

CONECTIVIDADE E COMPARTIMENTAÇÃO DOS SISTEMAS AQUÍFEROS SERRA GERAL E GUARANI NA REGIÃO CENTRAL DO ARCO DE PONTA GROSSA (BACIA DO PARANÁ, BRASIL)

Francisco José Fonseca Ferreira¹; Carlos Vieira Portela Filho¹;
Ernani Francisco da Rosa Filho¹ e Sidnei Pires Rostirolla¹

RESUMO A proposição recente de projetos de pesquisa na Bacia do Paraná, cujo foco central é avaliar o potencial hidrogeológico, os padrões de fluxo, as propriedades químicas e aspectos da proteção ambiental do Sistema Aquífero Guarani (SAG-granular), em relação ao arcabouço tectônico, motivou investigar uma área fortemente estruturada no contexto da região central do Arco de Ponta Grossa (APG), correspondente ao Sistema Aquífero Serra Geral (SASG-fissural), sobrejacente, com base na integração de dados geofísicos, geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos. O processamento e interpretação de dados aeromagnéticos, baseados principalmente nas técnicas do sinal analítico e do gradiente horizontal, possibilitou refinar o arcabouço estrutural da região central do APG, o qual foi delineado por blocos romboédricos delimitados principalmente por estruturas NW-SE e NE-SW. Três novos lineamentos regionais NW-SE foram identificados: Apucarana, Arapongas e Maringá, além de outros nas direções NE-SW, E-W e N-S. O novo arcabouço magnético-estrutural foi cotejado com a distribuição espacial de parâmetros hidrogeológicos (potenciometria, vazão, capacidade específica) e hidroquímicos (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, SO_4^{2-} ; sólidos totais dissolvidos e pH). A interpretação integrada permitiu reconhecer o controle estrutural dos dados hidrogeológicos e hidroquímicos e também a conexão hidráulica dos SASG e SAG como indicada por diferentes taxas de mistura de suas águas. Sólidos totais dissolvidos e pH constituíram indicadores complementares da procedência das águas do Sistema Aquífero Serra Geral.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Serra Geral, Sistema Aquífero Guarani, Arco de Ponta Grossa, conexão hidráulica, aeromagnetometria.

ABSTRACT The recent proposition for research projects in the Paraná Basin whose central focus is to evaluate the hydrogeological potential, flow patterns, chemical properties and environmental protection aspects of the Guarani Aquifer System (GAS-granular), related to the tectonic framework, has led to the investigation of a highly structured area in the context of the Ponta Grossa Arch (PGA) central region which corresponds to the overlying Serra Geral Aquifer System (SGAS - fractured) on the basis of the integration of geophysical, geological, hydrogeological and hydrochemical data. Processing and interpretation of aeromagnetic data, based (mainly) in analytical signal and horizontal gradient methods, allowed to refine the regional structural framework of the PGA central region which was delineated by blocks delimited (mainly) by NW-SE and NE-SW structures. Three new regional NW-SE lineaments were identified: Apucarana, Arapongas and Maringá. Others, NE-SW, N-S and E-W were also observed. The new magnetic-structural framework was confronted to the spatial distribution of hydrogeological parameters (potentiometry, outflow, specific capacity) and hydrochemical (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, SO_4^{2-} ; total dissolved solids, and pH). The integrated interpretation allowed to recognize the structural control of the hydrogeological and hydrochemical data and also the hydraulic connection of the SGAS and GAS as indicated by their differential water mixture rates. Total dissolved solids and pH were complementary indicators of water provenance of the Serra Geral Aquifer System.

Keywords: Serra Geral Aquifer System, Guarani Aquifer System, Ponta Grossa Arch, hydraulic connection, aeromagnetometry.

INTRODUÇÃO

A avaliação de dados hidroquímicos provenientes de poços tubulares completados na Formação Serra Geral revelou que, por vezes, a composição resultante não reflete as características esperadas para estas rochas. Tais variações implicam na mistura com águas de outros aquíferos sotopostos conforme demonstrado por BITTENCOURT (1978), FRAGA (1986;1992), ROSA FILHO et al., (1987), BITTENCOURT et al., (2003), sugerindo que o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), além de seu caráter de barreira hidráulica do Sistema Aquífero Guarani (SAG), deva ser

tratado em conjunto com o SAG, em conformidade à provável conexão hidráulica e ao caráter de similaridade de alguns padrões de fluxo.

Visando contribuir para o entendimento dos mecanismos que atuam na dinâmica de fluxo do SASG, que engloba as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, Bacia do Paraná, e avaliar a conectividade com os sistemas aquíferos sotopostos (principalmente o SAG), procurou-se analisar seus comportamentos em uma área fortemente estruturada, situada na região central do Arco de Ponta Grossa (Figura 1),

¹Departamento de Geologia - Universidade Federal do Paraná (francisco.ferreira@ufpr.br); (cportela@petrobras.com.br); (ernani@ufpr.br); (rostirolla@ufpr.br)

limitada pelas coordenadas geodésicas 23°00' e 24°00' de latitude Sul e 51°00' e 52°00' longitude Oeste, aonde se dispõe de uma densidade razoável de poços, decorrente da demanda de água necessária para atender importantes municípios do centro-norte do estado do Paraná.

A pesquisa envolveu dados aeromagnéticos adquiridos durante a década dos 80 (PETROBRAS, 1981) e que haviam sido interpretados por FERREIRA (1982a,b). A partir do reprocessamento destes dados, foi possível

obter um refinamento das estruturas que constituem o arcabouço da área de estudo, que integradas com dados geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), ensejaram interpretações dos controles estruturais do fluxo e do quimismo das águas do SASG e permitiram identificar falhas e fraturas responsáveis pela conexão hidráulica com o SAG (PORTELA FILHO, 2003; FERREIRA et al., 2004).

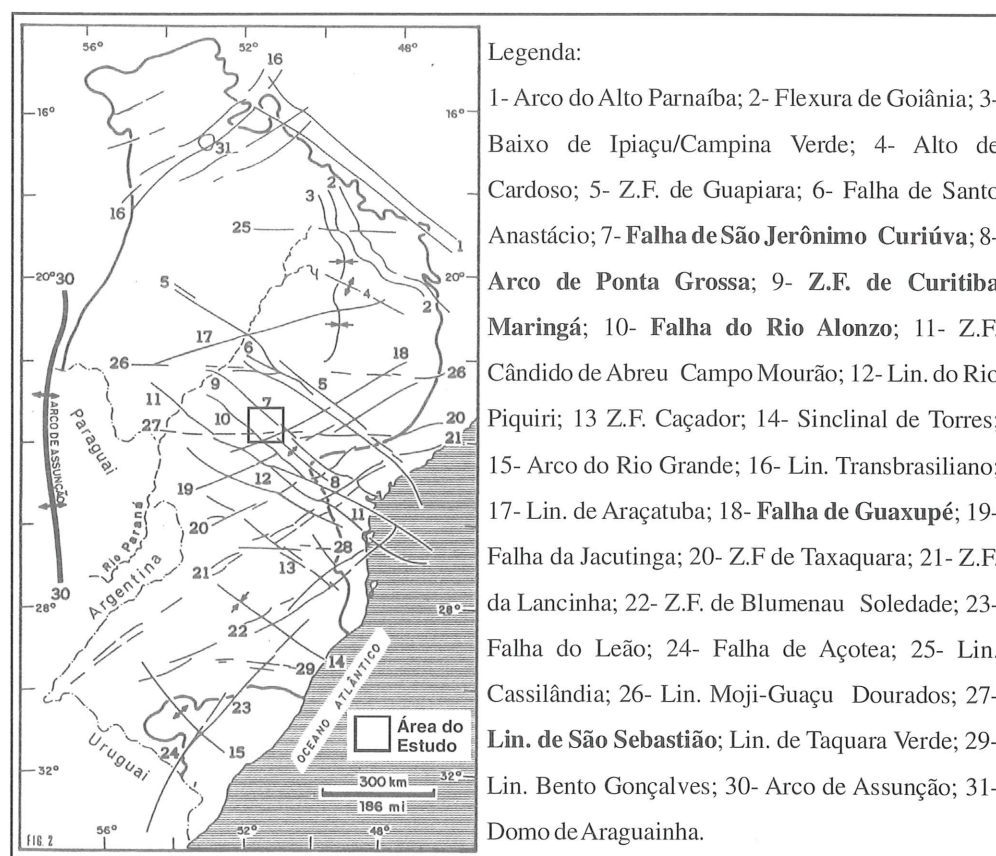


Figura 1 – Contexto tectônico da Bacia do Paraná no Brasil indicando a área estudada. (modificado de ZALÁN et al., 1990)

CONTEXTO GEOLÓGICO

Considerada uma das mais proeminentes sinéclises do continente sul-americano, a Bacia do Paraná envolve atualmente uma área superior a 1.400.000 km², com tratos situados no centro-sul do Brasil, norte do Uruguai, mesopotâmia Argentina e oeste Paraguai. Seu registro estratigráfico iniciou no neo-Ordoviciano (± 450 Ma), com as primeiras incursões marinhas, passando por estágios de glaciação no Neocarbonífero e desertificação do interior continental no intervalo Triássico-Jurássico, re-

gistrando um importante evento magmático Mesozóico, até o encerramento do processo sedimentar com depósitos continentais no neo-Cretáceo (± 65 Ma). Esta história evolutiva representou um intervalo de cerca de 385 Ma, no qual estão registrados períodos descontínuos de sedimentação limitados por discordâncias regionais, relacionados a variações eustáticas do nível do mar, associada a eventos de subsidência ocorridos no continente, em resposta aos esforços orogênicos paleozóicos na borda oeste e ao

processo de abertura do oceano Atlântico Sul (MILANI, 1997).

O embasamento da bacia é constituído pela interação de blocos crustais que foram soldados durante o processo colisional Brasileiro, por ocasião da consolidação do Gondwana. A importância dos *trends* estruturais herdados do embasamento na evolução estratigráfica-estrutural da Bacia do Paraná foi destacada por FERREIRA (1982a,b), ZALÁN et al., (1990), SOARES (1991), MILANI (1997), ARTUR (1998), ROSTIROLLA et al., (2000), STRUGALE (2002), dentre outros. Estes *trends* de estruturas que interagiram na bacia foram subdivididos por ZALÁN et al., (1990) em três grupos principais, separados por direções NW-SE, NE-SW, E-W e, secundariamente, N-S. FERREIRA (1982a,b) destacou a importância das estruturas associadas ao Arco de Ponta Grossa dentre as demais que afetaram a bacia, em função de atuarem como condutos para os derrames de lavas, predominantemente basálticas, da Formação Serra Geral. Tais condutos constituíram extensos alinhamentos magnéticos-estruturais de direção NW-SE, rastreados desde o rio Paraná até a plataforma continental, extensões mínimas de 600 km, frequentemente preenchidos por diques de dolerito.

GEOLOGIA DA ÁREA

Na área estudada estão representados os litotipos incluídos nas superseqüências Gondwana I (porção superior), Gondwana III e Bauru. Na divisão em seqüências apresentada por MILANI (1997) e MILANI; RAMOS (1998), a Formação Pirambóia assenta-se sobre a Formação Rio do Rasto, e ambas são posicionadas na Superseqüência Gondwana I. A Formação Botucatu, associada à Formação Serra Geral, integra a Superseqüência Gondwana III. Destas unidades a que apresenta maior extensão aflorante na área do estudo (Figura 2) é a Superseqüência Gondwana III, que engloba as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Uma breve síntese da estratigrafia das formações está indicada no mapa geológico da figura 2.

A Formação Rio do Rasto está inserida no Grupo Passa Dois de idade Permiana e ocorre na borda sudeste da área, sendo constituída essencialmente por siltitos esverdeados a arroxeados, podendo encerrar intercalações de argilitos, arenitos finos e níveis carbonáticos.

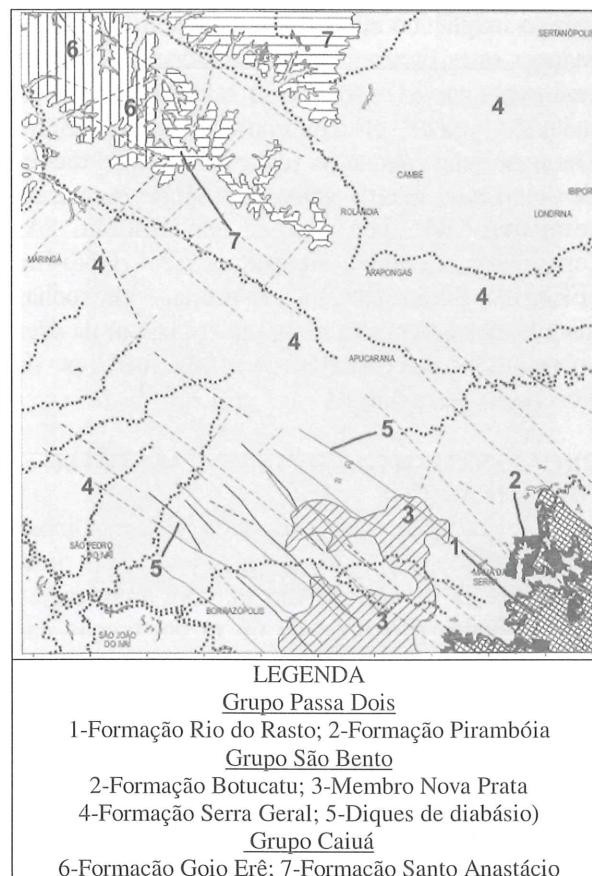


Figura 2 - Mapa geológico da área.
(modificado de PAULIPETRO, 1981)

A Formação Pirambóia caracteriza-se por uma sedimentação arenosa flúvio-eólica, submetida a condições de clima árido. SOARES; ASSINE (1992) citam que esta formação é constituída principalmente por arenitos avermelhados, finos a médios, podendo ocorrer nos horizontes inferiores níveis de arenitos argilosos e também arenitos grossos a conglomeráticos. Sucendendo discordantemente a este pacote ocorrem sedimentos continentais do Grupo São Bento pertencentes a Formação Botucatu, representados em SOARES; ASSINE (1992) e MILANI (1997) por fácies eólicas associadas à geração de um extenso campo de dunas. Esta formação é representada por arenitos esbranquiçados, amarelados, avermelhados, com intercalações de finas camadas de argilitos e siltitos, constituindo os reservatórios do Sistema Aquífero Guarani (SAG). A Formação Serra Geral é constituída, essencialmente, por basaltos toleíticos a andesitos basálticos, riolitos e riodacitos subordinados. A espessura máxima desta cobertura atinge 900 m na área de estudo, anotada em poço situado em Londrina-PR. As rochas vulcânicas aliadas aos enxames de diques subvulcânicos constituem as principais fontes responsáveis pelas anomalias do

campo magnético nesta região, as quais permitem mapear estes litotipos de forma indireta. Datações realizadas por TURNER et al., (1994), através do método Ar/Ar, posicionaram o evento Serra Geral no intervalo entre 137 e 127Ma. Os diques de dolerito de direção geral NW-SE apresentaram resultados no intervalo de 134-130Ma. As formações Santo Anastácio e Goio-Erê (FERNANDES, 1992), constituídas de rochas siliciclásticas, ocorrem na porção noroeste da área sobrepostas discordantemente aos basaltos da Formação Serra Geral.

PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROMAG - NETOMÉTRICOS

O levantamento foi executado segundo linhas espaçadas de 2.000 m na direção N-S, a uma altura média de voo de 450 m, com amostragem em intervalos próximos de 66 m na direção das linhas de aquisição. Também foram realizadas linhas de controle espaçadas de 20.000 m, dirigidas perpendicularmente às linhas de produção. Os dados digitais do projeto Rio Ivaí foram cedidos pela PETROBRAS (1981) à Universidade Federal do Paraná (UFPR) já tratados e corrigidos dos erros de posicionamento, nivelamento das linhas, deriva de voo e remoção do *IGRF-International Geomagnetic Reference Field*. Os procedimentos de pré-processamento, incluindo análise crítica dos dados e micronivelamento, são relatados em PORTELA FILHO (2003). A figura 3 representa o mapa do campo magnético residual micronivelado e pseudoiluminado segundo N45E.

A partir da malha micronivelada do campo magnético anômalo (Figura 3) foram aplicados os filtros do gradiente horizontal total, amplitude e fase (inclinação) do sinal analítico. Tais atributos foram manipulados na forma de mapas, objetivando a interpretação de anomalias, associadas à falhas e diques, realçadas através destas técnicas. O gradiente horizontal total é o vetor resultante das combinações das primeiras derivadas horizontais nas direções x e y. Este processo envolve uma transformação de fase e um realce das altas frequências. MILLIGAN; GUNN (1997) comprovaram que a transformação de fase ressalta os picos das anomalias, localizadas aproximadamente sobre as bordas de corpos espessos, e o realce da alta frequência proporciona um estreitamento destes picos para aumentar a definição das bordas dos corpos. A figura 4 indica o mapa do gradiente horizontal total pseudoiluminado segundo N45E.

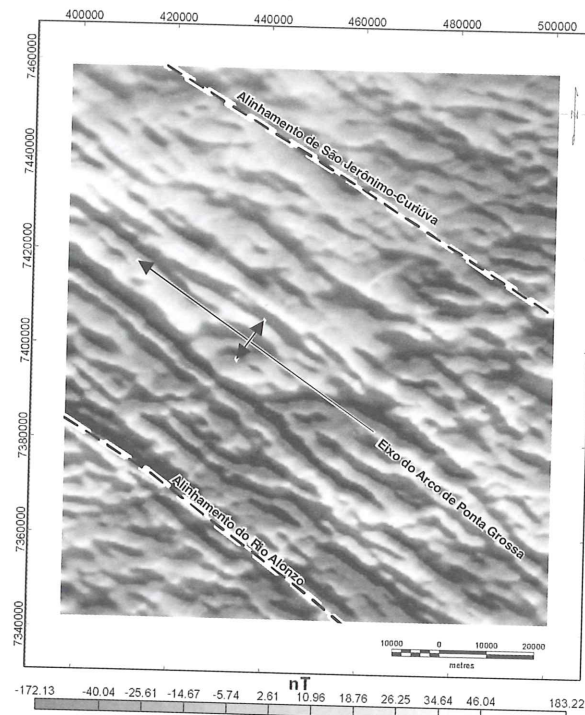


Figura 3 - Mapa magnético residual.

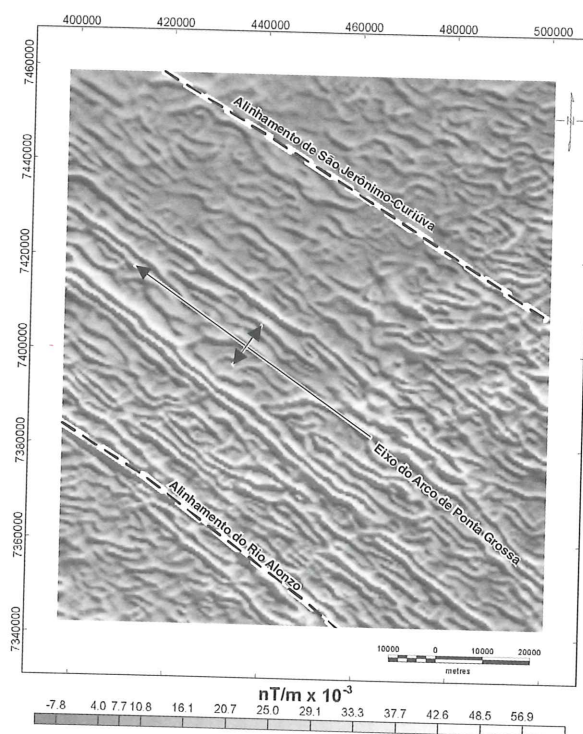


Figura 4 - Mapa do gradiente horizontal total.

O método do sinal analítico envolve os gradientes (derivadas horizontais e vertical) de anomalias de campos potenciais. O conceito de sinal analítico foi definido inicialmente por NABIGHIAN (1972; 1974; 1978). Este método não requer um conhecimento prévio da direção de magnetização e não necessita do processamento de redução ao pólo, como

confirmado por HSU et al., (1998). A função amplitude do sinal analítico, ou seu valor absoluto, pode ser expressa por um vetor adição de duas componentes reais (nas direções x e y) e uma componente imaginária na direção z. A figura 5 exibe o mapa da amplitude do sinal analítico pseudoiluminado segundo N45E.

A fase ou inclinação do sinal analítico é definida pelo ângulo formado entre os vetores imaginário e real do sinal analítico da mesma ordem, ou seja, representa o quociente da primeira derivada vertical pelo gradiente horizontal. A figura 6 mostra o mapa da fase do sinal analítico pseudoiluminado segundo N45E.

MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

A partir da carta topográfica vetorizada da Folha Londrina (IBGE, 1977), na escala 1:250.000, foi gerado um modelo digital de elevação (MDE). O traçado dos alinhamentos negativos de relevo teve por finalidade aferir as estruturas obtidas através do método magnético, além de suprir a dificuldade de identificação das estruturas de direção N-S, mascaradas por artefatos segundo a direção das linhas de aquisição e eliminados pelo processo de micronivelamento. A figura 7 exibe o mapa de alinhamentos estruturais extraídos do MDE.

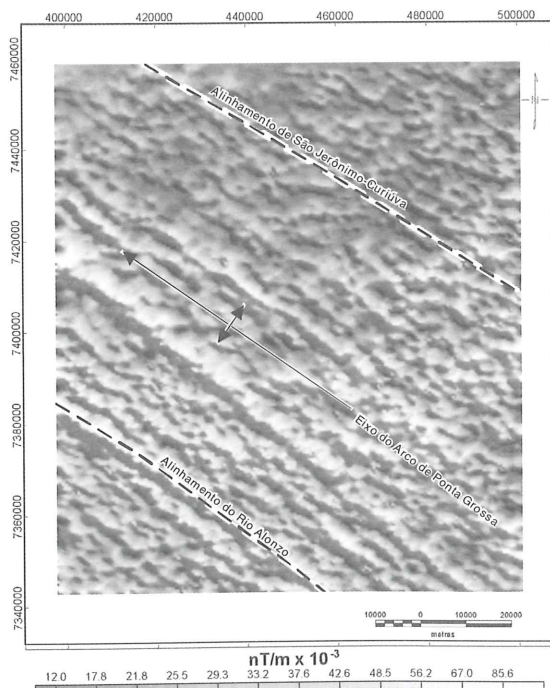


Figura 5 - Mapa do sinal analítico.

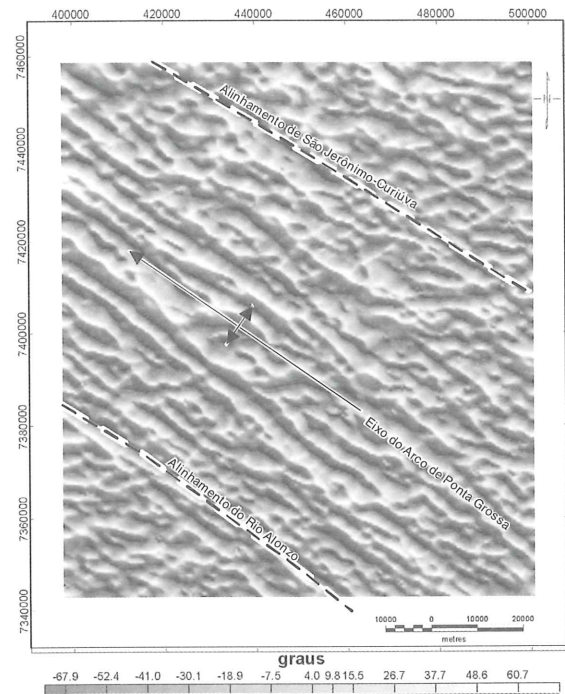


Figura 6 - Mapa da fase sinal analítico.

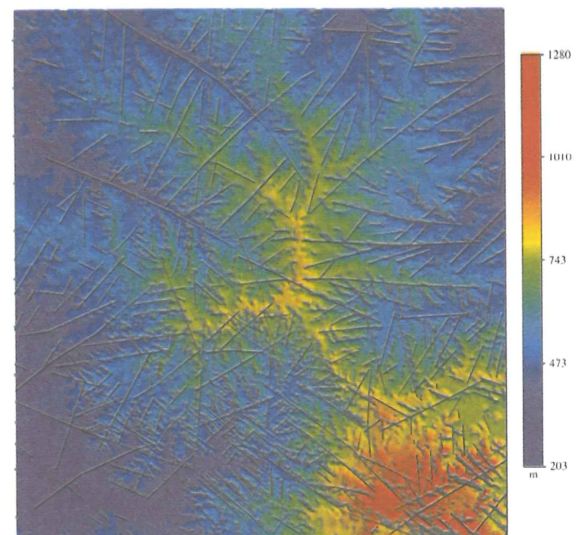


Figura 7 - Alinhamentos estruturais (MDE).

ARCABOUÇO MAGNÉTICO-ESTRUTURAL

Para determinar as principais estruturas e sintetizá-las em um arcabouço magnético-estrutural, foram interpretados os mapas do gradiente horizontal total (Figura 4), da amplitude e da fase do sinal analítico (Figuras 5 e 6), acrescidos das feições reveladas pelo MDE (Figura 7). Na interpretação do MDE foi constatada que a direção N-S também apresenta grande importância na área e, como já mencionado, essa direção não foi contemplada pela interpretação geofísica em função do paralelismo com as linhas de vôo e do micronivelamento.

Os alinhamentos interpretados não estão relacionados a uma única estrutura ou dique, mas a uma resposta magnética integrada de fontes situadas a várias profundidades e com magnetizações diversas, como também observado por USSAMI et al., (1991). Dessa forma a figura 8 reflete as principais feições estruturais da região central do Arco de Ponta Grossa, denotando as continuidades relevantes dos alinhamentos e diques, onde a espessura de cada feição está relacionada, principalmente, às estruturas do gradiente horizontal total, as quais delimitam aquelas da amplitude e da fase do sinal analítico, vinculadas a um mesmo *trend*. Ainda neste mapa pode-se facilmente correlacionar as principais estruturas de direção NW-SE com os alinhamentos do APG. Assim, além das estruturas descritas anteriormente em FERREIRA (1982a,b), foram reconhecidas outras três de caráter regional denominadas por PORTELA FILHO (2003) de alinhamentos de Maringá, Apucarana e Arapongas.

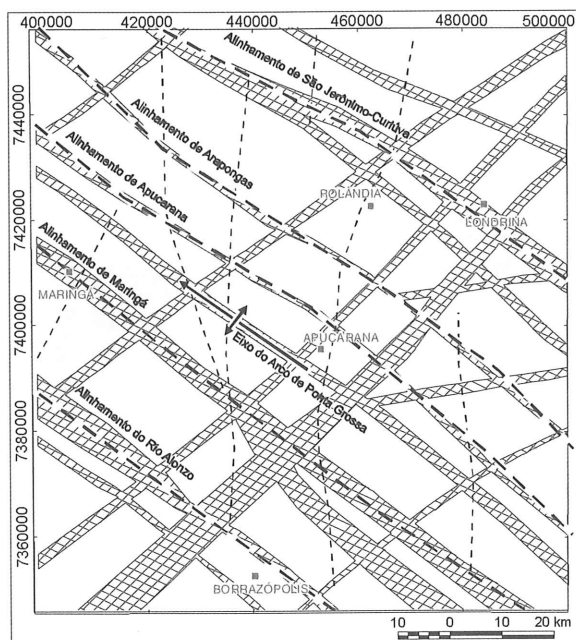


Figura 8 - Arcabouço magnético-estrutural.

SISTEMAS AQUÍFEROS GUARANI E SERRA GERAL

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) abrange unidades areníticas do Triássico (formações Pirambóia e Rosário do Sul, no Brasil, e Buena

Vista no Uruguai) e do Jurássico (formações Botucatu no Brasil, Missões no Paraguai e Taquarembó no Uruguai e na Argentina), sotoposto a um conjunto de rochas magmáticas (essencialmente basaltos e diques de dolerito da Formação Serra Geral) as quais constituem, por sua vez, o SASG, cujas espessuras oscilam entre 200 e 1000 m.

Quanto ao comportamento estrutural do SAG, ARAÚJO et al., (1995) citam que diversos fatores influenciaram a atual configuração, como os depocentros de lavas da Formação Serra Geral, a ativação regional de sistemas de falhas, os soerguimentos das bordas da bacia e dos arcos de Ponta Grossa, Campo Grande, Rio Grande e Sinclinal de Torres (Figura 1).

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é fissural e abrange todo o sul-sudeste do Brasil, inclusive países vizinhos (Uruguai, Paraguai e Argentina). Conforme REBOUÇAS (1978), o SASG denota condições hidrogeológicas heterogêneas e anisotrópicas. O modo de ocorrência da água subterrânea do SASG está condicionado tanto a fatores genéticos do pacote basáltico (*intertrapp*, amígdalas, vesículas e disjunções), quanto à presença de estruturas (falhas, fraturas e diques de dolerito) que condicionam a circulação das águas nestas rochas. A conjugação destes fatores aumenta a capacidade de armazenamento de água. A recarga principal ocorre através da pluviometria, principalmente em áreas com desenvolvido manto de alteração, topografia pouco acidentada e considerável cobertura vegetal (mata nativa). Localmente, onde há condições potenciométricas e estruturais favoráveis, pode ocorrer recarga ascendente a partir do SAG. A tipologia das águas do SASG é bicarbonatada cálcica, decorrente da ação intempérica dos basaltos típicos.

Os dados hidrogeológicos, cedidos pela Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (Sudersa-PR), são oriundos de 625 poços perfurados no período de 1961 a 1995. Para o presente estudo considerou-se apenas os poços completados na Formação Serra Geral. Inicialmente procedeu-se uma análise crítica e estatística, eliminando os dados espúrios e padronizando as unidades (Tabela 1).

Tabela 1 – Estatísticas dos parâmetros de interesse das águas subterrâneas do SASG.

Estatísticas	Potenciometria (m)	Vazão (m³/h)	Cap. Específica (m³/h/m)	pH	STD (mg/L)
Máximo	862,10	185,00	42,50	9,90	518,00
Mínimo	312,00	0,25	0,01	5,70	11,00
Média	523,92	18,69	1,82	7,40	161,01
Desvio	98,2	24,77	3,74	0,72	82,44

Em seguida os dados foram interpolados e contornados através de células quadradas de 5000 x 5000 m. Com base neste procedimento foram gerados mapas de contorno das seguintes variáveis: potenciometria, vazão, capacidade específica, sólidos totais dissolvidos (STD) e pH. Também foram elaborados mapas ternários dos cátions (Mg^{2+} ; Ca^{2+} ; Na^{+} ; K^{+}) e dos ânions (SO_4^{2-} ; $HCO_3^{-}+CO_3^{2-}$; Cl^{-}), provenientes de 57 poços selecionados por BUCHMANN FILHO (2002) e que apresentaram diferenças de balanço iônico inferiores a 15%. O número insuficiente de dados hidroquímicos restringiu a distância de interpolação, impedindo previsões em toda a área do estudo. Os mapas ternários são comumente empregados na análise de dados gama-espectrométricos e de imagens de satélite (fusão de bandas), onde são relacionadas em uma só carta três malhas regulares. Tais malhas são dispostas em cada um dos extremos de uma escala de cor *R* (red), *G* (green), *B* (blue). A seguir serão descritos os dados obtidos através da análise estatística e os mapas das mencionadas variáveis, em correspondência ao arcabouço magnético-estrutural da figura 8.

O mapa da superfície potenciométrica (Figura 9) mostra uma forte tendência de sudeste para noroeste, com as cotas mais elevadas (± 850 m) situadas no quadrante SE, as quais decaem gradativamente até atingirem valores da ordem de ± 400 m no extremo NW, portanto mergulhando para o interior da bacia. Esta configuração coincide com o eixo do Arco de Ponta Grossa, o qual está em conformidade com a topografia, denotando um comportamento de aquífero livre como observado por FRAGA (1986). A partir deste alto central, a superfície potenciométrica decresce gradativamente também nos sentidos NE e SW, atingindo as menores cotas em seus respectivos extremos (± 350 m).

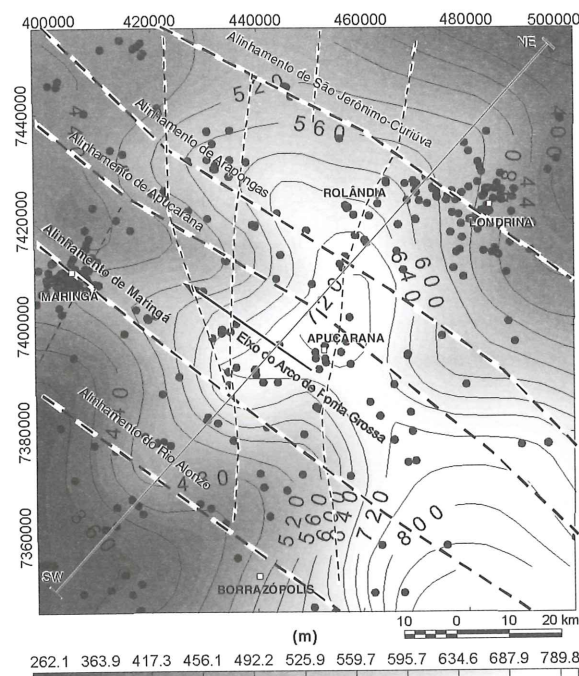


Figura 9 – Mapa potenciométrico.

Um perfil de direção SW-NE, indicado na figura 9, permitiu relacionar a superfície potenciométrica e a topografia da área (Figura 10). Nota-se que a superfície potenciométrica normalmente apresenta variações locais, as quais não seguem a tendência geral da topografia. As maiores diferenças entre as superfícies potenciométrica e altimétrica são encontradas na porção central da área, o que certamente reflete uma situação de maior controle estrutural determinada pela presença de diques e falhas encontrados, preferencialmente, em trato que encerra o ápice do APG. Também são indicados na figura 10 os seguintes alinhamentos: A-Alinhamento do Rio Alonzo; B-Alinhamento de Maringá; C-Alinhamento de Apucarana; D-Alinhamento de Arapongas; E-Alinhamento São Jerônimo-Curiúva.

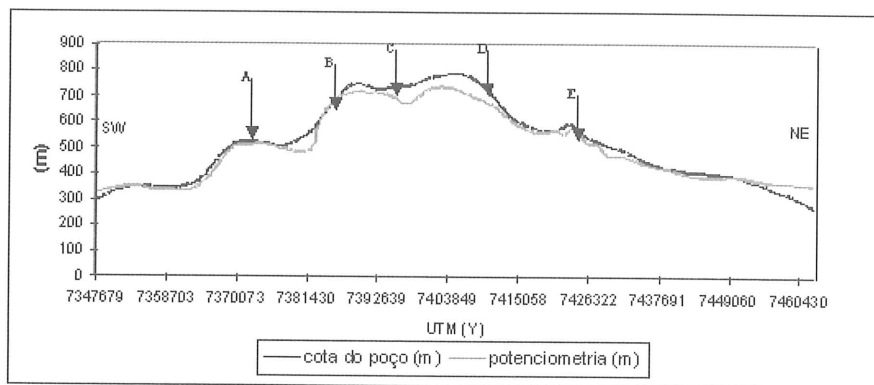


Figura 10 - Correlação entre a potenciometria e a topografia (localização na Figura 9).

Nos mapas de vazão e capacidade específica (Figuras 11 e 12), observa-se uma compartimentação regional balizada pelo eixo do Arco de Ponta Grossa, onde a norte desta estrutura as magnitudes de tais variáveis são mais elevadas, em contraste com a porção sul. Na análise em escala de maior detalhe, nota-se áreas com altas produtividades, aparentemente confinadas em compartimentos romboédricos balizados por estruturas NW-SE e NE-SW. A moldura magnética-estrutural sobreposta a estes mapas mostra que as áreas de maior produtividade estão respectivamente controladas pelo Alinhamento São Jerônimo-Curiúva, sobretudo os núcleos a norte de Londrina, onde existem mais dados, e pelos alinhamentos de Arapongas e Apucarana, próximos do eixo do APG, onde a densidade de diques de dolerito é maior. Na porção central da área a ocorrência de valores anômalos de capacidade específica foi constatada justamente sobre alinhamentos de direção NW-SE, ou por blocos limitados por tendências NW-SE e NE-SW.

O mapa de contorno dos sólidos totais dissolvidos (Figura 13), exhibe claramente três áreas de maior concentração, respectivamente a nordeste do Alinhamento São Jerônimo-Curiúva, no extremo noroeste da região entre os alinhamentos de Maringá e Apucarana, e a sudoeste do Alinhamento do Rio Alonzo, denotando influência das estruturas associadas ao Arco de Ponta Grossa na distribuição dos teores. Altos valores de STD denotam águas com maior tempo de residência no aquífero, mas também podem estar entremeadas com águas provenientes de outros reservatórios.

A análise conjunta dos três últimos mapas (Figuras 11, 12 e 13), revela que as áreas com elevadas vazões e capacidades específicas coincidem com aquelas de menores teores de STD. Ao mesmo tempo existem tratos com altas capacidades específicas e vazões baixas que estão

aparentemente relacionados com concentrações mais elevadas de sólidos totais dissolvidos.

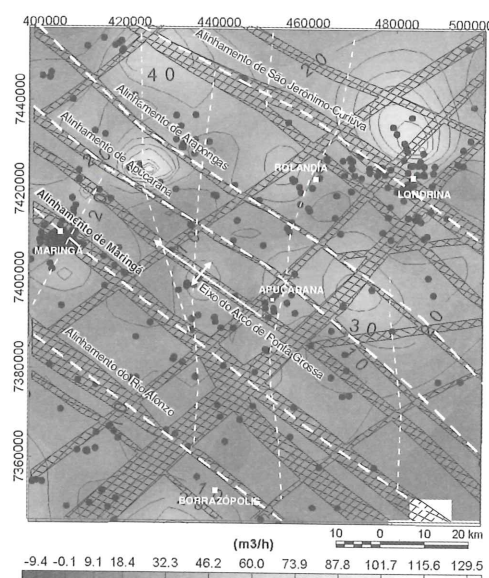


Figura 11 - Mapa de vazões.

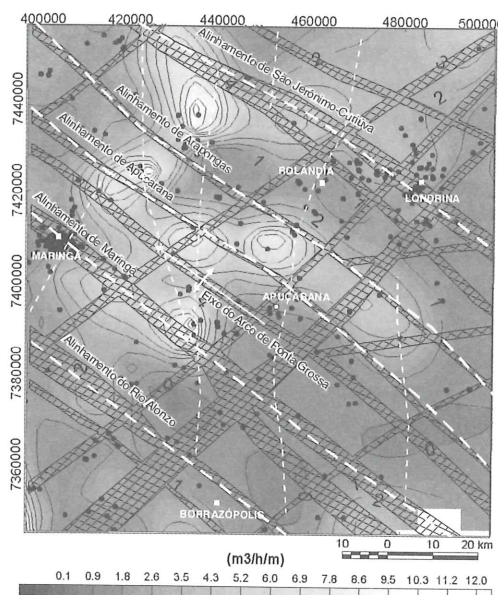


Figura 12 - Mapa da capacidade específica.

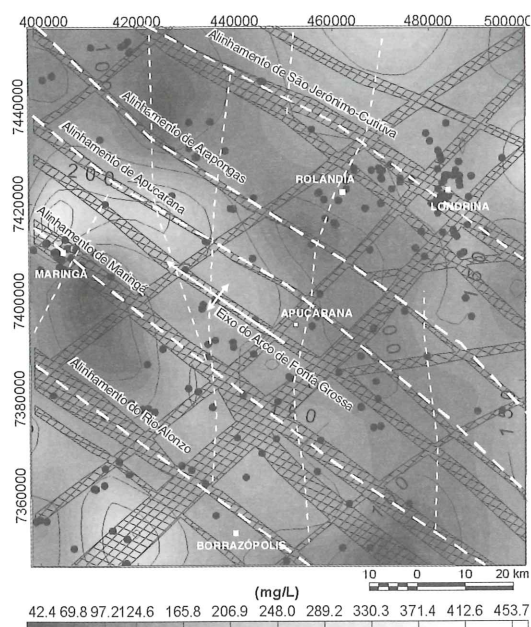


Figura 13 - Mapa de sólidos totais dissolvidos.

O mapa do potencial hidrogeniônico (Figura 14) foi gerado a partir dos dados de 507 poços, mais concentrados principalmente em torno das cidades de Londrina e Maringá. Neste mapa pode-se observar que os valores alcalinos se dispõem segundo as principais direções estruturais e que as maiores concentrações normalmente estão nos cruzamentos destas tendências. Tais tendências foram encontradas principalmente: (i) ao sul de Londrina, no cruzamento entre o Alinhamento São Jerônimo-Curiúva e uma megaestrutura de direção NE-SW; (ii) no ápice do APG e no Alinhamento de Maringá, ao interceptar a mesma megaestrutura

de direção NE-SW, além de outra mais a noroeste; (iii) ao norte de Maringá e oeste de Borrazópolis, relacionada ao eixo do APG e ao Alinhamento do Rio Alonzo, respectivamente. Para o SASG, os valores alcalinos do pH são comumente atribuídos a águas subterrâneas com influência do SAG sotoposto.

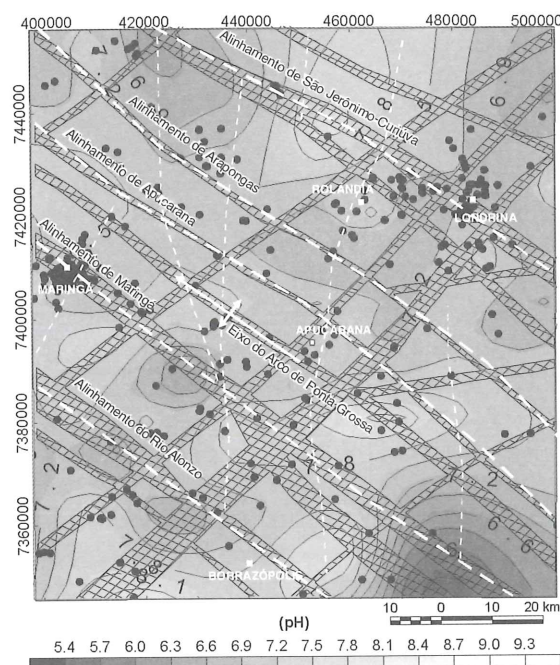


Figura 14 - Mapa do pH.

Os dados hidroquímicos dos cátions e dos ânions (BUCHMANN FILHO, 2002) foram agrupados na tabela 2, mostrando os principais atributos descritivos de sua distribuição.

Tabela 2 - Estatísticas dos cátions e dos ânions das águas subterrâneas do SASG.

Estatísticas	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ⁻⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻
Máximo	140,84	46,55	87,27	3,25	201,00	23,00	34,00
Mínimo	0,900	0,07	0,40	0,10	4,00	0,00	0,00
Média	16,44	3,77	14,65	0,91	69,82	3,31	2,76
Desvio	19,40	6,28	18,17	0,81	42,25	4,44	5,64

Os dados químicos analisados revelam comportamento semelhante aos descritos por ROSA FILHO et al., (1987), FRAGA (1986) e BITTENCOURT et al., (2003), com exceção dos cátions sódio e potássio, os quais se encontram acima dos valores médios esperados para o SASG.

Através do diagrama de Piper (Figura 15), construído a partir dos dados de poços completados na Formação Serra Geral, foram

caracterizadas as águas subterrâneas do SASG na área de estudo. Tais águas são predominantemente bicarbonatadas cálcicas, mas também podem ser constatadas tendências para águas bicarbonatadas cálcio sódicas a cálcio magnesianas e bicarbonatadas sódicas.

Perfazendo 56% das amostras analisadas, as águas bicarbonatadas cálcicas se caracterizam por apresentar teor médio de cálcio mais elevado (20 mg/L), profundidade média da entrada de água de

60 m, e valores de pH próximos da neutralidade. Nestas águas o valor médio de STD é de 123 mg/L.

As águas bicarbonatadas sódicas, características de conexão com o SAG, representam 19,5% do universo de amostras, pH maiores que 8, valor médio de STD de 180 mg/L, e as profundidades das entradas de água são superiores a 80 m.

semelhantes aos obtidos neste trabalho. Para estes autores, o aumento da alcalinidade das águas reflete-se no incremento dos teores de sódio decorrente da insolubilização do cálcio e também do magnésio.

Os poços perfurados no extremo noroeste da área estão em torno do contato com o Grupo Caiuá (arenitos). Em seis poços inseridos neste contexto, foi constatado que a razão Na/K assume valores menores que um, caracterizando a influência de litotipos do Grupo Caiuá (sistema aquífero sobrejacente ao SASG), de acordo com BITTENCOURT (1978;1993). Nas águas relacionadas aos basaltos, tal razão varia entre 2,02 e 18,02 e em poços do Sistema Aquífero Caiuá (SAC) este índice oscila entre 0,27 e 1,58, onde os valores mais elevados são atribuídos por BITTENCOURT et al., (2003) a contaminação por águas dos basaltos.

As razões Na/Ca mostram valores acima de um em quase todas as águas bicarbonatadas sódicas e bicarbonatadas sódio cálcicas. Apenas uma amostra de água bicarbonatada sódica apresenta razão Na/Ca menor que 1, além de pH igual a 5,8. Nesta amostra a razão Na/K é menor que um, indicando influências do aquífero sobrejacente.

Na tentativa de avaliar a distribuição espacial das fácies hidroquímicas antes descritas, apesar da insuficiência de dados iônica, foi utilizado o modelo ternário da figura 16, cuja escala de cor associa os vértices do triângulo *R-G-B* aos cátions (Mg^{2+} ; Ca^{2+} ; Na^{+} ; K^{+}) e aos ânions (SO_4^{2-} ; $HCO_3^{-}+CO_3^{2-}$; Cl^{-}), de modo semelhante ao empregado nos diagramas ternários de Piper. Para a geração dos mapas das figuras 17 e 18, as unidades dos cátions e dos ânions foram convertidas para meq/L. Dessa maneira as cores estão relacionadas aos campos de classificação química das águas, permitindo uma análise georreferenciada das fácies do SASG e da localização geográfica de pontos, *trends* e/ou áreas de conexão hidráulica com o SAG, subjacente. Logicamente, uma interpretação consistente destes mapas deve levar em conta a precisão do posicionamento dos dados e a qualidade das análises hidroquímicas. Nestes mapas (Figuras. 17 e 18), podem ser identificadas áreas de maior ou menor contribuição do SAG, as quais normalmente caracterizam-se por apresentar teores de sódio mais elevados, em relação aos demais cátions.

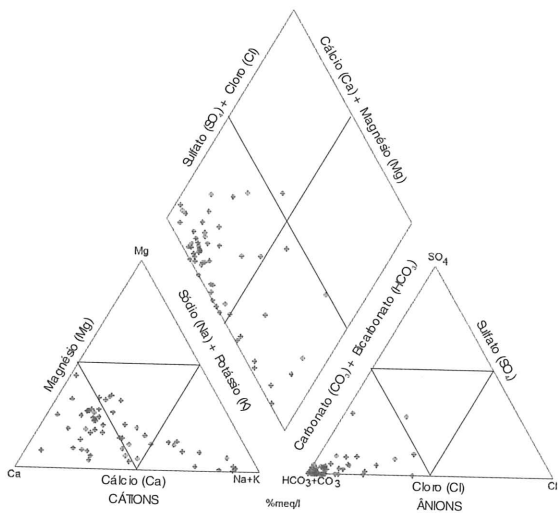


Figura 15 - Diagrama de Piper do SASG.

As águas bicarbonatadas cálcio magnesianas (10,5%), apresentam profundidade média da entrada de água de 25 m, pH em torno de 6,7 e STD médio de 78 mg/L. É ainda importante ressaltar que os poços com maiores profundidades médias de entrada de água apresentaram tendência para águas bicarbonatadas sódicas, enquanto aqueles com tendências para águas bicarbonatadas cálcio magnesianas indicaram contribuições a menores profundidades médias.

Nas águas bicarbonatadas cálcio sódicas (10,5%), a profundidade média das entradas de água é de 73 m, o pH assume valores próximos de 8, e os sólidos totais dissolvidos variam em torno de 170 mg/L. Ainda são observadas duas amostras no campo de águas bicarbonatadas sódio cálcicas (3,5%), as quais apresentam pH francamente alcalino.

Segundo ROSA FILHO et al., (1987), a influência de águas do SAG em fontes naturais e poços perfurados na Formação Serra Geral é revelado por teores maiores de sódio, pH alcalinos, e, em alguns casos, pelas temperaturas mais elevadas. BITTENCOURT et al., (2003) analisaram o quimismo das águas subterrâneas da bacia do rio Piquiri, onde obtiveram resultados

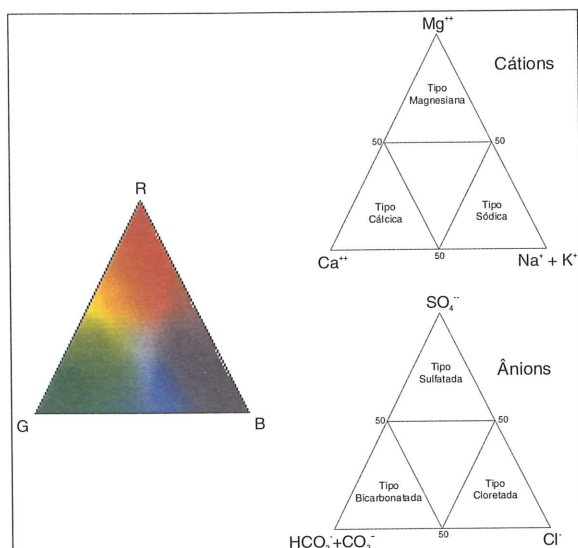


Figura 16 – Comparação entre o modelo ternário RGB e os diagramas hidroquímicos triangulares.

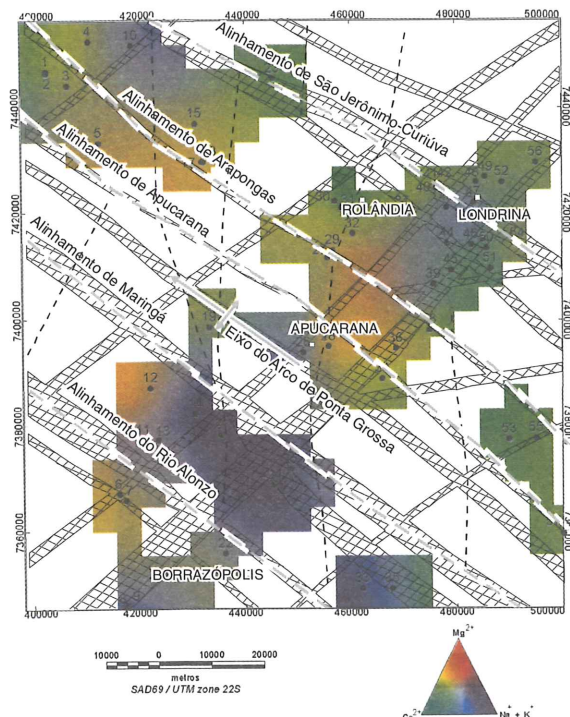


Figura 18 – Mapa ternário dos cátions.

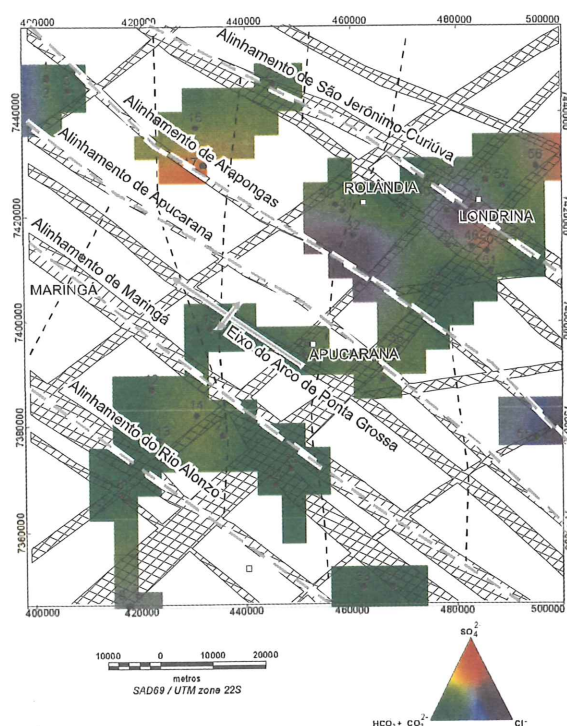


Figura 17 – Mapa ternário dos ânions.

Como observado na análise do diagrama de Piper (Figura 15), e nos mapas das figuras 17 e 18, a tendência predominante de distribuição dos cátions e dos ânions nas águas subterrâneas é bicarbonatada cálcica, mas também ocorrem águas de composição bicarbonatada cálcio magnesiana, cálcio sódica e bicarbonatada sódica. No mapa dos ânions (Figura 17), nota-se que a composição predominante é bicarbonatada. Também é possível visualizar áreas onde as cores indicam tendências para tipos de águas cloretadas e sulfatadas, representativas de variações menores dentro do campo das águas bicarbonatadas. Na região entre os alinhamento de Maringá e do Rio Alonzo, observa-se que a tendência das águas é predominantemente bicarbonatada sódica (Figuras 17 e 18), revelando a importância destas estruturas de direção NW-SE na conexão dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani. Os poços com estas características foram perfurados ao longo daquela região e próximos de intersecções com estruturas de direção NE-SW. Outro local de contribuição de águas bicarbonatadas sódicas ocorre próximo da cidade de Londrina, onde são encontrados altos valores de sódio no cruzamento de estruturas NE-SW com o Alinhamento São Jerônimo-Curiúva, e, mais a sul, na intersecção de uma megaestrutura NE-SW com outra de direção aproximada E-W.

De acordo com o observado anteriormente, as águas que possuem influências do SAG

normalmente apresentam caráter alcalino. É interessante observar a correspondência entre tratos mais alcalinos indicados no mapa do pH (Figura 14), com áreas de composições bicarbonatada sódica e sódio cálcica. Dessa maneira, o mapa do potencial hidrogeniônico pode ser utilizado para indicar áreas com maior favorabilidade de conexão dos sistemas aquíferos considerados. Um exemplo ocorre no prolongamento NW do Alinhamento de Maringá, onde, apesar da ausência de outros dados hidroquímicos, o mapa da figura 14 revela altos valores, sugerindo a presença de águas bicarbonatadas sódicas provenientes da conexão do SAG e do SASG. Tendências para águas bicarbonatadas cálcio magnesianas foram encontradas próximas aos alinhamentos de Apucarana e Arapongas.

CONCLUSÕES

1) A utilização de técnicas modernas de processamento de dados aeromagnéticos, como gradiente horizontal, amplitude e fase do sinal analítico, em regiões fortemente magnetizadas, se mostraram eficazes no delineamento do arcabouço magnético-estrutural da região central do Arco de Ponta Grossa; 2) A interpretação dos mapas magnéticos permitiu refinar a megaestruturação da região central do Arco de Ponta Grossa, por meio da proposição de novos alinhamentos, segundo a direção NW-SE, como os de Apucarana, Arapongas e Maringá; 3) Em relação ao comportamento das águas subterrâneas, o trabalho procurou demonstrar, apesar de seu caráter regional e à luz dos dados disponíveis, que a distribuição espacial dos parâmetros hidrogeológicos do Sistema Aquífero Serra Geral, como potenciometria, vazão, capacidade específica, potencial hidrogeniônico (pH) e sólidos totais dissolvidos (STD), está condicionada pela trama magnética-estrutural proposta. Desta forma observou-se que a superfície potenciométrica, em geral, acompanha o relevo, sugerindo um comportamento de aquífero livre, mergulhando para o interior da bacia, e que os maiores contrastes ocorrem no ápice do Arco de Ponta Grossa, denotando controle estrutural; 4) Os mapas de vazão e

capacidade específica mostraram que as áreas de maior produtividade são condicionadas por compartimentos romboédricos balizados por estruturas segundo as direções NW-SE e NE-SW. Tais áreas coincidem com baixos teores de STD. Já os tratos de maiores concentrações de STD, igualmente vinculados a grandes estruturas, sugerem maior tempo de residência das águas ou contribuição de outros aquíferos sotopostos como o SAG; 5) A distribuição espacial do pH indica, do mesmo modo, um condicionamento estrutural, onde as áreas alcalinas, normalmente, apresentam afinidade com águas do SAG, enquanto tendências à neutralidade são características do SASG. Desta forma na ausência de outros dados hidroquímicos, o pH pode ser um indicativo de conexão dos mencionados sistemas aquíferos; 6) Os dados hidroquímicos, representados na forma de diagrama de Piper, mostraram que as águas características do SASG são predominantemente bicarbonatadas cálcicas (56%) e bicarbonatadas cálcio magnesianas (10,5%), confirmando estudos anteriores. Já as áreas dominadas por águas bicarbonatadas sódicas (19,5%), bicarbonatadas sódio cálcicas (3,5%) e bicarbonatadas cálcio sódicas (10,5%), por outro lado, são resultantes de conexão com o SAG, evidenciando diferentes taxas de mistura com águas do SASG; 7) A distribuição georreferenciada das variáveis hidroquímicas, indicada pelos mapas ternários coloridos dos cátions e dos ânions, mostra com clareza o condicionamento a grandes estruturas e compartimentos, mesmo considerando o número restrito de amostras. Nestes mapas, são indicadas áreas de predominância das águas características do SASG, assim como aquelas de conexão com o SAG, ressaltando-se um trato localizado entre os alinhamentos do Rio Alonzo e Maringá (cor azul), sudoeste da área, no mapa dos cátions. As evidências hidroquímicas conduzem a que se caracterize um sistema aquífero híbrido, com taxas variadas de mesclagem das águas do SASG e do SAG; 8) Finalmente, considera-se que os métodos utilizados e os resultados apresentados poderão contribuir para a gestão sustentável de ambos os sistemas aquíferos (SASG e SAG).

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L.M.; FRANÇA, A.B.; POTTER, P.E. **Aquífero gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai: mapas hidrogeológicos das formações Botucatu, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó**. UFPR/Petrobras, 16 p., 9 mapas, 1995.
- ARTUR, P. C. **Paleolineamentos na Bacia do Paraná: favorabilidade para a acumulação de hidrocarbonetos**. Curitiba, 1998. Dissertação (Mestrado em Geologia Exploratória), Departamento de Geologia – UFPR.
- BITTENCOURT, A.V.L. **Sólidos hidrotransportados na bacia hidrográfica do rio Ivaí: aplicação de balanço hidrogeoquímico na compreensão da evolução de processos da dinâmica externa**. São Paulo, 1978. Tese (Doutorado em Geoquímica), Instituto de Geociências - USP.
- BITTENCOURT, A.V.L. Sobre a quantificação do intemperismo na bacia do rio Piquiri-PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, 41:35-51, 1993.
- BITTENCOURT, A.V.L.; ROSA FILHO, E.F.; HINDI, E.C.; BUCHMANN FILHO, A.C. 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. **Águas Subterrâneas**, ABAS, 17:67-76, 2003.
- BUCHMANN FILHO, A.C. **Caracterização das águas do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Paraná**. Curitiba, 2002. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental), Departamento de Geologia – UFPR.
- DEBEGLIA, N.; CORPEL J. 1997. Automatic 3-D interpretation of potential field data using analytic signal derivatives. **Geophysics**, 62: 87-96.
- FERNANDES, L.A. **A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): os grupos Bauru e Caiuá**. São Paulo, 1992. Dissertação (Mestrado em Ciências). Instituto de Geociências - USP.
- FERREIRA, F.J.F. **Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa**. São Paulo, 1982a. Dissertação (Mestrado em Ciências). Instituto de Geociências - USP.
- FERREIRA, F.J.F. Alinhamentos estruturais-magnéticos da região centro-oriental da Bacia do Paraná e seu significado tectônico. In: **Geologia da Bacia do Paraná – Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonetos**. Paulipetro, Consócio CESP-IPT, p.144-166, 1982b.
- FERREIRA, F.J.F.; PORTELA FILHO, C.V.; ROSA FILHO, E.F.; ROSTIROLLA, S.P. Connection of the Serra Geral and Guarani aquifers across Ponta Grossa Arch. In: International Congress of the International Association of Hydrogeologists, XXXIII and International Congress of the Latin-American Association of Underground Hydrogeology for Development, 7°. Zacatecas, 2004. **Anais em CD ROM...** Zacatecas-City, México, IAH and ALHSUD.
- FRAGA, C.G. **Introdução ao zoneamento do Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Paraná**. São Paulo, 1986. Dissertação (Mestrado em Ciências). Instituto de Geociências - USP.
- FRAGA, C.G. **Origem de fluoretos em águas subterrâneas dos sistemas aquíferos Botucatu e Serra Geral**. São Paulo, 1992. Tese (Doutorado em Ciências), Instituto de Geociências - USP.
- HSU, S. -K.; COPPENS, D.; SHYU, C.T. Depth to magnetic source using the generalized analytical signal. **Geophysics**, 63:1947-1957, 1998.
- IBGE. Carta topográfica da Folha Londrina (SF-22-Y-D), escala 1:250.000, 1977.
- MILANI, E.J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica sul-ocidental**. Porto Alegre, 1997. Tese (Doutorado em Geologia). Instituto de Geociências - UFRGS.
- MILANI, E.J.; RAMOS, V.A. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, 28:473-484, 1998.
- MILLIGAN, P.R.; GUNN, P.J. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17: 63-75, 1997.
- NABIGHIAN, M.N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. **Geophysics**, 37:507-517, 1972.
- NABIGHIAN, M.N. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. **Geophysics**, 39:85-92, 1974.
- NABIGHIAN, M.N. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transform: fundamental relations. **Geophysics**, 49:780-786, 1984.
- PAULIPETRO. **Mapa geológico integrado do Bloco SF-22-U (ACS-74)**, escala 1:250000, Consócio CESP-IPT, 1981.
- PETROBRAS. **Projeto Aerogeofísico Rio Ivaí**, Consócio CESP-IPT, Paulipetro, 1981.
- PORTELA FILHO, C.V. **Condicionamento estrutural-magnético do Sistema Aquífero Serra Geral na região central do Arco de Ponta Grossa e sua conectividade com o Sistema Aquífero Guarani**. Curitiba, 2003. Dissertação (Mestrado em Geologia Exploratória). Departamento de Geologia - UFPR.
- REBOUÇAS, A.C. Potencialidades hidrogeológicas dos basaltos da Bacia do Paraná no Brasil. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XXX. Recife, 1978. **Anais...**, Recife-PE, SBG, p. 1963-1976.

ROSA FILHO, E.F.; SALAMUNI R.; BITTENCOURT, A.V.L. Contribuição ao estudo das águas subterrâneas nos basaltos do estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, 37:22-52, 1987.

ROSTIROLLA, S.P.; ASSINE, M.L.; FERNANDES, L.A.; ARTUR, P.C. Reativação de paleolineamentos durante a evolução da Bacia do Paraná – o exemplo do alto estrutural de Quatiguá. **Revista Brasileira de Geociências**, 30:639-648, 2000.

SOARES, P. C. **Tectônica sinsedimentar cíclica na Bacia do Paraná: controles**. Tese (Professor Titular). Curitiba, 1991. Departamento de Geologia – UFPR.

SOARES, P.C.; ASSINE, M.L. A Sequência Triássico-Jurássica da Bacia do Paraná. In: Encontro sobre sedimentação continental das bacias mesozóicas brasileiras, 1, **Acta Geológica Leopoldinensia**, 36:137 – 138, 1992.

STRUGALE, M. **Arcabouço e evolução estrutural do Arco de Ponta Grossa no Grupo São Bento (Mesozóico): implicações na hidrodinâmica do Sistema Aquífero Guarani e na migração de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná**. Curitiba, 2002. Dissertação (Mestrado em Geologia Exploratória). Departamento de Geologia – UFPR.

TURNER, S.; REGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, S.; E MANTOVANI, M.M.S. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. **Earth and Planetary Science Letters**, 124: 333-348, 1994.

USSAMI, N.; KOLISNYK, A.; RAPOSO, M.I.B.; FERREIRA, F.J.F.; MOLINA, E.C.; ERNESTO, M. Detectabilidade magnética de diques do Arco de Ponta Grossa: um estudo integrado de magnetometria terrestre/aérea e magnetismo de rocha. **Revista Brasileira de Geociências**, 21:317-327, 1991.

ZALÁN, P.V.; WOLF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; NETO, E. V. S.; CERQUEIRA, J. R.; MARQUES, A. The Paraná Basin, Brazil. In: Leighton et al. (coords), **Interior Cratonic Basins. AAPG Memoir**, 51: 681-708, 1990.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Petrobras pela cessão dos dados aeromagnetométricos, à Suderhsa pelos dados hidrogeológicos e hidroquímicos, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo na forma de bolsa de mestrado (CVPF) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processo 452268/2004-4, FJFF).