

# Arenitos asfálticos na Bacia do Paraná: estudo das ocorrências no Alto Estrutural de Anhembi

*Tar sandstones in the Paraná Basin: a study of the occurrences in the Anhembi Structural High*

Carlos César de Araújo | Jorge Kazuo Yamamoto | Sidnei Pires Rostirolla

## resumo

Existem acumulações de arenito asfáltico em arenitos do Eotriássico na margem leste da Bacia do Paraná. O objetivo deste trabalho é explicar a gênese destas ocorrências no Alto Estrutural de Anhembi. Este alto é uma estrutura do Jurássico - Cretáceo relacionada à reativação de falhas preexistentes do embasamento, onde lamitos permianos afloram em uma região de arenitos triássicos. O betume foi derivado de rochas geradoras permianas maturadas por soleiras de rochas básicas do derrame continental da Formação Serra Geral. Examina-se a distribuição das acumulações de betume ao se integrarem dados de campo com dados morfoestruturais, modelamento digital de terreno, gravimetria, aeromagnetometria e sensoriamento remoto. A interpretação do arcabouço estrutural é baseada primeiramente na análise morfoestrutural, na distribuição das anomalias gravimétricas e magnetométricas e levantamento estrutural de campo. O Alto de Anhembi consiste em três blocos, com eixo principal de direção

N50°O. Os afloramentos de arenito asfáltico ocorrem ao redor da estrutura, em seu bloco baixo, e estão restritos à porção inferior da Formação Pirambóia. A interpretação morfoestrutural sugere que o arenito asfáltico ocorre em posições intermediárias entre os altos e baixos estruturais. A mais provável explicação para as acumulações relaciona a maturação do óleo e sua migração às intrusões do Eocretáceo das soleiras Serra Geral em folhelhos negros permianos da Formação Irati, e subsequente migração ao longo de falhas e paredes de diques até os reservatórios em arenitos eólicos triássicos da Formação Pirambóia. Os diques de rochas básicas não somente facilitaram a migração, mas também há locais onde eles formaram barreiras à migração lateral. Além disso, as fácies de interduna e fluvial da Formação Pirambóia formaram selos locais e barreiras para migração vertical.

(originais recebidos em 13.03.2006)

**Palavras-chave:** arenito asfáltico | Bacia do Paraná | Alto de Anhembi | Formação Pirambóia | aeromagnetometria

## abstract

*There are tar accumulations in Early Triassic sandstones along the eastern margin of the Paraná Basin. The aim of this research work is to explain the tar sandstone occurrences in the Anhembi High. The Anhembi High, where Permian mudstones outcrop in a Triassic sandstone area, is a Jurassic-Cretaceous structure related to the reactivation of pre-existing basement faults. Tar was derived from Permian source rocks that matured along the basic sills of the continental flood basalt cover of Serra Geral Formation. This paper examines the habitat of tar accumulation and integrates fieldwork with morphostructural data, digital elevation model, gravity and airborne magnetic data and remote sensing imagery. The interpretation of the structural framework is based primarily on the morphostructural analysis, the distribution of gravity and magnetic anomalies and on a structural field survey. The Anhembi High consists of three blocks with a N50W-trending major axis. Tar sandstone outcrops occur around the Anhembi structure, on its low-lying block and are restricted to the lower Pirambóia Formation. The morphostructural interpretation suggests the occurrence of tar sandstones at intermediate positions, between the structural highs and lows. The most likely explanation for these tar accumulations relates oil maturation and migration to the intrusion of Early Cretaceous Serra Geral sills into the Late Permian black shales of the Irati Formation, and subsequent migration along faults and dyke walls into eolian sandstone reservoirs of the Triassic Pirambóia Formation. Not only did the basic dykes locally facilitate migration, but there were also places where they constituted barriers to lateral migration. Furthermore, the interdune and fluvial facies of the Pirambóia Formation formed local seals and barriers to vertical migration.*

*(expanded abstract available at the end of the paper)*

**Keywords:** tar sand | Anhembi High | Paraná Basin | Pirambóia Formation | airborne magnetics

## introdução

Entre as localidades de ocorrência de arenitos asfálticos na borda leste da Bacia do Paraná (Araújo *et al.* 2004, 2005) destaca-se a região ao norte da Escarpa de Botucatu, nas cercanias da

cidade de Anhembi. A maior acumulação de arenito asfáltico da borda leste da Bacia do Paraná (Fazenda Betumita) ocorre na área de estudo com um volume estimado de 5,7 milhões de barris de óleo (Thomaz Filho, 1982). Os arenitos asfálticos são caracterizados como reservatórios exumados e sua exposição proporciona excelente oportunidade para avaliar o modelo exploratório ou mesmo para caracterizar potenciais reservatórios. Na Bacia do Paraná, o estudo de acumulações de hidrocarbonetos tem encontrado dificuldades no imageamento sísmico devido à presença de espessos pacotes de rochas vulcânicas. Considerando tal limitação do método sísmico, são relacionadas as respostas das análises morfoestrutural, gravimétrica e magnetométrica para o estudo de potenciais acumulações de hidrocarbonetos e sua relação com dados geológicos de campo.

A distribuição espacial regional e caracterização geológica dos arenitos asfálticos da Bacia do Paraná foi apresentada por Araújo *et al.* (2004). Foi feita a descrição de todas as ocorrências na área, a datação geocronológica K/Ar e  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dos diques de diabásio associados às ocorrências e foi apresentado um modelo genético regional. O trabalho de Araújo *et al.* (2003) detalha o método de análise morfoestrutural utilizado regionalmente e apresenta suas implicações no entendimento da gênese das ocorrências de arenito asfáltico, e Araújo *et al.* (2005) analisa as ocorrências, segundo dados radiométricos, gravimétricos, aeromagnéticos e de sensoriamento remoto, na região do Complexo Estrutural do Jacu, sul da cidade de Bofete (SP). Para aquela área, os autores destacam a relação das ocorrências em falhas destrais noroeste e aplicam o diagrama de Christie-Blick e Biddle (1985) com dados de campo e com os interpretados nas imagens de satélite.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é explicar a gênese das ocorrências de arenito asfáltico no entorno do Alto Estrutural de Anhembi com ênfase nos controles estruturais em diferentes escalas, a partir de interpretação de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto, análise morfoestrutural da rede de drenagem e levantamento estrutural de campo.

A escolha da área de Anhembi é justificada por apresentar arenitos asfálticos em volume considerável, uma constatação de que os elementos essenciais do sistema petrolífero (geração, migração, retenção) funcionaram adequadamente em algum momento da evolução da Bacia do Paraná.

No método empregado, considerou-se primeiramente a distribuição espacial da rocha-reservatório em relação ao Alto Estrutural de Anhembi, de forma a explicar sua relação com a estratigrafia e magmatismo da área. Além disso, apresentam-se os resultados dos levantamentos estruturais e análises geofísicas por métodos potenciais na região do Alto de Anhembi e suas conseqüências para o entendimento da geração e migração do petróleo nessa região.

As ocorrências de arenitos asfálticos (Araújo *et al.* 2004, 2005) têm sido atribuídas ao Sistema Petrolífero Irati-Pirambóia (Araújo *et al.* 2000), induzido por maturação anômala de folhelhos betuminosos da Formação Irati, a partir de intrusões ígneas dos basaltos Serra Geral (Simoneit *et al.* 1978 a, b; Araújo *et al.* 2000). O trapeamento foi controlado pelas fácies deposicionais da Formação Pirambóia e também pelos diques de rochas básicas. A distribuição espacial das ocorrências está diretamente relacionada aos flancos do alto estrutural que pode ser observado no mapa de contorno estrutural e morfoestrutural. Devido ao controle exercido pelas rochas intrusivas na maturação e pelas zonas de falha na migração e trapeamento, as anomalias magnéticas foram utilizadas como rastreadores para explicar o posicionamento das ocorrências.

Embora sejam hidrocarbonetos aflorantes, o posicionamento estratigráfico restrito à Formação Pirambóia indica que as ocorrências de arenitos asfálticos consistem em prováveis reservatórios exumados. Não há evidências de exudações em rochas terciárias ou quaternárias. Não há qualquer ocorrência cujo reservatório seja representado pelos arenitos eólicos permeáveis da Formação Botucatu, embora seja reportada a presença em reservatórios permianos na Formação Tatuí (Franzini, 1972; Araújo *et al.* 2004).

## arcabouço geológico

A Bacia do Paraná caracteriza-se por ser uma bacia intracratônica com início da sedimentação no Cambriano-Ordoviciano, cuja seção sedimentar pode ser dividida em três seqüências tectono-sedimentares do Ordoviciano-Devoniano, Eocarbonífero-Permiano e Neojurássico-Eocretáceo limitadas por inconformidades (Zalán *et al.* 1991). A deposição destas seqüências foi influenciada por variações climáticas, anomalias termais, tensões horizontais relacionadas com a dinâmica na borda da placa e verticais associadas à evolução mantélica, nesse último caso principalmente durante o evento de ruptura do Gondwana. Fulfaro *et al.* (1982) descrevem, para a transição permotriássica, uma mudança do nível de base regional. Neste período, um mar raso (Teresina/Corumbataí) é ocupado por dunas litorâneas (Pirambóia) e, posteriormente, por dunas de um deserto continental (Botucatu). Para Fulfaro *et al.* (1982), esta mudança ocorreu, em princípio, devido ao levantamento dos Andes Meridionais e à movimentação tectônica positiva do assoalho da Bacia do Paraná.

Em toda a Bacia do Paraná, segundo Zalán *et al.* (1991), dois estilos estruturais principais estão presentes: deformações associadas a intrusões ígneas e deformações associadas a reativações de elementos tectônicos lineares com direção NE e NO.

O embasamento cratônico da bacia tem uma estruturação NE (fig. 1a), com blocos limitados por falhas nesta mesma direção que é condicionada pelo Cinturão Transbrasiliiano, na borda noroeste da bacia, e pela Faixa Ribeira na porção sudeste. Na borda leste destacam-se lineamentos estruturais quilométricos de direção NE como a Falha de Jacutinga, as zonas de falha Blumenau - Soledade e Lancinha-Cubatão e a zona de cisalhamento Ribeira. Entre as estruturas NO destacam-se os lineamentos Tietê (que cruza a área de estudo), Barra Bonita-Itu, Paranapanema, a Falha Santo Anastácio, o Lineamento de Guapiara e o Arco da Ponta Grossa.

Diques de rochas básicas alinhados na direção NO, desde o litoral sul de São Paulo até o interior do Paraná constituem o Arco de Ponta Grossa

(fig. 1a). Ferreira (1982) admite a atuação tectônica do Arco de Ponta Grossa desde o Devoniano, com a maior atividade no Jurássico-Cretáceo, e que a direção predominante dos diques da região central do Arco de Ponta Grossa é N50°O, com variações locais desde N30°O até E-O.

A área de estudo localiza-se na porção centro-oriental da Bacia do Paraná, junto à depressão do Rio Tietê. O estudo foi concentrado na área de afloramento das unidades sedimentares do Neopermiano ao Eocretáceo, que caracterizam a região do Alto de Anhembi (fig. 1b e 2). Estas sucessões sedimentares representam o registro da evolução do interior do Gondwana, concomitante aos eventos orogênicos fini-hercínios (também denominado Ciclo Gondwânico) na margem da placa. O término do Ciclo Gondwânico ocorreu no Triássico, quando teve início a fragmentação do Gondwana, a abertura do Oceano Atlântico Sul e o magmatismo da Província Paraná-Etendeka. Os folhelhos negros e rochas carbonáticas do Neopermiano da Formação Irati foram depositados sob ambientes aquosos anóxicos em bacias marinhas de circulação restrita. Na região de Anhembi não há afloramentos da Formação Irati. Acima desta encontram-se lamitos, siltitos e rochas carbonáticas da Formação Teresina depositados em paleoambiente marinho raso. Acima desta unidade ocorre a Formação Pirambóia, composta de rochas siliciclásticas de idade triássica. Na área de estudo, predominam arenitos brancos, cinza, amarelados e avermelhados, que apresentam estratificações cruzadas de médio e grande portes e estratificações plano-paralelas correspondentes a depósitos de interdunas. Os arenitos têm granulometria média, os grãos são polidos, subangulares e subarredondados, mal selecionados, há porções siltosas e argilosas (Petri e Fulfaro, 1983). Na área de estudo, a formação atinge espessuras de até 130 m em poços na região de Anhembi. O clima semi-árido durante a sedimentação é aceito pela maioria dos autores (Petri e Fulfaro, 1983; Briguetti, 1994; Caetano-Chang, 1997). A associação faciológica da Formação Pirambóia indica deposição eólica e aquosa na sua base e domínio eólico para o topo. Entretanto, não há mapeamentos sistemáticos de fácies deposicio-

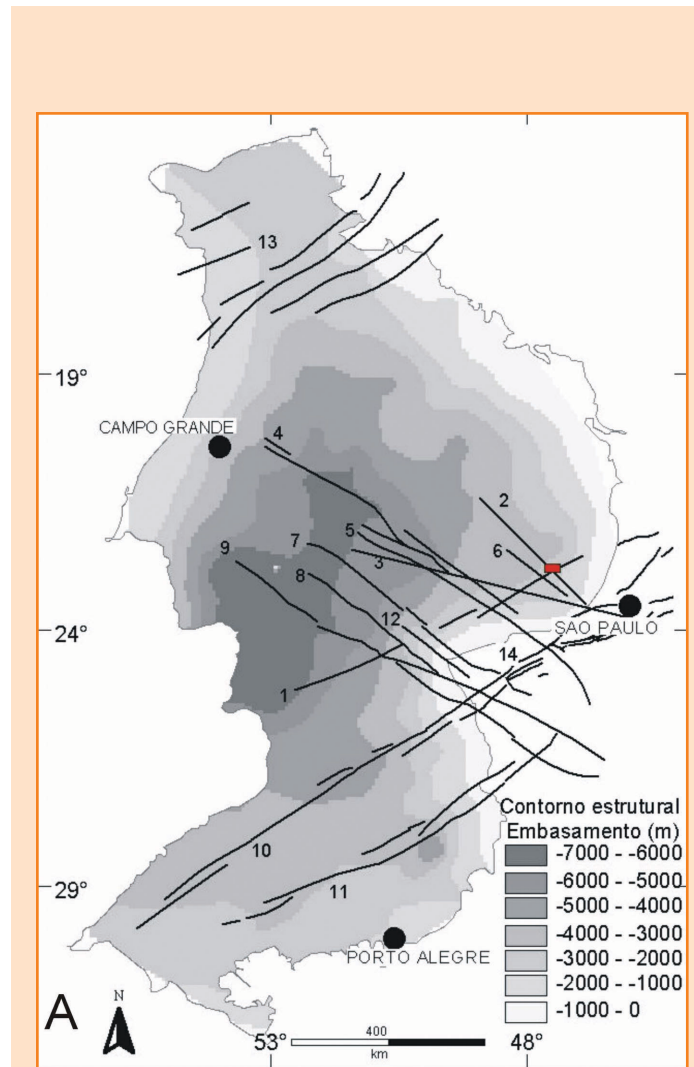


Figura 1 – (A) A Bacia do Paraná é condicionada principalmente por estruturas de direção NE relacionadas ao Cinturão de Cisalhamento Ribeira (Neoproterozóico - Cambriano Superior) e pelo Cinturão de Cisalhamento Transbrasiliense. Seu depocentro tem aproximadamente 7 000 m de profundidade. A subsidência fanerozóica foi controlada principalmente pela reativação das estruturas NE relacionadas ao embasamento. No Mesozóico a ativação de estruturas de direção NO formou importantes falhas nesta direção. A área de estudo está representada pelo pequeno retângulo vermelho a oeste de São Paulo. 1 - Falha de Jacutinga. 2 - Lineamento Tietê. 3 - Lineamento Paranapanema. 4 - Falha de Guapiara. 5 - Falha Santo Anastácio. 6 - Lineamento Barra Bonita - Itu. 7 - Falha São Jerônimo - Curiúva. 8 - Falha Rio Alonzo. 9 - Falha Cândido de Abreu - Campo Mourão. 10 - Zona de Falha Lancinha - Cubatão. 11 - Zona de Falha Blumenau - Soledade. 12 - Arco de Ponta Grossa. 13 - Zona de Cisalhamento Transbrasiliense. 14 - Zona de Cisalhamento Ribeira. Estruturas compiladas de Zalán *et al.* (1991) e CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2001a, b). (B) Mapa geológico com lineamentos interpretados e rosetas dos sistemas de fraturamento na área do Alto Estrutural de Anhembi. Os lineamentos e falhas foram interpretados em imagens ETM + Landsat 7; as falhas foram também observadas em campo. As rosetas foram feitas a partir de dados de fraturas em afloramentos.

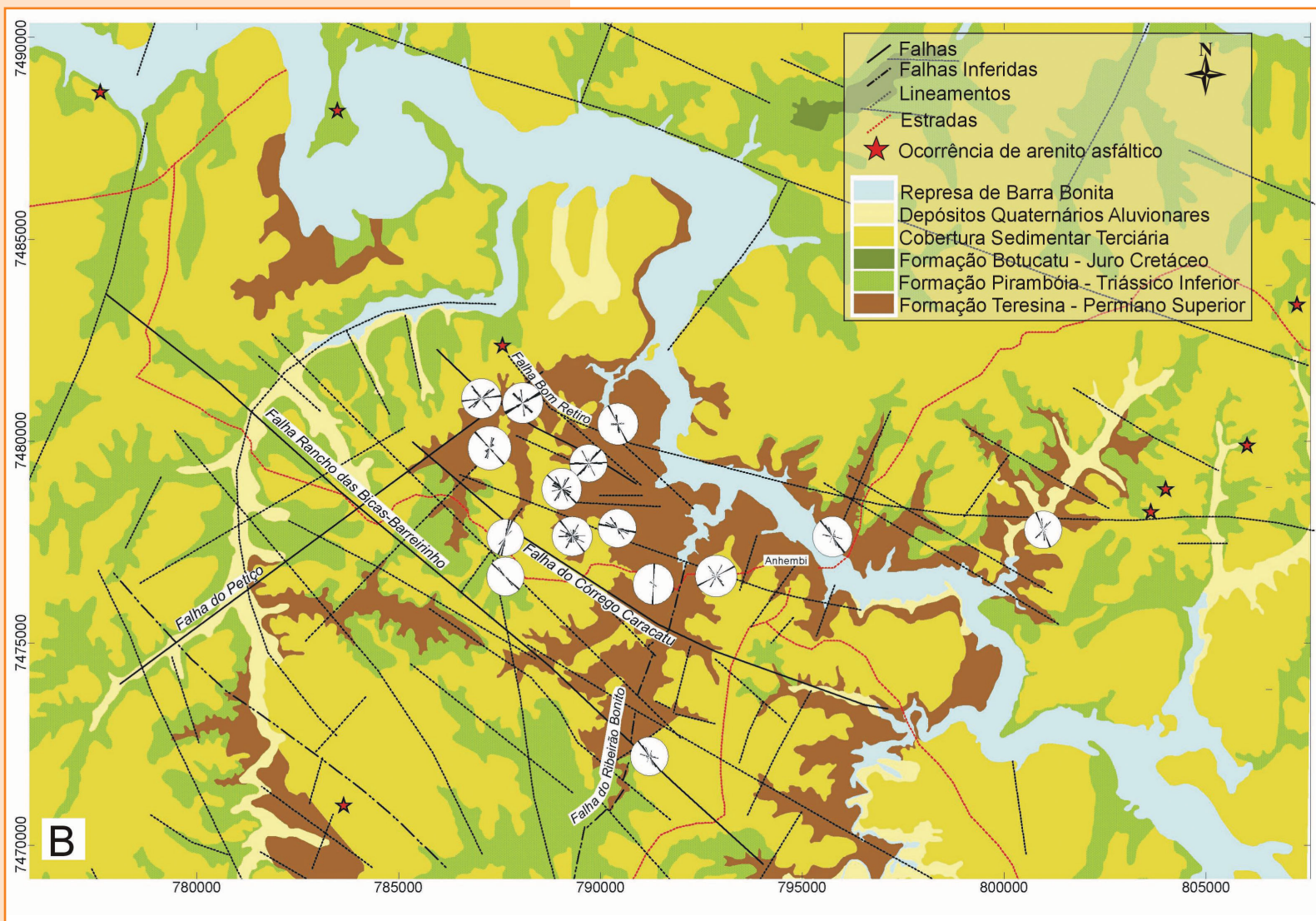


Figure 1 – (A) The Paraná Basin is controlled mainly by NE-trending structures related to the Ribeira shear zone (Neoproterozoic-Early Cambrian) and by the Transbrasiliano shear zone. Its depocentre is 7 000 m deep approximately. The Phanerozoic subsidence was controlled mainly by the reactivation of NE-trending basement structures. During the Mesozoic the activation of NW-trending structures formed important faults. The study area is represented by the red rectangle west of São Paulo. 1 - Jacutinga Fault. 2 - Tietê Lineament. 3 - Paranapanema Lineament. 4 - Guapiara Fault. 5 - Santo Anastácio Fault. 6 - Barra Bonita - Itu Lineament. 7 - São Jerônimo - Curiúva Fault. 8 - Rio Alonzo Fault. 9 - Cândido de Abreu - Campo Mourão Fault. 10 - Lancinha - Cubatão Fault Zone. 11 - Blumenau - Soledad Fault Zone. 12 - Ponta Grossa Arch. 13 - Transbrasiliano Shear Zone. 14 - Ribeira Shear Zone. This structure is derived mainly from Zalán et al. (1991) and CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2001a, b). (B) Geological map with interpreted lineaments and rose diagram of the fracture systems in the Anhembi High Area. The lineaments and faults were interpreted from remote sensing images ETM+ Landsat 7, the faults were also recognized in fieldwork. The rose diagrams were built over fieldwork data.

nais desta formação demonstrando seu comportamento espacial.

Briguetti (1994) identificou quatro grupos de fácies na Formação Pirambóia: dunas, interdunas, lençóis de areia e fluviais. Caetano-Chang (1997), a partir de perfis de poços na região de Anhembi, descreve que as variações de fácies evidenciam, da base para o topo, a diminuição da presença de água influenciando a sedimentação. Na base, Caetano-Chang (1997) identificou fácies subaquosas e de interdunas. Em direção ao topo, a autora interpreta a deposição de extensos depósitos de areias eólicas em condições de maior aridez.

O contato basal da Formação Pirambóia com a Formação Teresina tem origem controversa.

Segundo Petri e Fulfaro (1983), o início da deposição da Formação Pirambóia é marcado em grande área do Estado de São Paulo, por regolito fóssil, sob a forma de brecha de siltito em matriz arenosa. A partir de estudo de fácies, Matos (1995) sugere a atuação de processos deposicionais regidos por marés no mesmo intervalo basal, intercalando exposição subaérea. Este autor propôs o estabelecimento de nova unidade litoestratigráfica informal denominada camada Porangaba, substituindo a denominação "regolito fóssil" e passando a integrar o topo do Grupo Passa Dois, o que caracterizaria um contato transicional entre as formações Teresina e Pirambóia. Em relação ao contato basal, Caetano-Chang (1997) comenta que as pseudobrechas e brechas de intraclastos que antecedem a sedimentação Pirambóia fazem parte da história sedimentar do final da sedimentação Teresina. Segundo a autora, em vários locais os arenitos eólicos da Formação Pirambóia assentam-se diretamente sobre os sedimentos finos subjacentes, indicando ação de erosão eólica mais pronunciada. Dessa forma, a autora interpreta a existência de extensiva discordância pré-Pirambóia na porção nordeste da bacia.

As ocorrências de arenitos asfálticos encontram-se na seção inferior da Formação Pirambóia em suas fácies eólicas, acima das quais depósitos argilosos de interdunas inibiram localmente a migração de fluidos para os arenitos eólicos jurásico-cretáceos da Formação Botucatu. Finalmente, derrames basálticos ocorreram por toda a bacia no início do Cretáceo (135 - 127 Ma). Na área afloram rochas básicas da Formação Serra Geral na forma de numerosos diques dispersos por toda a região.

O modelo exploratório adotado considera que as ocorrências de arenitos asfálticos tiveram como rocha-fonte os folhelhos negros da Formação Irati (Membro Assistência), aquecidos e maturados pelas intrusivas Serra Geral e com acumulação na base dos arenitos Pirambóia e traçados lateralmente pela presença de diques de diabásio. Considera-se que a rocha capeadora no topo das acumulações pode ser representada por uma soleira já erodida e que a fácies de interduna da Formação Pirambóia associada à baixa viscosidade do óleo configurou-se como capa.

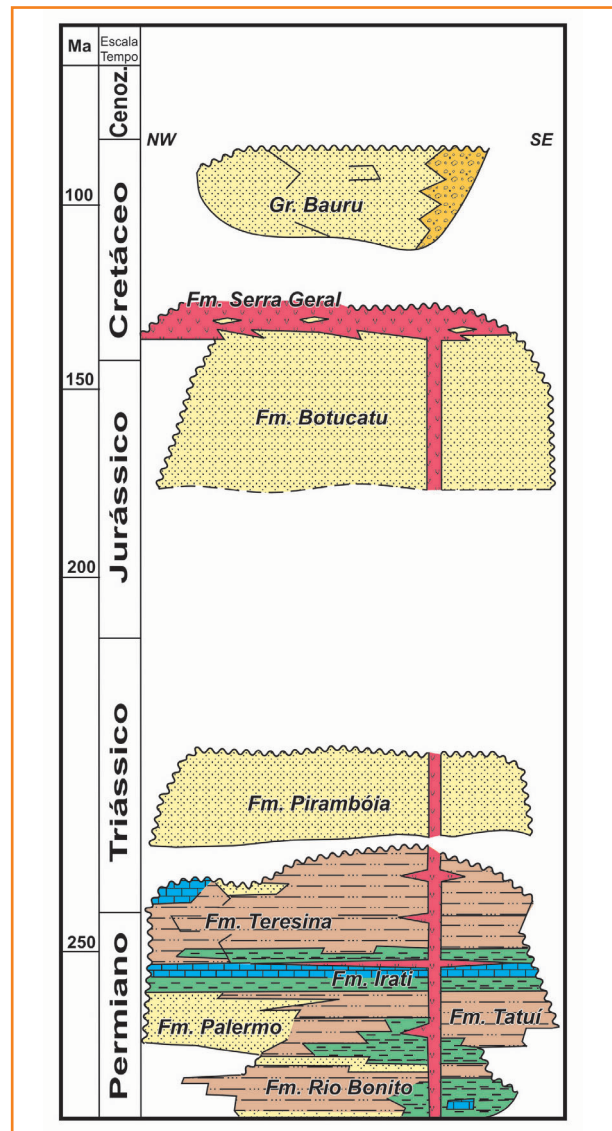


Figura 2 – Coluna estratigráfica simplificada da seção permiana-triássica na área do Alto de Anhembi, mostrando importantes inconformidades entre as formações Teresina, Pirambóia e Botucatu. O hiato do Eotriássico está relacionado à Orogenia Cabo - Ventana do Permiano Superior - Neotriássico, enquanto o hiato do Triássico Superior reflete uma reorganização dos campos de tensão em um prelúdio da fragmentação continental. Modificado de Milani e Zalán (1999).

Figure 2 – Stratigraphic column of the Permian - Cretaceous section in the Anhembi High, showing significant unconformities between the Teresina, Pirambóia and Botucatu formations. The Early Triassic hiatus is linked to the Late Permian - Triassic Cape-Ventana Orogeny, while the Late Triassic reflects a reorganisation of stress fields as a prelude to continental fragmentation. Modified after Milani e Zalán, 1999.

## eventos tectônicos deformadores

A região melhor preservada para o estudo da Orogenia San-Rafaélica, de idade permiana-triásica compreende as Sierras Australes, que também são denominadas Sierra de La Ventana (fig. 3). O reconhecimento das deformações na Faixa Ventana, que representa a margem colisional entre o Gondwana e o Bloco Patagônico, é condição essencial para o entendimento da deformação na Bacia do Paraná, com importantes consequências para o estabelecimento do modelo estrutural aplicado à área do Alto de Anhembi.

Segundo Cobbold *et al.* (1986), as Sierras Australes compõem um cinturão de dobramento isolado com direção NO-SE, paralelo à margem do Cráton La Plata, com um comprimento de aproximadamente 180 km, localizado a aproximadamente 500 km ao sul de Buenos Aires. Segundo os autores, o embasamento granítico e sua cobertura sedimentar paleozóica sofreram intensa deformação sob condições da fácies xisto-verde.

Segundo Rosselo *et al.* (1997), a idade da deformação das Sierras Australes é permiana e eotriássica. O posicionamento cronológico é baseado em eventos metamórficos indicados pela formação de ilita com  $282\pm 3$  Ma,  $273\pm 8$  Ma,  $265\pm 3$  Ma (K/Ar ilita) do Grupo Curamalal, depositado no Siluriano. Evidência de magmatismo sintectônico é fornecida por datação radiométrica de  $245\pm 12$  Ma (K/Ar hornblenda) para o granito López Lecube, imediatamente a oeste das Sierras Australes.

Segundo Cobbold *et al.* (1986), o deslocamento regional é de encurtamento com vetor de convergência de sudoeste para nordeste, cavalgamento para NE e transcorrência destal ao longo do *trend* NO. Deste modo, o cinturão de dobramento sofreu convergência oblíqua destal.

Cobbold *et al.* (1992), a partir de investigações estruturais em bacias paleozóicas do sudoeste do Gondwana, concluem que a deformação intracontinental foi espacialmente generalizada durante o Permiano-Triássico. Segundo os autores, o estilo de deformação variou de espessamento crustal no sul e oeste, falhamentos transcorrentes no centro até rifteamento no norte e leste. Os autores inferem uma tensão compressi-

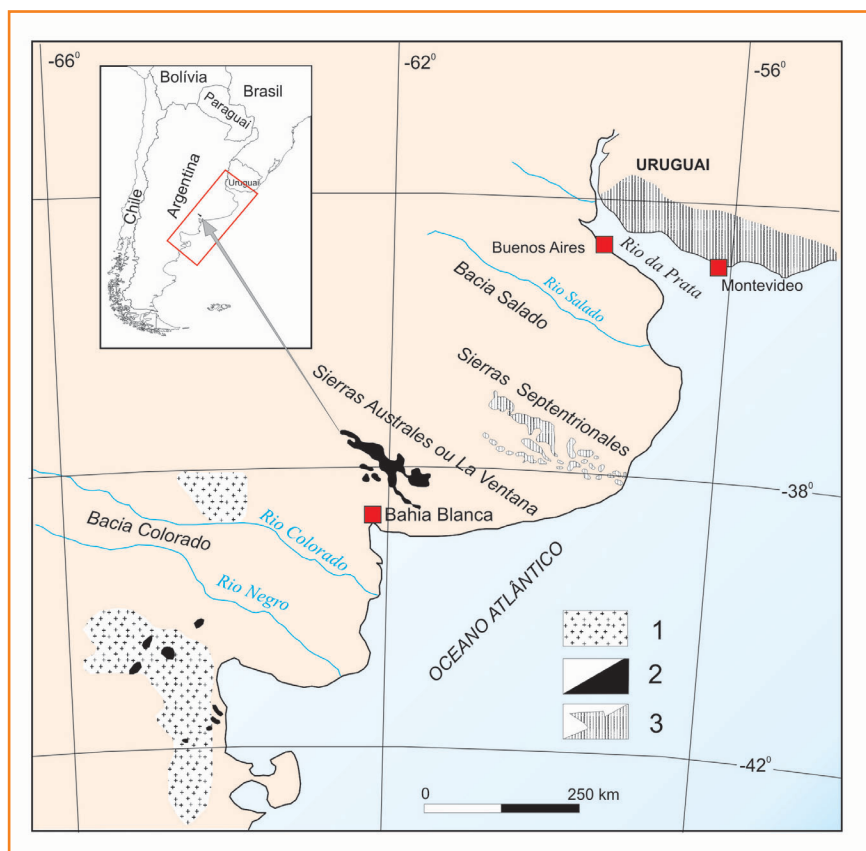


Figura 3 – Esboço geológico da porção centro-atlântica da Argentina. (1) Plutonismo Paleozóico; (2) Cobertura sedimentar (pré-cambriana nas Sierras Setentrionales, eopaleozóica no nordeste da Patagônia e do Siluriano ao Neopaleozóico nas Sierras Australes); (3) Embasamento pré-cambriano. Modificado de Cobbold *et al.* 1986; Rosselo *et al.* 1997.

Figure 3 – Geological sketch of the centre-Atlantic portion of Argentina. (1) Paleozoic Plutonism; (2) Sedimentary cover (Precambrian on Sierras Setentrionales, Early Paleozoic in the northeast Patagonia and Silurian to Late Paleozoic on Sierras Australes); (3) Precambrian basement. Modified after Cobbold *et al.* 1986 and Rosselo *et al.* 1997.

va, atenuada pela distância a partir de uma margem compressiva do tipo Andina. Segundo Cobbold *et al.* (1992), na Bacia do Paraná a direção de contração parece ser NE-SO na porção sul, e na região norte da bacia aproxima-se de E-O. Segundo os autores, os mapas de isópacas indicam uma história complexa, com desenvolvimento de altos e baixos internos, incluindo os arcos do Rio Grande, de Ponta Grossa (direção NO-SE) e de Assunção (direção N-S). Contudo, no Triássico, para Tankard *et al.* (1995), concomitante à deposição da Formação Pirambóia, a deformação é distensiva. Além disso, também se consideram os eventos cretácicos envolvidos na abertura do Oceano Atlântico.

## o Alto Estrutural de Anhembi

Junto à represa de Barra Bonita, às margens do Rio Tietê, cercanias da cidade de Anhembi, tem-se o Alto Estrutural de Anhembi (denominado Domo de Anhembi por Soares, 1974). As cotas topográficas na área variam de 450 m a 600 m e os contatos entre as formações Pirambóia e Teresina variam de 460 m até 545 m, de acordo com levantamentos de campo. A estrutura de Anhembi caracteriza-se por um eixo maior e principais lineamentos de direção N500 e falhas de direção NO e NE. Esta estrutura pode ser compartimentada em três blocos (Petrobras 1971, *apud* Franzinelli, 1972) chamados Alto de Anhembi, na porção norte da estrutura, Alto de Anhembi Sul, na porção intermediária e Alto de Piapara, na porção sudoeste (fig 4).

Estas direções também são observadas nos mapas gravimétricos e magnéticos e estão geneticamente relacionadas às falhas, diques e soleiras da Formação Serra Geral, além de blocos altos e baixos do embasamento.

Segundo Araújo *et al.* (2005), as acumulações de arenito asfáltico ocorrem em reservatórios localizados ao longo dos limites estruturais entre blocos do embasamento onde falhas aumentaram a permeabilidade. O mapeamento morfoestrutural mostra que os limites de blocos são definidos por falhas e por fraturamento mais intenso (fig. 5b). Há também diques de rochas básicas ao longo de falhas caracterizando zonas de dilatação (figs. 4 e 6b). Além disso, zonas de falha NE e NO e o fraturamento associado propiciam rotas favoráveis para migração de hidrocarbonetos.

Segundo Araújo *et al.* (2004), na região do município de Anhembi encontram-se oito ocorrências de arenito asfáltico (fig. 5c) chamadas: Betumita, Braço da Represa, Fazenda Ribeirão Claro, Moquém I, Moquém II, Piapara, Porto Martins e Volta Grande. Em geral, as ocorrências são encontradas em áreas íngremes, sujeitas à erosão ao redor da porção central do Alto de Anhembi. Observa-se que a erosão, de idade terciária, destruiu possíveis ocorrências, do mesmo modo que expôs os afloramentos de arenito asfáltico, além de certamente ter destruído o selo associado às ocorrências.

## aspectos estruturais

A área do Alto Estrutural de Anhembi é caracterizada pela presença de estruturas rúpteis pós-deposicionais. Entre elas, destacam-se as fraturas presentes nos siltitos Teresina e as bandas de deformação nos arenitos Pirambóia. Interpreta-se que estas estruturas foram geradas por eventos mesozóicos, embora a reativação de estruturas permianas também seja considerada. Os ângulos de mergulho das fraturas e bandas de deformação em geral são da ordem de 80° ou maiores. Estas estruturas, assim como na área do Jacu (Araújo *et al.* 2005), têm um arranjo NE e NO. O arranjo angular destas fraturas em afloramento auxiliou a definição do sentido de movimentação tectônica e confirmou a direção das falhas (fig. 1b) interpretadas a partir das imagens de sensoriamento remoto, MNT (modelo numérico de terreno) e rede de drenagem (figs. 4 e 5). Deste modo, em campo, os principais indicadores cinemáticos encontrados foram as fraturas escalonadas (fig. 7a) e as feições anastomosadas características de zonas de cisalhamento rúpteis e bandas de deformação (fig.7c).

Nos siltitos da Formação Teresina, as estruturas são caracterizadas por arranjos geométricos organizados em famílias de fraturas escalonadas que podem ser associadas a estruturas maiores interpretadas em imagens de sensores remotos.

As bandas de deformação ocorrem nos arenitos da Formação Pirambóia e apresentam planos de rejeitos milimétricos a centimétricos, localmente decimétricos. Estas feições ocorrem em conjuntos ou zonas de bandas, onde a somatória dos pequenos rejeitos é da ordem de metros. Foram observadas estrias realçadas por recobrimento supérgeno de óxido de ferro (fig. 7b). Microscopicamente, as bandas de deformação são caracterizadas pela diminuição da porosidade com diminuição do tamanho dos grãos (cominuição) e preenchimento dos poros por um cimento silicoso.

Os lineamentos interpretados a partir das imagens de sensoriamento remoto, modelo numérico de terreno e rede de drenagem indicam direções principais N45°-70°O e N10°-30°E, secundariamente E-O (figs. 8a e 8b).



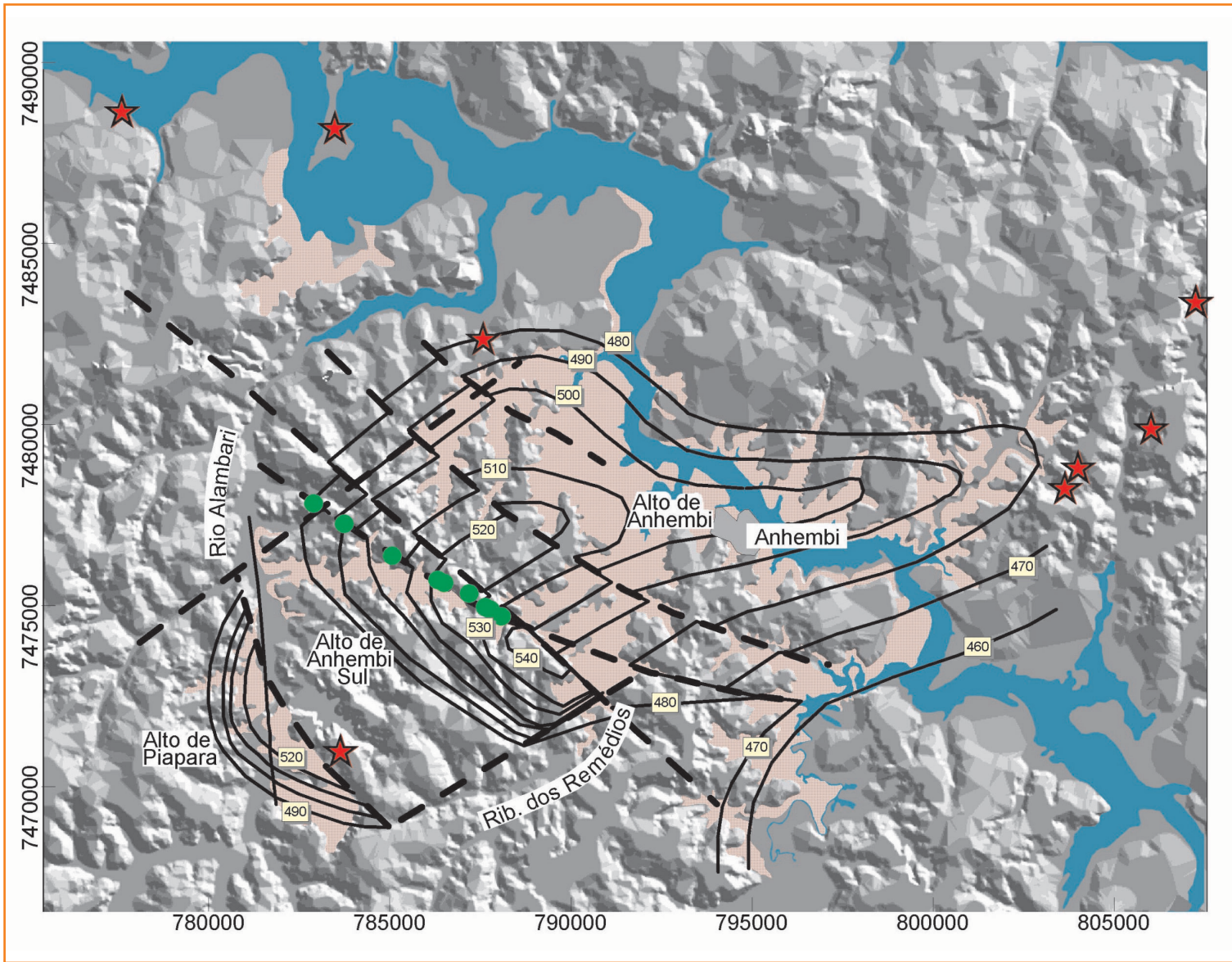


Figura 4 – Contorno estrutural do topo da Formação Teresina na região do Alto de Anhembi sobre modelo numérico de terreno sombreado, iluminação N45°, elevação de 45°. As linhas contínuas indicam o contorno estrutural com valores em metros acima do nível do mar. A área de afloramento da Formação Teresina está em rosa e a represa de Barra Bonita em azul. As estrelas vermelhas representam as ocorrências de arenito asfáltico e as linhas tracejadas são as principais falhas e lineamentos utilizados na interpretação do contorno estrutural. A área é caracterizada principalmente por estruturas transtensionais sinistras de direção NO e conformação dos blocos com eixo maior para NE. Coordenadas UTM em metros; M.C. -51°, SAD69.

Figure 4 – Structural contour map of the top of the Teresina Formation superimposed on a topographically shaded DEM., N45° illumination, 45° elevation. The lines indicate the structural contours in meters above sea level. The outcrop area of the Teresina Formation is in pink and the Barra Bonita dam is in blue. The red stars represent the tar occurrences and the dashed lines are the main faults and lineaments used in the structural interpretation. The area is characterized mainly by NW-trending sinistral transensional structures with NE major axis. UTM coordinates in meters; M.C. -51°, SAD69.

Em campo, foram confirmadas falhas oblíquas sinistras N50°-60°O. Estas falhas provavelmente têm características transtensionais, inclusive com algumas intrusões ígneas básicas ao longo da direção principal (fig. 4). Entre estas, destaca-se a intrusão de um dique de comprimento quilométrico

ao longo da Falha Rancho das Bicas-Barreirinho (fig. 1b e fig. 4), com bloco baixo para nordeste. As falhas NE também foram confirmadas como sinistras em duas direções (N20°E e N50°E). As falhas NE são menos frequentes e os indicadores cinemáticos raros.

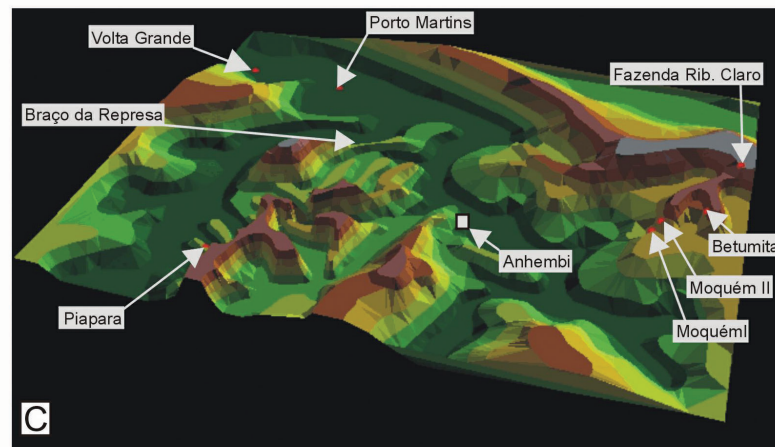
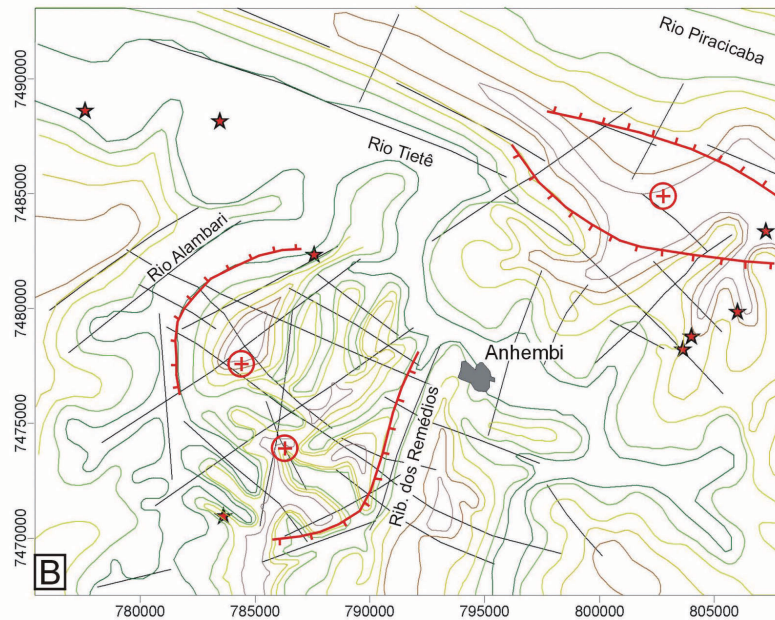
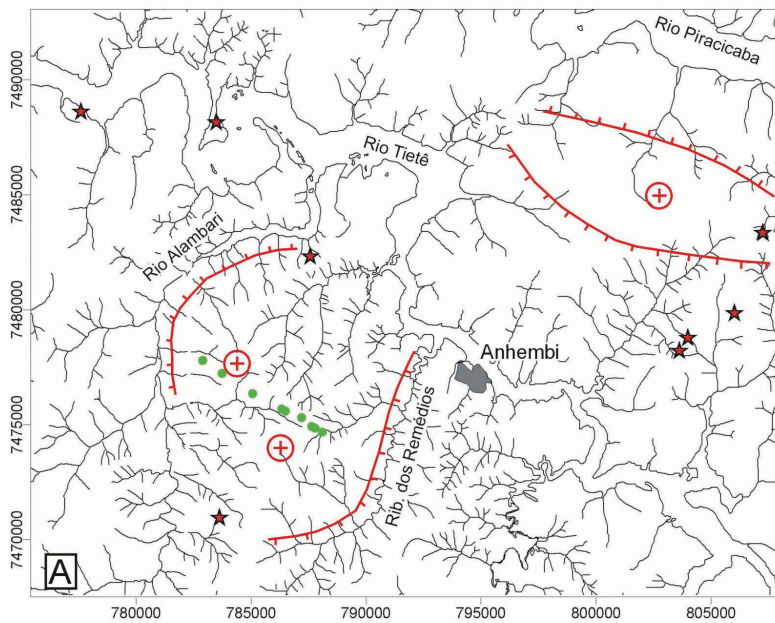


Figura 5 – Interpretação morfoestrutural. (A) Mapa de drenagem com indicação das principais anomalias de drenagem interpretadas, em vermelho. Nota-se, entre os rios Alambari e dos Remédios, uma anomalia com padrão anelar e radial de drenagem, os sinais positivos indicam as áreas de alto estrutural. Os pontos verdes indicam os afloramentos de um dique de rocha básica. (B) Curvas de isovalor com interpretação morfoestrutural e indicação das anomalias observadas em A. As estrelas indicam os pontos com ocorrência de arenito asfáltico. (C) Representação tridimensional de altos e baixos morfoestruturais com indicação das ocorrências de arenito asfáltico. Os tons de verde indicam baixo estrutural e os tons de marrom e cinza indicam alto estrutural. Notar que as ocorrências se encontram nas regiões entre altos e baixos estruturais. Coordenadas UTM em metros; M.C. -51°, SAD69.

Figure 5 – Morphostructural interpretation. (A) Drainage map showing the main interpreted drainage anomalies in red, the spikes on the red lines indicate interpreted dip of the terrane. The Alambari and Remedios rivers form annular and radial anomalies, the positive signs indicate high structural areas. The green dots indicate dolerite outcrops. (B) Isocontour lines with the morphostructural interpretation and indication of the anomalies observed in A. The stars indicate the tar sandstone location. (C) DEM of the morphostructural highs and lows with indication of the tar sand occurrences. The greenish colors indicate low areas and the brownish and grayish colors indicate high structural areas. Occurrences are located mainly on intermediate areas, between highs and lows. UTM coordinates in meters; M.C. -51°, SAD69.

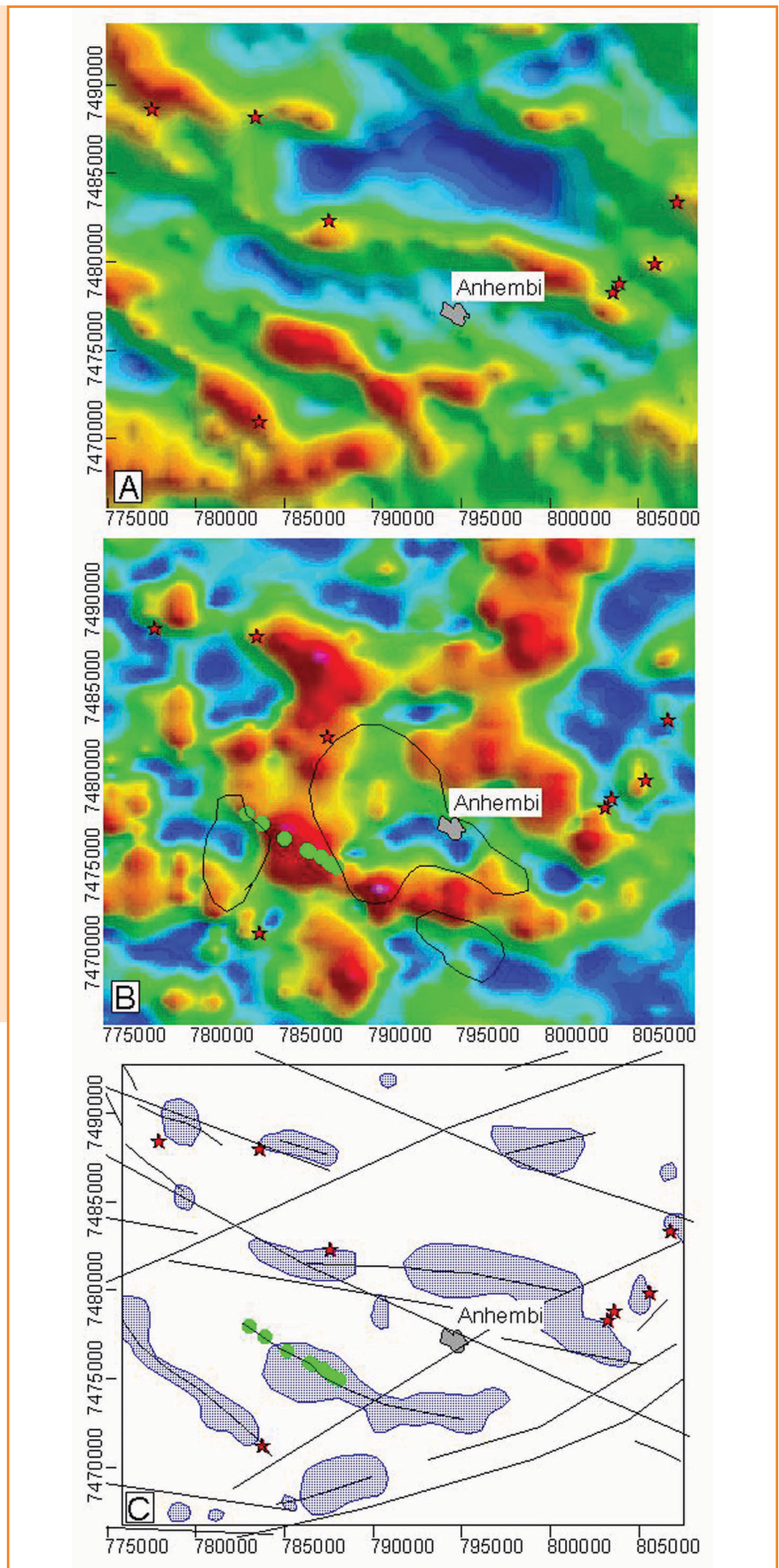
Além disso, os lineamentos NE apresentam menor comprimento em mapa e são segmentados pelos NW. A presença de dois sistemas de falhas sinistrais a 90° entre si sugere a atuação de duas fases de deformação, com as zonas de falha NE, mais antigas, sendo transpostas pelas zonas de falha NW. As estrias encontradas em poucos afloramentos (exemplos nas figs. 7b e 9b) indicam movimentação oblíqua com componente gravitacional nas falhas do Alto de Anhembi. Nos estereogramas de cinco afloramentos com evidências de lineações (fig. 10) podem ser observados o alto ângulo dos planos de falha e as respectivas lineações com baixo ângulo de caimento.

Figura 6 – (A) Dado aeromagnético, 1ª derivada vertical do campo magnético total. (B) Controle Automático de Ganho do campo magnético total com sobreposição da interpretação do alto gravimétrico. Observa-se que o alto gravimétrico, correspondente a um alto estrutural, tem ao seu redor anomalias magnéticas lineares correspondentes a corpos vulcânicos soterrados ou aflorantes (pontos verdes). (C) Os polígonos em azul correspondem a corpos magnéticos não aflorantes. Para a interpretação foi utilizado o critério mínimo de intersecção das anomalias observadas nos dados de 1ª derivada e controle automático de ganho. A direção do eixo maior dos corpos é NO e há coincidência com os maiores valores de anomalia gravimétrica Bouguer. Observa-se que há excelente correspondência entre as anomalias magnéticas lineares e o dique de rocha básica descrito em campo (pontos verdes).

Figure 6 – Airborne magnetic data, (A) 1<sup>st</sup> vertical derivative of the total field. (B) Automatic gain control of the total field with superimposition of the gravity high interpretation. The gravity high, related to a structural high, is surrounded by linear magnetic anomalies (green dots) related to buried or eroded volcanic bodies. (C) The blue polygons show buried magnetic bodies. For interpretation purposes, a minimum requirement criterion of intersection of the anomalies observed in the 1<sup>st</sup> vertical derivative and in the automatic gain control images was applied. The major axis direction of the bodies is NW and there is correspondence with the higher Bouguer values. There is excellent correspondence between the linear magnetic anomalies and the dolerite dike (green dots).

Estas estruturas segmentam o Alto Estrutural de Anhembi e provocam o basculamento dos blocos com mergulho das camadas para sudoeste no bloco sul e para nordeste no bloco norte (figs. 1b e 4). As ocorrências de arenito asfáltico localizam-se junto dos principais lineamentos interpretados, o que sugere que estes lineamentos podem se configurar como condutos do óleo.

Em campo, na ocorrência do Braço da Represa e, principalmente, na ocorrência Betumita, foram encontradas evidências de movimentação tectônica nas direções NE e NO. Nestes casos, foram encontradas bandas e zonas de bandas de deformação (fig. 9a). É importante salientar que em



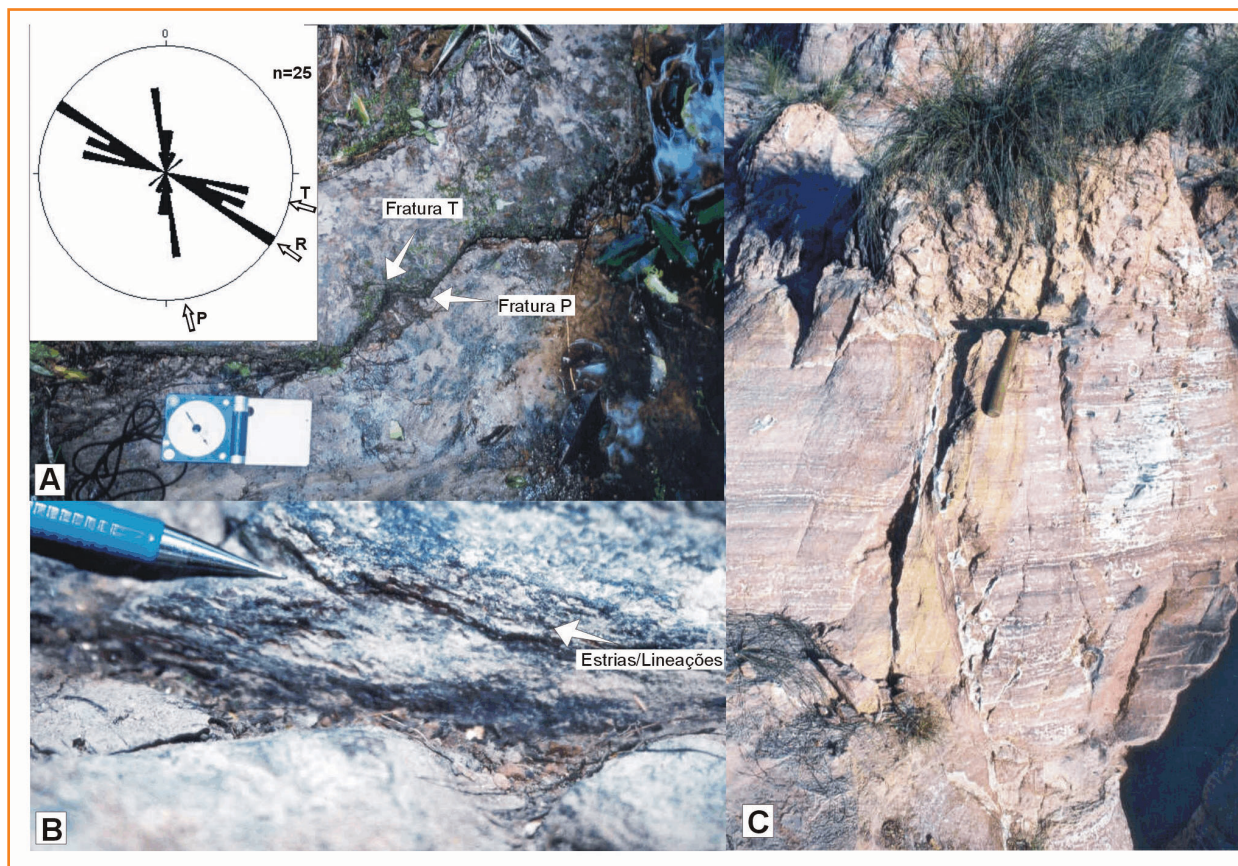


Figura 7 – Exemplos dos principais indicadores cinemáticos encontrados na região de Anhembi. (A) Fraturas escalonadas em siltitos da Formação Teresina (UTM E 787791 m, UTM N 7474490 m; M.C. -51°, SAD69); observam-se as fraturas P e T indicadas pelas setas na foto e P, T e R na roseta. Seu arranjo geométrico sugere movimentação sinistral. O afloramento está junto da Falha Rancho das Bicas-Barreirinho (fig. 1b) de direção N40°-60°O; (B) Estrias em siltitos da Formação Teresina (UTM E 790584 m, UTM N 7477691 m; M.C. -51°, SAD69), atitude da lineação N75°O/19°SE (105/19) coerente com o lineamento N70°W interpretado; (C) Banda de deformação em arenito da Formação Pirambóia (UTM E 787655 m, UTM N 7476806 m; M.C. -51°, SAD69), direção do plano N30°O/80°SO correlacionado à fratura sintética secundária P em área de movimentação sinistral. Esta interpretação é baseada no padrão anastomosado da banda de deformação e na direção N45°O

(direção Y) do lineamento interpretado.

Figure 7 – Examples of the main kinematic indicators from the Anhembi area. (A) Fractures on siltstones of the Teresina Formation (UTM E 787791m, UTM N 7474490 m; M.C. -51°, SAD69); fractures P and T are indicated by the arrows in the photo and P, T and R in rose diagram. Its geometrical arrangement suggests left lateral movement. This outcrop is located on the N40°-60°O Rancho das Bicas - Barreirinho Fault (fig. 1b). (B) Striation on siltstones of the Teresina Formation (UTM E 790584 m, UTM N 7477691 m; M.C. -51°, SAD69), lineation N75°O/19°SE consistent with the N70°W interpreted lineament. (C) Deformation band in sandstone of the Pirambóia Formation (UTM E 787655, UTM N 7476806 m; M.C. -51°, SAD69), plane N30°O/80°SO related to the secondary synthetic P over sinistral-oriented area. This interpretation is based on the anastomosed deformation pattern of the deformation band and on the N45°O (Y direction) interpreted lineament.

escala mesoscópica estas bandas são caracterizadas por apresentarem planos de cominuição livres de hidrocarbonetos. Além disso, microscopicamente não foram notadas quaisquer feições indicativas de expulsão dos hidrocarbonetos dos planos de cominuição, durante o processo de falhamento (fig. 9c). As bandas de deformação encontradas correspondem a falhas NO e NE, logo se interpreta que a migração dos hidrocarbonetos ocorreu **após** a geração destes falhamentos.

## análise rede de drenagem e interpretação morfoestrutural

Dados digitais da rede de drenagem foram obtidos a partir de mapas topográficos 1:50.000 e integrados em um sistema de informações geográficas (SIG). A interpretação morfoestrutural foi baseada em anomalias de drenagem que

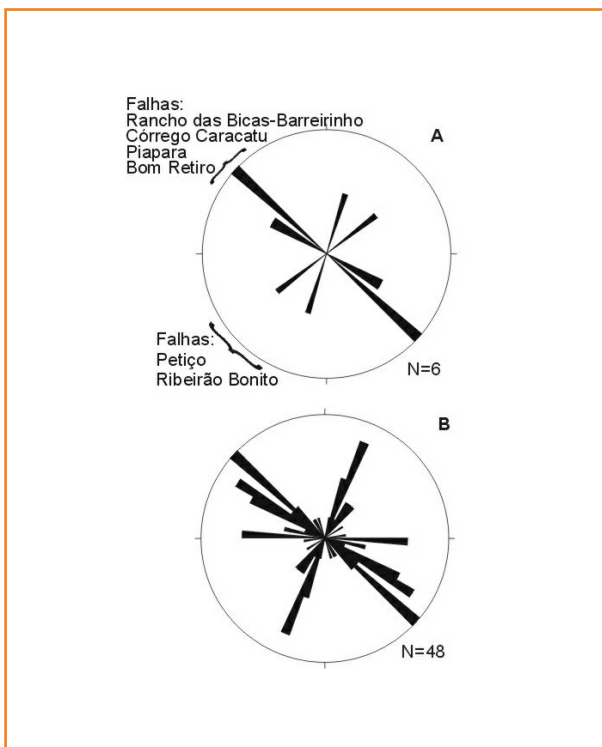


Figura 8 – Rosetas de falhas e lineamentos. (A) Roseta das falhas NE sinistrais e falhas NO sinistrais. (B) Roseta dos lineamentos interpretados em imagens de satélite, MNT e rede de drenagem. Verifica-se boa correlação entre as direções dos lineamentos interpretados e as falhas medidas em campo.

Figure 8 – Rose diagrams of faults and lineaments. (A) Rose diagrams of sinistral NE-trending faults and left lateral NW-trending faults. (B) Rose diagrams of the interpreted lineaments from remote sensing images, DEM (digital elevation model) and drainage network. There is a good correlation between the interpreted lineaments and the faults observed in the field.

representam modificações geométricas do padrão regional de drenagem. Araújo *et al.* (2003) descreve o método de análise morfoestrutural empregado na análise regional da área de ocorrência de arenitos asfálticos na borda leste da Bacia do Paraná em São Paulo. Assim como na área Jacu (Araújo *et al.* 2005), na área Anhembi os dados de campo sugerem que as flexuras detectadas na interpretação morfoestrutural refletem dobras forçadas (*forced folds*) em sub-superfície. Dobras forçadas (Stearns 1978; Withjack *et al.* 1990) são dobras que podem se formar acima de blocos falhados limitados por falhas normais.

O mapa morfoestrutural reflete principalmente os eventos cenozóicos, entretanto é possível reconhecer a influência dos eventos permianos e jurássico-cretáceos em função da reativação do arcabouço preexistente (Araújo *et al.* 2003).

Nota-se a configuração de estruturas de direção NE (altos e baixos morfoestruturais) na região de Piapara e de direção NO (baixo morfoestrutural) na região da Represa de Barra Bonita (fig. 5). Esta direção está relacionada ao alinhamento do Tietê. A oeste da cidade de Anhembi, o alto estrutural é caracterizado por duas expressivas anomalias de drenagem na forma de semi-circunferência, uma para noroeste, formada pelo Rio Alambari e por um braço da represa de Barra Bonita (fig. 5a). Nesta anomalia de drenagem também são observadas drenagens radiais. A outra está voltada para sudeste e é formada pelo Ribeirão dos Remédios (ou Ribeirão Bonito). Estas duas anomalias formam um padrão anelar, com drenagens radiais, características de áreas soerguidas.

Existe uma relação direta entre a geometria do Alto de Anhembi e o magmatismo jurássico-cretáceo que pode ser observada no padrão de drenagem da região central do alto (fig. 5). Nesta área, verifica-se o alinhamento NO de um alto topográfico. Este alinhamento corresponde a uma anomalia de drenagem relacionada a um dique subvertical de rocha básica mapeado com direção N55°O, largura aflorante de 5 m a 10 m e comprimento aflorante de aproximadamente 6 000 m, com afloramentos contínuos de até 200 m de comprimento. Com base no mapa de drenagem, o dique tem no mínimo 10 km e corresponde ao lineamento de drenagem interpretado, o qual é paralelo aos eixos dos rios Tietê e Piracicaba.

Notou-se, a partir de fotos aéreas e de imagens de sensoriamento remoto, que algumas ocorrências de arenito asfáltico na área também estão relacionadas a morfoestruturas localizadas precisamente em regiões intermediárias entre altos e baixos estruturais, como pode ser observado nas figuras 5b e 5c.

## modelo numérico de terreno

Foram digitalizadas quatro cartas topográficas 1:50.000 para a construção do modelo nu-

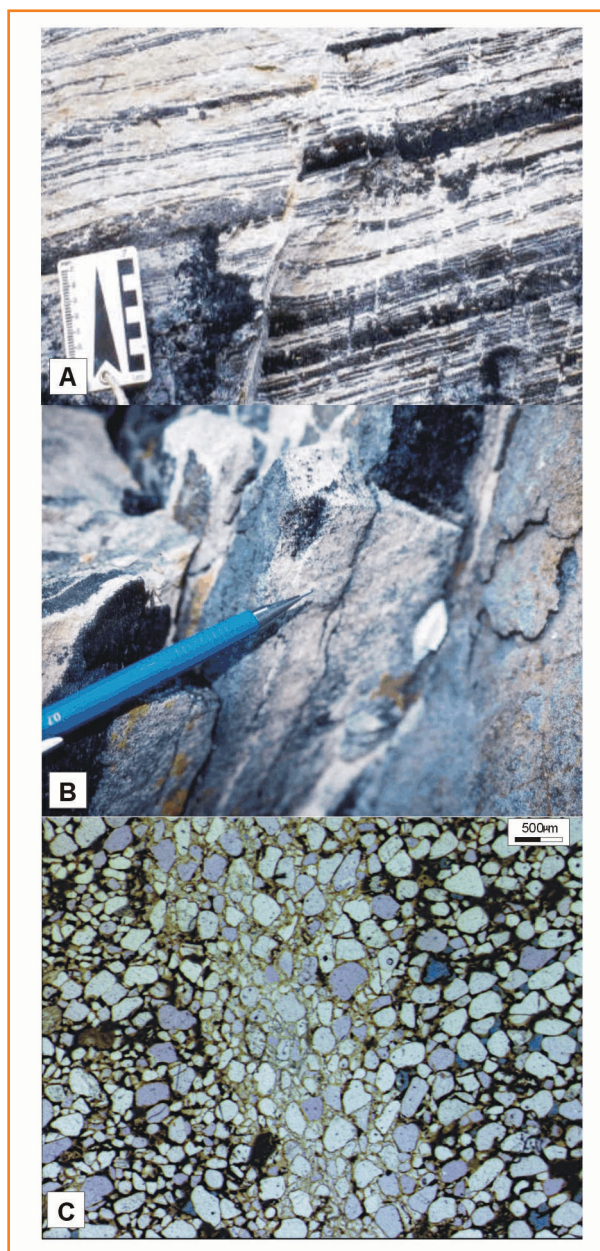
mérico de terreno (MNT). As isolinhas (intervalo de 20 m) foram interpoladas utilizando um algoritmo triangular para rede irregular, resultando em MNT com resolução de 30 m. A iluminação do MNT, a partir de três direções: N45, N315 e Norte, destaca principalmente os lineamentos na direção NO. Os alinhamentos topográficos NO são mais freqüentes que os alinhamentos NE; na porção central da área nota-se o expressivo alinhamento NO correspondente a um dique de diabásio aflorante de comprimento quilométrico, que é observável no mapa de drenagem e também nos mapas aeromagnetométricos

(figs. 5a e 6b). Na porção noroeste do MNT também se nota a anomalia de drenagem, em forma de semicircunferência formada pelo Rio Alambari, assim como a anomalia formada pelo Ribeirão dos Remédios (fig. 4).

Os afloramentos de arenito asfáltico encontram-se em áreas com menor número de lineamentos, que pode ser explicado pela maior concentração de lineamentos na porção central da estrutura de Anhembi. Além disso, as ocorrências localizam-se nas bordas da estrutura onde há presença de coberturas sedimentares terciárias que obliteram a expressão morfológica das zonas de falha. As ocorrências estão, em sua maioria, próximas de lineamentos NO, distanciadas de 200 m até 1 000 m, sugerindo que as áreas com maior densidade de lineamentos foram dissecadas e correspondiam ao alto da estrutura onde houve maior deformação (Araújo *et al.* 2003). Conclui-se que as ocorrências expostas atualmente correspondem a remanescentes de áreas menos deformadas e posteriormente dissecadas nos flancos dos altos estruturais.

#### Figura 9

Bandas de deformação encontradas na ocorrência Betumita (CC199). (A) Zona de banda de deformação com rejeito aparente centimétrico. (B) Estrias no plano de falhamento. (C) Fotografia em lupa com aumento de 6x, cimentação silicosa de grãos na banda de deformação com ausência de hidrocarbonetos.



#### Figure 9

Deformation bands on the Betumita occurrence (CC199). (A) Deformation band zone with 10 cm of apparent displacement. (B) Striation of the fault plane. (C) 6x magnified photo, siliceous cement of the deformation band grains with absence of hydrocarbon.

### gravimetria

Mapas gravimétricos e residuais foram preparados a partir de 120 medidas de campo com espaçamento médio de 1 500 m, que foram submetidas à interpolação por curvatura mínima com malha de 750 m. A interpretação considerou os altos gravimétricos (resíduos positivos), baixos gravimétricos (resíduos negativos), alinhamentos gravimétricos e inflexões das descontinuidades no relevo gravimétrico. O mapa de anomalia Bouguer reflete as respostas cumulativas da gravidade relacionada aos vários estratos, desde o embasamento, cobertura sedimentar e as rochas vulcânicas básicas de alta densidade. Portanto, os mapas residuais são considerados mais adequados para minimizar o efeito do campo de gravidade regional, assim como para realçar a distribuição preenchimento sedimentar e vulcânico. Neste sentido, o mapa de resíduo de primeiro grau da anomalia Bouguer (fig. 11) mostra a correspondência entre a área de afloramento das rochas permianas (centro do Alto de Anhembi), com a disposição do alto gravi-

métrico de direção N60°O, onde se considera que o embasamento sofreu soerguimento. Nos mapas residuais de primeiro, segundo e terceiro grau nota-se o deslocamento do alto gravimétrico para a região central do Alto Estrutural de Anhembi e a configuração de baixos gravimétricos ao redor deste alto.

O dique de diabásio NO está localizado na periferia deste alto gravimétrico, conforme se observa na figura 11b, indicando que esta posição corresponde a uma área de fraqueza na borda do alto estrutural e configura uma área de dilatação e percolação de fluidos. As ocorrências de arenito asfáltico localizam-se em regiões de inflexão entre altos e baixos gravimétricos. As áreas de baixos gravimétricos (resíduos de primeiro e segundo grau) correspondem a porções dos flancos do alto estrutural que foram preservadas. Originalmente, o óleo migrou em direção ao alto estrutural, mas as regiões do ápice da estrutura foram erodidas.

## magnetometria

As rochas básicas não aflorantes foram mapeadas a partir de dados aeromagnéticos. O banco de dados magnético digital faz parte do Projeto Botucatu (Paulipetro, 1980); o espaçamento das linhas de vôo é de 2 000 m e a amostragem foi feita a cada 100 m com direção de vôo N-S e altitude de 450 m. Para melhorar a resposta dos dados de intensidade magnética total e dar suporte à interpretação, os seguintes métodos de processamento foram aplicados: redução ao pólo, cálculo de derivadas verticais, sinal analítico e controle automático de ganho. A interpolação dos dados foi feita por um algoritmo de mínima curvatura com células de 500 m. Os elementos magnéticos mais importantes compreendem os lineamentos e as feições texturais. Os lineamentos magnéticos são localizados entre anomalias magnéticas positivas e negativas alongadas, observadas nos mapas de derivadas e de controle automático de ganho. As feições texturais são divididas em dois grupos, um correspondente a anomalias de baixa e média intensidade de frequência relacionadas a corpos geológicos não aflorantes e interpretadas no mapa de redução

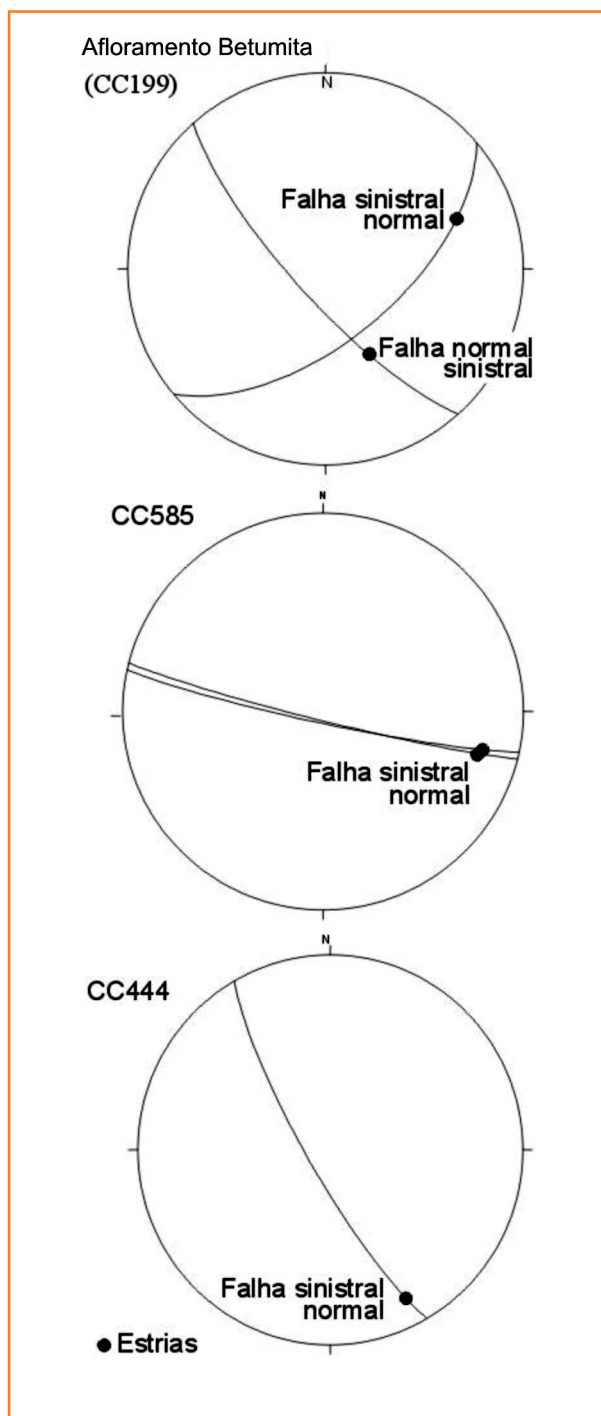


Figura 10

Estereogramas das lineações e planos de falha correspondentes encontrados na região de Anhembi, cuja cinemática pressupõe deformação transtensiva.

Figure 10

Stereograms of the lineations and corresponding fault planes found in the Anhembi region whose kinematics indicates transtensive deformation.

ao pólo. O outro grupo corresponde a anomalias de alta frequência e intensidade que estão relacionadas a afloramentos de rochas básicas ou corpos geológicos magnéticos rasos, interpretados principalmente no mapa de sinal analítico.

A região do Alto de Anhembi é caracterizada pela intersecção de lineamentos magnéticos NE e NO formando romboedros (fig. 6c). Na região do alto estrutural ocorre uma anomalia magnéti-

ca quilométrica de direção NO, indicativa da presença de corpo básico intrusivo (fig. 6b) localizado a sudoeste da cidade de Anhemi, situação que se repete ao norte do Alto de Anhemi. Estes altos magnéticos são limitados por lineamentos magnéticos de direção NE. Interpreta-se que a anomalia magnética de direção NO esteja relacionada à gênese da estrutura de Anhemi durante eventos tectônicos ocorridos a partir do Permiano até o Cretáceo, e principalmente relacionada à reativação pós-paleozóica. Os lineamentos magnéticos NE, caracterizados como limites da estrutura, refletem zonas de fraqueza do embasamento, ou falhas reativadas, que sofreram intrusões de rochas básicas.

Todas as ocorrências de arenitos asfálticos na região de Anhemi coincidem com os lineamentos magnéticos, sejam estes de direção nordeste ou noroeste.

Não há sobreposição entre os altos magnéticos, realçados pelo sinal analítico e anomalias Bouguer. Observa-se que os altos magnéticos estão ao redor dos altos gravimétricos, sugerindo que o bloco alto do embasamento esteja cercado de zonas de fraqueza dilatadas, por onde intrudiram diques de diabásio.

## posicionamento espacial das ocorrências e o magmatismo associado

A maioria das ocorrências de arenitos asfálticos está associada a diques de rochas básicas. Thomaz Filho (1982) observou tal relação na ocorrência Betumita, a partir de sondagens na área de ocorrência. Além disso, há evidências magnetométricas de campo da presença de diques nas ocorrências Moquém, Morro do Bofete, Bairro da Mina, Estrada da Mina, Fazenda São Jorge e Itatigue. Os diques de diabásio funcionaram como armadilhas verticais barrando a migração lateral de hidrocarbonetos. Araújo (2005) obteve uma idade de aproximadamente  $134 \pm 2$  Ma ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) para estes diques, posicionando-os cronologicamente do início ao meio do evento magmático.

Na ocorrência de Porto Martins, encontrou-se um dique aflorante (amostra CC236,  $134 \pm 2$  Ma

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) com direção N40°O/vertical. Neste caso, a ocorrência de arenito asfáltico localiza-se na porção sudoeste do dique. Franzinelli (1972) descreve a presença de diques de rochas básicas na ocorrência de Nhaíva, Morro do Bofete e Porto Martins. Segundo a autora, a migração do betume da Formação Irati até os arenitos teria ocorrido devido à formação de capilaridade e/ou devido à pressão gerada pelas intrusivas básicas. Embora não ocorram diques aflorantes na ocorrência Betumita, Thomaz Filho (1982) descreveu, a partir de dados de sondagem, um dique de diabásio não aflorante de direção aproximada N20°E/vertical. A ocorrência de arenito asfáltico está a leste e limitada pelo dique. O levantamento magnetométrico indica um dique de direção N-N10°E.

No mapa aeromagnético da área de afloramento das ocorrências nota-se a tendência de alinhamento dos altos magnéticos de menor amplitude na direção NO, feição relacionada ao Arco de Ponta Grossa.

A associação dos diques com as ocorrências de arenito asfáltico permite considerar as seguintes hipóteses:

- a intrusão de soleiras nas rochas geradoras, durante o magmatismo Serra Geral, causou a maturação local da matéria orgânica dos folhelhos Irati, e a intrusão de diques eventualmente pode ter propiciado um caminho de migração vertical secundária devido ao fraturamento presente junto à parede do dique;
- o magmatismo ocorreu na forma de pulsos ao longo de aproximadamente 10 Ma; infere-se que estes pulsos propiciaram um mecanismo termal/tectônico que propiciou a migração.

Devido ao posicionamento das ocorrências, apenas do lado dos diques voltado para o deposcentro, argumenta-se que os mesmos, nestes casos, funcionaram como barreiras laterais impermeáveis no caminho de migração horizontal dos hidrocarbonetos. A maturação ainda pode ser explicada pelo magmatismo Serra Geral, mas, neste caso, a migração ocorre tardiamente em relação à intrusão dos diques, quando estes já estão crista-



lizados. Propõe-se que a maturação anômala dos folhelhos da Formação Irati foi condicionada pelo aumento generalizado do grau geotérmico durante o magmatismo e complementarmente por soterramento; embora isoladamente a sobrecarga não apresentasse condições para provocar a maturação. É importante ressaltar que, em quase todas as ocorrências ocorrem diques a leste e baixos estruturais a oeste. Nos mapas gravimétricos também notam-se inflexões com baixos gravimétricos preferencialmente a oeste. Interpreta-se que o padrão de migração do óleo foi do centro da bacia para sua borda, seguindo rotas de migração ao longo das camadas, com os diques NE configurando barreiras verticais. Este padrão de migração provavelmente está relacionado às direções NO predominantes na área e também ao padrão hidrodinâmico da bacia durante a compactação dos pacotes sedimentares e expulsão da água. Além disso, é importante considerar as idades do magmatismo, que indicam direção de magmatismo NO-SE, com idades mais antigas na porção centro noroeste da bacia e mais jovens na porção sudeste.

## interpretação

O modelo para a gênese das ocorrências de arenito asfáltico envolve diversos elementos geológicos. Entre estes elementos, destacam-se o fator Geração relacionado às rochas geradoras do Sub-grupo Irati; o fator Reservatório relacionado aos arenitos da Formação Pirambóia e, secundariamente, da Formação Tatuí (Araújo, 2005); e finalmente o fator Migração / Trapeamento relacionado a zonas de falha e compartimentos estruturais, com evolução policíclica e associados a intrusivas básicas. A existência de hidrocarbonetos em volume considerável indica que a dinâmica (*timing*) do sistema petrolífero foi adequada às condições de acumulação.

Os aspectos de geração e migração primária foram discutidos por Araújo *et al.* (2000) e Araújo *et al.* (2005). Nesse último trabalho, com base no estudo de uma área ao sul do Alto de Anhembi, o autor afirma que a reativação permiana-triássica de estruturas do embasamento controlou os caminhos de migração vertical.

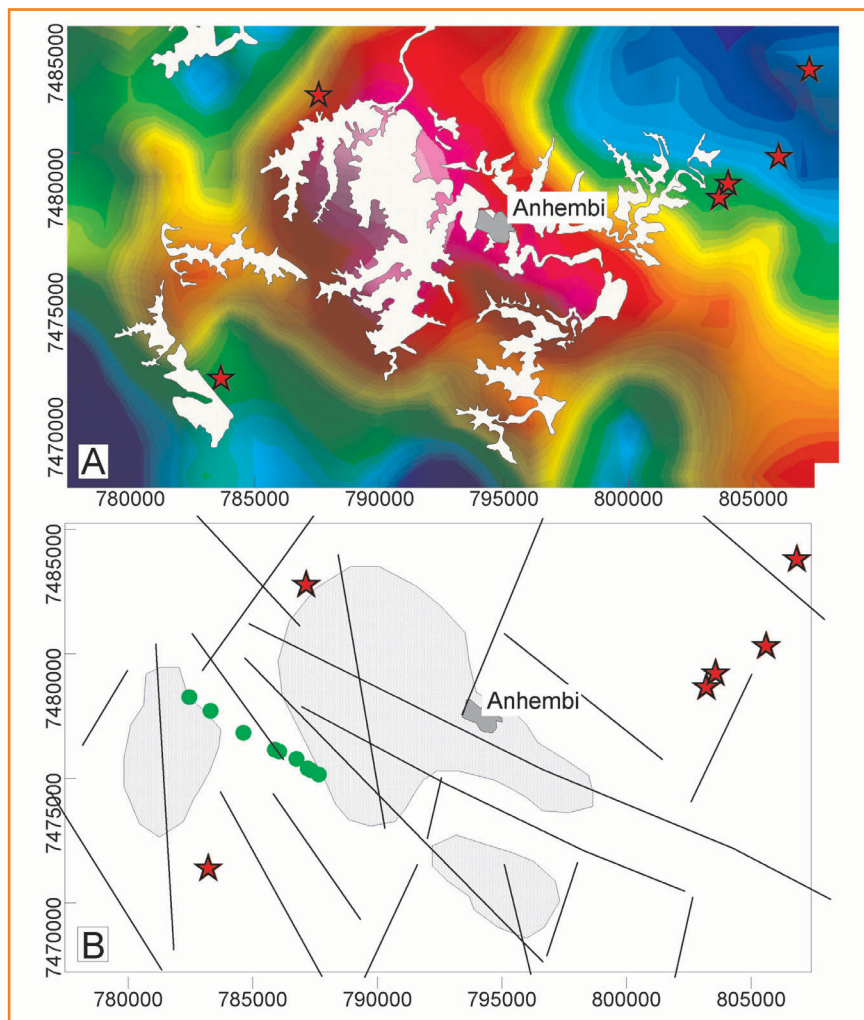


Figura 11 – (A) Mapa de resíduo de grau 1 da anomalia de gravidade Bouguer com sobreposição da área de ocorrência da Formação Teresina em cinza (alto estrutural). (B) Interpretação gravimétrica da área de soerguimento do embasamento e lineamentos. Os pontos verdes representam os afloramentos de um dique de rocha básica de direção NO; as estrelas vermelhas correspondem às ocorrências de arenito asfáltico.

Figure 11 – (A) First order residual gravity field data, Bouguer anomaly with superimposition of the Teresina Formation outcrop area in gray shade (structural high area). (B) Gravity interpretation of the uplift basement area and lineaments. The green dots represent the outcrops of a NW-trending dolerite dike; the red stars represent tar occurrences the field.

Dois fatores principais afetaram a migração secundária: um estratigráfico e um estrutural. O fator estrutural relaciona-se ao desenvolvimento de altos estruturais como o de Anhembi, permitindo a migração ao longo de zonas de falha a partir das regiões de baixo estrutural em direção ao centro dos altos estruturais. O fator estratigráfico diz respeito ao posicionamento da maioria das ocorrências, que estão preferencialmente na porção basal da Formação Pirambóia.

Isto ocorre pela variação de permeabilidade dada pela presença de fácies eólica, de interduna e fluvial. Além disso, considera-se a possibilidade do hidrocarboneto biodegradado ter se constituído como selo aliado à baixa permeabilidade da fácies de interduna.

As ocorrências de arenito asfáltico estão em bordas de altos estruturais provavelmente de idade jurássica-cretácea. A migração ocorreu em direção aos altos estruturais e considera-se que os hidrocarbonetos tenham atingido as rochas-reservatório presentes no topo destas estruturas. Estes altos estruturais foram posteriormente erodidos em um processo provavelmente iniciado no final do Cretáceo e que perdura até hoje. Desse modo, considera-se que os topos dos altos estruturais foram erodidos e as acumulações destruídas. As ocorrências encontradas estão em terrenos remanescentes preservados da erosão em porções intermediárias entre os altos e baixos estruturais.

O fator tempo implícito na cronologia dos eventos, descritos anteriormente, é essencial para a explicação da gênese dos arenitos asfálticos. Considera-se que houve contemporaneidade entre os eventos de geração/migração e a acumulação dos hidrocarbonetos dentro de um período de aproximadamente 10 Ma, correspondente ao evento tectono-magmático da reativação mesozóica.

Entretanto, esta contemporaneidade de eventos provavelmente causou perda de hidrocarbonetos por falta de sincronismo, ou seja, ocorrência de fluxo de hidrocarbonetos na rocha-reservatório sem a geração de selos como soleiras de diabásio ou mesmo derrames basálticos, por exemplo. Neste caso, nota-se que predominantemente há armazenamento em função das condições de permeabilidade da rocha armazenadora. Nos afloramentos de arenito asfáltico, é possível observar este fato no aspecto listrado e irregular provocado pelo preenchimento do óleo nas estratificações cruzadas de origem eólica. Além disso, todas as ocorrências eram formadas por fácies eólica, não tendo sido encontradas ocorrências em depósitos fluviais ou fácies de interduna.

Segundo Araújo *et al.* (2000), a contemporaneidade do processo de geração e migração

com a formação de trapas estruturais (durante o rifteamento do Gondwana) diminui o potencial das formações Pirambóia e Botucatu para armazenar petróleo devido às incertezas associadas ao sincronismo entre os eventos. Com base nesta premissa, os autores definem que há maior chance de armazenamento nas estruturas originadas no evento Cabo La Ventana. Entretanto, na área de estudo, a principal estrutura associada às ocorrências de arenitos asfálticos é o Alto Estrutural de Anhembi de idade jurássica-cretácea; seu papel relaciona-se à migração dos hidrocarbonetos, na forma de falhas condutoras, e à acumulação, na forma de camadas basculadas e diques trapeadores. Desse modo, modificou-se o diagrama de eventos do Sistema Petrolífero Irati-Pirambóia proposto por Araújo *et al.* (2000) para explicar a seqüência de eventos relacionada às ocorrências de arenito asfáltico da área de estudo. Na figura 12 mostra-se o quadro de eventos dos elementos relacionados à gênese de arenitos asfálticos da borda leste da Bacia do Paraná.

## conclusões

Os trabalhos de reconhecimento estrutural de campo, geofísica e análises geocronológicas permitiram o melhor entendimento dos fatores relacionados à gênese das ocorrências de arenito asfáltico no sistema petrolífero Irati-Pirambóia. O método empregado possibilitou o entendimento da gênese das acumulações com base em métodos potenciais que mostraram excelente correlação com os dados de campo. Este método pode ser utilizado com sucesso em outras porções da bacia. Foram definidos fatores estratigráficos e estruturais, e suas relações temporais para a acumulação de hidrocarbonetos na área de estudo. A definição e compreensão do papel destes fatores em uma área de afloramento da borda da bacia contribuem para a pesquisa em porções profundas da Bacia do Paraná. Como importante parâmetro prospectivo definiu-se a presença de diques a leste das acumulações e baixos estruturais a oeste destas.

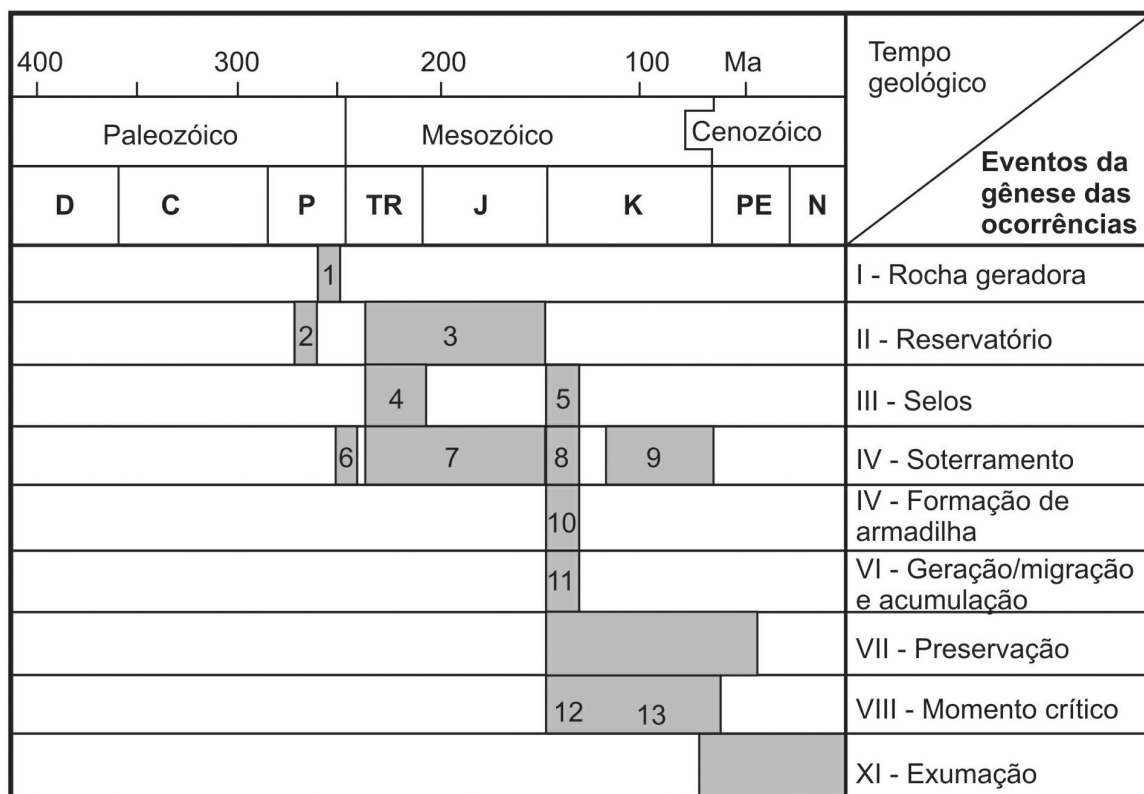
Os levantamentos gravimétricos e magnetométricos auxiliaram na definição do arcaço

Figura 12

Quadro de eventos – arenitos asfálticos. Principais elementos e cronologia relacionados à gênese dos arenitos asfálticos na borda leste da Bacia do Paraná (adaptado de Araújo et al. 2000).

Figure 12

Event chart – tar sandstones. Main elements and chronology related to the tar sandstone genesis in the eastern border of the Paraná Basin (modified after Araújo et al. 2000).



Eventos

**I - Rocha geradora**

- 1. Fm. Assistência (Kazaniano)

**II - Reservatórios**

- 2. Fm. Tatuí
- 3. Fm. Pirambóia e Botucatu

**III - Selos**

- 4. Fm. Pirambóia - fácies fluvial
- fácies eólica (interduna)
- 5. Fm. Serra Geral

**IV - Soterramento**

- 6. Neo-Permiano - Eo-Triássico
- 7. Neo-Triássico - Eo-Jurássico
- 8. Eo-Cretáceo
- 9. Neo-Cretáceo

**V - Formação da armadilha**

- 10. Fase de rifteamento

**VI - Geração / migração e acumulação**

- 11. Efeito termal da rochas ígneas intrusivas

**VII - Preservação**

**VIII - Momentos críticos**

- 12. Reativação Pós-Paleozóica
- 13. Soerguimento no Cretáceo Neo-Cenozóico.

**IX - Exumação**

estrutural da área. A área do Alto de Anhembi é caracterizada como uma região de alto gravimétrico intrudida por rochas vulcânicas. Isto resultou em uma anomalia de drenagem anelar bem definida. A interpretação morfoestrutural empregada permitiu o mapeamento dos principais blocos tectônicos e seus limites. Também permitiu a análise da estrutura do Jacu, que diferentemente da estrutura de Anhembi é caracterizada como de origem geomorfológica

relacionada às direções de intrusão de diques e falhamentos NO e NE.

No Alto Estrutural de Anhembi as anomalias de drenagem estão relacionadas à gênese de uma estrutura originada do soerguimento do embasamento, neste sentido, deriva-se um modelo onde se relaciona diretamente a resposta gravimétrica com o alto estrutural e com o posicionamento de possíveis acumulações de hidrocarbonetos ao seu redor. Comparativamente, para as ocorrências do

Complexo Estrutural do Jacu (Araújo *et al.* 2003 e Araújo *et al.* 2005) verificou-se que a estrutura do Jacu tem gênese geomorfológica e que o posicionamento das ocorrências está relacionado aos altos estruturais, também detectados na gravimetria, circundantes a este complexo. Contudo, notou-se que as ocorrências também se localizam em regiões de cruzamento de falhas que geraram zonas de dilatação propícias à intrusão dos diques e fluxo de fluidos.

O modelo genético regional apresentado por Araújo *et al.* (2004) é válido para a área do Alto Estrutural de Anhembí, embora ainda não se tenha confirmado claramente a relação temporal dos diques NE e NO.

A distribuição espacial das ocorrências de arenito asfáltico na área de estudo está diretamente relacionada aos elementos geológicos condicionantes. Entretanto, os processos erosivos atuantes na região foram fundamentais para a exposição dos afloramentos, e são reconhecidos principalmente pelo posicionamento das ocorrências nos flancos do alto estrutural em detrimento da área do ápice da estrutura, que tem sido erodida desde o Terciário.

Desse modo, considera-se que as ocorrências de arenito asfáltico estão diretamente relacionadas a condicionantes estratigráficos e estruturais, mas o processo denudacional é também considerado fundamental para sua exposição. De modo geral, os principais elementos do fator estratigráfico e estrutural são relacionados e estão no mapa de contorno estrutural (fig. 4): as ocorrências estão localizadas nos flancos de altos estruturais e localizadas a poucos metros do contato Teresina-Pirambóia, que é um importante parâmetro estratigráfico. Nos afloramentos, a presença de camadas argilosas na base da Formação Pirambóia age como uma barreira à migração vertical de hidrocarbonetos. Além disso, a migração lateral seguiu a direção do plano de acamamento dos arenitos Pirambóia (estratificação cruzada eólica).

O fator estrutural está relacionado aos lineamentos interpretados em imagens de satélite, na rede de drenagem e no MNT: as ocorrências estão localizadas perto dos principais lineamentos estruturais, especialmente na intersecção de fa-

lhas NO e NE. Fraturas de distensão relacionadas a falhas NO também são elementos importantes para a migração de óleo. Estas descontinuidades agem como condutos para a migração do óleo, entretanto, considera-se que estas falhas podem agir como selos ao longo do plano principal de deslocamento (Y de Riedel). A geração de falhas está relacionada a antigas zonas de fraqueza, incluindo as estruturas do embasamento, eventos permianos e a reativação pós-paleozóica. É inferido que as falhas transportaram hidrocarbonetos por dezenas de metros verticalmente e poucos metros lateralmente. Já a presença de bandas de deformação não preenchidas por óleo indica o desenvolvimento dos falhamentos pré-migração do óleo.

O elemento-chave na área de estudo é a presença de diques de rochas básicas associados às ocorrências de arenitos asfálticos nos flancos de um alto gravimétrico e morfoestrutural. Deste modo, estas características compõem uma importante ferramenta exploratória. Além disso, as ocorrências estão em áreas de alto magnético. Esta assinatura magnética é interpretada como derivada da presença de corpos básicos intrusivos. O magmatismo agiu nos estágios de geração, migração e acumulação. O magmatismo que gerou as barreiras verticais (diques) ocorreu principalmente no período inicial da reativação pós-paleozóica, assim como o aumento da temperatura que provocou o início da maturação e geração de óleo imaturo. Já a chegada do óleo nos reservatórios estudados ocorreu tardiamente, durante os estágios finais do magmatismo, quando os diques já estavam consolidados. Neste sentido, infere-se que possivelmente houve perda de hidrocarbonetos nas fases iniciais do magmatismo por falta de armadilhas adequadas.

## referências bibliográficas

- ARAÚJO, C. C.; YAMAMOTO, J. K.; MADRUCCI, V. Morphostructural analysis in a tar sandstone area, Paraná Basin, SP. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 24, n. 1-2, p. 25–41, jan./dez. 2003.
- ARAÚJO, C. C.; YAMAMOTO, J. K.; ROSTIROLLA, S. P. Distribuição espacial e caracterização geológica dos arenitos asfálticos das borda leste da Bacia do Paraná no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 34, n. 2, p. 187-200, jun. 2004.
- ARAÚJO, C. C.; YAMAMOTO, J. K.; ROSTIROLLA, S. P.; MADRUCCI, V.; TANKARD, A. Tar sandstones in the Paraná Basin of Brazil : structural and magmatic controls of hydrocarbon charge. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 22, n. 5, p. 671-685, May 2005.
- ARAÚJO, L. A.; TRIGÜIS, J. A.; CERQUEIRA, J. R.; FREITAS, L. C. S. The atypical permian petroleum system of the Paraná Basin, Brazil. In: MELLO, M. R.; KATZ, B. J. (Ed.). **Petroleum systems of South Atlantic margins**. Tulsa, Okla. : American Association of Petroleum Geologists, 2000. p. 377-402. (American Association of Petroleum Geologists. Memoir, 73).
- BRIGUETTI, J. M. P. **Faciologia dos sedimentos da Formação Pirambóia na região de Rio Claro (SP)**. Rio Claro : Universidade Estadual Paulista, 1994. Dissertação (Mestrado).
- CAETANO-CHANG, M. R. **A Formação Pirambóia no Centro-Leste do Estado de São Paulo**. Rio Claro : Universidade Estadual Paulista, 1997. Tese (Doutorado).
- COBBOLD, P. R.; MASSABIE, A. C.; ROSSELLO, E. A. Hercynian wrenching and thrusting in the Sierras Australes foldbelt, **Hercynica**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 135-148, 1986.
- COBBOLD, P. R.; ROSSELLO, E. R.; MILANI, E. J.; SZATMARI, P. (1992) Permo-Triassic intracontinental deformation in SW Gondwana. In: DE WIT, M; RANDSOME, I. G. D. (Ed.) **Inversion Tectonics of the Cape Fold Belt, Karoo and Cretaceous Basins of Southern Africa**. Balkema, 1992. p. 23-26.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Mapa Geológico do Brasil**. Rio de Janeiro, 2001a. 1 mapa. Escala 1:2.500.000. 1 CD-ROM.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Mapa Tectônico do Brasil**. Rio de Janeiro, 2001b. 1 mapa. Escala 1:2.500.000. 1 CD-ROM.
- CHRISTIE-BLICK, N.; BIDDLE, K. T. Deformation and basin formation along strike-slip faults. In: BIDDLE, K. T.; CHRISTIE-BLICK, N. (Ed.). **Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation**. Tulsa, Okla. : Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1985. p. 1-34. (Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication, 37).
- FERREIRA, F. F. J. **Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa**. São Paulo : Universidade de São Paulo, 1982. Dissertação (Mestrado).
- FRANZINELLI, E. **Arenitos asfálticos do estado de São Paulo**. São Paulo : Universidade de São Paulo, 1972. Tese (Doutorado).
- FULFARO, V. J.; SAAD, A. R.; SANTOS, M. V.; VIANNA, R. B. **Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná**. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 12, n. 4, p. 590-611, 1982.
- MATOS, S. L. F. **O contato entre o Grupo Passa Dois e a Formação Pirambóia na borda leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo**. São Paulo : Universidade de São Paulo, 1995. Dissertação (Mestrado).
- MILANI, E. J.; ZALÁN, P. V. An outline of the geology and petroleum systems of the Paleozoic interior basins of South America. **Episodes**, Ottawa, v. 22, n. 3, p. 199–205, Sep. 1999.
- PAULIPETRO. **Botucatu Project-Airborne Survey, Preliminary qualitative interpretation**. São Paulo : PAULIPETRO-Consórcio CESP/IPT. Relatório GEF-SMP-RT-05/80, vol. 1/1980, 14 p., 1980. Relatório Interno.

- PETRI, S.; FULFARO V. J. **Geologia do Brasil**. São Paulo : Universidade de São Paulo, 1983, 631 p.
- ROSSELO, E. A.; MASSABIE, A. C.; LÓPEZ-GAMUNDI, O. R.; COBBOLD, P. R.; GAPAIS, D. Late Paleozoic transpression in Buenos Aires and northeast Patagonia ranges, Argentina. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 10, n. 5-6, p. 389-402, 1997.
- ROSTIROLLA, S. P.; ASSINE, M. L.; FERNANDES, L. A.; ARTHUR, P. C. Reativação de paleolineamentos durante a evolução da Bacia do Paraná : o exemplo do alto estrutural de Quatiguá. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 30, n.4, p. 639-648, 2000.
- SIMONEIT, B. R. T.; BRENNER, S.; PETERS, K. E.; KAPLAN, I. R. Thermal alteration of Cretaceous black shale by basaltic intrusions in the eastern Atlantic. **Nature**, London, v. 273, n. 5663, p. 501–504, Jun. 1978a.
- SIMONEIT, B. R. T.; BRENNER, S.; PETERS, K. E.; KAPLAN, I. R. Thermal alteration of Cretaceous black shale by basaltic intrusions in the eastern Atlantic—II : effects on bitumen and kerogen. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Oxford, v. 45, n. 9, p. 1581–1602, Sep. 1978b.
- SOARES, P. C. Elementos estruturais da parte nordeste da Bacia do Paraná: Classificação e Gênese. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo : Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. v. 4, p. 107-121.
- STEARNS, D. W. Faulting and forced folding in the Rocky Mountains foreland. In: MATTHEWS, V. (Ed.). **Laramide Folding Associated with Basement Block Faulting in the Western United States**. Boulder, Colo. : Geological Society of America, 1978. p. 1–37. (Geological Society of America. Memoir, 151).
- TANKARD, A. J.; ULIANA, M. A.; WELSINK, H. J.; RAMOS, V. A.; TURIC, M.; FRANÇA, A. B.; MILANI, E. J.; BRITO NEVES, B. B.; EYLES, N.; SKARMETA, J.; SANTA ANA, H.; WIENS, F.; CIRBIÁN, M.; LÓPEZ PAULSEN, O.; GERMS, G. J. B.; DE WIT, M. J.; MACHACHA, T.; MILLER, R. M. **Structural and Tectonic controls of basin evolution in southwestern Gondwana during the Phanerozoic**. Tulsa, Okla. : American Association of Petroleum Geologists, 1995, p. 5-52. 1995. (American Association of Petroleum Geologists. Memoir, 62).
- THOMAZ FILHO, A. Ocorrência de arenito betuminoso em Anhembi (SP) - cubagem e condicionamento geológico. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 32., 1982, Salvador. **Anais...** São Paulo : Sociedade Brasileira de Geologia, 1982, v. 5, p. 2344-2348.
- WITHJACK, M. O.; OLSON, J.; PETERSON, E. Experimental models of extensional forced folds. **American Association of Petroleum Geologists. Bulletin**, Tulsa, Okla., v. 74, p. 1038-1054. 1990.
- ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, A.; MARQUES, A. Tectonics and sedimentation of the Paraná Basin. In: GONDWANA SYMPOSIUM, 7., 1988, São Paulo, **Proceedings...** São Paulo : Universidade de São Paulo, 1991. p. 83-117.

## expanded abstract

The focus of this work is the Anhembi High where Permian mudstones outcrop in a Triassic sandstone area and where approximately 8 tar sandstone occurrences are characterized as exhumed reservoirs. This paper examines the habitat of tar accumulation, and integrates fieldwork with morphostructural data, derived from the drainage network, a digital elevation model, gravity field data, airborne magnetic data and the geological interpretation of remote sensing images. The aim of this paper is to explain the genesis of these tar sandstones in the area.

Our study is concerned with the Upper Permian - Lower Cretaceous succession; which straddles the transition from Gondwana geology and orogeny to the events that lead to continental fragmentation and opening of the Atlantic Ocean, including the continental flood basalts. This paper addresses the distribution of tar sandstones and attempts to explain their relationship to stratigraphy, structural framework and magmatism. Geological constraints are related to the presence of the thick sequences of the Serra Geral volcanic rocks, which make the use of seismic methods difficult, and also to the fieldwork data due to the alteration stage of the outcrops. According to these constraints, a geological investigation method was applied based on field gravity and airborne magnetic data. Moreover, a morphostructural analysis was also performed and compared to the potential methods. Finally, all spatial data were organized in a geographical information system (GIS) and compared with the structural and stratigraphic field data to compose an interpretation model for the Anhembi High tar sandstones.

The processes of migration and accumulation have not been fully appreciated yet. Our model of tar migration and accumulation emphasizes structures including faults and fractures that were reactivated during Late Jurassic - Early Cretaceous tectonism, and the role of Serra Geral magmatism in thermal maturation, migration and accumulation. This magmatism took advantage of these structures in a pre-weakened crust. Permian structures were also considered and there is direct evidence of Late Permian - Early Triassic deformation in the Paraná Basin itself. In the northern part of the basin, Rostirolla et al. (2000) attribute activity along these NE-oriented basement structures to this episode of late Permian - Triassic tectonism. The Late Permian Teresina Formation is exposed in the central portion of the Anhembi Structural High where the overlying Triassic Pirambóia Formation cover has been

eroded. This high is rooted in basement structures and it is related to the reactivation of fault zones. The shape and position of the Anhembi High match gravity and magnetic anomalies and also have magmatic intrusions associated with it. There is a direct relationship between the Anhembi High and the Serra Geral volcanics that can be observed on the drainage pattern. All known tar sandstone occurrences are around the structural high on erosion preserved areas.

A morphostructural interpretation addressed the drainage anomalies and the way they record flexures in cover rocks at the structural boundaries of the main structural blocks. These flexures were characterized by drainage asymmetry and have been further modified by lineaments and associated tracts of brittle failure (joints, faults and shear zones) of the deformed cover. There is no seismic, but the field relationships suggest that these flexures were formed as forced folds. There is an excellent superimposition between the morphostructural anomalies and the gravity highs and magnetic lineaments. The morphostructural map is obviously a Cenozoic timeslice, however, we observe that the main trends have reworked the pre-existing structural framework. Thus, it is possible to recognize late Permian and Jurassic-Cretaceous influence because these older fabrics have been reactivated (Araújo et al. 2003).

The Bouguer anomaly map reflects the cumulative gravity responses of the various materials in the Precambrian basement, its sedimentary cover and the basic, high density volcanic rocks. In this sense, the first residual map shows the responses from the basin geology (sedimentary and volcanic basin fill). This map shows the correspondence between the Permian outcrop area and the shape of the N60W-trending gravimetric high; which is interpreted as a basement uplift in this area. The NW-trending dolerite dike is located in the surroundings of the gravimetric high and it is interpreted as a weakness area where dilation occurred and fluid flow lead to an analogous model of the tar sandstones genesis. The occurrences are located on the inflections between the gravimetric highs and lows. These inflection areas are interpreted as the preserved flanks of the structures. Originally oil migrated to the top of the structure, which was eroded subsequently.

The study area is characterized by NE- and NW-trending magnetic lineament intersections forming a polygonal framework. In the central portion of the high there is a NW-trending kilometeric magnetic anomaly indicating a dolerite dike that outcrops, as

well as an extensional (transtensional) pattern probably related to the Anhembi High development, which is coherent with fieldwork, gravity and morphostructural data. All the tar occurrences are located near or over magnetic lineaments with NE- or NW-trends.

Argillaceous beds in the lowermost part of the Pirambóia Formation acted as barriers to vertical migration of hydrocarbons. There is a possibility that sills might have worked like traps, however there is no field evidence, only the absence of the top part of these reservoirs, which were eroded. Tar accumulations are always associated with the main structural network, especially the intersections of NW- and NE-oriented faults. Oil migration followed the tract of extensional fractures, beside the NW-striking faults and the dilated intersections - where these faults and the NE trending fault system cross. The fractured fault

zones and dilation along the fault plains have provided migration fairways, but elsewhere associated intrusive bodies have formed lateral barriers to migration. This migration model using reworked basement fabrics should be regionally predictive.

The novel findings of this investigation are the presence of basic dolerite dykes that largely controlled the maturation, migration and accumulation of the oils. Moreover, we have demonstrated that this environment of tar accumulation is expressed as high magnetic response, thus suggesting a valuable exploration tool. The magnetic signature is, of course, attributed to the presence of basic intrusive igneous bodies along the fault plains. Furthermore, there is also a distinctive signature of the dikes related to the morphostructural and gravity responses when these data are compared to the magnetic response.

## autor principal



**Carlos César de Araújo**

Área de Negócio Internacional

Suporte Técnico

Produção e Reservas

e-mail: [ccaraujo@petrobras.com.br](mailto:ccaraujo@petrobras.com.br)

**Carlos César de Araújo** nasceu em São Bernardo do Campo (SP). Formou-se em Geologia pela Universidade de São Paulo em 1996, onde também obteve os títulos de Mestre em Ciências na área de Recursos Minerais (1999) e Doutor na área de Geologia Sedimentar (2003). Desenvolveu pesquisa com análise de favorabilidade de dados espaciais, processamento e interpretação de dados de sensores remotos, aerogeofísica, gravimetria e geocronologia. Ingressou na Petrobras em 2004. Atualmente, trabalha na Área de Negócio Internacional da Companhia. Sua área de especialização inclui sistemas de informação geográfica, análise de bacias, geologia estrutural e geotectônica. É membro da Sociedade Brasileira de Geologia.