



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ARQUITETURA, LITOFÁCIES E EVOLUÇÃO TECTONO-
ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO RIO DO PEIXE,
NORDESTE DO BRASIL

Autor:

Ajosenildo Nunes da Silva

Dissertação nº 79/PPGG

Orientador:

Prof. Dr. Emanuel Ferraz Jardim de Sá

Co-Orientadora:

Profa. Dra. Debora do Carmo Sousa

Natal/RN, Setembro de 2009



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ARQUITETURA, LITOFÁCIES E EVOLUÇÃO TECTONO-
ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO RIO DO PEIXE,
NORDESTE DO BRASIL

Autor:

Ajosenildo Nunes da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada
em 4 de Setembro de 2009 como
requisito à obtenção do grau de Mestre
em Geodinâmica pelo Programa de Pós-
Graduação em Geodinâmica e Geofísica
da UFRN.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Emanuel Ferraz Jardim de Sá (PPGG/UFRN – Orientador)

Prof. Dr. Fernando César Alves da Silva (PPGG/UFRN)

Dra. Liliane Rabêlo Cruz (PETROBRAS)

Natal/RN, Setembro de 2009

RESUMO

A Bacia do Rio do Peixe está situada no limite dos estados da Paraíba e do Ceará, imediatamente a norte do Lineamento Patos, com área de aproximadamente 1.315 km². Esta é uma das principais bacias de idade eocretácea no interior do Nordeste do Brasil, associadas ao rifteamento que moldou a atual margem continental. A bacia pode ser dividida em quatro sub-bacias, as quais correspondem aos semi-*grabens* de Pombal, Sousa, Brejo das Freiras e Icozinho.

Esta dissertação foi baseada em análises e interpretações de produtos de sensores remoto, levantamentos estratigráficos e dados estruturais de terreno, além de linhas sísmicas e dados gravimétricos.

Trabalhos de campo detalharam a caracterização faciológica das três formações previamente distinguidas na bacia, Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas. Ao contrário do empilhamento estratigráfico clássico, vertical, as relações de campo e a análise sismoestratigráfica evidenciaram as interdigitações e equivalência lateral entre essas unidades. Do ponto de vista bio/cronoestratigráfico e tectônico, as mesmas se correlacionam com a Tectonossequência Rifte neocomiana.

A Formação Antenor Navarro repousa em não conformidade sobre o embasamento cristalino e compreende litofácies originadas por um sistema fluvial entrelaçado, dominado por arenitos de granulometria grossa a conglomeráticos, imaturos, e conglomerados polimíticos na base. As exposições desta formação ocorrem em todos os semi-*grabens*, ao longo de suas margens flexurais. Dados de paleocorrente indicam deposição a partir de áreas fontes no embasamento, a norte/NW, ou a partir de rampas direcionais.

A Formação Sousa é composta por arenitos de granulometria fina, siltitos e folhelhos avermelhados e localmente cinza-esverdeados, laminados, com presença de marcas onduladas, gretas de contração e, por vezes, níveis carbonáticos. Esta formação denota a influência predominante de um sistema fluvial, com inferência (sismoestratigráfica) de fácies lacustre em subsuperfície. A sua distribuição abrange principalmente a parte central dos semi-*grabens* de Sousa e de Brejo das Freiras, que constituem os principais depocentros da bacia. A análise das paleocorrentes mostra que o transporte dos sedimentos também ocorreu de norte/NW para sul/SE.

A Formação Rio Piranhas é composta por arenitos arcossianos de granulometria grossa, com intercalações de brechas e conglomerados polimíticos, depositados por sistemas de leques aluviais. As exposições desta formação ocorrem principalmente nas margens falhadas dos semi-*grabens*, sendo mais restritas na Sub-bacia de Icozinho. As paleocorrentes orientam-se predominantemente no sentido de norte/NW para sul/SE, ou em disposição axial acompanhando paleoescarpas de direção NE/SW. Nos diferentes compartimentos da bacia, esta unidade interdigita-se com as formações Sousa e Antenor Navarro, ratificando a deposição sintectônica do conjunto.

A análise estrutural da Bacia do Rio do Peixe, também baseada em dados de campo e interpretação de seções sísmicas, mostra que as principais falhas representam a reativação frágil de zonas de cisalhamento pré-cambrianas. Tais falhas, normais ou de rejeito oblíquo (normal sinistral para a direção E-W), delimitam os semi-*grabens* e compartimentos internos. O levantamento de dados estruturais permitiu detalhar a cinemática dessas falhas e inferir eixos de *strain* e o regime de esforços atuantes na evolução da bacia.

O levantamento sísmico 2D realizado nos semi-*grabens* de Brejo das Freiras e de Sousa possibilitou a visualização da geometria em cunha dos refletores, que apresentam basculamento para sul/SE, controlado pelas falhas de borda. O arranjo interno dos refletores evidencia a atuação sindeposicional (até sinlitificação) dos falhamentos, como por exemplo o espessamento de camadas e o recobrimento de degraus por estratos mais jovens. São observadas a presença de sinclinais e anticlinais geradas pela combinação do basculamento com a geometria lítrica, os degraus e o arrasto das falhas.

O degrau de Santa Helena perfaz o seu limite sul como uma rampa de revezamento e também se articula com o semi-*graben* de Sousa. A falha de São Gonçalo, com orientação E-W e mergulho para norte, define o limite sul do semi-*graben* de Sousa. Internamente a este segundo semi-*graben* foram identificados dois depocentros limitados por uma falha normal com direção NE-SW e mergulho para NW, adjacente a um alto interno no qual ocorrem indícios de óleo. O principal depocentro, a NW dessa falha, deve atingir 2,0 km de profundidade.

ABSTRACT

The Rio do Peixe Basin is located in the border of Paraíba and Ceará states, immediately to the north of the Patos shear zone, encompassing an area of 1,315 km². This is one of the main basins of eocretaceous age in Northeast Brazil, associated to the rifting event that shaped the present continental margin. The basin can be divided into four sub-basins, corresponding to Pombal, Sousa, Brejo das Freiras and Icozinho half-grabens.

This dissertation was based on the analysis and interpretation of remote sensing products, field stratigraphic and structural data, and seismic sections and gravity data.

Field work detailed the lithofacies characterization of the three formations previously recognised in the basin, Antenor Navarro, Sousa and Rio Piranhas. Unlike the classical vertical stacking, field relations and seismostratigraphic analysis highlighted the interdigitation and lateral equivalency between these units. On bio/chrono-stratigraphic and tectonic grounds, they correlate with the Rift Tectonosequence of neocomian age.

The Antenor Navarro Formation rests overlies the crystalline basement in non conformity. It comprises lithofacies originated by a braided fluvial system system, dominated by immature, coarse and conglomeratic sandstones, and polymict conglomerates at the base. Its exposures occur in the different half-grabens, along its flexural margins. Paleocurrent data indicate source areas in the basement to the north/NW, or input along strike ramps.

The Sousa Formation is composed by fine-grained sandstones, siltites and reddish, locally grey-greenish to reddish laminated shales presenting wavy marks, mudcracks and, sometimes, carbonate beds. This formation shows major influence of a fluvial, floodplain system, with seismostratigraphic evidence of lacustrine facies at subsurface. Its distribution occupies the central part of the Sousa and Brejo das Freiras half-grabens, which constitute the main depocenters of the basin. Paleocurrent analysis shows that sediment transport was also from north/NW to south/SE.

The Rio Piranhas Formation is composed by coarse-grained immature sandstones, breccias and polymict conglomerates deposited as alluvial fans. Exposures of this formation occur mainly at the faulted margins of the half-grabens, being more restricted at Icozinho sub-basin. Paleocurrents flowed to the north/NW, or along strike following paleoscarpments. In the different basin compartments, this unit interfingers with the Sousa and Antenor Navarro formations, attesting to their syntectonic deposition.

Structural analysis of the Rio do Peixe Basin, also based on field data and interpretation of seismic sections, shows that its major faults represent the brittle reactivation of Precambrian shear zones. Such faults, of normal or oblique slip (senestral normal along the E-W trend), define the borders of the half-grabens and internal compartments. The structural data collected allowed to detail the fault kinematics and to infer strain axes and the stress regime active during the evolution of the basin.

The 2D seismic survey conducted in Brejo das Freiras and Sousa half-grabens allowed the visualization of the wedge shaped reflectors, tilted to the south/SE by the border faults. The internal geometry of the reflectors point to the syndepositional (to synlithification) activity of the faults, including layer thickening and younger beds overlying fault steps, and drag features. Syncline and anticline structures were generated by the combination of tilting with the listric geometry, the steps and drag effects of the faults.

The south/SE border of the Brejo das Freiras half-graben is controlled by the homonymous fault, trending NE-SW and dipping to the NW. Gravity and seismic data allow to infer up to 2,5-3,0 km thicknesses for the main depocenter of this half-graben. The Santa Helena step defines its southern limit as a relay ramp and also connects it to the Sousa half-graben. Internally in this second half-graben, two depocenters were recognized limited by a NE-SW trending normal fault dipping to NW, adjacent to an internal high where oil seeps are known. The main depocenter, to the NW of this fault, is up to 2 km deep.

AGRADECIMENTOS

As poucas linhas que serão preenchidas a seguir refletem o meu apreço inestimável e reconhecimento incomensurável de todos que colaboraram para a realização desta Dissertação de Mestrado.

Agradeço ao orientador Prof. Dr. Emanuel Ferraz Jardim de Sá pelo apoio, incentivo, paciência e, principalmente, pelo conhecimento transmitido, muito obrigado. À coorientadora Profa. Dra. Debora do Carmo Sousa pelo apoio e importantes discussões e correções.

À Profa. Dra. Valéria Centurion Córdoba pelas discussões e correções fundamentais para o desenvolvimento da dissertação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG/CCET/UFRN) e À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao projeto de pesquisa “Arquitetura e evolução tectono-estratigráfica das bacias interiores do Nordeste, a norte do Lineamento Pernambuco”, pelo apoio financeiro.

À equipe de campo pelo profissionalismo e dedicação no desenvolver dos trabalhos. Meus sinceros agradecimentos a Antônio, Aureliano A. V. Nóbrega, Axel A. T. de Sousa, Enio Maia, Patrícia R. de Carvalho Costa.

Aos Professores Doutores Alex Francisco Antunes, Fernando Antônio P. L. Lins, Fernando César A. da Silva e Claiton M. dos Santos Scherer pelas contribuições geofísicas e geológicas.

A todos os profissionais que compõem o Laboratório de Geologia e Geofísica do Petróleo, em especial ao Emanuel Brito (Cidadão) e Nilda (PPGG).

Aos colegas de mestrado Barbara, Camila Almeida, Fabio Enrique M. Rojas, Filipa M. C. C. Pereira, Hugo R. Caycedo Garcia, Luana Karina Câmara de Medeiros, Marieli.

Agradecimento especial aos amigos Diogo F. A. Gaspar e Fátima Maria Canelas Cardoso pelo incentivo e apoio nos momentos difíceis, muito obrigado.

Agradeço especialmente à Suzivânia Azevêdo de Medeiros que sempre esteve ao meu lado incentivando e apoiando as minhas decisões.

Agradeço a todos que contribuíram, seja de forma direta ou indireta, para o desenvolvimento e concretização desta dissertação.

SUMÁRIO

RESUMO	iii
ABSTRACT	v
AGRADECIMENTOS	vii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xx
 Capítulo 1 – Introdução	 1
1.1 – Apresentação e Localização da Área de Estudo	2
1.2 – Objetivos e Justificativas	4
1.3 – Base de Dados	5
1.4 – Aspectos Metodológicos	6
 Capítulo 2 – Contextualização Regional e Trabalhos Prévios da Bacia do Rio do Peixe	 8
2.1 – Introdução	9
2.2 – O Embasamento das Bacias Interiores do Nordeste	11
2.3 – Geologia das Bacias Interiores do Nordeste	13
2.3.1 – Estratigrafia e Paleontologia	13
2.3.2 – Estrutura e Tectônica	18
 Capítulo 3 – Cartografia Geológica e o Arcabouço Estrutural e Estratigráfico da Bacia do Rio do Peixe	 20
3.1 – Introdução	21
3.2 – O Arcabouço Estrutural e Estratigráfico	23
3.3 – Mapa Geológico da Bacia do Rio do Peixe	28
3.4 – Análise Sismoestratigráfica e Integração de Dados	31
3.4.1 – Caracterização das Sismofácies e Relações com as Unidades Estratigráficas	31
3.4.2 – Tratos de Sistemas Tectônicos	32
3.4.3 – A Coluna Estratigráfica da Bacia do Rio do Peixe	36

Capítulo 4 – Estudo Faciológico e Cenário Depositional para a Bacia do Rio do Peixe	38
4.1 – Introdução	39
4.2 – Formação Antenor Navarro	39
4.2.1 – Fácies Conglomeráticas	41
4.2.2 – Fácies Areníticas	43
4.3 – Formação Sousa	46
4.3.1 – Fácies Areníticas	48
4.3.2 – Fácies Pelíticas	50
4.4 – Formação Rio Piranhas	53
4.4.1 – Fácies Conglomeráticas	54
4.4.2 – Fácies Areníticas	55
4.5 – Modelo Depositional Integrado para a Bacia.....	58
 Capítulo 5 – Análise Estrutural da Bacia do Rio do Peixe	61
5.1 – Introdução	62
5.2 – Estruturas no Embasamento e na Bacia: Interpretação das Imagens de Sensores Remoto.....	63
5.3 – Geometria dos Semi- <i>Grabens</i> e Altos, e Feições Sismoestruturais Associadas.....	69
5.3.1 – O Semi- <i>Graben</i> de Brejo das Freiras e o Degrau de Santa Helena	72
5.3.2 – O Semi- <i>Graben</i> de Sousa.....	75
5.3.3 – Os Semi- <i>Grabens</i> de Pombal e de Icozinho	77
5.4 – As Falhas de Borda	78
5.4.1 – Regimes de Deformação e Relações com a Seção Sedimentar	78
5.4.2 – Geometria e Cinemática.....	87
5.5 – Falhas Secundárias nas Margens Flexurais	88
5.6 – Regime Cinemático do Rifting Eocretáceo	91

Capítulo 6 – Discussões e Conclusões.....	94
Referências Bibliográficas.....	100
Anexo.....	107

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1 – Introdução

Figura 1.1: Mapa de localização da área com as principais vias de acesso e cidades. Mosaico de imagens (S-25-05, S-24-05 e S-24-00) de satélite <i>Landsat 7-ETM+</i> , exibindo composição em RGB742	3
Figura 1.2: Fluxograma sintetizando todas as atividades empregadas durante a preparação desta dissertação	7

Capítulo 2 – Contextualização Regional e Trabalhos Prévios da Bacia do Rio do Peixe

Figura 2.1: Distribuição das bacias interiores e marginais do Nordeste oriental, com discriminação das principais sequências deposicionais. Modificado de Ponte <i>et al.</i> (1991).....	9
Figura 2.2: Esquema ilustrando o <i>trend</i> Cariri-Potiguar com as principais bacias. O polígono azul (a) apresenta a localização da Bacia do Rio do Peixe; as linhas em preto (b) representam os principais lineamentos (zonas de cisalhamento pré-cambrianas, com segmentos reativados como falhas no Eocretáceo ou em idade mais jovem). Notar a inflexão das isogálicas, desde a Bacia Potiguar até a Bacia do Araripe, definindo o baixo gravimétrico associado ao <i>trend</i> Cariri-Potiguar (delimitado pelas linhas tracejadas em vermelho); tal comportamento evidencia o eixo de afinamento crustal nesta região. Modificado de Castro <i>et al.</i> (1998)	10
Figura 2.3: Distribuição dos domínios tectônicos da Província Borborema, e as principais bacias sobrepostas. Adaptado de Delgado <i>et al.</i> (2003) por Oliveira (2008). Outras bacias cretáceas referidas no texto incluem: (1) Bacia de Iguatu, (2)	

Bacia de Cel. João Pessoa, (3) Bacia do Rio do Peixe, (4) Bacia de Lavras da Mangabeira, (5) Bacias da Zona Transversal	12
---	----

Capítulo 3 – Cartografia Geológica e o Arcabouço Estrutural e Estratigráfico da Bacia do Rio do Peixe

Figura 3.1: Imagem de satélite *Landsat 7 ETM+* na composição RGBI-7537, destacando em tonalidade rosa (b) as rochas pelíticas (dentro dos limites da bacia) e, em tonalidades creme-amarronzadas (a), as rochas areníticas. Nesta composição, as zonas de cisalhamento (c) são bem marcadas, apresentando traços retilíneos a curvilíneos. O contorno preto representa os limites da bacia, os traços mais espessos em preto são as principais falhas, e as fotolineações em vermelho representam as zonas de cisalhamento E-W e NE-SW

24

Figura 3.2: Fotografias do afloramento RP-007, localizado a NNW de São João do Rio do Peixe. Em (A) é ilustrado o contato em não conformidade, com um conglomerado basal da Formação Antenor Navarro sobreposto aos milonitos do embasamento (observar o mergulho forte, para NW, da foliação destes últimos). Em (B) é observado um plano de falha normal, com direção ENE-WSW e mergulho para norte, cortando o conglomerado basal no mesmo afloramento. Notar os *slickenfibers* quartzosos no plano da falha

26

Figura 3.3: Feições da borda falhada do semi-*graben* de Sousa, a leste de Marizópolis. Em (A), fotomosaico da paisagem mostrando, em primeiro plano, o retrabalhamento atual da paleoescarpa da falha de Marizópolis, com a colina sustentada pelo embasamento e flanqueada, a norte, pelos depósitos da Formação Rio Piranhas (FRP). Em segundo plano, observa-se a planície ocupada pela Formação Sousa (FS), que aflora próxima ao veículo, mergulhando para norte pelo efeito de arrasto da falha de borda. O mergulho das camadas inverte para sul, adiante (vide esboço em D). Em (B) é ilustrado o forte mergulho para norte dos arenitos conglomeráticos Rio Piranhas (FRP, afloramento RP-085), devido ao arrasto causado pela falha. Neste local e adjacências (A, B, C), as camadas da Formação Rio Piranhas estão sotopostas (e deste modo, interdigitadas) com os pelitos da Formação Sousa. Em (C) é mostrado o aspecto dos conglomerados

(FRP), incluindo grandes blocos, erráticos do embasamento; imediatamente a norte (à direita na foto), ocorrem os pelitos da Formação Sousa (FS) 27

Figura 3.4: Mapa geológico da Bacia do Rio do Peixe, apresentando modificações referentes à estratigrafia (área de abrangência das formações e coluna estratigráfica, em função das interdigitações e relação lateral entre as formações previamente distinguidas) e o arcabouço e cinemática das falhas. A profundidade nos cortes geológicos foi calibrada com dados de inversão gravimétrica e sísmicos. Observar a localização do furo estratigráfico Lagoa do Forno, a SE de Sousa. Modificado de Ponte *et al.* (1991) e Françolin (1992)..... 30

Figura 3.5: Seção sísmica 0295-2088, evidenciando as configurações internas das sismofácies características de cada unidade mapeada. Para a Formação Antenor Navarro foi interpretada a sismofácies subparalela (a); a Formação Sousa é representada por sismofácies paralela (b) e, a Formação Rio Piranhas, por sismofácies caótica (c). É importante mencionar o truncamento erosional (d), bem expressivo, no topo da seção e a ocorrência de refletores planos de alta frequência (e) imediatamente sobre o embasamento. Ainda nesta figura foram interpretados tratos de sistemas tectônicos. A descrição detalhada dos tratos encontra-se no item a seguir..... 33

Figura 3.6: Perfil litológico do furo estratigráfico Lagoa do Forno (LFst-1-PB). O poço foi locado pelo DNPM no semi-*graben* de Sousa, na localidade de Lagoa do Forno, cerca de 8,7 km a sudeste da cidade de Sousa. Apresenta profundidade final de 1005,75 m. O furo atingiu o embasamento cristalino atravessando as três formações, Rio Piranhas, Sousa e Antenor Navarro. Reproduzido de Roteiro de Campo – Bacias Rio do Peixe e Araripe, PPGG/UFRN 35

Figura 3.7: Coluna estratigráfica proposta para a Bacia do Rio do Peixe, enfatizando as relações de interdigitação e contemporaneidade entre as formações reconhecidas, as quais integram a Tectonossequência Rife nesta bacia. Na Formação Rio Piranhas são distinguidas as fácies areníticas (a) e conglomeráticas (cg) 37

Capítulo 4 – Estudo Faciológico e Cenário Depositional para a Bacia do Rio do Peixe

Figura 4.1: Em (A) é exemplificada a ocorrência de rochas conglomeráticas intercaladas aos pacotes areníticos da fácies **Aa** da Formação Antenor Navarro, na rampa direcional de Aparecida, semi-*graben* de Sousa (afloramento RP-251, ver Anexo 1). (B) Na fácies **Cmm** ocorrem blocos e calhaus de rochas graníticas e gnáissicas (afloramento RP-215), em geral angulosos a subarredondados, na borda flexural a NE de Sousa. Em (C) é observado um arenito fino a médio exibindo forma de leito plano, referente à fácies **Ap** no semi-*graben* de Icozinho (RP-ic-021). (D) Localmente, a fácies **Ap** mostra intercalações de níveis de pelitos, como pode ser exemplificado no afloramento RP-174, semi-*graben* de Brejo das Freiras a sul de Uiraúna..... 42

Figura 4.2: Seção colunar do afloramento RP-021, localizado nas proximidades de Boa Vista, a norte de Sousa (Anexo 1), próximo à borda (margem flexural) do semi-*graben*. Nesta seção são observados arenitos conglomeráticos com estratificações cruzadas acanaladas (A) e tabulares (B), associados a conglomerados imaturos, fortemente litificados; correspondem à fácies **Aa**, com alguns níveis da fácies **At**. As paleocorrentes são dirigidas para SE; o norte é indicado pelo cabo do martelo 44

Figura 4.3: Seção colunar do afloramento RP-013, localizado nas proximidades de Vertente, a SE de Triunfo (Anexo 1), na margem flexural do semi-*graben* de Brejo das Freiras. Nesta seção pode ser observado o arranjo entre as fácies areníticas **Aa** e **Ap**. Em (A) são ilustrados arenitos grossos com estratificações cruzadas acanaladas. Em (B), arenitos grossos com estratificações cruzadas acanaladas (sentido para ESE; norte indicado pelo cabo do martelo), observadas em planta..... 45

Figura 4.4: Em (A), aspecto da Formação Sousa em afloramento (RP-023) na porção central do semi-*graben* de Sousa, com predomínio de camadas de folhelhos vermelhos a verdes, e siltitos intercalados com camadas de arenitos, em geral finos a médios (estes em primeiro plano). Em (B) são observadas pegadas de dinossauros no afloramento RP-020 (Anexo 1), parte do rico acervo paleontológico desta bacia; estes icnofósseis ocorrem principalmente nos níveis pelíticos desta formação 47

Figura 4.5: Seção colunar do afloramento RP-030, localizado nas proximidades de São João do Rio do Peixe (Anexo 1), margem flexural do semi-*graben* de Sousa. Neste ponto foram identificadas fácies areníticas e pelíticas. (A) Arenito fino com grãos bem selecionados, exibindo gradação inversa e laminação plano-paralela. (B) Arenito grosso apresentando estratificações cruzadas acanaladas, com paleocorrentes para SE..... 49

Figura 4.6: Seção colunar do afloramento RP-005 (Anexo 1), a WNW de Marizópolis, em rampa de revezamento na margem falhada. No topo da seção foram identificados níveis com abundante cimentação calcítica, além de marcas onduladas cavalgantes e estratificações cruzadas tabulares, em arenitos finos a médios (em ‘A’ fácies **AI**). Na base da seção observa-se a presença de pacotes pelíticos, intercalados nos arenitos (em ‘B’, fácies **PI**) 51

Figura 4.7: Seção colunar do afloramento RP-023, localizado a NW de Sousa (Anexo 1). Nesta seção colunar é observada a disposição das fácies pelíticas. Pode ser observada a alternância entre siltitos/argilitos e camadas de calcário pedogênico (A), gretas de contração (B) e marcas onduladas (C)..... 52

Figura 4.8: Fácies de brechas e conglomerados da Formação Rio Piranhas. Em (A), o afloramento RP-311, localizado a SW do Açude Pilões (Anexo 1), apresenta brechas sedimentares matriz-suportadas (fácies **Cmm**) com, subordinadamente, níveis incipientemente estratificados (B, detalhe de A). Em (C), o afloramento RP-055, localizado a SW de São Domingos, é constituído por conglomerados e brechas matriz-suportados, com blocos e matacões do embasamento (idem fácies **Cmm**). Em (D) é ilustrado conglomerado com fragmentos placosos de rochas pelíticas (provavelmente rompidos a partir de uma matriz laminada) e de arenitos finos, com formas subarredondadas (variedade da fácies **Cmm**) 56

Figura 4.9: Seção colunar do afloramento RP-035 (Fácies **Aa** e **Ap** da Formação Rio Piranhas), localizado nas proximidades de Lagoa do Forno (Anexo 1), sul de Sousa, próximo á margem falhada desse semi-*graben*. Em (A) são observados arenitos com estratificações cruzadas de baixo ângulo, intercalados com finas camadas de pelitos (em boa parte erodidas). Em (B) são ilustrados arenitos grossos

a conglomeráticos com estratificações cruzadas acanaladas. Notar as paleocorrentes em planta, exibindo direção geral para norte (indicada pelo cabo do martelo)..... 57

Figura 4.10: (A) Representação esquemática do modelo deposicional interpretado para a Bacia do Rio do Peixe, apresentando genericamente os depósitos fluviais, planície aluvial, lacustres e leques aluviais (modelo adaptado de Gawthorpe & Leeder 2000). O modelo contempla, também, os tratos de sistemas tectônicos analisados na figura 3.5. (B) Destaque de perfil N-S ilustrando a disposição dos leques aluviais nas margens falhadas; notar a transição entre as fácies à medida que se afastam do embasamento cataclasado: conglomerados e brechas, e arenitos conglomeráticos, grossos e finos. Notar ainda o basculamento das camadas e, nas vizinhanças da falha, o sinclinal de arrasto 59

Capítulo 5 – Análise Estrutural da Bacia do Rio do Peixe

Figura 5.1: Imagem de radar SRTM com sombreado ressaltando o relevo e sobreposição de uma camada em pseudocolor, com interpretação dos lineamentos. Os traços em vermelho são fotolineações associadas a estruturas dúcteis no embasamento. Observar o contorno nítido dos semi-*grabens*. No limite sul do semi-*graben* de Sousa observa-se lineamentos E-W bem marcados, relacionados à margem falhada e concordantes com o *trend* do Lineamento Patos (LPa). Os limites SE, falhados, dos semi-*grabens* de Brejo das Freiras e de Icozinho (bem como o de Pombal) são concordantes com o *trend* NE do feixe de cisalhamentos de Portalegre. Internamente e nas bordas dos semi-*grabens*, são identificados lineamentos (em azul) interpretados como falhas ou fraturas eocretáceas, com destaque ao sistema escalonado NE, no semi-*graben* de Sousa..... 64

Figura 5.2: Imagem de satélite *Landsat 7 ETM+* na composição RGB-175. Esta composição possibilita a distinção entre as rochas pelíticas (b) e areníticas (a) da bacia. Também nesta composição são destacadas as zonas de cisalhamento (c). O contorno preto representa os limites da bacia, os traços mais espessos em preto são as principais falhas eocretáceas, e as fotolineações em vermelho representam as zonas de cisalhamento brasileiras, com direção E-W ou NE-SW 65

Figura 5.3: Fotomosaico do afloramento RP-311, próximo ao açude Pilões, mostrando a porção sul da falha de Brejo das Freiras. Em primeiro plano são observados os conglomerados e brechas sedimentares da Formação Rio Piranhas (detalhe na figura 5.11A, C, D), associados à borda falhada do semi-graben. A crista topográfica ao fundo é definida por milonitos e veios de quartzo de um ramo da zona de cisalhamento de Portalegre. A falha eocretácea imprime uma larga faixa cataclástica no embasamento, ilustrada na figura 5.10A, B 66

Figura 5.4: Fotografia aérea da porção SW do Semi-graben de Brejo das Freiras, mostrando o truncamento dos *trends* E-W dos milonitos do embasamento por uma falha NE, que define o seu limite com as rochas sedimentares da Formação Antenor Navarro; restritas ocorrências desses sedimentos, a NW do traço da falha, são consistentes com um rejeito moderado 67

Figura 5.5: Imagem de satélite mostrando o sinclinal com duplo caimento (bacia) na porção sul do semi-graben de Brejo das Freiras. A superfície marcadora da estrutura é o acamamento das rochas sedimentares. No detalhe é ilustrada a disposição 3D do arranjo entre a falha, o basculamento e o arrasto das camadas, gerando o sinclinal. Imagem obtida a partir do programa *Google Earth* 68

Figura 5.6: Perfis geológicos da Bacia do Rio do Peixe, ilustrando a geometria interna dos semi-grabens e as relações entre as rochas sedimentares nas margens flexural e falhada. Observar a interdigitação entre as formações e a localização dos depocentros. Notar a estruturação das falhas (borda falhada) em degraus e a ocorrência de conglomerados e outras rochas siliciclásticas mais jovens, sobre os mesmos. Os cortes estão localizados no mapa da figura 3.4. O furo Lagoa do Forno localiza-se próximo à seção, tendo sido representado como apoio à interpretação . 70

Figura 5.7: Interpretação das seções sísmicas do levantamento 0295_rio_do_peixe_-2d, adquiridas pela Projeto Bacias Interiores através de convênio envolvendo a UFRN, a PETROBRAS e a empresa *Brain Technologies*. (A) e (B) correspondem às seções sísmicas *dip* nas sub-bacias de Brejo das Freiras e Sousa, de direção NW-SE. Notar a disposição das falhas com deslocamento normal (em Brejo das Freiras) ou oblíquo normal (em Sousa), delimitando e seccionando os semi-grabens. A ocorrência da Formação Rio Piranhas, em laranja, acompanha as bordas falhadas.

Observar o espessamento das camadas em direção à falha de borda em Brejo das Freiras. Tais falhas são estruturadas em degraus e os sedimentos sobrepostos não correspondem à base do pacote sedimentar, denotando uma sequência de falhas em *piggyback* e a deposição sintectônica do pacote sedimentar. Em (C) observa-se a seção sísmica *strike*, amostrando o semi-*graben* de Sousa, na direção SW-NE e interligando as seções sísmicas anteriores. Notar o alto interno na Sub-bacia de Sousa, interceptado nas seções em (B) e (C), no qual ocorrem exsudações de óleo. A Formação Sousa (verde) é bem marcada pelos refletores de alta frequência, em arranjo paralelo. A Formação Antenor Navarro (amarelo creme) exibe sismofácies descontínuas a paralelas, com um horizonte basal de alta frequência. As linhas sísmicas estão localizadas no mapa auxiliar, com os respectivos códigos; para melhor visualização, comparar com a figura 5.8..... 71

Figura 5.8: Disposição em pseudo-3D (diagrama de cerca) das seções sísmicas, com interpretação estratigráfica e estrutural. Comparar a interpretação com o mapa e perfis geológicos da bacia (figuras 3.4 e 5.6) 72

Figura 5.9: Inversão dos dados gravimétricos na Bacia do Rio do Peixe (levantamento do Projeto Bacias Interiores; PETROBRAS/UFRN/PPGG). Em (A) é ilustrado o mapa com o resultado da modelagem gravimétrica a partir da anomalia *Bouguer* residual; as isolinhas representam a estimativa da profundidade do topo do embasamento (atentar para as escalas em cor). Em (B) é mostrado o arranjo 3D das seções sísmicas e sua correlação com a modelagem gravimétrica, observando a boa correspondência entre os dois métodos geofísicos. As conversões e ajustes foram realizadas pelos geofísicos Alex F. Antunes e Fernando A. P. L. Lira Lins, professores do PPGG/UFRN 73

Figura 5.10: Em (A) é observado o embasamento (micaxistos miloníticos cortados por veios félsicos) falhado e cataclasado (corte em pedreira com direção NW-SE). Embora predominem no corte os componentes de movimento normal, a ocorrência localizada de rejeitos inversos (à esquerda do cabo do martelo) pode refletir o componente direcional do rejeito da falha, neste setor. Com a evolução progressiva das falhas de borda, brechas tectônicas e cataclasitos são gerados principalmente no piso das falhas (protólitos do embasamento, em B e C); em C os fragmentos já

exibem rotação, imersos na matriz cominuída. Ocorrência de brechação também é verificada em afloramentos de rochas sedimentares (D). As fotografias A e B correspondem ao afloramento RP-311, a fotografia C ao afloramento RP-235 e D a RP-010 (Anexo 1)..... 80

Figura 5.11: Em (A) são observadas brechas sedimentares lateralmente dispostas a um degrau de embasamento cataclástico (pedreira ao fundo, ilustrada em 5.10A). (B) é uma brecha sedimentar imatura, com fragmentos do embasamento granito-gnáissico cataclasado. Em (C) a brecha sedimentar inclui matacão de milonito do embasamento. (D) representa uma brecha com matriz lamosa, envolvendo fragmentos de rochas sedimentares e do embasamento cristalino. Estas rochas representam depósitos de fluxo de detritos, característicos da Formação Rio Piranhas. A, C e D correspondem ao afloramento RP-311 e B ao afloramento RP-086 (Anexo 1) 81

Figura 5.12: Em (A) observam-se falhas distensionais/normais basculadas, deslocando foliação e veios de micaxisto milonítico (afloramento RP-311). (B, RP-092) corresponde a uma falha oblíqua, com componente dextral e (C, RP-035) a uma banda de deformação com rejeito direcional, também dextral, indicado pelos sigmóides S-C 82

Figura 5.13: Falhas com feições cataclásticas; *slickenlines* estão invariavelmente bem desenvolvidos. O alto *rake* e batentes nas fibras carbonáticas indicam cinemática normal em (B), afloramento RP-311; nas demais fotos, o movimento é direcional. Em (A), estrutura S-C cataclástica e juntas de distensão em fragmentos indicam rejeito dextral em falha NE (RP-311). Em (D), microjuntas de distensão nos fragmentos da matriz de um conglomerado atestam movimento sinistral em plano E-W (melhor visualizado em C; afloramento RP-054). Os afloramentos constam do mapa no Anexo 1 85

Figura 5.14: Falhas (bandas de deformação) hidroplásticas. São características as estruturas S-C (análogo da trama milonítica), ilustradas em A (geral e detalhe) e a ausência ou reduzida expressão de *slickenlines* (B, C). A e B correspondem ao afloramento RP-015, e (C) ao afloramento RP-031, ambos da Formação Rio

Piranhas (Anexo 1). As bandas apresentam rejeito normal predominante, sendo que a foto (B) ilustra um componente dextral muito subordinado..... 86

Figura 5.15: Mapa geológico da Bacia do Rio do Peixe, com representação de populações de falhas mesoscópicas em estereogramas (identificados por letras, com correspondência ao texto). Os estereogramas plotam as falhas como traços ciclográficos e os *slickenlines* como setas, com indicação da cinemática seguindo o padrão da literatura (falhas normais, oblíquas e de rejeito direcional/transcorrentes)..... 90

Figura 5.16: Exemplos de falhas secundárias nas margens flexurais. Em (A; semi-*graben* de Sousa) é observado o deslocamento do seixo (pequena falha com topo para SSE) associado à atividade de falhamentos ao longo da discordância basal da Formação Antenor Navarro. (B; semi-*graben* de Brejo das Freiras) corresponde a uma falha (banda de deformação) normal com direção NE, na mesma unidade, antitética em relação à falha de borda. A atuação destas falhas não chega a inverter o basculamento regional das camadas. A foto (A) foi obtida no afloramento RP-007 e (B), no RP-076 (Anexo 1)..... 91

Figura 5.17: Com base na análise estrutural desenvolvida neste estudo, pode-se inferir que as discontinuidades estruturais na borda da bacia, com direção E-W foram reativadas como falhas oblíquas, normais sinistrais (caráter transtracional) evidenciadas na figura por setas compostas. Já o *trend* NE de discontinuidades estruturais foram reativadas como falhas normais, evidenciando a distensão NW-SE..... 92

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1 – Introdução

Tabela 2.1: Comparação entre as diversas propostas existentes na literatura, para a coluna estratigráfica da Bacia do Rio do Peixe. Modificado de Lima Filho (1991).....	14
---	----

Capítulo 3 – Cartografia Geológica e o Arcabouço Estrutural e Estratigráfico da Bacia do Rio do Peixe

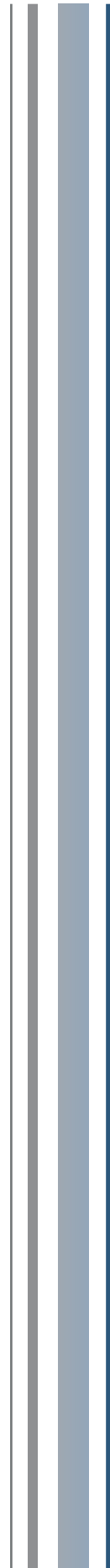
Tabela 3.1: Padrões de tonalidades obtidos a partir das composições em RGB e RGBI para as formações Antenor Navarro e Sousa	22
--	----

Capítulo 4 – Estudo Faciológico e Cenário Depositional para a Bacia do Rio do Peixe

Tabela 4.1: Relação das fácies identificadas na Bacia do Rio do Peixe e sua ocorrência nas formações do Grupo Rio do Peixe.....	40
--	----

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO



1.1 – Apresentação e Localização da Área de Estudo

A dissertação de mestrado desenvolvida pelo autor aborda os trabalhos de mapeamento geológico na Bacia do Rio do Peixe, envolvendo estudos estratigráficos, estruturais e de interpretação sísmica, contribuindo para o entendimento da sua arquitetura e evolução. A Bacia do Rio do Peixe faz parte do conjunto denominado de Bacias Interiores do Nordeste, que compreendem um conjunto de *graben* e *semi-grabens* originados por reativações de descontinuidades estruturais presentes no embasamento pré-cambriano.

O desenvolvimento dos estudos durante o mestrado contou com a orientação do Professor Doutor Emanuel Ferraz Jardim de Sá e com colaborações dos professores doutores Alex Francisco Antunes, Debora do Carmo Sousa, Fernando Antônio Pessoa Lira Lins e Valéria Centurion Córdoba (todos do PPGG/UFRN), bem como do Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer (IG/UFRGS).

Este trabalho está inserido em um projeto de pesquisa em desenvolvimento no Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) da UFRN. O projeto de pesquisa intitulado *Arquitetura e evolução tectono-estratigráfica das bacias interiores do Nordeste, a norte do Lineamento Pernambuco* é financiado por um convênio entre a PETROBRAS e a UFRN/PPGG/FUNPEC. A equipe associada ao projeto é composta por pesquisadores e alunos do PPGG/PRH22/DG-UFRN, bem como de outras instituições cooperantes.

A Bacia do Rio do Peixe encontra-se situada no limite NW do Estado da Paraíba com o Ceará, mais precisamente entre os meridianos 37° 47' 00'' e 38° 50' 00'' de longitude oeste e entre os paralelos 06° 25' 00'' e 06° 50' 00'' de latitude sul, abrangendo uma área de aproximadamente 1.315 km². A bacia pode ser dividida em quatro sub-bacias que correspondem aos *semi-grabens* de Pombal, Sousa, Brejo das Freiras e Icozinho.

O acesso à área pode ser realizado por rodovias federais, BR-230 (partindo de Pombal para Sousa), que atravessa a área de leste a oeste, e pela BR-405 (partindo de Cajazeiras para Uiraúna), ou ainda por rodovias estaduais, PB-391 que interliga a cidade de Sousa à Uiraúna e pela PB-393, partindo de Marizópolis para

São João do Rio do Peixe (figura 1.1). Outros acessos secundários, tais como estradas carroçáveis e caminhos, foram utilizados para recobrir ao máximo a área de estudo.

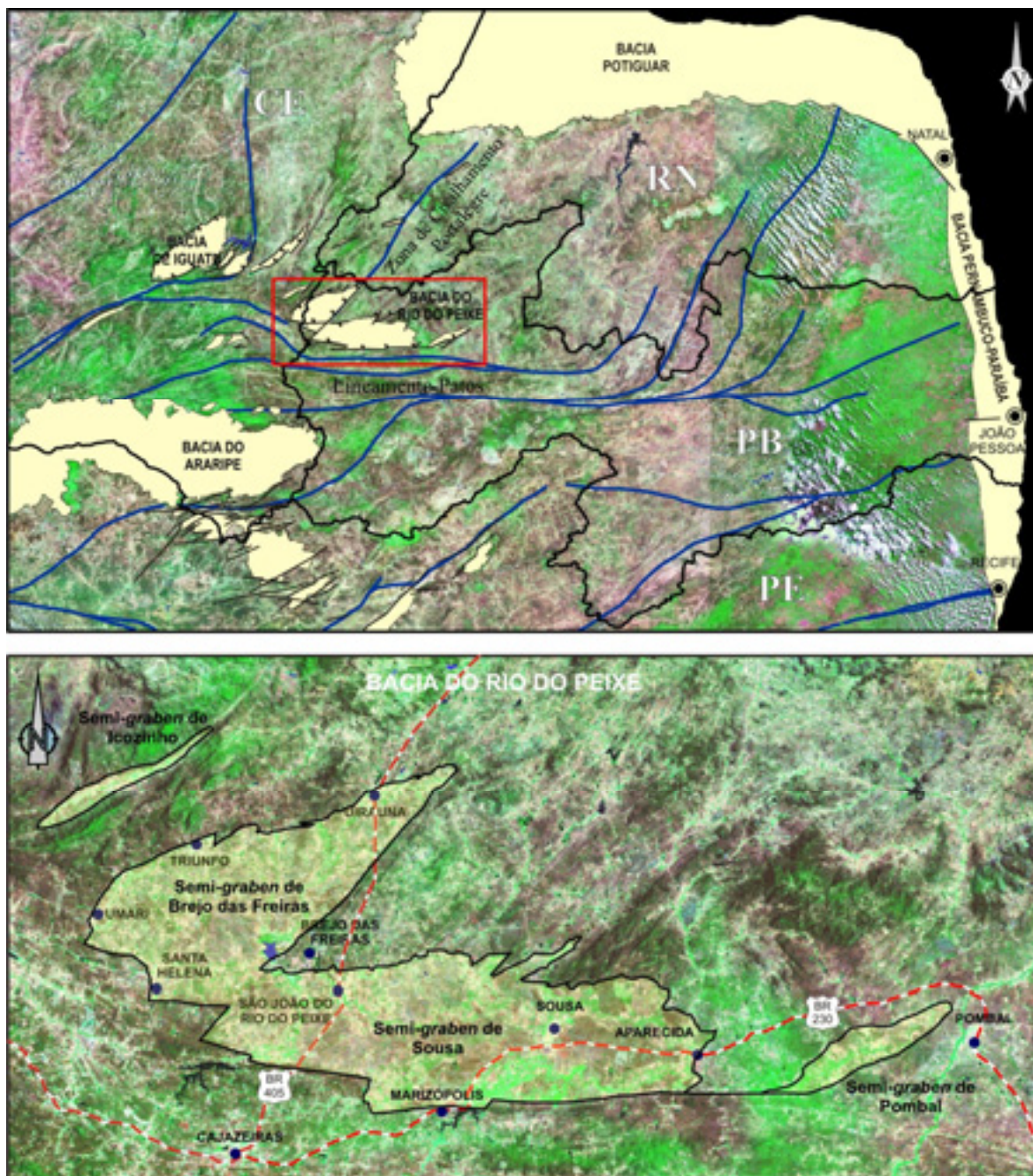


Figura 1.1: Mapa de localização da área com as principais vias de acesso e cidades. Mosaico de imagens (S-25-05, S-24-05 e S-24-00) de satélite *Landsat 7-ETM+*, exibindo composição em RGB742.

1.2 – Objetivos e Justificativas

A Bacia do Rio do Peixe constitui uma das principais bacias interiores do Nordeste, a norte do Lineamento Pernambuco. O estudo dessas bacias (e neste caso específico, Rio do Peixe) vai contribuir para o entendimento de uma série de questões. Por exemplo, se os diferentes *grabens*, que compõem a bacia, possuem uma evolução independente, ou se os sedimentos representam testemunhos de uma bacia maior, embutidos nos referidos *grabens* e assim preservados da erosão.

Como parte do tema proposto, foram realizados estudos com objetivo de analisar o arcabouço estratigráfico e estrutural da bacia, mais especificamente, detalhar o arcabouço estratigráfico com base na caracterização faciológica de cada unidade (formações Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas), as suas relações de contato e eventuais discordâncias que possam estar associadas às unidades litoestratigráficas mapeadas. A ocorrência de depósitos pré-rifte (principalmente a seção neojurássica reportada em outras bacias na região Nordeste), ou exclusivamente de idade sinrifte, tem sido ponto de opiniões divergentes no tocante à coluna estratigráfica desta bacia. Com respeito ao arcabouço estrutural, pretende-se determinar as relações de idade dos falhamentos com respeito às rochas sedimentares, assim como o regime deformacional das estruturas (cataclástico *versus* hidroplástico; sin ou pós-litificação dos sedimentos da bacia).

Como parte dos trabalhos estratigráficos e estruturais, foram interpretadas três seções sísmicas (adicionalmente correlacionadas com dados gravimétricos), que permitiram detalhar a arquitetura da bacia, abordando a geometria dos depocentros e altos, as relações estratigráficas das unidades e a cinemática e cronologia relativa dos falhamentos que condicionam a história deposicional. A partir do mapeamento de campo e pela análise de produtos de sensores remotos, é discutido o controle das falhas sinrifte pela reativação de estruturas do embasamento, especialmente as zonas de cisalhamento brasileiras.

Levantamentos geológicos cada vez mais detalhados da Bacia do Rio do Peixe vêm sendo realizados nos últimos anos. Dados geoquímicos, além da ocorrência de exsudações de óleo (Mendonça Filho *et al.* 2006), indicam condições

favoráveis para possíveis acumulações de hidrocarbonetos, destacando a necessidade de considerar esta e outras bacias similares no cenário das atividades de exploração no Nordeste do Brasil.

1.3 – Base de Dados

Os trabalhos desenvolvidos envolveram a organização do acervo bibliográfico, o qual inclui teses, dissertações, monografias, artigos, cartas topográficas e geológicas. Foram adquiridas fotografias aéreas em escala de 1:20.000, obtidas pela CDRM-PB, e imagens de satélite *Landsat 7 - ETM+*, especificamente a cena WRS 216/065 adquirida em 02/10/2000, com resolução espectral que varia do visível ao infravermelho-próximo, apresentando resolução espacial de 30 metros. Ainda em relação aos sensores orbitais, foram utilizados dados de radar *SRTM*, cena WRS 216/065, com resolução espacial de 90 metros. Todos os dados de sensores orbitais aqui utilizados são de domínio público, tendo sido obtidos na página do *Global Land Cover Facility – University of Maryland*.

Os dados de gravimetria e de sísmica de reflexão foram obtidos no âmbito do Projeto Bacias Interiores. Também foram utilizados dados de litoestratigrafia e estruturas obtidos por outros participantes do projeto (em especial, pela Geóloga Patrícia R. C. Costa), nas mesmas ou em diferentes campanhas de campo. O levantamento sísmico 2D (designado 0295_rio_do-peixe_2d, no BDEP/ANP) realizado na bacia foi objeto de parceria entre o PPGG/UFRN e as empresas PETROBRAS e *Brain Technologies*. Foram adquiridas três seções sísmicas, duas *dip* (direção NW-SE) e uma *strike* (direção NE-SW), totalizando 80 quilômetros lineares e com intervalo de amostragem correspondente a dois milissegundos. As linhas sísmicas levantadas foram processadas na PETROBRAS UN-RNCE pelo Geofísico Heron Schots, gerando como produto as seções sísmicas que foram interpretadas neste trabalho.

1.4 – Aspectos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos aplicados na execução deste trabalho foram subdivididos em etapas, sumarizada abaixo e na figura 1.2:

- i) Revisão bibliográfica e do mapeamento regional, através de compilação dos dados pré-existentes;
- ii) Interpretação de imagens de satélite (*Landsat 7 ETM+*) por meio de composições e aplicações de filtros para realce, utilizando o programa *ER Mapper* 6.4. Análise de imagens de radar para mapeamento do *fabric* dúctil do embasamento e das fraturas na bacia e no substrato, com técnicas de realce e filtragem. Estas imagens foram tratadas com técnicas de sombreamento, utilizando a ferramenta *Hillshade* do programa *ArcGis* 9.1. Este procedimento foi aplicado com o objetivo de ressaltar as feições topográficas e lineamentos do terreno. As feições que mais se destacam foram vetorizadas, definindo as principais orientações das estruturas mapeadas. Adicionalmente, foram utilizadas fotografias aéreas convencionais para auxiliar o mapeamento geológico de detalhe;
- iii) Levantamento de dados sedimentológicos em afloramentos para compor seções estratigráficas, levando em consideração o conteúdo faciológico e a coluna estratigráfica integrada da bacia. Foram obtidos dados estruturais visando à caracterização das falhas, abordando critérios cinemáticos, reativações, rochas e preenchimentos associados, relações com camadas e unidades estratigráficas; distinção das falhas cretáceas com respeito às estruturas tardi-brasilianas e seu controle pelas grandes zonas de cisalhamento dúcteis, de orientação E-W e NE. Todos os dados geológicos foram inseridos numa base única em ambiente *GIS*; para isto, foi utilizado o módulo *ArcMap* do programa *ArcGis* 9.1, resultando na confecção do mapa geológico da área.
- iv) Para a interpretação dos dados sísmicos, foi necessário proceder ao seu carregamento em aplicativos específicos. Neste trabalho, o carregamento dos dados sísmicos foi realizado em estação de trabalho com o programa *Geographix Discovery R2004.1* (versão 8.5) da *Landmark Graphics Corporation*. Inicialmente foi criado um projeto utilizando a ferramenta *ProjectExplorer*, que permite a

inclusão do nome do projeto, local de armazenamento dos dados e o sistema de coordenadas da base de dados. Posteriormente são importados os dados culturais, como por exemplo, o mapa base da área de estudo. A etapa seguinte foi a da criação do ambiente para interpretação, utilizando a interface *SeisVision*, que permite visualizar o dado sísmico no domínio do tempo ou em profundidade, aplicando-se paletas de cores de acordo com as variações de amplitude. Esse procedimento ressalta o contraste entre as reflexões, facilitando o mapeamento de horizontes e falhas.

v) Integração dos dados estratigráficos e estruturais com a interpretação de dados geofísicos (sísmica e gravimetria), finalizando com a elaboração da dissertação com base nos resultados obtidos.

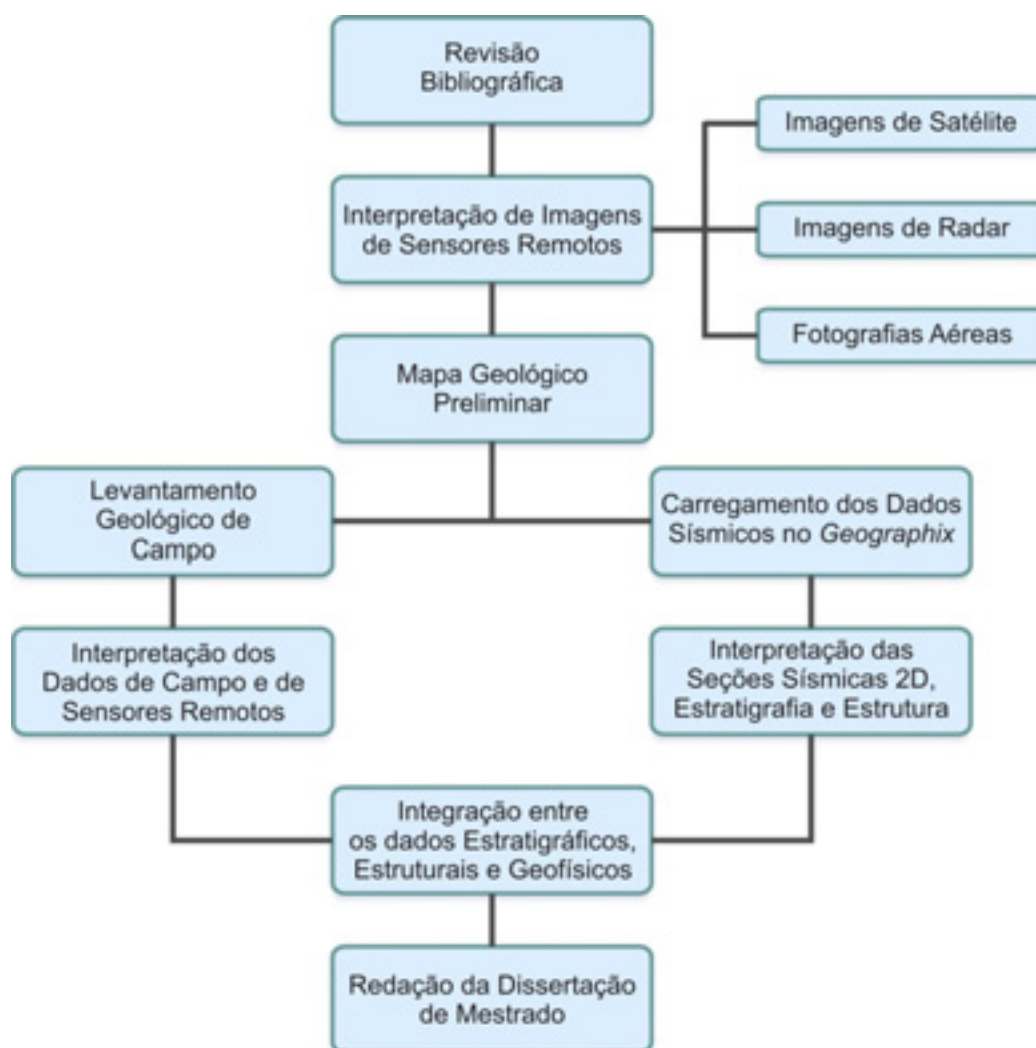


Figura 1.2: Fluxograma sintetizando todas as atividades empregadas durante a preparação desta dissertação.

CAPÍTULO 2

CONTEXTUALIZAÇÃO REGIONAL E TRABALHOS PRÉVIOS DA BACIA DO RIO DO PEIXE

2.1 - Introdução

As Bacias Interiores do Nordeste do Brasil correspondem a um conjunto de remanescente de bacias sedimentares que tiveram origem a partir do preenchimento de depressões geradas pelo evento que separou os continentes Africano e Sul-americano (Ponte *et al.* 1991). Estas bacias sedimentares estão situadas a norte do Lineamento Pernambuco, estrutura que corresponde a uma zona de cisalhamento pré-cambriana; o limite norte das bacias aflorantes corresponde à borda sul da seção albiânica-neocretácea da Bacia Potiguar, próxima à margem continental, que por sua vez capeia uma outra estrutura de *graben* eocretácea (figura 2.1).

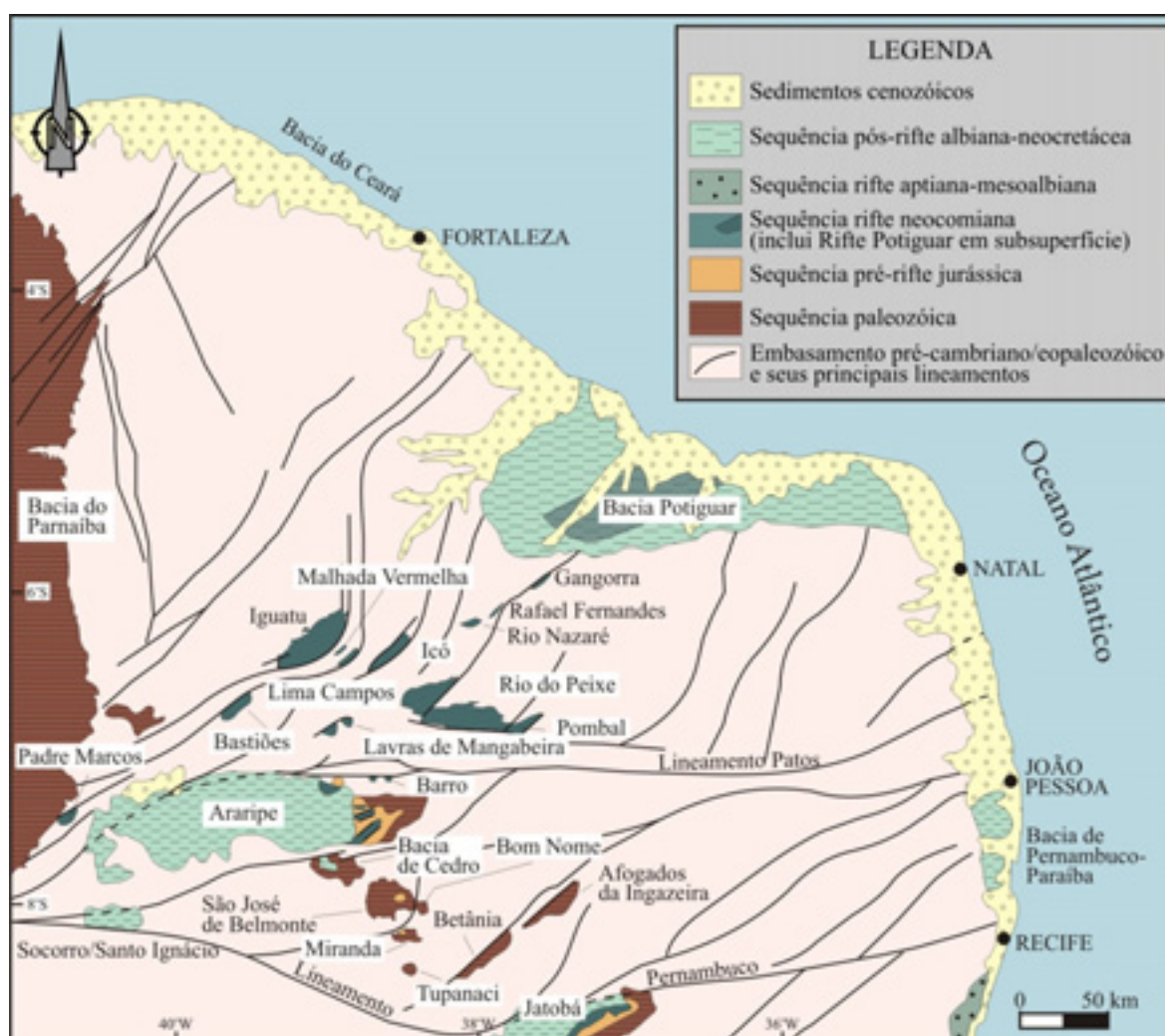


Figura 2.1: Distribuição das bacias interiores e marginais do Nordeste oriental, com discriminação das principais seqüências deposicionais. Modificado de Ponte *et al.* (1991).

Nos vários modelos tectônicos propostos para as bacias interiores (Françolin & Szatmari 1987; Szatmari *et al.* 1987; Conceição *et al.* 1988; Sénant & Popoff 1991; Matos 1992, 1999, 2000; Ponte *et al.* 1991; Françolin 1992; Françolin *et al.* 1994; Ponte & Ponte Filho 1996, p.ex.), as mesmas definem o chamado *trend* Cariri-Potiguar (figura 2.2), demarcando um eixo de rifteamento de idade neocomiana a barremiana. Estas bacias foram objeto de mapeamento e atividade exploratória (sondagens e campanha sísmica) por parte do DNPM, SUDENE e empresas consorciadas com a PETROBRAS, entre o final da década de 60 até os anos 80 (sintetizados por Braun 1969; Ghignone 1986; Ponte *et al.* 1991; Ponte & Ponte Filho 1996). Além do interesse exploratório, tais bacias podem contribuir com análogos de campo para melhor compreensão das rochas e processos nas bacias da margem continental.

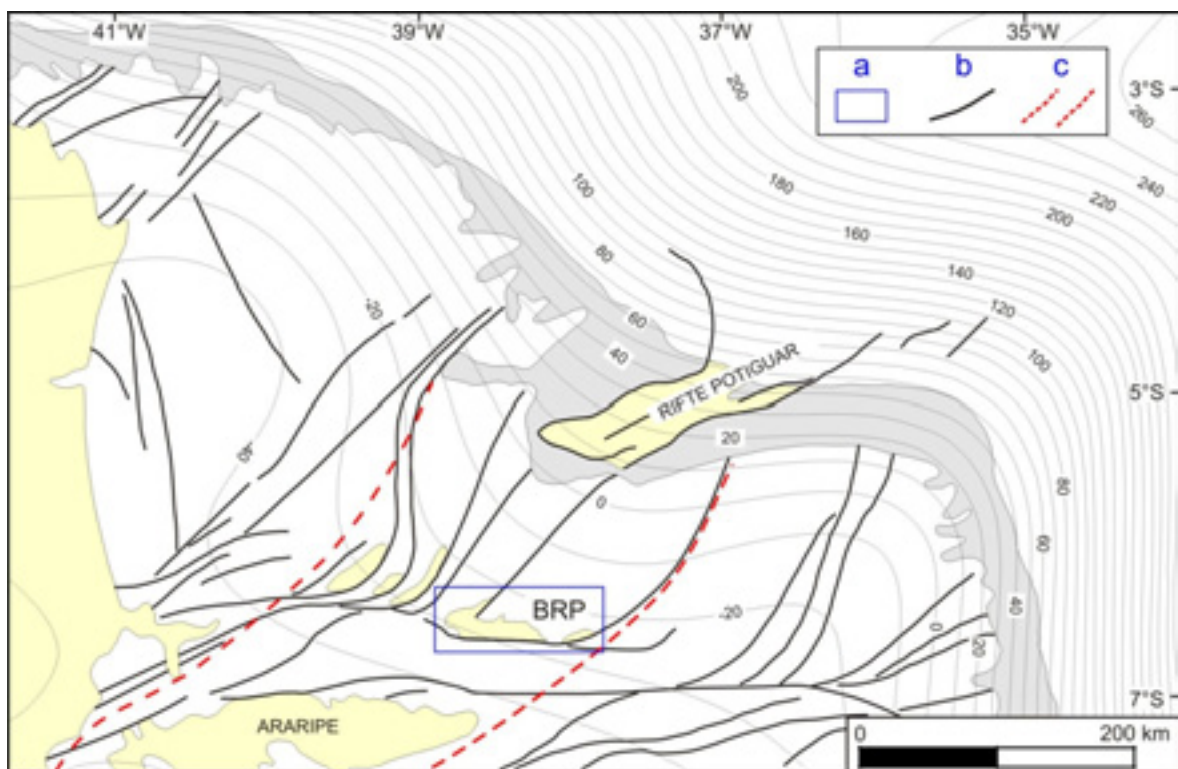


Figura 2.2: Esquema ilustrando o *trend* Cariri-Potiguar com as principais bacias. O polígono azul (a) apresenta a localização da Bacia do Rio do Peixe; as linhas em preto (b) representam os principais lineamentos (zonas de cisalhamento pré-cambrianas, com segmentos reativados como falhas no Eocretáceo ou em idade mais jovem). Notar a inflexão das isogálicas, desde a Bacia Potiguar até a Bacia do Araripe, definindo o baixo gravimétrico associado ao *trend* Cariri-Potiguar (delimitado pelas linhas tracejadas em vermelho); tal comportamento evidencia o eixo de afinamento crustal nesta região. Modificado de Castro *et al.* (1998).

2.2 – O Embasamento das Bacias Interiores do Nordeste

O embasamento das bacias interiores do Nordeste é composto pelas rochas pré-cambrianas da Província Borborema. Corresponde, mais especificamente, aos domínios tectônicos Central, Rio Grande do Norte e Ceará (figura 2.3), separados por extensas zonas de cisalhamento; cada domínio é constituído por vários terrenos, distinguidos por uma série de parâmetros litoestratigráficos, estruturais, geocronológicos e geofísicos (Ferreira & Santos, 2000).

O Domínio Ceará é composto por quatro terrenos, Orós-Jaguaribe, Banabuiú, Ceará Central e o Terreno Acaraú. Limita-se a leste pela Zona de Cisalhamento Jaguaribe, seguindo para sul ao longo da Zona de Cisalhamento Tatajuba (Oliveira, 2008). A porção leste deste domínio (o Terreno Orós-Jaguaribe) inclui estreitas faixas de rochas metavulcanossedimentares associadas à ortognaisses (sendo característicos os corpos de *augen* gnaisses), todos de idade mesoproterozóica, intercaladas tectonicamente com rochas gnáissico-migmatíticos e intrudidas por granitóides relacionados às suítes magmáticas neoproterozóicas (Cavalcante, 1999). Este terreno constitui o embasamento das bacias de Iguatu e Coronel João Pessoa (figuras 2.1 e 2.3).

O Domínio Rio Grande do Norte compreende, de leste para oeste, os terrenos São José do Campestre, Seridó e Rio Piranhas, além do Terreno Granjeiro, mais a sul. Este domínio é limitado a oeste pela Zona de Cisalhamento Portalegre, a norte pela Bacia Potiguar, a leste pela Bacia Pernambuco-Paraíba e a sul pelo Lineamento Patos. O Domínio Rio Grande do Norte é caracterizado por um cinturão neoproterozóico central, denominado de Faixa Seridó. Diferentemente do Terreno Orós-Jaguaribe, nesse domínio não há registro de sedimentação e vulcanismo/plutonismo mesoproterozóico, e sim de uma expressiva e ampla sedimentação neoproterozóica. O Terreno São José do Campestre inclui a mais antiga crosta da Plataforma Sul-Americana, o núcleo arqueano de Bom Jesus, com rochas datadas de até 3,4 Ga (Ferreira & Santos, 2000). Os terrenos Rio Piranhas, Seridó e Orós-Jaguaribe estão representados no embasamento das bacias do Rio do Peixe e (neste caso, na porção norte) Lavras da Mangabeira (figuras 2.1 e 2.3).

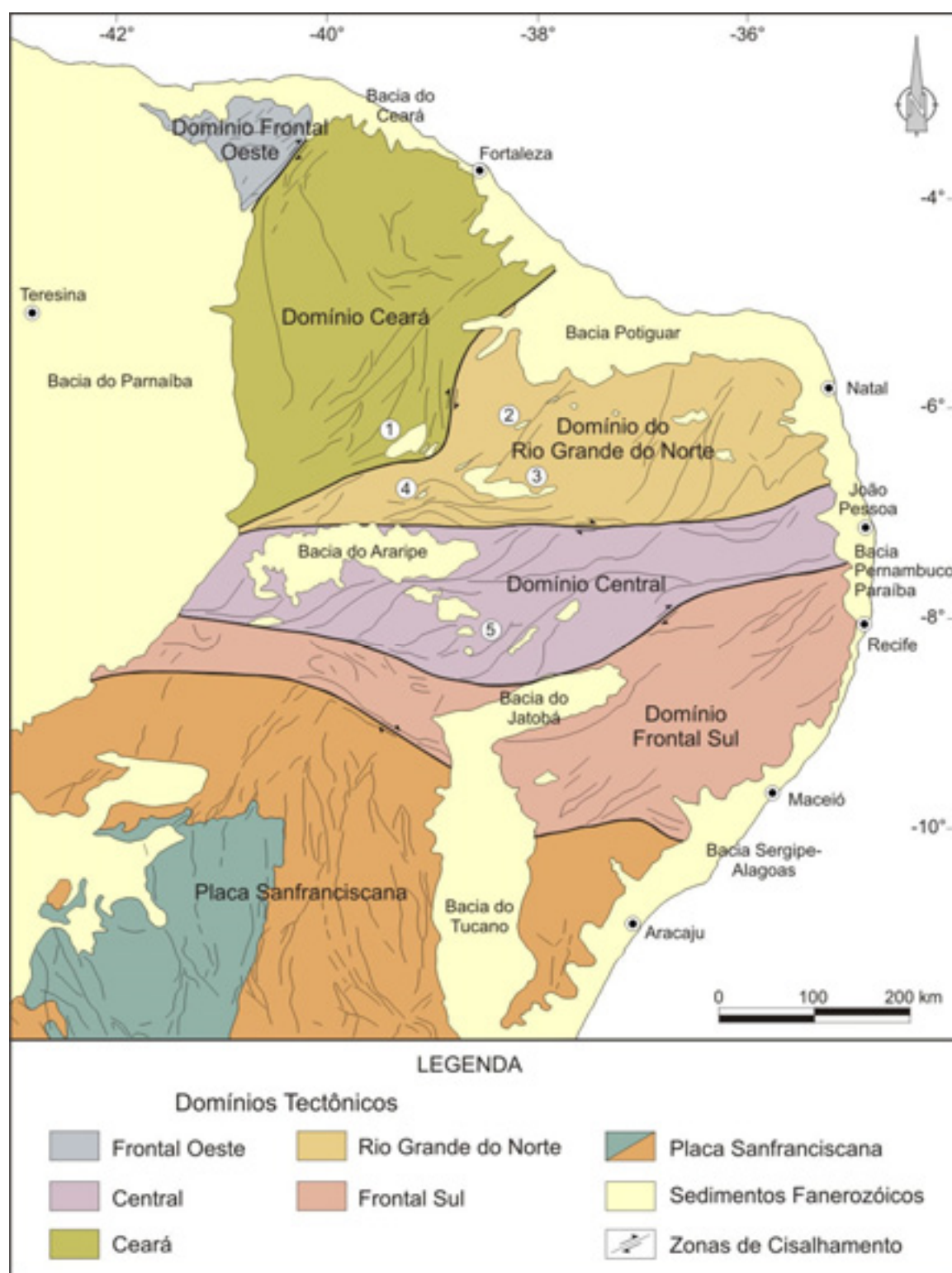


Figura 2.3: Distribuição dos domínios tectônicos da Província Borborema, e as principais bacias sobrepostas. Adaptado de Delgado *et al.* (2003) por Oliveira (2008). Outras bacias cretáceas referidas no texto incluem: (1) Bacia de Iguatu, (2) Bacia de Cel. João Pessoa, (3) Bacia do Rio do Peixe, (4) Bacia de Lavras da Mangabeira, (5) Bacias da Zona Transversal.

O Domínio Central ou Transversal é limitado, a norte e a sul, pelas zonas de cisalhamento Patos e Pernambuco, respectivamente. Este domínio abrange principalmente terrenos de idade meso e neoproterozóica, com importante componente metavulcanossedimentar, podendo ocorrer ainda orto e paragneisses de idade arqueana e paleoproterozóica. Este domínio também é caracterizado por intenso plutonismo granitóide e as importantes zonas de cisalhamento de idade neoproterozóica/brasileira (Medeiros, 2004). Os terrenos da Zona Transversal constituem o embasamento da Bacia do Araripe e demais remanescentes sedimentares a sudeste desta última, as *bacias da Zona Transversal* (Figuras 2.1 e 2.3).

2.3 – Geologia das Bacias Interiores do Nordeste

2.3.1 – Estratigrafia e Paleontologia

A Bacia do Rio do Peixe (BRP) é uma das principais bacias, no interior do Nordeste, associadas ao rifteamento eocretáceo que moldou a atual margem continental. A exemplo de outras bacias (por exemplo, Iguatu), a BRP apresenta uma coluna sedimentar que é atribuída ao Estágio Rifte, de idade neocomiana, de acordo com estudos bioestratigráficos da PETROBRAS (Ponte *et al.* 1991) e de outros pesquisadores. Alternativamente, alguns trabalhos (Garcia *et al.* 2005) citam a possibilidade de ocorrer uma seção pré-rifte, de idade neojurássica, preservada na porção basal dos *grabens*; tal afirmação ainda necessita de dados bioestratigráficos que a comprove. Nesta e nas bacias de Iguatu, não são conhecidos registros de uma cobertura pós-rifte, hoje encontrada apenas nas bacias Potiguar e Araripe. A tabela 2.1 ilustra uma comparação proposta por vários autores para as unidades estratigráficas da Bacia do Rio do Peixe e de outras bacias interiores.

Braun (1969) subdividiu a coluna estratigráfica da BRP em três unidades informais, designadas por A, B e C, com base em descrições litológicas e destacando o conteúdo fossilífero da unidade B. Este estudo representa uma das primeiras tentativas de analisar o registro sedimentar desta bacia. No entanto, a

formalização dessas unidades deve-se a Albuquerque (1970) e Mabesoone & Campanha (1974), que dividiram a coluna estratigráfica da bacia, representada pelo Grupo Rio do Peixe, em três formações, Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas, da base para o topo, respectivamente.

Tabela 2.1: Comparação entre as diversas propostas existentes na literatura, para a coluna estratigráfica da Bacia do Rio do Peixe. Modificado de Lima Filho (1991).

TEMPO (milhões de anos)	GEOCRONOLOGIA		Braun, 1969	Albuquerque, 1970 Mabesoone & Campanha, 1974; Arai, 2006	Lima Filho, 1991	Garcia <i>et al.</i> , 2005	ESTÁGIOS TECTÔNICOS
	PERÍODO	ANDAR					
130	CRETÁCEO	BARREMIANO	C			Fm. Rio P. ?	RIFTE
		HAUTERIVIANO					
		VALANGINIANO	B	Formações Rio Piranhas, Sousa e Antenor Navarro		Formação Sousa	
		BERRIASIANO					
140			A		Formações Rio Piranhas, Sousa e Antenor Navarro		
150	JUR.	TITHONIANO				Fm. A. Navarro	PRÉ-RIFTE
270?							SINÉCLISE
300?							
	SILURO-DEVONIANO						

Tinoco *et al.* (1975) realizaram estudos sobre conchostráceos da Formação Sousa, e os resultados obtidos foram comparados aos de outras unidades estratigráficas mesozóicas. Os dados paleontológicos analisados reforçaram a suposição da idade variando entre o jurássico superior ao cretáceo inferior, para a Bacia do Rio do Peixe.

No artigo publicado por Ghignone *et al.* (1986), os autores abordaram feições estratigráficas e estruturais das bacias do Araripe, Iguatu e Rio do Peixe. Como contribuição importante desse estudo, ressalta-se a identificação da variação lateral entre as unidades, indicando a parcial contemporaneidade das mesmas.

As unidades sinrifte exibem associações paleontológicas (ostracodes, palinórfos) típicas dos andares Rio da Serra e Aratu (Bacias do Araripe, Rio do Peixe, Iguatu), com um importante evento erosional inferido pela ausência dos andares Buracica e Jiquiá, no topo da seção rifte (Arai *et al.* 1989; Ponte & Appi, 1990; Ponte *et al.* 1991). Rochas de idade correspondente ao Andar Alagoas, representadas por uma sequência siliciclástico-carbonático-evaporítica, correlata ao Estágio Transicional das bacias da margem continental, ocorrem apenas na Bacia do Araripe.

Lima *et al.* (1987) realizaram um estudo palinológico da sondagem Lagoa do Forno (furo estratigráfico). Os autores afirmam que toda a seção analisada é, como esperado, não marinha, fato este evidenciado pela ausência completa de elementos do paleomicroplâncton marinho e também pelo predomínio de matéria orgânica de natureza lenhosa. Com base nas interpretações, os autores concordam com uma idade que varia entre o Jurássico Superior e o Cretáceo Inferior para os sedimentos da Bacia do Rio do Peixe. Além disso, os autores destacam que é perfeitamente possível que a Bacia do Rio do Peixe, face ao contexto tectônico regional, seja na verdade uma porção isolada e aflorante da Formação Pendência (Bacia Potiguar).

Arai *et al.* (1989) analisaram dados bioestratigráficos a partir das amostras provenientes de várias bacias interiores do Nordeste. Neste trabalho é importante destacar que o Andar Dom João foi determinado apenas na Bacia do Araripe, a partir do estudo de ostracodes. Dados de palinologia levantados na Bacia do Rio do Peixe, mais precisamente do poço Lagoa do Forno, indicam idade do Cretáceo inferior, correspondendo provavelmente ao Andar Rio da Serra e/ou Aratu. Este resultado é compatível com os dados obtidos por Lima *et al.* (1987).

O estudo de Carvalho & Carvalho (1990) destaca o significado paleoambiental dos conchostráceos na Bacia do Rio do Peixe. As feições estruturais descritas pelos autores, e a análise das diferentes fácies sedimentares no semi-

graben de Sousa, indicam claramente eventos de soerguimento na borda norte. Os depósitos desta área são siliciclásticos grossos (arenitos grossos a conglomeráticos), que evidenciam condições de alta energia; constituindo um sistema hidrodinâmico inapropriado para a manutenção de uma fauna bentônica. Já na porção centro-sul da bacia, os sedimentos siltítico-argilosos traduzem condições ambientais lacustres ou de planície de inundação, em função de uma maior estabilidade tectônica e de uma drenagem direcionada para o interior dos depocentros. Existe assim um controle na distribuição dos conchostráceos definido pelas características hidrodinâmicas do meio, reflexo direto das condições tectônicas que prevaleceram durante a sedimentação na bacia.

Lima Filho (1991) caracterizou litofaciologicamente as formações da Bacia do Rio do Peixe. A Formação Antenor Navarro foi descrita como composta por conglomerados e arenitos grossos arcossianos, associados a arenitos médios a finos, intercalados com siltitos e argilitos. Esta formação teria sido gerada por um sistema fluvial anastomosado e por leques aluviais. A Formação Sousa foi caracterizada pela predominância de folhelhos e siltitos avermelhados e delgadas lentes de calcários, além de intercalações de arenitos finos a grossos. O autor sugeriu que a sedimentação ocorreu em águas calmas, em ambiente lacustre raso ou de planície de inundação, com influência fluvial. A Formação Rio Piranhas é composta por arenitos grossos a conglomeráticos, com intercalações de siltitos e argilitos avermelhados. O autor reconheceu a influência de tectonismo durante a sedimentação na bacia, e considerou relações de fácies entre essas unidades. Em termos cronoestratigráficos, admitiu a ocorrência de rochas pré-cretáceas (Andar Dom João, e mesmo mais antigas) na porção inferior da coluna estratigráfica da bacia.

Nos artigos de Da Rosa & Garcia (1995, 2000), Valença *et al.* (2003), Garcia *et al.* (2005) e Arai (2006), são discutidos vários problemas existentes nos arcabouços estratigráficos apresentados para o Cretáceo inferior das bacias interiores do Nordeste. Arai (2006) destacou que as rochas associadas ao Andar Dom João não ocorrem nas bacias situadas a norte do Lineamento Patos como, por exemplo, na Bacia do Rio do Peixe. O autor comenta ainda que existe um hiato

regional no intervalo compreendido entre os andares Aratu e Neo-Alagoas, referente aos andares Buracica e Jiquiá.

Srivastava & Carvalho (2004) resumiram as feições estratigráficas, paleontológicas e de evolução tectônica da BRP. As formações reconhecidas (Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas, esta última julgada restrita à Sub-bacia de Sousa) foram empilhadas verticalmente, com variação de idade entre os andares Dom João e Aratu. Garcia *et al.* (2005) e Da Rosa & Garcia (2000) advogam a correlação dos arenitos da Formação Antenor Navarro com litofácies semelhantes nas bacias de Sergipe-Alagoas, Tucano-Recôncavo e Araripe, interpretadas como parte da Sequência Pré-rifte neojurássica (Andar Dom João, com as formações Serraria, Sergi e Missão Velha, nas respectivas bacias).

Scherer *et al.* (2007) realizaram um estudo na BRP, mostrando que as fácies identificadas são típicas de sistemas de canais fluviais distributários, que suplantariam em importância (ao menos ao nível aflorante atual) as esperadas fácies lacustres. Tal diagnóstico é baseado na associação de fácies identificadas para cada tipo de depósito presente nas formações, com abundantes feições de exposição subaérea, e no arranjo das paleocorrentes.

Silva *et al.* (2008) realizaram um estudo faciológico e paleoambiental da Formação Sousa com base em três furos estratigráficos rasos, com o objetivo de testemunhar os possíveis folhelhos geradores e os arenitos reservatórios. Os autores ressaltaram que as rochas encontradas em subsuperfície, ao contrário do que se esperava, não são de natureza puramente terrígena, como descrito pela literatura (argilitos vermelhos calcíferos intercalados com corpos de arenitos depositados em paleoambientes aluvial, fluvial e leque distal). O material descrito em testemunho são margas e argilitos calcíferos vermelhos e acinzentados, intercalados por finas camadas de calcilutitos, com laminações microbianas e *tepee*, ou por arenitos com laminações cruzadas. Tais fácies, exóticas para o contexto paleoambiental tradicionalmente proposto pela literatura, parecem indicar um contexto lacustre hipersalino e de *sabkha* (continental?).

2.3.2 – Estrutura e Tectônica

A Bacia do Rio do Peixe é essencialmente constituída por depósitos sinrifte, de idade neocomiana, sendo objeto atual de interesse face à ocorrência de óleo próximo à superfície, a NW da cidade de Sousa (PB). A Bacia do Araripe, a sul do Lineamento Patos, é mais complexa e se destaca por apresentar, em adição aos depósitos sinrifte: (i) uma importante seção pré-rifte preservada no assoalho da bacia, constituída por rochas sedimentares de provável idade eopaleozóica e jurássica, e (ii) uma cobertura pós-rifte, englobando unidades de um contexto lacustre-evaporítico-marinho raso (de idade aptiana-albiana) e siliciclásticos continentais de provável idade albiana-cenomaniana. Mais restritamente (Lavras da Mangabeira, CE), rochas sedimentares truncadas por diques básicos de idade eojurássica podem constituir restos da cobertura pré-rifte aprisionados em semi-*grabens* neocomianos ou, alternativamente, o registro de um primeiro evento distensional, juro-triássico, precursor do rifteamento eocretáceo (Jardim de Sá *et al.* 2007).

Françolin *et al.* (1994) descreveram os tipos de falhas (normais, de rejeito direcional e inversas), a cinemática e os esforços regionais atuantes que influenciaram na estruturação da bacia. A partir da interpretação dessas informações e dados paleomagnéticos demonstrando blocos rotacionados, os autores inferiram que a bacia foi submetida, no Eocretáceo, a esforços compressivos de direção ENE-WSW e distensivos com orientação SSE-NNW, devido à reativação frágil das zonas de cisalhamento brasileiras. Os autores mencionam ainda que a deformação intracontinental provavelmente esteve associada à propagação da zona de rifte de sul para norte, precedendo a abertura do Atlântico Sul.

No artigo publicado por Nogueira *et al.* (2004), foi realizado um estudo magnético e gravimétrico com ênfase ao arcabouço estrutural da Bacia do Rio do Peixe, o que incluiu a geração de um modelo gravimétrico 3D. A modelagem forneceu uma estimativa para a profundidade do topo do embasamento, de até 1.900 metros, na área mais profunda da bacia. A interação entre o procedimento de inversão dos dados gravimétricos, juntamente com informações oriundas das

medidas de densidade e de um furo de sondagem, permitiu delinear o arcabouço geométrico para a bacia, consistente com o conhecimento-geológico tectônico naquela época.

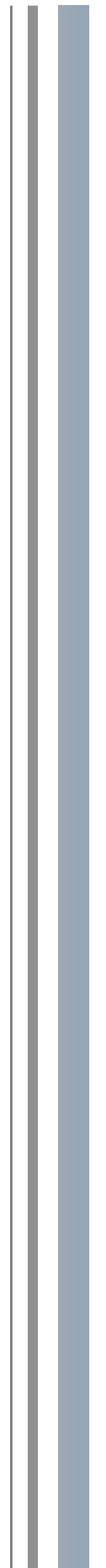
No trabalho de Castro *et al.* (2007) foram detalhados os levantamentos gravimétricos, magnéticos e radiométricos (iniciados por Nogueira *et al.* 2004) no sentido de avançar no conhecimento dos elementos arquiteturais e da evolução tectônica da Bacia do Rio do Peixe. Os autores reforçam que as principais falhas da bacia estão relacionadas à reativação das estruturas pré-cambrianas e condicionadas à orientação do campo de tensões regional, semelhantemente ao que foi exposto no trabalho de Françolin *et al.* (1994). A interpretação de dados gravimétricos indica que a espessura do pacote sedimentar pode atingir 2.000 metros nas partes mais profundas da bacia.

Segundo Sousa *et al.* (2007), a combinação do nível de erosão atual com a geometria das falhas principais da bacia (normais, com *trend* NE, e oblíquas sinistrais, com *trend* E-W) evidencia a existência de quatro semi-*grabens*, Pombal, Sousa, Brejo das Freiras e Icozinho. Dados geofísicos e estruturais corroboram a estimativa de espessura da coluna sedimentar, que pode atingir profundidades de 2 km na porção mais profunda dos depocentros. Nesse estudo foi realizada uma revisão estratigráfica mais refinada, com base na interpretação de seções sísmicas. A aplicação de métodos estratigráficos, incluindo relações com o tectonismo de falhas, permite revisar a estratigrafia desta bacia e atestar o caráter sintectônico dos depósitos.

Baseados na interpretação das seções sísmicas adquiridas na bacia, Antunes *et al.* (2007) destacam a relação existente entre as falhas e o preenchimento sedimentar, detalhando as sismofácies e geometrias presentes em cada semi-*graben*, com destaque para as feições de espessamento de seção em direção às falhas principais, demonstrando o caráter sintectônico da deposição.

CAPÍTULO 3

CARTOGRAFIA GEOLÓGICA E O ARCABOUÇO ESTRUTURAL E ESTRATIGRÁFICO DA BACIA DO RIO DO PEIXE



3.1 - Introdução

A análise do arcabouço geológico da área foi iniciada com a utilização de imagens de sensores remotos e mapas geológicos da literatura. Os dados assim obtidos permitiram a confecção do mapa geológico preliminar para subsidiar os trabalhos de campo. Foram utilizados produtos de sensores remotos, compreendendo imagens de satélite *Landsat 7 ETM+*, imagens de radar *SRTM* e fotografias aéreas. Estes dados foram úteis na identificação das unidades estratigráficas e elementos estruturais, estes últimos ressaltados principalmente nas imagens de radar. Fotografias aéreas foram utilizadas para o mapeamento em detalhe de setores da área de estudo, com identificação de estruturas tectônicas e sedimentares.

As técnicas de processamento digital de imagens (PDI) são importantes para a manipulação de produtos de sensores remotos por computador (imagens de satélite e radar), facilitando a identificação das relações entre os diversos elementos que representam o arcabouço geológico de determinada área.

Com o intuito de destacar nas imagens as unidades geológicas de interesse, foram realizadas composições coloridas em *RGB* ou *RGBI*, que consistem no agrupamento de 3 bandas espectrais de acordo com cada canal (*Red*: Vermelho; *Green*: Verde e *Blue*: Azul), com a possibilidade de acrescentar bandas em outros canais, por exemplo, intensidade, saturação e matiz. Em cada composição gerada foi aplicado tratamento por realce de contraste, utilizando o histograma *equalize*, para obter uma melhor definição das unidades de paisagem, consequentemente favorecendo a identificação de feições estruturais e estratigráficas.

A separação ou limite entre as rochas sedimentares da bacia e o embasamento é bem marcado em todas as composições testadas, mas principalmente nas composições *RGBI-7537* e *RGB-175*, devido ao alto contraste entre esses litotipos (tonalidades mais claras nas rochas sedimentares). Esta observação é evidenciada nos semi-*grabens* de Icozinho, Brejo das Freiras e, em sua maior parte, de Sousa.

Internamente à bacia, a discriminação entre rochas siliciclásticas de granulometria grossa (arenitos, arenitos conglomeráticos e conglomerados) e rochas pelíticas ficou bem evidenciada nas referidas composições RGBI-7537 e RGB-175 (figuras 3.1 e 5.2, respectivamente), bem como em outras composições testadas, tais como RGB-345, RGB-432, RGB-532 e RGB-543.

Com base nestas observações e informações de campo, foi possível correlacionar o padrão de tonalidades das unidades de paisagem com as formações Antenor Navarro e Sousa (tabela 3.1). Por outro lado, a separação entre as formações Rio Piranhas e Antenor Navarro não foi possível por este método, devido às similaridades litológicas envolvidas, sendo ambas constituídas, predominantemente, por rochas conglomeráticas e areníticas.

Tabela 3.1: Padrões de tonalidades obtidos a partir das composições em RGB e RGBI para as formações Antenor Navarro e Sousa.

Formações	Tonalidades	
	RGB-175	RGBI-7537
Antenor Navarro	Vermelho esbranquiçado	Marrom esbranquiçado
Sousa	Marrom esverdeado	Róseo

Nas imagens de satélite foram identificadas extensas faixas com adensamento de fotolineações, que correspondem a zonas de cisalhamento do embasamento, apresentando duas orientações principais, E-W e NE-SW. Outros tipos de lineamentos são relacionados a falhas ou fraturas (figuras 3.1 e 5.2).

Outro aspecto que se destaca nas imagens de satélite e, principalmente, nas fotografias aéreas, são estruturas curvilíneas ou mesmo retilíneas, relacionadas ao acamamento, em especial às intercalações entre rochas pelíticas e areníticas, originando alternância entre tonalidades claras e escuras (figuras 3.1 e 5.2).

Ainda neste capítulo é discutida a interpretação sismoestratigráfica e sismoestrutural preliminar 2D de três seções sísmicas, abrangendo os semi-*grabens* de Brejo das Freiras e Sousa (*vide* Capítulo I, Seções 1.3 e 1.4), e feita sua

integração com dados de campo e de sensores remotos. Foi obtida, desta forma, uma primeira visão da arquitetura da bacia, traduzida no seu mapa geológico e coluna estratigráfica.

3.2 - O Arcabouço Estrutural e Estratigráfico

A Bacia do Rio do Peixe está localizada imediatamente a norte do Lineamento Patos, de direção E-W, na junção com ramos NE da Zona de Cisalhamento de Portalegre.

Na literatura (Rand, 1984; Lima & Coelho, 1987 e Françolin, 1992), esta bacia é descrita como composta por três sub-bacias ou semi-*grabens*, de Pombal, Sousa e Brejo das Freiras, de leste para oeste. Nesta Dissertação, as rochas sedimentares que ocorrem em Icozinho foram consideradas como um quarto semi-*graben*, parte deste conjunto.

O Embasamento pré-cambriano é dominado por dobramentos e zonas de cisalhamento de extensão pluriquilométrica, como pode ser visto nas imagens de satélite (figuras 3.1 e 5.2) e de radar (figura 5.1). Na área é destacado um domínio norte caracterizado por fotolineações com *trend* NE-NNE, incluindo as zonas de cisalhamento diagnosticadas pelo adensamento dos traços estruturais. Os litotipos envolvidos são predominantemente ortognaisses paleoproterozóicos e granitóides brasileiros foliados, e equivalentes miloníticos. No domínio a sul, caracterizado por litotipos similares, além de micaxistos, são mais frequentes as rochas miloníticas e os *trends* estruturais variam em torno de E-W (WNW a ENE).

As sub-bacias apresentam-se alongadas segundo o *trend* dominante no embasamento adjacente; no caso de Sousa, o *trend* E-W do Lineamento Patos, enquanto que as demais exibem direção NE (Brejo das Freiras, Icozinho) ou ENE (Pombal).

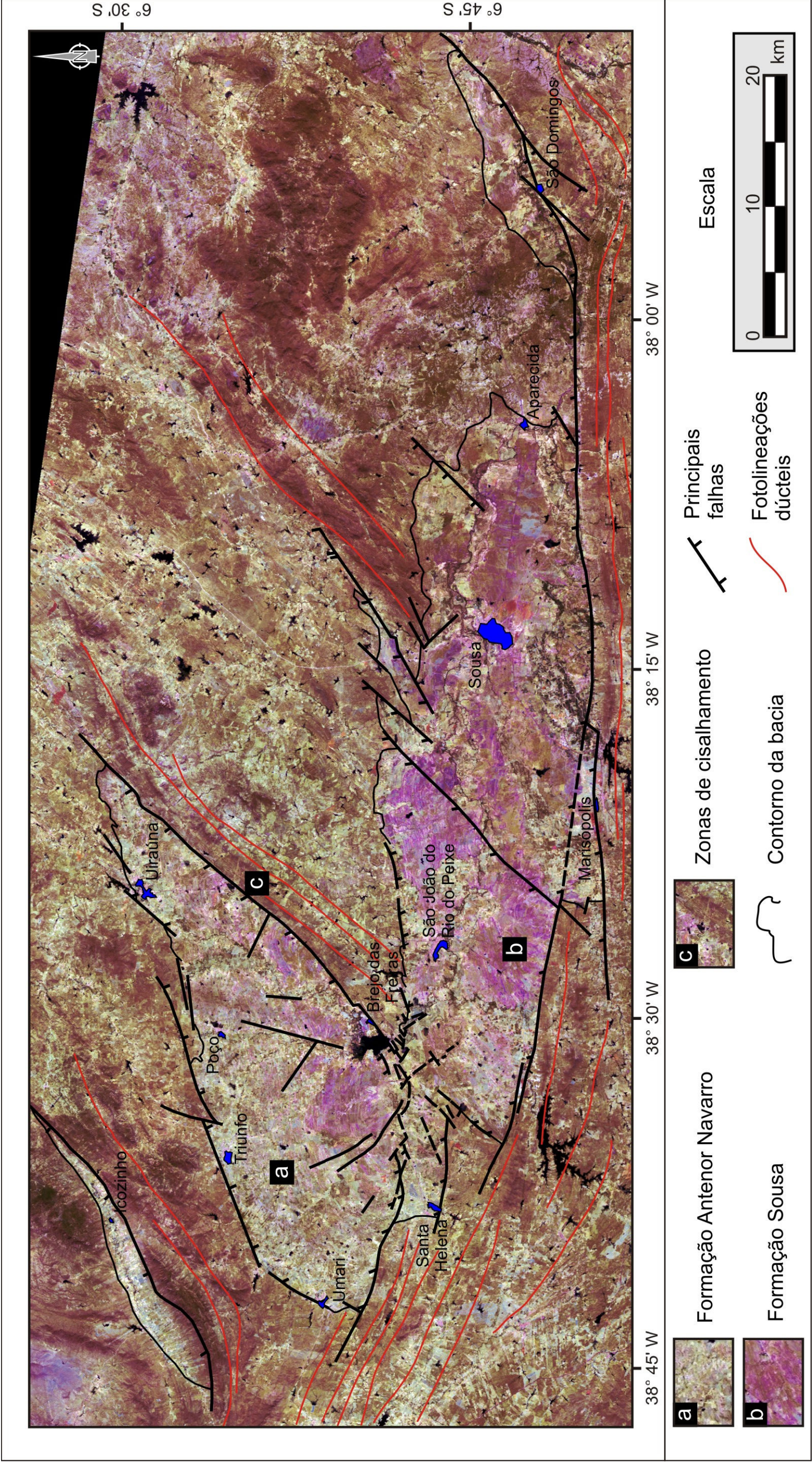


Figura 3.1: Imagem de satélite Landsat 7 ETM+ na composição RGBI-7537, destacando em tonalidade rosa (b) as rochas pelíticas (dentro dos limites da bacia) e, em tonalidades creme-amarronzadas (a), as rochas areníticas. Nesta composição, as zonas de cisalhamento (c) são bem marcadas, apresentando traços retilíneos a curvilíneos. O contorno preto representa os limites da bacia, os traços mais espessos em preto são as principais falhas, e as fotolineações em vermelho representam as zonas de cisalhamento E-W e NE-SW.

Em cada uma das sub-bacias é reconhecida uma borda com geometria curvilínea (menos evidente em Icozinho), truncando as fotolineações do embasamento (figura 3.1), comportamento que caracteriza um contato por não conformidade, na base das rochas sedimentares. Esta é feição característica das bordas NW das sub-bacias de Pombal e Brejo das Freiras, e da borda norte da Sub-bacia de Sousa. Por outro lado, as bordas sul (em Sousa) e SE (nas demais sub-bacias) exibem um traço retilíneo, indicativo de falha, usualmente acompanhando as fotolineações adensadas de zonas de cisalhamento do embasamento (figuras 3.1, 5.1 e 5.2). No caso de Icozinho, ambas as bordas são retilíneas, mas o estudo de campo novamente confirma uma falha principal na borda SE. Na Sub-bacia de Brejo das Freiras e em direção a sudoeste, o traço NE da borda falhada virga para oeste e WNW, compondo uma rampa oblíqua que delimita o Degrau de Santa Helena.

Considerando que as camadas sedimentares mergulham predominantemente contra as falhas (ou seja, para SE ou sul), fica bem caracterizada a geometria de *semi-graben*. Projetando os mergulhos para cima, e considerando um dado nível de erosão, é muito provável que a cobertura sedimentar removida tenha interligado esses vários depocentros, em um estágio avançado do seu preenchimento. A geometria desses depocentros será enfocada, com maior detalhe, no capítulo 5.

Tendo em vista os mergulhos dominantes das camadas em cada *semi-graben* (basculamento das camadas contra as falhas de borda), e a distribuição das unidades ou formações já reconhecidas em trabalhos prévios (Braun, 1969; Françolin, 1992; Françolin *et al.*, 1994), ficaram consagrados na literatura os modelos estratigráficos assumindo o seu empilhamento essencialmente vertical. Isoladamente, a sucessão de unidades no furo estratigráfico Lagoa do Forno (figura 3.6; *vide* localização na figura 3.4) também induz a considerar um empilhamento vertical das formações Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas. Uma contribuição importante deste e de outros trabalhos em paralelo, com base em interpretação sísmica (Córdoba *et al.* 2008; Antunes *et al.* 2009), é a ênfase nas relações e mudanças laterais entre as unidades, em especial a caracterização das rochas siliciclásticas provenientes da erosão da borda falhada, o que será abordado nos capítulos 4 e 5.

Nas margens flexurais dos semi-*grabens*, os arenitos e conglomerados da Formação Antenor Navarro capeiam o embasamento (exemplo na figura 3.2), o que explica o seu posicionamento na base da coluna estratigráfica, admitido pelos vários autores. Todavia, os contatos desta unidade com as demais formações, observados em campo, são caracteristicamente interdigitados, feição que é comprovada pela análise das linhas sísmicas (Seção 3.4). Do mesmo modo, as observações de campo ao longo das bordas falhadas comprovam as interdigitações entre as formações Sousa e Rio Piranhas, atestando a sua contemporaneidade. Este tipo de relação é ilustrado pela figura 3.3 e sintetizado no modelo da figura 4.10.

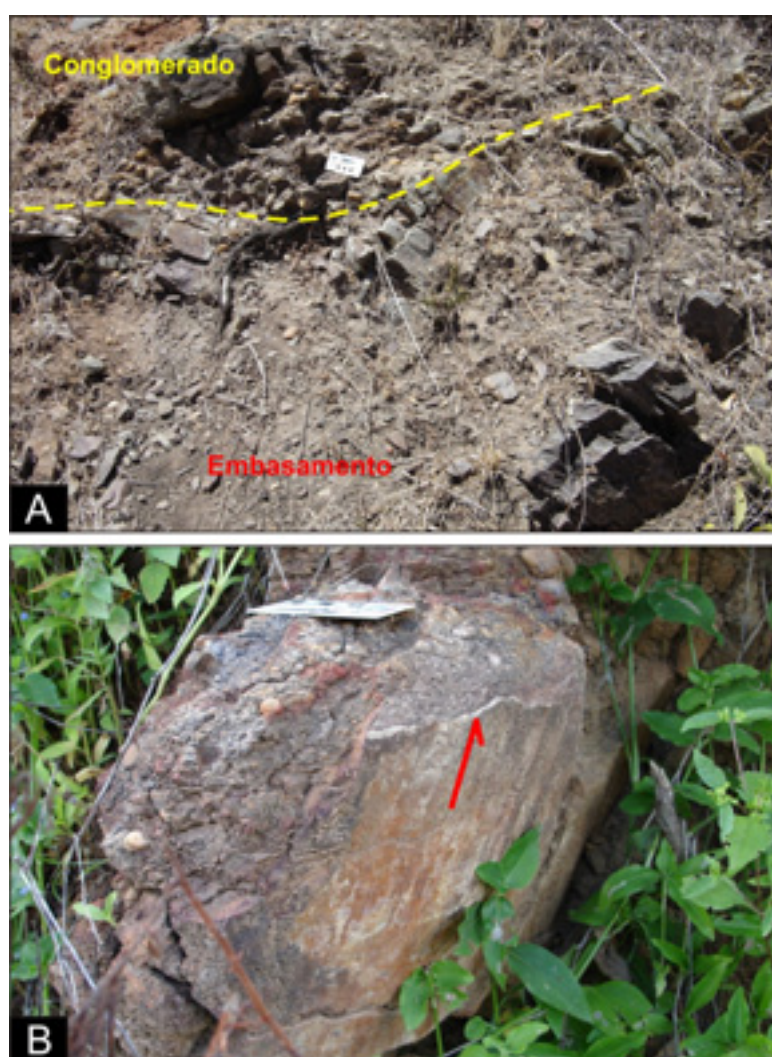


Figura 3.2: Fotografias do afloramento RP-007, localizado a NNW de São João do Rio do Peixe. Em (A) é ilustrado o contato em não conformidade, com um conglomerado basal da Formação Antenor Navarro sobreposto aos milonitos do embasamento (observar o mergulho forte, para NW, da foliação destes últimos). Em (B) é observado um plano de falha normal, com direção ENE-WSW e mergulho para norte, cortando o conglomerado basal no mesmo afloramento. Notar os *slickenfibers* quartzosos no plano da falha.



Figura 3.3: Feições da borda falhada do semi-*graben* de Sousa, a leste de Marizópolis. Em (A), fotomosaico da paisagem mostrando, em primeiro plano, o retrabalhamento atual da paleoescarpa da falha de Marizópolis, com a colina sustentada pelo embasamento e flanqueada, a norte, pelos depósitos da Formação Rio Piranhas (FRP). Em segundo plano, observa-se a planície ocupada pela Formação Sousa (FS), que aflora próxima ao veículo, mergulhando para norte pelo efeito de arrasto da falha de borda. O mergulho das camadas inverte para sul, adiante (*vide* esboço em D). Em (B) é ilustrado o forte mergulho para norte dos arenitos conglomeráticos Rio Piranhas (FRP, afloramento RP-085), devido ao arrasto causado pela falha. Neste local e adjacências (A, B, C), as camadas da Formação Rio Piranhas estão sotopostas (e deste modo, interdigitadas) com os pelitos da Formação Sousa. Em (C) é mostrado o aspecto dos conglomerados (FRP), incluindo grandes blocos, erráticos do embasamento; imediatamente a norte (à direita na foto), ocorrem os pelitos da Formação Sousa (FS).

3.3 - Mapa Geológico da Bacia do Rio do Peixe

O mapeamento geológico realizado na Bacia do Rio do Peixe teve como objetivo a revisão dos dados relativos ao arcabouço estrutural e à estratigrafia da bacia, analisando como o sistema de falhas atuou controlando a deposição ou deformando a seção sedimentar, representada pelos litotipos das formações Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas. Para isto foram analisadas imagens de satélite, radar e fotografias aéreas; em paralelo, foram realizadas campanhas de campo com a finalidade de comprovar as interpretações realizadas em laboratório.

A principal modificação que o mapeamento propiciou foi o reconhecimento de relações laterais entre as formações, indicada no campo pelos contatos interdigitados, diferentemente dos trabalhos anteriores (Braun, 1969; Françolin, 1992), que enfatizaram o empilhamento vertical das unidades.

O mapa geológico apresentado neste trabalho (figura 3.4) traz modificações, com respeito a mapas anteriores, em relação ao aumento da área (ou mesmo a própria cartografia) da Formação Rio Piranhas nos semi-*grabens* de Sousa, Pombal e Brejo das Freiras (neste caso, especialmente a sul e oeste do Açude de Pilões), devido à caracterização de ocorrências mais expressivas ao longo das bordas falhadas. A análise de paleocorrentes foi importante nesse sentido, demonstrando a distinção das unidades areníticas Antenor Navarro e Rio Piranhas; esta última apresenta paleocorrentes para norte (ou em direção axial), ao oposto da primeira (ambas também exibem vetores com orientação axial; *vide* a figura 3.4). Ainda no semi-*graben* de Sousa e em comparação com trabalhos prévios, observa-se o aumento para oeste da área de ocorrência da Formação Sousa, alcançando a cidade de São João do Rio do Peixe. Na porção oriental do Degrau de Santa Helena (sul e SW do Açude de Pilões), o mapa expõe uma interpretação (avaliada ainda como preliminar) da junção entre os semi-*grabens* de Brejo das Freiras e de Sousa, inclusive com implicações sobre a idade relativa entre os mesmos (*vide* Item 5.3.1).

Na versão do mapa aqui apresentada, os perfis geológicos foram ajustados com base nos dados de subsuperfície – o furo Lagoa do Forno (figura 3.6), as profundidades obtidas da modelagem gravimétrica (figura 5.9) e a interpretação das

seções sísmicas (figura 5.7 e outras). Foram consideradas as relações laterais entre as unidades litoestratigráficas (em especial, a Formação Rio Piranhas), todavia assumindo a continuidade (mas não total) da Formação Antenor Navarro no piso dos semi-*grabens*. Foram delineadas mais claramente as bordas falhadas e as bordas flexurais; nestas últimas, o contato basal da seção sedimentar ocorre como uma não conformidade, ou é afetado por falhas de pequeno rejeito. Foi observado que não há continuidade atual dos litotipos presentes no semi-*graben* de Sousa com aqueles de Pombal, contrariando mapeamentos anteriores, que incluíam uma estreita faixa de rochas sedimentares conectando os dois semi-*grabens*. Finalmente, foram destacados os rejeitos, normal ou oblíquo (normal sinistral nas falhas E-W), das principais falhas de borda.

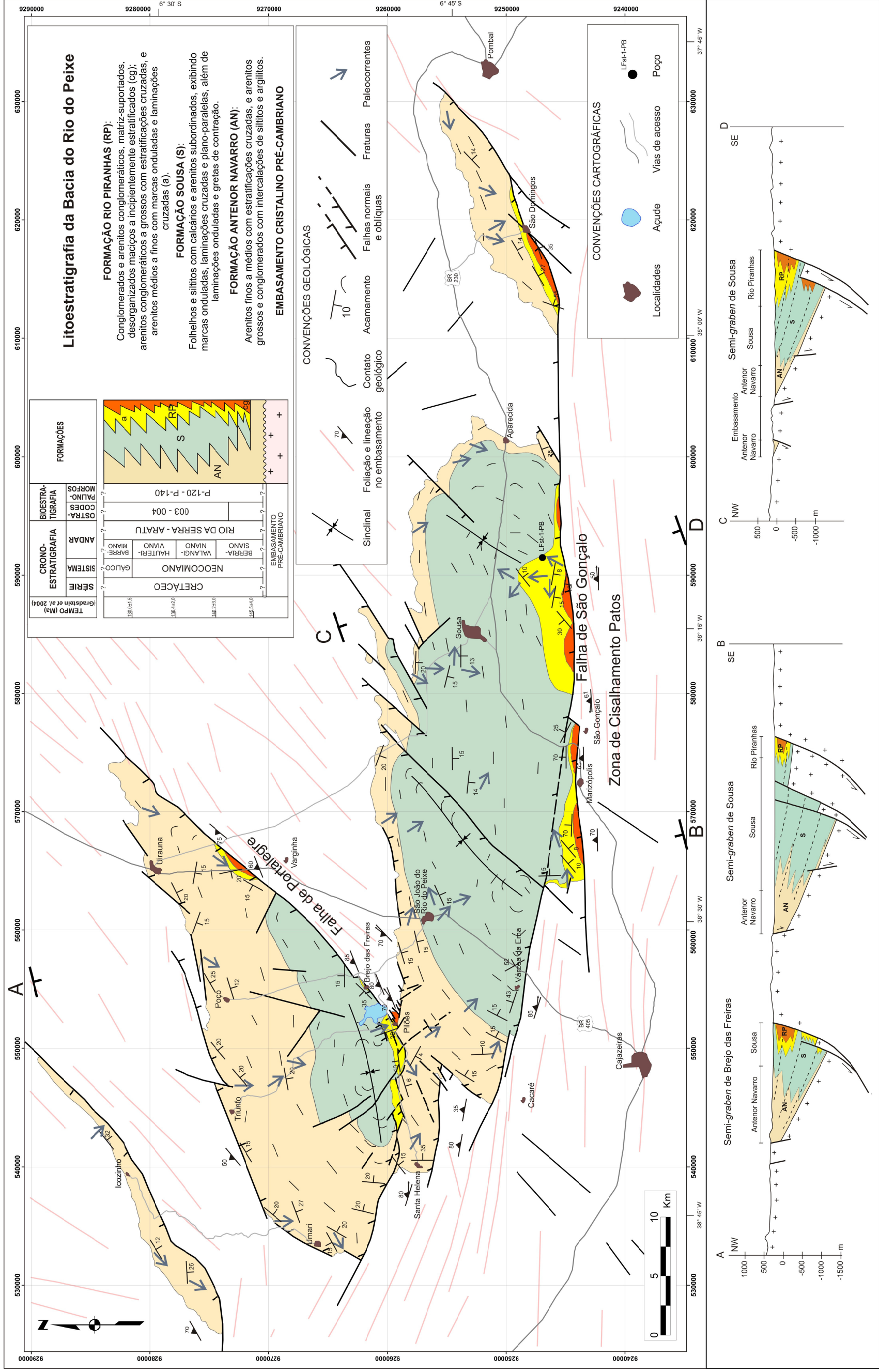


Figura 3.4: Mapa geológico da Bacia do Rio do Peixe, apresentando modificações referentes à estratigrafia (área de abrangência das formações e coluna estratigráfica, em função das interdigitações e relação lateral entre as formações previamente distinguidas) e o arcabouço e cinemática das falhas. A profundidade nos cortes geológicos foi calibrada com dados de inversão gravimétrica e sísmicos. Observar a localização do furo estratigráfico Lagoa do Forno, a SE de Sousa. Modificado de Ponte *et al.* (1991) e Françolin (1992).

3.4 – *Análise Sismoestratigráfica e Integração de Dados*

O levantamento sísmico 2D efetuado na BRP (sigla 0295_rio_do_peixe_2d, no BDEP/ANP) produziu três seções sísmicas de ótima qualidade, duas *dip* (direção NW-SE) e uma *strike* (direção NE-SW), totalizando 80 quilômetros lineares. Esta aquisição abrangeu os semi-*grabens* de Brejo das Freiras e Sousa, os quais representam os dois principais depocentros da bacia.

As seções obtidas (em especial, as duas linhas *dip*, representadas neste capítulo pela figura 3.5) delimitam claramente a geometria de semi-*grabens* dos depocentros, bem como as relações estratigráficas e estruturação interna. Em conjunto com os dados gravimétricos obtidos e/ou retrabalhados pelo Projeto Bacias Interiores, assim como o perfil do furo Lagoa do Forno (figura 3.6), foi possível obter estimativas mais confiáveis da profundidade do embasamento, adicionando dados importantes para a reavaliação do potencial exploratório destas bacias.

A interpretação sismoestrutural deste levantamento será abordada no Capítulo 5. No presente item, será apresentada uma análise estratigráfica e sismoestratigráfica dos mesmos, incluindo a correlação com o arcabouço geológico construído com os dados de campo. Este tema oferece significativa contribuição para o conhecimento da arquitetura e evolução da seção sedimentar desta bacia.

3.4.1 – *Caracterização das Sismofácies e Relações com as Unidades Estratigráficas*

No presente texto, o termo “sismofácies” corresponde a uma unidade tridimensional, composta por um conjunto de reflexões sísmicas com características ou padrões próprios, que diferem dos conjuntos adjacentes dentro de uma sismosequência (Mitchum *et al.* 1977). A interpretação sismoestratigráfica permite inferir, a partir das sismofácies, os processos sedimentares inerentes aos sistemas deposicionais, ou seja, a resposta a um determinado processo sedimentar, com base nas reflexões sísmicas.

A análise das seções sísmicas da Bacia do Rio do Peixe possibilitou a caracterização de cada formação, levando em consideração a configuração interna

das reflexões, de acordo com os padrões de sismofácies, assim como a sua geometria.

A Formação Antenor Navarro é caracterizada por apresentar sismofácies subparalela, com refletores contínuos a descontínuos; a continuidade dos refletores em direção à parte central dos depocentros mostra clara interdigitação com a Formação Sousa. Observa-se, também, que a porção inferior desta formação está marcada por refletores planos de alta frequência, com maior continuidade nos depocentros (figuras 3.5 e 5.7).

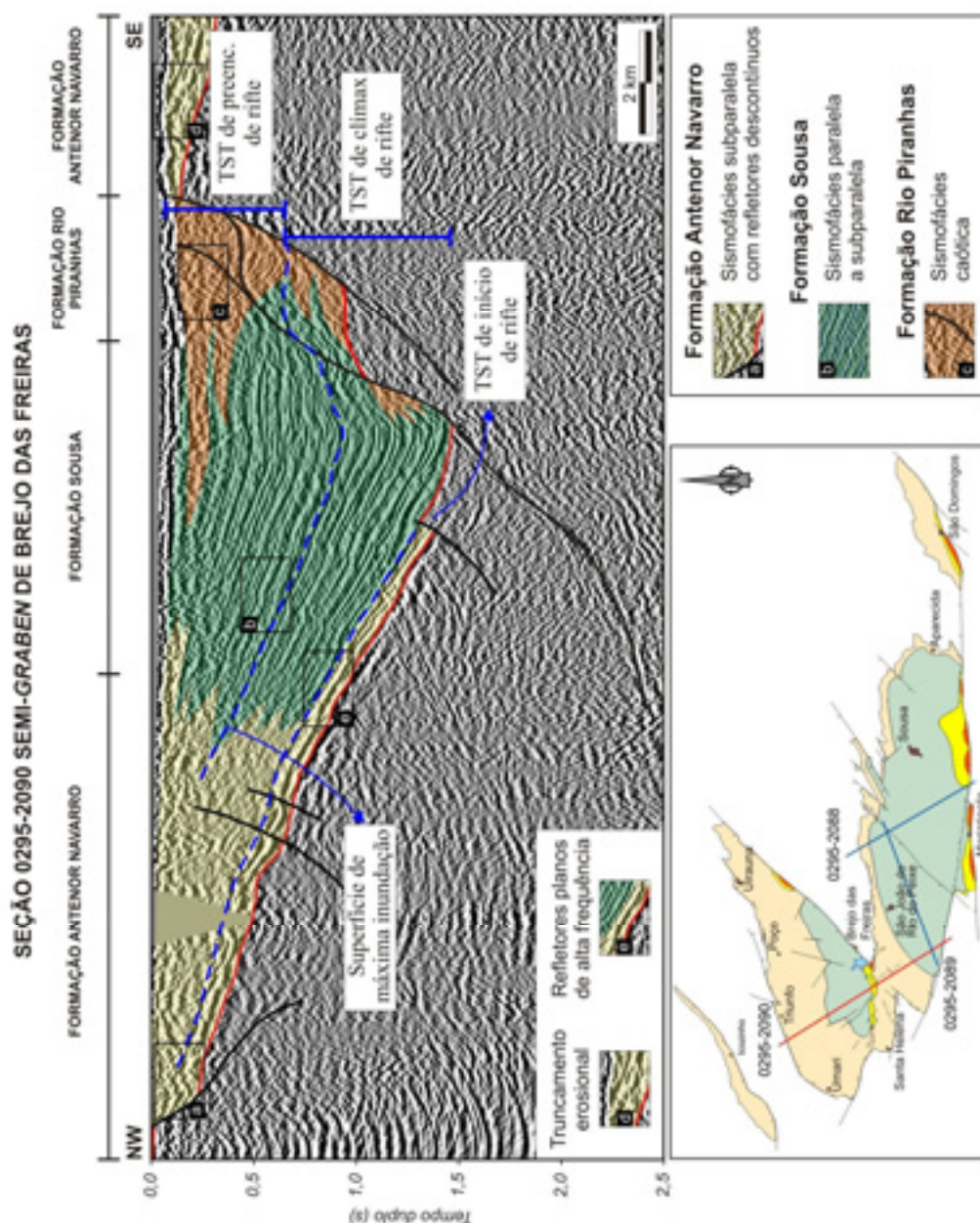
A Formação Sousa é representada nas seções sísmicas por refletores de alta frequência, exibindo sismofácies paralelas a subparalelas. O limite superior desta formação apresenta refletores com terminação sob uma zona intemperizada, definindo um truncamento erosional; observa-se ainda que os refletores vão espessando contra a falha de borda (falha de Brejo das Freiras), indicando movimentação sindeposicional (figura 3.5). Comumente é verificada a interrupção dos refletores por falhas secundárias, bem como na falha principal e nos limites dos degraus.

A Formação Rio Piranhas encontra-se, nas seções sísmicas tal como em campo, claramente associada às bordas falhadas. As sismofácies identificadas são caóticas, consistindo em reflexões discordantes e descontínuas, sugerindo um arranjo desordenado das superfícies de reflexão, caracterizando um ambiente de energia alta e variável, relacionada à deformação sindeposicional (figuras 3.5 e 5.7).

3.4.2 – *Tratos de Sistemas Tectônicos*

A identificação dos tratos de sistemas, realizada por meio da interpretação das seções sísmicas, tem como base o modelo proposto por Kuchle *et al.* (2007). Os autores propuseram uma adaptação dos conceitos de estratigrafia de sequência para o ordenamento estratigráfico de sucessões sedimentares em bacias do tipo rifte, levando em consideração a caracterização dos padrões de empilhamento, determinação de superfícies-chave e mapeamento de discordâncias.

Figura 3.5: Seção sísmica 0295-2088, evidenciando as configurações internas das sismofácies características de cada unidade mapeada. Para a Formação Antenor Navarro foi interpretada a sismofácies subparalela (a); a Formação Sousa é representada por sismofácies paralela (b) e, a Formação Rio Piranhas, por sismofácies caótica (c). É importante mencionar o truncamento erosional (d), bem expressivo, no topo da seção e a ocorrência de refletores planos de alta frequência (e) imediatamente sobre o embasamento. Ainda nesta figura foram interpretados tratos de sistemas tectônicos. A descrição detalhada dos tratos encontra-se no item a seguir.



Com base no modelo descrito acima, aplicado na interpretação das seções sísmicas, foi possível reconhecer três tratos de sistemas tectônicos na Bacia do Rio do Peixe, representados na figura 3.5.

O *Trato de Sistemas Tectônico de Início do Rifte* é marcado por ciclos pouco espessos, onde o espaço é criado e sucessivamente preenchido, configurando uma fase com pouca criação de espaço deposicional. No presente caso, é tentativamente correlacionado à porção basal da Formação Antenor Navarro, representada por refletores de alta amplitude, contínuos através dos depocentros.

O *Trato de Sistemas Tectônico de Clímax do Rifte* representa o evento sincrônico ao pulso tectônico principal, onde a taxa de criação de espaço supera o aporte marginal e gera retrogradações em direção à margem flexural, enquanto que na falha de borda a cunha conglomerática avança em direção ao depocentro.

O *Trato de Sistemas Tectônico de Preenchimento do Rifte* representa o estágio subsequente ao pulso tectônico, quando a sedimentação compõe uma cunha progradante na margem flexural da bacia, enquanto que na falha de borda a cunha conglomerática avança em sentido oposto.

No caso desta bacia (e de outras bacias interiores), a ação erosiva envolvida na geração de uma discordância pós-Aratu eliminou os depósitos mais jovens dos semi-*grabens*, prejudicando o reconhecimento do estágio tardio da sua evolução.

No empilhamento inferido e ilustrado na figura 3.5, a fase de máxima expansão do sistema lacustre é visualizada na interface entre os tratos de sistemas de *Clímax* e de *Preenchimento* do rifte (corresponde a superfície de máxima inundação). É em torno dessa interface que pode ser prevista a ocorrência de fácies lacustres intercalados na Formação Sousa, os quais devem incluir os geradores responsáveis pelos indícios de óleo continental conhecidos na região (Mendonça Filho *et al.* 2006).

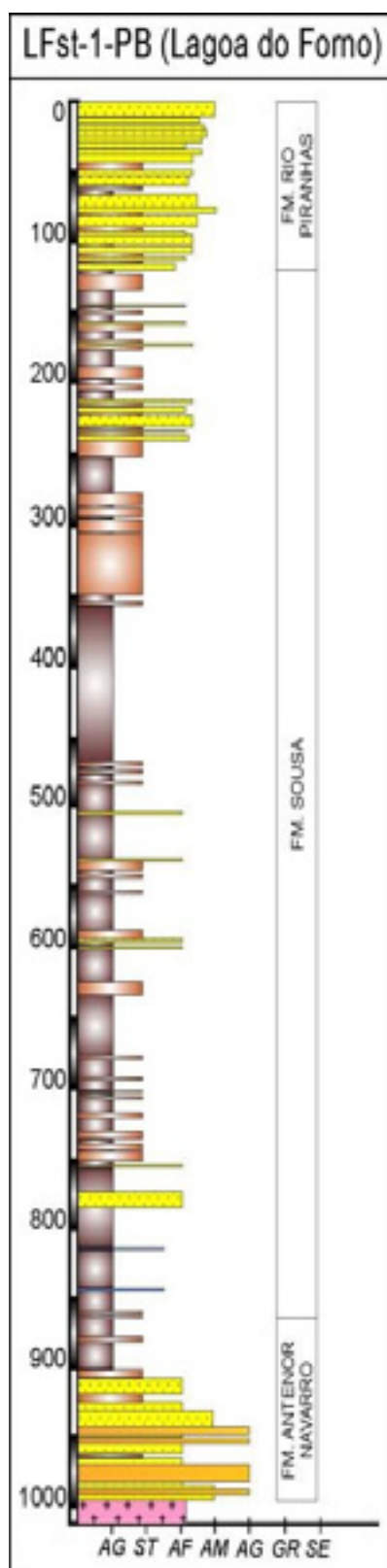


Figura 3.6: Perfil litológico do furo estratigráfico Lagoa do Forno (LFst-1-PB). O poço foi locado pelo DNPM no semi-graben de Sousa, na localidade de Lagoa do Forno, cerca de 8,7 km a sudeste da cidade de Sousa. Apresenta profundidade final de 1005,75 m. O furo atingiu o embasamento cristalino atravessando as três formações, Rio Piranhas, Sousa e Antenor Navarro. Reproduzido de Roteiro de Campo – Bacias Rio do Peixe e Araripe, PPGG/UFRN.

3.4.3 – A Coluna Estratigráfica da Bacia do Rio do Peixe

Os dados aqui expostos e interpretados, de forma preliminar, resultam na proposição de uma nova coluna estratigráfica para a Bacia do Rio do Peixe, ilustrada na figura 3.7 e também incorporada à figura 3.4. Na forma proposta, a coluna é representativa para os semi-*grabens* de Sousa e Brejo das Freiras. Para os semi-*grabens* de Icozinho e Pombal, a seção preservada é correlacionada à porção inferior do empilhamento figurado, com ausência da Formação Sousa. A distribuição das formações na coluna estratigráfica mostra, na base, um arranjo retrogradacional das unidades enquanto que, no topo, o arranjo das unidades tende a ser progradacional. Cabe ainda destacar que a representação é simplificada, por não considerar a correlação cronoestratigráfica de detalhe, que ocorre entre esses remanescentes de depocentros; subsiste o questionamento sobre a idade do preenchimento de cada semi-*graben*, resultando em um padrão geral sincrônico ou diacrônico. Com base em análise sismoestratigráfica, correlacionando as mudanças no padrão de empilhamento das sismofácies em cada depocentro, Córdoba *et al.* (2009) propuseram que a deposição no semi-*graben* de Brejo das Freiras tenha iniciado mais cedo, em comparação ao semi-*graben* de Sousa.

Por outro lado, a constatação do sincronismo entre as diferentes formações mapeadas, pelo menos em cada semi-*graben*, e as relações estratigráficas e tectonoestratigráficas descritas (neste e em itens adiante), oferecem resposta a uma questão importante, colocada na literatura (*vide* tabela 2.1). As relações de contemporaneidade e interdigitação das fácies, e os indicadores de deposição sintectônica, confirmam que toda a seção conhecida pode ser atribuída ao evento de rifteamento neocomiano, como sustentado por autores como Ponte *et al.* (1991) e Arai (2006). A ocorrência de unidades pré-rifte em Rio do Peixe, equivalentes às formações Brejo Santo e Missão Velha, da Bacia do Araripe, proposta por Da Rosa & Garcia (1995, 2000) e Garcia *et al.* (2005), não é corroborada a nível do conhecimento atual.

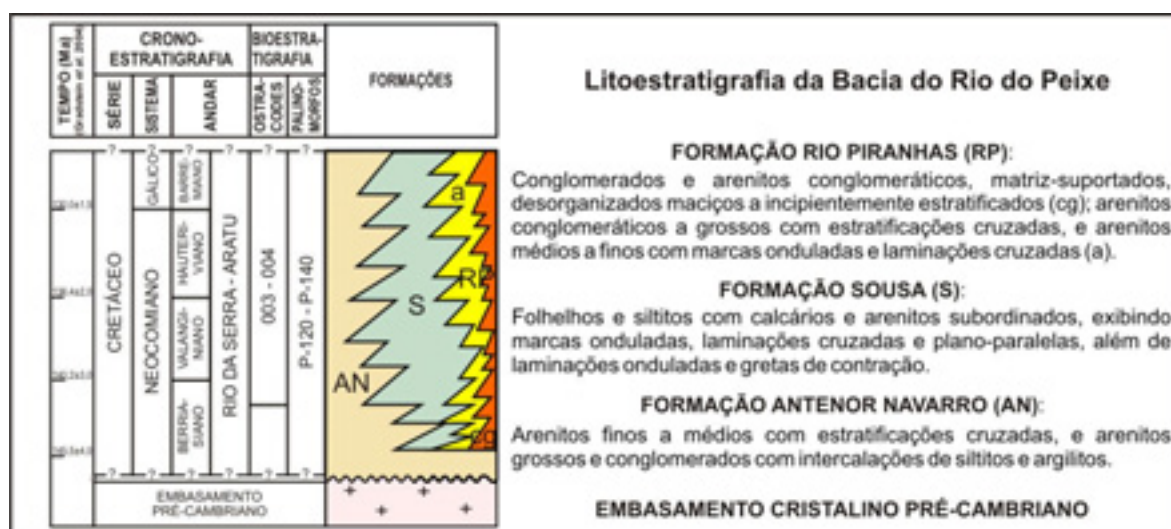
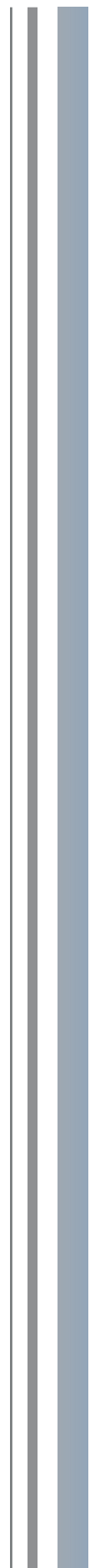


Figura 3.7: Coluna estratigráfica proposta para a Bacia do Rio do Peixe, enfatizando as relações de interdigitação e contemporaneidade entre as formações reconhecidas, as quais integram a Tectonossequência Rife nesta bacia. Na Formação Rio Piranhas são distinguidas as fácies areníticas (a) e conglomeráticas (cg).

CAPÍTULO 4

ESTUDO FACIOLÓGICO E CENÁRIO DEPOSICIONAL PARA A BACIA DO RIO DO PEIXE



4.1 - Introdução

Os levantamentos de dados estratigráficos por meio da análise de afloramentos permitiram realizar um estudo detalhado de fácies nas rochas sedimentares que compõem a Bacia do Rio do Peixe, litoestratigraficamente reunidas no grupo homônimo. Os critérios utilizados neste trabalho obedeceram à metodologia empregada por Miall (1985) para a análise faciológica de depósitos fluviais. Sendo assim, as fácies foram organizadas de acordo com a descrição litológica e, principalmente, pela caracterização das estruturas sedimentares (tabela 4.1). Para a nomenclatura de todas as fácies foi utilizada a primeira letra maiúscula para designar os diferentes litotipos, seguida por letras minúsculas que representam as estruturas sedimentares mais importantes. Como exceção, quando foi importante destacar algum constituinte da rocha, todas as letras empregadas foram maiúsculas. Posteriormente, as fácies geneticamente relacionadas foram reunidas ou agrupadas, constituindo associações de fácies. Essas associações apresentam características e inter-relações inerentes aos processos sedimentares, e o reconhecimento das mesmas possibilitou a interpretação dos sistemas deposicionais.

O estudo faciológico desenvolvido na Bacia do Rio do Peixe foi aplicado para cada formação. Como as fácies refletem os processos sedimentares e estes podem estar presentes em formações distintas, algumas fácies, ressalvadas particularidades, foram reconhecidas em mais de uma formação. A discriminação entre as fácies levou em conta o contexto no qual as mesmas estão inseridas; por exemplo, na margem flexural ou margem falhada.

4.2 – Formação Antenor Navarro

De acordo com os dados de campo, as rochas da Formação Antenor Navarro encontram-se em contato direto com o embasamento, na forma de uma não conformidade, que fica evidenciada ao longo das margens flexurais dos semi-*grabens* (figura 3.2). Suas principais exposições estão localizadas nos semi-*grabens* de Brejo das Freiras e Sousa, ainda que também ocorra, de forma dominante, nos semi-*grabens* de Pombal e Icozinho (figura 3.4).

Tabela 4.1: Relação das fácies identificadas na Bacia do Rio do Peixe e sua ocorrência nas formações do Grupo Rio do Peixe.

FÁCIES	LITOLOGIAS	ESTRUTURAS SEDIMENTARES
Cmm	Conglomerados, brechas e arenitos conglomeráticos, matriz-suportados.	Maciços ou com acamamento incipiente.
Aa	Arenitos finos a muito grossos.	Estratificações cruzadas acanaladas.
Ap	Arenitos finos a muito grossos.	Estratificações plano-paralelas.
At	Arenitos finos a muito grossos.	Estratificações cruzadas tabulares.
Al	Arenitos finos a médios.	Laminações cruzadas de marcas onduladas.
Ab	Arenitos muito finos a médios.	Bioturbados ou com laminação plano-paralela.
Am	Arenitos finos a grossos.	Maciços.
Pg	Pelitos.	Gretas de contração.
Pl	Pelitos com intercalações de arenitos muito finos.	Laminações cruzadas de marcas onduladas ou plano-paralelas.
Pb	Pelitos.	Bioturbados, maciços ou com laminações cruzadas de marcas onduladas incipientes.
FORMAÇÃO ANTENOR NAVARRO	FORMAÇÃO SOUSA	FORMAÇÃO RIO PIRANHAS
Cmm	Al	Cmm
Aa	Ab	Aa
Ap	Pg	Ap
At	Pl	
Am	Pb	

Os litotipos que representam a Formação Antenor Navarro são constituídos principalmente por arenitos, com conglomerados subordinados; em menor proporção são identificadas camadas pelíticas, intercaladas nos arenitos.

Nas margens flexurais dos semi-*grabens* de Sousa e de Brejo das Freiras (bem como em Icozinho e Pombal), as medidas de paleocorrentes mostram um padrão de orientação para SE e sul (figura 3.4), direcionadas para os principais depocentros e, com menor frequência, para SW (esta, em Pombal, Icozinho e nas rampas direcionais dos outros semi-*grabens*, próximo a Aparecida e Uiraúna, respectivamente). Este comportamento está associado ao período inicial de implantação da bacia, onde as drenagens principais foram desenvolvidas divergindo

das margens flexurais em direção aos depocentros, ou em trajetória axial, margeando os relevos em formação ao longo da margem falhada.

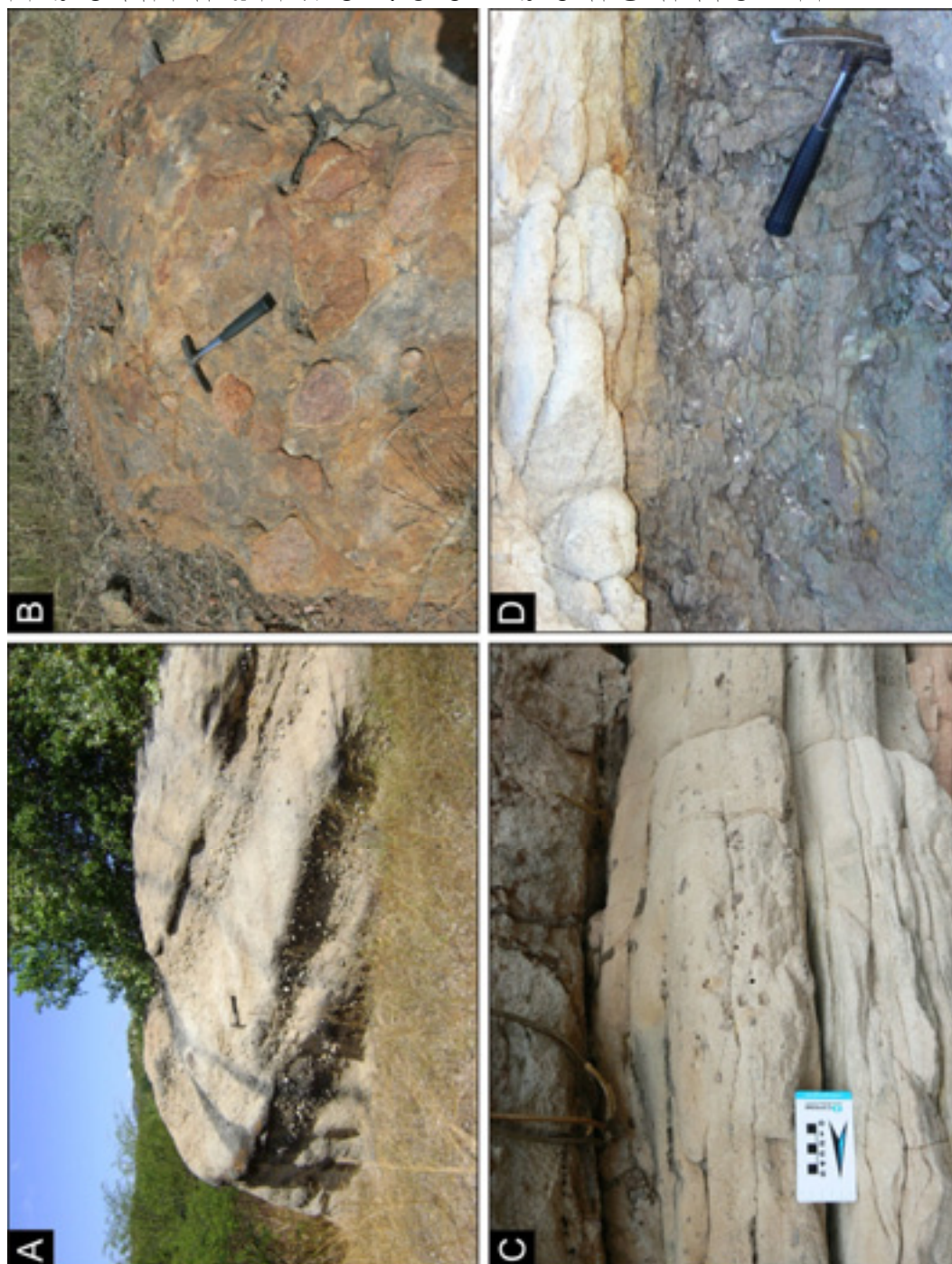
Em relação à faciologia, a Formação Antenor Navarro reúne fácies conglomeráticas basais e, principalmente, fácies areníticas, as quais apresentam grande variação granulométrica, assim como nos tipos de estruturas sedimentares presentes. Com base nestes aspectos, as fácies foram reunidas em dois grupos principais, descritos a seguir.

4.2.1 – *Fácies Conglomeráticas*

Na Formação Antenor Navarro, rochas conglomeráticas em geral ocorrem intercaladas, e subordinadas em espessura, nos pacotes predominantemente areníticos (figura 4.1A), tendo sido agrupadas, faciologicamente, com estes últimos (no caso dessa figura, a fácies **Aa**). Com predomínio de conglomerados, foi identificada a fácies *Conglomerados, brechas e arenitos conglomeráticos matriz-suportados* (**Cmm**). Nesta fácies, ocorrem blocos e calhaus de rochas graníticas e gnáissicas, além de milonitos diversos, em geral angulosos a subarredondados (figura 4.1B); quando de menor granulometria (< 2 cm), são frequentes os fragmentos de feldspatos (caracteristicamente frescos, derivados de granitos porfíricos) e de quartzo. Esses conglomerados são mais frequentes ao longo do contato basal desta formação, quando se apresentam fortemente silicificados e, por vezes, com conteúdo preponderante de seixos de quartzo arredondados (figuras 3.2 e 5.16A).

Os conglomerados e arenitos conglomeráticos que fazem parte da fácies **Cmm** foram interpretados como tendo sido depositados sob a ação de fluxos gravitacionais, particularmente de fluxos de detritos plásticos, que constituem um fluxo viscoso com alta coesão interna.

Figura 4.1: Em (A) é exemplificada a ocorrência de rochas conglomeráticas intercaladas aos pacotes areníticos da fácies **Aa** da Formação Antenor Navarro, na rampa direcional de Aparecida, semi-*graben* de Sousa (afloramento RP-251, ver Anexo 1). (B) Na fácies **Cmm** ocorrem blocos e calhaus de rochas graníticas e gnáissicas (afloramento RP-215), em geral angulosos a subarredondados, na borda flexural a NE de Sousa. Em (C) é observado um arenito fino a médio exibindo forma de leito plano, referente à fácies **Ap** no semi-*graben* de Icozinho (RP-ic-021). (D) Localmente, a fácies **Ap** mostra intercalações de níveis de pelitos, como pode ser exemplificado no afloramento RP-174, semi-*graben* de Brejo das Freiras a sul de Uiraúna.



4.2.2 – *Fácies Areníticas*

Na Formação Antenor Navarro foram identificadas quatro fácies areníticas: *Arenitos finos a muito grossos com estratificações cruzadas acanaladas (Aa)*, *Arenitos finos a muito grossos com estratificações plano-paralelas (Ap)*, *Arenitos finos a muito grossos com estratificações cruzadas tabulares (At)* e *Arenitos finos a grossos maciços (Am)*. Em todas elas, os grãos de quartzo e feldspatos perfazem uma fração importante no arcabouço das rochas, o que permite inferir a existência de granitóides porfiríticos (entre outros litotipos) na área fonte de erosão.

A fácies **Am**, composta por arenitos finos a grossos, não apresenta estruturas sedimentares visíveis ou, se estas se formaram, não foram preservadas. Esta fácies, de aspecto maciço, foi interpretada como tendo sido formada a partir de fluxos hiperconcentrados.

Os arenitos finos a muito grossos, com estratificações cruzadas acanaladas e intercalações de níveis conglomeráticos, da fácies **Aa** (figuras 4.2 e 4.3), foram interpretados como tendo sido gerados a partir de fluxo trativo. Correspondem a depósitos originados pela migração de formas de leito de crista sinuosa (dunas 3D).

A fácies **At**, arenitos finos a muito grossos, com estratificações cruzadas tabulares e intercalações *de níveis* conglomeráticos, foi interpretada como tendo sido gerada por fluxos trativos a partir da migração de formas de leito de crista reta (dunas 2D; figura 4.2).

Arenitos finos a muito grossos com estratificações plano-paralelas e, raramente, cruzadas de baixo ângulo, compõem a fácies **Ap**, a qual foi considerada como tendo sido formada a partir de fluxos trativos, em regime de fluxo superior, originando formas de leito plano (figura 4.1C). Localmente, a fácies **Ap** mostra intercalações de níveis de pelitos, conforme ilustrado na figura 4.1D. Em outros casos, próximos ao contato superior desta unidade, intercalações de pelitos avermelhados foram interpretadas como interdigitações (línguas e lentes) dos litotipos da Formação Sousa.

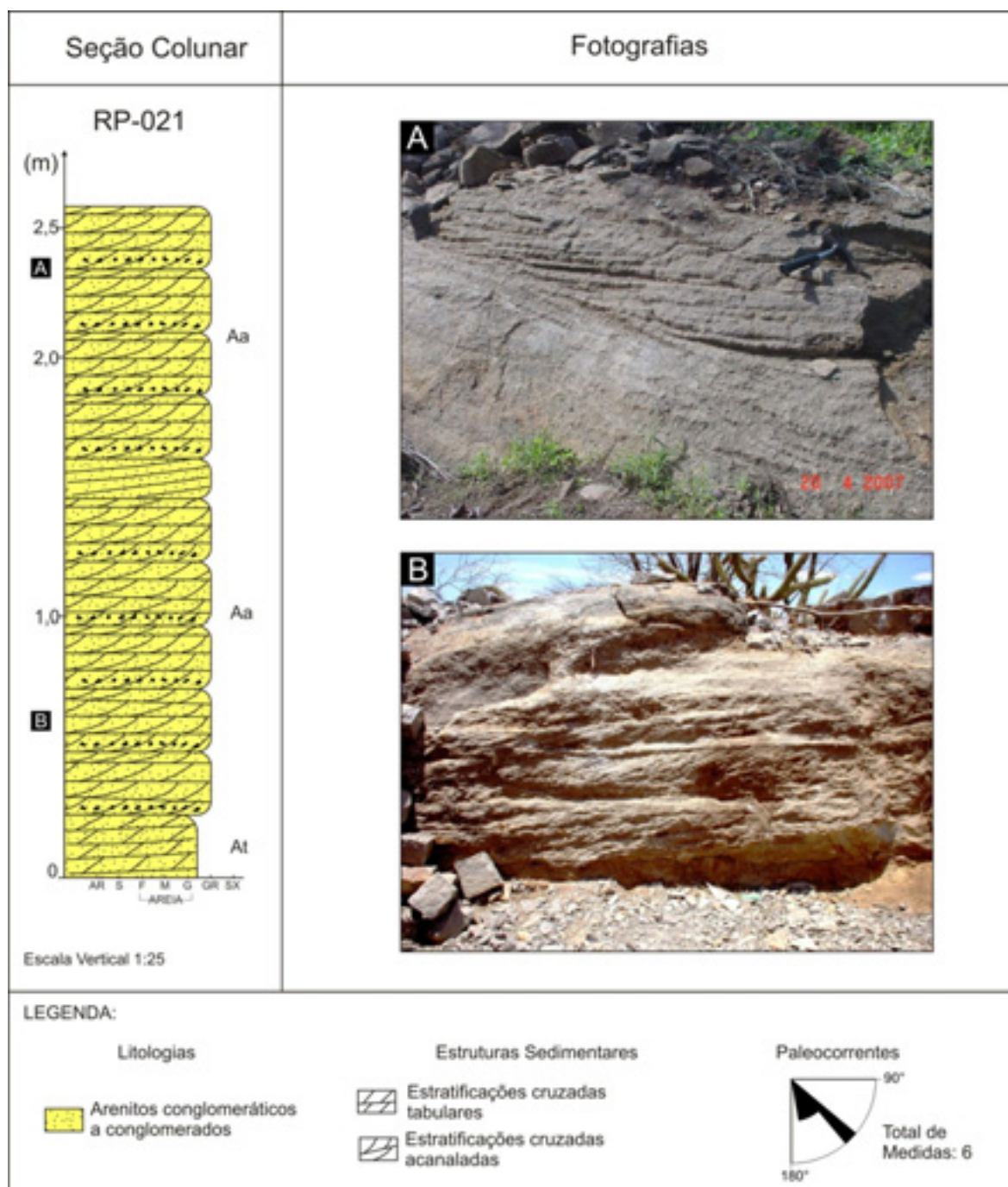


Figura 4.2: Seção colunar do afloramento RP-021, localizado nas proximidades de Boa Vista, a norte de Sousa (Anexo 1), próximo à borda (margem flexural) do semi-graben. Nesta seção são observados arenitos conglomeráticos com estratificações cruzadas acanaladas (A) e tabulares (B), associados a conglomerados imaturos, fortemente litificados; correspondem à fácies Aa, com alguns níveis da fácies At. As paleocorrentes são dirigidas para SE; o norte é indicado pelo cabo do martelo.

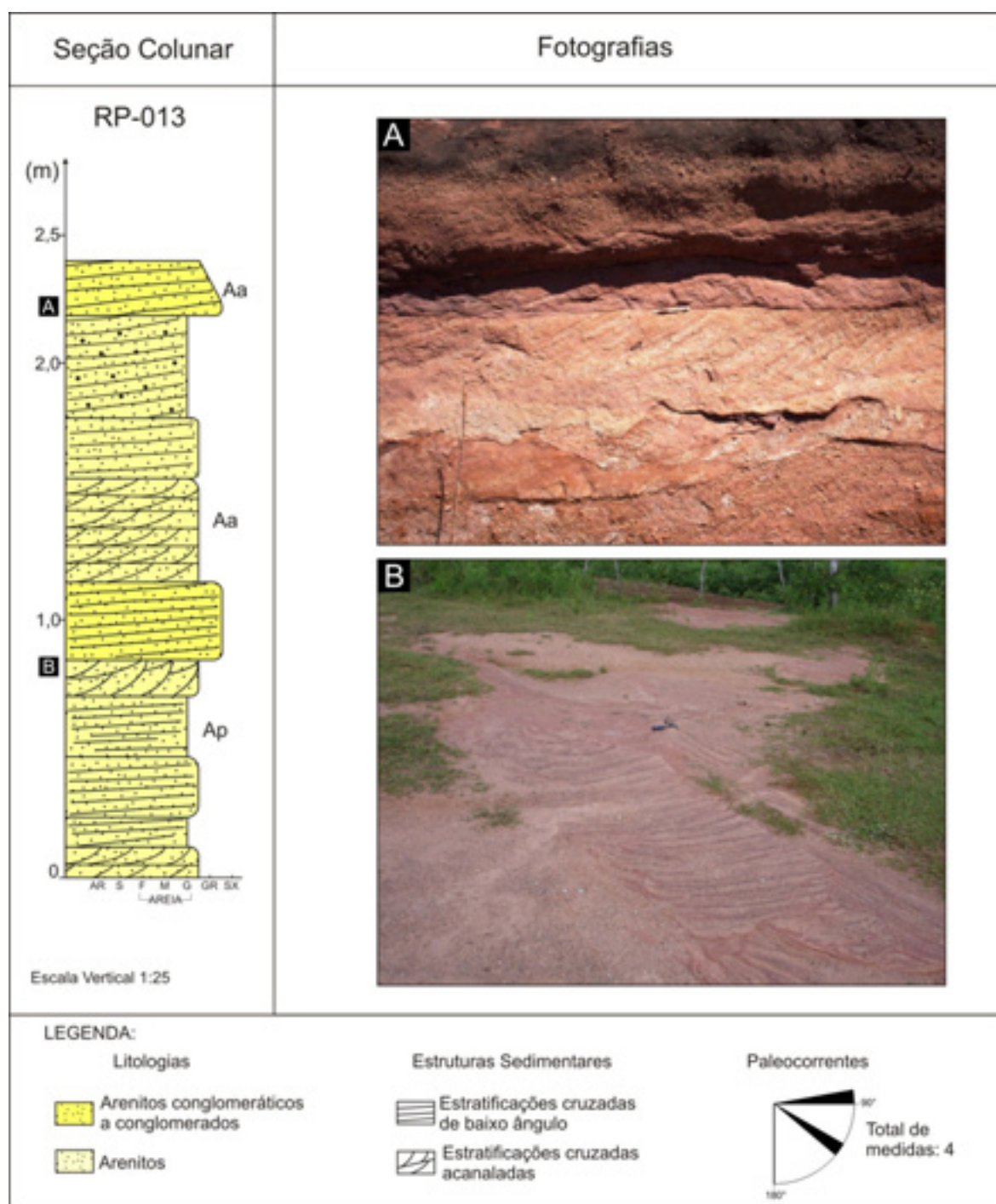


Figura 4.3: Seção colunar do afloramento RP-013, localizado nas proximidades de Vertente, a SE de Triunfo (Anexo 1), na margem flexural do semi-graben de Brejo das Freiras. Nesta seção pode ser observado o arranjo entre as fácies areníticas **Aa** e **Ap**. Em (A) são ilustrados arenitos grossos com estratificações cruzadas acanaladas. Em (B), arenitos grossos com estratificações cruzadas acanaladas (sentido para ESE; norte indicado pelo cabo do martelo), observadas em planta.

Na continuidade do estudo faciológico, foi possível agrupar as fácies em associações. Foram assim reconhecidas as seguintes associações de fácies:

- (i) Conglomerados e arenitos grossos a conglomeráticos estratificados, representados pelas fácies **Cmm**, **Aa** e **At**, correspondendo à associação de depósitos de preenchimento de canal fluvial;
- (ii) Arenitos finos a grossos estratificados, representados pelas fácies **Ap** e **Am**, e pelitos intercalados da fácies **Ap**, correspondendo à associação de depósitos de transbordamento, marginais ao canal fluvial.

A associação de depósitos de preenchimento de canal fluvial é representada por fácies de alta energia, as quais geralmente constituem formas de leito e barras. A associação de depósitos de transbordamento do canal fluvial compreende a deposição de sedimentos nas margens dos canais em época de inundações, formando corpos arenosos com geometria em lençol, depositados por fluxo trativo em regime de fluxo superior (lobos de extravasamento).

4.3 – Formação Sousa

A Formação Sousa foi mapeada apenas nos semi-*grabens* de Brejo das Freiras e Sousa. Esta formação é dominada por camadas de folhelhos vermelhos a verdes, e siltitos vermelhos intercalados com camadas de arenitos, em geral finos a médios (figura 4.4A); níveis carbonáticos (calcretes) ocorrem localmente. As principais estruturas sedimentares identificadas são marcas onduladas, estratificações plano-paralelas e cruzadas acanaladas de pequeno porte, gretas de contração e bioturbações. Pegadas de dinossauros, parte do rico acervo paleontológico desta bacia, ocorrem principalmente nos níveis pelíticos desta formação (figura 4.4B).

Intercalações de arenitos médios a grossos ou muito grossos, com estratificações cruzadas acanaladas (figura 4.5B), ocorrem no contexto da transição entre as formações Antenor Navarro e Sousa, sendo interpretados como interdigitações destas unidades; os arenitos são referidos à fácies **Aa**.

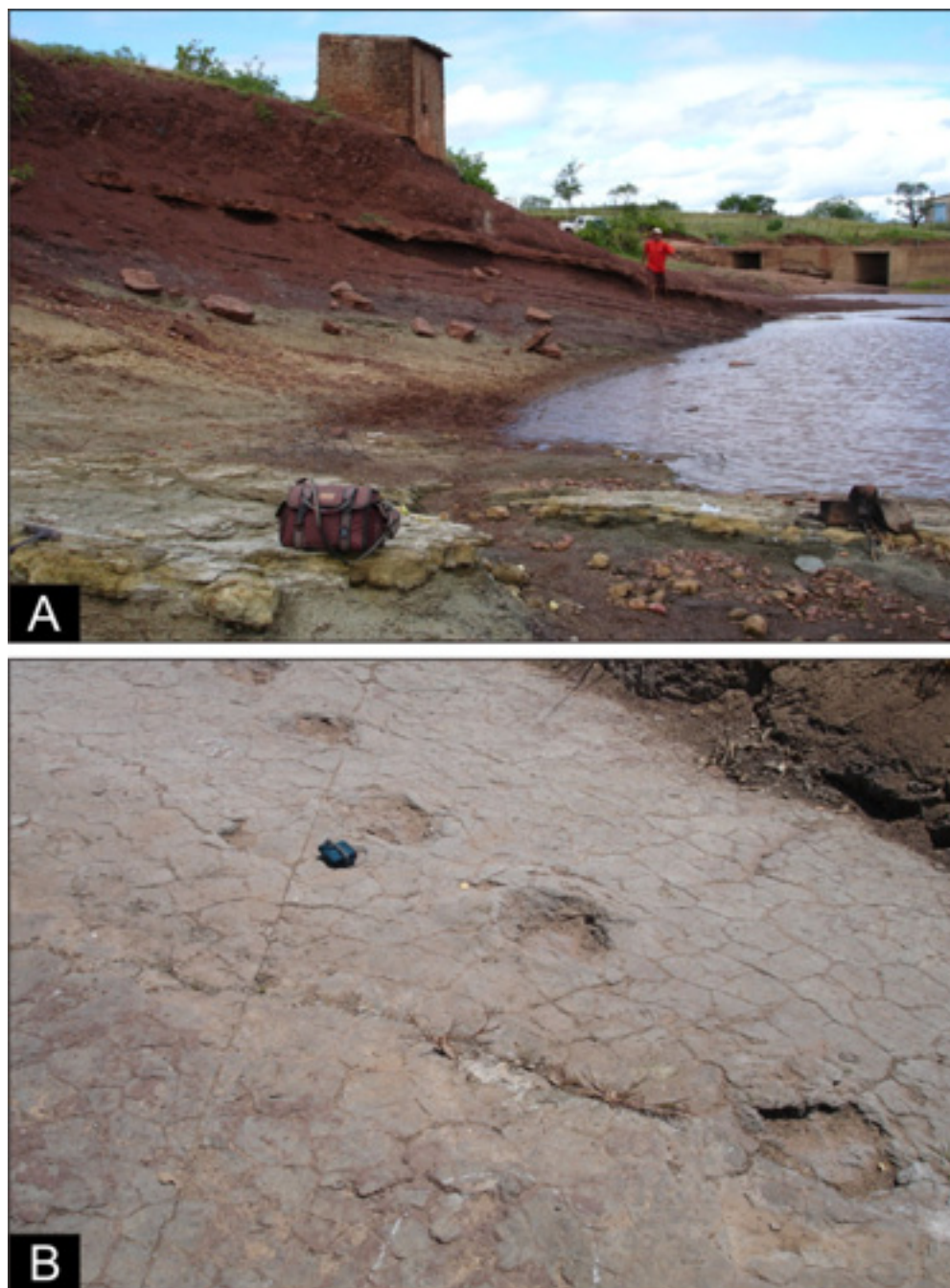


Figura 4.4: Em (A), aspecto da Formação Sousa em afloramento (RP-023) na porção central do semi-*graben* de Sousa, com predomínio de camadas de folhelhos vermelhos a verdes, e siltitos intercalados com camadas de arenitos, em geral finos a médios (estes em primeiro plano). Em (B) são observadas pegadas de dinossauros no afloramento RP-020 (Anexo 1), parte do rico acervo paleontológico desta bacia; estes icnofósseis ocorrem principalmente nos níveis pelíticos desta formação.

Dados de paleocorrentes mostram um padrão de orientação em geral para SE ou sul, semelhante ao padrão encontrado na Formação Antenor Navarro. Podem ocorrer anomalias com paleocorrentes orientadas para leste ou nordeste; esta

situação é observada na rampa de revezamento de Marizópolis (semi-*graben* de Sousa; *vide* figura 3.4) e em outros locais.

A análise faciológica realizada na Formação Sousa permitiu a identificação de fácies areníticas, subordinadas em importância às fácies pelíticas. As mesmas serão descritas a seguir:

4.3.1 – Fácies Areníticas

Na Formação Sousa foram identificadas duas fácies areníticas, as quais ocorrem como intercalações com as rochas pelíticas dominantes na unidade. São elas: *Arenitos muito finos a médios bioturbados ou com laminações plano-paralelas* (**Ab**) e *Arenitos finos a médios com laminações cruzadas de marcas onduladas* (**Al**).

Na transição entre as formações Sousa e Antenor Navarro, ocorrem as fácies areníticas **Aa** e **At**, definidas quando da caracterização faciológica desta última, tendo sido interpretadas como depósitos originados pela migração, sob influência de fluxos trativos, de formas de leito de cristas sinuosas e de cristas retas, respectivamente. Associados aos litotipos da fácies **Aa** e, menos frequentemente, aos da fácies **At**, ocorrem estratos compostos por arenitos muito bem selecionados, com grãos arredondados, que exibem gradação inversa. Estes arenitos apresentam ocorrência limitada (afloramento a leste de São João do Rio do Peixe, figura 4.5A) e, portanto, não foram individualizados como fácies em particular. Foram interpretados como produto do retrabalhamento eólico das formas de leito que originaram as fácies **Aa** e **At**.

A fácies **Ab**, composta por arenitos muito finos a médios com fósseis, geralmente bivalves, exibem bioturbações e icnofósseis, laminações plano-paralelas e, em menor proporção, cruzadas de marcas onduladas. Pode ser inferido que as rochas que compõem esta fácies foram geradas por fluxos trativos, porém em regime de fluxo inferior.

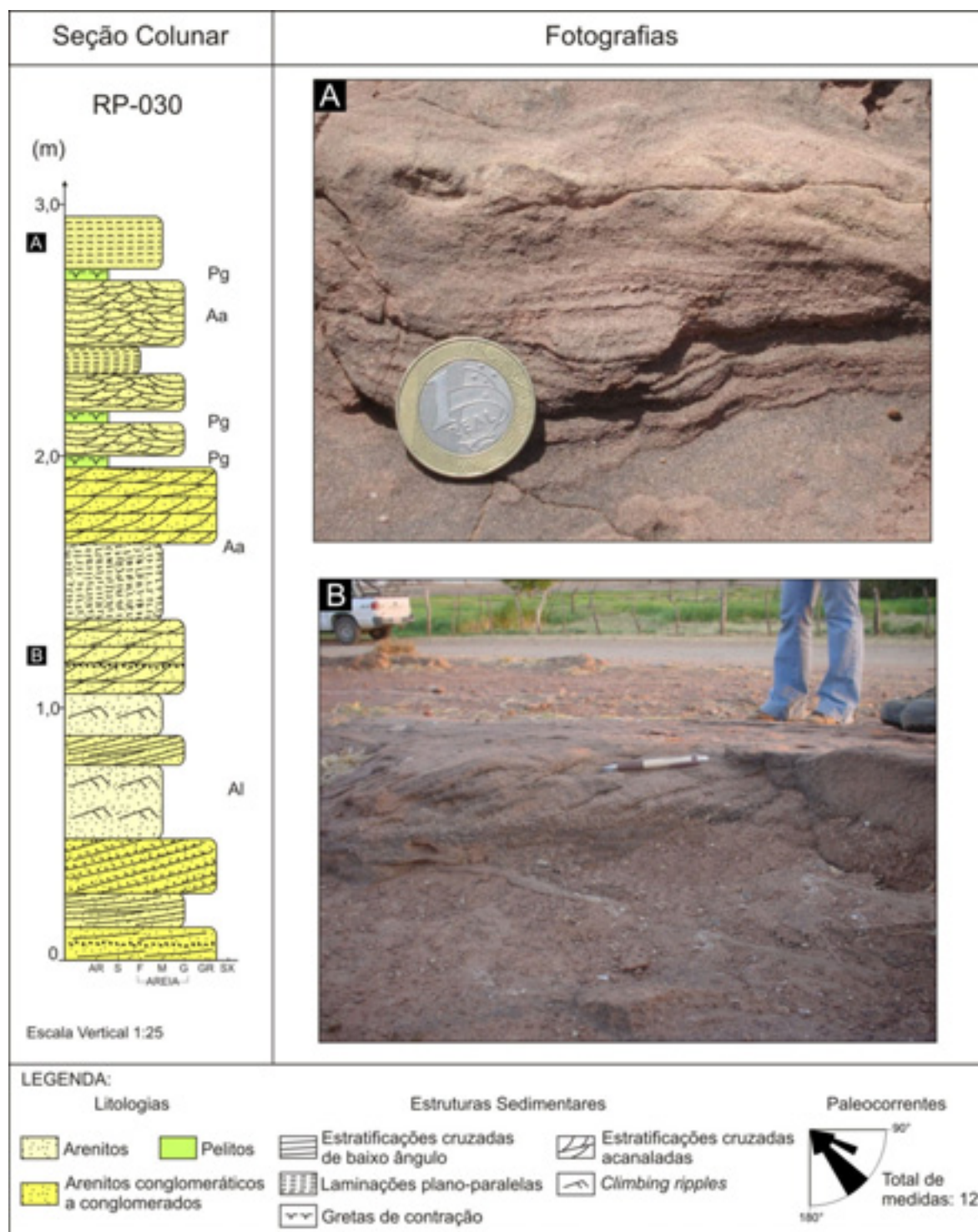


Figura 4.5: Seção colunar do afloramento RP-030, localizado nas proximidades de São João do Rio do Peixe (Anexo 1), margem flexural do semi-graben de Sousa. Neste ponto foram identificadas fácies areníticas e pelíticas. (A) Arenito fino com grãos bem selecionados, exibindo gradação inversa e laminação plano-paralela. (B) Arenito grosso apresentando estratificações cruzadas acanaladas, com paleocorrentes para SE.

A fácies **Al**, arenitos finos a médios com laminações cruzadas de marcas onduladas, localmente é caracterizada por arenitos calcíferos (figura 4.6). A cimentação desses arenitos implica na presença de carbonato de cálcio no sistema, o que corrobora com a ocorrência de microbialitos, descritos recentemente na bacia (Silva *et al.* 2008). A fácies **Al**, assim como a fácies **Ab**, foi interpretada como tendo sido gerada por fluxos trativos em regime de fluxo inferior. Estes arenitos encontram-se associados às fácies pelíticas, formando lentes ou camadas de espessura centimétrica.

4.3.2 – Fácies Pelíticas

Na Formação Sousa dominam as fácies pelíticas, que foram caracterizadas em três tipos: *Pelitos com gretas de contração (Pg)*, *Pelitos com intercalações de arenitos muito finos com laminações cruzadas de marcas onduladas (Pl)*, e *Pelitos bioturbados, maciços ou com laminações cruzadas de marcas onduladas incipientes (Pb)*.

A fácies **Pg**, pelitos maciços com gretas de contração, foi interpretada como depósitos externos ao canal ou depósitos de canais abandonados, no qual o substrato úmido era intermitentemente submetido à exposição subaérea (figura 4.7B).

A fácies **Pl**, pelitos intercalados a arenitos com laminações cruzadas de marca ondulada e, por vezes, plano-paralelas, foi interpretada como resultante da deposição a partir de fluxo trativo, o qual produziu depósitos de extravasamento de canais ou, de forma alternativa, depósitos lacustres rasos (figuras 4.6 e 4.7A, C).

Por fim, a fácies **Pb**, pelitos com bioturbações e, menos frequentemente, com incipientes laminações cruzadas de marcas onduladas, ou até mesmo maciços, foi interpretada como tendo sido gerada sob influência de fluxo trativo, o qual formou depósitos de extravasamento de canais mais distais e/ou depósitos lacustres rasos de baixa energia.

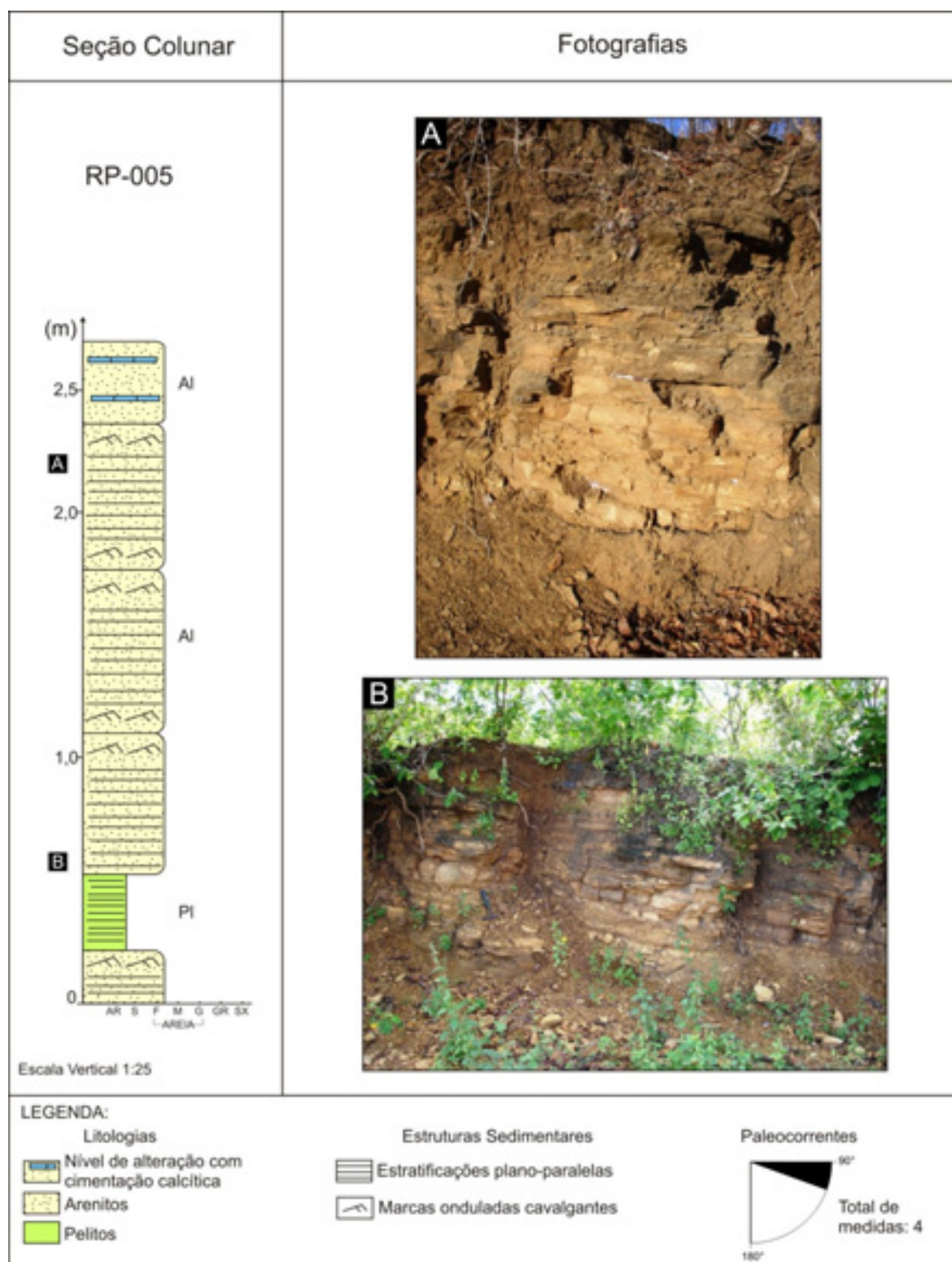


Figura 4.6: Seção colunar do afloramento RP-005 (Anexo 1), a WNW de Marizópolis, em rampa de revezamento na margem falhada. No topo da seção foram identificados níveis com abundante cimentação calcítica, além de marcas onduladas cavalgantes e estratificações cruzadas tabulares, em arenitos finos a médios (em 'A' fácies **AI**). Na base da seção observa-se a presença de pacotes pelíticos, intercalados nos arenitos (em 'B', fácies **PI**).

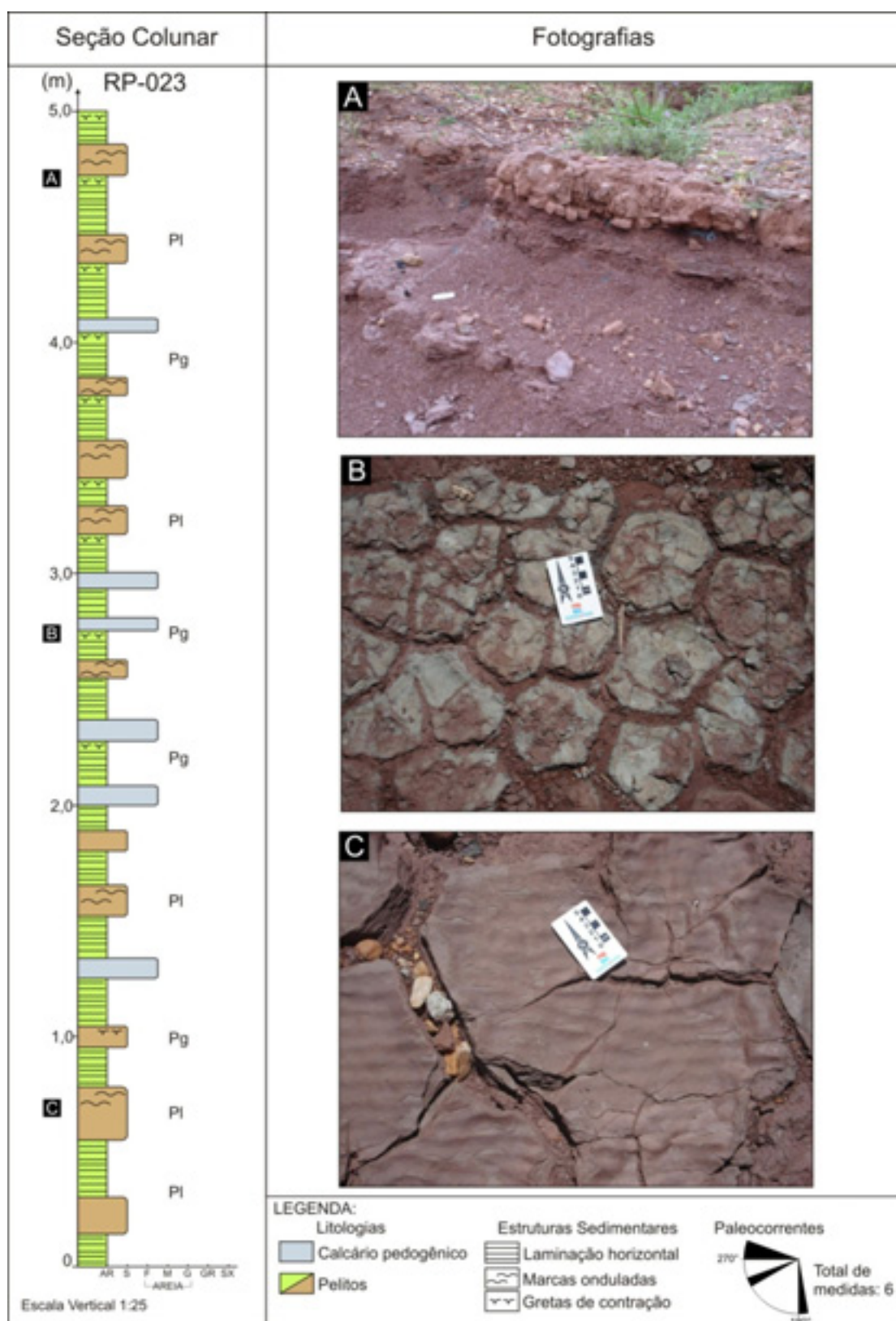


Figura 4.7: Seção colunar do afloramento RP-023, localizado a NW de Sousa (Anexo 1). Nesta seção colunar é observada a disposição das fácies pelíticas. Pode ser observada a alternância entre siltitos/argilitos e camadas de calcário pedogênico (A), gretas de contração (B) e marcas onduladas (C).

As relações laterais e verticais entre as fácies descritas possibilitaram o reconhecimento e a caracterização da seguinte associação faciológica:

- (i) Pelitos incipientemente laminados, maciços ou exibindo gretas de contração, por vezes intercalados com arenitos muito finos a médios com laminações cruzadas de marcas onduladas, representados pelas fácies **Pl**, **Pb**, **Pg**, **Ab** e **Al**, correspondendo a uma associação lacustre ou a lobos terminais de sistemas fluviais distributários.

As duas possibilidades de interpretação acerca do sistema deposicional que caracteriza a Formação Sousa não são excludentes. Cada sistema pode ter sido desenvolvido em etapas (e/ou sítios) distintas durante o preenchimento sedimentar da bacia. A partir da associação de fácies que domina em superfície (e considerando a concentração de afloramentos estudados no semi-*graben* de Sousa), é aceito que a mesma corresponda, preferencialmente, a depósitos de lobos terminais de sistemas fluviais distributários, conforme proposto por Scherer *et al.* (2007).

Por outro lado, a análise das sismofácies (Seção 3.4, figura 3.5, neste caso no semi-*graben* de Brejo das Freiras) sugere a divisão da sequência em três tratos de sistemas tectônicos. Esses tratos correspondem a fases de maior ou menor atividade tectônica, com variação na razão entre as taxas de aporte sedimentar e de criação de espaço de acomodação. Assim, assumindo a existência de um lago, a sua maior expansão (marcada por uma superfície de máxima inundação) ocorreria quando a taxa de criação de espaço de acomodação excedesse a de aporte sedimentar. Nesse momento, o lago deveria ter se tornado relativamente mais profundo e perene (*vide* a posição da superfície de inundação máxima do lago, marcada na figura 3.5). Deste modo, o arranjo das sismofácies é compatível com a ocorrência (ou maior expressão) de fácies lacustres em subsuperfície.

4.4 – Formação Rio Piranhas

A Formação Rio Piranhas é restrita às margens falhadas da bacia. Os litotipos são principalmente conglomerados e brechas, arenitos conglomeráticos e arenitos; de forma subordinada ainda podem ocorrer camadas de pelitos, com espessura decimétrica a centimétrica, possivelmente representando interdigitações com a Formação Sousa.

Dados de paleocorrentes mostram um padrão de orientação diferente daquele observado nas formações Sousa e Antenor Navarro. Na Formação Rio Piranhas são identificadas, em geral, direções para norte e NW, com variações pontuais para leste e oeste (rampas no semi-*graben* de Sousa), caracterizando áreas fontes nas margens falhadas ou aporte sedimentar de forma axial à referida margem (figura 3.4). Além das paleocorrentes e da localização paleogeográfica destes litotipos, limitada as margens falhadas, a ocorrência importância dos conglomerados e brechas é outra feição distintiva da Formação Rio Piranhas. Este é o caso, em especial, dos arenitos que a compõem, litofaciologicamente semelhantes aos da Formação Antenor Navarro, o que pode originar dúvidas na discriminação dessas unidades em campo.

As fácies identificadas nesta unidade, separadas em conglomeráticas e areníticas, serão descritas a seguir.

4.4.1 – Fácies Conglomeráticas

Na Formação Rio Piranhas foi identificada a fácies *Conglomerados, brechas e arenitos conglomeráticos matriz-suportados (Cmm)*.

As brechas e conglomerados são caracterizados pela abundância de fragmentos de matacões e blocos (os maiores podem atingir mais de 1 m de diâmetro; figuras 4.8C, 3.3C e 5.11C), além de grãos tamanho seixo, de diâmetro centimétrico a decimétrico, todos imersos em matriz arenítica grossa. Em geral a distribuição dos fragmentos é irregular, ou mesmo caótica; blocos de grandes dimensões podem ocorrer isolados na rocha (figuras 3.3C e 5.11C), concentrados (figura 4.8C e 5.11B) ou, localmente, arranjados compondo acamamento incipiente (figuras 4.8A e 3.3C). Os fragmentos são constituídos por diversos litotipos cristalinos, incluindo milonitos (figura 5.11D) e cataclasitos (figura 5.11B), havendo boa correlação com as exposições adjacentes do embasamento, indicativo de proveniência local; o caráter predominantemente anguloso dos fragmentos reforça tal interpretação. Em casos de aparente exceção, o caráter mais arredondado de blocos reflete a proveniência a partir do retrabalhamento de brechas tectônicas do embasamento, que sofreram “erosão mecânica” (causada pela rotação

dos blocos numa matriz de *gouge* cataclástico; *vide* item 5.4.1, comparando as figuras 5.11A e 5.10C) antes do retrabalhamento sedimentar.

A sul do açude de Pilões (SW de Brejo das Freiras) foi observada uma variedade de litofácies em que a matriz é lamosa (argilosa), com grãos variando de grânulo a seixo. A composição dos fragmentos varia desde litotipos cristalinos, que são os dominantes, até arenitos finos e fragmentos placóides de argilitos (figuras 4.8D e 5.11D).

A fácies **Cmm** é interpretada como tendo sido depositada por fluxos gravitacionais, especialmente por fluxos de detritos plásticos oriundos da erosão das escarpas de falhas.

4.4.2 – Fácies Areníticas

Na Formação Rio Piranhas foram identificadas duas fácies areníticas: *Arenitos finos a muito grossos com estratificações cruzadas acanaladas (Aa)*, *Arenitos finos a muito grossos com estratificações plano-paralelas (Ap)*.

As fácies **Aa** e **Ap**, arenitos com estratificações cruzadas acanaladas e plano-paralelas, respectivamente, já foram descritas anteriormente em relação à Formação Antenor Navarro, onde são os constituintes predominantes. Na Formação Rio Piranhas, a sua característica distintiva inclui as paleocorrentes e a rápida transição às fácies conglomeráticas (além da localização), conforme já referido. As mesmas (figuras 4.9 e 3.3B) são interpretadas como geradas por fluxos trativos que atuaram nas porções internas de canais.

Na Formação Rio Piranhas foi possível agrupar as fácies nas seguintes associações:

- (i) Arenitos conglomeráticos e conglomerados caóticos matriz-suportados, representados pelas fácies **Ca**, **Cp** e **Cm**, compreendendo a associação de leques aluviais;
- (ii) Arenitos grossos a conglomeráticos e conglomerados estratificados, representados pelas fácies **Aa** e **Ap**, correspondendo à associação de depósitos de preenchimento de canal fluvial.

Figura 4.8: Fácies de brechas e conglomerados da Formação Rio Piranhas. Em (A), o afloramento RP-311, localizado a SW do Açude Pilões (Anexo 1), apresenta brechas sedimentares matriz-suportadas (fácies **Cmm**) com, subordinadamente, níveis incipientemente estratificados (B, detalhe de A). Em (C), o afloramento RP-055, localizado a SW de São Domingos, é constituído por conglomerados e brechas matriz-suportados, com blocos e matacões do embasamento (idem fácies **Cmm**). Em (D) é ilustrado conglomerado com fragmentos placosos de rochas pelíticas (provavelmente rompidos a partir de uma matriz laminada) e de arenitos finos, com formas subarredondadas (variedade da fácies **Cmm**).



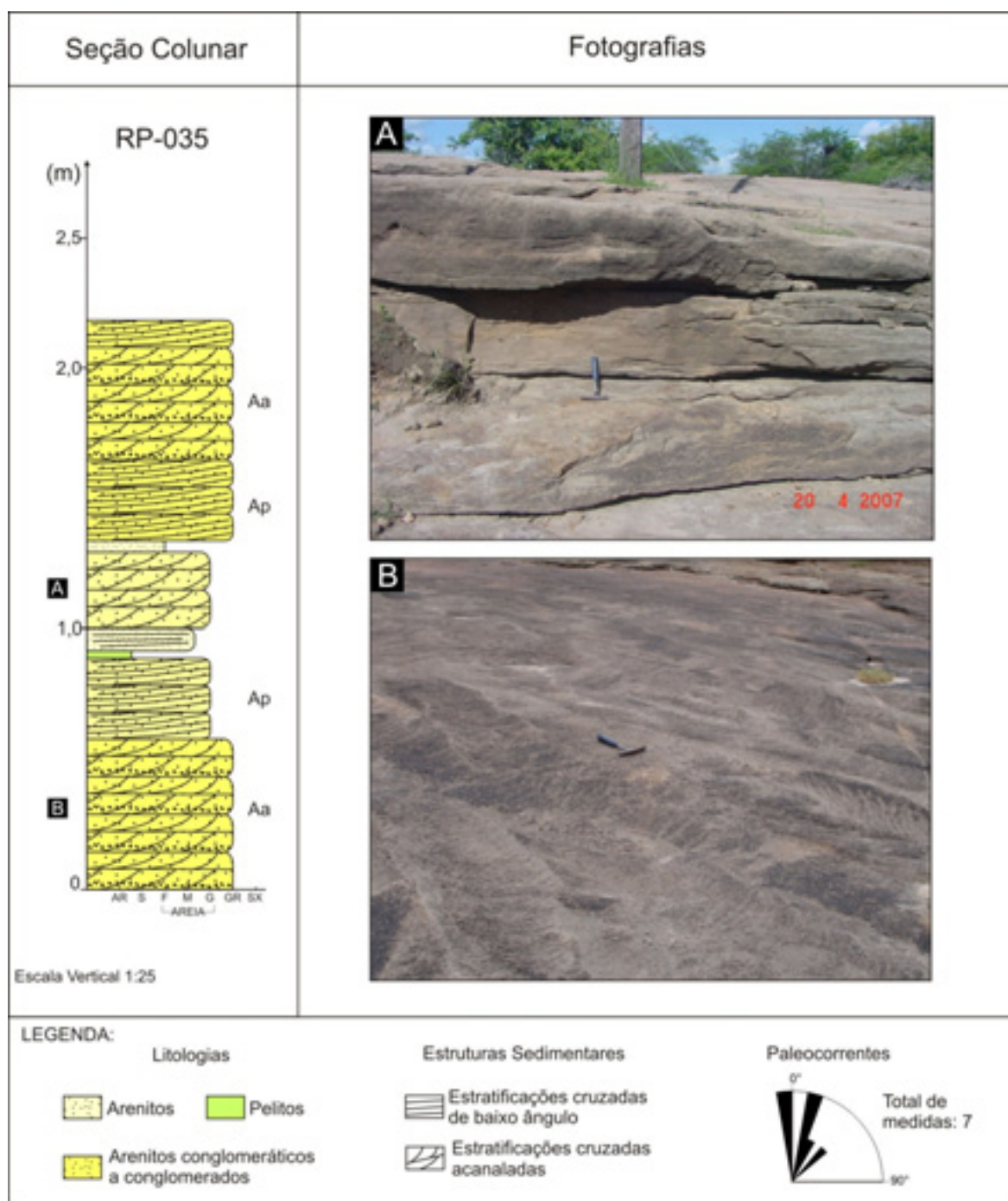


Figura 4.9: Seção colunar do afloramento RP-035 (Fácies **Aa** e **Ap** da Formação Rio Piranhas), localizado nas proximidades de Lagoa do Forno (Anexo 1), sul de Sousa, próximo à margem falhada desse semi-*graben*. Em (A) são observados arenitos com estratificações cruzadas de baixo ângulo, intercalados com finas camadas de pelitos (em boa parte erodidas). Em (B) são ilustrados arenitos grossos a conglomeráticos com estratificações cruzadas acanaladas. Notar as paleocorrentes em planta, exibindo direção geral para norte (indicada pelo cabo do martelo).

A associação de leque aluvial é composta por depósitos conglomeráticos originados em função da movimentação das falhas de borda. Por sua vez, a associação de depósitos de preenchimento de canal fluvial é constituída por formas de leito e barras; tal associação representa a deposição em porções mais distais, em relação aos leques aluviais.

4.5 – Modelo Depositional Integrado para a Bacia

A caracterização faciológica esboçada para cada formação permitiu inferir os processos sedimentares que atuaram durante a deposição dos sedimentos, assim como interpretar os possíveis sistemas deposicionais relacionados ao preenchimento da bacia.

A figura 4.10 apresenta, de forma idealizada, o modelo deposicional aqui proposto para a Bacia do Rio do Peixe. Este modelo foi elaborado com base na proposta de Gawthorpe & Leeder (2000) para a arquitetura aluvial desenvolvida em bacias distensionais. O modelo proposto por estes autores mostra o arranjo espacial dos principais depósitos sedimentares associados à estruturação interna da bacia.

Na margem flexural são desenvolvidos predominantemente depósitos fluviais constituídos por arenitos de granulometria fina a muito grossa, arenitos conglomeráticos e conglomerados, com drenagens dirigidas para os depocentros. Os litotipos de granulação mais fina correspondem a depósitos de transbordamento de canal fluvial, ao passo que os litotipos de granulação mais grossa estão associados a depósitos de preenchimento de canal.

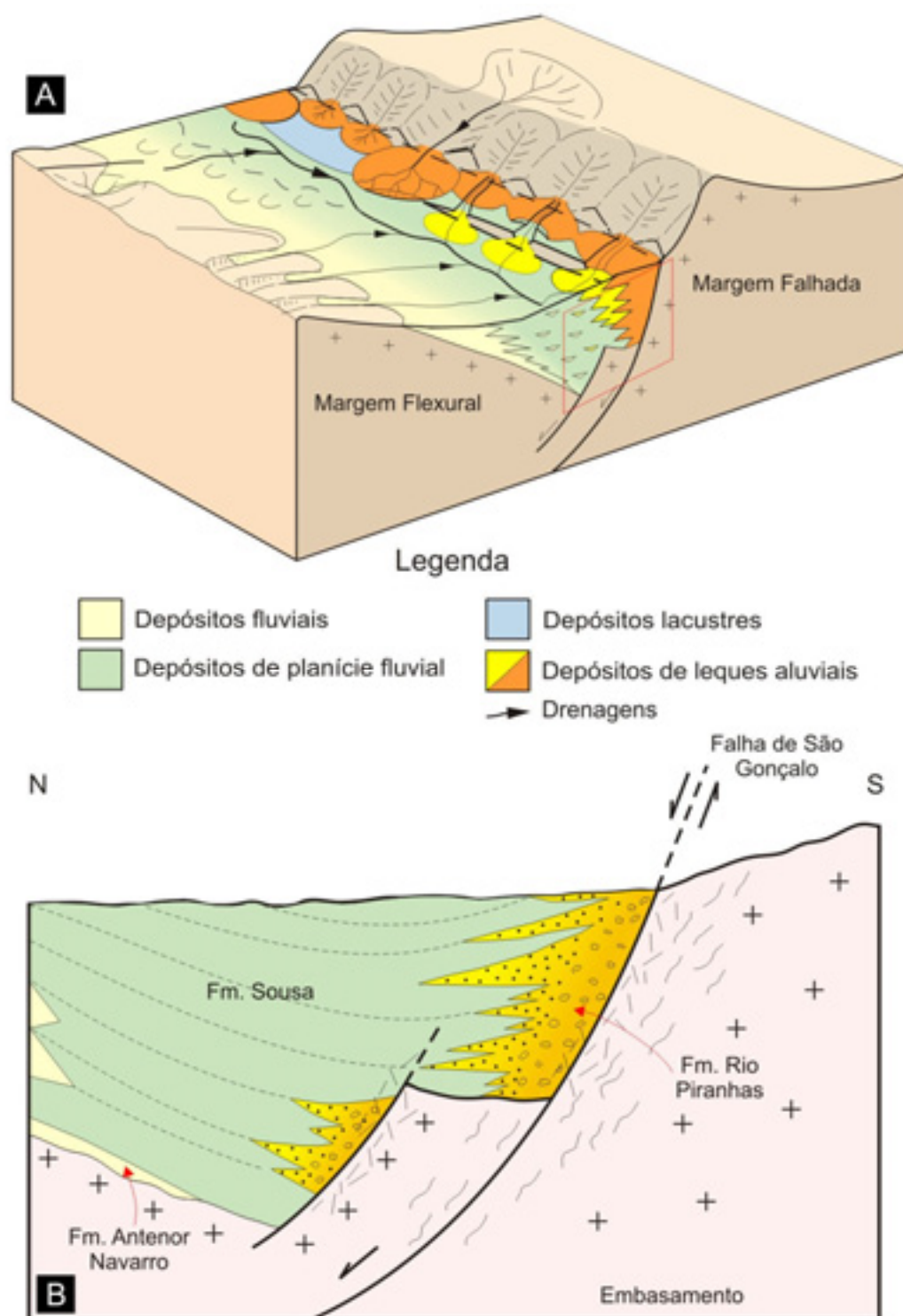


Figura 4.10: (A) Representação esquemática do modelo deposicional interpretado para a Bacia do Rio do Peixe, apresentando genericamente os depósitos fluviais, planície aluvial, lacustres e leques aluviais (modelo adaptado de Gawthorpe & Leeder 2000). O modelo contempla, também, os tratos de sistemas tectônicos analisados na figura 3.5. (B) Destaque de perfil N-S ilustrando a disposição dos leques aluviais nas margens falhadas; notar a transição entre as fácies à medida que se afastam do embasamento cataclásico: conglomerados e brechas, e arenitos conglomeráticos, grossos e finos. Notar ainda o basculamento das camadas e, nas vizinhanças da falha, o sinclinal de arrasto.

Na parte central dos semi-*grabens* (Sousa e Brejo das Freiras) são desenvolvidos depósitos lacustres rasos e efêmeros ou, de forma alternativa, lobos terminais de sistemas fluviais distributários (Scherer *et al.* 2007); em subsuperfície devem ocorrer fácies lacustres mais desenvolvidas, associadas a fases em que os lagos se tornaram mais profundos e perenes. As drenagens são direcionadas contra a falha de borda, mas podem ocorrer orientações paralelas, relacionadas à entrada de drenagens axiais à bacia. Os litotipos característicos deste sistema são pelitos e arenitos de granulometria fina.

Na margem falhada são encontrados depósitos de leque aluvial. Estes depósitos encontram-se na frente de escarpas, situação que propicia grande descarga de sedimentos grossos, que originam os conglomerados. Nas partes terminais dos leques aluviais podem ocorrer associações com arenitos e pelitos. Geralmente as paleocorrentes apresentam direções oposta àquelas encontradas na margem flexural e na parte central da bacia.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE ESTRUTURAL DA BACIA DO RIO DO PEIXE

5.1 - Introdução

Este capítulo aborda a análise das estruturas frágeis associadas à implantação da Bacia do Rio do Peixe e à deformação da sua seção sedimentar. As falhas principais da bacia foram condicionadas pela reativação de estruturas pré-cambrianas, em especial as zonas de cisalhamento brasileiras, como já assinalado nos itens 3.2 e 3.3. O levantamento sistemático dos diversos elementos estruturais que afetaram o pacote de rochas sedimentares conduziu à identificação da cinemática da deformação e orientação dos eixos principais de *strain* associados à implantação e evolução da bacia.

A análise inicia em macroescala, utilizando imagens de satélite correlacionadas com os dados de terreno, de modo a identificar os *trends* estruturais do embasamento e as estruturas principais na bacia. Uma visão mais precisa é obtida através da análise sismoestrutural, integrando o arcabouço estrutural de subsuperfície com os dados do mapa geológico, assim delineando os baixos (semi-*grabens*) e altos estruturais. Ainda nesta análise integrada, a correlação dos dados sísmicos com os de afloramentos permite relacionar as feições estruturais com a história de preenchimento da bacia. Nesse contexto são abordadas interpretações relativas à geometria da bacia e a diferenciação entre as estruturas nas margens falhadas (brechas tectônicas, conglomerados de borda, basculamento e arrasto das camadas) e nas bordas flexurais (não conformidade na base da seção sedimentar, a qual é afetada por falhas secundárias).

A análise sismoestrutural é baseada no levantamento sísmico 2D efetuado na Bacia do Rio do Peixe, reportado na Seção 1.4 e parcialmente analisado na Seção 3.4. A direção NW-SE das duas linhas sísmicas *dip* foi escolhida pelo seu paralelismo com a direção de transporte tectônico da deformação distensional (*vide* adiante); as mesmas são interligadas por uma linha *strike* com direção NE-SW. Este levantamento permitiu imagear os semi-*grabens* de Brejo das Freiras e Sousa, que correspondem aos principais depocentros da bacia.

5.2 – Estruturas no Embasamento e na Bacia: Interpretação das Imagens de Sensores Remoto

Com base na análise de imagens de satélite (*Landsat 7 ETM+*) e radar (SRTM), foram vetorizados lineamentos e fotolineações nos semi-*grabens* e terrenos de embasamento adjacentes, relacionados às estruturas frágeis de idade eocretácea (assim identificadas por delimitarem a seção sedimentar ou serem paralelas a lineamentos nestas últimas) ou a estruturas dúcteis no substrato pré-cambriano, estas de idade brasileira (final do Neoproterozóico; *vide* Seção 2.2) ou mais antigas.

As estruturas dúcteis apresentam-se como extensos feixes de lineamentos retilíneos ou, menos comumente, curvilíneos. O mapeamento dessas estruturas conduziu à identificação de duas orientações preferenciais na área (figuras 5.1, 5.2 e 3.1). Na borda sul da Sub-bacia de Sousa, a direção leste-oeste é condicionada pelo *fabric* plano-linear das rochas miloníticas da Zona de Cisalhamento Patos e seus protólitos granito-gnáissicos e metassedimentares: foliação de alto ângulo contendo uma lineação de estiramento de baixo *rake*, ambas moldadas pela topografia da área e/ou a “microtopografia” dos afloramentos. A outra orientação, NE-SW (variando a ENE na Sub-bacia de Pombal), mostra-se mais desenvolvida na borda SE das sub-bacias de Brejo das Freiras e Icozinho, correspondendo respectivamente a ramos das zonas de cisalhamento de Portalegre e de Icozinho. Em Brejo das Freiras, o *trend* NE da falha de borda virga, a sul, para a direção E-W e até WNW, compondo uma rampa oblíqua que delimita (a norte) o Degrau de Santa Helena. A reativação de diferentes ramos das zonas de cisalhamento brasileiras, durante o rifteamento eocretáceo, controlou a estruturação da bacia (figura 5.3).

Na borda norte da Sub-bacia de Sousa, destaca-se o truncamento dos *trends* NE do embasamento pelo contato basal das rochas sedimentares, aproximadamente E-W em mapa e imagens (figuras 5.1, 5.2 e 3.4), o qual corresponde a uma superfície de não conformidade, caracterizada em campo (*vide* Seção 3.2 e figura 3.2). Nas demais sub-bacias, o alinhamento das bordas NW é subparalelo ou trunca em menor ângulo os *trends* estruturais do cristalino. Alguns trechos desses contatos,

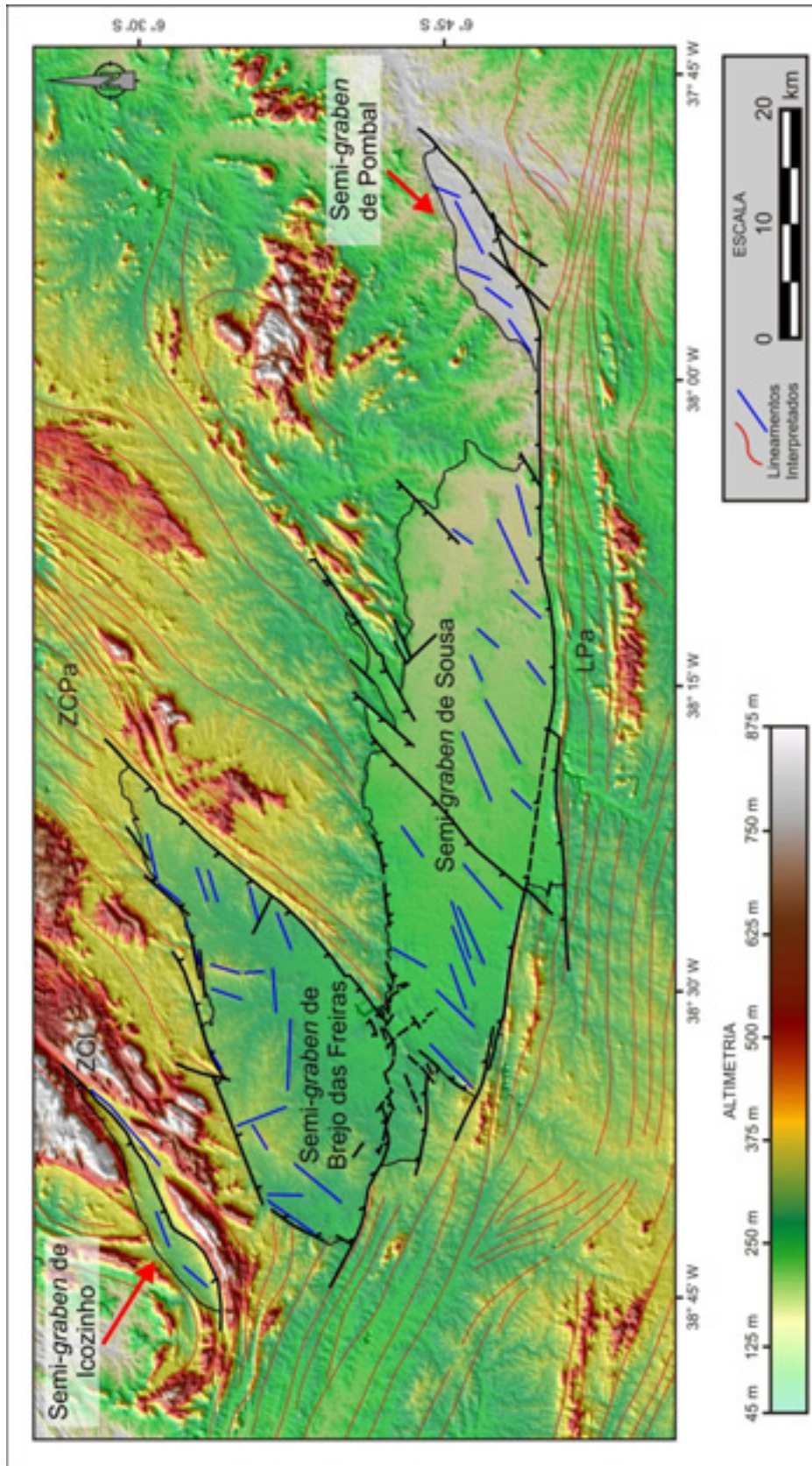


Figura 5.1: Imagem de radar SRTM com sombreamento ressaltando o relevo e sobreposição de uma camada em pseudocolor, com interpretação dos lineamentos. Os traços em vermelho são fotolineações associadas a estruturas dúcteis no embasamento. Observar o contorno nítido dos *semi-grabens*. No limite sul do *semi-graben* de Sousa observa-se lineamentos E-W bem marcados, relacionados à margem falhada e concordantes com o *trend* do Lineamento Patos (LPa). Os limites SE, falhados, dos *semi-grabens* de Brejo das Freiras e de Icozinho (bem como o de Pombal) são concordantes com o *trend* NE do feixe de cisalhamentos de Portalegre. Internamente e nas bordas dos *semi-grabens*, são identificados lineamentos (em azul) interpretados como falhas ou fraturas eocretáceas, com destaque ao sistema escalonado NE, no *semi-graben* de Sousa.

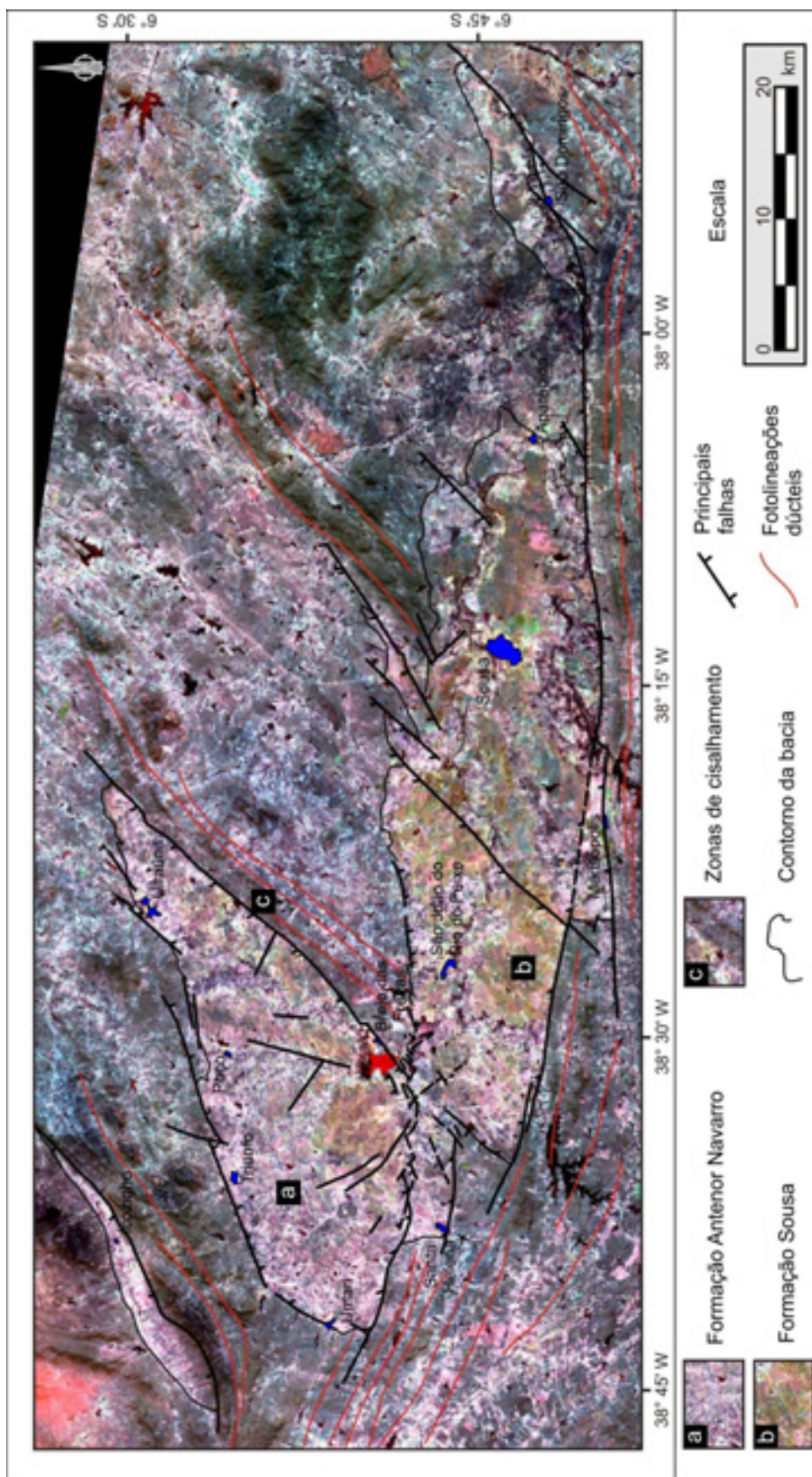




Figura 5.3: Fotomosaico do afloramento RP-311, próximo ao açude Pilões, mostrando a porção sul da falha de Brejo das Freiras. Em primeiro plano são observados os conglomerados e brechas sedimentares da Formação Rio Piranhas (detalhe na figura 5.11A, C, D), associados à borda falhada do semi-*graben*. A crista topográfica ao fundo é definida por milonitos e veios de quartzo de um ramo da zona de cisalhamento de Portalegre. A falha eocretácea imprime uma larga faixa cataclástica no embasamento, ilustrada na figura 5.10A, B.

mais retilíneos, são indicativos da presença de falhamentos, especialmente no extremo SW da Sub-bacia de Brejo das Freiras; *vide* Seção 5.5 e comparar o mapa geológico da figura 3.4 e as imagens de satélite e radar. A figura 5.4 ilustra o truncamento dos *trends* do embasamento por uma falha normal com direção NE, que define o limite do referido semi-*graben* nessa localidade.

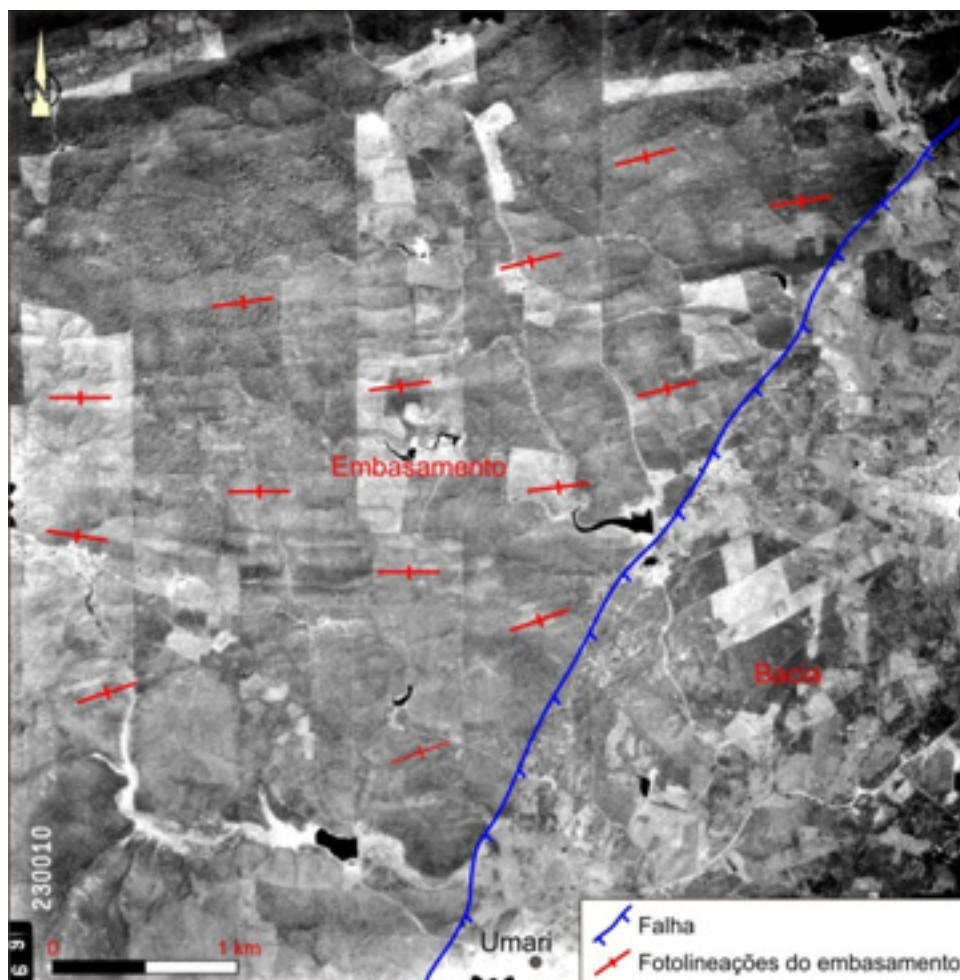


Figura 5.4: Fotografia aérea da porção SW do Semi-*graben* de Brejo das Freiras, mostrando o truncamento dos *trends* E-W dos milonitos do embasamento por uma falha NE, que define o seu limite com as rochas sedimentares da Formação Antenor Navarro; restritas ocorrências desses sedimentos, a NW do traço da falha, são consistentes com um rejeito moderado.

Além das feições lineares correlatas a falhamentos nas bordas das sub-bacias, outros lineamentos foram identificados na imagem de radar, nas partes centrais dos semi-*grabens*. Em Sousa, são marcantes os lineamentos NE (também visíveis no embasamento mais a sul) apresentando um padrão escalonado com respeito à orientação E-W da borda sul da sub-bacia, esta última incluindo lineamentos

interpretados como estruturas frágeis (feições discretas), coincidentes com as fotolineações penetrativas do embasamento, associadas a seu *fabric* dúctil pré-cambriano (figura 5.1; comparar com a figura 5.2, na qual os lineamentos internos não são destacados). Além dos padrões de lineamentos, contidos tanto na bacia quanto no embasamento, a imagem de radar é bastante efetiva na delimitação do contorno dos semi-*grabens*, mesmo nos setores com drenagem mais desenvolvida, que tendem a mascarar essas feições.

Por outro lado, fotografias aéreas convencionais, e cenas do *Google Earth* (figura 5.5), ilustram melhor os *trends* do acamamento no interior dos semi-*grabens*, permitindo visualizar mergulhos, truncamentos por falhas e, em especial, a ocorrência de dobras que acompanham o contorno dos mesmos, acomodando os estratos à geometria do depocentro, controlada por efeitos de basculamento e arrasto (*vide* adiante).

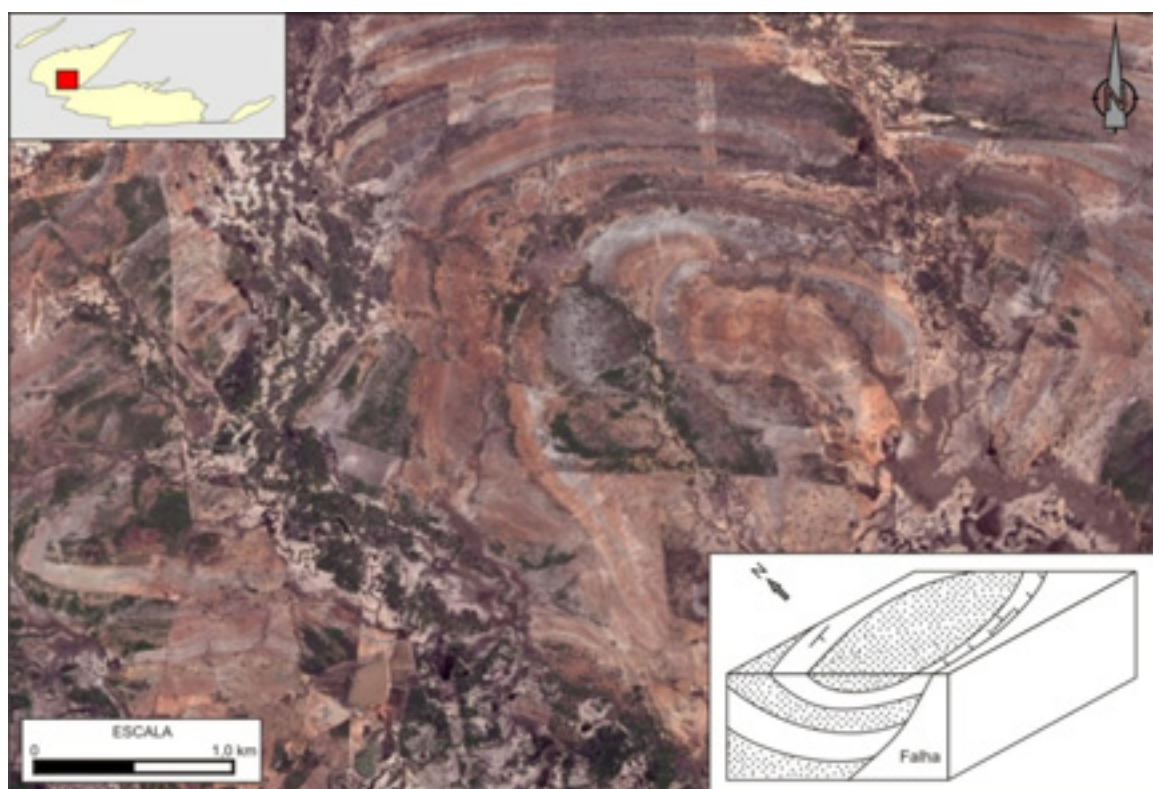


Figura 5.5: Imagem de satélite mostrando o sinclinal com duplo caimento (bacia) na porção sul do semi-*graben* de Brejo das Freiras. A superfície marcadora da estrutura é o acamamento das rochas sedimentares. No detalhe é ilustrada a disposição 3D do arranjo entre a falha, o basculamento e o arrasto das camadas, gerando o sinclinal. Imagem obtida a partir do programa *Google Earth*.

5.3 – Geometria dos Semi-Grabens e Altos, e Feições Sismoestruturais Associadas

A integração dos dados de sensores remoto, campo e seções sísmicas permite descrever em maior detalhe as feições de macroescala da Bacia do Rio do Peixe, principalmente combinando o mapa geológico (figura 3.4) com a interpretação de subsuperfície (dados gravimétricos, perfis geológicos da figura 5.6 e as seções sísmicas ilustradas nas figuras 5.7, 5.8 e 5.9); uma discussão introdutória foi feita no Capítulo 3.

Durante o Eocretáceo, a reativação frágil das faixas miloníticas pré-cambrianas desenvolveu falhas normais ao longo das zonas com direção NE, e falhas de rejeito direcional ou oblíquo ao longo das zonas E-W, as quais delimitam depocentros assimétricos do tipo *semi-graben*, com uma margem flexural (rochas sedimentares em não conformidade sobre o embasamento, truncando as suas estruturas) e uma margem retilínea em mapa, falhada. Ao longo destas últimas ocorrem brechas tectônicas e cataclasitos, bem como a deposição de brechas sedimentares e conglomerados (leques aluviais) que se interdigitam com as porções mais distais da seção.

A atividade das falhas principais provocou o basculamento regional (no âmbito do *semi-graben*) das camadas contra elas, bem como efeitos de arrasto nas suas proximidades. Longitudinalmente ao eixo maior dos *semi-grabens* principais (Sousa e Brejo das Freiras) ainda ocorrem rampas de revezamento (Santa Helena, Marizópolis) ou direcionais (borda leste do *semi-graben* de Sousa, borda NE do *semi-graben* de Brejo das Freiras). Esta geometria 3D, incluindo os efeitos de basculamento e arrasto, compõe em macroescala estruturas sinclinais de duplo caimento, as quais acomodam as camadas à topografia do substrato cristalino, controlada pelo rejeito diferencial e a geometria lítrica das falhas (comparar figuras 3.4, 5.5 e 5.9). Tais dobras correspondem a estruturas distensionais, geradas por mecanismo de *bending*.

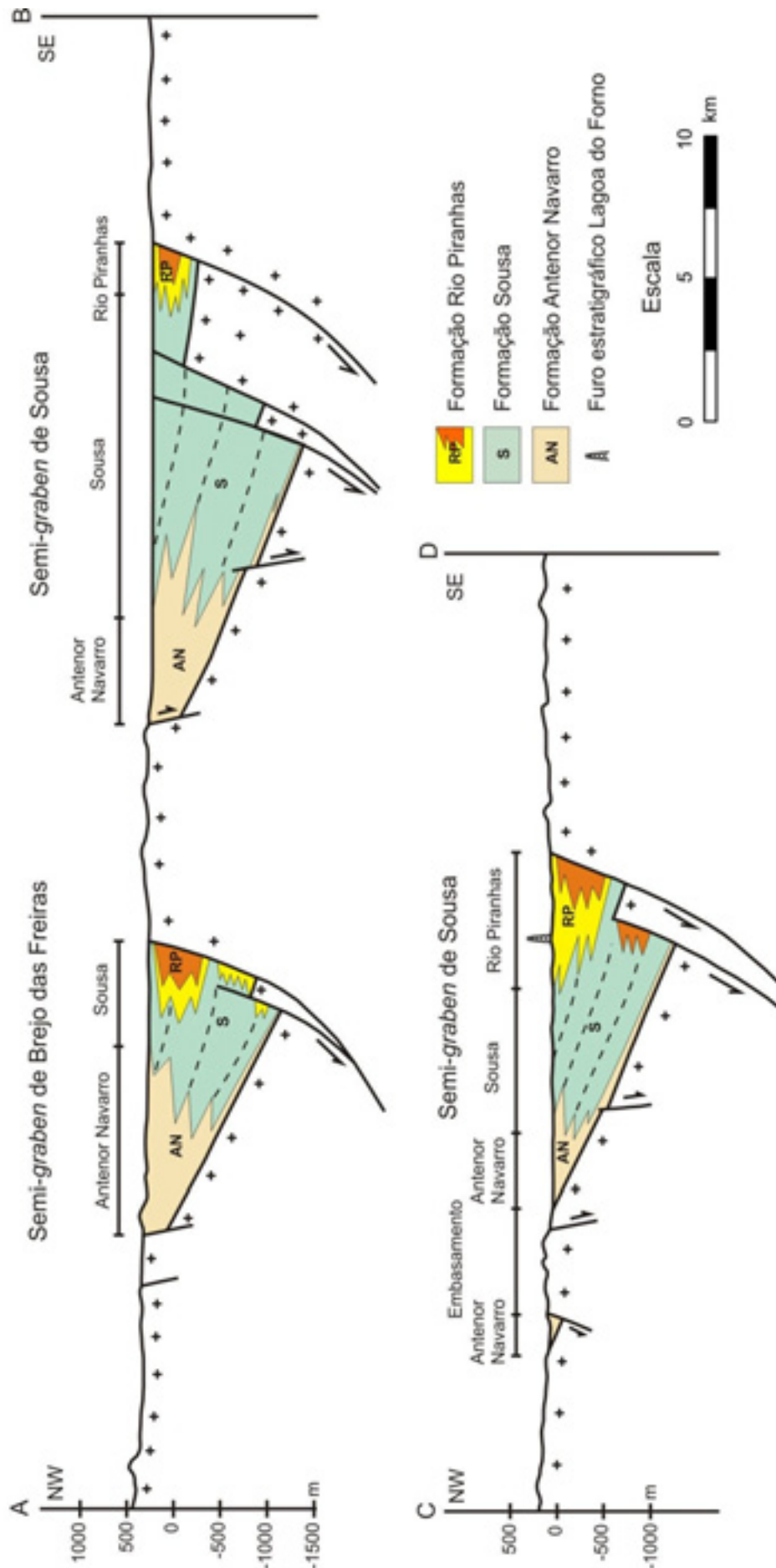


Figura 5.6: Perfis geológicos da Bacia do Rio do Peixe, ilustrando a geometria interna dos semi-grabens e as relações entre as rochas sedimentares nas margens flexural e falhada. Observar a interdigitação entre as formações e a localização dos depocentros. Notar a estruturação das falhas (borda falhada) em degraus e a ocorrência de conglomerados e outras rochas siliciclásticas mais jovens, sobre os mesmos. Os cortes estão localizados no mapa da figura 3.4. O furo Lagoa do Forno localiza-se próximo à seção, tendo sido representado como apoio à interpretação.

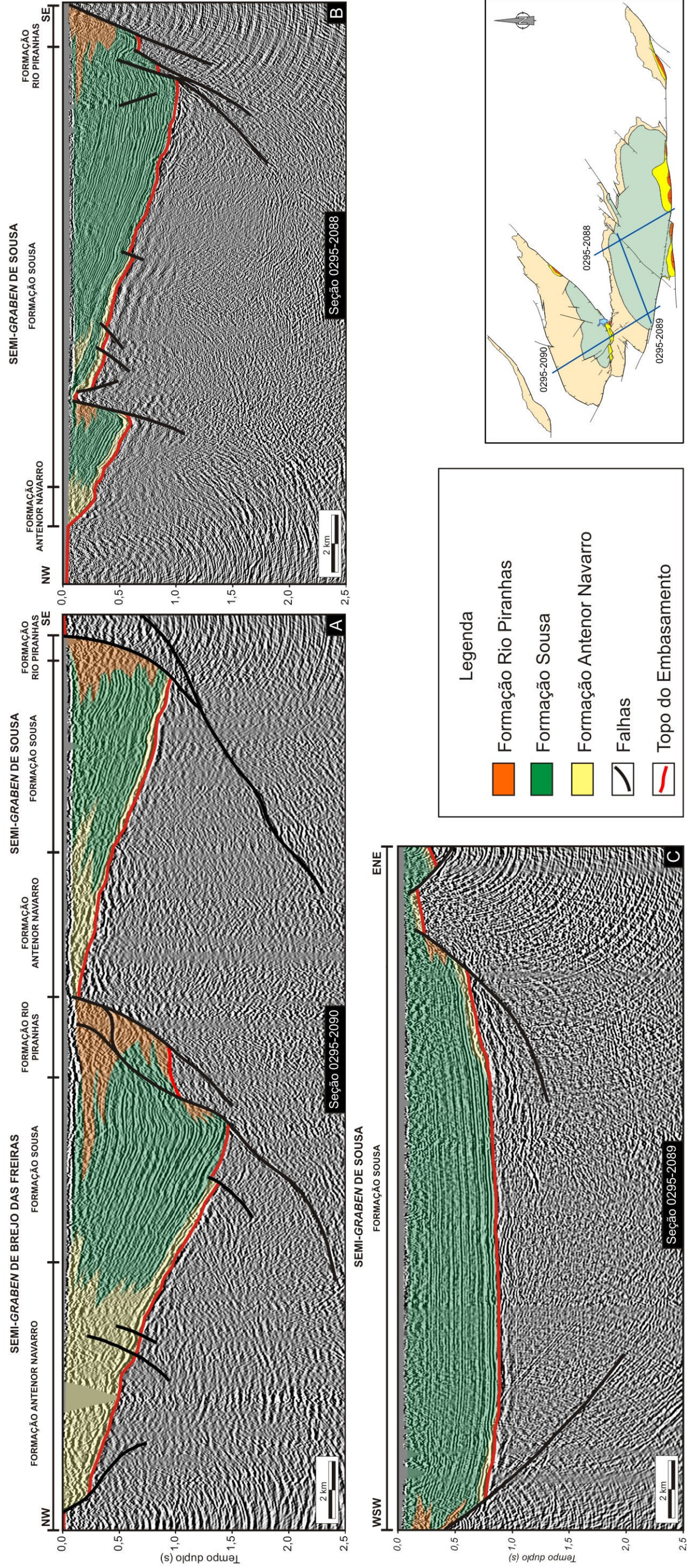


Figura 5.7: Interpretação das seções sísmicas do levantamento 0295_rio_do_peixe_2d, adquiridas pela Projeto Bacias Interiores através de convênio envolvendo a UFRN, a PETROBRAS e a empresa *Brain Technologies*. (A) e (B) correspondem às seções sísmicas *dip* nas sub-bacias de Brejo das Freiras e Sousa, de direção NW-SE. Notar a disposição das falhas com deslocamento normal (em Brejo das Freiras) ou oblíquo normal (em Sousa), delimitando e seccionando os semi-*grabens*. A ocorrência da Formação Rio Piranhas, em laranja, acompanha as bordas fallhadas. Observar o espessamento das camadas em direção à falha de borda em Brejo das Freiras. Tais falhas são estruturadas em degraus e os sedimentos sobrepostos não correspondem à base do pacote sedimentar, denotando uma sequência de falhas em *piggyback* e a deposição sintectônica do pacote sedimentar. Em (C) observa-se a seção sísmica *strike*, amostrando o semi-*graben* de Sousa, na direção SW-NE e interligando as seções sísmicas anteriores. Notar o alto interno na Sub-bacia de Sousa, interceptado nas seções em (B) e (C), no qual ocorrem exsudações de óleo. A Formação Sousa (verde) é bem marcada pelos refletores de alta frequência. A Formação Antenor Navarro (amarelo creme) exhibe sismofácies descontínuas a paralelas, com um horizonte basal de alta frequência. As linhas sísmicas estão localizadas no mapa auxiliar, com os respectivos códigos; para melhor visualização, comparar com a figura 5.8.

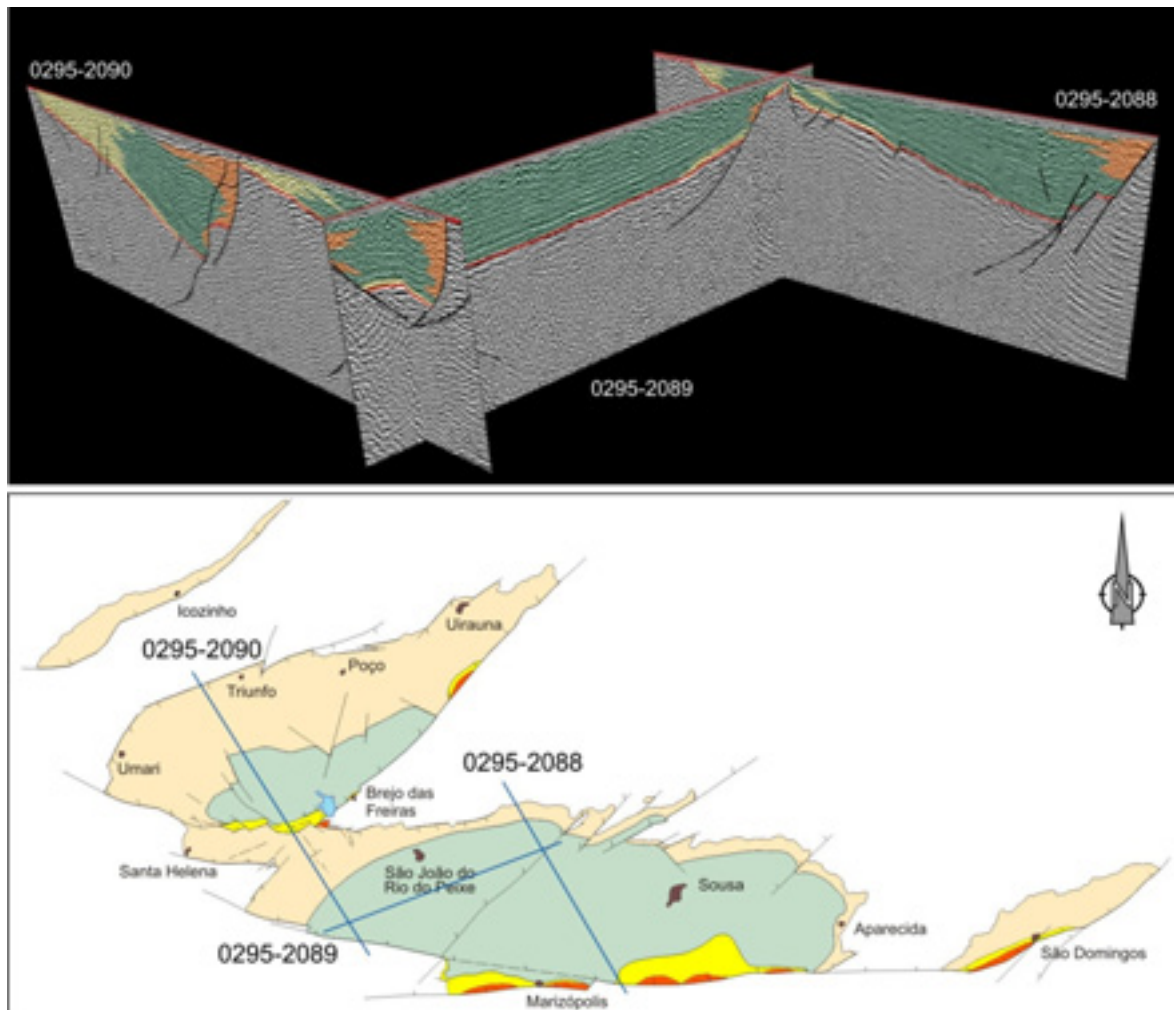


Figura 5.8: Disposição em pseudo-3D (diagrama de cerca) das seções sísmicas, com interpretação estratigráfica e estrutural. Comparar a interpretação com o mapa e perfis geológicos da bacia (figuras 3.4 e 5.6).

5.3.1 - O Semi-Graben de Brejo das Freiras e o Degrau de Santa Helena

O semi-*graben* de Brejo das Freiras tem forma elipsoidal em superfície, com eixo maior na direção NE-SW. A borda falhada é definida pela estrutura homônima, implantada sobre uma faixa milonítica brasileira (um segmento da Zona de Cisalhamento de Portalegre), ambas mergulhando no mesmo sentido, para NW. A NW, a margem flexural integra um alto estrutural (*horst* assimétrico) que delimita este semi-*graben* da estrutura de Icozinho.

Na seção sísmica 0295-2090, figura 5.7A (*vide* ainda o corte A-B da figura 5.6 e a figura 5.8), a geometria em cunha do semi-*graben* fica bem caracterizada pelo predomínio de mergulhos para SE (*vide* variações de mergulhos no mapa

geológico da figura 3.4). Na seção sísmica observa-se que, a partir da margem flexural, os refletores mergulham contra a falha de borda (falha de Brejo das Freiras), sendo que esta última mergulha para NW. Na medida em que se aproximam da falha, os estratos exibem nítido espessamento divergente, caracterizando taxas diferenciadas de subsidência e a cronologia sintectônica da

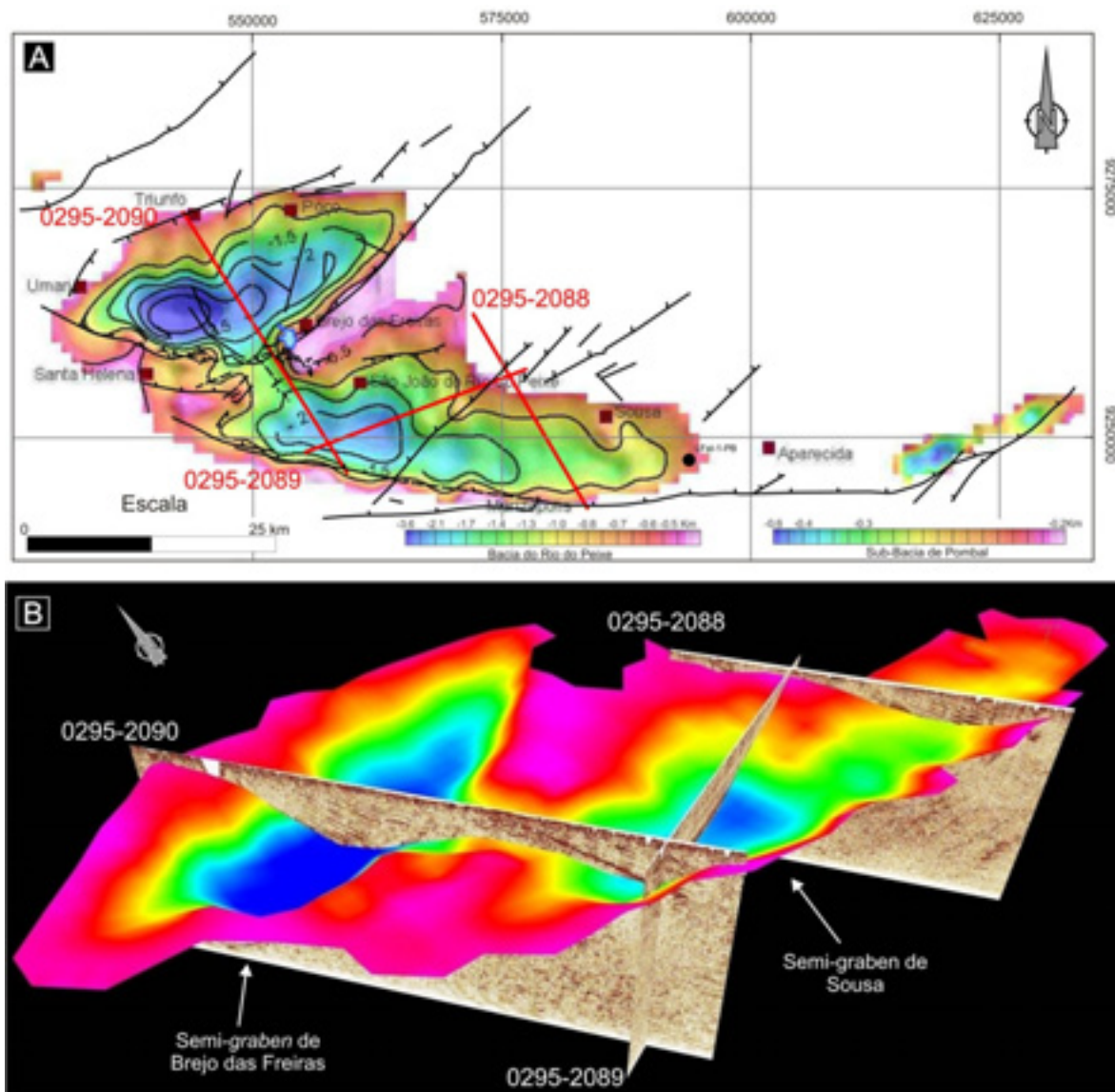


Figura 5.9: Inversão dos dados gravimétricos na Bacia do Rio do Peixe (levantamento do Projeto Bacias Interiores; PETROBRAS/UFRN/PPGG). Em (A) é ilustrado o mapa com o resultado da modelagem gravimétrica a partir da anomalia *Bouguer* residual; as isolinhas representam a estimativa da profundidade do topo do embasamento (atentar para as escalas em cor). Em (B) é mostrado o arranjo 3D das seções sísmicas e sua correlação com a modelagem gravimétrica, observando a boa correspondência entre os dois métodos geofísicos. As conversões e ajustes foram realizadas pelos geofísicos Alex F. Antunes e Fernando A. P. L. Lira Lins, professores do PPGG/UFRN.

deposição do pacote sedimentar, ratificada pela transição a sismofácies caóticas, características de leques aluviais. Ainda nesta seção, a falha de Brejo das Freiras exhibe geometria lítrica e uma estrutura em degraus. A correlação dos refletores, indicando que os degraus são capeados por estratos mais jovens (em relação ao assoalho principal do semi-*graben*) comprova adicionalmente a deposição sintectônica e a migração da falha de borda em estilo *piggyback*. Em campo, observa-se que as brechas e conglomerados da Formação Rio Piranhas (em primeiro plano nas figuras 5.3 e 5.11A) capeiam o embasamento (gnaisses e micaxistos miloníticos, estes últimos ilustrados na figura 5.10A,B, 5.12A e, ao fundo, na figura 5.11A) falhado e cataclasado, como esperado a partir da interpretação sísmica.

A combinação da geometria lítrica, os degraus e o efeito de arrasto das camadas ao longo da falha origina dobras anticlinais e sinclinais, visíveis na seção sísmica e indicadas pela variação de mergulhos nos mapas de superfície. Pela conjugação do basculamento regional e do arrasto, a estrutura principal é uma dobra sinclinal que exhibe duplo caimento (tipo bacia; figuras 3.4, 5.5, 5.6 e 5.7A, B); a porção central (linha de depressão da charneira) dessa dobra permite inferir o setor de maior rejeito da falha. Nesse local seccionado pela linha sísmica 2090, a seção sedimentar é mais espessa, coincidindo com o baixo gravimétrico ilustrado na figura 5.9; é possível estimar uma profundidade máxima entre 2,5 a 3 km, para este depocentro. A partir dele, o embasamento torna-se mais raso nos sentidos NE (em direção a Uiraúna) e oeste (em direção a Santa Helena e Umari), configurando rampas direcionais. As estruturas de arrasto sinalizam a contínua atividade das falhas durante e após a deposição, e são mais evidentes nos níveis mais basais da seção sedimentar (formação do arrasto em profundidade, ao mesmo tempo que, em nível superficial, ocorria deposição).

A falha de Brejo das Freiras, com traço principal na direção NE-SW, apresenta rejeito normal e separa o semi-*graben* homônimo de um alto estrutural a SE, aqui referido como o Alto de Varginha. A sul/SW da localidade Pilões, esta falha se ramifica em um *splay* de terminação; o segmento principal virga para E-W e até WNW, funcionando como uma rampa oblíqua, que delimita este semi-*graben* com o Degrau (rampa de revezamento, comumente referido como “alto”, na

literatura) de Santa Helena. Outro ramo da falha de Brejo das Freiras segue no rumo SW e delimita parcialmente, ou mesmo interliga em direção a oeste, as rochas sedimentares daquele degrau com aquelas do semi-*graben* de Sousa. A configuração dos mergulhos predominantes (para SE) e a orientação das camadas na terminação ocidental do semi-*graben* de Sousa (virgando de E-W para NE, aproximando-se da borda falhada a sul), pode envolver um truncamento estratigráfico e/ou estrutural, o qual seria consistente com uma idade mais jovem para o início da deposição neste último (cf. interpretação de Córdoba *et al.* 2009). No entorno desse ponto de ramificação (que também delimita o Alto de Varginha e o Degrau de Santa Helena), ocorrem arenitos grossos, conglomerados e brechas compondo uma associação de fácies de leques aluviais correlacionados à Formação Rio Piranhas, observados no campo (são proeminentes imediatamente a sul da vila de Pilões; vide figuras 5.3 e 5.11) e interpretados na linha sísmica 2090. Com base nos dados de campo e no modelo de distribuição de sismofácies (figura 3.5), esta unidade foi tentativamente cartografada acompanhando a rampa oblíqua no limite norte do Degrau de Santa Helena (mapa da figura 3.4 e outros).

Internamente ao semi-*graben* de Brejo das Freiras, observam-se falhas exibindo deslocamento normal de menor ordem, sintéticas ou antitéticas (figura 5.7A). Uma falha antitética é interceptada na borda NW do semi-*graben* (localização no extremo NW da linha sísmica e no mapa da figura 3.4). Observa-se a ocorrência de lineamentos escalonados com orientação próxima de ENE (figura 5.1), sugestivos de um componente direcional dextral, subordinado, no segmento centro-norte da falha de Brejo das Freiras.

5.3.2 – O Semi-Graben de Sousa

O semi-*graben* de Sousa apresenta forma alongada na direção E-W, sendo limitado a norte pelo embasamento, ao longo da margem flexural (corresponde ao “Alto de Varginha” e sua extensão para leste, ultrapassando o meridiano de Sousa; vide figura 3.4 e outras). O contato basal em não conformidade, da Formação Antenor Navarro (ilustrado na figura 3.2) com o embasamento, é seccionado ou

retrabalhado por falhas que em geral são de pequeno porte. A sul, a borda deste semi-*graben* é definida pela falha de São Gonçalo, de direção geral E-W e mergulho para norte (figuras 3.4 e 5.7A, B), em geral coincidente com os mergulhos da foliação no embasamento. O *trend* desta falha principal transiciona para ENE no sentido leste (em direção a São Domingos), ou para WNW no sentido oeste (localidade Cacaré), em ambos os casos controlada por ramificações ou variações de orientação do *fabric* do Lineamento Patos (comparar com a figura 5.1).

Do açude de São Gonçalo para oeste, a falha de Marizópolis constitui uma ramificação da falha de São Gonçalo, estruturando uma rampa de revezamento; o contato com o embasamento é feito por arenitos e conglomerados da Formação Rio Piranhas, intercalados lateralmente com pelitos da Formação Sousa. O rejeito inferido para este sistema de falhas é oblíquo, normal com componente sinistral. Entre outros critérios (*vide* adiante), esta cinemática é evidenciada por falhas NE escalonadas, como lineamentos internos (Figura 5.1) ou seccionando todo o semi-*graben*.

As seções sísmicas ilustradas nas figuras 5.7A, B (linhas 0295-2090 e 2088) e 5.8 imageiam este semi-*graben*, com a característica geometria em cunha e profundidade maior nas proximidades da margem falhada, onde são novamente mapeadas as fácies de leques aluviais sintectônicos. No seu interior foi identificado um alto estrutural oblíquo, alongado com direção NE e delimitado por uma falha que mergulha para NW. Esta falha, provavelmente com componente de rejeito normal preponderante, separa o semi-*graben* de Sousa em dois depocentros, o principal deles localizado a oeste/NW (*vide* mapa gravimétrico e integração com a sísmica, nas figuras 5.8 e 5.9), onde a inversão gravimétrica sugere profundidade máxima da ordem de 2 km. No depocentro a leste/SE, mais raso, o furo Lagoa do Forno (figura 3.6 e localização nas figuras 3.4, 5.6, 5.8 e 5.9) atravessou uma coluna com cerca de 1.000 m de rochas sedimentares, até atingir o embasamento (Lima & Coelho 1987).

A falha de São Gonçalo também apresenta geometria lítrica e segmentação em degraus (figuras 5.6 a 5.8), induzindo dobras e arrasto normal nas camadas. Não é nítida a feição de espessamento dos estratos, mas a cronologia de deposição nos

degraus e a sismofácies caótica da fácies de leques aluviais confirmam a migração desta falha em estilo *piggyback* e a deposição sintectônica das camadas, tal como na falha de Brejo das Freiras.

Como antes mencionado, entre os semi-*grabens* de Sousa (e mais especificamente, a sua margem flexural) e o de Brejo das Freiras (a partir da sua margem falhada), interpõe-se um alto de embasamento na forma de semi-*horst* (ou *horst* assimétrico), o Alto de Varginha. A sul/SW de Pilões, a junção do extremo SW desse alto com o Degrau de Santa Helena é estruturada pelo *splay* de terminação associado à falha de Brejo das Freiras, tendo mais a sul o extremo oeste da falha de São Gonçalo (figura 3.4). Este arranjo complexo, ainda insuficientemente entendido, deve estar controlado pela convergência entre os *trends* NE (da Zona de Cisalhamento de Portalegre) e E-W/WNW (do Lineamento Patos neste setor), no substrato cristalino (comparar com figuras 5.1 e 5.2).

5.3.3 – Os Semi-Grabens de Pombal e de Icozinho

Essas estruturas de menor porte são preenchidas principalmente por camadas areníticas e conglomeráticas correlacionadas à Formação Antenor Navarro e, muito característica em Pombal, pelos conglomerados e brechas da Formação Rio Piranhas. Infere-se que estes semi-*grabens* tenham sido mais rasos, comparativamente àqueles anteriormente descritos.

O semi-*graben* de Pombal localiza-se na terminação oriental da falha de São Gonçalo, que no local apresenta *trend* ENE a NE (figuras 3.4 e 5.1). Um alto de embasamento une a margem flexural deste semi-*graben* com aquela do semi-*graben* de Sousa, através de uma rampa direcional com suave arqueamento. O limite SE do semi-*graben* de Pombal é marcado por uma falha com movimento variando de normal a oblíquo (normal sinistral), ainda balizada por cunhas conglomeráticas associadas a leques aluviais, da Formação Rio Piranhas.

O semi-*graben* de Icozinho é bastante estreito (cerca de 2 km, ou menos, contrastando com a largura da ordem de 15 km, em Sousa e Brejo das Freiras); seu limite SE encontra-se ancorado na zona de cisalhamento homônima (um dos ramos da Zona de Cisalhamento de Portalegre), reativada como falha normal com direção

NE e mergulho para NW. Na borda NW o contato se faz por discordância ou falha de pequeno rejeito, resultando no basculamento das camadas para SE, a exemplo dos demais semi-*grabens* descritos.

5.4 – As Falhas de Borda

5.4.1 - Regimes de Deformação e Relações com a Seção Sedimentar

De acordo com o mapa geológico apresentado no Capítulo 3, perfis geológicos e seções sísmicas ilustrados nas figuras 5.6 e 5.7, as falhas de borda ocorrem nas margens sudeste e sul dos semi-*grabens*. Três “tipos” de associações litoestruturais (uma delas integrando a Formação Rio Piranhas) e estilos estruturais ocorrem ao longo das margens falhadas:

(i) Brechas tectônicas e cataclasitos, predominantemente com protólitos do embasamento (ilustrações nas figuras 5.10A, B, C), mas também presentes, embora com expressão mais reduzida, em afloramentos de rochas sedimentares (figura 5.10D com protólitos de arenitos finos e siltitos; figura 5.13A com protólito de brecha sedimentar);

(ii) Associações de conglomerados, brechas e arenitos grossos, compondo os leques aluviais da Formação Rio Piranhas (figuras 3.3, 4.8, 4.10 e 5.11). Observa-se, em várias localidades (Pilões, Marizópolis, São Domingos), que os conglomerados e brechas sedimentares muitas vezes retrabalham as brechas tectônicas derivadas do embasamento; clastos de embasamento cataclasado e de milonitos são constituintes usuais das rochas desta associação (figura 5.11B, C). Mais restritamente (sul de Pilões), foi observado uma litofácies de conglomerado ou brecha com matriz lamosa envolvendo fragmentos do embasamento e de rochas sedimentares semi-consolidadas (arenitos e pelitos), representando depósitos de fluxo de detritos (figuras 4.8D e 5.11D);

(iii) Afloramentos com maior frequência de falhas, juntas e, por vezes, veios carbonáticos ou silicosos, todavia mantendo a orientação homogênea dos marcadores pré-existentes (acamamento ou foliações), fazendo parte da zona de danos lateralmente disposta às porções centrais das falhas, estas caracterizadas pela

intensa cataclase, cominuição de grãos e rotação de blocos (associação tipo i). Os afloramentos tipo (iii) incluem o embasamento cristalino no piso das falhas normais ou oblíquas e/ou, em menor frequência, as rochas sedimentares do teto, em especial as fácies de leques aluviais (associações do tipo ii).

Essas diferentes associações litoestruturais informam sobre as condições e processos dos falhamentos. Todavia, apenas os afloramentos do tipo (iii) é que fornecem medidas coerentes sobre a geometria e cinemática das falhas principais, através de satélites de mesoescala, sintéticas ou antitéticas. Comumente são identificadas falhas normais (figuras 3.2B, 5.12A, 5.13B, 5.14 e 5.16B) ou normais oblíquas (figura 5.12B), bem como de rejeito direcional (figuras 5.12C e 5.13A, C, D), assim definidas pelo deslocamento de camadas, feições de arrasto e/ou por *slickenlines* e outros marcadores cinemáticos associados. Falhas com rejeito (ou componente) inverso foram observadas em afloramentos localizados, sendo ilustradas por Françolin (1992).

Devido aos efeitos do basculamento regional (contra as falhas) ou arrasto (divergindo das falhas) das camadas, falhas precoces de mesoescala (ou mesmo macroscópicas) podem se apresentar rotacionadas em relação à sua posição original; no caso, são observadas falhas normais sintéticas com mergulhos mais suaves, e (sub)verticalização das antitéticas (figura 5.12A), se controladas por basculamento, e o efeito oposto se o controle é pelo arrasto (figura 5.14A). Tais variações contribuem para a dispersão das medidas dos planos, ilustrada pelos estereogramas do item 5.4.2. Quando as falhas principais apresentam um componente direcional (ou de obliquidade) de movimento, o eixo de rotação dos marcadores (camadas) pode ser inclinado. Os casos de forte rotação foram eliminados das projeções.

Adicionalmente, os afloramentos tipo (iii) também podem indicar as condições do falhamento, distinguindo-se falhas cataclásticas e falhas hidroplásticas.

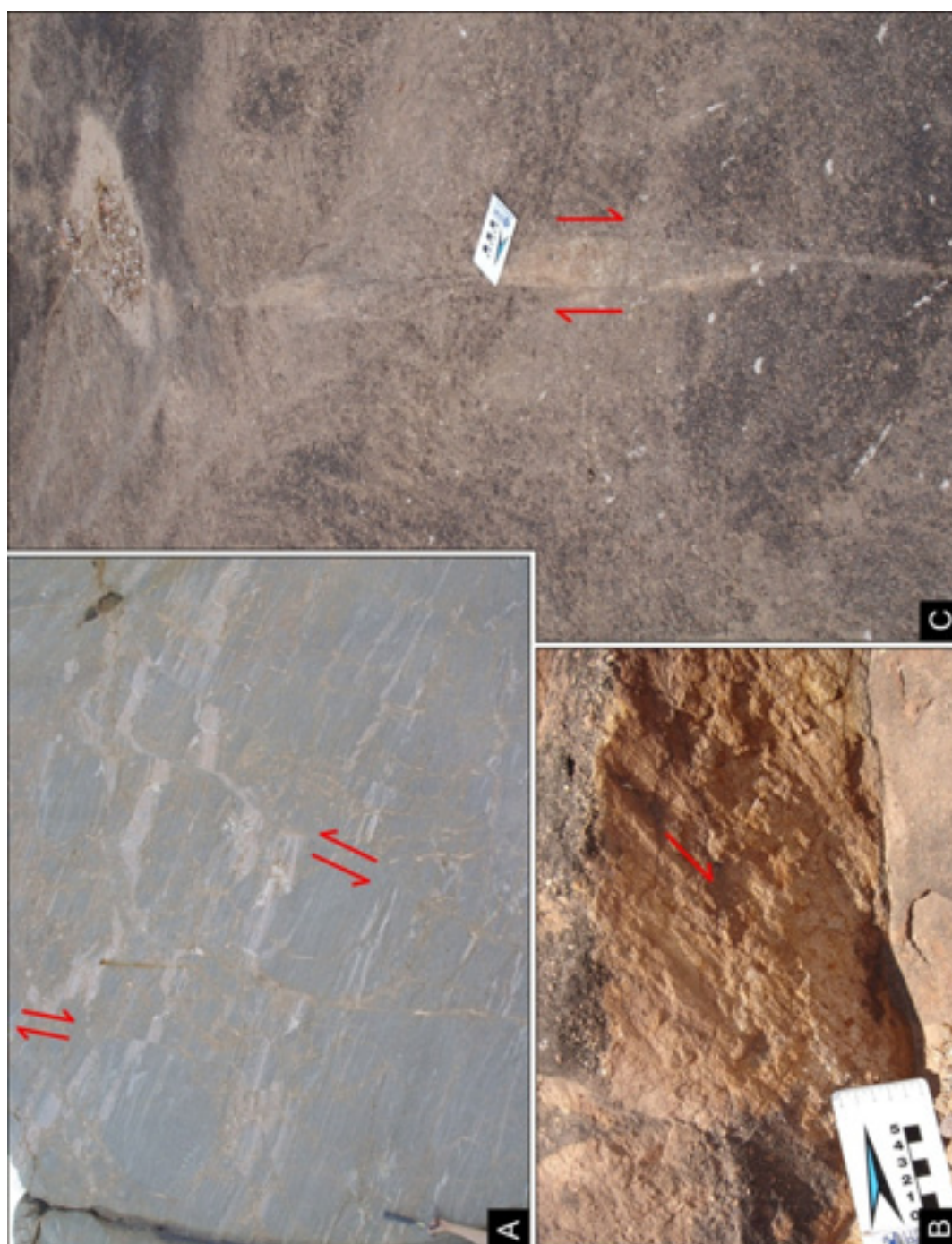
Figura 5.10: Em (A) é observado o embasamento (micaxistos miloníticos cortados por veios félsicos) falhado e cataclasado (corte em pedra com direção NW-SE). Embora predominem no corte os componentes de movimento normal, a ocorrência localizada de rejeitos inversos (à esquerda do cabo do martelo) pode refletir o componente direcional do rejeito da falha, neste setor. Com a evolução progressiva das falhas de borda, brechas tectônicas e cataclasitos são gerados principalmente no piso das falhas (protólitos do embasamento, em B e C); em C os fragmentos já exibem rotação, imersos na matriz cominuída. Ocorrência de brechação também é verificada em afloramentos de rochas sedimentares (D). As fotografias A e B correspondem ao afloramento RP-311, a fotografia C ao afloramento RP-235 e D a RP-010 (Anexo 1).





Figura 5.11: Em (A) são observadas brechas sedimentares lateralmente dispostas a um degrau de embasamento cataclástico (pedreira ao fundo, ilustrada em 5.10A). (B) é uma brecha sedimentar imatura, com fragmentos do embasamento granito-gnáissico cataclasado. Em (C) a brecha sedimentar inclui matacão de milonito do embasamento. (D) representa uma brecha com matriz lamosa, envolvendo fragmentos de rochas sedimentares e do embasamento cristalino. Estas rochas representam depósitos de fluxo de detritos, característicos da Formação Rio Piranhas. A, C e D correspondem ao afloramento RP-311 e B ao afloramento RP-086 (Anexo 1).

Figura 5.12: Em (A) observam-se falhas distensionais/normais basculadas, deslocando foliação e veios de micaxisto milonítico (afloramento RP-311). (B, RP-092) corresponde a uma falha oblíqua, com componente dextral e (C, RP-035) a uma banda de deformação com rejeito direcional, também dextral, indicado pelos sigmóides S-C.



As *falhas cataclásticas* (que são a regra no embasamento) são diagnosticadas pela ocorrência de enxames de planos discretos, bem definidos e mais retilíneos, com forte cominuição associada e, muitas vezes, películas argilosas, quartzosas ou, mais raramente, carbonáticas (identificação a olho nu); *slickenlines* estão presentes e podem ser bem desenvolvidos, ora com fibras (figuras 3.2B, 5.12B e 5.13B, C), ora como estriação mecânica. Nas rochas sedimentares, o regime é denotado pelo fraturamento de grãos (quartzo, feldspato) e clastos na matriz dos arenitos e conglomerados, bem como pelo desenvolvimento de brechas tectônicas, com fragmentos angulosos da rocha sedimentar (figura 5.10D).

Os critérios cinemáticos usuais (à parte o deslocamento ou arrasto de marcadores, como o acamamento) incluem as fraturas associadas de mesoescala (T, R, R' etc.), o fraturamento dos grãos (microjuntas de distensão, clastos com fraturas em V e microfalhas) e *slickenfibers* com batentes (figuras 5.13 e 5.16A). Para estas falhas, infere-se que os sedimentos já estariam litificados ou em processo avançado de litificação, quando do falhamento.

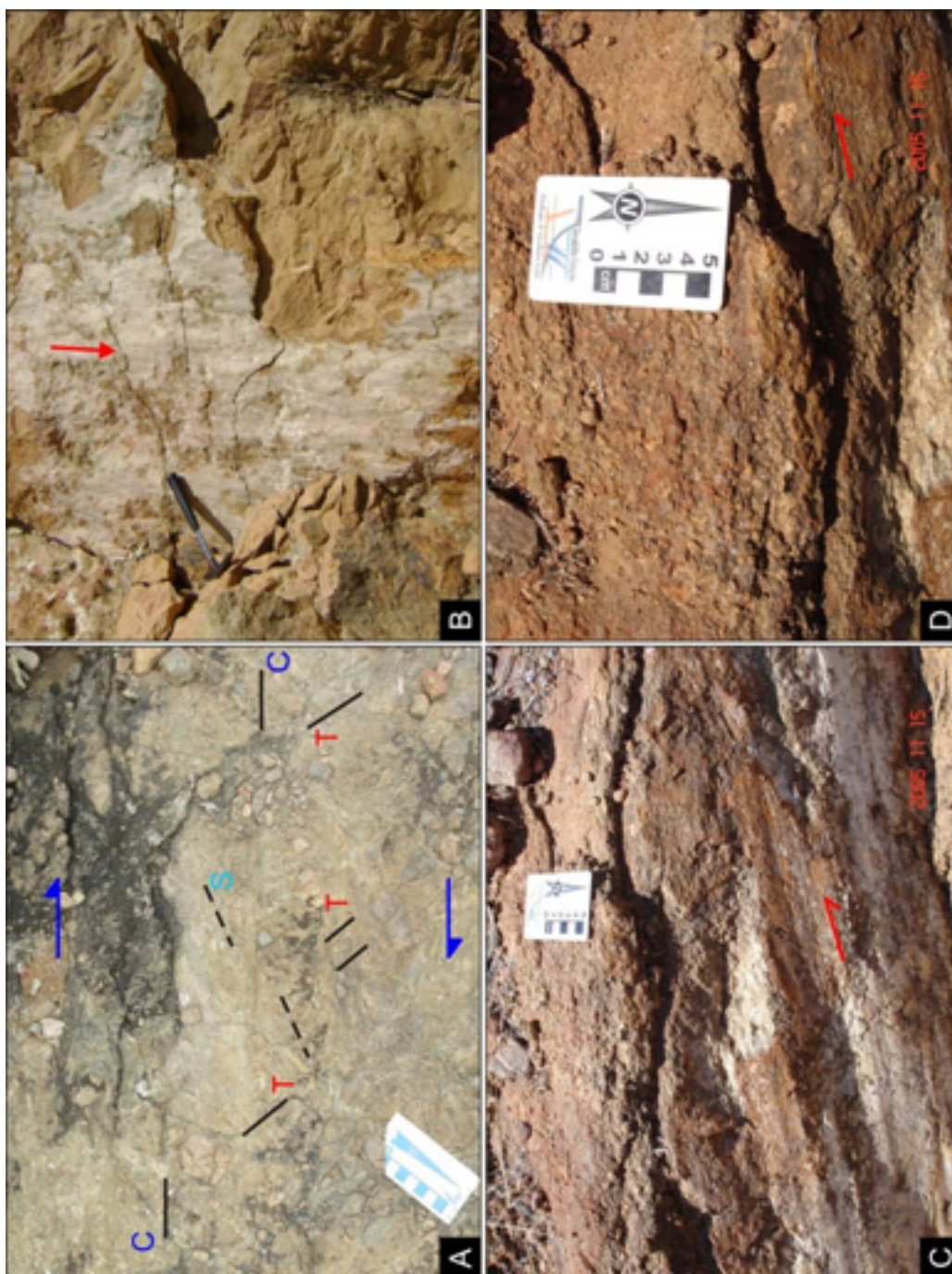
As falhas *hidroplásticas* ocorrem como planos que, comparativamente, apresentam maior espessura, ainda que variando de centimétrica (ou mesmo decimétrica) a subcentimétrica; são planos com geometria mais irregular ou curvilinear; a quantidade de deslocamento em cada plano é relativamente restrita (em geral inferior a 1 ou 2 cm). *Slickenlines* são pouco desenvolvidos e, muitas vezes, ausentes, o que dificulta a análise cinemática; todavia, em vários casos, é possível discernir, inclusive a olho nu, um *fabric* composto tipo S-C (morfologicamente análogo aos de rochas miloníticas, de alta temperatura), que denota a seção de movimento da falha (seção XZ do elipsóide de *strain*), ou um corte oblíquo próximo desta. Estruturas sigmodais são deste modo características e permitem inferir a cinemática das falhas (figuras 5.12C e 5.14) – neste caso comumente designadas como *bandas de deformação*, muito típicas da deformação de arenitos porosos e amplamente descritas na literatura especializada (Aydin & Johnson 1983; Antonellini *et al.* 1994; Fossen *et al.* 2007; exemplos na região Nordeste são descritos por Costa 2004, Ferreira 2004 e Araújo Netto 2009). Com as feições reportadas, interpreta-se que a falha (banda de deformação) foi ativa quando

o sedimento ainda estava parcialmente consolidado, ou em processo de litificação. Todavia, o diagnóstico preciso dessas condições requer o exame de lâminas delgadas, que devem evidenciar a ausência de matriz cominuída e a orientação de grãos por rotação em um meio inconsolidado, normalmente saturado em fluidos, com baixas viscosidade e coesão. Na escala mesoscópica, *slickenlines* são pouco desenvolvidos em falhas hidroplásticas, pela inexistência ou escassez de marcadores (grãos alongados) que possam ser rotacionados.

É comum que, em um enxame de bandas de deformação hidroplásticas, algumas ou várias delas exibam feições cataclásticas no seu interior ou na periferia (limite). Na maior parte dos casos, esta feição deve significar deformação progressiva, acompanhando a crescente litificação das rochas (ou alternativamente, a reativação cataclástica dos planos); a manutenção dos mesmos indicadores cinemáticos apoiaria a primeira interpretação. Sendo este o caso predominante nesta bacia, os dados cinemáticos coletados foram plotados sem discriminação do regime da falha.

Um outro tipo de relação é a contemporaneidade entre falhas e a deposição das camadas, tema abordado nas Seções 3.4 e 4.5. Esta relação é melhor diagnosticada nas seções sísmicas, através do espessamento dos estratos (o melhor exemplo é o semi-*graben* de Brejo das Freiras, na figura 5.7A) e da sua relação com os degraus das falhas de borda (camadas mais jovens recobrem o embasamento nos degraus mais elevados). Em campo, o testemunho da deposição sintectônica são as cunhas de conglomerados e arenitos distribuídos ao longo das falhas principais (*vide* a caracterização da Formação Rio Piranhas, Seção 4.4 e figura 4.10, e o mapa da figura 3.4), ocorrendo interdigitados com as formações Sousa e Antenor Navarro (figura 3.7). O padrão de orientação das paleocorrentes das três unidades, com destaque para o seu controle pela geometria e paleotopografia dos semi-*grabens* (figura 3.4), é outro aspecto consistente com a interpretação do caráter sintectônico para toda a seção sedimentar exposta.

Figura 5.13: Falhas com feições cataclásticas; *slickenlines* estão invariavelmente bem desenvolvidos. O alto *rake* e batentes nas fibras carbonáticas indicam cinemática normal em (B), afloramento RP-311; nas demais fotos, o movimento é direcional. Em (A), estrutura S-C cataclástica e juntas de distensão em fragmentos indicam rejeito dextral em falha NE (RP-311). Em (D), microjuntas de distensão nos fragmentos da matriz de um conglomerado atestam movimento sinistral em plano E-W (melhor visualizado em C; afloramento RP-054). Os afloramentos constam do mapa no Anexo 1.



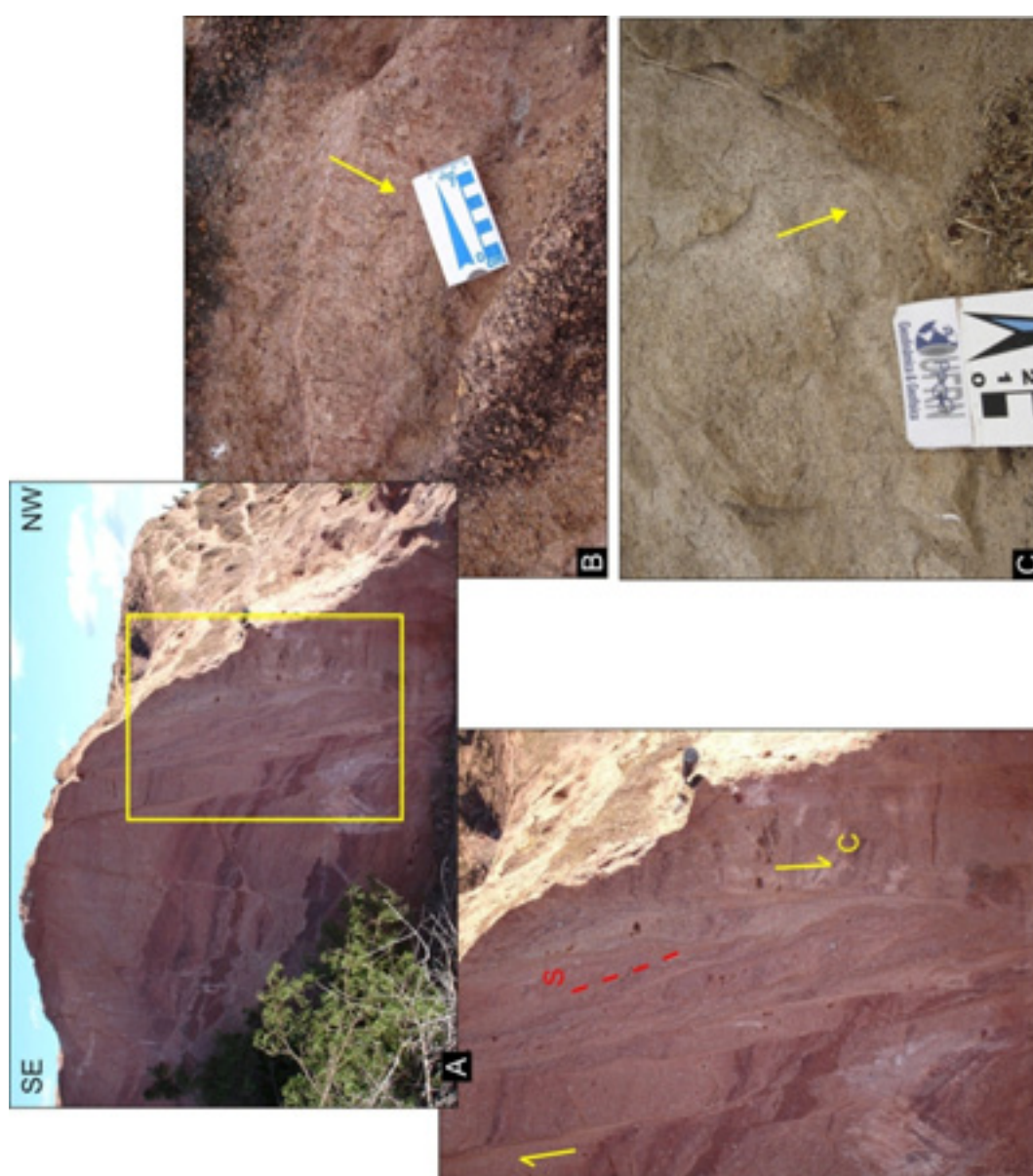


Figura 5.14: Falhas (bandas de deformação) hidroplásticas. São características as estruturas S-C (análogo da trama milonítica), e ilustradas em A (geral e detalhe) e a ausência ou reduzida expressão de *slickenlines* (B, C). A e B correspondem ao afloramento RP-015, e (C) ao afloramento RP-031, ambos da Formação Rio Piranhas (Anexo 1). As bandas apresentam rejeito normal predominante, sendo que a foto (B) ilustra um componente dextral muito subordinado.

É importante compreender que, nas falhas principais (ou segmentos das mesmas), com rejeitos finitos da ordem de centenas de metros a 2 ou mesmo 3 quilômetros, a deposição em superfície pode/deve ser contemporânea a falhas hidroplásticas (ou mesmo cataclásticas) e feições de arrasto em um nível mais profundo do depocentro, desenvolvidas em sedimentos apenas parcialmente litificados (figura 4.10). Ao mesmo tempo, o embasamento cataclasado em profundidade ainda maior tende a ser exumado no piso das falhas normais e termina justaposto, lateralmente, a rochas sedimentares com assinatura de estruturas de baixa profundidade.

As relações acima descritas podem ser utilizadas como argumento para auxiliar na distinção entre unidades estratigráficas pré-rifte ou sinrifte (ou ainda, sedimentos pré ou sintectônicos; Jardim de Sá *et al.* 2007). O predomínio de falhas em regime cataclástico, com ausência (ou reduzida expressão) de estruturas hidroplásticas ou falhas sindeposicionais, é a feição esperada para unidades pré-rifte, litificadas antes da deformação. No presente caso, a importância das estruturas sindeposicionais, ou de idade pré a sinlitificação (hidroplásticas), é uma feição consistente com o contexto sinrifte da seção sedimentar em Rio do Peixe.

5.4.2 - Geometria e Cinemática

O limite SE do semi-*graben* de Brejo das Freiras (bem como o limite norte do degrau de Santa Helena) é feito pela falha homônima; esta falha apresenta rejeito normal e direção NE-SW, com mergulho para NW. Nos afloramentos estudados do tipo (iii), foram amostradas falhas antitéticas e (em menor número) sintéticas; a orientação dos *slickenlines*, junto com os marcadores cinemáticos, identifica falhas normais ou com reduzido componente direcional, dextral. A direção de distensão principal (eixo X do elipsóide de *strain*), subhorizontal e inferida pela orientação média dos *slickenlines* nas falhas (figura 5.15A, B), varia de NW a NNW, concordando com as estimativas reportadas por Sénant & Popoff (1991) e Françolin *et al.* (1994). A partir do açude de Pilões, esta falha ramifica e encurva para ENE e E-W, com mergulho para norte (figura 3.4); os planos de mesoescala,

principalmente antitéticos, variam de normais a oblíquos, neste caso com componente sinistral (figura 5.15C, D).

A borda sul do semi-*graben* de Sousa é definida pela falha oblíqua, normal-sinistral de direção E-W, denominada de falha de São Gonçalo, incluindo a ramificação que passa por Marizópolis. As mesmas apresentam mergulhos para norte, sendo que em afloramentos ocorrem falhas sintéticas e antitéticas (figura 5.15). Em meso a macroescala, o movimento da falha é particionado em segmentos normais ou oblíquos com direção próxima de E-W (figuras 5.15E,G,I,J,L), e segmentos predominantemente normais com orientação NE (figuras 5.15G,H,K). Localmente ocorrem falhas com orientação próxima de N-S e movimento direcional dextral (interpretadas como planos antitéticos R', do componente direcional; figura 5.15F). Mais uma vez, a orientação média dos *slickenlines* permite inferir uma direção NW a NNW para a distensão principal (eixo X do elipsóide de *strain*).

A continuidade para leste da falha de borda do semi-*graben* de Sousa, até o semi-*graben* de Pombal, exibe inflexão para ENE-NE, provavelmente sob influência das anisotropias do embasamento nesta parte da bacia. A cinemática é a mesma neste semi-*graben* (figura 5.15); a falha de borda e suas ramificações incluem segmentos com mesofalhas sintéticas e antitéticas, E-W (ou WNW) normais (figura 5.15M), E-W a ENE normais sinistrais ou sinistrais (figura 5.15O, P), e NE a NNE normais dextrais (figura 5.15N).

Na borda sudeste do semi-*graben* de Icozinho, a falha apresenta rejeito normal e direção NE-SW, com mergulho para NW (figura 5.15V).

5.5 – Falhas Secundárias nas Margens Flexurais

As margens flexurais dos semi-*grabens* da Bacia do Rio do Peixe são marcadas por relação de não conformidade, com as rochas sedimentares sobrepostas ao embasamento cristalino. Todavia, nessas margens e no interior dos semi-*grabens*, também ocorrem falhas secundárias, em geral com direções NE-SW e rejeito predominantemente normal, o que também parece estar controlado pelas estruturas pré-existentes do embasamento, onde a trama regional inclui zonas de cisalhamento com direção NE-SW.

Na margem norte do semi-*graben* de Sousa são observadas falhas normais, cataclásticas, predominantemente antitéticas à falha de borda, com direção NE-SW (a norte e NW de Sousa) ou ENE (norte de São João do Rio do Peixe), sendo que as primeiras se dispõem obliquamente ao traço geral E-W dessa margem (figuras 3.2B e 5.15Q). Localmente, mesofalhas de baixo ângulo reativaram o contato em discordância (figura 5.16A). Falhas com direção similar (e neste caso, subparalelas, mas truncando o contato discordante de baixo ângulo), predominantemente antitéticas (à falha de borda), são observadas na margem flexural do semi-*graben* de Brejo das Freiras (figuras 5.15R a U, e 5.16B).

A atuação destas falhas não afetou significativamente as rochas sedimentares, a ponto de inverter o basculamento regional das camadas, o que confirma o pequeno rejeito dessas estruturas, o que também é denotado pelas seções sísmicas (figura 5.7).

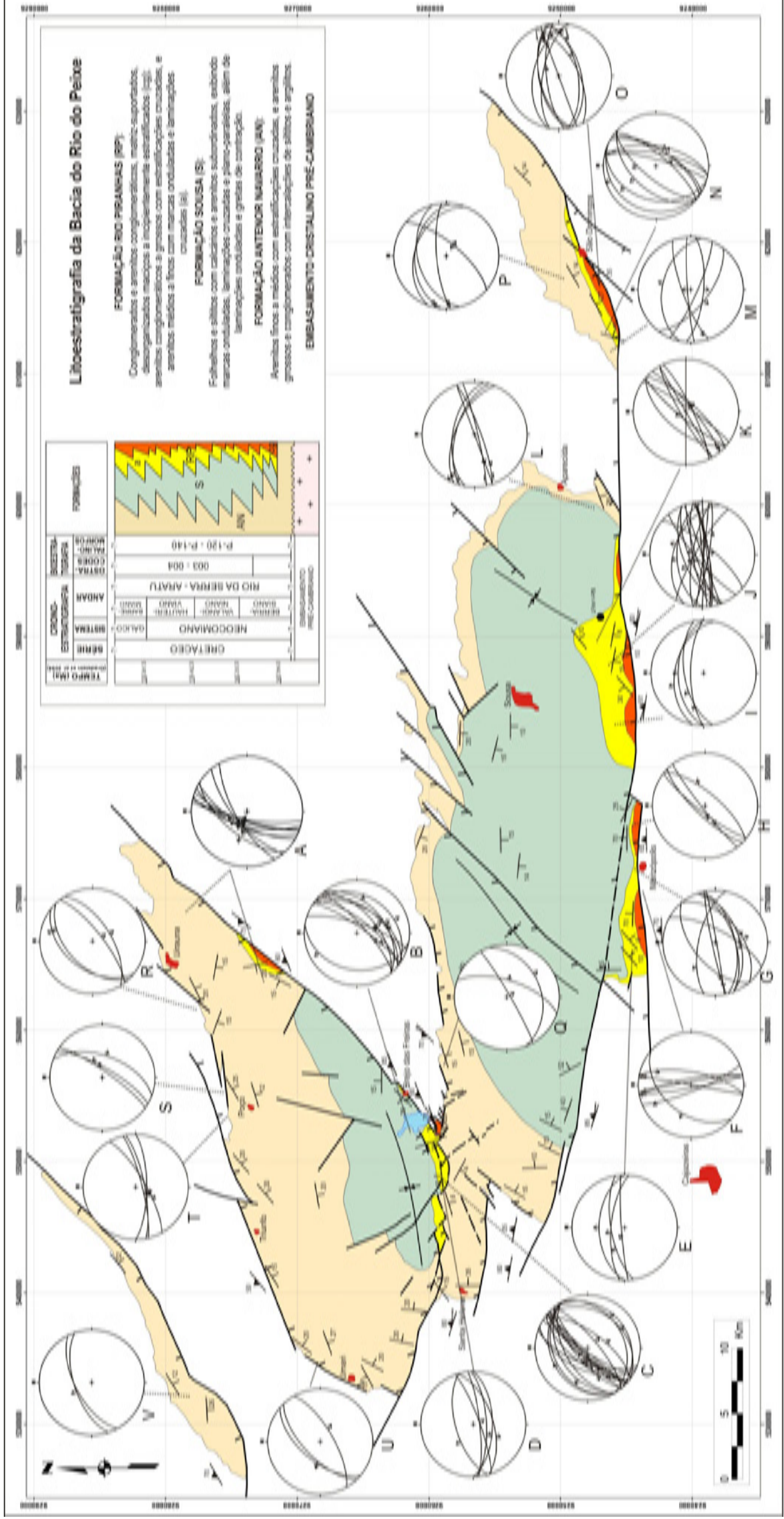


Figura 5.15: Mapa geológico da Bacia do Rio do Peixe, com representação de populações de falhas mesoscópicas (identificados por letras, com correspondência ao texto). Os estereogramas plotam as falhas como traços ciclográficos e os *slickenlines* como setas, com indicação da cinemática seguindo o padrão da literatura (falhas normais, oblíquas e de rejeito direcional/transcorrentes).



Figura 5.16: Exemplos de falhas secundárias nas margens flexurais. Em (A; semi-graben de Sousa) é observado o deslocamento do seixo (pequena falha com topo para SSE) associado à atividade de falhamentos ao longo da discordância basal da Formação Antenor Navarro. (B; semi-graben de Brejo das Freiras) corresponde a uma falha (banda de deformação) normal com direção NE, na mesma unidade, antitética em relação à falha de borda. A atuação destas falhas não chega a inverter o basculamento regional das camadas. A foto (A) foi obtida no afloramento RP-007 e (B), no RP-076 (Anexo 1).

5.6 – Regime Cinemático do Rifteamento Eocretáceo

Os dados expostos detalharam a geometria dos semi-grabens e as relações de cronologia entre a deformação associada ao rifteamento e o preenchimento sedimentar dos depocentros. A cinemática dessa deformação já havia sido inferida pelos estudos de Sénant & Popoff (1991), Françolin (1991) e Françolin

et al. (1994), suportados pelos dados de terreno, e coadunam-se com o modelo regional de Matos (1992,1999), embora existam algumas variações nas interpretações dadas por esses autores. A distensão NW a NNW, definida pelos autores supracitados e corroborada pelos dados aqui expostos, é visualizada como a cinemática principal do rifteamento: um evento distensional com estiramento principal nessa direção (figura 5.17). A geometria e cinemática das falhas eocretáceas foi fortemente controlada pelas anisotropias do substrato cristalino: o *trend* NE originou (através de nucleação ou reativação) falhas normais, enquanto que o *fabric* E-W do Lineamento Patos formou falhas oblíquas, normais sinistrais; estas últimas conferem um caráter transtraccional ao semi-*graben* de Sousa, enquanto que os demais semi-*grabens* obedecem ao modelo usual de distensão (sub)ortogonal à direção das falhas principais NE, com transição a rampas oblíquas (Santa Helena). A combinação das seções sísmicas com a modelagem gravimétrica permitiu estimar profundidades máximas da ordem de 2,0 ou 2,5 – 3,0 km, para os principais depocentros desta bacia.

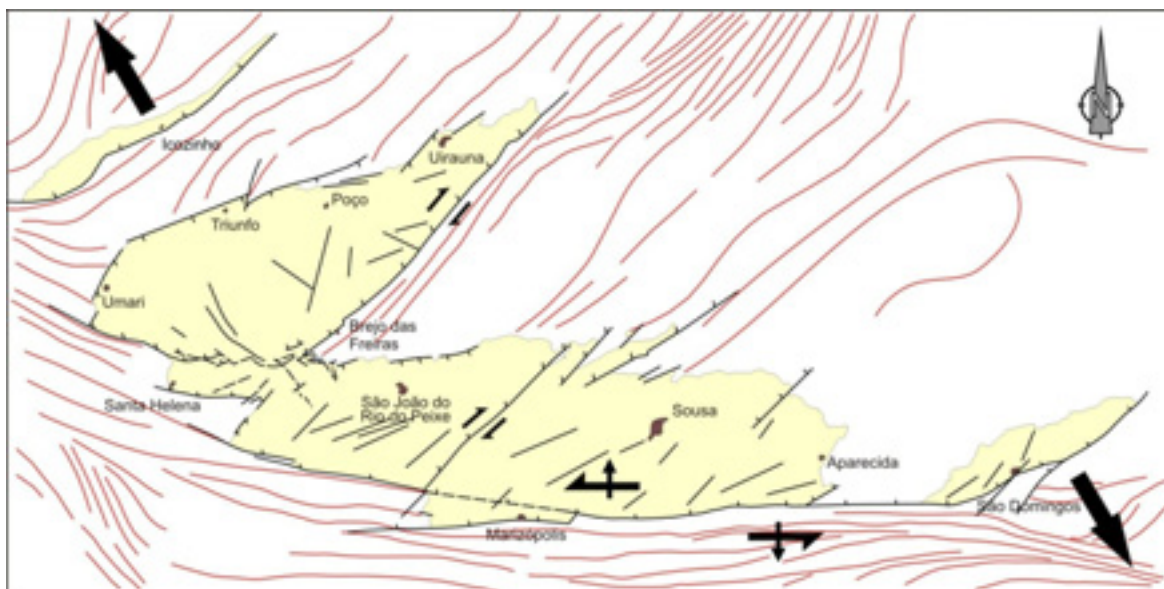


Figura 5.17: Com base na análise estrutural desenvolvida neste estudo, pode-se inferir que as discontinuidades estruturais na borda da bacia, com direção E-W foram reativadas como falhas oblíquas, normais sinistrais (caráter transtraccional) evidenciadas na figura por setas compostas. Já o *trend* NE de discontinuidades estruturais foram reativadas como falhas normais, evidenciando a distensão NW-SE.

Com a eventual exceção de uma fina e contínua seção basal da Formação Antenor Navarro (observação nas seções sísmicas), o caráter sintectônico da deposição está agora adequadamente suportado por dados de campo e do levantamento sísmico. É possível inferir a atuação de falhamentos sinrifte (ou seja, com distensão NW a NNW) durante a deposição, bem como durante e em etapa tardia à diagênese das camadas. Utilizando os dados bioestratigráficos disponíveis (Arai, 2006, p.ex.), identificando o intervalo correspondente aos andares Rio da Serra e (parte?) Aratu, pode ser estimado um lapso de tempo da ordem de 10 Ma para o evento de rifteamento em Rio do Peixe, com deposição e deformação penecontemporâneas.

Finalmente, cabe mencionar a ocorrência, aparentemente limitada, de algumas estruturas que não se enquadram na descrição aqui apresentada. Trata-se de falhas com orientações similares, mas cinemática oposta, qual seja falhas E-W com rejeito direcional dextral e falhas NNE/N-S com componente sinistral. No momento, a interpretação mais simples é considerá-las como estruturas pós-rifte, com a possibilidade de associá-las à abertura transcorrente/transformante da Margem Equatorial, no Aptiano (Andar Alagoas).

CAPÍTULO 6

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

O presente estudo, realizado na Bacia do Rio do Peixe, permitiu detalhar o seu arcabouço estratigráfico e estrutural, com base na integração entre os dados de campo e de sensores remotos, com a interpretação de seções sísmicas e de dados gravimétricos. A bacia constitui parte do *trend* Cariri-Potiguar, que marca o eixo de rifteamento neocomiano no Nordeste oriental, a norte do Lineamento Pernambuco. A mesma é estruturada em *semi-grabens* com direções NE (Pombal, Brejo das Freiras e Icozinho) ou E-W (Sousa), basculados para SE ou sul, respectivamente.

Em relação à litoestratigrafia, foram desenvolvidos estudos faciológicos que permitiram a caracterização de cada formação. A Formação Antenor Navarro capeia em discordância o embasamento pré-cambriano, aflorando ao longo das margens flexurais dos *semi-grabens*, em dois deles ocorrendo isoladamente das demais unidades, como resultado da erosão tardi a pós-rifte. A mesma compreende uma associação de fácies areníticas e, em menor expressão, conglomeráticas (na porção basal), associadas a um sistema fluvial entrelaçado, onde predominam depósitos de canal fluvial e, subordinadamente, de transbordamento de canal. As medidas de paleocorrentes indicam transporte sedimentar em geral para sul/SE. Nas seções sísmicas, a Formação Antenor Navarro apresenta sismofácies subparalelas, com refletores contínuos a descontínuos.

A Formação Sousa engloba fácies pelíticas, comumente apresentando marcas onduladas, gretas de contração, bioturbações, icnofósseis e fósseis; tais feições são indicativas de ambientes lacustre e/ou de planície aluvial. As medidas de paleocorrentes indicam aporte sedimentar para sul/SE, semelhante ao observado na Formação Antenor Navarro. Foi identificada a associação de fácies areníticas intercaladas aos pacotes pelíticos, reforçando a influência de sistemas fluviais lateralmente dispostos. As sismofácies na Formação Sousa são paralelas e de alta amplitude, com refletores divergentes em direção à margem falhada, ressaltando o caráter sintectônico da deposição.

A Formação Rio Piranhas reúne fácies conglomeráticas e areníticas, que representam depósitos de leques aluviais associados às escarpas de falhas. Brechas sedimentares e conglomerados representam a denudação das antigas escarpas de falhas. As fácies areníticas são interpretadas como uma parte mais distal dos leques

aluviais. As medidas de paleocorrentes nesta formação indicam transporte para NW ou norte, contrastando com as direções observadas nas demais unidades. Também ocorreu aporte sedimentar axialmente à bacia, ao longo de rampas laterais.

Os trabalhos de campo evidenciaram relações de passagem lateral e interdigitação entre essas formações, corroboradas pela interpretação de seções sísmicas, conduzindo às modificações na coluna estratigráfica da bacia. Na porção inferior da sequência sedimentar, as sismofácies exibem um padrão retrogradacional que culmina em uma superfície de máxima inundação; na porção superior o arranjo de sismofácies segue um padrão progradacional. Nessa interpretação foram reconhecidos três tratos de sistemas tectônicos, referentes ao *início do rifte* (fase com pouca criação de espaço deposicional), *clímax do rifte* (a taxa de criação de espaço supera o aporte marginal e gera retrogradações na margem flexural e na borda falhada, onde uma cunha conglomerática avança abruptamente em direção ao depocentro) e ao *preenchimento do rifte* (cunha progradante na margem flexural, enquanto que na borda falhada ocorre uma retrogradação da cunha conglomerática). A correlação das seções sísmicas (figuras 3.3 e 5.7) com o mapa geológico (figura 3.4) permite inferir que o Trato de Preenchimento de Rifte domina ao nível atualmente aflorante, compreendendo as três unidades litoestratigráficas. Afloramentos do Trato de Início do Rifte podem ser identificados na base da Formação Antenor Navarro, nas margens flexurais dos semi-*grabens* (exemplos nas figuras 3.2, 4.1B e 4.2); o Trato de Clímax do Rifte ocorre apenas em subsuperfície.

As relações de contemporaneidade e interdigitação das fácies, e os indicadores de deposição sintectônica, confirmam que toda a sequência sedimentar pode ser atribuída ao evento de rifteamento neocomiano, desfavorecendo interpretações prévias da ocorrência de unidades pré-rifte (equivalentes às formações Brejo Santo e Missão Velha, da Bacia do Araripe), nesta bacia.

A integração dos dados estruturais (de sensores remotos, campo, linhas sísmicas e modelagem gravimétrica) permitiu descrever em maior detalhe as feições de macroescala da Bacia do Rio do Peixe, tais como a arquitetura dos semi-*grabens* e altos, e a geometria e cinemática dos sistemas de falhas. Perfis geológicos foram utilizados para reconstruir a geometria interna (em cunha) dos semi-*grabens* e os

depocentros principais, bem como as relações entre as rochas sedimentares nas margens flexural (em não conformidade sobre o embasamento) e falhada. Falhas de menor porte podem seccionar as rochas sedimentares nas margens flexurais. As falhas de borda apresentam geometria lítrica e uma estruturação em degraus, com ocorrência de conglomerados e arenitos mais jovens (Formação Rio Piranhas), sobrepostos a esses degraus, evidenciando que os falhamentos evoluem em estilo *piggyback* e estiveram ativos durante a deposição das camadas. A combinação das seções sísmicas com a modelagem gravimétrica permitiu estimar profundidades máximas da ordem de 2 a 3 km, para os principais depocentros desta bacia.

Nos semi-*grabens* de Brejo das Freiras, Pombal e Icozinho, as falhas de borda apresentam direção NE a ENE, mergulham para NW e exibem cinemática normal, por vezes com moderado componente direcional dextral. No semi-*graben* de Sousa, a falha E-W exibe mergulho para norte e cinemática normal sinistral, evidenciada por marcadores cinemáticos de mesoescala e pelo arranjo escalonado de falhas NE, normais; uma dessas falhas, com mergulho para NW, define um alto interno alongado nessa direção. Índícios de óleo, em superfície, coincidem com a localização desse alto. Rampas de revezamento (Marizópolis e Santa Helena) são definidas por ramificações das falhas principais.

A análise de regimes de deformação e relações com a sequencia sedimentar permitiu a identificação de três “tipos” de associações litoestruturais ou estilos estruturais, que ocorrem ao longo das margens falhadas: (i) brechas tectônicas e cataclasitos, predominantemente com protólitos do embasamento; (ii) associações de conglomerados, brechas e arenitos grossos, compondo os leques aluviais da Formação Rio Piranhas; e (iii) afloramentos com maior frequência de mesofalhas, juntas e veios, compondo as zonas de danos das falhas principais, cuja cinemática foi assim determinada (normais NE, e normais sinistrais E-W a ENE, como as mais frequentes).

Essas diferentes associações litoestruturais, e as relações com as unidades sedimentares (em especial, as cunhas conglomeráticas da Formação Rio Piranhas) em macro (sísmica) e mesoescala, permitem inferir as condições e processos dos falhamentos. São caracterizadas falhas e movimentações sindeposicionais, pré a

sinlificação dos sedimentos, e pós-litificação, predominantemente controladas pela mesma cinemática e assim indicativas de deformação progressiva no decorrer do rifteamento.

A distensão NW a NNW, definida pelos dados aqui obtidos e/ou interpretados, é visualizada como a cinemática principal do rifteamento: um evento distensional com estiramento principal nesta direção. A geometria e cinemática das falhas eocretáceas foi fortemente controlada pelas anisotropias do substrato cristalino; o *trend* NE nucleou (ou reativou) falhas normais, enquanto que o *fabric* E-W do Lineamento Patos controlou a formação de falhas oblíquas, normais sinistrais; estas últimas conferem um caráter transtraccional ao semi-*graben* de Sousa, enquanto que os demais obedecem ao modelo usual de distensão (sub)ortogonal à direção das falhas principais NE.

Com base nos dados bioestratigráficos disponíveis, o rifteamento ocorreu no intervalo correspondente aos andares Rio da Serra e (em parte ?) Aratu, no Neocomiano - porção inferior do Barremiano, com duração da ordem de 10 Ma.

Os indícios (exsudações) de óleos de origem continental (Mendonça Filho *et al.* 2006), observados nesta bacia, devem estar filiados a camadas geradoras na Formação Sousa; fácies lacustres candidatas são inferidas ocorrerem em subsuperfície. Mais provavelmente (ou pela falta de evidências alternativas da ocorrência de uma cobertura pós-rifte), a maturação desses geradores e subsequente expulsão do óleo deve ter ocorrido sob a ação do soterramento da pilha sedimentar sinrifte, durante o Eocretáceo; A espessura remanescente de sedimentos, preservada nos depocentros (2,0 - 2,5, localmente até 3,0 km), e uma estimativa de erosão não inferior a 2 km (Jardim de Sá, 2006), viabiliza esse quadro de geração, comparativamente a outras bacias de ambiência similar. A relação de interdigitação lateral, e a declividade da pilha sedimentar, devem ter favorecido a migração do óleo *up dip*, até os potenciais reservatórios da Formação Antenor Navarro; outra alternativa seria a migração de óleo ao longo das falhas de borda e acumulação nos arenitos e conglomerados da Formação Rio Piranhas. No primeiro caso, altos internos e falhas antitéticas selantes seriam candidatos a trapas estruturais, contexto que parece ocorrer a NW de Sousa. No segundo caso, podem ser visualizadas as

dobras e o acunhamento dos reservatórios areníticos interdigitados com os pelitos da Formação Sousa. A erosão pós-Aratu, incluindo eventos mais jovens, do final do Cretáceo ao início do Neógeno, seriam os fatores restritivos para a preservação dessas acumulações hipotéticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, J. P. T. 1970. Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste: Folha nº 15 – Jaguaribe – Ceará. SUDENE, Recife, Ser. Hidrogeologia 32: 187p.
- Antonellini, M. A.; Aydin, A.; Pollard, D. D. 1994. Microstruture of deformation bands in porous sandstones at Arches National Park, Utah. Jour. Struct. Geol., 7: 941-959.
- Antunes, A. F.; Andrade, P. R. O.; Jardim de Sá, E. F.; Lins, F. A. P. L.; Alves da Silva, F. C.; Sousa, D. C.; Córdoba, V. C. 2007. Estilo tectônico do rifte na Bacia do Rio do Peixe. XXI Simp. Geol. Nordeste, Bol. Resumos, SBG, Natal: 218.
- Antunes, A. F.; Jardim de Sá, E. F.; Lins, F. A. P. L.; Silva, A. N. 2009. Tectonic framework of Rio do Peixe Basin (Northeast Brazil). XIth Intern. Congr. Braz. Geophys. Soc., SBGf, Salvador (no prelo).
- Arai, M. 2006. Revisão estratigráfica do Cretáceo Inferior das Bacias Interiores do Nordeste do Brasil. Revista de Geociências [UNESP], Rio Claro, v. 25, n. 1/3, p. 7-15.
- Arai, M.; Hashimoto, A. T.; Uesugui, N. 1989. Significado cronoestratigráfico da associação microflorística do Cretáceo inferior do Brasil. Bol. Geoc. Petrobras, 3: 87-103.
- Araújo Netto, J. M. 2009. Análise meso e microscópica de bandas de deformação em arenitos da Bacia do Araripe, NE do Brasil. Monografia de Graduação. UFRN. Natal.
- Aydin, A. & Johnson, A. M. 1983. Analysis of faulting in porous sandstones. Jour. Struct. Geol., 5: 19-31.
- Brito, I. M. 1987. As unidades litoestratigráficas da passagem Jurássico-Cretáceo do Nordeste do Brasil. Rev. Bras. Geoc., 17: 81-85.
- Braun, O. P. G. 1969. Geologia da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil. Rio do Janeiro: PROSPEC S/A - Prospecções Geologia e Aerofotogrametria: Departamento Nacional da Produção Mineral, 23 p.
- Brown, Jr., L. F. & Fischer, W. L. 1980. *Seismic-stratigraphic interpretation and petroleum exploration*. Austin, AAPG, 125p.

- Carvalho, I. S. & Carvalho, M. G. P. 1990. O significado paleoambiental dos conchostráceos da Bacia de Sousa. In: Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, 1, Crato-PE, 1990, SBP. Anais: 329-333.
- Castro, D. L.; Medeiros, W. E.; Jardim de Sá, E. F.; Moreira, J. A. M. 1998. Mapa gravimétrico do Nordeste Setentrional do Brasil e margem continental adjacente: interpretação com base na hipótese de isostasia. *Braz. J. Geophys.* 16 (2/3), 115–131.
- Castro, D. L.; Oliveira, D. C.; Branco, R. M. G. 2007. On the tectonics of the Neocomian Rio do Peixe Basin, NE Brazil: Lessons from gravity, magnetics, and radiometric data. *Journal of South American Earth Sciences* 24, 184-202pp.
- Conceição, J. C. J.; Zalán, P. V. & Wolff, S. 1988. Mecanismo, evolução e cronologia do rift Sul-Atlântico. *Bol. Geoc. Petrobras*, 2: 255-265.
- Córdoba, V. C.; Antunes, A. F.; Jardim de Sá, E. F.; Silva, A. N.; Sousa, D. C.; Lins, F. A. P. L. 2008. Análise estratigráfica e estrutural da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil: integração de dados a partir do levantamento sísmico pioneiro 0295_rio_do_peixe_2d. *Bol. Geoc. Petrobras*, 16: no prelo.
- Costa, P. R. C. 2004. Mapeamento geológico-estrutural da área da serra do Letreiro, a oeste de Jeremoabo (BA): caracterização da tectônica de falhas do Graben do Tucano, na escala de um reservatório de hidrocarbonetos. Monografia de Graduação. UFRN. Natal.
- Da Rosa, A. A. S. & Garcia, A. J. V. 1995. Reanálise da sequência continental pré-rifte na margem norte da Depressão Afro-Brasileira. *Geociências, USP*, 14: 105-120.
- Da Rosa, A. A. S. & Garcia, A. J. V. 2000. Palaeobiogeographic aspects of northeast Brazilian basins during the Berriasian before the break up of Gondwana. *Cretaceous Res.*, 21: 221-239.
- Delgado, I. M.; Souza, J. D.; Silva, L. C.; Silveira Filho, N. C.; Santos, R. A.; Pedreira, A. J.; Guimarães, J. T.; Angelim, L. A. A.; Vasconcelos, A. M.; Gomes, I. P.; Lacerda Filho, J. V.; Valente, C. R.; Perrota, M. M.; Heineck, C. A. 2003. Geotectônica do Escudo Atlântico. In: Bizzi, L. A.; Schobbenhaus,

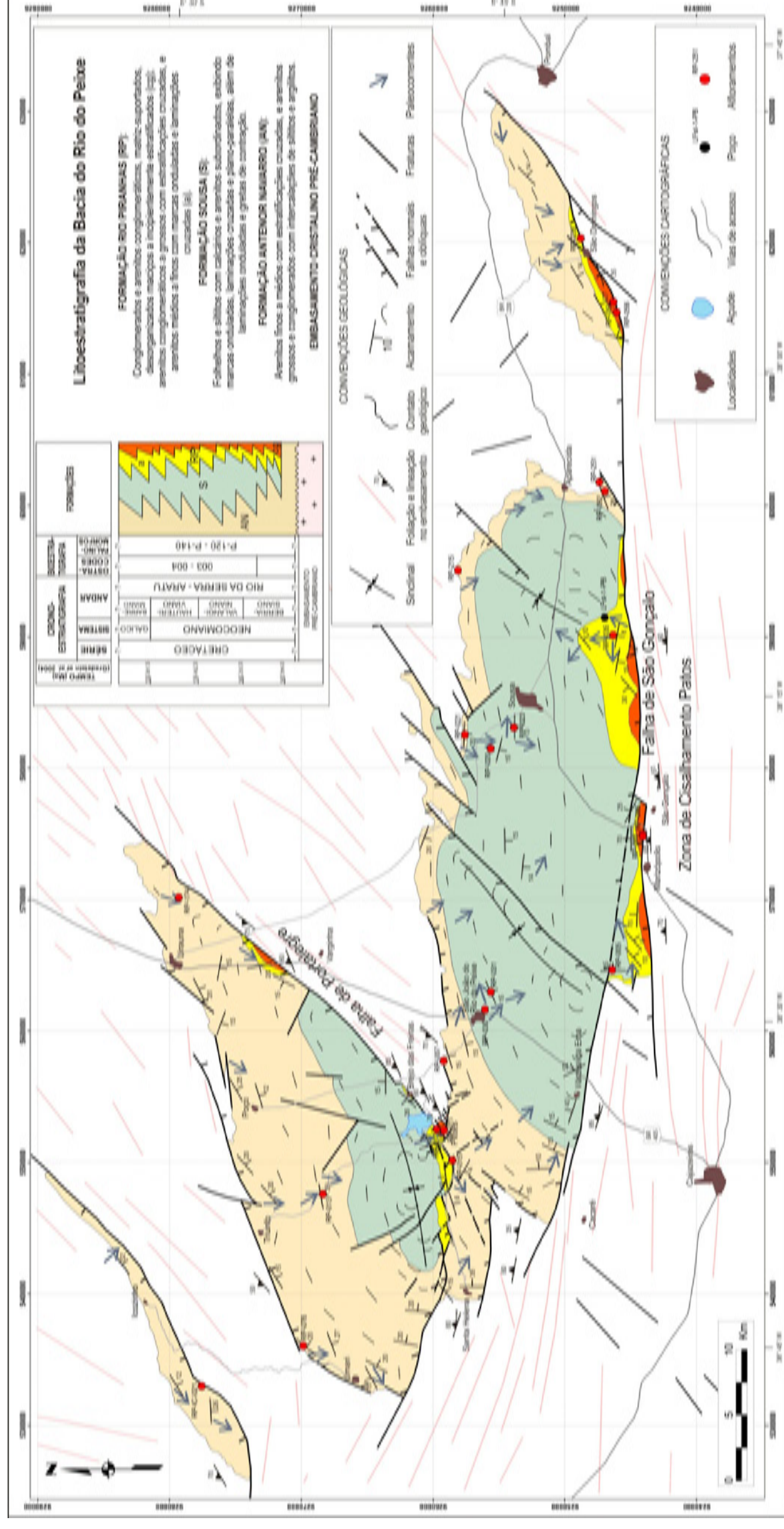
- C.; Vidotti, R. M.; Gonçalves, J. H. (eds.), *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Brasília: 227-334.
- Ferreira, C. A. & Santos, E. J. 2000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Jaguaribe SE, Folha SB.24-Z. Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Escala 1:500.000. Brasília: CPRM.
- Ferreira, T. S. 2004. Caracterização de bandas de deformação em arenitos porosos: estudo de casos nas bacias Potiguar (RN), Sergipe-Alagoas (SE) e Tucano (BA). Monografia de Graduação. UFRN. Natal.
- Fossen, H.; Schultz, R. A.; Shipton, Z. K.; Mair, K. 2007. Deformation bands in sandstones: a review. *Jour. Geol. Soc. London*, 164: 755-769.
- Françolin, J. B. L. 1992. Analyse structurale du bassin du Rio do Peixe (Brésil). Tese de Doutorado, Centre Armoricaïne d'Étude Structurale des Socles, Université de Rennes: 240p.
- Françolin, J. B. L.; Cobbold, P. R.; Szatmari, P. 1994. Faulting in the Early Cretaceous Rio do Peixe Basin (NE Brazil) and its significance for the opening of the Atlantic. *Jour. Struct. Geol.*, 16: 647-661.
- Françolin, J. B. L.; Szatmari, P. 1987. Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem norte brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 196-207.
- Garcia, A. J. V.; Da Rosa, A. A. S.; Goldberg, K. 2005. Paleoenvironmental and paleoclimatic control on early diagenetic processes and fossil record in Cretaceous continental sandstones of Brazil. *Jour. of South American Earth Sciences*, 19: 243-258p.
- Gawthorpe, R. L., and Leeder, M. R. 2000. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins: *Basin Research*, v. 12, p. 195–218.
- Ghignone, J. I., coord. 1986. Estratigrafia, estrutura e possibilidades de petróleo das bacias do Araripe, Iguatu e Rio do Peixe. *Geoquisa, Relat. Técn. inédito*: 32p.
- Gradstein, F. M.; Ogg, J. G.; Smith, A. G. 2004. *A geologic timescale*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. P. 610.
- Jardim de Sá, E. F. 2006 (Cap. 11). *A Evolução Geodinâmica e Termotectônica Cenozóica da Província Borborema: Discussão Final, Implicações e Alguns*

- Temas para Continuidade. *In*: Galindo, A. C. (coord.) *et al.*, Projeto Cronoboro: Distribuição dos Sedimentos Cenozóicos nas Bacias Pernambuco-Paraíba, Potiguar e Ceará, como Função da Epirogenia Cenozóica da Província Borborema. Relatório Final. Convênio FINEP / CTPETRO / PETROBRAS / FUNPEC / UFRN-PPGG. Vol. 1, Texto, Anexos e Mapas.
- Jardim de Sá, E. F.; Antunes, A. F.; Córdoba, V. C.; Sousa, D. C. 2007. Sedimentação pré e sinrifte: critérios e exemplos nas bacias cretáceas do Nordeste do Brasil. XI Simp. Nac. Estudos Tectônicos, Anais, SBG, Natal: 52-53.
- Kuchle, J.; Holz, M.; Scherer, C. M. S.; Fernandes, F.; Bedregal, R. P. 2007. Mapeamento Estratigráfico de Bacias Rifte a partir de padrões de empilhamento e seus significados genéticos. 4º PDPETRO - ABPG, Campinas, SP.
- Lima Filho, M. L. 1991. Evolução tectono-sedimentar da Bacia do Rio do Peixe - PB. Dissertação de Mestrado. UFPE. Recife.
- Lima, M. R.; Coelho, M. P. C. A. 1987. Estudo palinológico da sondagem estratigráfica da Lagoa do Forno, Bacia do Rio do Peixe, Cretáceo do Nordeste do Brasil. Boletim do Instituto de Geociências - USP, Série Científica 18, p. 67-83.
- Mabesoone, J. M. & Campanha, V. A. 1974. Caracterização estratigráfica dos grupos Rio do Peixe e Iguatu. Rev. Estudos Sediment., UFRN, Museu Câmara Cascudo, 3/4: 21-41.
- Matos, R. M. D. 1992. The Northeast Brazilian rift system. *Tectonics*, 11: 766-791.
- Matos, R. M. D. 1999. History of the Northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break-up between Brazil and West Africa. *In*: Cameron, N. R.; Bate, R. H.; Clure, V. S. (eds.), *The Oil and Gas Habitats of the South Atlantic*. Geol. Soc., London, Spec. Publ., 153: 55-73.
- Matos, R. M. D. 2000. Tectonic evolution of the Equatorial South Atlantic. *In*: Mohriak, W. & Talwani, M. (eds.), *Atlantic Rifts and Continental Margins*. Geophysical Monograph, 115: 331-354.

- Medeiros, V. C. 2004. Evolução geodinâmica e condicionamento estrutural dos terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, Domínio da Zona Transversal, NE do Brasil. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 200p.
- Mendonça Filho, J. G.; Carvalho, I. S.; Azevedo, D. A. 2006. Aspectos geoquímicos do óleo da Bacia de Sousa (Cretáceo Inferior), Nordeste do Brasil: contexto geológico. São Paulo, Geociências, UNESP, 25: 91-98.
- Miall, A. D. 1985. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Science Reviews*, 261-308p.
- Mitchum R. M., Jr., Vail P. R., Sangree J. B. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 6: stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: C.E. Payton (Ed.). *Seismic stratigraphy: Applications to hydrocarbon exploration*. AAPG, Memoir # 26, p. 117-133.
- Nogueira, F. C. C.; Oliveira, M. S. & Castro, D. L. 2004. Estudo Magnético e Gravimétrico do Arcabouço Estrutural da Bacia do Rio do Peixe - PB. *Revista de Geologia, UFC. Fortaleza*. Vol. 17, nº 1, 74-87.
- Oliveira, R. G. 2008. Arcabouço Geofísico, Isostasia e causas do Magmatismo Cenozóico da Província Borborema e de sua Margem Continental (Nordeste do Brasil). Tese de Doutorado. UFRN. Natal.
- Ponte, F. C. & Appi, C. J. 1990. Proposta de revisão da coluna litoestratigráfica da Bacia do Araripe. *Anais XXXVI Congr. Bras. Geol., Natal*, 1: 211-226.
- Ponte, F. C.; Hashimoto, A. T.; Dino, R., coords. (1991) *Geologia das bacias sedimentares mesozóicas do interior do Nordeste do Brasil*. PETROBRAS/CENPES/DIVEX/SEBIPE, relat. inédito.
- Ponte, F. C.; Ponte Filho, F. C. 1996. Estrutura geológica e evolução tectônica da Bacia do Araripe. Recife: Departamento Nacional da Produção Mineral (4º e 10º Distritos Regionais): Delegacias do Ministério das Minas e Energia em Pernambuco e Ceará. 68 p.
- Posamentier, H. W. & Walker, R. G. 2006. *Facies Models Revisited*. Society for Sedimentary Geology. Tulsa, Oklahoma, U.S.A.

- Scherer, C. M. S.; Córdoba, V. C.; Sousa, D. C.; Jardim de Sá, E. F. 2007. Associação de fácies típicas de Sistemas Fluviais Distributários na Bacia do Rio do Peixe, NE do Brasil. XXII Simpósio de Geologia do Nordeste, Boletim nº20. Natal-RN.
- Sénant, J.; Popoff, M. 1991. Early Cretaceous extension in northeast Brazil related to the South Atlantic opening. *Tectonophysics*, Amsterdam, v. 198, n. 1, p. 35-46.
- Silva, R. P.; Borghi, L.; Carvalho, I. S.; Idaécio, F. 2008. Laminações microbianas e fácies sedimentares da Formação Sousa (Bacia de Sousa, PB). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 44. Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia. p.124.
- Sousa, D. C.; Córdoba, V. C.; Jardim de Sá, E. F.; Scherer, C. M. S.; Antunes, A. F.; Silva, A. N.; Andrade, P. R. O. 2007. Arquitetura deposicional da Bacia do Rio do Peixe. XXII Simpósio de Geologia do Nordeste, Boletim nº 20. Natal-RN.
- Srivastava, N. K. & Carvalho, I. S. 2004. Bacias do Rio do Peixe. Fundação Paleontológica Phoenix. Aracaju-SE. Informativo nº 71, p. 4.
- Szatmari, P.; Françolin, J. B. L.; Zanotto, O.; Wolff, S. 1987. Evolução tectônica da margem equatorial brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 17, p. 180-188.
- Teichert, C. 1958. Concepts of facies: *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, v. 42, p. 2718–2744.
- Tinoco, I. M.; Katoo, I. 1975. Conchostráceos da Formação Sousa, Bacia do Rio do Peixe, Estado da Paraíba. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 7. Fortaleza/CE. p.135-147.
- Valença, L. M. M.; Neumann, V. H.; Mabelsoone, J. M. 2003. An overview on Callonvian-Cenomanian intracratonic basins of Northeast Brazil: Onshore stratigraphic record of the opening of the southern Atlantic. *Geologica Acta*, 1: 261-275p.

ANEXO



Anexo 1: Mapa geológico da Bacia do Rio do Peixe com a localização dos afloramentos citados na dissertação.