

EVIDÊNCIAS DA CONECTIVIDADE HIDRÁULICA ENTRE OS SISTEMAS AQUÍFEROS SERRA GERAL E GUARANI NO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL E ASPECTOS AMBIENTAIS CORRELACIONADOS.

Giancarlo Lastoria¹; Didier Gastmans², Hunk Kiang Chang³; Osmar Sinelli⁴; Ian Hutcheon⁵

RESUMO - Relações de fluxo das águas subterrâneas entre as duas unidades hidroestratigráficas da Bacia Sedimentar do Paraná, o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e o Sistema Aquífero Guarani (SAG), são conhecidas a partir de evidências observadas nos estados do Paraná e de São Paulo, face a uma maior disponibilidade de dados e estudos. As mesmas evidências hidroquímicas e hidrodinâmicas podem ser verificadas na região centro-sul do Estado de Mato Grosso do Sul, zona de afloramento dos basaltos, onde ocorre dois domínios hidrodinâmicos distintos, colocando a superfície potenciométrica do SAG ora acima, ora abaixo da superfície potenciométrica do SASG. Algumas amostras de águas subterrâneas de poços no SASG apresentam características semelhantes àquelas das águas do SAG. Estas evidências apontam para implicações ambientais importantes, tanto na manutenção do nível de base dos rios da região, como na própria proteção do SAG subjacente, levando-se em conta a intensa atividade agrícola e a pequena espessura dos derrames basálticos, notadamente na porção sudoeste da área. Ao mesmo tempo, o entendimento desta interação entre os aquíferos, contribui para a elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual do SAG no Estado, definindo zonas de descarga do SAG para o SASG, e zonas de recarga no sentido inverso.

ABSTRACT: The relationships of groundwater flow between two hydrostratigraphic units of the Paraná Basin, the Serra Geral Aquifer System (SGAS) and the Guarani Aquifer System (GAS) are known from much evidence gathered in the states of São Paulo and Paraná, where the number of works on this theme is greater than in other regions. The same hydrochemical and hydrodynamic evidence can be observed in the south-central region of Mato Grosso do Sul State, a zone of basalt outcropping, where two distinct hydrodynamic dominions occur, with the GAS piezometric surface being found either under or above the SGAS piezometric surface. Some groundwater samples from wells drilled in the SGAS had the same characteristics as waters from the GAS. This evidence implies important environmental consequences, as much for maintenance of the base level of the rivers in the region, as for protection of the subjacent GAS, taking into account the existing intensive agricultural activity and the thinness of the basalt, especially in the south-west part of the area. At the same time, the understanding of this interaction between the aquifers is important in the elaboration of a conceptual hydrogeological model for the GAS in the State, defining the discharge zones from the GAS to the SGAS, and from the latter to the former.

Palavras-chave: Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral, conectividade hidráulica, Mato Grosso do Sul.

- (1) Professor Associado da UFMS/CCET/DHT-Campo Grande, MS – Cx. Postal 549 - CEP 79.070-900. E-mail lastoria@nin.ufms.br
- (2) Pesquisador - UNESP – LEBAC - Rio Claro (SP) – CEP: 13506-900. Fone/Fax: (55-19) 3532-5119, email: gastmans@rc.unesp.br
- (3) Professor UNESP – LEBAC - Rio Claro (SP) – CEP: 13506-900. Fone/Fax: (55-19) 3532-5119, email: chang@rc.unesp.br
- (4) Coordenador do Curso de Engenharia Ambiental - Faculdades COC – Ribeirão Preto, email: osmarsineli@coc.com.br
- (5) Professor Department of Geology and Geophysics – University of Calgary (CAN) email: ian@earth.geo.ucalgary.ca

1 - INTRODUÇÃO

Os principais reservatórios de águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Paraná estão relacionados aos seus estratos mesozóicos (Rebouças 1999), e dois dos principais sistemas aquíferos são representados pelos basaltos da Formação Serra Geral, de idade jurássica-cretácea e os arenitos das formações Botucatu/Pirambóia/Tacaurembó/Rosário do Sul/Santa Maria, com idades triássica e jurássica, constituintes, respectivamente, do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e do Sistema Aquífero Guarani (SAG).

O comportamento hidrogeológico dessas duas unidades hidroestratigráficas é distinto, reflexo das diferentes litologias e estruturas de cada estrato. Enquanto o SAG, que representa o principal reservatório de águas subterrâneas da bacia, apresenta fluxo em meio poroso, podendo ser considerado um aquífero regional, relativamente contínuo e homogêneo, o SASG constitui um aquífero de porosidade por fissuras, anisotrópico, com fluxo de água ocorrendo predominantemente em superfícies de descontinuidade horizontal, representadas pelas zonas de topo e base dos derrames, contato interderrames, e/ou verticais, nos planos de disjunção colunar, observados no centro dos derrames (Rebouças & Fraga, 1988). Nas frentes de derrames também pode ocorrer o fluxo vertical (Bagolini, 1963). Em função dessa característica de fluxo, restrito a zonas específicas dentro do pacote rochoso, as incertezas quanto à prospecção de águas subterrâneas dentro do SASG são grandes.

Outra diferença fundamental diz respeito aos graus de confinamento, enquanto o SASG apresenta-se geralmente com características de aquífero livre e/ou semiconfinado, em função da existência de conexões verticais entre os diversos níveis horizontalizados, o SAG, encontra-se em sua maior parte sob condições de confinamento, justamente sob as rochas basálticas do SASG. O posicionamento estratigráfico das unidades, que acaba refletindo no grau de confinamento ao qual o SAG é submetido, presume a possibilidade de transferência vertical de água subterrânea entre essas duas unidades, tanto em regiões onde o grau de confinamento do SAG é menor, quanto nas proximidades do eixo central da Bacia Sedimentar do Paraná, onde o confinamento é maior.

Essa transferência de águas subterrâneas estaria inclusa em um contexto maior de circulação de águas subterrâneas entre as unidades hidroestratigráficas da Bacia sedimentar do Paraná. Entretanto esta questão, ainda bastante controversa, tem sido tema de alguns estudos (Meng & Maynard 2001; Bonotto 2005), sem que conclusões definitivas sejam apresentadas.

A necessidade de elaboração de modelos hidrogeológicos conceituais e de simulações numéricas, como ferramenta de gestão de aquíferos e, principalmente, neste momento onde o Sistema Aquífero Guarani é objeto de interesse da comunidade técnico-científica, e dos órgãos gestores de recursos hídricos nos países onde ele ocorre, torna necessária a apresentação de evidências das relações de fluxo, entre as águas contidas nos basaltos do SASG e nos arenitos do SAG, possibilitando o mapeamento das zonas de recarga e de descarga do SAG, bem como a compreensão desses mecanismos.

No Estado de Mato Grosso do Sul, numerosas evidências, potenciométricas e hidroquímicas, indicam a existência da relação de fluxo vertical entre os dois sistemas aquíferos e, com o objetivo de contribuir à discussão desse tema, relevante à questão da gestão das águas subterrâneas no âmbito da Bacia Sedimentar do Paraná, essas evidências serão apresentadas e discutidas, enfocando importantes aspectos ambientais associados à essa conectividade hidráulica..

2 - RELAÇÕES DE FLUXO ENTRE O SASG E O SAG NA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ

Evidências da existência de fluxo vertical de águas subterrâneas entre os sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani, têm sido apontadas por diversos autores, e a primeira referência a esta questão é apresentada pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, que, para a região de Ribeirão Preto, já aventava a ocorrência de trocas de águas entre os dois sistemas aquíferos em volumes maiores que o fluxo subterrâneo regional de descarga, estimando-o na ordem de dezenas a centenas de milhões de metros cúbicos ao ano (DAEE, 1974).

Para a região sudoeste do Estado de São Paulo, o funcionamento hidráulico, esquematizado na Figura 01, prevê que nas regiões onde a carga piezométrica do SAG encontra-se acima dos níveis piezométricos dos sistemas aquíferos sotopostos (SASG e Sistema Aquífero Bauru), ocorrem condições favoráveis à existência de fluxo vertical ascendente (DAEE, 1979)

O estudo sugere que, apesar da existência de espesso pacote de derrames basálticos, a ocorrência de fluxo por meio de descontinuidades verticais é possível (fluxo intenso), não sendo, a princípio, possível nem a quantificação nem a comprovação deste fluxo. Sob condições de superfícies piezométricas invertidas, ou seja, o nível potenciométrico do SASG é superior à superfície do SAG, foi presumida a existência de fluxo vertical descendente (DAEE, 1979).

Além de evidências de conexão hidráulica em função da superfície potenciométrica das unidades aquíferas, a análise da evolução hidroquímica regional das águas do SAG no Estado de São Paulo, indica a existência de recarga através dos basaltos intensamente fraturados da Formação Serra Geral, ao longo de uma faixa de cerca de 60 km de largura, a partir do contato dos sedimentos das formações Botucatu/Pirambóia com os basaltos (Silva, 1983).

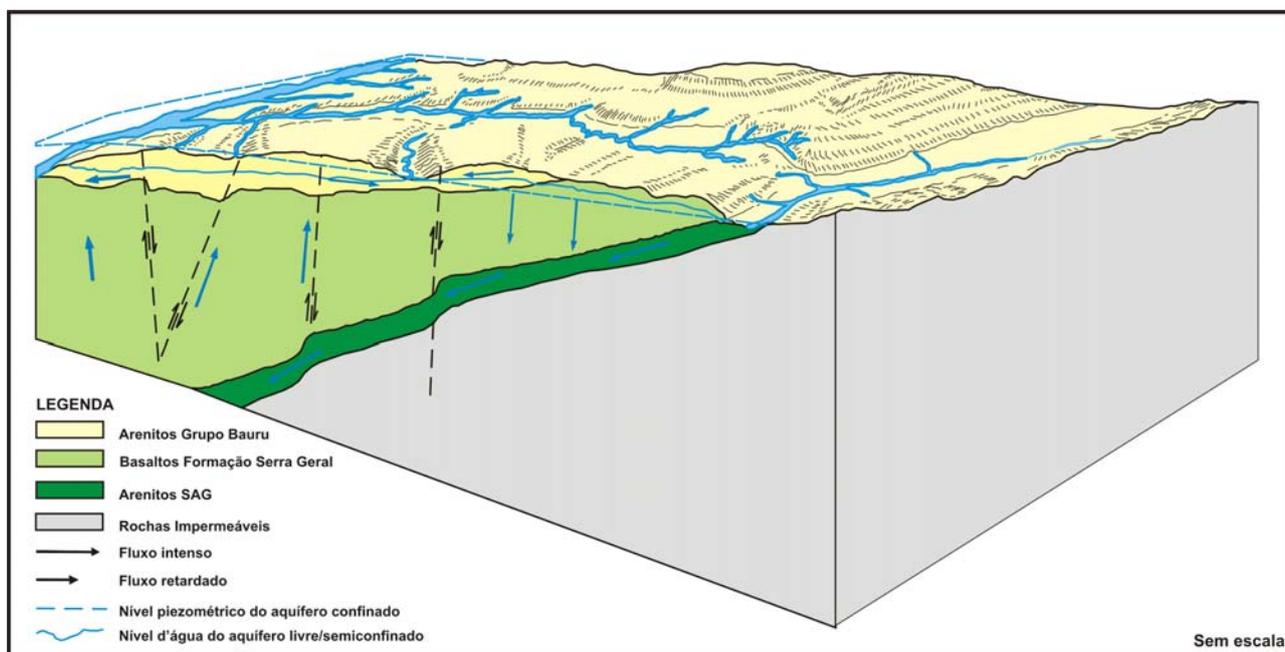


Figura 01. Modelo hidrogeológico conceitual de fluxo das águas subterrâneas na borda leste da Bacia do Paraná (Modificado de DAEE, 1979).

Gallo & Sinelli (1980) estudando a recarga do SAG a partir de águas percoladas através do SASG, na região de Ribeirão Preto, observaram que a composição química e isotópica das águas subterrâneas do SAG, sob condições de semiconfinamento, é devida principalmente a lixiviação dos minerais constituintes do solo, que são em sua maioria provenientes da alteração de basaltos, e que o bicarbonato presente nas águas nestas regiões provêm essencialmente do CO₂ contido na zona de aeração do solo, e que, sob condições de aumento do confinamento, o bicarbonato passa a ter origem principalmente na dissolução dos carbonatos presentes como cimento nas rochas areníticas constituintes do SAG.

Indicações da ocorrência de fluxo ascendente de águas do SAG em direção ao SASG também foram observadas no Estado do Paraná, sendo apresentada como principal evidência dessa influência, a ocorrência de águas provenientes de fontes e poços relacionados ao SASG, com concentrações elevadas de sódio, pH's alcalinos e, em alguns casos, temperaturas mais elevadas (Rosa Filho *et al.*, 1987).

A ocorrência de diversas fontes, em rochas basálticas da Formação Serra Geral no Estado do Paraná, com águas geoquimicamente semelhantes às águas subterrâneas contidas no SAG, foi demonstrada através de estudos de equilíbrio termodinâmico e caracterização hidroquímica (Bittencourt, 1996). Segundo esse autor, as águas dessas fontes apresentam quimismo distinto daquele característico de águas contidas no reservatório basáltico, com composição bicarbonatada cálcica, enquanto as águas em questão, apresentam composição sulfatada ou cloretada sódica, refletindo fácies hidroquímicas de águas contidas em rochas depositadas sob condições desérticas, com pH, concentrações de sulfato e sódio relativamente elevados, eminentemente relacionados aos sedimentos das formações Botucatu e Pirambóia, constituintes do SAG, diluídas por águas circulantes afins às rochas basálticas.

Os mecanismos que propiciaram a ascensão das águas subterrâneas armazenadas no SAG para o SASG estariam relacionadas à presença de condições hidráulicas favoráveis associadas a descontinuidades geológicas regionais, conforme observado por Bittencourt *et al.* (2003) na Bacia Hidrográfica do Rio Piquiri, no Estado do Paraná, resultando numa contaminação natural do SASG.

Além da contribuição do SAG na contaminação das águas contidas no SASG, outro tipo de relação de fluxo aventada por Meng & Maynard (2001) e Bonotto (2005) para as unidades hidroestratigráficas da Bacia Sedimentar do Paraná, diz respeito à ocorrência, na zona de maior confinamento do SAG, de águas com altas concentrações de sódio, associadas a teores elevados de cloreto, sulfato e fluoreto, que teriam origem na contaminação das águas do SAG, por águas provenientes das unidades estratigráficas posicionadas abaixo da Formação Pirambóia, constituinte basal do aquífero na região sudeste.

3 - CONTEXTO HIDROGELÓGICO DO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL

O quadro hidrogeológico da porção oriental do Estado de Mato Grosso do Sul, é constituído por três unidades hidroestratigráficas da Bacia Sedimentar do Paraná, os Sistemas Aquíferos Guarani, Serra Geral e Bauru, este último englobando as formações Caiuá, e Santo Anastácio, e que afloram, respectivamente, como uma faixa contínua cortando o estado em direção NS, na porção centro sul do estado e em toda a faixa leste de Mato Grosso do Sul (Figura 02).

Essas três unidades hidroestratigráficas representam os principais mananciais de águas subterrâneas para o estado, respondendo por cerca de 90% dos poços operados para abastecimento público (SANESUL/TAHAL, 1998).

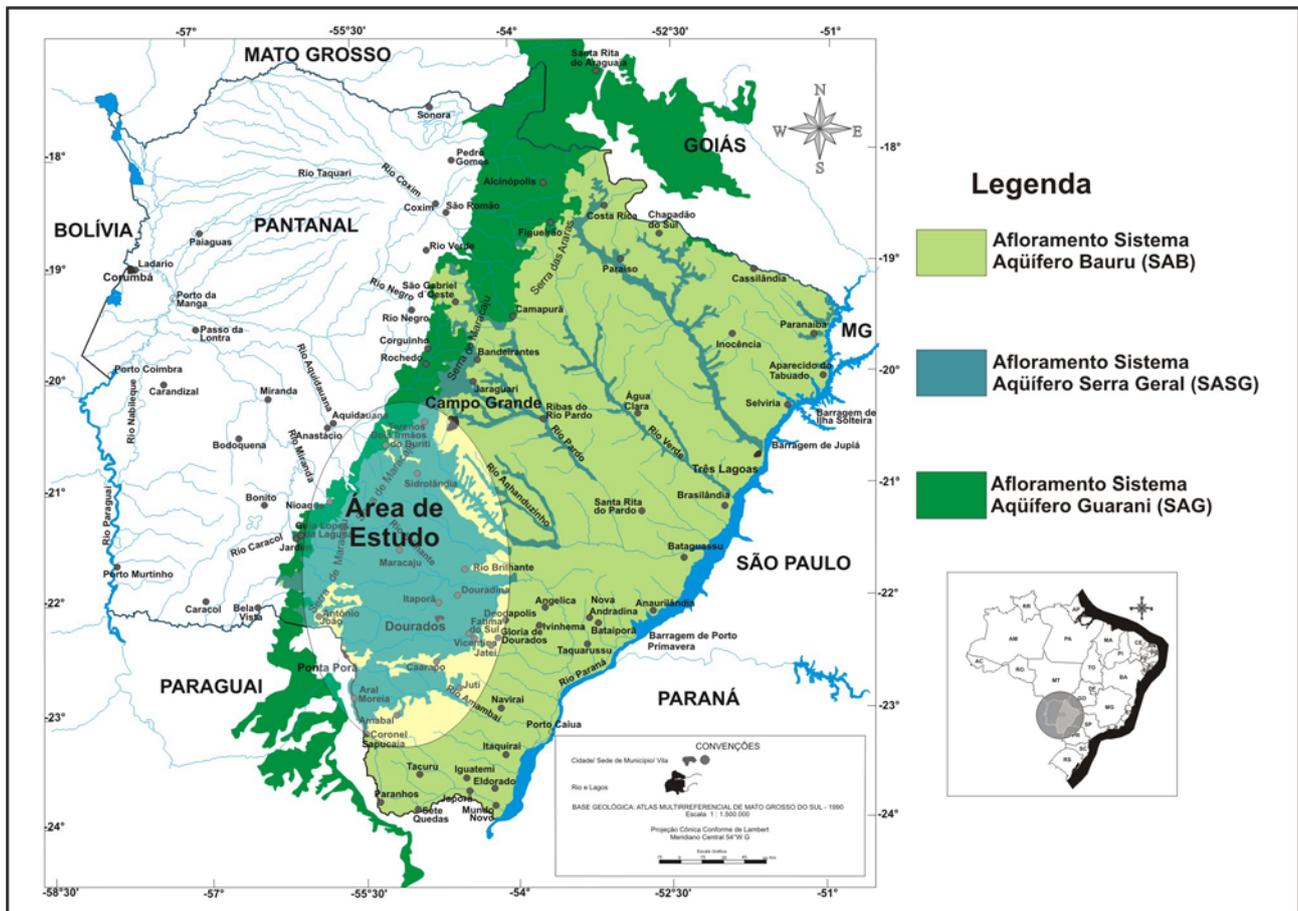


Figura 02. Mapa de localização da área de estudo e distribuição dos principais sistemas aquíferos no Estado de Mato Grosso do Sul..

3.1. - Sistema Aquífero Serra Geral (SASG)

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), ocupa uma área aproximada de 178.000 km², aflorando em cerca de 40.000 km², na porção centro sul do Estado de Mato Grosso do Sul (Figura 02), sendo sobreposto pelos sedimentos constituintes do Grupo Bauru, na porção leste do estado.

Em sua área de ocorrência concentra-se 61% da população do estado, que tem se utilizado de suas águas para o abastecimento público e o atendimento da crescente demanda para a expansão agroindustrial (Lastoria, 2002; Lastoria *et al.*, submetido). Em sua área de afloramento, a espessura observada para os derrames basálticos é de 50m na cidade de Amambaí, 200m em Maracajú, 400m em Dourados, 100 a 300m em Campo Grande e 450m em Ponta Porã. As maiores espessuras para os derrames basálticos no estado foram encontradas em poço perfurado na cidade de Três Lagoas

(709m), e no Estado de São Paulo, próximo à divisa com Mato Grosso do Sul, no município de Presidente Epitácio (1532m) (SANESUL/TAHAL, 1998; Lastoria, 2002; Lastoria *et al.* submetido).

Pode-se afirmar que o SASG apresenta comportamento hidráulico diferenciado. Quando se analisa pontualmente este comportamento na porção aflorante, o aquífero apresenta comportamento semiconfinado a confinado, conforme modelo hidrogeológico proposto por Lastoria (2002), entretanto, regionalmente pode ser considerado como aquífero livre.

O fluxo das águas subterrâneas em seu interior, parte das porções nordeste e sudoeste do estado, respectivamente Campo Grande e Ponta Porã, próximo à divisa com o Paraguai, em direção, respectivamente, para sudeste e noroeste até a região de Dourados, onde apresenta direção sudeste, para a calha do Rio Paraná. Lastoria (2002) e Lastoria *et al.* (submetido) atribuem este comportamento a um condicionamento tectônico devido ao Graben de Rio Brilhante (Figura 03).

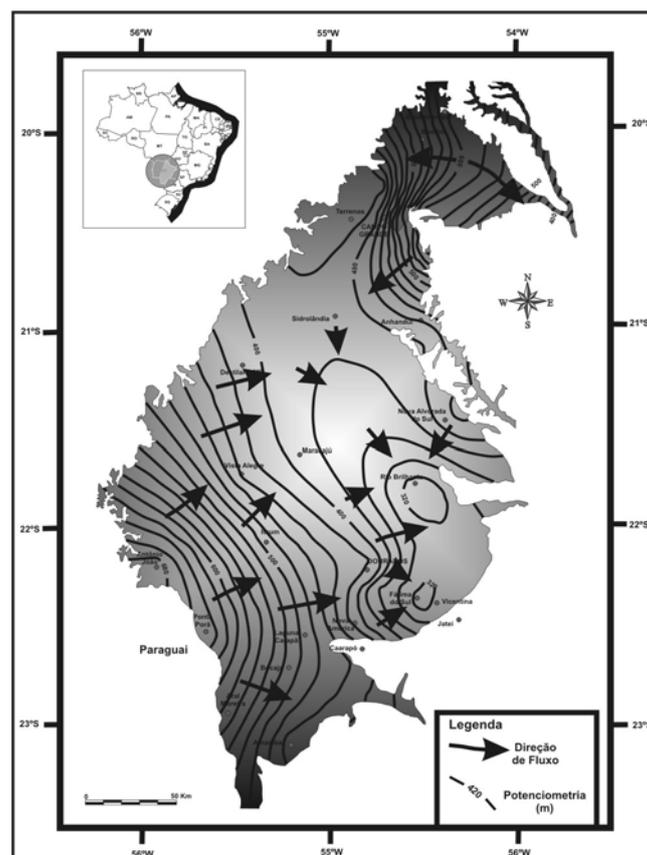


Figura 03. Mapa potenciométrico do SASG na zona de afloramento da Formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul (Modificado de Lastoria, 2002).

A classificação hidroquímicas das águas do SASG indica a predominância de águas bicarbonatadas cálcicas ou calco-magnesianas, entretanto em algumas localidades, como Fátima do Sul e Rio Brilhante, termos bicarbonatados calco-sódicos são observados, pressupondo uma contribuição do SAG sotoposto (Lastoria, 2002; Lastoria *et al.*, submetido).

3.2. - Sistema Aquífero Guarani (SAG)

No Estado de Mato Grosso do Sul, o SAG ocupa uma área de aproximadamente 213.000 km², dos quais 36.000 km² correspondem às áreas de afloramento das formações Botucatu e Pirambóia, que formam uma faixa contínua de direção NNS, com largura aproximada de 100 km, bordejando o Pantanal Mato-Grossense (Figura 02). A partir dessa faixa as formações constituintes do SAG mergulham para leste em direção a calha do Rio Paraná sob as rochas basálticas da Formação Serra Geral (SANESUL/TAHAL, 1998; Gastmans & Chang, 2005).

Atualmente o SAG é responsável pelo abastecimento de aproximadamente 25% da população do estado, com uma centena de poços tubulares perfurados no aquífero, que captam volume estimado em 47.000.000 m³/ano (Chang, 2000), apresentando poços não jorrantes com vazões de até 320 m³/h, e médias de 40 m³/h (SANESUL/TAHAL, 1998). Na cidade de Cassilândia, existem poços jorrantes, um deles com vazão de 400 m³/h.

As condições de fluxo das águas subterrâneas do SAG em Mato Grosso do Sul, apresentam algumas peculiaridades, quando comparadas àquelas observadas na borda leste da Bacia Sedimentar do Paraná, onde o fluxo está direcionado a partir das áreas de afloramento em direção a oeste, para o Rio Paraná (Gastmans & Chang, 2005).

A Figura 04 apresenta a configuração da potenciometria para o SAG no Estado de Mato Grosso do Sul, indicando a existência de três áreas principais de recarga, com fluxo radial a partir delas, em direção ao centro da Bacia Sedimentar do Paraná e para as áreas de afloramento das formações Botucatu/Pirambóia. Esta configuração condiciona a existência de um divisor de águas com traçado aproximadamente paralelo ao divisor de águas superficiais, entre as bacias hidrográficas dos rios Paraná e Paraguai (Gastmans & Chang, 2005). Esses autores mostram que as águas do SAG em sua zona de afloramento são predominantemente bicarbonatadas cálcicas, enquanto que sob condições de confinamento passam para fácies bicarbonatadas sódicas, e que poços onde existe a captação de água nos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral, apresentam uma tendência a concentrações maiores de magnésio, conferindo a estas águas composição

bicarbonatada calco-magnésiana, o que indicaria, uma contribuição das rochas basálticas na sua composição final.

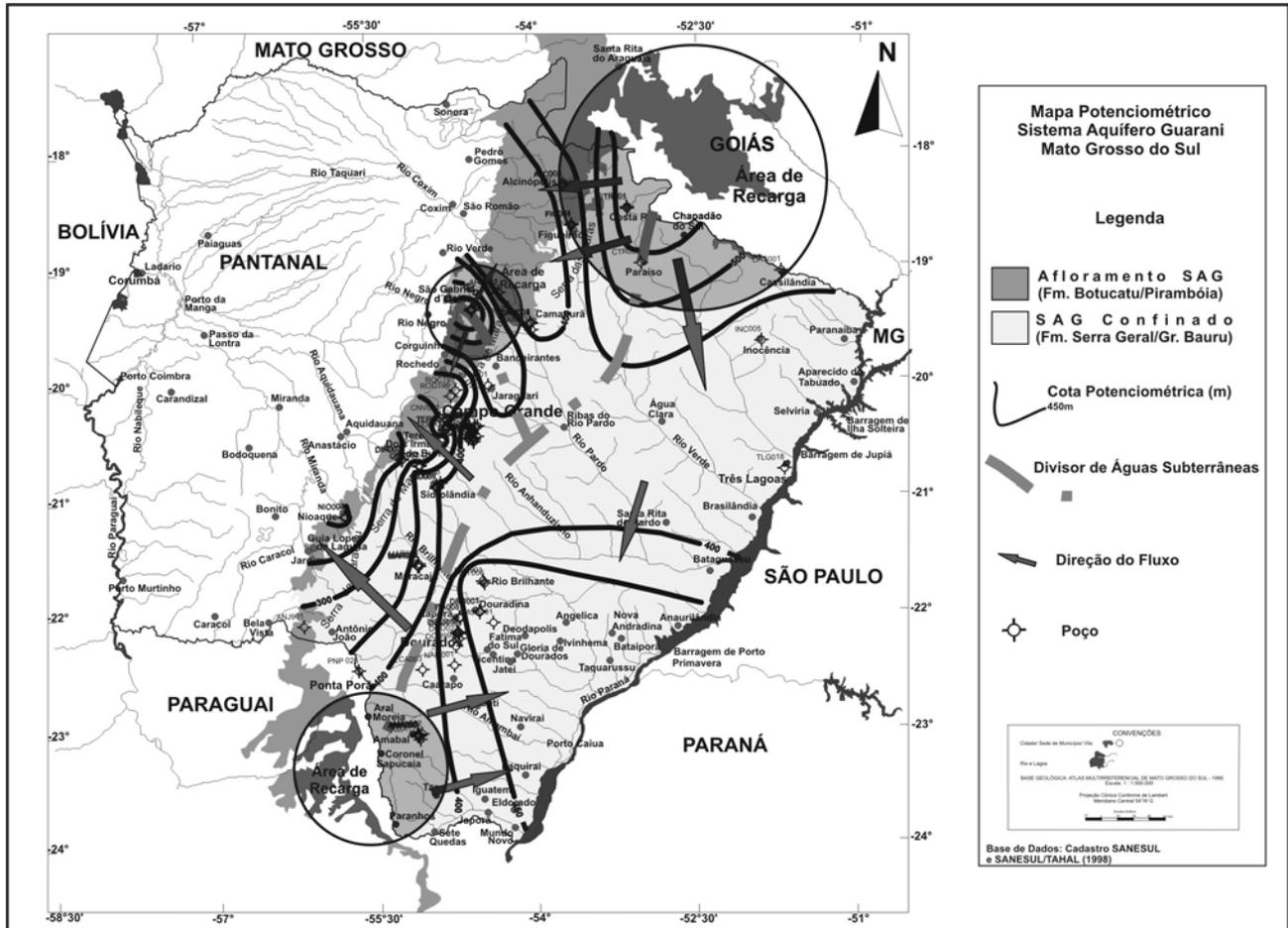


Figura 04. Mapa potenciométrico do SAG em Mato Grosso do Sul (Modificado de Gastmans & Chang, 2005)

4 - EVIDÊNCIAS DO FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS ENTRE O SAG E O SASG EM MATO GROSSO DO SUL

A elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual para uma unidade hidroestratigráfica qualquer, deve também levar em consideração o comportamento hidrogeológico das unidades sobrepostas e sotopostas, de modo a contemplar possível aporte/descarga de água subterrânea entre as unidades.

Partindo-se dessa premissa, não se pode avaliar o comportamento hidrogeológico do SAG, e conseqüentemente elaborar modelo hidrogeológico conceitual, sem analisar o comportamento do SASG sobreposto, e vice versa.

No Estado de Mato Grosso do Sul as evidências das relações de fluxo entre estas unidades aquíferas são observadas na região de Dourados, a partir da análise da superfície potenciométrica dos dois sistemas aquíferos e da interpretação de dados hidroquímicos. A soma destas evidências poderá fornecer subsídios para a elaboração de simulações numéricas que quantificam este fluxo.

4.1. - Superfícies potenciométricas

A maneira mais simples de se constatar a possibilidade da existência de fluxo ascendente ou descendente entre duas unidades aquíferas em contato, é a de se comparar as suas superfícies potenciométricas.

A partir desta análise comparativa observa-se claramente na porção centro oeste do Estado de Mato Grosso do Sul, que as cotas potenciométricas do SASG são superiores àquelas do SAG, presumindo a possibilidade de recarga do SAG, por águas percoladas através dos basaltos, enquanto que na região de Rio Brillhante-Maracajú, localizada a norte-noroeste de Dourados, tem-se um comportamento inverso, ou seja, a carga potenciométrica do SAG, é superior àquela do SASG, inclusive com a ocorrência de surgência natural do Aquífero Guarani, fato este também observado por SANESUL/TAHAL (1998) e Lastoria (2002) (Figura 05).

O mecanismo de fluxo de água através dos basaltos pode ser explicado através do modelo hidrogeológico conceitual para o SASG no Estado de Mato Grosso do Sul, proposto por Lastoria (2002) e Lastoria *et al.* (submetido).

Este modelo indica a predominância de fluxo nas superfícies de contato entre os derrames, onde ocorrem níveis vesículo-amigdaloidais e zonas de descontinuidades horizontais de grande extensão, e que em função da estruturação vertical presente na morfologia dos derrames, ou relacionadas às grandes feições estruturais da Bacia do Paraná, possibilitaria a passagem de água de níveis superiores para inferiores e vice e versa.

4.2. - Hidroquímica

Na mencionada região localizada a norte-noroeste da cidade de Dourados (Rio Brillhante-Maracajú), onde o nível piezométrico do SAG se sobrepõe ao do SASG, existem poços perfurados

no basalto cujas águas apresentam grande similaridade, em termos composicionais, com àquelas provenientes de poços perfurados no SAG.

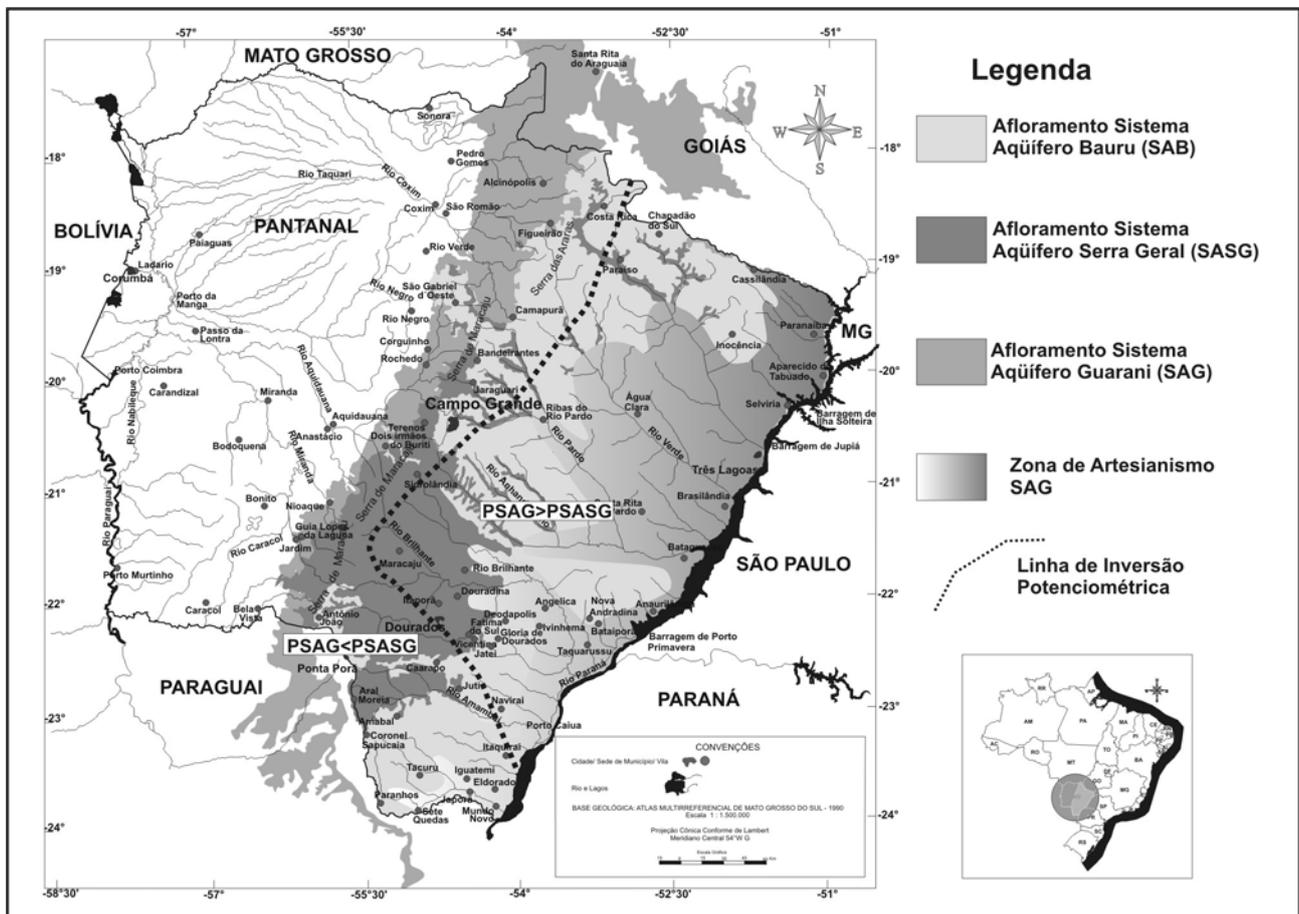


Figura 05. Linha de inversão da carga potenciométrica entre SAG/SASG e Zona de Surgência Natural do SAG em Mato Grosso do Sul (Compilado com dados de SANESUL/TAHAL, 1998; Lastoria, 2002 e Gastmans & Chang, 2005).

O Diagrama de Piper (1944), elaborado a partir de análise de águas subterrâneas, cujos resultados foram apresentadas em trabalhos prévios (SANESUL/TAHAL, 1998 e Lastoria, 2002), indica a existência de três grupos hidroquímicos, o primeiro relacionado a águas do SASG, com características bicarbonatadas calco-magnesianas, um segundo representando as águas do SAG, de natureza bicarbonatadas sódicas, e finalmente um grupo de águas mistas, que representariam termos de misturas entre as águas dos dois aquíferos (Figura 06).

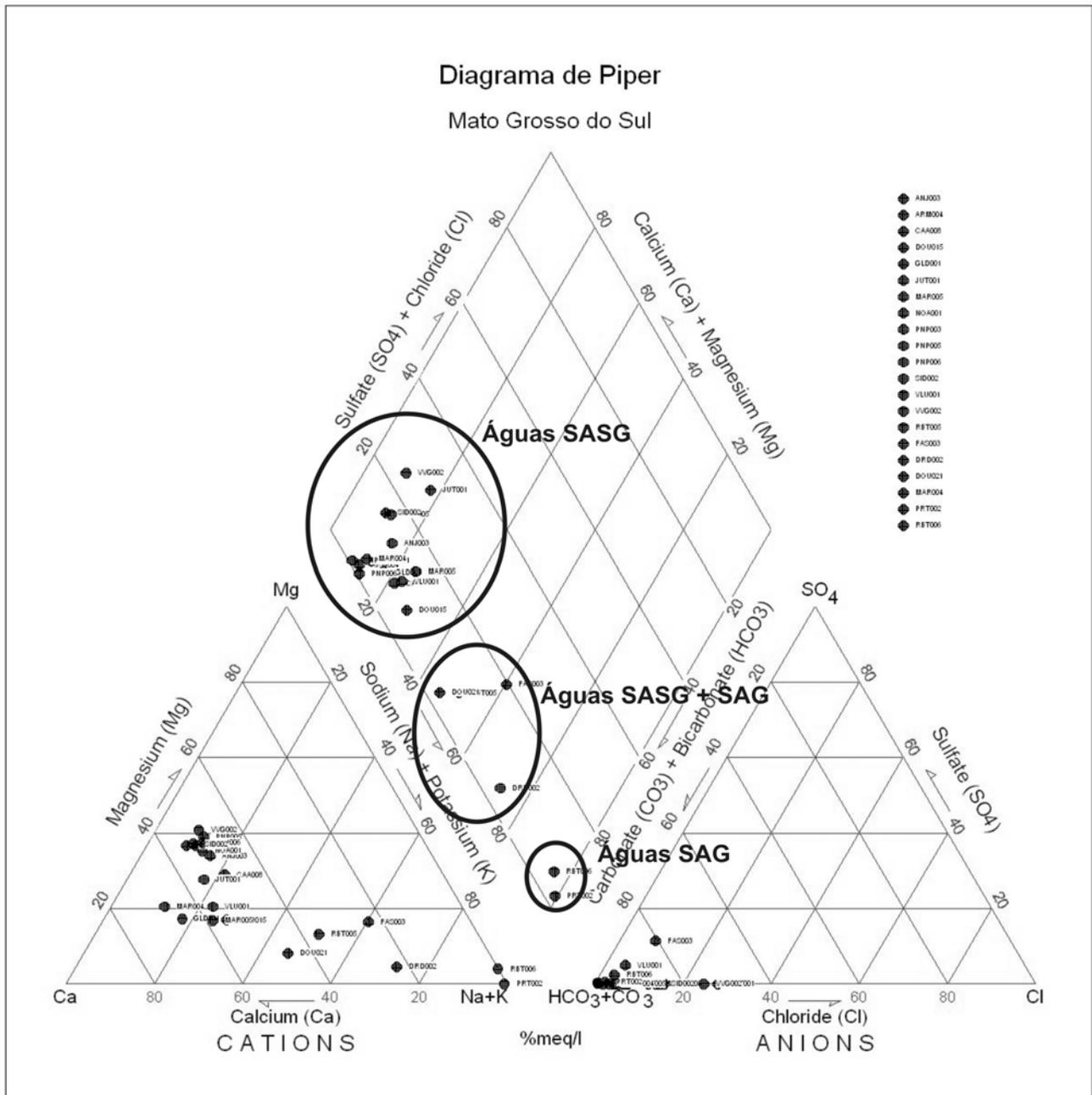


Figura 06. Diagrama de Piper de Águas Subterrâneas da Região de Dourados, MS.

A distribuição das fácies hidroquímicas pode ser observada no mapa da Figura 07, notando-se que as águas do SASG, a oeste da linha de inversão potenciométrica, apresentam composição bicarbonatada cálcica (SID002, DOU015, CAA008, JUT001 e NOA002), enquanto as amostras provenientes de poços perfurados no SASG, localizadas a leste desta linha, apresentam aumento nas concentrações de sódio (FAS003, DRD002 e RBT005), bastante semelhantes às águas provenientes do SAG (PRT002 e RBT006).

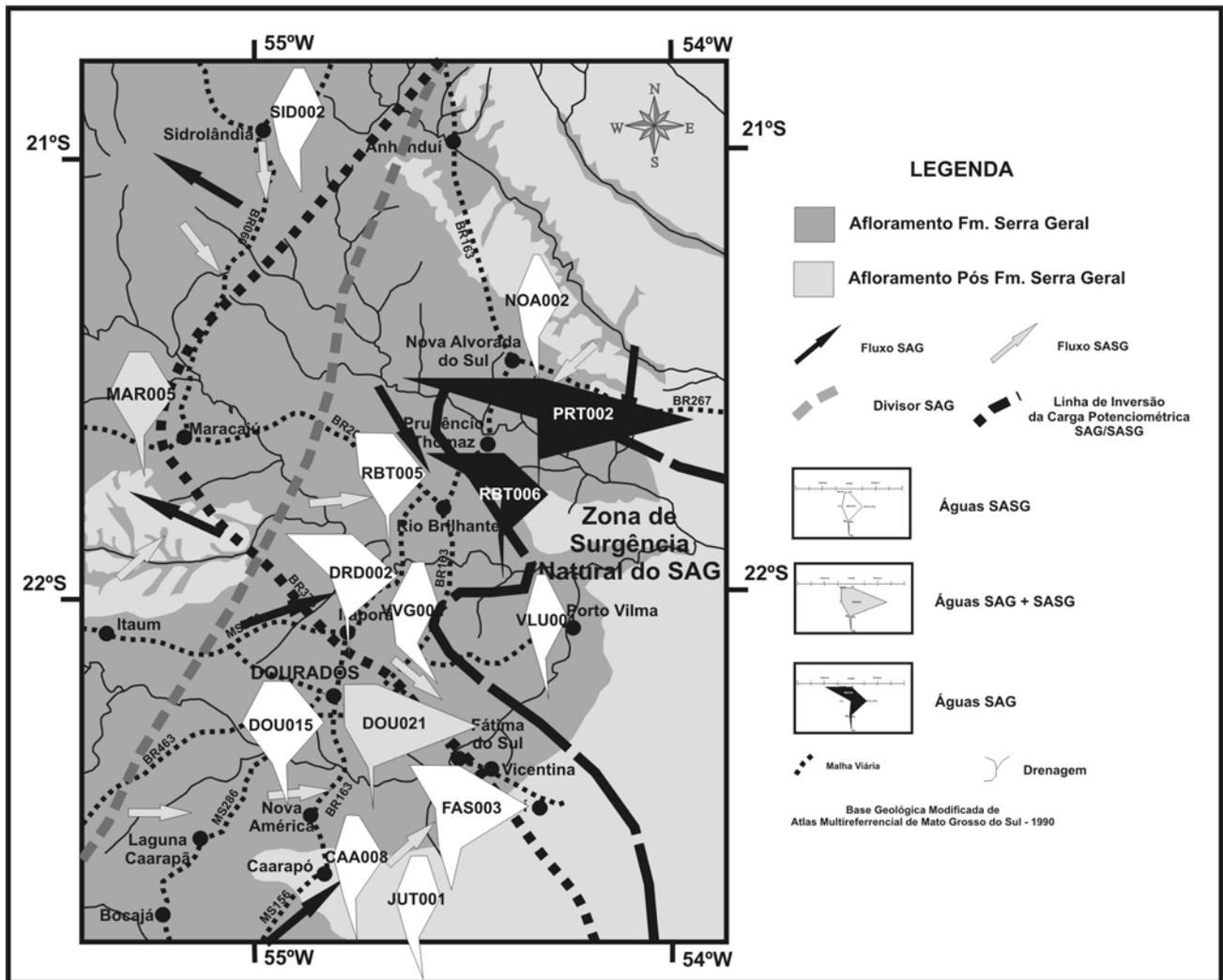


Figura 07. Mapa de distribuição de fácies hidroquímicas das águas subterrâneas dos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Guarani na região de Dourados, MS

5 - ASPECTOS AMBIENTAIS ASSOCIADAS À CONECTIVIDADE HIDRÁULICA ENTRE OS SISTEMAS AQUÍFEROS SERRA GERAL/GUARANI

As evidências de conectividade hidráulica entre os Sistemas Aquíferos Serra Geral e Guarani na área estudada, apontam para implicações ambientais importantes, tanto para o fluxo vertical ascendente, como para o fluxo descendente. No primeiro caso, a recarga pontual do SASG por águas provenientes do SAG, poderia explicar os valores elevados de capacidade específica de poços perfurados no basalto naquela região, ao mesmo tempo em pode-se constatar a manutenção do nível de base de rios que têm suas nascentes e tributários no domínio dos derrames basálticos.

No caso dos fluxos verticais descendentes, deve-se alertar para a possibilidade de contaminação das águas subterrâneas por princípios ativos presentes nos agroquímicos largamente aplicados na região, levando-se em conta a maior velocidade do fluxo ao longo das zonas de fraturas, áreas com menor espessura dos basaltos (algumas dezenas de metros em Amambaí), além da conhecida e combatida utilização de produtos proibidos no país, contrabandeados.

Cálculos hidrológicos efetuados pela TAHAL/SANESUL (1998), mostram que o escoamento básico mínimo, na área dos basaltos aflorantes, no sentido oeste, em direção ao Pantanal, pode alcançar entre 350 a 380 x 10⁶ m³/ano, enquanto nos afloramentos de sudoeste, nas direções leste e nordeste, são da ordem de 80 a 100 x 10⁶ m³/ano. Os fluxos provenientes do sudoeste, área de Ponta Porã, são estimados em 10 a 12 x 10⁶ m³/ano. Esses valores representam as variações do potencial do aquífero, caracterizando um meio com comportamento anisotrópico.

Avaliando os dados apresentados na Tabela 1, nota-se que a última coluna, escoamento básico específico, corresponde a valores mínimos de infiltração que irão permitir o escoamento de base médio, apresentados na penúltima coluna, ou seja, esses são valores exclusivos para manutenção das drenagens nas épocas secas. Só ocorrerá infiltração profunda, se houver precipitação que proporcione valores superiores aos apontados na última coluna da Tabela 1.

Tabela 1 – Dados hidrológicos de rios que drenam a área de estudo, pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Paraná (TAHAL / SANESUL, 1998).

Rio	Código ANEEL	Estação.	Período de dados	Área (Km ²)	Precipitação (mm/ano)	Escoamento total (10 ⁶ m ³ /ano)	Etesp. (10 ³ m ³ /km ² /ano)	Escoamento básico (10 ⁶ m ³ /ano)	Ebesp. (10 ³ m ³ /km ² /ano)
Pardo	63900001	Rib. Rio Pardo	1975-1980	9386	1400	4371	466	3668	391
Anhandui	63955000	D.Costa	1976-1984	13359	1300	6632	496	3449	258
Dourados	64609000	Dourados	1972-1995	5690	1500	5733	1008	4517	794
Dourados	64610000	P.Vilma	1985-1994	8887	1500	13833	1556	10604	1193
Vacaria	64613000	Aroeira	1972-1995	4487	1350	2580	575	2188	488
Ivinhema	64617000	Ivinhema	1972-1993	31905	1300	3443	108	2596	81
Amambaí	64701000	Est.Caap.Amb.	1986-1990	3452	1500	1638	475	800	232
Pardo	63979000	Porto Uere	1984-1995	33356	1300	4167	125	3497	105

Etesp = escoamento total específico.

Ebesp = escoamento básico específico.

1mm = 10³m³/km².

ANEEL = Agência Nacional de Energia Elétrica.

A avaliação da potencialidade das águas subterrâneas, principalmente em aquíferos livres, exige bom conhecimento dos recursos hídricos superficiais e das chuvas – principal fonte de recarga, tornando necessária a elaboração do balanço hídrico.

Com base na disponibilidade de informações meteorológicas, Lastoria (2002) elaborou o balanço hídrico (método de Thornwaite & Mather – 1955, *apud*. Teixeira, 1984) para a região de Dourados, utilizando dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (*apud*.

Freitas Filho, 1999). A partir desses dados, foi elaborada a Tabela 2, que apresenta valores de deficiências e excessos hídricos mensais, para a região.

Tabela 2– Balanço Hídrico para a região de Dourados, no período de 1980/1990
(Valores em mm).(Lastoria, 2002)

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
P	206	214	150	103	71	40	33	34	68	134	182	180	1415
Ep	117	101	106	80	65	56	54	69	84	134	106	117	1089
P-EP	89	113	44	23	6	-16	-21	-35	-16	0	76	63	326
Neg. Acum.	0	0	0	0	0	-16	-37	-72	-88	89	0	0	
Arm	100	100	100	100	100	86	68	48	40	40	100	100	
Alt	0	0	0	0	0	-14	-18	-20	-8	0	60	0	0
Er	117	101	106	80	65	54	51	54	76	134	106	117	1061
Def.	0	0	0	0	0	2	3	15	8	0	0	0	28
Exc.	89	113	44	23	6	0	0	0	0	0	16	63	354

P= chuva;

Ep= evapotranspiração potencial;

Arm.= armazenamento útil à vegetação (máximo = 100mm);

Alt = variação do armazenamento de água no solo;

Er= evapotranspiração real;

Def.= deficiência hídrica;

Exc.= excedente hídrico.

Verificando-se a Tabela 2, nota-se um excedente hídrico, de 354mm para Dourados, no período analisado. Para a mesma região, contida na sub-bacia do Rio Ivinhema, o seu tributário, Rio Dourados, necessita para a manutenção do escoamento básico específico, 794mm anuais na estação Dourados e 1193mm anuais em Porto Vilma (Tabela 1).

Comparando-se os dados mencionados de escoamento básico específico, com os valores de excedente hídrico, obtidos através do balanço hídrico, pode-se concluir que para a região de Dourados, os valores do excedente hídrico são inferiores a necessidade mínima para a manutenção do nível de base do Rio Dourados, indicando que o SASG estaria sofrendo um rebaixamento na área, para garantir o escoamento básico citado, ou o SAG, que tem área de recarga e potencialidade hídrica diferentes do basalto, está alimentando o Aquífero Basáltico, mantendo a perenidade dos rios.

Com relação à recarga do SAG a partir da percolação dos fluxos provenientes do SASG, o que chama a atenção com relação aos níveis estáticos para a região de Dourados, são os valores maiores que 50 m. Nestes casos a maioria dos poços atingiu o SAG, cujo nível potenciométrico encontra-se abaixo do SASG.

Outro parâmetro que merece destaque é a capacidade específica de poços perfurados nos basaltos, chegando a valores superiores a 50 m³/h.m.

Vale salientar que, com base nos dados fornecidos pelas empresas de perfuração de poços, tem ocorrido um aumento da capacidade específica com o decorrer do bombeamento, chegando

praticamente ao dobro do valor inicial em alguns casos (Rebouças & Lastoria, 1980). Este fato pode ser explicado por uma progressiva desobstrução das zonas de circulação da água nos basaltos, face à predominante agressividade da água do SASG, conforme é mostrado na Figura 08.

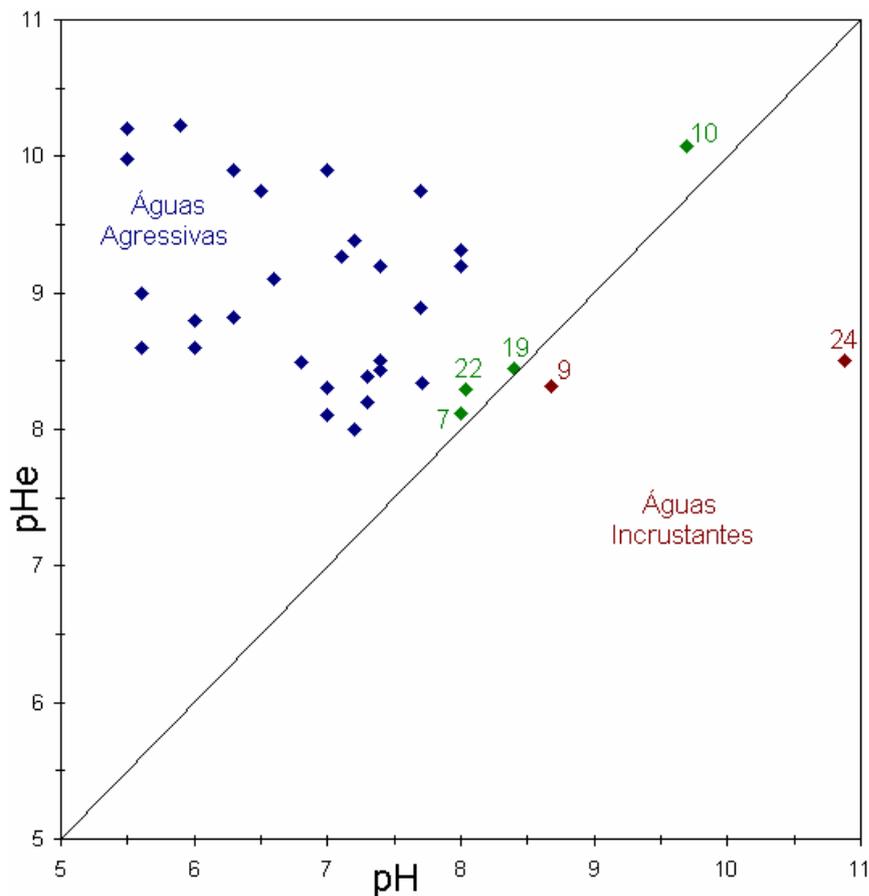


Figura 08- Gráfico pH x pHe, mostrando que a grande maioria das águas analisadas enquadram-se como “Águas Agressivas” (Lastoria, 2002).

A maior desobstrução das fraturas, implica também em um aumento da velocidade do fluxo subterrâneo no SASG, que por sua vez é maior que no SAG subjacente. Outras zonas de descarga do SASG são o sistema fluvial e as fontes. Estas fontes ocorrem onde as fraturas horizontais e os contatos entre derrames são interceptados pela topografia; estando diretamente vinculadas ao regime de chuvas e geralmente secam nos períodos mais secos do ano, agosto/setembro.

O Mapa Potenciométrico gerado para o SASG (Figura 3), mostra que as linhas de fluxo convergem para uma área de “depressão” na região de Dourados, indicando ser esta área uma zona de alta potencialidade. Utilizando o Mapa Potenciométrico e aplicando a lei de Darcy (1), pode-se calcular a velocidade média dos fluxos em alguns pontos estudados. Algumas condições de contorno foram adotadas, como inexistência de perda ou fuga de água no sistema, que a espessura é

constante ao longo do trecho calculado, e que a porosidade efetiva das fraturas é constante. Assim tem-se:

$$V = - [(T/b\theta) / (dh/dl)] \quad (1)$$

Sendo: V = velocidade, em m/ano; T = transmissividade (m²/d); b = espessura da camada, em m; θ = porosidade efetiva (%) e dh/dl = gradiente hidráulico, em m/m.

O sinal negativo é arbitrariamente convencionado para indicar que o escoamento está orientado no sentido do decréscimo da carga hidráulica, dh. O uso do sinal negativo implica na determinação do sinal do gradiente hidráulico.

Para efeito de cálculo nesse trabalho, foi estipulado um valor para a porosidade efetiva da ordem de 10% ou 0,1.

Usando os valores de espessura e transmissividade encontrados para os derrames basálticos da área de estudo, foram calculados alguns valores mínimos da velocidade dos fluxos (Tabela 3).

Embora a lei de Darcy tenha sido desenvolvida para aplicação em meio de porosidade intergranular e as fraturas no basalto apresentam grande irregularidade, a sua utilização na área estudada mostra indicativos para o fluxo regional, prevalecendo o modelo de fluxo proposto (predominantemente horizontal). Admitindo-se valores de porosidade efetiva <1%, as velocidades apresentadas serão muito maiores, o que deve ocorrer se a análise for efetuada em escala de detalhe, para cada fratura.

Tabela 3: Velocidades calculadas dos fluxos de água no Aquífero Serra Geral, na área de afloramento dos derrames basálticos em Mato Grosso do Sul (Lastoria,2002)

Localidade	T (m ² /d)	b (m)	dh (m)	dl (m)	V (m/a)
Dourados	390	88	180	80000	36,5
Maracajú	85	211	210	80000	7,3
Fátima do Sul	1700	88	280	102000	204
Rio Brilhante	10	83	103	40000	1,0
Ponta Porã	242	112	42	20000	15
Bocajá	203	143	60	30000	10

Os valores encontrados mostram as diferenças no potencial do Aquífero Serra Geral, o que demonstra a existência de zonas preferenciais de circulação nos basaltos e indicam uma faixa de grande fluxo regional em Fátima do Sul, onde se dá o escoamento básico para o Rio Paraná. Essas

velocidades também servem para indicar a ação de contaminantes (originados pela aplicação de agroquímicos), com respostas mais rápidas ou mais demoradas para serem reveladas.

6 – CONCLUSÕES

As evidências de fluxo de águas subterrâneas entre duas das principais unidades hidroestratigráficas da Bacia do Paraná, o SAG e o SASG, vem sendo relatadas há muito tempo, entretanto as evidências deste fenômeno estavam baseadas em observações das relações potenciométricas entre os dois aquíferos e as similaridades químicas observadas entre as suas águas subterrâneas.

Essa relação de fluxo aponta para a necessidade de se gerenciar também as regiões de afloramento dos basaltos da Formação Serra Geral, como forma de se garantir a proteção da qualidade das águas subterrâneas do SAG, pois a questão da sua recarga não passa apenas pela sua zona de afloramento, e sim por uma faixa de largura variável, onde a piezometria do aquífero sotoposto (SASG) é superior a sua, conforme já observado no Estado de São Paulo (Silva, 1983) e agora também evidenciado no Estado de Mato Grosso do Sul.

Com a elaboração de simulações matemáticas é possível a quantificação deste fluxo, entretanto essas simulações necessitam de modelos conceituais bem elaborados e consistentes que reflitam a realidade.

No Estado de Mato Grosso do Sul foi possível observar as evidências físicas (potenciométricas e balanço hídrico) e químicas (qualidade das águas subterrâneas) das trocas existentes entre o SAG e o SASG.

Deve-se considerar que as características hidrodinâmicas das duas unidades aquíferas ainda não são bem conhecidas, em função da inexistência de dados de ensaios de bombeamento que possibilitem o cálculo destes parâmetros.

Outra questão a ser desvendada está relacionada aos caminhos percorridos pelas águas subterrâneas de um aquífero a outro, verificando-se a existência de controles geológicos, estratigráficos ou estruturais para estas transferências.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOGOLINI, B. 1963. Geologia da barragem de Jupia (Rio Paraná). Relatório THEMAG. São Paulo, 93p.

- BITTENCOURT, A.V.L. 1996. Sobre o controle do quimismo de águas termais da Bacia do Paraná. *Boletim Paranense de Geociências*, **44**: 117-129.
- BITTENCOURT, A.V.L.; ROSA FILHO, E.F.; HINDI, E.C.; BUCHMANN FILHO, A.C. 2003. A influência dos basaltos e de misturas com águas de aquíferos sotopostos nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia do Rio Piquiri. Paraná – BR. *Revista Águas Subterrâneas*, **17**: 67-75.
- BONOTTO, D.M. 2005. Hydro(radio)chemical relationships in the giant Guarani aquifer, Brazil. *Journal of Hydrology* **xx**: 1-34, (Article in Press – Available online at www.sciencedirect.com)
- CHANG, H.K. 2000. *Proteção Ambiental e Gerenciamento Sustentável Integrado do Aquífero Guarani – Tema 03*. Disponível em http://www.ana.gov.br/guarani/gestao/gest_cbasico.htm acessado em 20/06/2005.
- DAEE. 1974. Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE – *Estudo de Águas Subterrâneas. Região Administrativa 6 – Ribeirão Preto*. volume 2. texto.
- DAEE. 1979. Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE – *Estudo de Águas Subterrâneas. Região Administrativa 10 e 11 – Presidente Prudente e Marília*. volume 1. texto.
- FREITAS FILHO, J.D. 1999. *Caracterização física do médio curso do Rio Dourados (MS), escala 1:100 000 - Bases para o zoneamento geo-ambiental*. Dissertação de Mestrado, IGCE / UNESP, mapas. Rio Claro, 146p.
- GALLO, R.; SINELLI, O. 1980. Estudo Hidroquímico e Isotópico das Águas Subterrâneas na Região de Ribeirão Preto (SP). *Revista Brasileira de Geociências*; **10**: 129-140.
- GASTMANS, D. & CHANG, H.K. 2005. Avaliação da hidrogeologia e hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no Estado de Mato Grosso do Sul. *Revista Águas Subterrâneas*, **19**[1]: 35-48.
- LASTORIA, G. 2002. *Hidrogeologia da Formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul*. Tese de Doutorado. Área de Concentração – Geociências e Meio Ambiente. IGCE – UNESP – Rio Claro. 133p.
- LASTORIA, G.; SINELLI, O.; CHANG, H.K.; HUTCHEON, I.; PARANHOS FILHO, A.C.; GASTMANS, D. 2005. Hidrogeologia da Formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul. *Submetido para a Revista Águas Subterrâneas*.
- MAZOR, E.; DREVER, J.I.; FINLEY, J.; HUNTOON, P.W. 1993. Hydrochemical implications of groundwater mixing: An example from the southern Laramie basin, Wyoming. *Water Resources Research*, **29**(1): 193-205.

- MENG, S.X. & MAYNARD, J.B. 2001. Use of statistical analysis to formulate conceptual models of geochemical behavior: water chemical data from the Botucatu aquifer in São Paulo state, Brazil. *Journal of Hydrology*, **250**:78-97.
- PARKHURST, D.L. & APPELO, P. 1999. *User's guide to PHREEQC (Version 2) – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259. 310p.
- PIPER, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *American Geophysical Union Transactions*, **25**: 914-923.
- REBOUÇAS, A.C. 1999. Groundwater resources in South America. *Episodes*, **22**[3]: 232-237.
- REBOUÇAS, A.C. & FRAGA, C.G. 1988. Hidrogeologia das rochas vulcânicas do Brasil. *Revista Brasileira de Águas Subterrâneas*. São Paulo, **12**:29-55.
- REBOUÇAS, A.C. & Lastoria, G. 1980. Potencial Hidrogeológico do Aquífero Basáltico em Campo Grande. In: Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas, 1º. Recife, ABAS... *Anais*, v. 1, p. 415-426.
- ROSA FILHO, E.F.; SALAMUNI, R.; BITTENCOURT, A.V.L. 1987. Contribuição ao estudo das águas subterrâneas nos basaltos no estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, **37**: 22-52.
- RUEEDI, J.; PURTSCHERT, R.; BEYERLE, U.; ALBERICH, C.; KIPFER, R. 2005. Estimating groundwater mixing ratios and their uncertainties using a statistical multi parameters approach. *Journal of Hydrology*, **305**: 1-14.
- SILVA, R.B.G. 1983. *Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do Aquífero Botucatu no estado de São Paulo*. Tese de Doutorado. IG-USP. 133p.
- SANESUL/TAHAL. 1998. *Estudos hidrogeológicos de Mato Grosso do Sul*. Relatório Final. Campo Grande. mapas V.I e II. 736p.
- TEIXEIRA, J.A. 1984. Considerações sobre os métodos da determinação da evapotranspiração potencial e da evapotranspiração real no município de Olinda, PE. *Revista DAE*. São Paulo, v. 44, n. 138, p. 189-211.
- ZALÁN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A. 1990. Bacia do Paraná. In: Raja Gabaglia, G.P.; Milani, E.J. (Coord). *Origem e evolução de Bacias Sedimentares*. Petrobrás Rio de Janeiro. p. 135-167.