

IMPORTÂNCIA DO ESTUDO E ANÁLISE DE TECTÔNICA RÚPTIL NA CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI – SAG.

Luiz Amore¹ & Ana Luiza Sabóia de Freitas²

Resumo - Desde os anos sessenta, diversos estudos tectônicos foram efetuados no contexto da Bacia do Paraná, visando à exploração de petróleo, carvão e outros bens minerais ou à história evolutiva da Bacia. Estes estudos foram e são de extrema importância para a consolidação do conhecimento geológico no país. Entretanto, há carência de estudos tectônicos e estruturais que abordem a aspectos ligados à capacidade de armazenamento, transporte e descarga de água subterrânea nas unidades geológicas da Bacia ou que determinem a influência de estruturas no fluxo hidrodinâmico dos aquíferos ou a interconexão entre unidades. O presente trabalho faz uma rápida abordagem sobre a natureza dos estudos tectônico-estruturais e tectônico-estratigráfico-sedimentares executados no contexto da Bacia do Paraná e analisa a importância da tectônica rúptil na caracterização estrutural do Sistema Aquífero Guarani e na determinação de parâmetros de modelagem e de gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Abstract - For the last forty years, many tectonic surveys have been undertaken on the context of the Paraná Intracratonic Basin. These studies focused on the oil, coal and mineral ores exploration or on the geologic history investigation. Despite their great importance to the consolidation of the Brazilian geological knowledge, the surveys were not conduct in order to approach groundwater storage-transport-discharge capacity of the aquifers or to determine the influence of the rock structures on the aquifer hydrodynamic behavior and the connectivity between the geological unities. This work is intended to briefly approach the sort of tectonic-structural-sedimentary studies carried out on the context of the Paraná Basin and to analyse the importance of the brittle tectonics on the characterization of the Guarani Aquifer System – GAS and the determination of the parameters generated either to perform flux models and groundwater resources management of the GAS.

Palavras - chave: Sistema Aquífero Guarani, aquíferos transfronteiriços, tectônica rúptil, tectônica, unidades tectono-sedimentares, sistema de fraturas, Bacia do Paraná.

¹ Agência Nacional de Águas, Setor Policial Sul, Áreas 05, Quadra 03, Bloco L, sala 233 – Brasília-DF, CEP 70.610-200 – Fone: (61) 445-5369 – Fax (61) 445-5354 – e-mail: amore@ana.gov.br e amore@tba.com.br.

² Agência Nacional de Águas, Setor Policial Sul, Áreas 05, Quadra 03, Bloco L, sala 233 – Brasília-DF, CEP 70.610-200 – Fone: (61) 445-5332 – Fax (61) 445-5354 – e-mail: anafreitas@ana.gov.br.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A existência de uma rede de fraturamento influencia de sobremaneira o comportamento hidrodinâmico de aquíferos porosos. Sob condições de saturação, as fraturas são, em geral, caracterizadas pela alta permeabilidade e baixa capacidade de armazenamento. Comparativamente, a matriz porosa da rocha apresenta baixa permeabilidade e alta capacidade de armazenamento. A conectividade da rede de fraturamento terá papel secundário em aquíferos porosos, quando comparado a aquíferos francamente fraturados. No primeiro caso, o sistema fratura-matriz porosa-fratura compensa a baixa conexão entre as descontinuidades, enquanto que no segundo, a interconexão entre as fraturas é responsável pela definição das condições de fluxo [1]. As fraturas funcionam como caminhos preferenciais de contaminantes, nos estágios iniciais de percolação.

A caracterização estrutural no sentido de determinar características hidrodinâmicas e susceptibilidade à contaminação deve ser efetuada em três escalas: i. na escala regional, onde são mapeados os lineamentos mais importantes da bacia e do embasamento e fornece uma indicação do comportamento estrutural da unidade geológica que se pretende estudar; ii. na escala da formação ou unidade específica, onde são mapeadas as estruturas e comportamento estrutural que influenciam o comportamento hidrodinâmico do aquífero em questão e das unidades adjacentes, que possuam influência (recarga indireta) e iii. na escala específica das estruturas, onde é verificado o comportamento hidrodinâmico da rede de fraturas. Os autores indicam seis parâmetros básicos a serem estudados na rede de fratura, com o objetivo de se determinar este comportamento: i. o espaçamento entre as fraturas; ii. a orientação; iii. tamanho; 4. conectividade; 5. abertura e 6. preenchimento, [2]; [3] e [4].

Neste sentido, [5] e [6] efetuaram estudos na escala de meso e micro fraturas, com base na caracterização dos sistemas de fraturamento, por meio de análise estatística e por meio de estudos de imagens de satélite, respectivamente. Estudos de tectônica rúptil são de extrema valia na exploração de águas subterrâneas. Os estudos de [5] e [6] mostraram alta correlação entre a malha hídrica superficial e o sistema de fraturamento Inglaterra/França, enquanto que os estudos de [5] forneceram subsídios para a exploração de águas na região do Tuareg/Nigéria.

O Aquífero Guarani engloba depósitos flúvio-lacustres do período Triássico e eólicos do período Jurássico, inseridos no contexto da Bacia do Paraná (Siluriano - Cretáceo Superior). As condições deposicionais da Bacia do Paraná foram fortemente influenciadas por processos tectônicos, cuja intensidade variou ao longo de sua história geológica. O arcabouço tectônico-estrutural resultante dita a conformação do aquífero Guarani como um todo, porém, mais além, dita o comportamento hidrodinâmico através de padrões de fraturamentos presentes nas unidades do SAG. Entretanto, os estudos tectônico-estruturais executados na Bacia do Paraná não foram focados na determinação da influência que as estruturas exercem sobre o comportamento hidrodinâmico do Aquífe-

ro ou na delimitação das áreas de recarga indireta, mas sim na determinação de ambientes deposicionais.

De forma a responder aos desafios impostos pela necessidade de criação de mecanismos adequados à gestão coordenada das águas subterrâneas, conforme detectado no âmbito da implementação do Projeto Aquífero Guarani (Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai, GEF/Banco Mundial, Organização dos Estados Americanos) foi elaborado por [7] um mapa esquemático pioneiro que apresenta as áreas potenciais de recarga, trânsito e descarga do sistema com base nas informações cartográficas e dados disponíveis sobre o SAG. Sobre este mapa foram plotadas as principais feições tectônico-estruturais anteriormente definidas nos trabalhos executados na bacia do Paraná e abaixo referenciados (Figura 1).

O presente trabalho tem como objetivo mostrar a necessidade de se executar estudos visando à caracterização tectônico-estrutural e tectônico-rúptil das unidades do Sistema Aquífero Guarani - SAG, no sentido de complementar as informações para gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos no contexto do Aquífero Guarani.

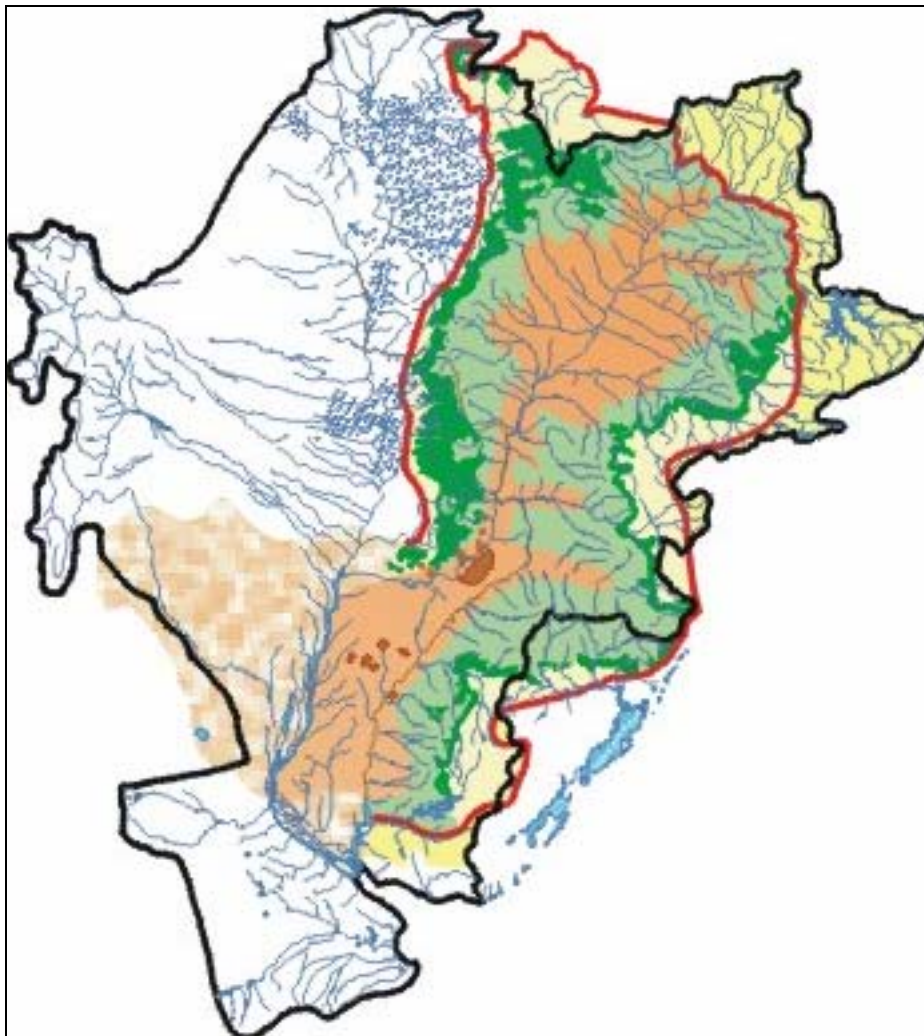


Figura 1: Mapa esquemático do Sistema Aquífero Guarani.

A linha divisória preta indica área de abrangência da Bacia Hidrográfica do Paraná; a área em amarelo escuro corresponde a área potencial de recarga indireta, por água superficial; a área em amarelo claro corresponde a área potencial de recarga indireta, por águas subterrâneas; a área em verde escuro corresponde a área de recarga direta em regime poroso (afloramento do Aquífero Guarani); as áreas em verde claro correspondem a áreas de recarga direta em regime fraturado (basaltos); as áreas em laranja correspondem às áreas potenciais de descarga e a área borrada corresponde a área potencial de descarga, porém de fluxo indefinido. Fonte: [7].

2. ESTUDOS NA BACIA DO PARANÁ

Diversos estudos foram conduzidos no contexto da Bacia do Paraná no âmbito da PETROBRÁS e PAULIPETRO [8], visando a determinação da coluna estratigráfica da bacia e dos ambientes de sedimentação, a fim de se determinar se havia condicionantes para existência de hidrocarbonetos. Outros estudos realizados objetivaram resgatar a história evolutiva da bacia, propondo soluções para a interpretação de sua evolução tectono-sedimentar, os principais eixos de deposição e os ciclos orogênicos envolvidos, [9]; [10]; [11]; [12]; [13]. O conjunto desses trabalhos foi definitivo para a elaboração de uma coluna estratigráfica, para a determinação de seqüências tectono-sedimentares, para a definição dos ciclos orogênicos que condicionaram sua história evolutiva e para a caracterização dos principais lineamentos, arcos e eixos deposicionais.

O pacote sedimentar que representa a Bacia do Paraná constitui a superposição de três bacias diferentes, com limites e geometria variáveis. Este fato se dá em função do movimento das placas tectônicas ao longo da história geológica da bacia. Segundo o autor, a primeira bacia corresponde às seqüências siluriana e devoniana, depositadas em um golfo aberto para o Paleo-Pacífico. A segunda corresponde à uma seqüência permocarbonífera, típica de sinéclise intracontinental, desenvolvida em mar interior. A fase dos derrames corresponde à terceira bacia [14].

As condições deposicionais na Bacia do Paraná, durante o período Paleozóico foram fortemente influenciadas por processos tectônicos que resultaram na formação da grande sinéclise intracratônica de eixo NE. Destacam-se profundas depressões estruturais, que coincidem com os cursos atuais dos rios Paraná e Uruguai. Ao longo do eixo deposicional ocorrem, pelo menos, três centros deposicionais, situados entre a falha de Presidente Epitácio e movimentos relacionados aos lineamentos de Rio Verde, a zona de falhas de Guapira e São Gerônimo-Curiúva e a zona de falhas de Cândido de Abreu e a do rio Piquiri [15].

A migração dos pólos de sedimentação que ocorreu na Bacia do Paraná refere-se a movimentos verticais, relacionados a diferenciações que tiveram lugar no manto inferior, verificadas em perfis construídos a partir de experimentos sísmicos [9]. As primeiras seqüências deposicionais ocorreram sobre aulacógenos, com direção preferencial NW-SE. Com o soergimento do Arco de Assun-

ção (entre o Siluriano e o Devoniano) houve o seccionamento da borda pericratônica com a faixa andina ativa [9]. A formação da Pangea, durante o Carbonífero, provocou soerguimento generalizado do pacote, verificado pelo hiato deposicional neste período. As mudanças dos pólos deposicionais sugerem mudanças de orientação dos campos de esforços atuantes na bacia [16].

Os depósitos eólicos da Formação Botucatu constituem uma das mais expressivas ocorrências de depósitos continentais [17]. O início de sua sedimentação ainda é controverso, mas [10] situaram-no em aproximadamente 150 Ma, com base em datações realizadas na Formação Serra Geral. A Formação Botucatu constitui um grande depósito de sedimentos desérticos, com ausência de períodos mais úmidos, o que define o sistema como eólico seco [18].

O soerguimento dos Andes Meridionais (250 Ma) se dá ao final do período de equilíbrio entre subsidência e soerguimento do Permiano. Em seguida, inicia-se novo soerguimento do arco de Ponta Grossa (210 Ma). Em seguida a um período de predominância de clima desértico, quando ocorreu a deposição dos arenitos da Formação Botucatu, ocorrem novos soerguimentos térmicos, que resultaram em vastos derrames basálticos (150 Ma) [9]. O soerguimento das bordas da Bacia do Paraná se deu durante a separação dos continentes Sul-Americano e Africano (110 Ma), ainda sob efeito do soerguimento dos Andes. [9] propuseram mapa que evidencia a estruturação da Bacia do Paraná nas direções NE e NW, localmente E-W, tendo como base elementos estruturais (lineamentos, zonas de fratura e cisalhamento). [19] sugere que processo de compartimentação pode ser mais pronunciado, inclusive com o preenchimento de falhas por diques de basalto. A característica tectônica mais marcante na Bacia do Paraná são estruturas do tipo arco, alongadas, que marcam os limites da bacia e distinguem lineamentos tectônicos que a cortam, desde seu limite leste, em direção ao seu depocentro [20].

Três eventos distensivos são reconhecidos ao longo da história geológica da Bacia do Paraná [11]. Um primeiro datado de 440 Ma, um segundo, mais importante, ocorrido no Permiano e um terceiro, associado ao vulcanismo que resultou na Formação Serra Geral, dominado por forte componente térmica, sendo sua maior contribuição à geração de lavas.

O arcabouço geológico resultante da conformação da Bacia do Paraná (zonas de falha, arqueamentos, etc.) aumenta a importância dos processos de intercomunicação entre os horizontes das seqüências estratigráficas [21].

3. DISCUSSÃO

O breve resumo descrito no item anterior deixa claro que, apesar de longe de estarem esgotados, os estudos tectônico-estratigráficos e tectônico-estruturais na Bacia do Paraná já elucidaram muito sobre as direções e variações ao longo do tempo geológico das calhas de deposição, as direções dos lineamentos principais que influenciaram os processos de sedimentação, os principais ci-

dos orogenéticos e as principais direções dos esforços que resultaram nos processos tectônicos de grande escala verificados na Bacia.

Sob este aspecto, pode-se dizer que já existem elementos para uma primeira abordagem de um estudo para caracterização de escala regional, conforme sugerido por [2]. Entretanto, muito há por ser feito nas escalas de unidade geológica e na escala das estruturas de forma a caracterizar as estruturas e processos da tectônica rúptil, tanto singenética quanto neotectônica.

Estudos na linha de caracterização de sistemas de fraturamento na escala dos arenitos do Aquífero Guarani e da Formação Serra Geral fornecerão subsídios para a compreensão da arquitetura do SAG, determinação da interconexão entre blocos, dinâmica de fluxo entre o basalto e o arenito e extensão das áreas de recarga indireta.

Um estudo mais detalhado, de caracterização das fraturas, indicará parâmetros a serem incluídos em modelos de fluxo e determinará qual geração de fraturas pode estar preenchida, seja por diques de basalto, seja argilominerais. Vale mencionar que os modelos de fluxo hidrodinâmico elaborados para o Aquífero Guarani não necessariamente dão peso à influência de micro e meso fraturas na velocidade da água e na interconexão entre unidades, sendo, portanto, incompletos.

As tentativas de definição do SAG carecem de uma abordagem sistêmica do regime de fluxo, capaz de definir quantitativamente e qualitativamente subsistemas aquíferos na esfera do SAG e suas inter-relações. A gestão sustentável dos recursos hídricos do SAG e de outros aquíferos brasileiros depende do conhecimento profundo da tectônica rúptil, que condiciona o armazenamento e transporte das águas subterrâneas, a fim de se elaborar modelos de gestão mais precisos.

4. CONCLUSÕES

O nível de conhecimento tectônico da Bacia do Paraná está fortemente associado as litofácies sedimentares, incluindo os estudos de paleofauna e flora. Entretanto, os estudos de evolução tectônica desenvolveram-se, fundamentalmente, em função das necessidades de exploração e exploração de hidrocarbonetos e carvão, além de minerais radioativos, subsidiariamente. Deste modo, apesar da importância da linha de pesquisas executadas no âmbito da Bacia do Paraná, há carência de estudos sobre caracterização da tectônica rúptil e sua importância na acumulação e transporte da água subterrânea no SAG. A plena caracterização do sistema hidrogeológico da Bacia do Paraná, em termos de recarga, trânsito e descarga da água no SAG depende do desenvolvimento de estudos na área da tectônica rúptil. Fundamentalmente, é necessário aprofundar os estudos das direções, estruturas geradas e da condutividade hidráulica, de forma a permitir a adequada modelagem do SAG e fornecer subsídios para gestão sistêmica dos recursos do aquífero, de forma sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NEUNHÄUSERER, I.; HEMMINGER, A.; HELMIG, R. (1999). *Influence of Fracture – Matrix – Interaction on Flow and Transport Processes and the Resulting Effective Parameters in Fractured Porous Systems*. Proceedings of XXVIII IAHR congress, Graz, Austria.
- [2] WEALTHALL, G.P.; KUEPER, B.H.; LERNER, D.N. (1999). *Fractured rock-mass characterization for predicting the fate of DNAPLS*. Proceedings of XXVIII IAHR congress, Graz, Austria.
- [3] ABBEY, D.G.; ALLEN, D.M. (1999). *Fracture zones aquifer testing, and scale effects: considerations in fractured bedrock aquifers of southwestern British Columbia*. Proceedings of XXVIII IAHR congress, Graz, Austria.
- [4] KEARL, P.M.; ROEMER, K.; ROGOFF, E.B. (1998). *Characterization of a fractured aquifer using the colloidal borescope*. Advances in Environmental Research, 3 (1): 49-57.
- [5] BALL, E. (1980). *An example of very consistent brittle deformation over a wide intracontinental area: the late Pan-African fracture system of the Tuareg an Nigerian shield*. Tectonophysics, 61: 363-379.
- [6] BEVAN, T.G.; HANCOCK, P.L. (1986). *A late Cenozoic regional mesofracture system in southern England and northern France*. Journal of the Geological Society, 143: 355-362.
- [7] AMORE, L.; VARGAS, F.P.H.; OLIVEIRA, W.A. 2001. Mapa Esquemático do Sistema Aquífero Guarani Como Contribuição à Gestão. In: Anais , II Simpósio Paraguaio de Geologia e III Simpósio Paraguaio de Águas Subterrâneas e Perfuração de Poços. Assunção, Paraguai.
- [8] MILANI, E.J.; FRANÇA, A.B.; SCHNEIDER, R. (1994). *Bacia do Paraná*. B. Geoci. PETROBRÁS, Rio de Janeiro, 8(1): 69-82.
- [9] FULFARO, V.J.; SAAD, A.R.; SANTOS, M.V.; VIANNA, R.B. (1982). *Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Parná*. Revista Brasileira de Geociências. 12 (4): 590-611.
- [10] FULFARO, V.J.; SAAD, A.R.; PERINOTTO, J.A.J.; ETCHEBEHERE, M.I.C. (1997). *Paraná Basin: Mineral resource potentials in Brazil, Uruguay and Paraguay*. International Geology Review. Vol. 39, p. 703-722.
- [11] QUINTAS, M.C.; MANTOVANI, M.S.M.; ZALAN, P.V. (1999). *Contribuição ao Estudo da Evolução Mecânica da Bacia do Paraná*. Revista Brasileira de Geociências, 29(2):217-226.
- [12] ASSINE, M.L.; SOARES, P.C.; MILANI, E. (1994). *Seqüências tectono-sedimentares meso-paleozóicas da Bacia do Paraná, sul do Brasil*. Revista Brasileira de Geociências. 24(2): 77-89.
- [13] VITORELLO, I.; PADILHA, A.L. (2000). *Mapping of Electrical Conductivity on the Torres Syncline Hinge, Southeastern Paraná Basin*. Revista Brasileira de Geociências. 30(3): 535-537.

- [14] ZALAN, P.V.; WOLF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T. (1990). *Bacia do Paraná*. Origem e evolução das Bacias Sedimentares. Petrobrás. In: *Contribuição ao Estudo da Evolução Mecânica da Bacia do Paraná*. Revista Brasileira de Geociências, 29(2):217-226.
- [15] ARAUJO, L.M.; FRANÇA, A.B.; POTTER, P.E. (1999). *Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in Paraná and Chaco-Paraná basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA*. Hydrogeology Journal, 7:317-366.
- [16] TURNER, S.P.; REGELORES, M.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C.J.; MANTOVANNI, M.S.M. (1994). *Magmatism and continental break-up in the South-Atlantic: high precision ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology*. Earth and planetary Sciences Letters. In: *Contribuição ao Estudo da Evolução Mecânica da Bacia do Paraná*. Revista Brasileira de Geociências, 29(2):217-226.
- [17] ALMEIDA, F.F.M. (1954). *Botucatu, um deserto triássico da América do Sul*. DNPM, Div. Geol. Min. Notas Prel. E Estudos, vol. 86, 21 pp. In: *Eolian dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in southernmost Brazil: morphology and origin*. Sedimentary Geology 137 (2000) 63-84.
- [18] SCHERER, C.M.S. (2000). *Eolian dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in southernmost Brazil: morphology and origin*. Sedimentary Geology 137 (2000) 63-84.
- [19] ROSA FILHO, E.F.; HINDI, E.C.; XAVIER, J.M. (2001). Effects of structural features on groundwater withdraw from the Guarani Aquifer System – Paraná State, Brazil.
- [20] CORDANI, U.G.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A.; PORTO, R.; THOMAS FILHO, A.; CUNHA, F.M.B. (1984). *Estudo Preliminar de integração do pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares Brasileiras*. Revista Ciência Técnica Petróleo. N. 15. Petrobrás, CENPS, CINTEP. 70p.
- [21] REBOUÇAS, A.C. (2000). *Aqüífero Guarani, características gerais e potenciais*. Secretaria de Recursos Hídricos – Ministério do Meio Ambiente, Brasília – Nota técnica.