale a aproximadamente 50% da superfície do estado (HAUSMAN, 1995). Essa Formação é caracterizada como fraturada quando há conexão entre a seqüência vulcânica básica e ácida, onde as principais litologias são basaltos toleíticos, andesitos, riolitos e dacitos (RADAM/BRASIL, 1986; ROISENBERG, 1990). Conforme levantamento realizado pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM, 1998), ocorrem dois tipos principais de litologias na área de estudo: basaltos do tipo Gramado e vulcânicas ácidas do tipo Palmas/Caxias.

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 podem ser englobadas em três zonas principais (LEINZ, 1949; ROISENBERG; CHIES, 1987; ROISENBERG, 1990) que possuem distribuição e ocorrência variável:

-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 m. Essa zona é caracterizada por dois tipos preferenciais de estruturas primárias: as juntas horizontais (planares e retilneas, com espaçamento centi a decimétrico bastante regular) e as juntas verticais, que ocorrem sobrepostas às primeiras, são menos regulares e apresentam desde aspecto maciço até porções intensamente fraturadas;

-zona superior: é composta por rochas vulcânicas vesiculares a amigdalóides (preenchidas por zeólitas, carbonatos e quartzo).

As estruturas primárias, como as juntas verticais e as zonas vesiculares a amigdalóides possuem correlação com aquíferos fraturados, visto que vários poços tubulares produtivos estão associados a regiões que não possuem estruturas tectônicas. No caso das estruturas vesiculares a amigdalóides somente são produtivas as zonas que apresentarem alta concentração dessas estruturas.

CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

A área de estudo está inserida na unidade morfotectônica denominada de Fachada Atlântica (Figura 2) e nas unidades hidrogeológicas denominadas de Ácidas Aplainadas e Ácidas Dissecadas (LISBOA, 1993). A primeira unidade é caracterizada por rochas ígneas vulcânicas ácidas, associadas a um relevo pouco dissecado e a um manto de alteração de espessura média. Os lineamentos são de médio a pequeno porte com orientação preferencial para nordeste. Essa unidade possui um bom potencial com relação à presença de aquíferos fraturados. A segunda unidade apresenta um relevo com grau de dissecção forte, solos com pequena espessura e lineamentos de pequeno a médio porte, o que a torna uma área com baixo potencial de ocorrência de aquíferos fraturados.

Na área de estudo há a ocorrência de dois tipos de aquíferos, um denominado livre ou freático e o outro, fraturado (REGINATO, 2003; REGINATO; STRIEDER, 2004). O primeiro está localizado no manto de alteração existente sobre as rochas vulcânicas e possui como principais condicionantes os fatores: solo (tipo e espessura), relevo, litologia (tipo e estruturação primária) e clima. O aquífero fraturado está localizado nas rochas vulcânicas, sendo seu principal condicionante o sistema estrutural e, em segundo plano, a estruturação primária da rocha. Os dois sistemas de aquíferos, livre ou freático e fraturado, podem ou não apresentar conexão. No entanto, o primeiro aquífero tem um papel importante com relação à recarga do aquífero fraturado quando há conexão entre eles.

O aquífero fraturado na região é captado por 690 poços tubulares (cadastrados durante a etapa do projeto) sendo seus principais usos relacionados com abastecimento público urbano e rural (61%), com a indústria (25%), com uso doméstico (7%), com o desenvolvimento de atividades agrícolas (5%) e com atividades recreativas (2%). Além disso, dos nove municípios abrangidos pelo projeto, cinco deles dependem exclusivamente da água subterrânea para o abastecimento público urbano.

O aquífero fraturado na região possui características hidrodinâmicas que refletem a forte anisotropia que este apresenta, conforme pode ser observado na tabela 1. Os valores apresentados correspondem a médias gerais obtidas, sendo que para cada uma das regiões há variações nos parâmetros identificados.

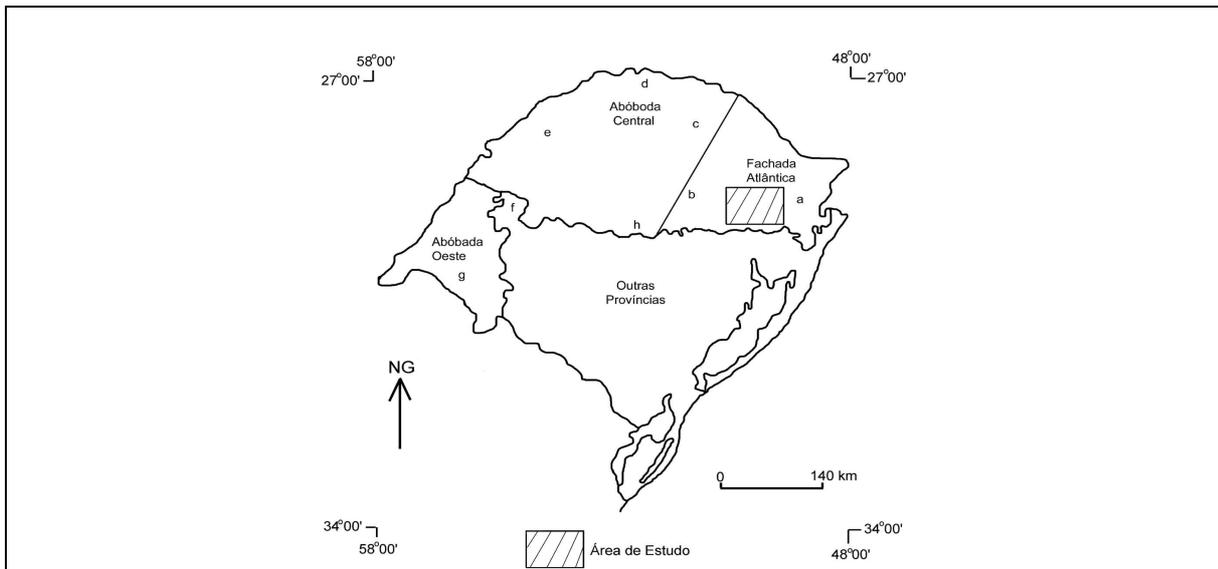


Figura 2- Localização da área em relação às Províncias Hidrogeológicas segundo Lisboa (1993)

Figure 2- Localization of the area in relation to the Hidrogeologic Provinces according to Lisboa (1993)

Tabela 1- Características hidrodinâmicas do aquífero fraturado obtidas através da análise de dados hidrogeológicos de 238 poços

Table 1- Gotten hydrodynamic characteristics of the fractured aquifer through the analysis of the hidrogeologic data of 238 well

Características	Resultados		
Profundidade Média dos Poços Tubulares	110 m		
Número de Entradas de Água	1 (43,5%)	2 (39,1%)	3 ou + (17,4%)
Profundidade das Entradas de Água	Intervalo de 0 até 70 m (76%)		
Nível Estático (NE)	0 até 10 m (66,4%)	10 a 20 m (16,4%)	Acima de 20 m (17,2%)
Transmissividades (T)	Média 0,493 m ² /h	Mínima 0,133 m ² /h	Máxima 1,458 m ² /h
Capacidades Específicas (q)	Média 0,395 m ³ /h/m	Mínima 0,106 m ³ /h/m	Máxima 1,166 m ³ /h/m
Vazões (Q)	> 10 m ³ /h 72,1 %	10 a 20 m ³ /h 18,6 %	> 20 m ³ /h 9,3%

Quanto às características hidroquímicas, observou-se que as águas do aquífero fraturado estão distribuídas em três campos principais: águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (80,1%), águas bicarbonatadas sódicas (18,4%) e águas sulfatadas cálcicas ou magnesianas (1,4%). Além disso, as águas apresentam boa qualidade para serem utilizadas em diferentes atividades industriais, agrícolas, recreativas ou para abastecimento público. No entanto, cabe salientar que um problema típico da região é a ocorrência de excesso de Fe e Mn em padrões acima do permitido, sendo sua origem relacionada aos processos de alteração das rochas vulcânicas. (REGINATO, 2003; REGINATO; STRIEDER, 2004).

FATORES CONDICIONANTES DOS AQUIFEROS FRATURADOS NA FORMAÇÃO SERRA GERAL

Para o aquífero fraturado da Formação Serra Geral foram definidos como fatores condicionantes o padrão estrutural, o relevo, a litologia (tipo de rocha e estruturação primária), o solo (tipologia) e a hidrogeologia (REGINATO, 2003). Dessa forma, na prospecção de aquíferos fraturados, devem-se levar em consideração todos os fatores e promover a integração dos mesmos para que o resultado do estudo prospectivo seja positivo.

Fator Padrão Estrutural

O fator padrão estrutural corresponde à caracterização estrutural das diferentes litologias da região. Para isso, foram realizados levantamentos de campo e interpretação de lineamentos extraídos de fotografias aéreas (REGINATO, 2003, REGINATO; STRIEDER, 2001).

Nos levantamentos de campo foram identificadas estruturas como fraturas, zonas de fraturas, veios e diques e efetuada a análise geométrica e cinemática dessas feições. Observou-se na análise dinâmica, que as estruturas tectônicas, em geral, possuem uma orientação geral para o quadrante NE, sendo a direção principal representada pelos rumos N70-80E e N80-90E. As direções secundárias estão relacionadas com as orientações N20-30W e N80-90W. Considerando as direções principais e secundárias, pode-se identificar um padrão ortogonal para o sistema de fraturas. Quanto às fraturas que apresentam preenchimento, foram identificadas orientações principais dadas pelos rumos N70-80E, N00-10E, N10-20W, N60-90W. As zonas de fraturas apresentaram orientações preferências marcadas pelos rumos N70-90E, N00-10E e N70-90W. As estruturas como os diques possuem orientação variada, sendo que os de diabásio identificados na região possuem orientações N50-60E, enquanto os preenchidos por arenitos apresentam orientações N20-70E.

Os dados apresentados evidenciam que na região há um padrão aproximadamente ortogonal de fraturas com orientação próxima a Norte-Sul e Leste-Oeste, comprovando que na região houve a existência de diferentes campos tensionais. Por

outro lado, existem estruturas que possuem orientação diferente desse padrão, sendo que nesse caso, devem corresponder a planos de cisalhamento, onde se alojaram veios e diques.

Na análise cinemática, foram identificados dois campos tensionais principais. O primeiro campo caracteriza-se por uma direção de compressão σ_1 horizontal de orientação 82° e uma direção de tração σ_3 horizontal de orientação 352°. Já o segundo campo possui orientação de compressão σ_1 igual a 174° e uma direção de tração igual a 264°. Para ambos os campos as fraturas paralelas e subparalelas à direção de compressão são denominadas de trativas, enquanto as outras são definidas como oblíquas. Ambos os tipos de fraturas podem apresentar preenchimento, fato observado na orientação das fraturas preenchidas e pela orientação dos veios e diques, identificados no levantamento de campo.

Esses dois campos atuaram na região como um todo e dependendo do setor pode ser identificada a existência dos dois ou de um campo somente. Isso implica na necessidade de estudos locais para a caracterização do regime predominante e para a definição do tipo de estrutura. Além disso, a orientação desses dois campos indica a existência do padrão ortogonal evidenciado pelos dados de campo.

Com a interpretação de lineamentos obtidos de fotografias aéreas em escala 1:60.000, foram identificados 4154 estruturas separadas em quatro grupos principais (Tabela 2) e tratadas estatisticamente por técnicas vetoriais.

Tabela 2- Distribuição dos lineamentos identificados na interpretação de fotografias aéreas e sua distribuição nos quatro grupos

Table 2- Distribution of the delineaments identified in the air photograph interpretation and its distribution in the four groups

Grupo	Intervalo - Range	Nº de Lineamentos	Orientação Média	Comprimento Médio (m)
1	N0-14E e N00-14W	663	N0-10E e N00-10W	630,5-990,7
2	N15-84E	1751	N30-60E	675,7-979,1
3	N15-75W	1316	N40-50W	642,2-974,9
4	N85-90E e N75-90W	424	N80-90W	741,8-1082,2

Analisando-se a quantidade de estruturas identificadas, observa-se que os lineamentos nordestes são predominantes, seguidos dos noroestes. Já com relação à orientação média (extraído do azimute médio), observa-se que as direções principais correspondem às orientações preferenciais e secundárias identificadas no levantamento de campo, sendo que há variações dependendo do setor analisado, o que acaba

corroborando a existência de comportamentos diferenciados em cada região (dependendo do campo tensional predominante). Na análise dos comprimentos médios dos lineamentos é possível identificar que os valores entre 630 a 1082 m correspondem às médias gerais, sendo que para cada região há variações. No entanto, observa-se que os lineamentos não apresentam dimensões demasiadas (quilométricas - dois, três, quatro ou

mais quilômetros), o que condiz com os processos da deformação rúptil.

O fator estrutural consiste num dos mais importantes condicionadores dos aquíferos fraturados, mas pode-se observar pelos dados apresentados que a existência de estruturas numa determinada região não é indicativa da ocorrência de aquíferos fraturados. Muitas delas podem estar preenchidas, o que acaba inviabilizando a ocorrência dos mesmos. É necessário que, além da identificação de estruturas, sejam feitas as análises geométricas, cinemáticas e dinâmicas visando a caracterização das estruturas identificadas e a definição da provável estrutura condicionadora dos aquíferos fraturados da área objeto de estudo.

Para a utilização desse condicionante, na etapa de integração de dados, foram gerados mapas com a distribuição dos lineamentos segundo a orientação apresentada (distribuição em grupos).

Fator Relevo

O fator relevo corresponde a um dos condicionantes dos aquíferos fraturados, por conta principalmente do grau de dissecação. Conforme Hausman (1995) e Lisboa (1993), o grau de dissecação tem um importante papel na formação de zonas de descarga dos aquíferos, prejudicando assim as recargas e a ocorrência de aquíferos fraturados. Assim, as zonas que apresentarem algum grau de dissecação são menos favoráveis à ocorrência de águas subterrâneas, visto que o armazenamento é menor e a descarga passa a ser maior em função da possibilidade de formação de fontes de encosta originadas pela quebra do relevo.

Na região, o fator relevo foi analisado visando à identificação de zonas de grau de dissecação diferenciado. Essa identificação foi realizada com base na análise de um modelo digital de elevação (Figura 3) elaborado a partir de cartas topográficas em escala 1:50.000, do Serviço Geográfico do Exército.

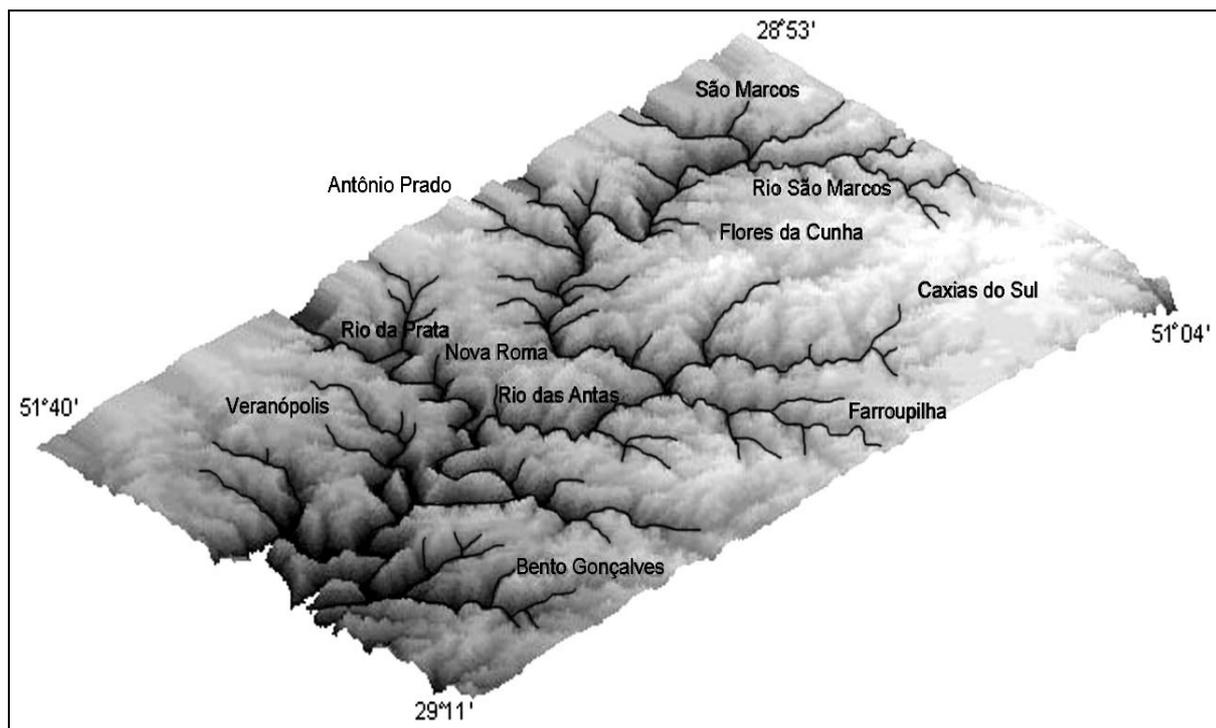


Figura 3- Modelo Digital de Elevação da Área de Estudo
Figure 3- Digital model of elevation of the Area of Study

Analisando-se o modelo digital de elevação, observa-se que o relevo da região apresenta-se 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 a calha do Rio das Antas.

As áreas que apresentam modelados de relevos com grau de dissecação médio a forte correspondem à calha do Rio das Antas, ao vale do Rio da Prata e à região compreendida pelo Rio São Marcos. O setor de Caxias do Sul e Flores da Cunha é caracterizado por superfícies com grau de ondulação suaves a fortes e a região de Farroupilha e Bento Gonçalves é marcada por superfícies fortemente onduladas com a formação

de blocos diferenciados. Já na região de Veranópolis, é evidenciada a presença de superfícies onduladas (grau médio a forte) e alguns altos topográficos. No setor Nova Roma há um alto topográfico com forma de crista limitado pelos vales do Rio da Prata e Rio das Antas.

Com base nas características morfoestruturais da região, observa-se que as áreas com modelados dissecados de relevo de graus médios a fortes (correspondentes aos vales dos principais rios) são áreas menos favoráveis para a ocorrência de aquíferos fraturados. Já nas áreas com graus de dissecação menores, como as apresentadas pelas regiões de Caxias do Sul, Flores da Cunha e Farroupilha há uma tendência maior a ocorrência desses aquíferos.

Visando à utilização desse condicionante na etapa de integração de dados, foi gerado um mapa digital com as curvas de nível e um modelo numérico do terreno.

Fator Litologia

O fator litologia também é um dos condicionantes dos aquíferos fraturados, embora possua um grau de importância menor quando comparado com os outros. A relação principal está associada à estruturação dos derrames de lavas, visto que as estruturas primárias podem influenciar na circulação de água, quando conectadas a sistema de fraturas tectônicas. Outra relação ocorre com a hidroquímica, onde as rochas básicas e ácidas têm influência nas características químicas da água subterrânea. Na área de estudo, foram identificadas duas grandes seqüências de rochas vulcânicas: uma básica e outra ácida. A seqüência vulcânica básica é representada principalmente por rochas basálticas, dispostas em seis grandes derrames de lavas. Esses derrames possuem espessuras variáveis, entre 30 a 120 m e apresentam como estruturação primária, amplas zonas basais, zonas de disjunção vertical e camadas de rochas vesiculares a amigdalóides. Associadas a essas camadas, ocorrem diferentes tipos de brechas vulcânicas. A seqüência vulcânica ácida é caracterizada por litologias como riodacitos, dacitos e riolitos, distribuídos ao longo de três derrames principais. Esses derrames possuem espessura regular da ordem de 50 m e apresentam uma estruturação primária marcada por zonas basais (pequenas espessuras), de disjunção horizontal (amplas) e zonas vesiculares a amigdalóides. Associadas às zonas basais, é comum a ocorrência de camadas de rochas maciças e níveis de vidro vulcânico.

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. Essas zonas estão mais sujeitas aos processos de intemperismo, que facilitam a abertura e a conexão de vazios existentes na rocha e auxiliam no processo de circulação da água. Cabe salientar que a zona vesicular, por si só, não constitui um bom aquífero, mas quando conectada a estruturas tectônicas, há grandes chances de ocorrência de bons volumes de água. Outro ponto importante está relacionado com o contato entre as zonas vesiculares a amigdalóides com zonas maciças e camadas de brechas vulcânicas. Nesses contatos, há a formação de planos que, quando intemperizados, facilitam o processo de circulação da água.

Com base nas características apresentadas, pode-se salientar que a seqüência de rochas vulcânicas básicas possui maiores chances com relação à ocorrência de água subterrânea, em função da estruturação dos derrames e das amplas zonas vesiculares a amigdalóides que ocorrem associadas.

Para a utilização desse condicionante na etapa de integração de dados foi elaborado um mapa geológico da região contendo a distribuição das duas seqüências de rochas vulcânicas.

Fator Solo

O fator solo também pode ser considerado como um condicionante dos aquíferos fraturados, sendo sua influência associada com o tipo e espessura do manto de alteração. Essas duas características têm influência nos processos de infiltração e, conseqüentemente, nos processos de recarga dos aquíferos.

Na área de estudo foram identificadas três associações de solos que ocorrem em diferentes situações de relevo e apresentam características variadas. A primeira associação corresponde aos solos Cambissolos e Neossolos; a segunda aos Podzólicos e Cambissolos; e a terceira aos solos do tipo Terra Bruna.

A análise das características do fator solo e das suas relações com os aquíferos fraturados, evidencia 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 Neossolos 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.

Para o emprego desse condicionante na etapa de integração de dados foi elaborado um mapa com a distribuição das três associações de solos.

INTEGRAÇÃO DE DADOS

A etapa de integração de dados foi realizada visando à determinação de um modelo de prospecção para aquíferos fraturados da Formação Serra Geral. Para tanto, foi elaborado um modelo conceitual (REGINATO; STRIEDER, 1999) tendo como base os fatores condicionantes dos aquíferos fraturados. Nesse caso, os diferentes condicionantes geológicos foram separados em planos de informações utilizados nas etapas de integração de dados. Além disso, foi gerado um plano de informação

denominado de cadastro que continha a localização dos poços tubulares produtivos (separados por grupos de vazões) e nulos. Esse plano foi utilizado para checagem dos produtos obtidos com as etapas de integração de dados (Tabela 3).

A integração de dados foi realizada com o emprego do *software* SPRING e das rotinas de processamento denominadas de: medida de classes, tabulação cruzada e a ferramenta de análise e suporte a decisão (“Processo Analítico Hierárquico-AHP”).

O processamento de dados foi iniciado visando à geração de um novo plano de informação denominado de mapa de classes de declividade. Nesse caso, a área estudada foi fatiada em diferentes classes de declividade visando uma análise detalhada do condicionante relevo e sua relação com os aquíferos fraturados.

Tabela 3- Planos de informações necessários para o desenvolvimento do estudo, com a divisão em dados a serem obtidos e suas respectivas fontes

Table 3- Necessary plans of information for the development of the study, with the division in data to be gotten and its respective sources

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

Tabulação Cruzada

Nessa etapa, foram cruzados os diferentes planos de informações com o plano cadastro para identificação de prováveis correlações entre os mesmos. Além disso, o resultado dessa tabulação, associado às informações dos condicionantes, foram utilizadas nas etapas seguintes de integração de dados.

Na tabulação cruzada foram integrados os seguintes planos de informações:

-Solo x Cadastro: o resultado obtido indicou que a maior parte dos poços produtivos está localizado em áreas onde há a associação de solos Neossolos/Cambissolos (60,93%). Isso está relacionado com o tamanho da classe, pois essa associação de solos abrange a maior parte da área de estudo. Além disso, observou-se que poços apresentando vazões acima de 20 m³/h estão relacionados às associações de solos Neossolos/Cambissolos e Cambissolos/Podzólicos;

-Geologia x Cadastro: nesse caso a tabulação permitiu identificar que a classe que representa a seqüência de rochas ácidas está associada a maior ocorrência de poços tubulares produtivos (79,12%) e que o intervalo de vazão característico dessa associação é de 0 a 10 m³/h;

-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 encontrado evidencia que a maior ocorrência de poços tubulares está associado 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, acima de 60% de declividade não há ocorrência de poços tubulares com vazões maiores que 10 m³/h.

-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 encontrados indicam que os grupos de lineamentos nordeste e noroeste possuem uma associação praticamente igual da ocorrência de poços tubulares produtivos. 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 leste-oeste e norte-sul mostra uma ocorrência menor de poços tubulares nessas estruturas. No entanto,

quando se comparam diferentes intervalos de vazões, torna-se evidente uma maior relação com os lineamentos norte-sul.

Com relação aos poços tubulares nulos, observa-se que eles possuem associação com os diferentes grupos de lineamentos (as estruturas nordeste apresentaram a maior correlação). Isso evidencia a existência de estruturas que apresentam comportamentos diferenciados quanto à ocorrência da 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.

Análise e Suporte a Decisão

Com as informações dos fatores condicionantes dos aquíferos fraturados e com os dados obtidos na etapa da tabulação cruzada foi desenvolvida uma outra etapa de integração, que propiciou a determinação da correlação entre o cruzamento de fraturas e a ocorrência de aquíferos, bem como a geração de um mapa de favorabilidade a ocorrência de aquíferos fraturados.

O plano de informação denominado de cruzamento que continha as intersecções de fraturas foi gerado através da técnica AHP (Processo Analítico Hierárquico) e da programação "LEGAL". Esse plano de informação foi integrado, por meio da técnica de tabulação cruzada, com o plano cadastro onde se identificou uma pequena coincidência de poços tubulares produtivos com áreas onde havia intersecção de fraturas (somente 8,1%). Isso indica não ser esse o principal fator a ser seguido na hora da locação de poços tubulares. Da mesma forma, identifica-se uma correlação entre poços nulos e regiões onde há cruzamento de fraturas.

O segundo produto gerado com a utilização da técnica AHP e programação "LEGAL" foi o mapa de favorabilidade à ocorrência de aquíferos fraturados. Esse mapa resultou do cruzamento dos seguintes planos de informações: geologia, solos e classes de declividade, fatores esses identificados como condicionantes dos aquíferos. Para sua elaboração foram dados pesos diferenciados para cada um dos planos de informações a serem integrados (etapa da programação "LEGAL"). O resultado dessa integração resultou em um mapa com três

diferentes classes de favorabilidade (Figura 4): classe muito favorável (40,59%), classe favorável (38,99%) e classe pouco favorável (20,42%).

Para determinar a relação existente entre as diferentes classes e a localização dos poços tubulares produtivos, foi realizada uma tabulação cruzada entre o mapa de favorabilidade e o plano de informação cadastro. O resultado evidenciou uma grande coincidência dos poços tubulares produtivos com as áreas definidas pelas classes muito favorável a favorável. Além disso, verifica-se que há índices altos de áreas de coincidência entre poços tubulares nulos e as diferentes classes, entre elas as consideradas como favoráveis a muito favoráveis. Isso comprova a importância dos lineamentos como condicionantes dos aquíferos fraturados, pois mesmo que a área seja considerada como muito favorável, a locação deve ser realizada sobre lineamentos.

Com o objetivo de promover a integração dos lineamentos com o mapa de favorabilidade (descrito acima) foi efetuada a integração desses planos de informações. O processo de integração empregado foi a técnica AHP tendo sido gerados

quatro mapas, um para cada grupo de lineamentos. Visando determinar a correlação existente entre esses mapas gerados e a ocorrência de aquíferos fraturados, foi realizada tabulação cruzada com o plano de informação cadastro. A análise dos resultados mostra uma forte coincidência na localização de poços tubulares produtivos sobre estruturas situadas em áreas consideradas como muito favoráveis. 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.

Em função da identificação da existência de correlações diferenciadas entre os lineamentos que constituem cada um dos diferentes grupos, foi realizada uma análise (através da interpretação visual dos Pis estrutural e cadastro) entre a localização de cada um dos poços tubulares (produtivos e nulos) e as orientações das estruturas (Tabela 4).

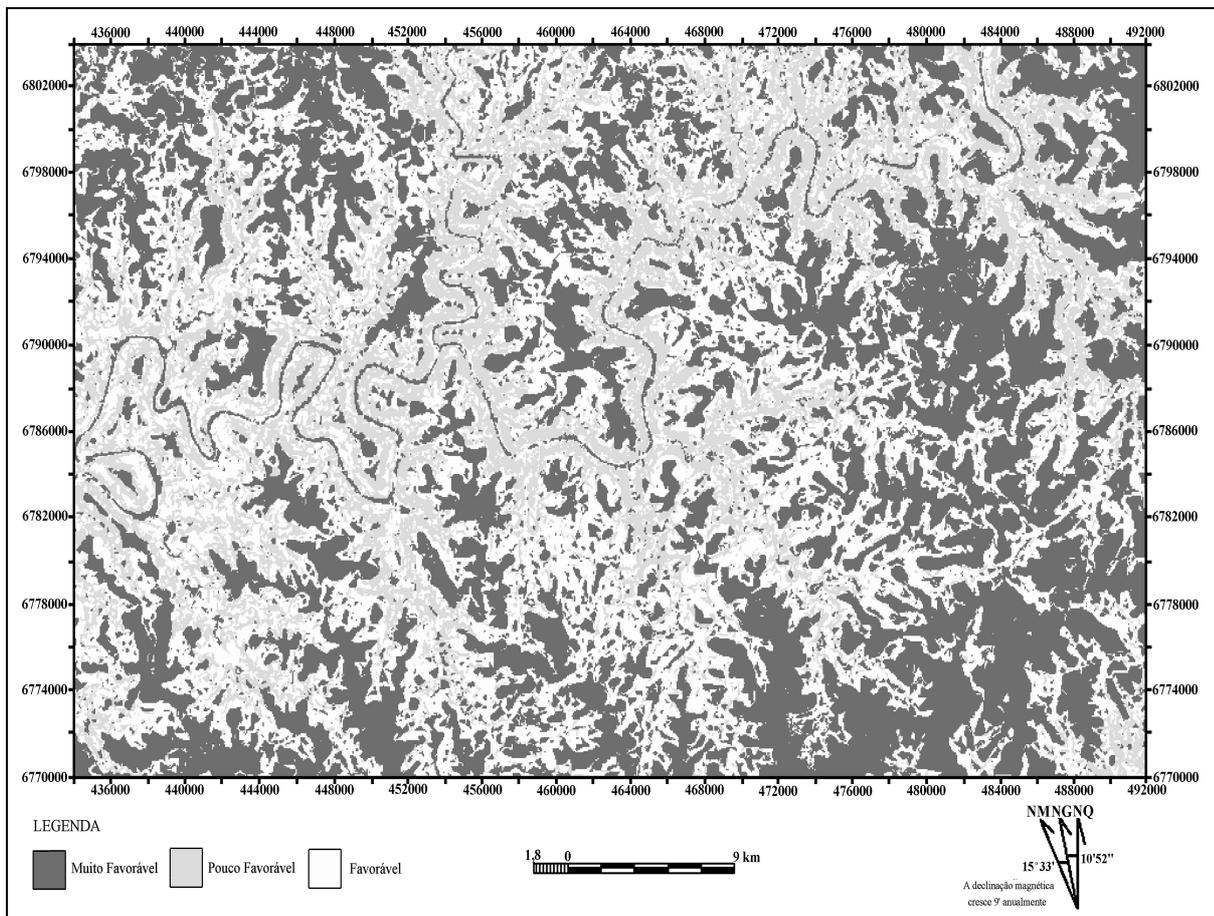


Figura 4- Mapa de favorabilidade a ocorrência de aquíferos fraturados segundo os condicionantes secundários
Figure 4- Map of manifestation the occurrence of fractured aquifer according to secondary conditions

Tabela 4- Correlação entre poços tubulares produtivos (diferentes vazões) e as orientações dos diferentes grupos de lineamentos

Table 4- Correlation between productive tubular wells (different outflows) and the orientation of the different groups of delineaments

Grupo 1- Lineamentos de orientação N-S								
Range °	N00-10E		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%			

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:

- lineamentos norte-sul (grupo 1): os poços produtivos com vazões acima de 20 m³/h estão associados a estruturas com orientações N10-4E;
- lineamentos nordeste (grupo 2): poços tubulares com vazões acima de 20 m³/h possuem correlação com estruturas orientadas na direção N20-30E e N40-50E;
- lineamentos noroeste (grupo 3): poços com vazões acima de 20 m³/h ocorrem associados a estruturas orientadas nas direções N30-40W e N50-60W;
- lineamentos lesteoeste (grupo 4): poços tubulares com vazões acima de 20 m³/h possuem correlação com estruturas orientadas na direção N80-90W;

Essas correlações identificadas entre os poços tubulares produtivos e as orientações dos diferentes lineamentos evidenciam 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 o mergulho), uma estrutura de determinada orientação pode ter resultados diferenciados: produtivo ou nulo.

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 não possuem relação com nenhum tipo de estrutura;

- 36,99% dos poços estão associado a lineamentos nordeste com orientação N30-40E e N50-60E;
- 17,81% dos poços estão relacionados com estruturas noroeste sendo a principal orientação dada pelo rumo N40-50W;
- 13,7% dos poços possuem relação com lineamentos norte-sul, cuja direção preferencial é N00-10E;
- 10,96% dos poços está associado a estruturas leste-oeste, cuja direção principal é N75-80W.

Da mesma forma que os poços produtivos, as relações identificadas servem para verificar que existem estruturas com comportamentos diferenciados.

PROSPECÇÃO DE AQUÍFEROS FRATURADOS NA ÁREA DE ESTUDO

A análise dos fatores condicionantes e dos produtos e resultados dos processos de integração de dados permitem 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 devem ser realizados de acordo com as seguintes etapas:

- 1- Levantamento Estrutural da Área de Estudo: 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 e subparalelas 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;

2- Caracterização dos Condicionantes Secundários: nesse caso, devem ser realizados estudos referentes ao grau de relevo (grau de dissecação e declividade), aos solos (tipo de espessura), bem como aos tipos litológicos. As regiões que apresentaram 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 aquíferos fraturados. Quando da ocorrência dessa situação, o condicionante litológico não terá grande influência, mas, ao efetuar locações sobre regiões onde há ocorrência de rochas vulcânicas básicas, deve-se dar atenção especial à presença de zonas vesiculares a 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 à ocorrência de aquíferos fraturados, aumenta as chances de serem obtidos poços tubulares produtivos com boas vazões.

CONCLUSÕES

A região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul é caracterizada pela presença de dois tipos de aquíferos: um denominado de livre ou freático e outro de fraturado.

O aquífero fraturado possui grande importância na região, pois é utilizado para o abastecimento de comunidades rurais e urbanas, para desenvolvimento de atividades agrícolas, industriais e recreativas. Cabe salientar que, dos onze municípios analisados, cinco possuem como única forma de abastecimento os recursos hídricos subterrâneos provenientes desse aquífero.

Como características hidrogeológicas o sistema aquífero fraturado apresenta uma forte anisotropia marcada por valores diferenciados de transmissividade, capacidade específica e vazões.

Além disso, as águas subterrâneas desse sistema apresentam boa qualidade e são classificadas, na sua maioria, como águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas.

Os condicionantes estruturais dos aquíferos fraturados da região estão relacionados com as estruturas geológicas (fraturas e zonas de fraturas), com a litologia (tipo e estruturação), com o tipo e espessura de solo e com o relevo (grau de dissecação). A análise desses fatores e a integração dos mesmos permitiram a identificação do grau de importância de cada um dos condicionantes, sendo que as áreas que apresentam lineamentos, estão associadas a relevos com baixo grau de dissecação e baixa declividade (abaixo de 30%), possuem solos do tipo Neossolo/Cambissolo e Cambissolo/Podzólico e apresentam rochas da seqüência ácida possuem as maiores chances para ocorrência de aquíferos fraturados. No entanto, deve ser dado enfoque para o tipo de estrutura e sua orientação, pois há influência direta dessas características com a ocorrência de água subterrânea.

Além disso, a análise dos fatores condicionantes e dos diferentes produtos da integração de dados permite determinar um modelo prospectivo para aquíferos fraturados da região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Nesse modelo a prospecção e a locação de poços tubulares devem ser realizadas sempre seguindo duas etapas: a primeira refere-se a um levantamento estrutural da região para caracterização dos tipos de estruturas e a segunda corresponde ao estudo dos condicionantes secundários como relevo, solos, litologia e estruturas primárias associadas.

REFERÊNCIAS

- COSTA, W.D. Análise dos Fatores que Influenciam na Hidrogeologia do Cristalino. **Águas Subterrâneas**, Ano 1, Set-Dez, nº 4. p. 14-47. 1965.
- COSTA, W.D. Análise dos Fatores que Atuam no Aquífero Fissural. CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, IV. Brasília. ABAS, **Anais....** p.289-302. 1986.
- CPRM. 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), 1998. 1 mapa color. Escala 1:250.000. Material cartográfico.
- CPRM. 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), 1998a. 1 mapa color. Escala 1:250.000. Material cartográfico.
- HAUSMAN, A. Províncias Hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul, RS. Estudos Tecnológicos: **Acta Geológica Leopoldensia**, Série Mapas. Nº 2. P-1-127, 1995.
- LEINZ, V. 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. 1949.
- LISBOA, N.A.. 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. 1993.
- RADAM/BRASIL. 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).
- REGINATO, P.A.R.. Integração de Dados para Prospecção de Aquíferos Fraturados em Trecho da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (RS). Porto Alegre, 2003. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais. UFRGS. 254p.
- REGINATO, P.A.R.; STRIEDER, A. J.. 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.1999.
- REGINATO, P.A.R.;STRIEDER, A. J.. 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. 2001.
- REGINATO, P.A.R.; STRIEDER, A.J. Caracterização Hidrogeológica E Potencialidades Dos Aquíferos Fraturados Da Formação Serra Geral Na Região Nordeste Do Estado Do Rio Grande Do Sul. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, ABAS, Anais (CD), 2004.
- REGINATO, P.A.R.; STRIEDER, A.J. Caracterização Hidroquímica Dos Aquíferos Fraturados Da Formação Serra Geral Na Região Nordeste Do Estado Do Rio Grande Do Sul In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, ABAS, Anais (CD), 2004a.
- ROISENBERG, A. Petrologia e Geoquímica do Vulcanismo Ácido Mesozóico da Província Meridional da Bacia do Paraná. Porto Alegre, 1990. Tese de doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (Inédito).
- ROISENBERG, A.; CHIES, J.O. Vulcanismo basaltolítico 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. 1987.

