

Análise de fraturas dos basaltos do Aquífero Serra Geral e o potencial de recarga regional do Sistema Aquífero Guarani

A. J. Fernandes, F. de Assis Negri, J. M. Azevedo Sobrinho e C. Varnier

Instituto Geológico – SMA, Av. Miguel Stefano, 3900, CEP 04301903, São Paulo, Brazil
ameliajf@igeologico.sp.gov.br
negri@igeologico.sp.gov.br
claudia.varnier@igeologico.sp.gov.br
zemia@igeologico.sp.gov.br

RESUMO

O Instituto Geológico, pertencente à Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, está realizando pesquisa, em escala regional, sobre o fluxo vertical de água subterrânea nos basaltos do Aquífero Serra Geral (ASG), pois este interfere na recarga dos arenitos do Sistema Aquífero Guarani (SAG) subjacentes e, conseqüentemente, na sua disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. A área de estudo corresponde ao afloramento do ASG, em região de importantes centros urbanos do Estado de São Paulo. Foram empregados os seguintes métodos: (1) trabalhos de campo, com ênfase na caracterização de estruturas verticais tectônicas e os campos de esforços que as geraram; e (2) tratamento dos dados estruturais coletados, para identificação de eventos tectônicos rúpteis e sua influência no fluxo de água subterrânea. Um aspecto importante do trabalho de campo foi a distinção entre fraturas de resfriamento e fraturas tectônicas, pois somente estas tem potencial de atravessar as camadas vesiculares dos basaltos que, de outra forma, constituem barreiras hidráulicas regionais para o fluxo vertical e para a conexão entre os aquíferos. Foram identificados três eventos tectônicos transcorrentes, que geraram fraturas conjugadas híbridas, as quais, por envolverem extensão, além de cisalhamento, como modos de propagação, são potencialmente favoráveis ao fluxo. Feições diagnósticas sugerem que, na porção sul da região estudada, o fluxo de água ocorre preferencialmente ao longo de fraturas N70-80W e N60-80E e, secundariamente, ao longo das N20W e N20E; na porção norte, o fluxo se dá segundo fraturas N15W e N5-10E; e na porção intermediária, ao longo de N40-65W.

Palavras-chave: Aquífero Serra Geral, basalto, fraturas, Sistema Aquífero Guarani, tectônica

Analysis of fracturing in the basalts of the Serra Geral Aquifer and the potential regional recharge of the Guarani Aquifer System

ABSTRACT

The Geological Institute, belonging to the Ministry for the Environment of the State of São Paulo, is currently undertaking regional research into vertical groundwater flow through the basalts in the Serra Geral Aquifer (ASG), which influences recharge of the sandstones in the underlying Guarani Aquifer System (SAG) and therefore the quantity of groundwater available and its susceptibility to pollution. The study area corresponds to the outcropping region of the ASG, an area of the state of São Paulo that contains important urban centres. The methods used included: (1) field work, focused on characterizing the vertical tectonic structures and the stresses responsible for their origin; and (2) an analysis of the structural data collected, aimed at identifying brittle tectonic events and their influence on groundwater flow. Distinguishing between cooling and tectonic fractures is a relevant aspect of the field work as only the tectonic events are capable of cutting across the vesicular beds, which otherwise form a barrier against vertical flow and block any connection between the aquifers. Three tectonic strike-slip events have been identified, each having generated hybrid tectonic fractures, which, because they involve extension as well as shearing, potentially favour flow. Diagnostic features suggest the occurrence in the south-western zone of the study area of preferential flow along fractures in the direction N70-80W and N60-80E, and secondary ones trending N20W and N20E; in the northeastern zone there is flow along secondary fractures in the direction N15W and N5-10E and in the central zone N40-65W.

Key words: basalt, fractures, Guarani Aquifer System, Serra Geral Aquifer, tectonics

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction and methods

We describe here the initial results of the project known as FRATASG II. Our aim is to identify the fracture zones that cut across the whole stack of basalt lava flows in the Serra Geral Aquifer (ASG) and presumably allow a significant vertical flow, which facilitates recharge of the sandstones in the underlying Guarani Aquifer System (SAG). The research is being undertaken over the whole area where basalts crop out in the central region of the State of São Paulo, roughly between the cities of São Carlos-Araraquara and Avaré (Fig. 1). The groundwater associated with sandstones of the GAS has been heavily exploited for public use in important urban centres and, as the deep recharge only accounts for 3.5% of the whole (Barreto et al., 2010), the existence of recharge through the basalts close to the area where the sandstones crop out is an important issue, as it influences both the availability of the GAS groundwater resources and their susceptibility to pollution.

Our methods have included field work, focused on characterizing the vertical tectonic structures and the stresses responsible for their origin, and a subsequent analysis of the structural data collected, aimed at identifying brittle tectonic events and their influence on groundwater flow. Distinguishing between cooling and tectonic fractures is a relevant aspect of the field work as only the tectonic events are capable of cutting across the vesicular beds, which otherwise form a barrier against vertical flow and block any connection between the aquifers (Fernandes et al., 2011) (Fig. 2). Due to the mechanical behaviour of the vesicular zones it may be assumed that only the largest fractures are capable of cutting across the whole stack of basalts, which, in the region in question usually encompass from one to three basalt floods. As described in the literature (Ferril et al., 1999; Fernandes & Rudolph, 2001; Morin & Savage, 2003; Morin et al., 2006), the chronology of the tectonic events, each associated with a specific field stress, is prone to influence the preferential flow pathways. The superimposition of the events was deduced from the interaction among the fractures generated by different deformation events. Other features observed in outcrops, such as more intense weathering, water seepage and the existence of green vegetation along specific fractures, are considered to be diagnostic of more intense flow and may indicate the pathways for groundwater at greater depth. An analysis of the structural data collected allowed us to identify the brittle tectonic events and their superimposition.

Results and discussion

The basalts and intertrapp sandstones, together with the underlying Botucatu and Pirambóia sandstones and the overlying Bauru Group sandstones and mudstones, have been affected by three strike-slip tectonic events, the maximum principal stresses (σ_1) of which, from the oldest to the youngest were around N45-55E (the eNE event), N60-80W (the eWNW event) and N15-25E (the eNNE event). The letter "e", in the name of the events (as in eNE), refers to "event", and the direction that comes right after (NE), refers to the direction of the maximum principal stress (σ_1). Each tectonic event was responsible for the generation of two main fracture trends, which correspond to conjugate fractures, as can be seen in certain outcrops. We have verified the adjustment of these conjugate fracture trends to those found in each outcrop stereogram, where conjugate patterns were not clearly observed. This analysis showed that the most intense activity was related to the eWNW event, whilst the eNE activity, although less intense, appears to have been slightly stronger than that of the eNNE. An event very similar to the eWNW, that is, within a strike-slip regime and with a NW strike of σ_1 , is broadly described in the literature for São Paulo State and its vicinities. The youngest activity of this stress field is regarded as dating to the Quaternary (Riccomini, 1989; Fernandes & Amaral, 2002, among others). A strike-slip event similar to eNE is also described by the same authors, and another one, similar to eNNE, is described by Fernandes and Amaral (2002), according to whom the eNE and eNNE events are pre-Neocenoic and Quaternary (younger than eWNW) respectively. The predominant hybrid character of the conjugate fractures corresponding to the identified strike-slip events is indicated by the values of 2θ , as it varies on the whole between 30° and 45° (Figs 3, 4 and 5). As the propagation of hybrid fractures involved stretching as well as shearing, significant flows along the conjugate fractures might be expected.

The greater the cohesion of the sandstones the wider the 2θ angle between the sub-vertical conjugate fractures. For hard intertrapp sandstones, the 2θ angle is around 70-75° (Figs 3, 6A and 6B) and for loose Botucatu sandstones (Fig. 6C) the fractures appear to be orthogonal. Fractures propagating downward in the Pirambóia Formation (Fig. 7) suggest that the sandstones become concomitantly looser with depth.

Apart from the structures related to the strike-slip events, two major fractures generated in an extensional tectonic regime, trending from N30E to N75E and from N15W to N60W and dipping at a medium angle, have been recognised (Fig. 8). Evidence such as interaction between the fractures of both trends and the fact that they are orthogonal suggests that a single extensional event could have generated both of them. In this case the directions of the minimum principal stress (σ_3) and the intermediate one (σ_2) must have switched over time. The strike variation of each major trend is implied in a significant variation in strikes σ_2 and σ_3 and is explained by the distances between the geographic positions where the data were collected. The fact that the

extensional event appears not to influence the flow, as no diagnostic features are related to its medium-angle fractures, suggests that this is older than the strike-slip deformations, and it has in fact been reported in the literature that possibly only the most recent deformations control the flow.

Diagnostic features referred to above, such as more intense weathering, water seepage and the existence of green vegetation along specific fractures (Fig. 9), suggest that in the southern area of the study region groundwater flows preferentially along N70-80W and N60-80E striking fractures, and secondarily along N20W and N20E ones; in the northern area the flow tends to be more intense along N15W and N5-10E striking fractures, and in the intermediate area along N40-65W ones. The N70-80W flows, on the one hand, and N60-80E and N40-65W, on the other, can be related to extensional fractures and to the hybrid conjugate pair respectively, belonging to the eWNW event (Figs 4 and 5C); the N15W and N5-10E flows are probably related to the hybrid fractures of the eNNE event (Figs 4A and 4B). This suggests that in any specific area one of these two events, depending upon the intensity with which it affects that region, controls the direction of the preferential flow. The vertical fractures seen cutting through the vesicular zones trend in the same directions as the tectonic fractures in the dense basalt within the same outcrop (Fig. 9A).

The data collected until now in the FRATASG II project indicate that the conceptual groundwater flow model drawn for the Ribeirão Preto region, in the north-east of São Paulo State and that proposed by the FRATASG I project (Fernandes et al., 2010 and 2011; Wahnfried, 2010) is also valid for the region studied here. According to this model, horizontal fractures of varying lateral extents, usually occurring close to basalt flood contacts, correspond to preferential flow pathways; the model also indicates that the vesicular basalt layers constitute regional hydraulic barriers against vertical flow and also hamper connection between the SGA and the GAS. Nevertheless, this barrier may well be overcome by local sub-vertical fracture zones caused by strike-slip events, where their activity was more intense, which cut across the whole stack of basalt floods. The presence of fewer basalt floods would favour this situation. A reasonable hypothesis is that densely fractured tectonic zones are not to be seen in the vesicular layers because they would be prone to undergo intense weathering and would not be preserved at the surface as outcrops. It is proposed that the eWNW event, the event showing the most intense activity in the region, is the one that most probably links the SGA with the GAS, particularly when its fractures cut intertrapp sandstones and vesicular basalt layers.

Introdução

Importantes cidades paulistas, como Ribeirão Preto, Araraquara, São Carlos, Jaú e Bauru, usam o Sistema Aquífero Guarani (SAG) como fonte de água, e estão localizadas em uma faixa onde os basaltos da Formação Serra Geral possuem espessura média de, aproximadamente, 100 m. O entendimento do fluxo vertical através desta camada interfere tanto na disponibilidade hídrica, quanto na vulnerabilidade à poluição do SAG. Assim, o estudo da recarga do SAG através dos basaltos é de suma importância para o planejamento da exploração deste aquífero, pois, apesar dos seus arenitos apresentarem condutividade hidráulica (K) elevada e permitirem caudais de exploração elevados, as baixas taxas de recarga, em sua área de afloramento, e o possível confinamento exercido pelos basaltos, mesmo em áreas muito próximas ao afloramento do contato entre basaltos e arenitos, apontam para a não sustentabilidade de explorações intensas das suas águas.

O projeto FRATASG (coordenado pelo Instituto Geológico), que investigou a existência de recarga do SAG através dos basaltos do Aquífero Serra Geral (ASG), concluiu, a partir de investigações hidrogeológicas (ensaios de bombeamento e de traçadores), químicas e isotópicas, que, a recarga através de basaltos com espessura média de 100 m, em pequena área inserida no município de Ribeirão Preto, é inexistente ou muito

baixa. Atualmente, o projeto FRATASG II, cujos primeiros resultados são aqui apresentados, tem como objetivo indicar, com base em dados de geologia estrutural, as estruturas que potencialmente tem fluxo vertical significativo e que devem seccionar toda a pilha de basaltos, chegando ao SAG. Consequentemente, tais estruturas tem o potencial de promover recarga do SAG. O estudo está sendo realizado em escala regional, na área de afloramento do Aquífero Serra Geral, adjacente ao afloramento dos arenitos do SAG (formações Botucatu e Pirambóia), entre as cidades de Itaipava, a sul, e Borborema e Araraquara, a norte (Figura 1). Supõe-se que a recarga do SAG através do ASG, quando existente, deve acontecer localmente e através de zonas de fraturas tectônicas de mergulhos elevados, que seccionam toda a pilha de derrames basálticos. Isto é mais provável de ocorrer ao longo de zonas de fratura de maior envergadura e onde a pilha de basaltos é menos espessa e apresenta, no máximo, dois ou três derrames. O número de derrames é importante, pois, como concluído no projeto FRATASG, as camadas vesiculares, presentes nos contatos entre basaltos, constituem uma barreira para o fluxo vertical regional, uma vez que desfavorecem a propagação de fraturas verticais. Assim, quanto menos camadas vesiculares estiverem presentes, maior é a chance de ocorrência de fraturas verticais contínuas.

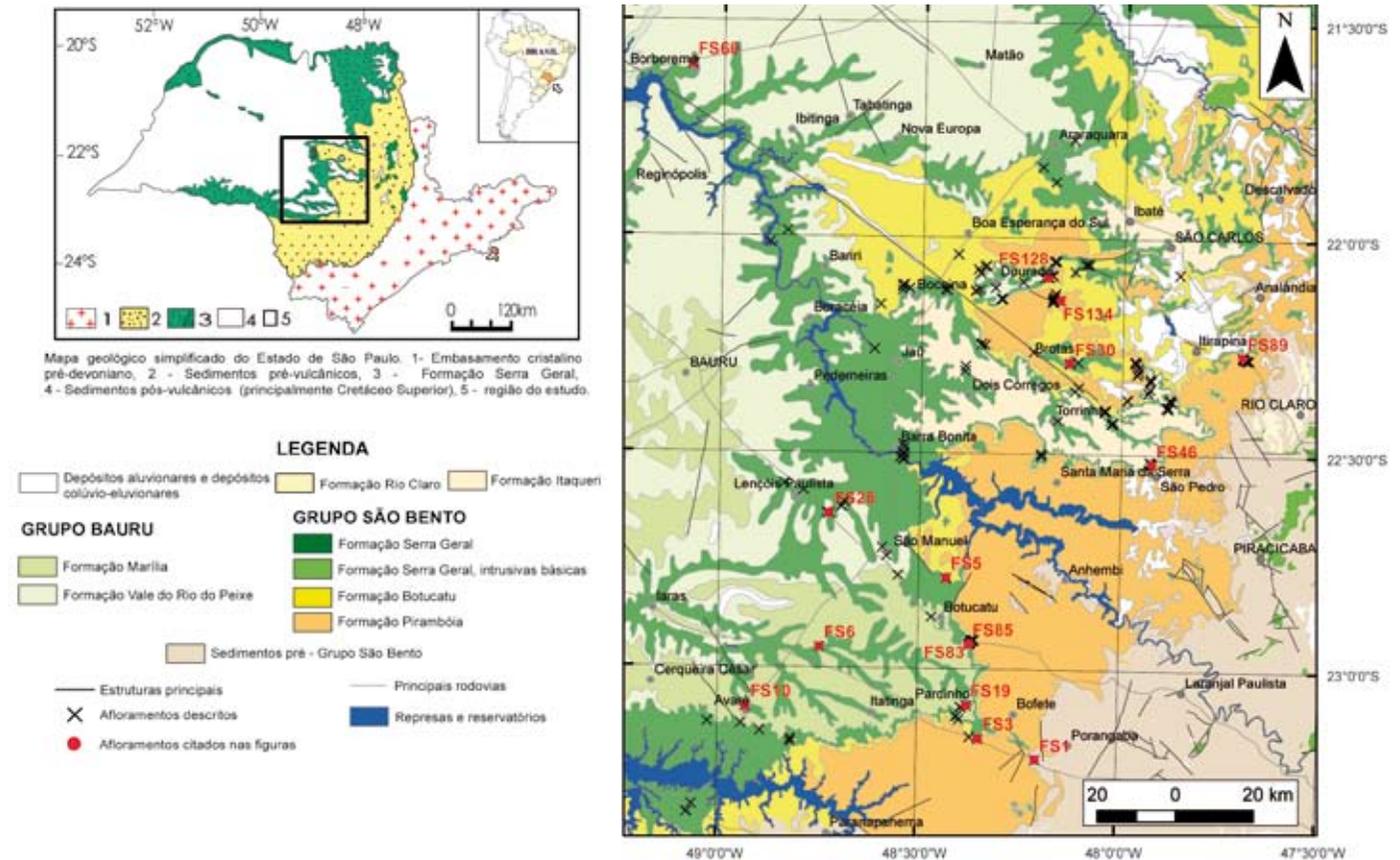


Figura 1. Localização e mapa geológico regional da área de estudo, e afloramentos descritos.

Figure 1. Location and regional geological map of the study area together with the outcrops described.

Geologia regional e hidrogeologia

No Estado de São Paulo, os basaltos da Formação Serra Geral (Eocretáceo) sobrepõem-se à Formação Botucatu (Jurássico-Cretáceo) e esta, à Formação Pirambóia (Permo-Triássico) (Figura 1).

A Formação Botucatu consiste de arenitos quartzosos finos a grossos, bem selecionados e arredondados, com estratificações cruzadas de grande porte, indicando deposição em ambiente eólico desértico (Almeida, 1954). Localmente intercalam-se sedimentos mais finos de ambiente lacustre.

A Formação Serra Geral, na área de estudo, é diretamente recoberta pelas seguintes unidades: Formações Vale do Rio do Peixe e Marília (Neocretáceo), pertencentes ao Grupo Bauru; Formação Itaqueri (Neocretáceo-Paleógeno), na região de Brotas; e depósitos aluvionares e colúvio-eluvionares, mais expressivos na região de Itirapina (Figura 1). A Formação Vale do Rio do Peixe é composta por arenitos finos a muito finos, intercalados com siltitos ou lamitos arenosos; a Formação Marília, em sua ocorrência na borda leste do Estado, onde está inserida a área de estudo, é composta pelo Membro Echaporã, que é constituído

por arenitos finos a médios, com intercalações de lamitos e arenitos lamíticos, e conglomerados e arenitos conglomeráticos, todos com cimentação, nódulos e crostas carbonáticas (Fernandes e Coimbra, 2000).

A Formação Itaqueri compõe-se de arenito síltico, muito fino a grosso, eventualmente silicificado, além de folhelho e conglomerado (Figura 1). Os depósitos aluvionares e colúvio-eluvionares distinguem-se do Grupo Bauru por ser frequente a presença de nível basal de acumulação de clastos de quartzo, quartzitos e diversos tipos de concreções limoníticas, e por conterem fragmentos de carvão vegetal dispersos a até 6 metros de profundidade e grande quantidade de magnetita (Sinelli, 1971; Melo, 1995).

A sequência de derrames da Formação Serra Geral, como citado em Milani (2004), beira os 2000 m no depocentro das lavas, situado na região do Pontal do Paranapanema. No poço de Cuiabá Paulista os basaltos alcançam espessura de 1700 m (Almeida, 1986). Esta formação pertence à Província Magmática do Paraná (PMP), que ocorre nas regiões sul e sudeste do Brasil, uma das maiores províncias de basaltos continentais do mundo, cuja colocação precedeu a abertura do Atlântico Sul, com a fase principal de atividade

vulcânica entre 133 e 130 Ma (de acordo com síntese de Nardy *et al.*, 2008). Esta província constitui-se principalmente de rochas vulcânicas e intrusivas (diques e soleiras) basálticas de natureza toleítica (Cordani e Vandoros, 1967, Melfi *et al.*, 1988; Marques e Ernesto, 2004).

A transmissividade do Aquífero Serra Geral (ASG) varia de 1 a $9,5 \times 10^{-4}$ m²/s e a porosidade efetiva de 1 a 5% (DAEE 1979, *apud* Fernandes *et al.*, 2007); as capacidades específicas situam-se, principalmente, entre 0,16 e 2,89 m³/h/m (Fernandes *et al.*, 2007). Medições feitas durante testes de perda d'água, forneceram valores de permeabilidade de 10^{-3} a 10^{-4} m/s, para as zonas de contato entre os derrames e juntas e falhas associadas (Rebouças 1978, Nakao *et al.*, 1983) e ao redor de 10^{-8} cm/s para as fraturas verticais (Rebouças 1978). Quadros *et al.* (1991) e Tressoldi *et al.* (1990) realizaram testes em furos de apenas 12 m de profundidade, perfurados em pacote de derrames com alguns poucos metros de espessuras individuais de basaltos muitos fraturados e de elevadas K; demonstraram que, nas escalas de 15 e 40 m, o escoamento é dado essencialmente por contatos e fraturas sub-horizontais, interligados por descontinuidades sub-verticais de Ks menores ou de baixa densidade.

Em estudo de detalhe próximo a Ribeirão Preto, em local onde a espessura dos basaltos é de cerca de 100 m, Wahnfried (2010) demonstrou, através de perfilagens (acústicas e de temperatura e condutividade da água) e ensaios hidráulicos com obturadores, que no ASG a circulação preferencial ocorre ao longo de fraturas mais transmissivas horizontais que se localizam em profundidades de até cerca de 50 m; as fraturas verticais de resfriamento, por serem numerosas, atuam como porosidade primária, promovendo um maior armazenamento. As análises químicas e isotópicas, junto com as perfilagens e ensaios hidráulicos, indicam que a influência de recarga recente no ASG restringe-se aos 25 m, a partir da superfície, e que o fluxo de água nos basaltos concentra-se nos primeiros 50 m de profundidade; portanto, a recarga do SAG através do ASG, no local é inexistente ou não significativa (Wahnfried, 2010). Desta forma, os basaltos, com espessura da ordem de 100 m ou maior, funcionam, regionalmente, como barreira hidráulica para o fluxo vertical. No entanto, o projeto FRATASG II, tem como objetivo averiguar, com base em dados de geologia estrutural, a possibilidade de existência de recarga através de estruturas verticais tectônicas de maior envergadura no local de sua ocorrência. Isto assume maior importância quando se nota que, na área de afloramento do SAG, a recarga profunda, que pode efetivamente recarregar o SAG, é reduzida

a 3,5% da precipitação anual, para a bacia-piloto do Ribeirão da Onça (Barreto *et al.* 2010).

Tipos de estruturas presentes nos basaltos e sua potencial influência sobre a recarga do Sistema Aquífero Guarani

A recarga do Sistema Aquífero Guarani através dos basaltos do Aquífero Serra Geral deve ocorrer por meio de fluxo vertical, ao longo de fraturas que seccionem os basaltos Serra Geral e atinjam os arenitos Botucatu. A porção central de cada derrame, constituída de basalto denso, contém abundantes fraturas verticais, geradas por resfriamento. No entanto, como verificado em campo (Figura 2), as camadas vesiculares-amidaloidais, que ocorrem na base e no topo de cada derrame, apresentam fraturas de pequena continuidade, ou seja, sem potencial de formar uma rede conectada de fraturas que permitam um fluxo vertical contínuo. É notável que tais camadas, no topo de cada derrame, possam atingir até metade da espessura total deste. Fraturas horizontais de maior ou menor continuidade ocorrem com mais

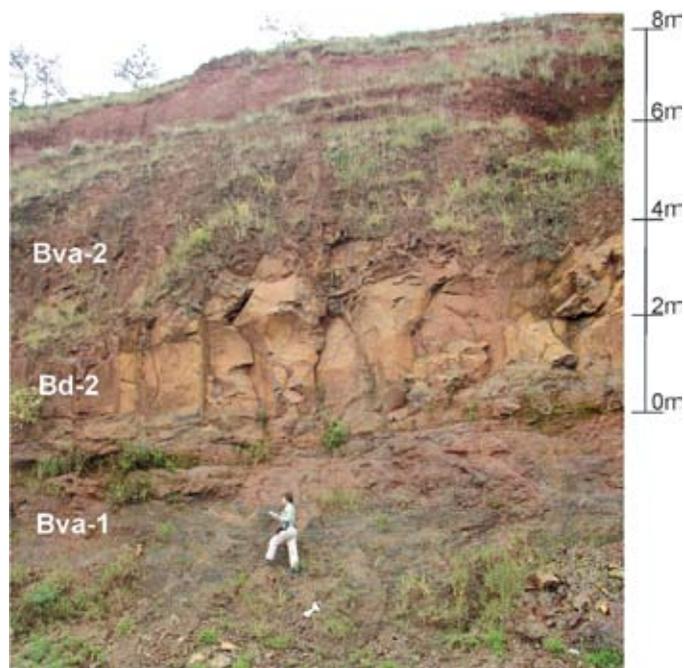


Figura 2. Neste afloramento (FS85) observa-se a camada vesicular de um derrame inferior (Bva-1) e as camadas de basalto denso (Bd-2) e vesicular (Bva-2) de um derrame superior. A escala mostra que Bd-2 e Bva-2 apresentam espessura semelhante (ao redor de 4 m cada uma). Fraturas verticais cortam a camada Bd-2, desde a base até o topo, mas não estão presentes nas camadas vesiculares.

Figure 2. Outcrop FS85, containing a vesicular bed (Bva-1) of the lowest lava flow and dense basalt (Bd-2) and vesicular beds (Bva-2) of the uppermost flow. The thicknesses of Bd-2 and Bva-2 are similar (about 4m each). Vertical fractures cut through Bd-2 from top to bottom, although they do not intrude into the vesicular beds.

frequência, mas não exclusivamente, próximo aos contatos entre derrames e constituem os caminhos preferenciais de fluxo dos basaltos (Fernandes *et al.*, 2010 e 2011). Estas características fazem parte da zonalidade típica de basaltos já descrita por Leinz em 1949. Assim, conclui-se que, em basaltos, o fluxo vertical encontra restrições importantes, pois as fraturas verticais de resfriamento restringem-se à porção central de basalto denso. A causa disto é que, durante o resfriamento, a abundância de espaços preenchidos por fases líquidas e gasosas não permite a propagação de fraturas nas camadas vesiculares. O preenchimento por fases sólidas (mineralização) de tais espaços ocorre em fases tardias do resfriamento ou mesmo em períodos posteriores e distantes deste; é importante ressaltar que parte dos espaços permanece não mineralizada e, por serem locais de dissipação de esforços, faz com que haja, nas camadas vesiculares, muito menos fraturas que nas camadas de basalto denso. Apesar disto, atividade tectônica e posterior ao resfriamento apresentaria potencial de gerar redes interconectadas de fraturas que seccionem toda a pilha de basaltos, e por este motivo, o estudo de conexão entre aquíferos deve focar a identificação de estruturas de origem tectônica.

Estudar a tectônica que atuou sobre basaltos defronta-se com a questão de distinguir fraturas formadas como resultado do resfriamento, que ocorrem em grande quantidade, daquelas formadas posteriormente, pela atuação de esforços tectônicos. As fraturas verticais dos basaltos podem ser divididas em dois tipos: as que delimitam e as que não delimitam colunas. Quando as fraturas verticais delimitam colunas, tendo em geral distribuição isotrópica, a gênese por resfriamento é inequívoca.

Por outro lado, considera-se que a origem tectônica, como descrito em Fernandes *et al.* (2011), é indicada pelas seguintes feições:

- (1) Padrões de fraturas conjugadas;
- (2) Zonas de fraturas subparalelas e com *trends* bem definidos, por vezes anastomosadas, indicando que o cisalhamento foi o mecanismo de sua propagação, e distribuídas em faixas estreitas, em geral com largura de centímetros a decímetros;
- (3) Fraturas de maior continuidade que se propagam dos níveis de basalto denso para os níveis B-VA, pois, de acordo com a zonalidade normal dos basaltos, as fraturas verticais de resfriamento tendem a não cortar o B-VA;
- (4) Fraturas que se propagam em camadas de arenito intertrappe, por vezes bem desenvolvidas e com *trend(s)* direcional(is) bem definido(s).

A presença de *slickensides*, com estrias de atrito e degraus (*steps*) perpendiculares, indica a atuação de es-

forços tectônicos, tanto em estruturas originalmente de resfriamento como as geradas por esforços tectônicos.

Métodos

Os métodos empregados foram os seguintes:

- (1) *Realização de trabalhos de campo*. A visita e descrição de afloramentos, em geral boas exposições verticais, presentes nas estradas que seccionam as escarpas das cuevas basálticas e pedreiras, enfatizou a verificação da estratigrafia local dos derrames de basalto e a identificação de zonas de fraturas, principalmente das sub-verticais. Estas últimas, quando se propagam nos arenitos das formações Botucatu e Pirambóia e nos basaltos vesiculares, são as que tem maior potencial de promover a conexão vertical entre os vários derrames de basaltos e destes com os arenitos sotopostos. Foi dada ênfase à observação e registro de feições que indicam a possível origem das fraturas, se de resfriamento ou tectônica, bem como a padrões tectônicos que permitam a identificação da atuação de eventos tectônicos (fraturas conjugadas e estrias de atrito) e a orientação dos esforços relacionados. A cronologia relativa dos eventos deformacionais foi estabelecida com base nas relações de superposição entre fraturas. Tal cronologia tem influência sobre os caminhos preferenciais de circulação de água subterrânea, como descrito na literatura (Banks *et al.*, 1994, Barton *et al.*, 1995, Ferril *et al.*, 1999, Fernandes y Rudolph 2001, Morin y Savage, 2003, Morin *et al.*, 2006). Também foram observadas feições que indicam fluxo preferencial ao longo de determinadas fraturas, tais como, alteração acentuada, presença de vegetação e saídas de água.
- (2) *Tratamento dos dados de análise geológica estrutural*. Os dados das fraturas foram analisados da seguinte forma: (a) identificação dos eventos tectônicos atuantes na área a partir da análise de afloramentos com padrões de fraturas conjugadas; (b) elaboração de estereogramas para os afloramentos em que as observações de campo indicavam que as estruturas eram, no geral, tectônicas; (c) comparação dos *trends* estruturais principais dos estereogramas com as direções médias das fraturas conjugadas dos eventos tectônicos identificados; (d) verificação dos eventos tectônicos mais atuantes com base nos dados obtidos nas etapas precedentes.

O presente trabalho apresenta os resultados relativos à aplicação dos métodos descritos acima, no

conjugados de fraturas subverticais estão muito bem definidos, como se pode notar na Figura 3, e a posição do ângulo agudo entre eles (2θ), que varia de 40° a 70° , indica esforço máximo principal (σ_1) de direção N45-55E; relações de superposição mostram que é

anterior ao eWNW (Figura 4). As fraturas conjugadas deste último fazem um ângulo 2θ de 30° . Em basalto denso alterado (afloramento FS8), foram observadas fraturas provavelmente conjugadas de eWNW com σ_1 ao redor de N60W, mas com um ângulo 2θ bem

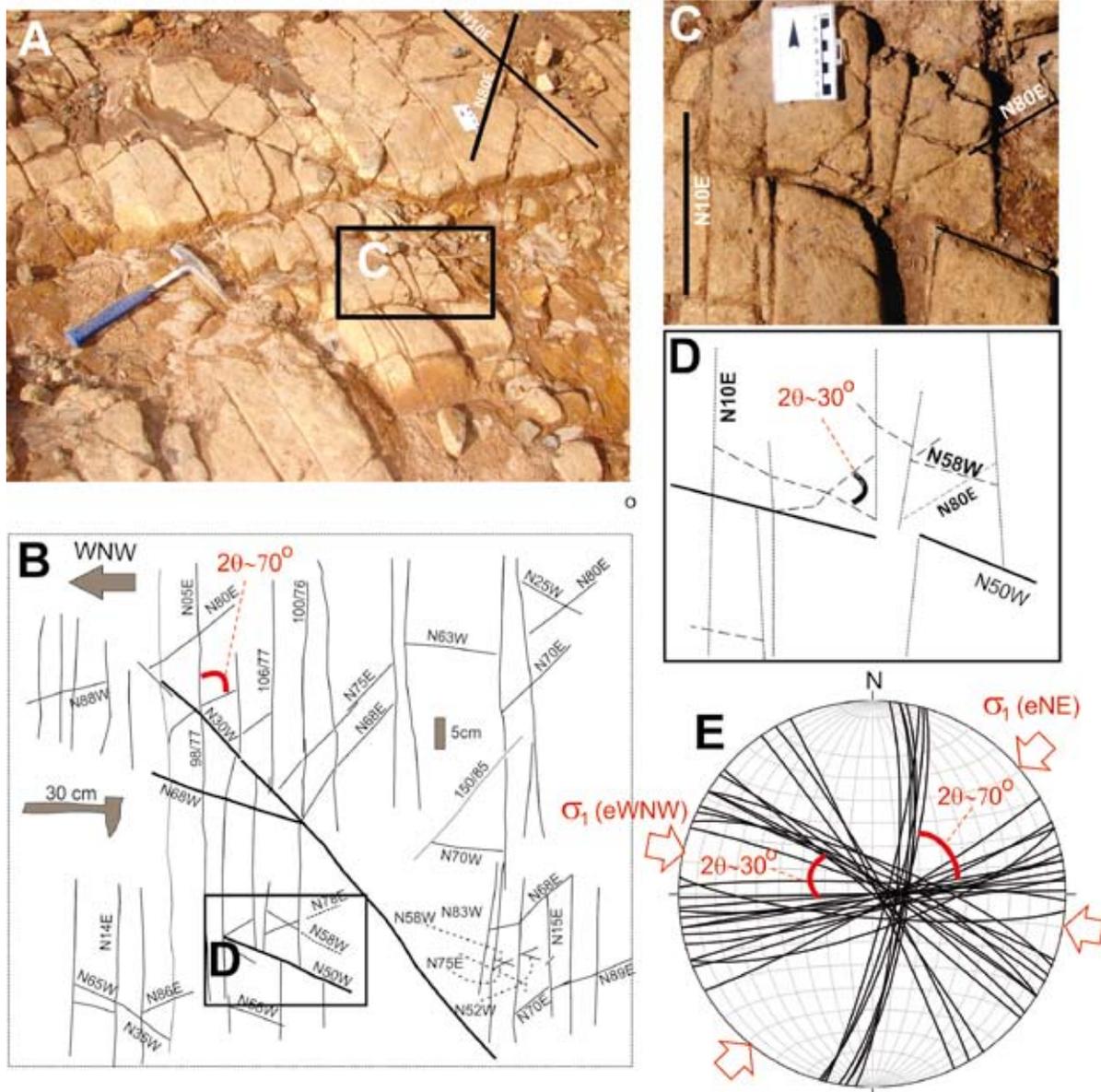


Figura 4. A, B) Foto e desenho do afloramento FS134 (basalto denso) mostrando as fraturas conjugadas subverticais (ao redor de N10E e N80E) do evento transcorrente eNE. C) Detalhe de A. D) Detalhe de B. E) Estereograma das fraturas conjugadas de eNE e eWNW, mostrando σ_1 de direção N50E e N78W, respectivamente, bem como os ângulos 2θ em torno de 70° e 30° . As fraturas conjugadas subverticais do evento eWNW (linhas tracejadas em D) terminam nas fraturas NNE (linhas contínuas e finas em D) do evento eNE, mostrando que este é mais antigo que o primeiro. As fraturas NNE do evento eNE são mais jovens que algumas fraturas NW (linhas mais espessas em B e D), pois aquelas terminam nestas, que, por sua vez, podem representar ou fraturas de resfriamento ou fraturas tectônicas de evento anterior ao eNE.

Figure 4. A, B) Photograph and drawing of outcrop FS134 (dense basalt), depicting subvertical conjugate fractures (around N10E and N80E) of the ENE strike-slip event; C) Detail of A; D) Detail of B; E) Stereogram of the ENE and eWNW conjugate fractures, showing σ_1 trending N50E and N78W respectively, as well as 2θ of about 70° and 30° . The subvertical conjugate fractures of the eWNW strike-slip event (dashed lines in D) abut onto the NNE fractures (fine solid lines in D) of the ENE event, indicating that the former are younger. The NNE fractures of the ENE event are younger than some of the NW fractures (thick lines in B and D), as the former abut onto the latter. The NW fractures may represent either cooling or older tectonic fractures.

maior, ao redor de 80°. Também há sugestão de conjugados (*trends* N30-40W e N60-75W), com $\sigma_1 \sim$ N50W (FS133) e 2θ em torno de 30°. A superposição de fraturas NE ou ENE, mais longas, e fraturas NW, mais curtas e terminando nas NE, em arenitos intertrappe (Figura 3), relacionáveis aos eventos eNE e eWNW, respectivamente, corrobora a relação cronológica identificada no FS134.

O terceiro evento transcorrente, denominado eNE, apresenta σ_1 de direção N15-25E e 2θ em torno de 45°, tendo sido caracterizado em basalto denso dos afloramentos FS30 e FS66. No FS66, o movimento deduzido de três planos estriados (critério do tipo “planos de cisalhamento de Riedel”, em Angelier, 1994) é coerente com os esforços deduzidos dos conjugados eNE (Figura 5). No FS30, o padrão conjugado foi bem caracterizado em afloramento horizontal. Neste local, fraturas de direção ao redor de EW formam um *trend* claro, sendo bastante retilíneas e mais contínuas que as dos conjugados do eNE. O *trend* EW é correlacionável principalmente ao evento eWNW, portanto esta relação sugere que o evento eNE é posterior ao eWNW. Esta ordenação cronológica corrobora a indicada por Riccomini (1997) para a tectônica deformadora da Bacia Bauru, onde identifica um evento mais antigo com σ_1 ao redor de EW (próximo ao do eWNW) e um mais novo com σ_1 ao redor de eNE (próximo ao do eNE). Além disso, a ordenação aqui sugerida, ou seja, eNE, eWNW, e eNE, do mais antigo para o mais jovem, é coerente com a sequência de eventos do Terciário e Quaternário descritos na literatura (Fernandes e Mello, 2004) para a região de Campinas, onde afetam gnaisses e granitos pré-cambrianos, rochas sedimentares permo-carboníferas e sedimentos neogênicos. Os eventos que afetam os basaltos e unidades sobrepostas possivelmente não são correlacionáveis àqueles que afetam rochas mais antigas, como as de Campinas, pois entre eles ocorrem os arenitos Botucatu e Pirambóia, que, em apresentando baixa coesão, não transmitiriam os esforços para os basaltos, resultando em um desacoplamento mecânico entre as unidades. No entanto, os campos de esforços e ordenação cronológica semelhantes sugerem que alguns fatores (p.ex., maior coesão dos arenitos, situados a maiores profundidades; existência de diques de diabásio, que cortem as unidades de rochas sedimentares sotopostas aos basaltos) poderiam favorecer a transmissão dos esforços.

Nos arenitos, intertrappe ou Botucatu, nota-se uma relação clara entre a coesão e o ângulo 2θ de fraturas subverticais conjugadas. Nos arenitos intertrappe do FS6 (Figura 3), onde a coesão é elevada (os arenitos são duros e não friáveis), o ângulo 2θ entre fraturas conjugadas é menor que 60°. No FS83 (Figura 6A e B),

onde também se observa uma boa coesão, o ângulo agudo entre as duas direções (N10-20E e N70W), apesar de ser maior, localiza-se claramente no quadrante NW, sendo possivelmente relacionado ao evento eWNW, apesar de haver rotação considerável com relação ao σ_1 daquele evento. Já em arenitos em que a coesão é baixa (são friáveis), como é o caso do FS46,

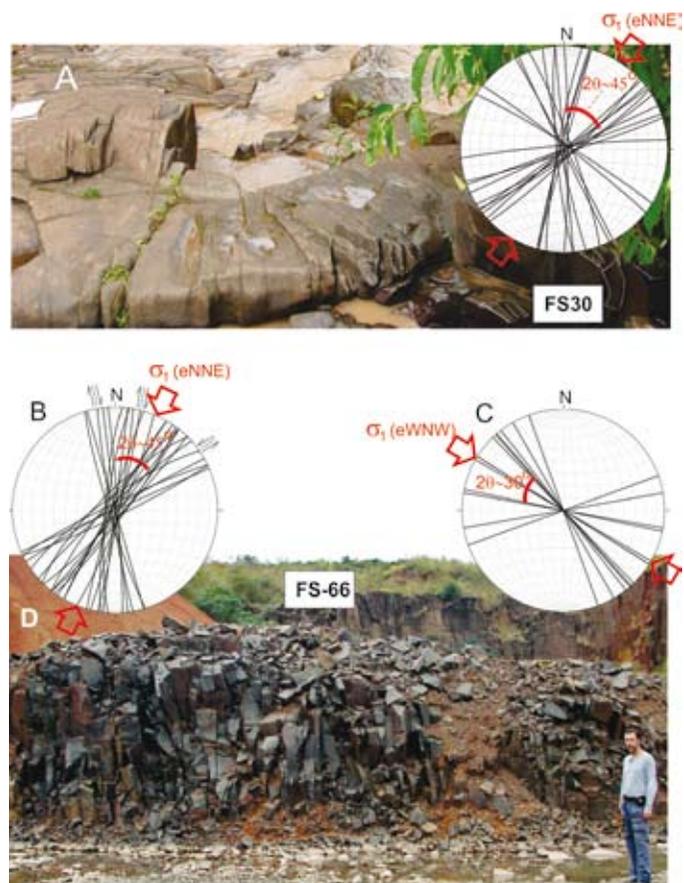


Figura 5. A, B) Fraturas conjugadas, do evento transcorrente eNE, indicando σ_1 de direção N15-25E e 2θ em torno de 45° (basalto denso dos afloramentos FS30 e FS66). A) Fraturas com espaçamento centimétrico relacionadas ao evento eNE e respectivo estereograma (FS30). B) Estereograma das fraturas com espaçamento centimétrico medidas na parede do afloramento FS66 (foto D); o movimento deduzido de três planos estriados (critério do tipo “planos de cisalhamento de Riedel”, em Angelier, 1994) é coerente com os esforços deduzidos dos conjugados eNE. C) Fraturas com espaçamento centimétrico e anastomosadas relacionadas ao evento eWNW e medidas no chão da pedreira do FS66.

Figure 5. A, B) Conjugate fractures pertaining to the ENNE strike-slip event, indicating a N15-25E strike σ_1 and 2θ of around 45° (dense basalt in outcrops FS30 and FS66); A) Closely spaced (cm) fractures of the ENNE event and their stereogram (FS30); B) Closely spaced (cm) fractures measured in a vertical wall of outcrop FS66 (photo D); movement deduced from three striated planes (Riedel’s shear-planes criterion, in Angelier, 1994) consistent with the direction of movement deduced for the principal stresses associated with the conjugate fractures of the ENNE event. C) Closely spaced (cm) anastomosing fractures related to the EWNW event, as measured on the floor of FS66.

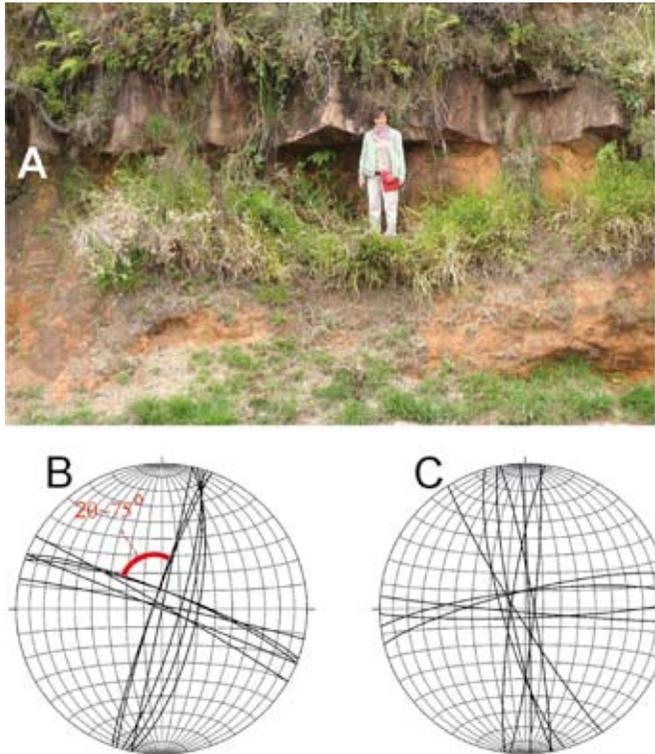


Figura 6. A, B) *Trends* de fraturas subverticais ao redor de N10-20E e N70W em arenitos intertrappe (FS83) com ângulo agudo (entre 70 e 80°) no quadrante NW, indicando σ_1 em torno de N25W, ou seja, rotacionado cerca de 30° com relação ao de evento eWNW. C) *Trends* ao redor de N20E-10E e N85W-N80E em arenito Botucatu (FS46); o posicionamento do ângulo agudo a partir do estereograma não é seguro, pois 2θ é próximo a 90°, e as fraturas podem ser correlacionáveis tanto ao eWNW como a algo intermediário entre o eNE e eNNE.

Figure 6. A, B) *Subvertical* N10-20E and N70W trending fractures in intertrapp sandstones (FS83) forming an acute angle of 70°-80° in the NW quadrant, indicating a σ_1 of around N25W, i.e. rotated by 30° compared to the s_1 of the eWNW event; C) N20E-10E and N85W-N80E trending fractures in Botucatu sandstone (FS46); the positioning of the acute angle according to the stereogram is not certain as 2θ is close to 90°, and the fractures may be related either to the eWNW event or to an intermediate one between ENE and ENNE.

os dois *trends* de fraturas subverticais presentes (N20E-10E e N85W-N80E, Figura 6C) formam ângulo próximo a 90°, não sendo possível relacioná-los a um dado evento tectônico. Este comportamento sugere que conforme a coesão aumenta, maior é o coeficiente de atrito interno, resultando em maior inclinação da envoltória de Mohr-Coulomb, e conseqüentemente, menor o ângulo 2θ . Fraturas ENE seccionam os arenitos Pirambóia no FS1 (Figura 7), e podem ser correlacionáveis ao evento eNE. É interessante que as fraturas se aprofundam cerca de 2 m, a partir da atual superfície do terreno, indicando que, neste local, a coesão dos arenitos diminui com a profundidade.

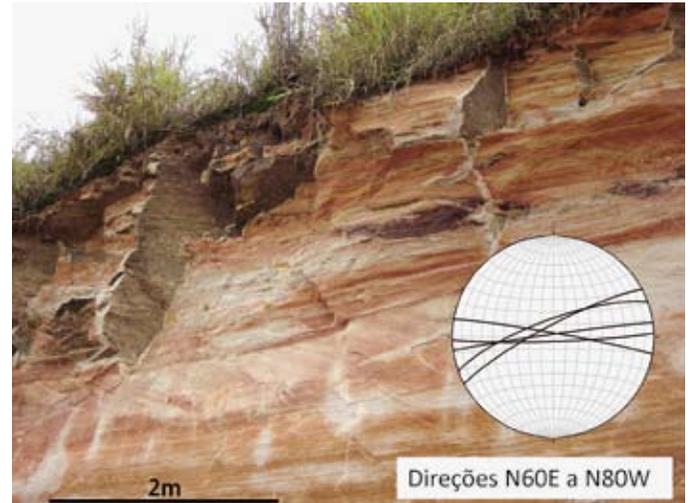


Figura 7. Arenitos Pirambóia do FS1 em que predomina o trend ENE, correlacionável ao evento eNE ou eWNW. A propagação de fraturas é de cima pra baixo e aprofunda-se cerca de 2 m a partir da atual superfície do terreno. Isto pode indicar que a coesão dos arenitos, no momento da propagação, diminuía com a profundidade.

Figure 7. Pirambóia sandstones in FS1 affected by the ENE trending fractures, related either to the ENE or eWNW event. The fractures are propagated downward up to 2 m from the present surface of the terrain, which may indicate that at the time of the propagation the cohesion of the sandstone decreased concomitantly with the depth.

Com relação às rochas (arenitos, conglomerados, lamitos) do Grupo Bauru (Neocretáceo), sobrepostas aos basaltos, foi verificado bom ajuste ao evento eNNE com σ_1 em torno de N35E; a associação de fraturas subverticais indica σ_1 em torno de N75E, sendo correlacionáveis ao eNE; e *trends* de fraturas NW, possivelmente relacionadas ao eWNW (direções N20-40W e N65-80W).

Dos 146 afloramentos visitados, 35 apresentam algum tipo de padrão tectônico, tal como: (1) predominância nítida de algum ou alguns intervalos de direções, (2) zonas em que fraturas de um dado intervalo de direções apresentam espaçamento centimétrico a decimétrico, (3) fraturas conjugadas, e (4) fraturas em *echelon*.

Os estereogramas dos afloramentos foram comparados com as direções médias das fraturas conjugadas dos eventos tectônicos claramente identificados nos seis afloramentos mencionados acima, para verificar o grau de ajuste com tais eventos, se parcial, bom ou muito bom. Dos 35 afloramentos com algum tipo de padrão tectônico, verificou-se ajuste com pelo menos um dos três eventos tectônicos; em geral, foi constatado ajuste com dois dos eventos e, ocasionalmente, com os três eventos. Ajuste bom ou muito bom foi verificado em 19 afloramentos para o evento eWNW; nove, para o eNE; e sete, para o eNNE.

Ajustes parciais foram verificados em oito, quatro e cinco, para os eventos eNE, eWNW e eNNE, respectivamente. Assim, nota-se que o evento tectônico que atuou mais intensamente na área é o eWNW. O eNE e o eNNE, tiveram intensidade semelhante, mas um pouco maior para o primeiro. É notável que Fernandes (1997) e Fernandes e Amaral (2002) concluíram que o evento, por eles denominado de eNW, de idade Quaternária, e correlacionável ao eWNW, descrito aqui, também é o de atuação mais intensa na região de Campinas. Evento transcorrente Quaternário com σ_1 NW também é descrito em outras regiões do Estado (Riccomini, 1989, Hasui *et al.*, 1995) e mesmo em Minas Gerais (Mello, 1997). No entanto, é importante notar que campo de esforços semelhante atuou também do Neocretáceo, manifestando-se ao longo de alinhamentos de direções NNW e WNW (Riccomini 1997) que se dispõem nas proximidades dos contatos aflorantes entre arenitos Botucatu e basaltos Serra Geral.

O método de análise de ajustes aos eventos, bem caracterizados em alguns afloramentos, revelou-se bastante significativo. Duas observações são importantes:

- O método é aplicável quando as comparações são feitas afloramento por afloramento, pois as variações de direções, associadas a um dado evento,

de um para outro afloramento, fazem com que não sejam identificados *trends* nítidos, quando as fraturas de vários afloramentos são plotadas em um mesmo estereograma;

- Os estereogramas, resultantes de medições independentes, realizadas por pessoas diferentes e em setores distintos dos afloramentos, mostraram, na maioria dos casos, a presença dos mesmos *trends* e ajustes, indicando que estes não são fortuitos.

Além das fraturas subverticais associadas aos eventos transcorrentes, também foram identificadas fraturas de mergulho intermediário ou intermediário a alto que sugerem campos de esforços compatíveis com evento(s) extensional(is), ou seja, σ_1 vertical e σ_3 horizontal.

Um único evento extensional, em que as direções de σ_2 e σ_3 são alternadas no tempo, é indicado pela presença de dois grupos de fraturas ortogonais ou quase ortogonais, com mergulho intermediário, que aparecem como estruturas contemporâneas no FS19, em que, durante determinado período de tempo, σ_3 apresenta direção N25E, e em outro, N75W (Figura 8); em outros afloramentos observam-se um ou dois grupos de fraturas de mergulho intermediário ou intermediário a alto indicando σ_3 de direções próximas àquelas do FS19 (Figura 8). Caputo (1995) descreve

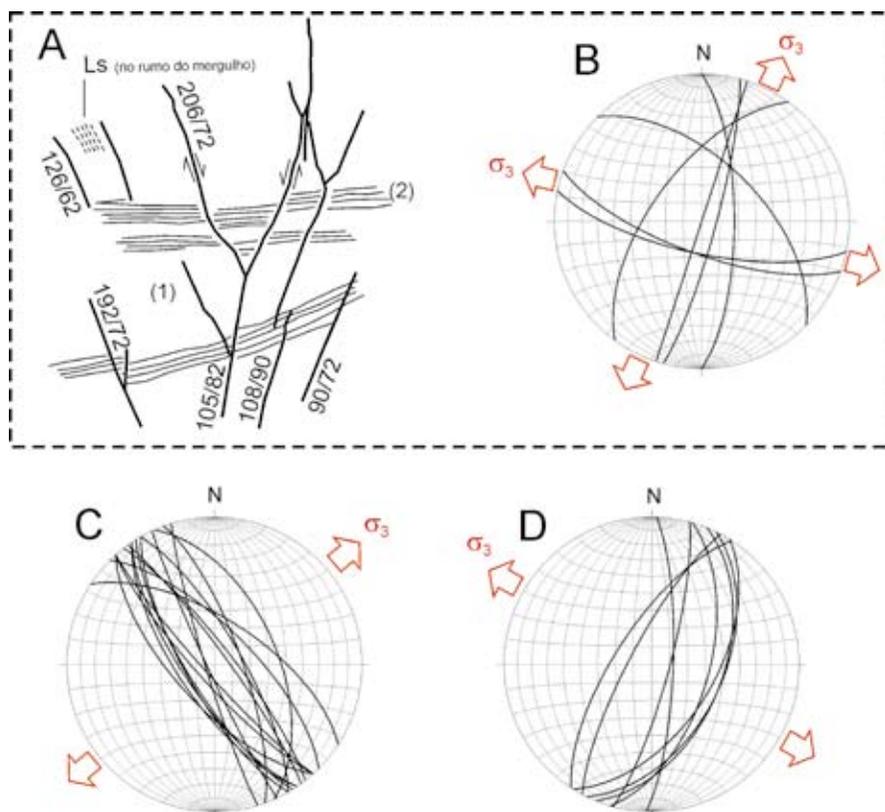


Figura 8. A, B) Dois grupos de fraturas (afloramento FS19), mergulhando cerca de 60°, ortogonais ou quase ortogonais e contemporâneos, indicando a atuação de um único evento extensional em que as direções de σ_2 e σ_3 são alternadas no tempo. Assim, em um determinado período de tempo σ_3 apresenta direção N25E, e em outro, N75W. O FS19 é constituído de basalto muito alterado (1) com camadas de veios brancos (silica) subparalelos (2). C, D) No afloramento FS128 dois grupos de fraturas de mergulho ao redor de 70°, indicam σ_3 de direções próximas às do FS19.

Figure 8. A, B) In outcrop FS19 two contemporaneous orthogonal, or almost orthogonal, fracture sets, dipping around 60°-70°, indicate the activity of a single extensional event in which the directions of σ_2 and σ_3 alternate over a period of time to time. Thus, during a certain period of time σ_3 is around N25E, and during another it is around N75W. Outcrop FS19 consists of weathered basalt (1) containing subparallel white (silica) veins (2); C, D) In outcrop FS128 two fracture sets, dipping around 70°, indicate σ_3 directions similar to the ones in FS19.

mecanismo que seria responsável por este tipo de alternância de esforços. Não foi possível estabelecer a relação cronológica entre as fraturas de ângulo intermediário com as subverticais dos eventos transcorrentes.

Como realçado acima, as camadas de basaltos vesiculares, que são mais espessas nos topos de cada derrame basáltico, constituem barreiras para o fluxo vertical, pois nelas as fraturas verticais contínuas são muito ocasionais e devem estar presentes, de forma significativa para o fluxo vertical, apenas em locais de ocorrência de zonas de fratura de maior envergadura, como concluído por Fernandes *et al.* (2011). Esta conclusão está de acordo com o que se observou na área de estudo, pois uma quantidade significativa de fraturas em basalto vesicular foi observada em apenas

um afloramento; estas apresentam os mesmos *trends* das fraturas do basalto denso no mesmo afloramento (Figura 9A).

Análise das feições diagnósticas de fluxo

O fluxo de água preferencial ao longo de determinados grupos de fraturas, nos afloramentos visitados, é indicado por feições chamadas de diagnósticas tais como: faixas de alteração intempérica pronunciada com relação ao grau de alteração observado na rocha adjacente à(s) fratura(s); presença de vegetação situada apenas ao longo da(s) fratura(s); saída de água ao longo da(s) fratura(s). A Figura 9, ilustrando esta situação, mostra estereogramas em que se notam direções preferenciais de circulação de água; os dados,

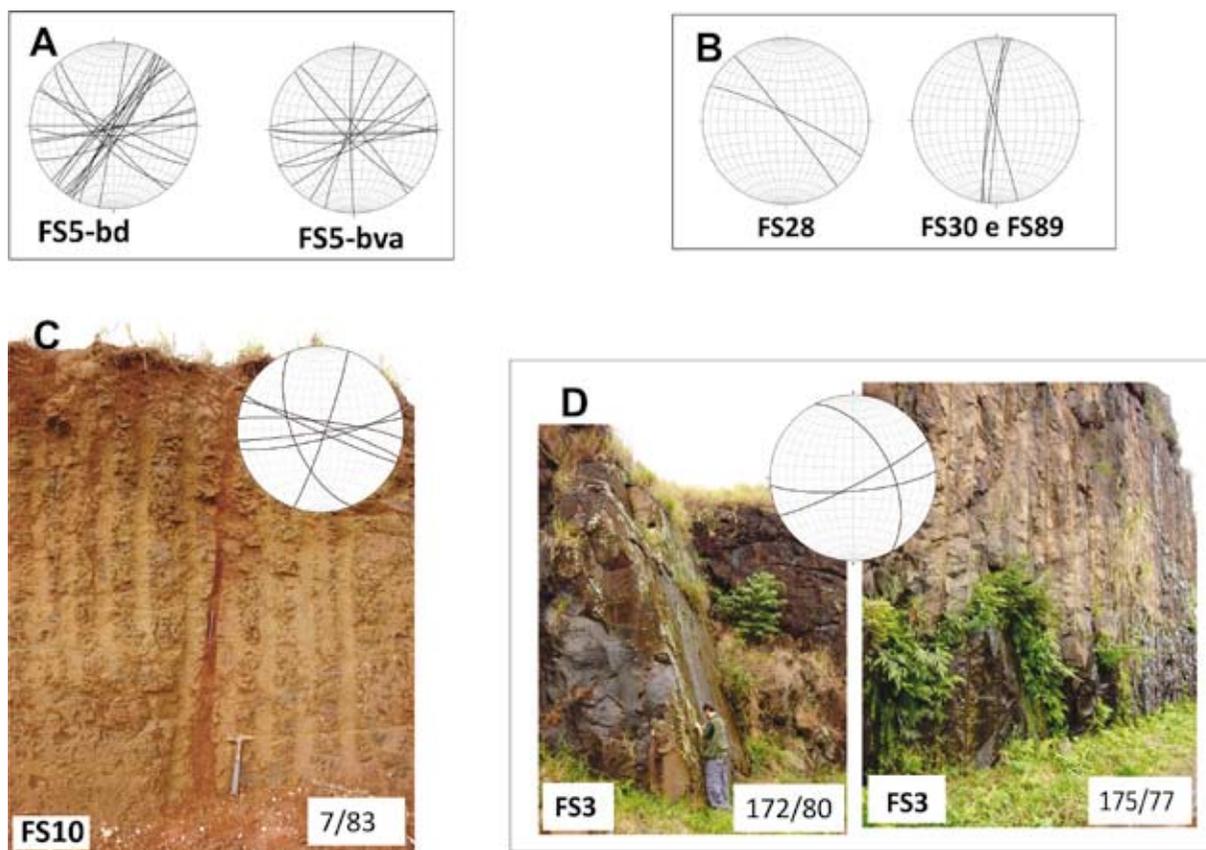


Figura 9. A) Fraturas em basalto vesicular (FS5-bva) apresentam os mesmos *trends* que o basalto denso (FS5-bd). C, D, E) Feições, tais como intemperismo, saídas de água e presença de vegetação, existentes ao longo de determinadas fraturas (em fotos e em estereogramas), sugerem direções preferenciais de fluxo de água subterrânea. Para a porção sul da região estudada, junto às cidades de Avaré e Pardinho, as feições diagnósticas relacionam-se, principalmente, às direções N70-80W e N60-80E e, subordinadamente, às direções em torno de N20W e N20E (FS3 e FS10); na porção norte da região estudada (próximo a Brotas e Ribeirão Bonito), associam-se às direções N15W e N5-10E (FS30 e FS89), e na porção central (Lençóis Paulista), ao intervalo N40-65W (FS28).

Figure 9. A) Fractures in the vesicular basalt (FS5-bva) show the same trends as in the dense basalt (FS5-bd); B, C, D, E) Features, such as weathering, seepage and green vegetation along some specific fractures, both in the photos and stereograms, suggest preferential directions of groundwater flow. In the southern zone of the study area, close to the cities of Avaré and Pardinho (FS3 and FS10), these features are mainly related to the N70-80W and N60-80E trending fractures and to a lesser degree the N20W and N20E ones; in FS30 and FS89, close to cities of Brotas and Ribeirão Bonito the northern zone of the study area, they are related to the N15W and N5-10E fractures; and in FS28 in the central zone, close to the city of Lençóis Paulista, to N40-65W trending fractures.

apesar de serem em número limitado, indicam que tais direções variam em função da posição geográfica. Assim, para a porção sul da região estudada, junto às cidades de Avaré e Pardinho (Figura 1), as feições diagnósticas relacionam-se, principalmente, às direções N70-80W e N60-80E e, subordinadamente, às direções em torno de N20W e N20E. Por outro lado, na porção norte da região estudada (próximo a Brotas e Ribeirão Bonito), associam-se às direções N15W e N5-10E, e na porção intermediária (Lençóis Paulista), ao intervalo N40-65W. As direções N70-80W, N60-80E e N40-65W são relacionáveis às fraturas provavelmente híbridas, ou seja, a sua gênese envolveu cisalhamento e extensão (Dunne y Hancock, 1994), do evento eWNW; as direções N15W e N5-10E são relacionáveis a fraturas, também provavelmente híbridas, do eNNE, sugerindo que são estes os eventos que controlam as direções preferenciais de fluxo com maior ou menor intensidade, dependendo da porção geográfica da região estudada. O caráter híbrido pode ser deduzido a partir do ângulo 2θ entre fraturas conjugadas, sendo que, quando o ângulo está próximo a 60° , é provável que as fraturas tenham sido geradas apenas por cisalhamento; ângulos menores que 50° já indicam que as fraturas tenham sido geradas pelos dois mecanismos, cisalhamento e extensão, ou seja, as híbridas devem ser mais abertas do que as propagadas apenas por cisalhamento. Para os eventos tectônicos transcorrentes atuantes na área, em alguns afloramentos, foram verificados ângulos de 30° ou 70° , para o eWNW, 40° , 50° ou 70° , para o eNE, e 45° , para o eNNE. Isto mostra que é de se esperar que fraturas híbridas, relacionadas a esses eventos, sejam comuns na região, e permitam um fluxo mais intenso de água subterrânea.

Conclusões

Os basaltos e os arenitos intertrappe intercalados, bem como as unidades sotopostas, arenitos Botucatu e Pirambóia, e sobrepostas, Grupo Bauru, são afetados por três eventos tectônicos transcorrentes com esforço máximo principal (σ_1), do mais antigo para o mais jovem de direção: N45-55E (evento eNE); N60-80W (evento eWNW); e N15-25E (evento eNNE). Através da análise dos ajustes parciais das direções principais dos eventos tectônicos identificados com os trends constantes dos estereogramas, concluiu-se que o evento de atividade mais intensa corresponde ao eWNW, sendo que o eNE tem atuação ligeiramente mais intensa que o eNNE.

Os três eventos descritos, bem como a sua cronologia relativa, correlacionam-se a eventos terciários e quaternários, descritos na literatura. É importante en-

fatizar que campo de esforços semelhante ao eWNW gerou desde feições tectônicas do Neocretáceo até estruturas quaternárias, estas descritas em várias áreas da porção oriental do Estado de São Paulo, além de regiões do Estado de Minas Gerais.

Além das estruturas relacionadas aos eventos transcorrentes, foram reconhecidos dois grandes grupos de fraturas de médio ângulo geradas em regime tectônico extensional. Apesar de terem sido reconhecidos dois grupos de direções (entre N30E e N75E e entre N15W e N60W), algumas evidências (ortogonalidade dos grupos de fraturas e relações de superposição) sugerem um único evento extensional, em que as direções dos esforços principais mínimo (σ_3) e intermediário (σ_2) tenham se alternado ao longo do tempo. Neste caso, é necessário que tenha havido variação, por vezes significativa, na orientação dos esforços horizontais, σ_2 e σ_3 , em função da posição geográfica.

As camadas de basaltos vesiculares, que são mais espessas nos topos de cada derrame basáltico, constituem barreiras para o fluxo vertical, pois quantidade significativa de fraturas em basalto vesicular é pouco observada, no entanto, apresentam os mesmos *trends* das fraturas tectônicas do basalto denso, no mesmo afloramento.

Feições diagnósticas sugerem que, na porção sul da região estudada, o fluxo de água ocorre, preferencialmente, ao longo de fraturas N70-80W e N60-80E e, secundariamente, ao longo das N20W e N20E; na porção norte, o fluxo se dá segundo fraturas N15W e N5-10E, e na porção intermediária, ao longo de N40-65W. As direções N70-80W, N60-80E e N40-65W são relacionáveis às fraturas, provavelmente híbridas, do evento eWNW; as direções N15W e N5-10E são relacionáveis a fraturas, também provavelmente híbridas, do eNNE, sugerindo que são estes os eventos que controlam as direções preferenciais de fluxo com maior ou menor intensidade, dependendo da porção geográfica da região estudada. O caráter híbrido das fraturas conjugadas dos eventos tectônicos transcorrentes é indicado pelo ângulo 2θ (varia de 30° a 70°), e tem consequências significativas para o fluxo ao longo das fraturas, pois estas, além de cisalhamento, também devem ter sofrido um processo de abertura.

Apesar da cronologia relativa do evento extensional com relação aos eventos transcorrentes não ter sido determinada, não se nota relação clara de tal evento com o controle de feições diagnósticas, o que pode sugerir que o mesmo seja mais antigo, pois é de se esperar que a circulação preferencial de água subterrânea, a princípio, seja controlada por eventos tectônicos mais jovens ou pelo campo de esforços atual, como demonstrado na literatura.

Os dados coletados até o momento neste projeto (FRATASG II) indicam que o modelo conceitual de fluxo de água subterrânea, na área de Ribeirão Preto, nordeste do Estado de São Paulo, proposto pelo projeto FRATASG I, é válido para toda a região de estudo. Segundo este modelo as camadas vesiculares dos basaltos constituem barreiras hidráulicas regionais para o fluxo vertical, dificultando a conexão entre o Aquífero Serra Geral e o Sistema Aquífero Guarani. No entanto, esta barreira deve ser transposta apenas em locais onde as fraturas subverticais dos eventos transcorrentes tenham atuado com maior intensidade, de modo a seccionar toda a pilha de basaltos. Uma quantidade menor de derrames favorecerá esta situação. A identificação de tais locais deve ser o alvo de pesquisas futuras.

Referências bibliográficas

- Almeida, F.F.M. 1954. Botucatu, um deserto triássico da América do Sul. *Notas Preliminares e Estudos da Divisão de Geologia e Mineralogia do DNPM*, 86, 1-21.
- Almeida, F.F.M. 1986. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16 (4), 325-349.
- Barreto, C., Gomes, L. y Wendland, E. 2010. Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa. *XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços*, São Luís, 1-22.
- Angelier, J. 1994. Fault slip analysis and palaeostress reconstruction. In: Hancock, P. L. *Continental Deformation*. Pergamon Press, U.K. P. 53-100.
- Banks, D., Rhor-Torp, E. y Skarphagen, H. 1994. Groundwater resources in hard rock: experiences from the Hvaler study, Southeastern Norway. *Applied Hydrogeology*, 2 (2), 33-42.
- Barton, C.A., Zoback, M.D. y Moos, D. 1995. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*, 23 (8), 683-686.
- Caputo, R. 1995. Evolution of orthogonal sets of coeval extension joints. *Terra Nova*, 7, 479-490.
- Cordani, U.G. y Vadoros, P. 1967. Basaltic rocks of the Paraná Basin. In: Bligarelli, J.J., Becker, R.D., Pinto, I.D. *Problems in Brazilian Gondwana Geology*. DG-UFPR, Curitiba, p. 207-234.
- Dunne, W.M. y Hancock, P.L. 1994. Palaeostress analysis of small-scale brittle structures. In: Hancock, P. L. *Continental Deformation*. Pergamon Press, U.K., 101-120.
- Fernandes, A.J. 1997. *Tectônica Cenozóica na Porção Média da Bacia do Rio Piracicaba e sua aplicação à hidrogeologia*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 244 pp.
- Fernandes, A.J., Maldaner, C.H. y Rouleau, A. 2011. Análise das Fraturas nos Basaltos de Ribeirão Preto, SP: Aplicação à Elaboração de Modelo Hidrogeológico Conceitual. *Revista Geologia USP. Série Científica*, 11 (3), 43 a 64.
- Fernandes, L.A. y Coimbra, A.M. 2000. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). *Revista Brasileira de Geociências*, 30 (4), 717-728.
- Fernandes, A.J. y Rudolph, D. 2001a. The influence of Cenozoic Tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in São Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, 9, 151-167.
- Fernandes, A.J. y Amaral, G. 2002. Cenozoic tectonic events at the border of the Parana Basin, São Paulo, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 14 (8), 911-931.
- Fernandes, A.J. y Mello, C.L. 2004. Coberturas cenozóicas e estruturas deformadoras na Depressão Periférica Paulista, Campinas, São Paulo. *Revista do Instituto Geológico*, 25, 49-66.
- Fernandes, A.J., Maldaner, C.H., Azevedo Sobrinho, J.M., Pressinotti, M.M.N. y Wahnfried, I. 2010. Estratigrafia dos Derrames de Basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto - SP) Baseada na Geologia Física, Petrografia e Geoquímica. *Geol. USP, Série Científica*, 10 (2), 73-99.
- Fernandes, A.J., Perrotta, M.M., Salvador, E.D., Azevedo, S.G., Gimenez Filho, A. y Paulon, N. 2007. Potencial dos aquíferos fraturados do Estado de São Paulo: condicionantes geológicos. *Revista Águas Subterrâneas*. São Paulo, 21, 63-84
- Ferril, D.A., Winterle, J., Wittmeier, G., Sims, D., Colton, S., Armstrong, A. y Morris, A.P. 1999. Stressed rock strains groundwater at Yucca Mountain, Nevada. *GSA. Today*, 9 (5), 1-8.
- Hasui, Y., Facincani, E.M., Santos, M. y Jimenez-Rueda, J.R. 1995. Aspectos estruturais e neotectônicos na formação de boçorocas na região de São Pedro, SP. *Geociências*, 14 (2), 59-76.
- Leinz, V. 1949. Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil. *Geologia*, 5 (Boletim CIII, USP), 1-67.
- Marques, L.S. y Ernesto, M. 2004. O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. In: Mantesso Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, A.D.R. y Brito-Neves, B. B. (eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo, 245-264.
- Melfi, A.J., Piccirillo, E.M. y Nardy, A.J. 1988. Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin: an introduction. In: Piccirillo, E.M. and Melfi, A.J. (Eds.). *The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects*. IAG-USP, São Paulo, 1-13.
- Melo, M.S.A. 1995. *Formação Rio Claro e depósitos associados: sedimentação neocenoica na Depressão Periférica Paulista*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 144 pp.
- Mello, C.L. 1997. *Sedimentação e Tectônica Cenozóicas no Médio Vale do Rio Doce (MG, Sudeste do Brasil) e suas implicações na evolução de um sistema de lagos*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 275 pp.
- Milani, E.J. 2004. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: Mantesso Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, A.D.R. e Brito-Neves, B.B. (eds.) *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo, p. 265-279.

- Morin, R.H. y Savage, W.Z. (2003) Effects of crustal stresses on fluid transport in fractured rock: case studies from northeastern and southwestern USA. *Hydrogeology Journal*, 11, 100-112.
- Morin, R.H., Savage, W.Z. y Rivard, C. 2006. Hydrogeologic consequences of gravity-induced stresses along a ridge: example from Annapolis Valley, Nova Scotia. *41° ARMA/USRMS, U.S. Symposium on Rock Mechanics: 50 Years of Rock Mechanics – Landmarks and Future Challenges*, Golden, Colorado, 10 p. (CD-ROM).
- Nakao, H., Freitas Júnior, M.S. y Araya, J.A.M. 1983. *Percolações preferenciais nas fundações das barragens sobre maciços basálticos*. Simpósio sobre Geotecnia da Bacia do Alto Paraná, São Paulo, 425-430.
- Nardy, A.J.R., Machado, F.B. y Oliveira, M.A.F. 2008. As rochas vulcânicas mesozoicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. *Revista Brasileira de Geociências*, 38 (1), 178-195.
- Quadros, E.F., Corrêa Filho, D., Taioli, F. y Pereira Junior, G.G. 1991. 3-D hydraulic tests on weathered-fractured basalt – Brazil. Proceedings of the International Congress on Rock Mechanics, Aachen, International Society of Rock Mechanics.
- Rebouças, A.C. 1978. Potencialidade hidrogeológica dos basaltos da Bacia do Paraná no Brasil. *XXX Congresso Brasileiro de Geologia*, Recife, 2963-2976.
- Riccomini, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo São Paulo, 256 pp.
- Riccomini, C. 1997. Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 27 (2), 153-162.
- Sinelli, O. 1971. Água subterrânea no município de Ribeirão Preto. *XXV Congresso Brasileiro de Geologia*, São Paulo, 17-34.
- Tressoldi, M. 1991. Uma contribuição à caracterização de maciços rochosos fraturados visando a proposição de modelos para fins hidrogeológicos e hidrogeotécnicos. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 291 pp.
- Wahnfried, I. 2010. Modelo Conceitual de Fluxo entre o Aquífero de Serra Geral e o Sistema Aquífero Guarani em Ribeirão Preto – SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 124 pp.

Recibido: diciembre 2011

Revisado: febrero 2012

Aceptado: abril 2012

Publicado: julio 2012

