

SÍNTESE DA OCORRÊNCIA GEOLÓGICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO RIO GRANDE DO SUL

Nelson Amoretti Lisboa¹; Norberto Dani¹; Marcus V. D. Remus¹ & João Castro¹

Resumo - A descrição do modo de ocorrência geológica das águas subterrâneas de uma região é essencial para subsidiar outras pesquisas mais detalhadas, baseadas em dados quantitativos.

Existem quatro fatores geológicos fundamentais que influem na caracterização de aquíferos: Materiais, estratigrafia, estruturas e geomorfologia.

A categoria Sistema Aquífero que abrange dimensões espaço – temporais é fundamental para ordenar sistematicamente a ocorrência das águas subterrâneas.

Os sistemas de rochas com suas discordâncias regionais são a base para a macro compartimentação das águas subterrâneas do Rio Grande do Sul.

Nove materiais (areia, cascalho, alteritos e colúvios, arenito, conglomerado, basalto, riolito, granito, mármore) formam os treze principais sistemas aquíferos do Estado (Planície Costeira, Planície Fluvial, Tupaciretã, Terraços Fluviais, Alteritos e Colúvios, Guarani, Rio Bonito, Guaritas, Santa Bárbara, Serra Geral Básicas, Serra Geral Ácidas, Granitóides, Mármore).

Estratigrafia, falhas, fraturas, dobras, corpos intrusivos e estruturas circulares diversas, modificam drasticamente as propriedades aquíferas dos materiais aquíferos.

A geomorfologia é fator de primeira ordem no modo de ocorrência das águas subterrâneas, influi no zoneamento da pluviometria, na distribuição das áreas de recarga, confinamento e descarga dos aquíferos.

Os fatores modificadores dos materiais aquíferos, estratigrafia, estruturas, geomorfologia são abordados para cada um dos sistemas aquíferos listados.

Abstract - The geological model of occurrence of ground water in one region is an important approach to complementary detailed research, normally expressed in quantitative dates. There are four geological factors that characterize the aquifers: material, stratigraphy, structures and geomorphology. The concept of aquifer system, with a space and temporal dimension, is also important in the systematic organization of ground water occurrence.

¹ Dept. de Geodésia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre – Brasil (nelsonlisboa@hotmail.com)

The use of rock system concept in the territory of Rio Grande do Sul, the concept of rock systems associated to regional discordance are essential to establish macro ground water compartment. It was considered nine materials (sand, pebbles, alterites and colluvium, conglomerates, basalts, riolites, granites and marble) originating thirteen aquifer systems (coastal plain, fluvial plain, Tupaciretã, fluvial terraces, alterites and colluvium, Guarani, Rio Bonito, Guaritas, Santa Bárbara, Serra Geral Basalts, Serra Geral Riolites, Granitoids and Marbles).

Faults, stratigraphy, fractures, folds, intrusive bodies and a variety of circular structures modify drastically the properties of some aquifers materials.

Geomorfology is considered an important factor, controlling the occurrence of ground water, specially in the distribution of rain, recharge areas, confinement and discharge of water from aquifers.

In this work, modify factors of aquifer material, as stratigraphy, structures and geomorphology are commented to each of the aquifers system analyzed.

Palavras-Chave - águas subterrâneas; sistemas aquíferos; ocorrência geológica.

INTRODUÇÃO

A descrição do modo de ocorrência geológico das águas subterrâneas de uma região, proporciona um modelo concreto, indispensável para embasar pesquisas detalhadas, tais como da distribuição de áreas de recarga – descarga, fluxo e piezometria dos aquíferos, quantidade, qualidade da água, exploração, usos, conservação, monitoramento e simulações de cenários para previsões de aproveitamento. Se não há uma concepção geológica qualitativa consistente, a análise e interpretação de dados quantitativos carece de embasamento e perde em efetividade.

Hausmann (1960) foi o primeiro pesquisador a ensaiar um esboço do modo de ocorrência das águas subterrâneas do Rio Grande do Sul.

O mesmo autor, Hausmann (1964) estabeleceu a sistematização das ocorrências dos aquíferos do Estado, definindo províncias hidrogeológicas do Rio Grande do Sul.

Samberg (1980) efetuou uma compartimentação hidrogeológica baseado no que denominou províncias geomorfológicas do Rio Grande do Sul. Hausmann (1995) fez uma revisão e ampliação do seu trabalho de 1960, fundamentado no avanço dos conhecimentos geológicos do Rio Grande do Sul e no grande número de poços perfurados desde então.

Este trabalho não se refere apenas ao enfoque da ocorrência geológica das águas subterrâneas. Aborda aspectos climáticos, hidrogeológicos e hidroquímicos, faz aproximações sobre circulação, piezometria, qualidade - classificação química das águas, rendimento e condições de captação dos aquíferos.

Passados nove anos desta publicação referencial de síntese da hidrogeologia do Rio Grande do Sul, visando dar continuidade a uma atualização a este tipo de abordagem regional, retomamos apenas um aspecto, o modo de ocorrência geológico das águas subterrâneas, por fornecer o modelo real básico, essencial para analisar, interpretar e entender a distribuição espacial de dados de piezometria, fluxo, quantidade e qualidade das águas. Estes pontos de vista poderão ser objeto de futuros trabalhos de síntese para o Estado do Rio Grande do Sul, subsidiados então pelo modelo geológico de ocorrência das águas subterrâneas.

Existem quatro fatores geológicos fundamentais que influem nas características dos aquíferos: Material (composição, textura, estruturas internas), estratigrafia (variações verticais e laterais de fácies) estruturas (falhas, diaclases, dobras, intrusões, estruturas circulares), e geomorfologia (graus de dissecação do relevo, posições altimétricas, regolito, superfície basal de intemperismo).

Ao se abordar a ocorrência de um aquífero, os fatores acima devem ser analisados e determinada a sua importância relativa, para cada caso específico.

Com o fim de sistematizar a abordagem, no ordenamento geológico da ocorrência da água subterrânea do Rio Grande do Sul, optamos pela categoria geral Sistema Aquífero, que abrange dimensões espaço - temporais, em detrimento de província hidrogeológica, que se refere especificamente a uma área da superfície da Terra.

SISTEMAS AQUÍFEROS

Meinzer (1959), com a intenção de sistematizar a hidrogeologia, propôs a amarração da água subterrânea aos sistemas de rochas. Salientou que a ocorrência de água subterrânea de uma região é governada pela geologia e, portanto, o esquema do sistema de rochas é indispensável para uma ordenação do modo natural de ocorrência das águas subterrâneas.

Desta proposição surgiu a concepção de Sistemas Aquíferos, condicionados pelos sistemas de rochas, elaborados pelos geólogos para um país ou para uma região. Neste contexto, Meinzer salienta também a importância das discordâncias regionais na macro compartimentação hidrogeológica.

Adotando este ponto de vista propomos o seguinte esquema para a macro compartimentação das águas subterrâneas do Rio Grande do Sul:

Aqüífero

Sistemas Aqüíferos Cenozóicos - Alteritos - Colúvos

Planície Costeira

Planícies Fluviais

Terraços Fluviais

Tupaciretã

..... DISCORDÂNCIA.....

Sistemas Aqüíferos Mesozóicos - Serra Geral

Guarani

..... DISCORDÂNCIA.....

Sistemas Aqüíferos Neopaleozóicos Rio Bonito

..... DISCORDÂNCIA.....

Sistemas Aqüíferos Eopaleozóicos Guaritas

Santa Bárbara

..... DISCORDÂNCIA

Sistemas Aqüíferos Pré Cambrianos Granitóides

Mármore

SISTEMAS AQUÍFEROS: MATERIAIS FORMADORES

Analisando as características hidrogeológicas gerais dos materiais estaremos fornecendo subsídios para uma primeira qualificação sumária generalizada dos principais sistemas Aqüíferos do Rio Grande do Sul, listados na tabela I.

Levando em conta o regolito (todo material inconsolidado que recobre a superfície da terra) e as rochas, sedimentares, ígneas e metamórficas (materiais consolidados), são **nove** os principais tipos de materiais que caracterizam **treze** principais sistemas aqüíferos do Estado do Rio Grande do Sul.

Regolito

Areia (1) - Sistemas Aqüíferos Cenozóicos da Planície Costeira, Planícies Fluviais interiores e Formação Tupaciretã

Cascalho (2) - Sistema Aqüífero Cenozóico de Terraços Fluviais interiores

Alteritos e Colúvios (3) - Sistema Aqüífero Freático

Rochas sedimentares

Arenito (4) - Sistema Aqüífero Mesozóico Guarani, Sistema Aqüífero Neopaleozóico Rio Bonito,

Conglomerado (5) - Sistema Aquífero Eopaleozóico Guaritas – Santa Bárbara

Rochas Ígneas

Basalto (6) - Sistema Aquífero Mesozóico Serra Geral

Granito (7) - Sistema Aquífero Pré Cambriano - Granitóides

Riolito (8) - Sistema Aquífero Mesozóico Serra Geral

Rochas Metamórficas

Mármore (9) - Sistema Aquífero Pré Cambriano - Mármore

A tabela I relaciona os materiais com os principais sistemas aquíferos do estado, indicando os locais preferenciais atualmente explorados.

Tabela I - Materiais componentes e principais sistemas aquíferos do Estado do Rio Grande do Sul

Categoria Geológica	N ^o	Material	Sistema Aquífero	Atualmente mais Explotado em:
Regolito	1	areia	1. Cenozóico de planície costeira 2. Cenozóico de planície fluvial 3. Cenozóico Tupaciretã	Toda a Planície Costeira Planície do Vacacaí São Gabriel Planalto Médio Tupaciretã
	2	cascalho	4. Cenozóico de terraço fluvial	Terraços do Rio Vacacaí São Gabriel
	3	Alteritos e colúvios	5. Cenozóico alteritos e colúvios	Dispersos em todo o Estado
Rocha Predominante	4	arenito	6. Mesozóico Guarani 7. Neopaleozóico Rio Bonito	Cuesta do Haedo Livramento Depressão Periférica Bagé
	5	Conglomerado	8. Eopaleozóico Guaritas 9. Eopaleozóico Santa Bárbara	Escudo Caçapava
	6	basalto	10. Mesozóico Serra Geral (1)	Planalto Médio, Cuesta do Haedo
	7	riolito	11. Mesozóico Serra Geral (2)	Planalto dos Campos Gerais
	8	granito	12. Pré Cambriano Granitóides	Escudo Porto Alegre
	9	mármore	13. Pré Cambriano Mármore	Escudo Bagé

AREIA-ARENITO - As areias e arenitos, em geral, são excelentes aquíferos, apresentam consistente continuidade lateral e vertical e originam grandes reservatórios de água subterrânea. As areias chegam a porosidades de até 40%, quando apresentam grãos arredondados e de tamanho uniforme.

A produtividade destes tipos de aquíferos é controlada por fatores tais como tamanho de grão, grau de seleção, grau de cimentação, quantidade de matriz, figura 1, quantidade de diaclases, extensão lateral e vertical.

No Rio Grande do Sul os **Sistemas Aquíferos Cenozóicos** são predominantemente compostos por areias ou arenitos fracamente cimentados, sendo o de maior potencial o Sistema Aquífero Cenozóico Planície Costeira, composto por areias e arenitos fracamente cimentados multicamadas de variadas origens que podem atingir satisfatórias extensões laterais e verticais e apresentar condições livres, semi confinadas a confinadas, com considerável potencial aquífero.

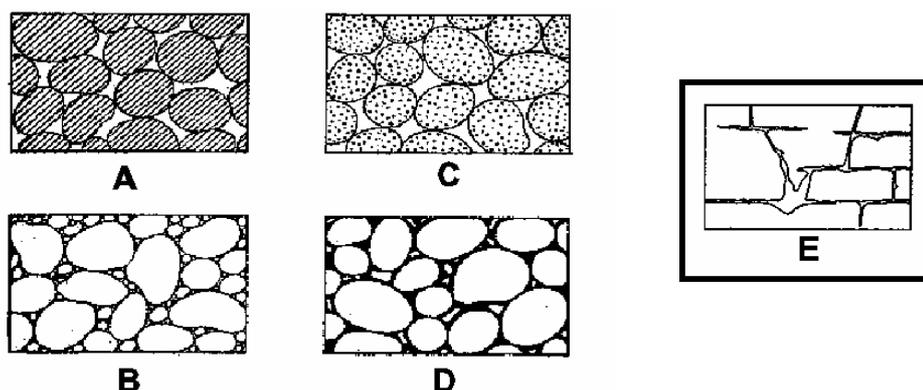


Figura 1 - Diferentes situações de poro - permeabilidade, em areias (A, C), em arenitos (B, D), em rochas solúveis (E) (Modificado de Meinzer 1959)

O Sistema Aquífero Cenozóico Planícies Fluviais apresenta camadas arenosas lenticulares descontínuas, é de pequena espessura, com pouca continuidade lateral apresentando, em geral, baixo a médio potencial aquífero, principalmente em condições freáticas.

O Sistema Aquífero Tupaciretã é composto por arenitos friáveis, finos a muito finos e arenitos silticos, fracamente cimentados, com matriz, medianamente selecionados, com baixo a moderado potencial aquífero em condições freáticas.

Dentro dos **Sistemas Aquíferos Mesozóicos** encontra-se o Sistema Aquífero Guarani, manancial subterrâneo mais importante do Estado em termos de quantidade de água, composto predominantemente por arenitos eólicos com grãos arredondados, bem selecionados, moderado grau de cimentação, pouca matriz, bastante diaclasados em zonas de grandes falhamentos.

Subordinadamente ocorrem arenitos fluviais medianamente selecionados, moderado grau de cimentação, com matriz, bastante diaclasados em zonas de grandes falhamentos. Este Sistema Aquífero apresenta grande continuidade lateral e vertical, condições livres, confinadas, com potencial aquífero muito grande.

O **Sistema Aquífero Neopaleozóico Rio Bonito** é composto predominantemente por arenitos fluviais de fácies deltaica e arenitos praias a marinho raso medianamente arredondados e selecionados, médio a alto grau de cimentação, com matriz, bastante diaclasados em zonas de grandes falhamentos. Este Sistema Aquífero apresenta razoável continuidade lateral e vertical, condições livres e confinadas e um potencial aquífero médio.

CASCALHO-CONGLOMERADO. Cascalho-conglomerado - Os cascalhos são os materiais ideais como aquíferos, pois combinam alta porosidade à alta permeabilidade, figura 2.

São os reservatórios que apresentam as maiores vazões específicas para poços, em geral de grande diâmetro e pequena profundidade.

No Rio Grande do Sul, ocorrem depósitos cenozóicos de cascalho ou conglomerado com fraco grau de cimentação nos terraços fluviais dos grandes e médios rios. O exemplo mais conhecido por sua exploração, é o Sistema Aquífero Cenozóico de Terraços Fluviais do Rio Vacacaí no município de São Gabriel, intensamente explorado para irrigação. O aquífero apresenta espessura moderada e continuidade lateral limitada em condições livres ou de confinamento e muito bom potencial.



Figura 2 - Cascalho em terraço fluvial, no vale do Arroio do Pinto, afluente do Rio Três Forquilhas.

Os conglomerados e arenitos com seixos e alto grau de cimentação, como é o caso do Sistemas Aquíferos Eopaleozóicos Guaritas e Santa Bárbara, são maus aquíferos. Em zonas de grandes falhas podem se criar condições locais de exploração.

ALTERITOS - COLÚVIOS - LEQUES - Os mantos de alteração residuais, bem como, colúvios e leques resultantes de movimentos de massa, recobrem descontinuamente grande parte da superfície do Estado. Formam o Sistema Aquífero Cenozóico, conhecido informalmente como Lençol Freático, figura 3.

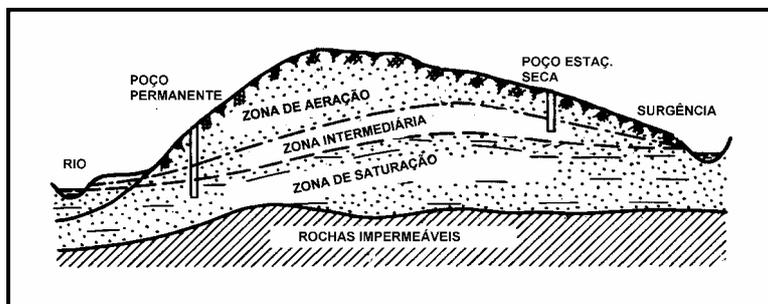


Figura 3 - Esquema de um sistema aquífero freático em manto de alteração residual e colúvios

Se caracterizam pela sua heterogeneidade composicional, textural, pequena espessura, é influenciado pelas variações climáticas, tem baixo potencial aquífero e frequentemente é poluído.

O setor mais produtivo dos alteritos é a superfície basal de intemperismo, ou seja, o contato do manto de alteração com o "bedrock" inalterado, com baixa permeabilidade.

Caso particular de alterito é o Silcrete que ocorre no município de Bagé, conhecido por Formação Santa Tecla, o qual funciona como um aquífero de pequena espessura mas com grande extensão lateral, bastante explorado para o uso doméstico na região.

BASALTO - Dentre as rochas ígneas, principalmente por aspectos estruturais decorrentes da fluidez da lava, é o litotipo que tem as melhores propriedades aquíferas. A estrutura interna de um derrame ideal Leinz (1966), figura 4, favorece, em parte, a circulação da água subterrânea.

No topo do derrame, na zona vesicular - amigdalóide, ocorre freqüente preenchimento das vesículas com quartzo e zeolitas possibilitando alteração intempérica diferencial em relação à massa de rocha, que cria zonas de armazenamento - circulação de água.. No centro do derrame, a zona de disjunção vertical também tem condições de poro - permeabilidade, possibilitando algum armazenamento e circulação. Apresenta-se, após, na base do derrame, um aquíclode representado por disjunção horizontal e vidro na base do derrame onde a circulação da água é muito lenta. O contato entre derrames também pode funcionar como discontinuidades que possibilitam o fluxo de água.

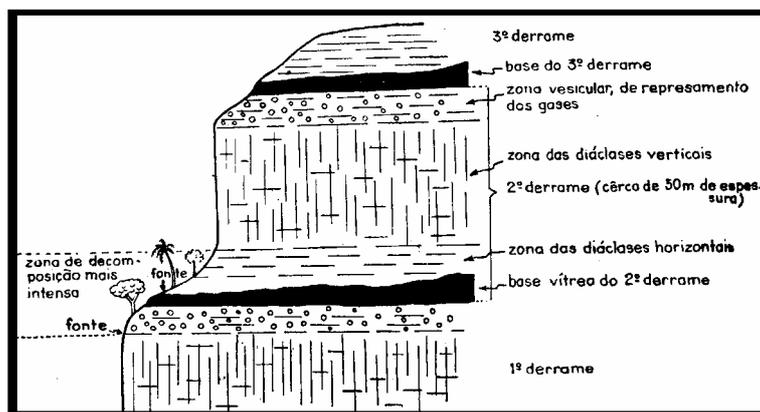


Figura 4 - Descontinuidades primárias em vulcanitos básicos do Sistema Aquífero Serra Geral
(modificado de Leinz 1966)

Estas descontinuidades internas menores dos derrames interconectam-se com as grandes descontinuidades tectônicas e formam um intrincado sistema de aberturas que caracterizam os sistemas aquíferos em meio fraturado, especificamente nas efusivas básicas.

O Sistema Aquífero Mesozóico Serra Geral no setor dos basaltos, do ponto de vista do aproveitamento atual, é o mais importante do Estado. As áreas de ocorrência de Basalto no Planalto de Santo Ângelo, Planalto Dissecado do Rio Uruguai e Planalto de Uruguaiana são intensamente exploradas estando os poços mais produtivos, situados nos principais lineamentos tectônicos.

RIOLITO - Os fluxos ácidos viscosos não favorecem o desenvolvimento de estruturas internas primárias que facilitem o armazenamento e circulação da água subterrânea. Os litotipos ácidos da Formação Serra Geral no Rio Grande do Sul, figura 5, apresentam basicamente duas zonas estruturais primárias, uma de base e topo com consistente disjunção horizontal, podendo atingir até 30 metros de espessura e uma central, também espessa, com esparsa disjunção vertical e aspecto geral maciço, com raras vesículas e amígdalas espalhadas.



Figura 5 - Perfil esquemático das principais estruturas primárias dos fluxos ácidos do Sistema Aquífero Serra Geral

Esta estruturação interna geral dos fluxos, se comparada com a dos derrames basálticos é pobre em termos de discontinuidades.

O Sistema Aquífero Mesozóico Serra Geral, no setor dos fluxos ácidos, também vem sendo intensivamente explorado no Planalto dos Campos Gerais e na Serra Geral, apesar do grande número de poços secos ou de baixa produtividade. Os poços mais produtivos são aqueles localizados nos lineamentos tectônicos, em especial os de médio porte, com mais de 10 Km de comprimento.

GRANITO - O termo "granito" em hidrogeologia, informalmente engloba toda a série plutônica das rochas ígneas, bem como gnaisses e migmatitos.

O modo de formação destes litotipos, a exemplo dos fluxos ácidos, não favorece o desenvolvimento de estruturas internas significativas para o armazenamento e circulação de águas subterrâneas predominando amplas zonas maciças, recortadas por veios com preenchimento principalmente de quartzo, diques de riolito e microgranito. Existe uma faixa superficial de rocha, com diaclases de alívio de tensão, sub horizontais ou com fracos mergulhos que podem interconectar-se com fraturas de origem tectônica e contribuir para o armazenamento e fluxo das águas subterrâneas, figura 6.

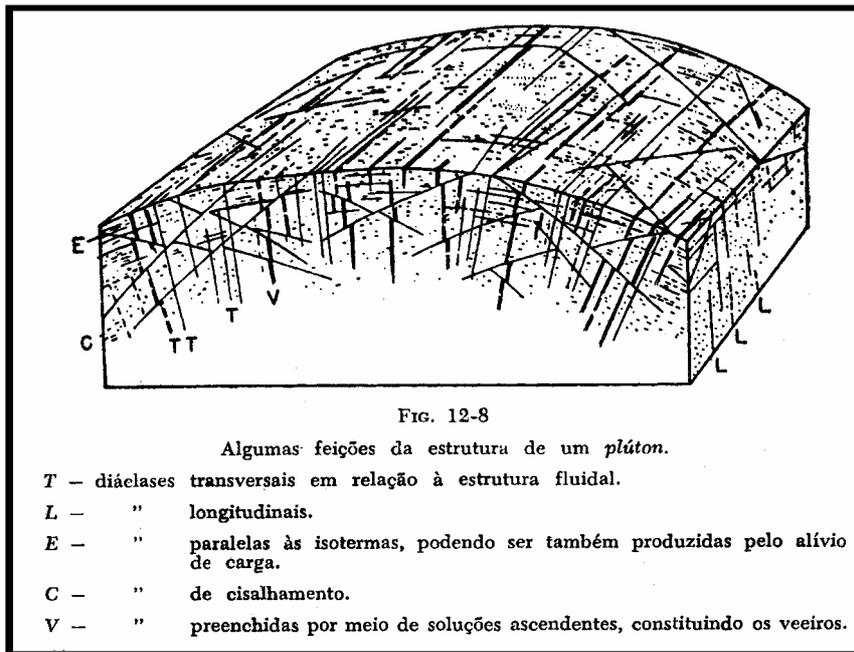


Figura 6 - Descontinuidades típicas do meio fraturado que caracteriza o Sistema Aquífero Pré Cambriano Granitóides, modificado de Leinz (1966)

Os grandes falhamentos que cortam estas rochas estão associados a esforços compressivos e geralmente são áreas impermeáveis e negativas para água subterrânea

O Sistema Aquífero Pré Cambriano Granitóides apesar da baixa vazão da maioria dos poços ali perfurados, é bastante explorado no Rio Grande do Sul em toda a superfície do Escudo Sul - Riograndense. Os poços mais produtivos estão associados a falhamentos com reativações predominantemente distensivas.

MÁRMORE - Os mármore apresentam poro - permeabilidade por processos de dissolução do carbonato de cálcio que ocorre principalmente na zona de percolação, acima da zona de saturação, onde a água que se infiltra vem carregada de gás carbônico. Favorecido por condições especiais de relevo, fraturamentos e evolução particular, as cavidades abertas na zona de percolação podem passar para a zona de saturação e constituir excelentes aquíferos, figura 1.

O Sistema Aquífero Pré Cambriano Mármore, no Rio Grande do Sul, ocorre em áreas restritas, nos cinturões metamórficos do Escudo Sul - Riograndense. São mármore dolomíticos pouco solúveis, mas em zonas de falha, podem produzir excelentes vazões. A potencialidade deste aquífero pode ser observada em frentes de exploração de pedreiras, onde, dependendo da topografia, a exploração dos mármore só pode ser feita mediante intensivo bombeamento da água subterrânea que verte no assoalho das pedreiras.

SISTEMAS AQUÍFEROS: ESTRATIGRAFIA E ESTRUTURAS

A concepção geológica das águas subterrâneas, apenas sob o ponto de vista dos materiais formadores é incompleta, pois fatores estratigráficos e estruturais modificam drasticamente as propriedades dos materiais aquíferos. Os principais parâmetros modificadores são:

Estratificação e Fácies	verticais
(variações)	laterais
Falhas e Fraturas	
Dobras	
Corpos intrusivos	
Estruturas circulares	

Variações verticais e laterais de estratificação e fácies

Os três sistemas aquíferos que são mais influenciados por estas variações são Sistema Aquífero Cenozóico Planície Costeira, Sistema Aquífero Mesozóico Guarani e Sistema Aquífero Paleozóico Rio Bonito

Sistema Aquífero Cenozóico Planície Costeira

É, dentre todos, o mais influenciado por variações laterais e verticais de fácies, condicionadas por uma série de ambientes de sedimentação que se sucederam no espaço e no tempo.

Pode-se considerar dois sistemas deposicionais gerais: Sistema Depositional Quaternário de Cobertura Laguna - Barreira, aflorante em toda a Planície Costeira e Sistema Depositional Terciário Bacia Rasa de Pelotas, que ocorre em sub superfície.

Uma boa visualização esquemática regional das influências das variações verticais e laterais de estratificação e fácies, nas características do Sistema aquífero Cenozóico Planície Costeira é dada por Windler in CPRM (1997), figura 8, em que o autor mostra, em secção denominada Crono - Ambiental, vinte e sete tipos de depósitos diferentes, distribuídos superficialmente e em profundidade, estreitamente interconectados, pertencentes aos dois grandes sistemas deposicionais antes referidos.

Sistema Aquífero Mesozóico Guarani

O Sistema Aquífero Mesozóico Guarani é o de melhor potencial no Estado, favorecido pela deposição de espessas seqüências sedimentares continentais clásticas de origem eólica, fluvial e subordinadamente lagunar.

O aquífero mestre do Sistema Aquífero Mesozóico Guarani é a Formação Botucatu, de origem eólica, com grande persistência lateral e vertical, fazendo parte do topo do Sistema, figura 9, Scherer et. al., in : Holz e De Ros (2000).

A Oeste, na altura de Livramento, o Sistema Aquífero Mesozóico Guarani é formado, na base pelas formações de origem fluvial Sanga do Cabral e Guará, ocorrendo no topo a Formação de procedência eólica Botucatu.

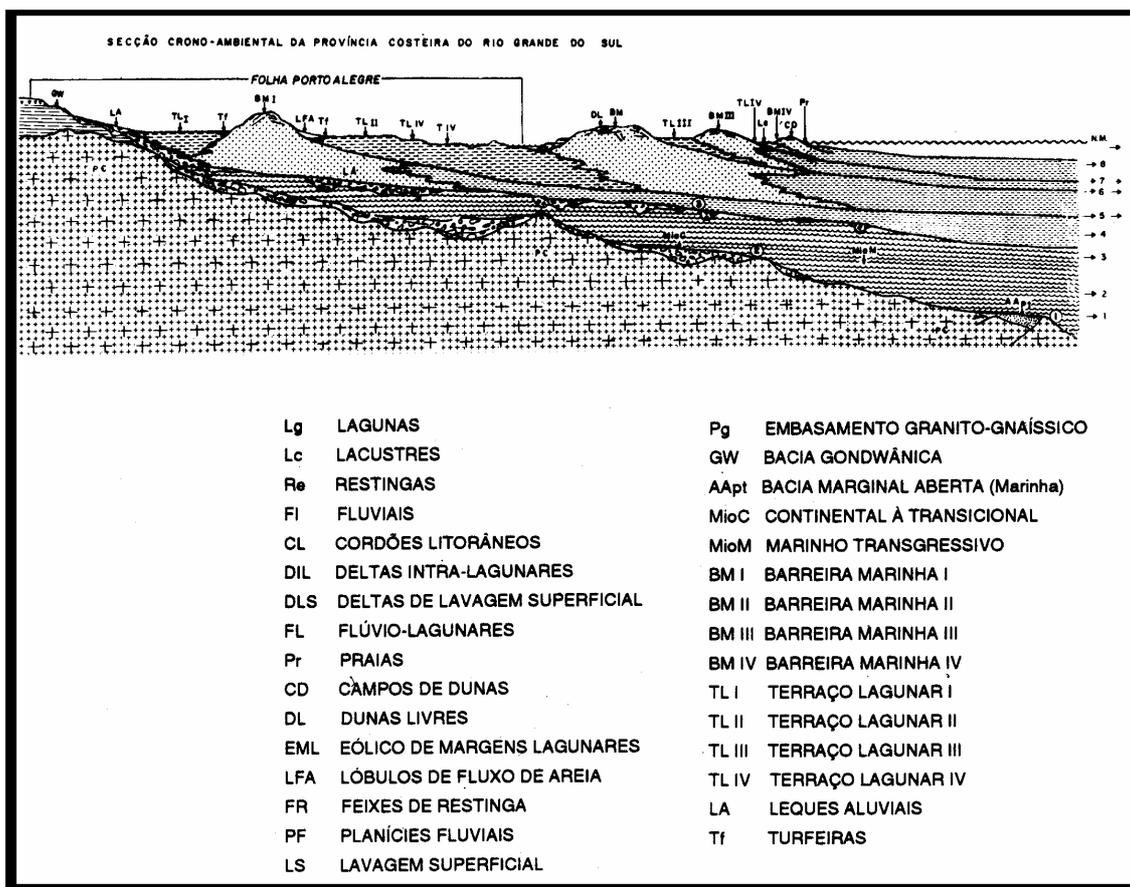


Figura 8 - Diversidade de variações e verticais de fácies do Sistema Aquífero Cenozóico Planície Costeira. Modificado de Windler (1997)

No centro do Estado, na altura de Santa Maria, o Sistema Aquífero Mesozóico apresenta na base a Formação Sanga do Cabral, como pacotes intermediários as formações Santa Maria e Caturrita de origem fluvial - lagunar e no topo a Formação Botucatu.

A Leste, na altura de Taquara o Sistema aquífero é composto na base pela Formação Sanga do Cabral e no topo pela Formação Botucatu.

Sistema Aquífero Neopaleozóico Rio Bonito

As variações laterais e verticais de fácies e estratificação do Sistema Aquífero Paleozóico Rio Bonito foram controladas por lenta e persistente subida do nível do mar, pontuada por três quedas, materializadas pela ocorrência de arenitos fluviais. Uma queda do nível do mar instalou um regime fluvio deltaico que evoluiu para um sistema laguna - barreira, com a retomada do movimento transgressivo do nível do mar. Rebaixamentos localizados geraram fácies de supramaré Holz e Carlucci, in: Holz e De Ros (2000). Os autores referidos apresentam um diagrama generalizado, com a disposição espacial, leste oeste, das associações faciológicas do Eo Permiano onde se inclui o Sistema Aquífero Paleozóico Rio Bonito, figura 10, em que se pode visualizar as variações regionais verticais e laterais do Sistema Aquífero.

Os horizontes mais produtivos se relacionam à fácies fluvial - deltaica.

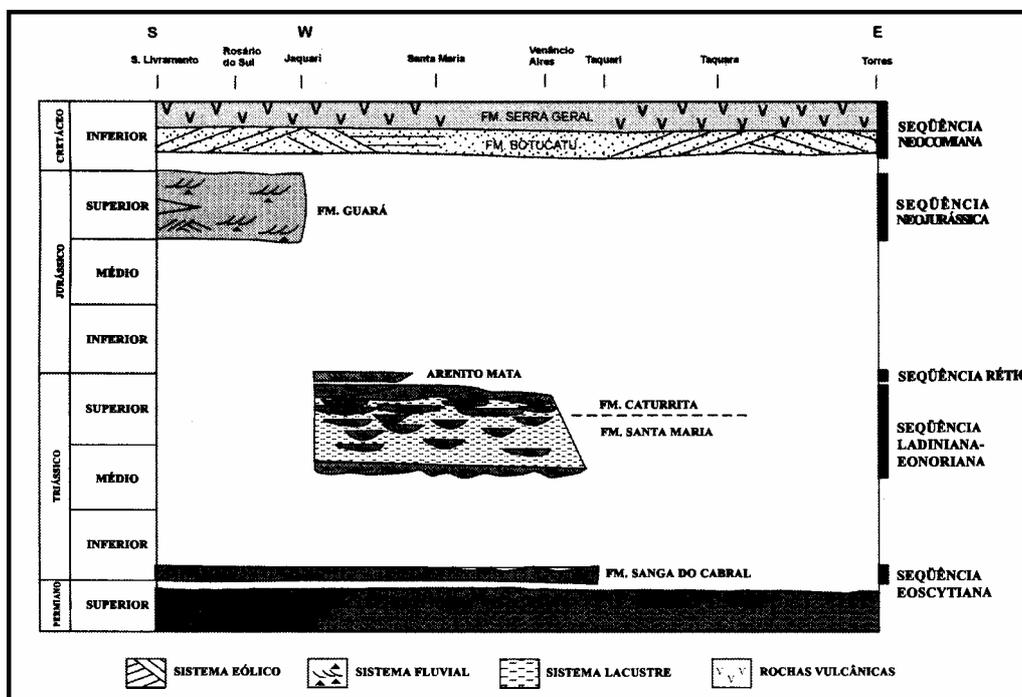


Figura 9 - Variações generalizadas de fácies e estratificação do Sistema aquífero Guarani no Rio Grande do Sul, modificada de Scherer et.al, in: Holz e De Ros. (2000)

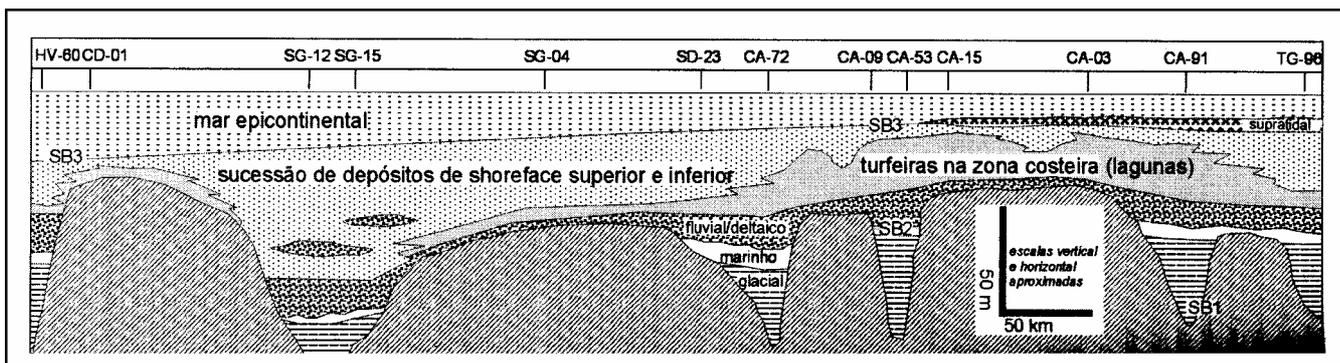


Figura 10 - Variações laterais e verticais de fácies no Sistema Aquífero Rio Bonito, modificado de Holz e Carlluci (2000)

Falhas - fraturas

Com exceção dos Sistemas Aquíferos Cenozóicos, os demais são consistentemente afetados por falhas e outras fraturas.

Especialmente as grandes falhas modificam bastante a distribuição e as posições relativas dos aquíferos, condições de recarga, fluxo, armazenamento e descarga das águas subterrâneas.

De acordo com as características, as falhas podem funcionar como condutos, reservatórios, ou mesmo barragens, das águas subterrâneas.

Nos sistemas aquíferos em rochas cristalinas impermeáveis, as falhas e fraturas são os principais reservatórios de águas subterrâneas.

O Sistema Aquífero Mesozóico Serra Geral se apresenta bastante compartimentado em blocos por falhas e fraturas, principalmente distensivas, sub verticais, salientando-se três direções principais (N 40⁰ E, N70⁰ E e N60⁰W).

As falhas, principalmente em áreas pouco dissecadas, aparecem com nitidez em imagens de sensoriamento remoto como feições lineares (lineamentos de médio porte com 10 a 100 km de comprimento), constituem os principais reservatórios do Sistema Aquífero Serra Geral.

Nos sistemas aquíferos **Pré Cambrianos Granitóides e Mármore**s predominam falhas compressivas associadas a zonas de cisalhamento impermeáveis, que se expressam na topografia como cristas isoclinais.

Em profundidade formam barreiras que dificultam o fluxo das águas subterrâneas.

Reativações destas falhas podem criar zonas de fraturas distensivas com possibilidades de acumular água. Frequentemente os planos destas fraturas são inclinados, figura 12 (a) , fato que deve ser levado em conta na locação da obra de captação.

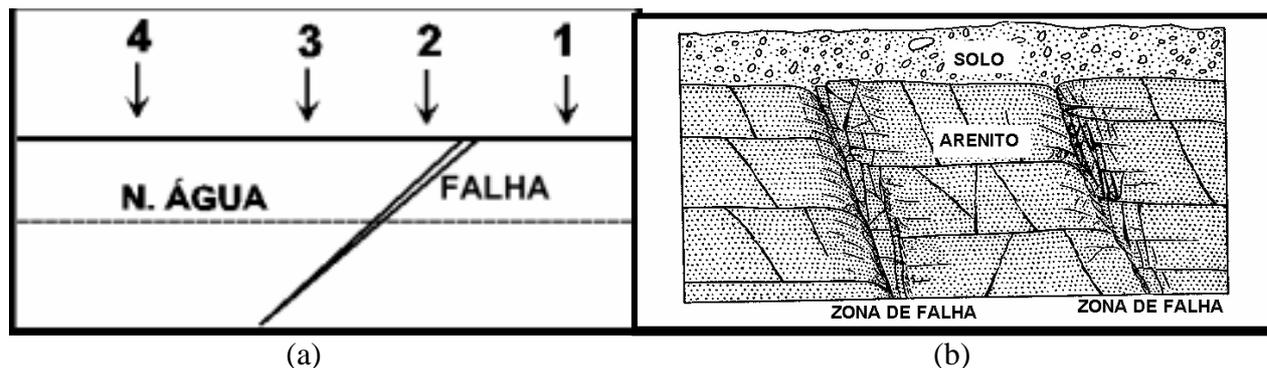


Figura 12 - Em (a) plano de fratura inclinado em (b) aumento da poro – permeabilidade de aquífero poroso na zona de falha.

Nos sistemas aquíferos **Eopaleozóico Guaritas - Santa Bárbara, Neopaleozóico Rio Bonito e Mesozóico Guarani**, falhamentos normais criam diferenças notáveis de regimes de fluxo nos lados opostos das falhas, criando importantes surgências naturais no plano de falha, e nos blocos baixos.

A zona de falha funcionando como grandes condutos para a água, pode se tornar um importante aquífero, constituindo-se nos setores mais produtivos mesmo nos meios porosos, figura 12 (b)

Estas zonas de falha podem estender-se a grandes profundidades, atravessando diversos sistemas aquíferos, são muito efetivas para a ascensão de águas profundas, mineralizadas e, às vezes, termiais.

Dobras

O fluxo das águas subterrâneas é fortemente condicionado por estruturas dobradas nos meios porosos. Em situação de confinamento, estruturas dobradas controlam condições de artesianismo surgente em poços, se convenientemente localados nas estruturas.

A influência de estruturas dobradas nos aquíferos do Rio Grande do Sul é particularmente importante nos sistemas aquíferos em meio poroso, **Sistema Aquífero Mesozóico Guarani, Sistema Aquífero Paleozóico Rio Bonito e Sistema Aquífero Eo Paleozóico Guaritas - Santa Bárbara**. Exemplo concreto desta influência ocorre no Sistema Aquífero Mesozóico Guarani, na fronteira oeste do Estado.

No Planalto de Uruguaiana, o Sistema Aquífero Guarani ocorre em condições de confinamento, tendo como pacote confinante basaltos da Formação Serra Geral, com espessuras que variam de 100 a 300m. Na região, os pacotes de basalto e arenito se estruturam em uma série de suaves domos e bacias estruturais, caso.

No centro das estruturas dômicas o Aquífero Guarani não acumula água, no centro das bacias, o Aquífero é bastante produtivo, provavelmente com poços surgentes. Os flancos de ambas estruturas apresentam o aquífero produtivo, com artesianismo não surgente.

Corpos Intrusivos

Os corpos intrusivos a exemplo das falhas são estruturas que alteram fluxo das águas subterrâneas.

Pela sua ocorrência comum, os diques que são intrusões discordantes em fraturas e os "sills" ou soleiras que são intrusões concordantes, nos estratos sedimentares são os mais importantes para a hidrogeologia.

No Rio Grande do Sul os diques ocorrem aos milhares, em séries, com diversas dimensões, cortando todas as litologias desde as pré Cambrianas até às Mesozóicas. São principalmente diques de riolito cortando as litologias antigas do Escudo Sul - Riograndense e de diabásio que ocorrem também no escudo, mas principalmente nas rochas sedimentares da Bacia do Paraná.

Os diques de riolito são extremamente impermeáveis provavelmente devido à alta viscosidade do magma formador, selando as fraturas onde eles intrudem, estabelecendo verdadeiras barreiras para as águas subterrâneas.

Os diques de diabásio, também podem funcionar como barreiras, mas não são tão impermeáveis como os riolitos e, em determinadas situações, podem funcionar como aquíferos.

As soleiras de diabásio produzem auréolas de recozimento nas rochas sedimentares encaixantes, principalmente nos pelitos que apresentam-se intensamente fraturados no entorno da intrusão, podendo funcionar como aquíferos suspensos, fornecendo consideráveis quantidades de água aos poços.

Estruturas Circulares

Particularmente no Sistema Aquífero Serra Geral foram identificadas estruturas circulares associadas a padrões de fraturas curvilíneas concêntricas, classificadas como estruturas vulcano - tectônicas, geradas por tectonismo associado às peculiaridades do extravasamento dos fluxos vulcânicos, Lisboa et al. (1985),.

Estas estruturas circulares foram comprovadas como armazenadoras de água subterrâneas, especificamente as suas bordas, Takahashi et al. (1993). No Sistema Aquífero Guarani ocorre uma estrutura circular peculiar e única no Rio Grande do Sul, a Estrutura Anelar Sinforme do Jarau classificada por Schuck et. al. (1987), como um provável astroblema.

Nas bordas da estrutura aflora a fácies eólica e no centro a fácies fluvial do Sistema Aquífero Guarani, os pacotes com mergulhos centrípetos . Estas condições litoestruturais condicionam excelente condições aquíferas, especialmente no centro da estrutura.

SISTEMAS AQUÍFEROS: GEOMORFOLOGIA

A geomorfologia é fator de primeira ordem no modo de ocorrência geológico das águas subterrâneas. Influi no zoneamento da pluviometria, na distribuição das áreas de recarga, circulação e descarga dos aquíferos. Praticamente todos os sistemas aquíferos do Estado sofrem a influência da variabilidade das formas do relevo.

A classificação dos domínios morfoestruturais e geomorfologia estrutural de Justus et. al. (1986) in: RADAMBRASIL, figura.19 é básica para demonstrar esta influência.

O texto a seguir refere-se à esta figura que ilustra a relação da geomorfologia com os sistemas aquíferos do estado do Rio Grande do Sul aparecem ali localizadas.

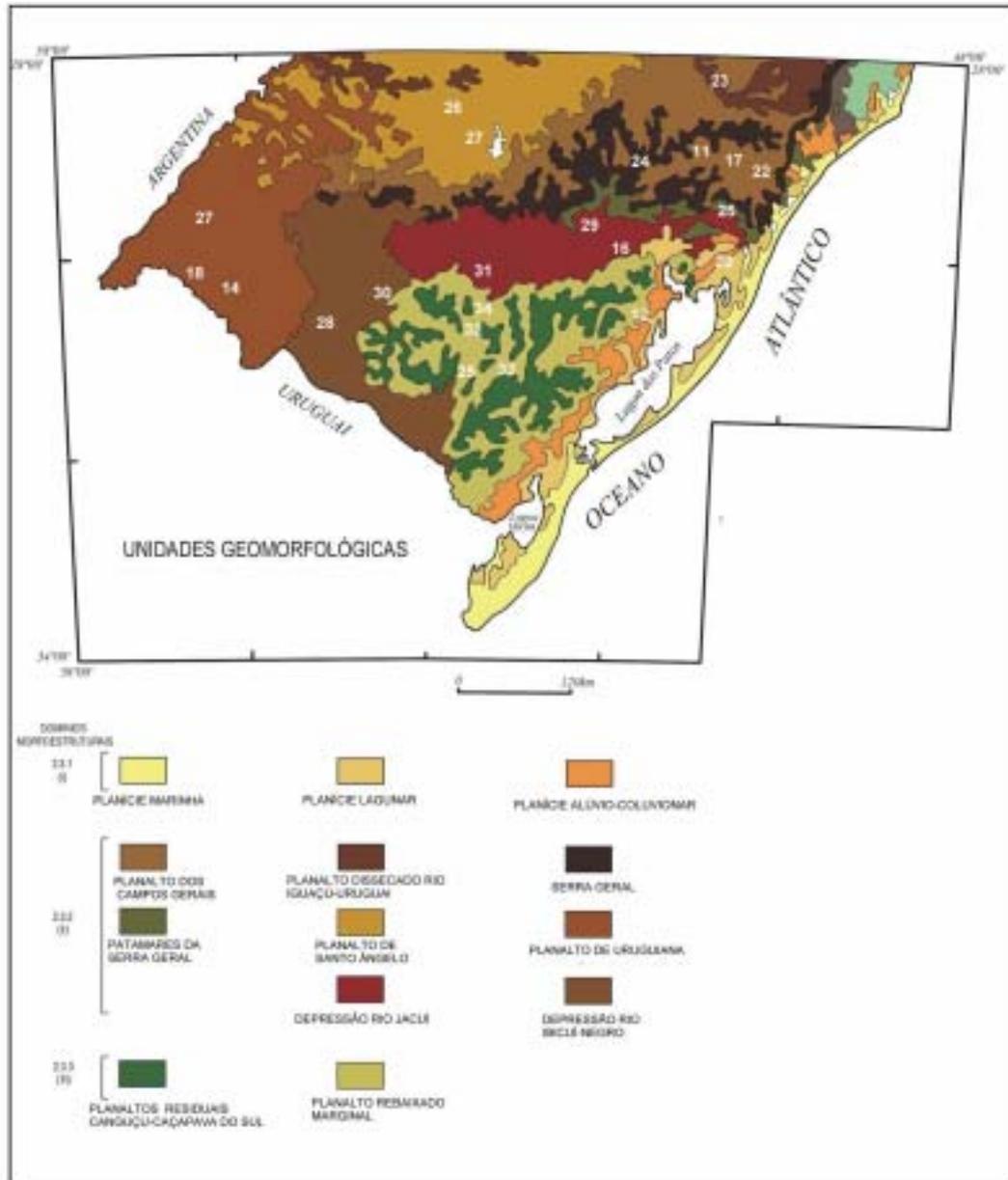


Figura 19 - Domínios morfoestruturais e unidades geomorfológicas do Rio Grande do Sul, modificado de Justus et. al. in:IBGE (1986).

Sistemas Aquíferos Cenozóicos

Sistema Aquífero Cenozóico Planície Costeira - Este sistema situa-se no domínio morfoestrutural dos Depósitos Sedimentares, subdivide-se em duas regiões geomorfológicas, Planície Costeira Interna, Planície Costeira Externa, que se desdobram nas unidades geomorfológicas Planície Marinha, Planície Lagunar e Planície Alúvio - Coluvionar.

De modo geral, a **Planície Aluvio - Coluvionar** funciona como área de recarga e as **planícies Marinha e Lagunar** como áreas de armazenamento semi confinado no Sistema Aquífero Cenozóico Planície Costeira.

Sistema Aquífero Cenozóico Tupaciretã -Este sistema situa-se no domínio morfoestrutural Bacias e Coberturas Sedimentares, região geomorfológica Planalto das Missões, unidade geomorfológica Planalto de Santo Ângelo.

Por sua posição topográfica, no topo do **Planalto de Santo Ângelo**, o Sistema Aquífero Cenozóico Tupaciretã é um aquífero livre, área de recarga do Sistema Aquífero Serra Geral nesta unidade geomorfológica. Esta particularidade geomorfológica é um fator diferencial que configura o Planalto de Santo Ângelo como o setor de maior potencial do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul.

Sistemas Aquíferos Mesozóicos

Sistema Aquífero Serra Geral -O Sistema Aquífero Serra Geral ocorre no Domínio Morfoestrutural das Bacias e Coberturas Sedimentares, em regiões geomorfológicas variadas, tais como Planalto das Araucárias, Planalto das Missões, Planalto da Campanha, desdobradas nas unidades geomorfológicas Planalto dos Campos Gerais, Planalto Dissecado dos Rios Iguassú - Uruguai, Serra Geral, Patamares da Serra Geral, Planalto de Santo Ângelo e Planalto de Uruguiana.

Por esta ampla diferenciação geomorfológica, o Sistema Aquífero Serra Geral é de todos, o que apresenta a mais evidente influência da geomorfologia na ocorrência das águas subterrâneas, com modelados esculturais variados de dissecação do relevo, que determinam sub - sistemas bem distintos.

Na **Unidade Geomorfológica Planalto dos Campos Gerais**, predominam vulcanitos ácidos aplainados. O relevo aplainado favorece a recarga do Sistema Aquífero Serra Geral nos lineamentos de pequeno e médio porte. Associadas às áreas de recarga ocorre padrão de drenagem lagunado com abundância de banhados correspondentes a exudações freáticas.

O relevo do Planalto dos Campos Gerais favorece altas taxas de precipitação nesta área de ocorrência do Sistema Aquífero Serra Geral, também um fator positivo para a recarga do Aquífero neste setor. O Sistema Aquífero Serra Geral, nesta unidade, apresenta razoável potencial aquífero para obras de captação estabelecidas em lineamentos.

Na **Unidade Geomorfológica Planalto Dissecado do Rio Uruguai**, predominam vulcanitos básicos densamente dissecados. O relevo densamente dissecado favorece a descarga do Sistema Aquífero Serra Geral junto às escarpas, onde ocorrem inúmeras surgências. Devido principalmente a este fato geomorfológico.

Esta condição geomorfológica do Sistema Aquífero Serra Geral, nesta unidade, lhe confere geralmente baixo potencial aquífero.

Na **Unidade Geomorfológica Serra Geral** ocorrem vulcanitos ácidos e básicos dissecados. O relevo dissecado favorece a descarga junto às escarpas, onde ocorrem muitas surgências. Neste caso também, a condição geomorfológica do Sistema Aquífero Serra Geral lhe atribui baixo potencial aquífero

Os **Patamares da Serra Geral** são testemunhos do recuo da escarpa da Serra Geral ao longo do Cenozóico e coincidem com os primeiros afloramentos da Formação Botucatu, eventualmente com restos de vulcanitos no topo dos morros testemunhos. Ocorrem principalmente no setor leste da escarpa, a partir da foz do sistema fluvial Taquari - Antas e correspondem à uma zona de transição entre a parte confinada e livre do Sistema Aquífero Guarani.

Na **Unidade Geomorfológica Planalto de Santo Ângelo** afloram vulcanitos básicos com relevo ondulado medianamente dissecado e amplas coberturas de regolito que podem ser alteritos argilosos provenientes do intemperismo dos vulcanitos, e ou coberturas arenosas da Formação Tupaciretã. Estas condições geomorfológicas favorecem a recarga através do regolito que alimenta o meio fraturado em profundidade. Por estas condições geomorfológicas, a Unidade Planalto de Santo Ângelo é o setor do Sistema Aquífero Serra Geral, no Rio Grande do Sul, com maior potencial aquífero.

Na **Unidade Geomorfológica Planalto de Uruguaiana** ocorrem vulcanitos básicos com elevado grau de aplainamento e modestas espessuras de regolito. Esta condição geomorfológica - pedológica associada a relativamente baixas taxas de precipitação, se comparadas a outros setores do Planalto Meridional, favorece recarga relativamente modesta ao longo dos sistemas de fraturas. Neste setor o Sistema Aquífero Serra Geral pode apresentar razoável potencial aquífero ao longo dos lineamentos que aparecem em imagens de sensoriamento remoto..

Sistema Aquífero Guarani. O Sistema Aquífero Guarani ocorre no Domínio Morfoestrutural Bacias e Coberturas Sedimentares, como aquífero confinado ou livre. Sua parte confinada situa-se nas regiões geomorfológicas Planalto das Araucárias, Planalto das Missões e Planalto da Campanha e unidades geomorfológicas Planalto dos Campos Gerais, Planalto Dissecado do Rio Uruguai, Serra Geral, Planalto de Santo Ângelo e Planalto de Uruguaiana.

Na parte confinada, a exploração do Sistema Aquífero Guarani está principalmente condicionada pela espessura do pacote confinante de vulcanitos, pela posição do topo do aquífero e pelo grau de dissecação do relevo. A unidade geomorfológica mais propícia para a sua exploração, como fonte de água potável, é o **Planalto de Uruguaiana**, onde a espessura dos vulcanitos raramente é superior aos 200m.

No **Planalto de Santo Ângelo**, espessuras de vulcanitos entre 800 e 1000m e o baixo grau de dissecação do relevo tornam atualmente inviável a exploração do Sistema Aquífero Guarani.

No **Planalto dos Campos Gerais**, onde as espessuras dos vulcanitos estão entre 600 e 800m, atualmente está se iniciando as primeiras tentativas de aproveitamento do Aquífero Guarani confinado, em Caxias do Sul.

No **Planalto Dissecado do Rio Uruguai**, embora as altas espessuras das vulcânicas, em torno de 800m, o elevado grau de dissecação do relevo, nas calhas das drenagens de maior porte, viabiliza cotas relativamente baixas, em torno de 400m que possibilitam a exploração de águas termais surgentes, caso de Marcelino Ramos e Iraí.

Na **Unidade Geomorfológica Serra Geral**, na bacia do rio das Antas ocorrem condições semelhantes ao Planalto Dissecado do Rio Uruguai, onde águas termais do Guarani também começam a ser aproveitadas no município de Nova Prata.

A parte livre do Sistema Aquífero Guarani, no Rio Grande do Sul, situa-se principalmente na Região Geomorfológica Depressão Central Gaúcha, unidades geomorfológicas Depressão Rio Ibicuí - Negro e Depressão Rio Jacuí.

Parte da **Unidade Geomorfológica Depressão Rio Ibicuí - Negro** corresponde ao reverso da "Cuesta do Haedo no setor aflorante do Aquífero Guarani. É a principal área de recarga do Sistema, confinado, no Planalto de Uruguai e, ao mesmo tempo, uma das maiores áreas de afloramento do Sistema Mesozóico em toda a Bacia do Paraná, com largura de aproximadamente 160 km na direção do eixo do Arco de Rio Grande. O Aquífero apresenta alto potencial aquífero nos arenitos eólicos e médio a baixo nos arenitos de origem fluvial. É intensamente explorado nesta unidade geomorfológica

A **Unidade Geomorfológica Depressão do Rio Jacuí** apresenta dois segmentos morfológicos distintos. A oeste, de Santa Maria a Estrela, apresenta relevo suave - ondulado, mantido principalmente por arenitos das fácies fluviais do Sistema Aquífero Guarani que neste setor apresenta baixo potencial aquífero.

A leste, de Estrela a Santo Antônio da Patrulha, o relevo suave - ondulado é pontuado por "inselbergues" em forma de mesas ou "cuestas" sustentadas pela fácies eólica da Formação Botucatu que junto às escarpas da Serra Geral transiciona para a Unidade Geomorfológica Patamares da Serra Geral, onde o topo do relevo é sustentado por vulcanitos. No setor leste da Depressão do Rio Jacuí, o potencial aquífero do Guarani é médio, nos relevos da fácies eólica, e baixo nos relevos suave - ondulosos das fácies fluviais.

Sistemas Aquíferos Neopaleozóicos

Sistema Aquífero Rio Bonito - Ocorre no Domínio Morfoestrutural das Bacias e Coberturas Sedimentares, Região Geomorfológica Depressão Central Gaúcha, unidades geomorfológicas Depressão Rios Ibicuí - Negro, e Rio Jacuí. A parte livre do Sistema Aquífero Neopaleozóico Rio Bonito baliza o limite entre os domínios morfoestruturais Embasamentos em Estilos Complexos e Bacias e Coberturas Sedimentares. Contorna a borda do Escudo Sul - Riograndense em um grande semi -arco, a partir da coxilha Pedras Altas a Sudoeste, até à calha do Arroio dos Ratos a nordeste. Desenvolve um modelado escultural predominantemente tabular com macroformas do relevo tipo Mesa e "Cuesta", estas principalmente com o reverso mergulhando no sentido contrário ao relevo do Escudo, no estilo das cuestas de "front" interno que configuram estruturas dômicas.

Na **Depressão Rios Ibicuí – Negro** ocorrem duas importantes áreas de recarga do Sistema Aquífero Neopaleozóico Rio Bonito que nesta unidade geomorfológica são as áreas de maior potencial aquífero, tanto na parte livre como na confinada, respectivamente no município de Candiota, Depressão - Rio Negro e no município de São Gabriel, Depressão - Rio Ibicuí.

Na **Depressão – Rio Jacuí** ocorre uma importante área de recarga, nas bacias dos rios Irapuá e Capané, município de Cachoeira do Sul que nesta unidade geomorfológica é a área de maior potencial do Sistema Aquífero Neopaleozóico Rio Bonito tanto na sua parte livre, como confinada.

Sistemas Aquíferos Eopaleozóicos

Sistema Aquífero Guaritas – Santa Bárbara – Ocorre no Domínio Morfoestrutural Embasamento em Estilos Complexos, Região Geomorfológica Planalto Sul – Riograndense, Unidade Geomorfológica Planaltos Residuais Canguçu – Caçapava do Sul.

Por se situar geralmente em áreas altas de divisores de águas e pelo seu elevado grau de litificação, o potencial aquífero do Sistema aquífero Eopaleozóico Guaritas – Santa Bárbara varia de baixo a muito baixo. Em zonas de falha tanto a situação topográfica como as condições de poro - permeabilidade podem se alterar, criando-se áreas favoráveis para o armazenamento de águas subterrâneas.

Sistemas Aquíferos PréCambrianos

Sistema Aquífero Granitóides – Ocorre no Domínio Morfoestrutural Embasamento em Estilos Complexos, Região Geomorfológica Planalto Sul – Riograndense, unidades geomorfológicas Planaltos Residuais Canguçu – Caçapava do Sul e Planalto Rebaixado Marginal.

A **Unidade Geomorfológica Planalto Residual Canguçu – Caçapava do Sul** funciona geralmente como área de recarga do Sistema Aquífero Granitóides alimentando o aquífero na

Unidade Geomorfológica Planalto Rebaixado Marginal, onde encontram-se as melhores ocorrências de águas subterrâneas, associadas a saprólitos espessos e a zonas de falha reativadas por esforços distensivos. O potencial aquífero varia de médio nas zonas fraturadas a muito baixo fora das fraturas.

Sistema Aquífero Mármore – Ocorre no Domínio Morfoestrutural Embasamento em Estilos Complexos, Região Geomorfológica Escudo Sul – Riograndense, **Unidade Geomorfológica Planalto Rebaixado Marginal**.

Apresenta estreita interconexão com o Sistema Aquífero Granitóides. A superfície dos granitóides situados na Unidade geomorfológica Planalto Residual Canguçu – Caçapava do Sul seve como área de recarga do Sistema Aquífero Mármore. Na Unidade Geomorfológica Planalto Rebaixado Marginal, a superfície do Sistema Aquífero Mármore, por sua vez, pode servir como área de recarga livre para o Sistema Aquífero Granitóides.

O Sistema Aquífero Precambriano Mármore, embora de ocorrência restrita, apresenta alto potencial aquífero.

CONCLUSÕES

A descrição do modo de ocorrência geológico das águas subterrâneas de uma região é essencial para subsidiar as demais pesquisas quantitativas. Se não há uma concepção geológica qualitativa consistente, a análise e interpretação de dados quantitativos carece de embasamento e perde em efetividade.

Os materiais formadores dos sistemas aquíferos lhes conferem as principais características do modo de armazenamento das águas subterrâneas.

A estratigrafia, suas discordâncias regionais, variações laterais e verticais de fácies e estratificação, influi na compartimentação dos sistemas aquíferos, bem como na variação das características do fluxo das águas subterrâneas, especificamente nos sistemas aquíferos em meio poroso.

As estruturas, falhas, dobras, corpos intrusivos, estruturas circulares, modificam drasticamente as características de fluxo e armazenamento dos sistemas aquíferos, tanto no meio fraturado, como no meio poroso.

A geomorfologia delimita e compartimenta principalmente as áreas de recarga, confinamento e descarga dos sistemas aquíferos .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hausman, A. (1960). Estudo das possibilidades de água subterrânea do Rio Grande do Sul. Boletim da Sociedade brasileira de Geologia, vol. 1. P. 31 - 41.
- [2] Hausman, A. (1964). Províncias hidrogeológicas do Rio Grande do Sul. I Semana Hidrogeológica Uruguiaia. Montevideu.
- [3] Hausman, A. (1995). Províncias hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul. Acta Geológica Leopoldensia, série mapas, mapa nº 2, p. 1 -127.
- [4] Holz, M., De Ros, L. F., (2000). Geologia do Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Centro de Investigação do Gondwana. 444p.
- [5] Justus, O. J., Machado, M. L. A., Franco, m. S. M. (1986). Geomorfologia. In: Folha SH 22 Porto Alegre e parte das folhas SH 21 Uruguaiiana SH 22 Lagoa Mirim. Rio de Janeiro. IBGE, Levantamento dos Recursos Naturais. Cap. 1, p. 29 - 312.
- [6] Lisboa, N. A., Schuck, M. T. G. O., Eick, N., Carraro, C. C. (1985). Identificação de uma estrutura vulcano tectônica elíptica na Formação Serra Geral, através de imagens Landsat, Radar e Aerofotos. In: Simpósio Sul Brasileiro de Geologia, 2., Florianópolis. Anais. V. 1, p. 131 - 145.
- [7] Meinzer, O. E. (1959). The occurrence of ground water in the United States. Geological Survey Water-Supply Paper, 489. p. 1-321.
- [8] Ramgrab, G., Windler, V., Camozzato, E., (1997). Porto Alegre, Folha SH 22 - Y - B. Programa de levantamentos geológicos básicos. Ministério das minas e Energia. CPRM - Serviço geológico do Brasil. 140p.
- [9] Samberg, R. (1980). Estudo hidrogeológico nas províncias litológicas do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Dissertação de mestrado em hidrologia aplicada, curso de pós graduação em hidrologia aplicada, Universidade federal do rio Grande do Sul. 99 p.
- [10] Schuck, M., Lisboa, N. A.(1987). Identificação de padrões estruturais no Grupo São Bento, Quaraí, Rio Grande do Sul, através de imagens orbitais e sub orbitais. Pesquisas, Porto Alegre, n. 20, p. 5 - 23.
- [11] Schuck, M., Lisboa, N. A. (1988). Caracterização de formas e padrões estruturais no Grupo São Bento da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul em imagens orbitais e sub orbitais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5, Natal. Anais. V. 2, p. 323 - 333.