



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

GRAVIMETRIA E SENSORIAMENTO REMOTO: UMA
APLICAÇÃO AO ESTUDO DA TECTÔNICA RECENTE
ENTRE MACAU E SÃO BENTO DO NORTE (RN)

Autor:

EUGÊNIO PACELLI DANTAS

Orientador:

Dr. David Lopes de Castro

Co-orientador:

Prof. Dr. Emanuel Ferraz Jardim de Sá

Dissertação nº 06/ PPGG

Natal - RN, outubro - 1998



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

GRAVIMETRIA E SENSORIAMENTO REMOTO: UMA APLICAÇÃO AO ESTUDO DA TECTÔNICA RECENTE ENTRE MACAU E SÃO BENTO DO NORTE (RN)

Autor:
EUGÊNIO PACELLI DANTAS

Dissertação de Mestrado apresentada em 27 de outubro de 1998, para obtenção do título de Mestre em Geofísica pelo Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN.

Comissão Examinadora:
Dr. DAVID LOPES DE CASTRO (Orientador)
Prof. Dr. EMANUEL FERRAZ JARDIM DE SÁ (UFRN)
Dr. RENATO MARCOS DARROS DE MATOS (PETROBRAS)

Natal - RN, outubro - 1998

Divisão de Serviços Técnicos
Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Dantas, Eugênio Pacelli.

Gravimetria e sensoriamento remoto : uma aplicação ao estudo da tectônica recente entre Macau e São Bento do Norte (RN) / Eugênio Pacelli Dantas. – Natal, RN, 1998.

97 f. : il.

Orientador: David Lopes de Castro.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica.

1. Gravimetria – Rio Grande do Norte – Dissertação. 2. Sensoriamento remoto – Rio Grande do Norte – Dissertação. 3. Rio Grande do Norte – Análise topográfica – Dissertação. 4. – Dissertação. I. Castro, David Lopes de. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 543.21(813.2)(043.2)



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Ciências Exatas e da Terra

***Programa de Pesquisa e Pós-Graduação
em Geodinâmica e Geofísica - PPGG***

PARECER DA BANCA EXAMINADORA
DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO ALUNO

EUGÊNIO PACELLI DANTAS

O mestrando fez uma clara e consistente apresentação da sua Dissertação de Mestrado, utilizando corretamente o tempo previsto para a apresentação. O mestrando demonstrou um bom domínio do problema de pesquisa sob análise e da metodologia empregada, em especial o tratamento digital de imagens. Na arguição o aluno mostrou uma boa evolução dos seus conhecimentos, respondendo de forma satisfatória as questões formuladas pelos examinadores. O texto é conciso, apresentando de forma clara e objetiva os dados, os métodos utilizados e as interpretações e conclusões decorrentes, com destaque a excelência das suas ilustrações. De acordo com a análise de todos os elementos, a Banca avaliou que os resultados apresentados satisfazem plenamente os requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Geodinâmica, e dado a boa qualidade deste trabalho, o aluno foi aprovado com conceito A.

Natal, 27 de outubro de 1998


Prof. Dr. David Lopes de Castro
Orientador e Presidente da Banca (DG/UFC)

Dr. Renato Marcos Darros de Matos
Examinadora Externo (PETROBRAS)


Prof. Dr. Emanuel Ferraz Jardim de Sá
Examinador Interno (PPGG/UFRN)


Ata de Realização da Defesa de Dissertação de Mestrado do aluno Eugênio Pacelli Dantas do Curso de Mestrado do Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

1 Aos vinte e sete dias do mês de outubro de mil novecentos e noventa e oito (1998), às 15
2 horas, instalou-se a Banca Examinadora da Dissertação de Mestrado do aluno Eugênio Pacelli
3 Dantas, no Anfiteatro A do Centro de Ciências Exatas e da Terra. A Banca Examinadora foi
4 composta pelos professores: Dr. Renato Marcos Darros de Matos - examinador externo
5 (PETROBRAS); Dr. Emanuel Ferraz Jardim de Sá - examinador interno e co-orientador
6 (DG/UFRN); Dr. David Lopes de Castro - orientador e examinador externo (DG/UFC), sob a
7 presidência deste último. O Coordenador do Programa, Prof. Dr. Emanuel Ferraz Jardim de
8 Sá, abriu a sessão convocando o Dr. David Lopes de Castro, o qual deu início aos trabalhos,
9 explicando o procedimento a ser adotado. Em seguida, foi solicitado ao candidato que iniciasse
10 a apresentação da dissertação, sob o título "Gravimetria e sensoriamento remoto: uma
11 aplicação ao estudo da tectônica recente entre Macau e São Bento do Norte (RN)", para a
12 qual foi concedido prazo de quarenta e cinco (45) minutos. Concluída a exposição do
13 candidato, o senhor presidente passou a palavra ao examinador externo, Dr. Renato Marcos
14 Darros de Matos, para argüir o candidato, e em seguida ao examinador interno, Dr. Emanuel
15 Ferraz Jardim de Sá. O presidente da Banca fez então suas observações acerca da natureza do
16 trabalho em julgamento. O candidato foi julgado APROVADO conforme as normas vigentes
17 na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, tendo recebido o conceito A.


Prof. Dr. DAVID LOPES DE CASTRO
Orientador e Presidente da Banca (DG/UFCE)


Prof. Dr. RENATO MARCOS DARROS DE MATOS
Examinador externo (PETROBRAS)


Prof. Dr. EMANUEL FERRAZ JARDIM DE SÁ
Examinador interno (PPGG/UFRN)


EUGÊNIO PACELLI DANTAS
Mestrando

Um dia...

Bem distante no futuro...

**Olharei para trás e ainda terei
a certeza de que valeu a pena
estudar.**

**A todos que compartilham
desse amor.**

Eugênio Pacelli Dantas

Mil obstáculos podem ser superados! Porém, não havendo um grande amor onde se apoiar, em cada trecho do caminho, jamais saberemos o verdadeiro sabor de uma vitória.

A Euriane, com todo amor.

Eugênio Pacelli Dantas

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
I. INTRODUÇÃO	01
II. A BACIA POTIGUAR	04
2.1. Estratigrafia.....	04
2.2. Modelos Geodinâmicos	09
2.2.1. A Evolução Mesozóica	09
2.2.2. A Evolução Cenozóica	12
2.3. Sistemas de Falhas	21
2.3.1. Sistema de Falhas de Carnaubais (SFC).....	22
2.3.2. Sistema de Falhas de Afonso Bezerra (SFAB).....	23
III. GRAVIMETRIA	26
3.1. Processamento dos dados gravimétricos	27
3.1.1. Ajuste polinomial robusto	27
3.1.2. Sombreamento de relevo gravimétrico	30
3.2. Interpretação qualitativa dos mapas gravimétricos	31
3.2.1. Mapas de anomalias gravimétricas.....	31
3.2.2. Sombreamento do mapa de anomalias residuais	34
IV. SENSORIAMENTO REMOTO E CORRELAÇÃO COM DADOS DE TERRENO	42
4.1. O sombreamento de imagens digitais (SID).....	43
4.2. As composições coloridas (RGB).....	44
4.3. Análise dos lineamentos e correlação estrutural.....	44
4.3.1. Os lineamentos NE	52
4.3.2. Os lineamentos NW e N-S.....	57

V. TOPOGRAFIA	71
5.1. O traços principais do relevo e da hidrografia.....	72
5.2. Análise dos dados topográficos	76
VI. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	84
VII. REFERÊNCIAS	93
ANEXO 01: Mapa geológico da área	

AGRADECIMENTOS

No decorrer deste trabalho, diversos foram os préstimos recebidos, assim como a participação e o auxílio de instituições de pesquisa. Impossibilitado de citar a todos, sob pena de cometer alguma injustiça, a forma mais democrática encontrada de homenageá-los, foi através do pequeno soneto abaixo.

**E brotou a semente...
Concebida com trabalho, emoção,
Pesquisa e dedicação.
Resultado de um amor latente.**

**Meu coração, que não mente,
Lembra com afeição,
E, a todos, agradece a colaboração!
Da mais direta a mais incipiente.**

**Mas, como agradecer a tanta contribuição?
Citar todos de forma independente?
Não! Dessa forma não cabe não!**

**Assim: Obrigado! Obrigado de montão!
Agradeço a toda a gente,
Que colaborou nesta dissertação!**

Em especial, minha família (pais, irmãos e esposa - Euriane Dantas), David Lopes de Castro (Orientador), Emanuel Ferraz Jardim de Sá (UFRN - PPGG), Renato Marcos Darros de Matos (PETROBRAS), Luciano, Maria Helena, Rielva, Rosilene, Silvana e demais amigos do mestrado, Walter Eugênio de Medeiros (UFRN - DFTE), Venerando Amaro e Helenice Vital (e a todos do DG - UFRN), Marcos e Debora (lembrando amigos e colegas do cotidiano), Aluizio e Marcos Madruga (em nome dos amigos do NCC - UFRN), Além das instituições CNPq, UFRN e PETROBRAS.

RESUMO

Esta dissertação aborda uma ampla área na porção central da Bacia Potiguar, abrangendo as cidades de Macau, São Bento do Norte (respectivamente, extremos oeste e leste) e Pendências (sul), no Estado do Rio Grande do Norte. Pesquisas anteriores (Hackspacher *et al.* 1985, p. ex.) mostraram a existência de uma rede de lineamentos nessa região, orientados segundo as direções NE-SW (Sistema de Falhas de Carnaubais - SFC) e NW-SE (Sistema de Falhas de Afonso Bezerra - SFAB). Neste trabalho, foi aprimorada a cartografia desses lineamentos e caracterizadas as diferentes etapas de movimentação e reativações recentes. Para tanto, foi utilizado um conjunto de técnicas envolvendo sensoriamento remoto, gravimetria e análise topográfica, com suporte de dados geológicos obtidos no terreno e análise do material bibliográfico disponível.

A estrutura profunda da bacia, incluindo as falhas mais antigas e de maior expressão, foram caracterizadas através da gravimetria. Foram empregadas as técnicas de ajuste polinomial robusto (Beltrão *et al.* 1991) e sombreamento de relevo gravimétrico. A primeira permitiu a separação das componentes regionais e residuais do campo gravimétrico observado. O mapa de anomalias regionais reflete o afinamento crustal em direção ao oceano, no contexto da margem continental passiva, bem como ao longo do eixo NE da bacia. Por outro lado, o mapa de anomalias residuais reflete a estruturação intracrustal da bacia, principalmente na sua parte emersa.

No que diz respeito à metodologia de sensoriamento remoto (SR), foram usadas as técnicas de sombreamento de imagens digitais (SID) e de composições coloridas (RGB). Estas técnicas realçaram as feições do terreno, tendo sido especialmente útil para a caracterização do SFC, cuja expressão superficial é mais sutil. Foi aprimorado o mapeamento dos lineamentos NW, com o reconhecimento adicional de fraturas com direção N-S. Por fim, a análise topográfica delineou o entalhamento dos vales fluviais e a integração dos resultados alcançados permitiu identificar o controle que a reativação das estruturas exerceram sobre as diferentes unidades litoestratigráficas cenozóicas.

O quadro geológico-estrutural identificado na área de estudo abrange um período que vai desde o final do Precambriano aos dias atuais. Esta história geológica pode ser assim resumida:

- As estruturas mais antigas do SFAB teria se formado no final do Precambriano ao Cambriano, como falhas tardi-brasilianas controlando a intrusão de diques de granitos tardios, próximo a Pedro Avelino (RN);

- No Cretáceo inferior, durante a abertura do Rifte Potiguar, o SFC foi implantado consoante a uma extensão principal WNW-SSE (Matos 1992), enquanto o SFAB deve ter se comportado como falhas de transferência;

- Durante o Terciário, uma importante reativação atingiu ambos os sistemas. Uma compressão N-S teria provocado transcorrência dextral no SFAB e sinistral no SFC. O mecanismo que deu origem a esta compressão ainda não está totalmente esclarecido, sendo, tentativamente, associado a um domo térmico delineado pelas ocorrências de vulcânicas básicas alcalinas da Formação Macau. Neste evento, falhas extensionais favoreceram a ocorrência de um depocentro com orientação N-S, propiciando o desenvolvimento de fácies marinhas na região limitada pelos sistemas de falhas de Afonso Bezerra e Carnaubais, como indicado pelas formações Tibau-Guamaré, em ambiente costeiro, lateralmente associada aos clásticos continentais da Formação Barreiras.

Finalmente, durante o Quaternário, uma nova reativação afetou ambos os sistemas, permitindo a preservação de litotipos das formações Tibau e Barreiras, além das cascalheiras do Rio Açu e sedimentos costeiros, em baixos estruturais. Nesse período, quando ambos os sistemas estiveram subordinados a uma compressão WNW-SSE, o SFC apresentou um movimento oblíquo normal-dextral, enquanto o SFAB obedeceu a um movimento normal com componente sinistral. Esse sistema de tensões é, hipoteticamente, relacionado à composição de um par cisalhante dextral nas zonas transformantes ao longo da margem equatorial brasileira (atribuído a taxas de expansão distintas em diferentes segmentos da cadeia Meso-Atlântica), com a tensão compressiva E-W (Assumpção 1992) gerada pela expansão da cadeia.

ABSTRACT

This dissertation deals with a large area in the central part of the Potiguar basin, including the villages of Macau, São Bento do Norte and Pendências, in the State of Rio Grande do Norte. Previous research (e.g., Hackspacher *et al.* 1985) identified different lineament sets in this region, trending NE-SW (Carnaubais Fault System - SFC) and NW-SE (Afonso Bezerra Fault System - SFAB). The present work improved the cartography of these lineaments, characterizing different movement episodes and recent reactivations. The adopted approach integrated data obtained by remote sensing, gravimetry and topographic analysis techniques, supported by field-collected and bibliographic information.

The deep structure of the basin, including the older and larger faults, were characterized by means of the gravimetric data, employing techniques such as robust polynomial fit (Beltrão *et al.* 1991) and shading of the gravimetric relief. The former one allowed the separation of regional and residual components of the gravimetric field. The regional anomalies map displays the crustal thinning effect towards the ocean, typical of passive continental margins, as well as along the axis of the onshore Potiguar Basin. On the other hand, the map of the residual gravimetric anomalies reflects the basin structure, specially inland.

The remote sensing analysis utilized digital techniques such as shading digital images (SID) and colour compositions (RGB). These techniques highlight terrain features and were specially useful to characterize the SFC, which lacks a strong surface expression. The imaging of NW trending lineaments was improved, and N-S trending fractures were also recognized. Topographic analysis, especially emphasizing drainage anomalies, integrated with structural information from outcrops, were useful to identify the reactivation of different fault sets and their control upon different cenozoic lithostratigraphic units.

The geological-structural framework identified in the area encompasses events ranging in age from the end of the Precambrian to the present day. This geological history may be summarized as follows:

- The oldest SFAB structures were formed between the end of Precambrian and the Cambrian period, as indicated by late-Brasiliano faults that control the intrusion of late granite dykes near Pedro Avelino (RN);

- In the early Cretaceous, during the opening of the Potiguar Rift, the SFC was developed following the main WNW-ENE extension direction (Matos 1992), while the SFAB probably behaved as transfer faults;

- During the Tertiary, an important reactivation affected both fault systems. A N-S compression induced dextral strike-slip movements along the SFAB and a sinistral component in the SFC. The mechanism that originated this compression is not perfectly understood, being tentatively related to a thermal doming associated with the alkaline basic volcanics of the Macau Formation. In this event, N-S trending extensional faults produced subsidence and allowed the deposition of marine facies along the region delimited by the Afonso Bezerra and the Carnaubais fault systems, as indicated by the the Tibau-Guamaré formations of coastal environment occurring, as lateral equivalents of the Barreiras Formation continental clastics.

Finally, during the Quaternary, a younger event reactivated once again both fault systems, partially with a major influence in the outcrop patterns of the Tibau and Barreiras formations, besides the Açu river gravel deposits and coastal sediments, all of them mostly preserved in down-faulted blocks. During this time interval, when both fault systems were subjected to a WNW-ESE compression, the SFC displays an oblique, normal-dextral movement, while the SFAB has a major normal movement conjugated with a minor sinistral one. This stress regime is hypothetically related to a composition between a dextral shear couple due to the transform zones along the Brazilian equatorial margin (ascribed to distinct spreading rates in different segments of the Mid-Atlantic ridge), with an E-W compression (Assumpção 1992) generated by the spreading of the ridge.

CAPÍTULO I

I. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, diversos autores (Hackspacher *et al.* 1985; Fonseca 1996, Dantas *et al.* 1997, e outros) estudaram a área norte do Estado do Rio Grande do Norte, demonstrando a existência de eventos neotectônicos. Um dos objetivos buscados foi a identificação de feições superficiais que pudessem caracterizar esses eventos deformacionais. Todavia, vários aspectos ainda necessitam de uma melhor compreensão, tais como a cartografia das principais descontinuidades, a caracterização de movimentos e reativação de falhas antigas, bem como a própria datação dessas reativações.

No intuito de contribuir para o equacionamento desses problemas, foi realizada uma pesquisa em uma área do litoral norte do Estado do Rio Grande do Norte, limitada pelos paralelos 04°51'00" S e 05°45'00" S e pelos meridianos 36°00'00" W e 37°00'00" W (Figura 1.1). As condições da área, tais como: (a) diferentes unidades litológicas com variadas respostas espectrais, e (b) falhas de grande rejeito normal, como a Falha de Carnaubais, colocando, lado a lado, rochas de densidades diferentes, dentre outras, foram favoráveis à aplicação das técnicas utilizadas nesta dissertação (processamento de imagens digitais, tratamento de dados gravimétricos e análise topográfica, controlados por dados de terrenos). Nesta região encontram-se dois grandes sistemas de falhas (Sistema de Falhas de Carnaubais - SFC e Sistema de Falhas de Afonso Bezerra - SFAB), que mostram indícios de reativações recentes. A área está situada na Bacia Potiguar, uma região produtora de óleo e gás natural. Deste modo, é importante investigar a ocorrência de eventos neotectônicos, visto que aquelas substâncias estão sujeitas à migração/remobilização a partir de fraturas geradas ou reativadas, com importantes implicações na exploração de hidrocarbonetos, justificando o interesse da PETROBRAS no desenvolvimento deste trabalho.

A aplicação do sensoriamento remoto (SR) visou observar feições superficiais da área (morfologia, drenagem), tentando caracterizar o reflexo da estruturação tectônica e sua relação com a distribuição das unidades lito-estratigráficas. Para este fim, empregou-

se o sombreamento de imagens digitais (SID), que realça os lineamentos e a composição colorida de bandas espectrais, o que permite a distinção de diferentes litotipos. Por sua vez, o estudo dos dados gravimétricos objetivou o mapeamento de grandes feições de subsuperfície, visando uma posterior correlação com seus prováveis reflexos em superfície.

Levantamentos geológicos de campo adicionaram dados para integração com resultados obtidos nas técnicas acima descritas, permitindo ainda o reconhecimento de feições relacionadas aos eventos tectônicos recentes.

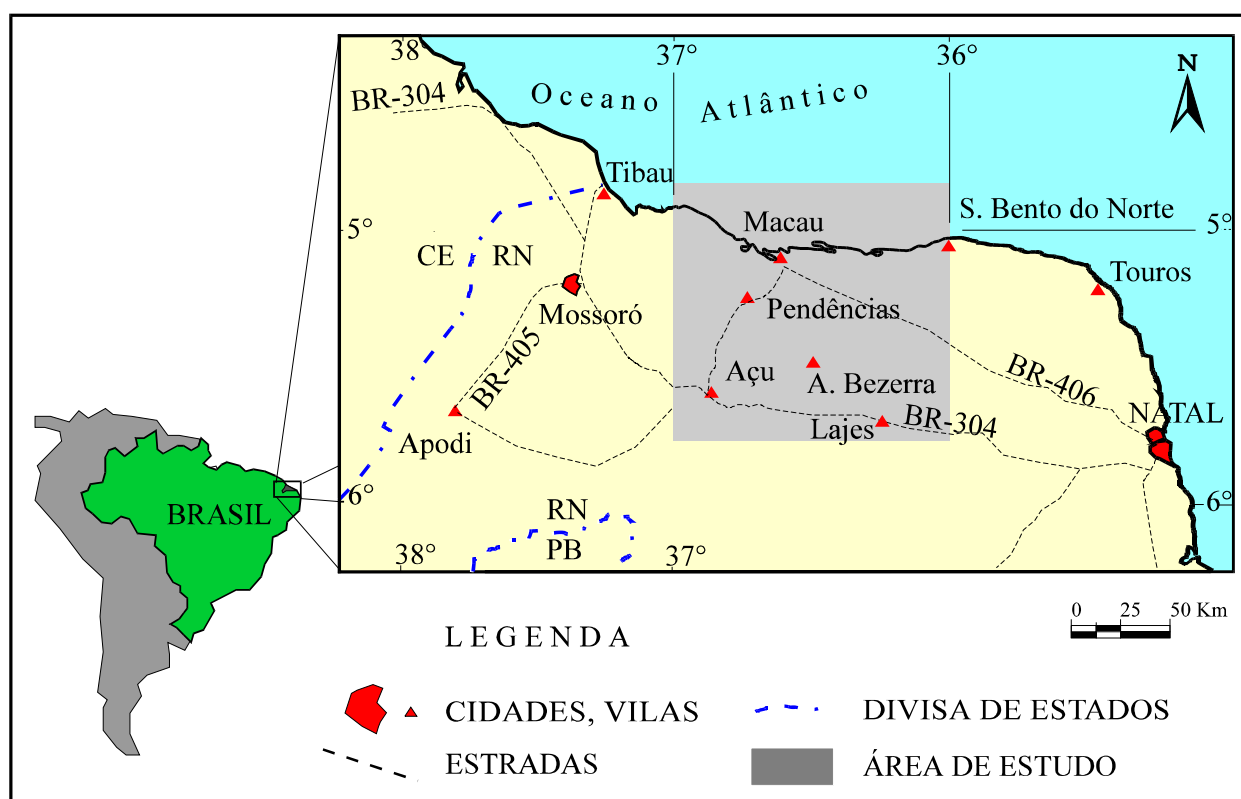


Figura 1.1. Localização da área de estudo.

Em suma, o Capítulo 2, apresenta a Bacia Potiguar, seu contexto tectônico, sua estratigrafia, a tectônica meso-cenozóica e os sistemas de falhas de Carnaubais e Afonso Bezerra, respectivamente SFC e SFAB. O Capítulo 3 descreve os procedimentos empregados no tratamento dos dados gravimétricos (ajuste polinomial robusto e sombreamento de relevo gravimétrico), apresentando e discutindo as respostas obtidas. O Capítulo 4 apresenta os produtos digitais obtidos com as técnicas de sombreamento de

imagens digitais, composições coloridas (RGB) e filtragem das frequências espaciais, as principais ferramentas aplicadas neste trabalho. Neste capítulo, foram usados principalmente, dados de terreno para, além de realizar a averiguação das respostas obtidas com o sensoriamento remoto (SR), fornecer um significado geológico para a estruturação observada. Uma análise dos dados topográficos disponíveis para a região foi realizada também com base na técnica de ajuste polinomial robusto, sendo descrita no Capítulo 5. As conclusões e sugestões constituem o Capítulo 6 e as referências aos trabalhos citados nesta dissertação finalizam o texto.

CAPÍTULO II

II. A BACIA POTIGUAR

A área de estudos encontra-se situada no contexto geológico da Bacia Potiguar, extremo Nordeste do Brasil, nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Esta bacia abrange uma área de 48.000 km², sendo 21.500 km² em terra e 26.500 km² até a isóbata de -2000 m, estando implantada na Província Borborema, de Almeida *et al.* (1977). À semelhança de outras, como as bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá, Rio do Peixe e Sergipe-Alagoas, a Bacia Potiguar faz parte do Sistema de Rifte do Nordeste Brasileiro (Matos 1992a). O embasamento da Bacia Potiguar foi caracterizado por Jardim de Sá (1984, 1994), sendo constituído por diversas faixas de rochas supracrustais e domínios gnaíssico-migmatíticos, com *trend* NE, interceptadas a sul pela Zona de Cisalhamento Patos, com direção E-W. A partir dos trabalhos de diversos autores (Bertani *et al.* 1987; Cremonini *et al.* 1996; entre outros), pode ser traçada uma configuração geométrica da estrutura da bacia, a qual seria constituída por um conjunto de *graben's* assimétricos (Apodi, Umbuzeiro, Guamaré e Boa Vista) de direção NE, levemente oblíquos aos principais lineamentos do embasamento cristalino a sul da bacia (Figura 2.1). Altos do embasamento separam os principais *graben's* da bacia. Esses altos consistem de cristas alongadas formadas por gnaisses, migmatitos ou xistos, soerguidos por falhas normais (Macau, Serra do Carmo e Quixaba). A Bacia Potiguar está limitada a oeste, com a Bacia do Ceará, pelo Alto de Fortaleza, e a leste, com a Bacia Pernambuco-Paraíba, pelo Alto de Touros (Araripe e Feijó 1994). A sul, o limite é constituído pela discordância com o embasamento cristalino, enquanto a norte e leste, pela cota batimétrica de -2000 m.

2.1. ESTRATIGRAFIA

O processo de formação da Bacia Potiguar pode ser dividido em dois estágios evolutivos (Souza 1982; Silva 1991; Oliveira 1993; Araripe e Feijó 1994; entre outros), como mostra a coluna crono-estratigráfica da Figura 2.2. Os dois estágios evolutivos são descritos a seguir:

(1) O **Estágio Rifte** (subsidiência tectônica) é composto por sedimentos da Formação Pendências, de idade Neocomiana a Eoaptiana (Cretáceo inferior), representados por conglomerados de escarpa de falha, além de siltitos e folhelhos depositados em sistema lacustrino, os quais foram, progressivamente, sobrepostos por arenitos deltaicos e fluviais. Estes sedimentos atingem uma espessura máxima em torno de 6000 m, tendo contato superior com a Formação Alagamar e inferior com o embasamento cristalino. Na porção submersa da bacia seu contato superior é com a Formação Pescada. Esta formação corresponde a uma cunha de sedimentos encontrada na plataforma continental composta de arenitos com intercalações de folhelhos e siltito depositados em sistema de leques aluviais coalescentes.

(2) O **Estágio Pós-Rifte** (subsidiência termal) iniciou no Albiano. Esta fase pode ser dividida em três seqüências, descritas a seguir:

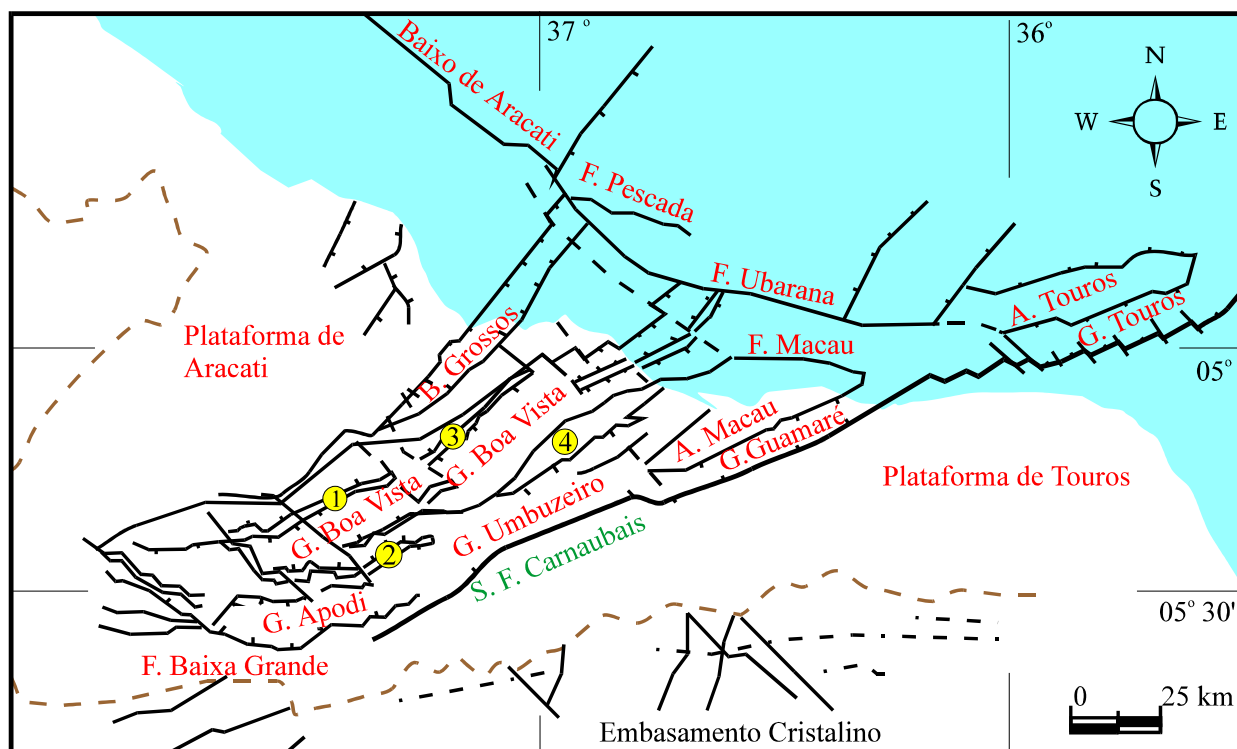


Figura 2.1. Arcabouço estrutural da Bacia Potiguar. (1) Alto de Canudos, (2) Alto de Quixaba, (3) Alto de Mossoró e (4) Alto de Serra do Carmo. Na figura, A corresponde Alto, B Baixo, G a Graben e F a Falha. Modificado de Cremonini *et al.* (1996).

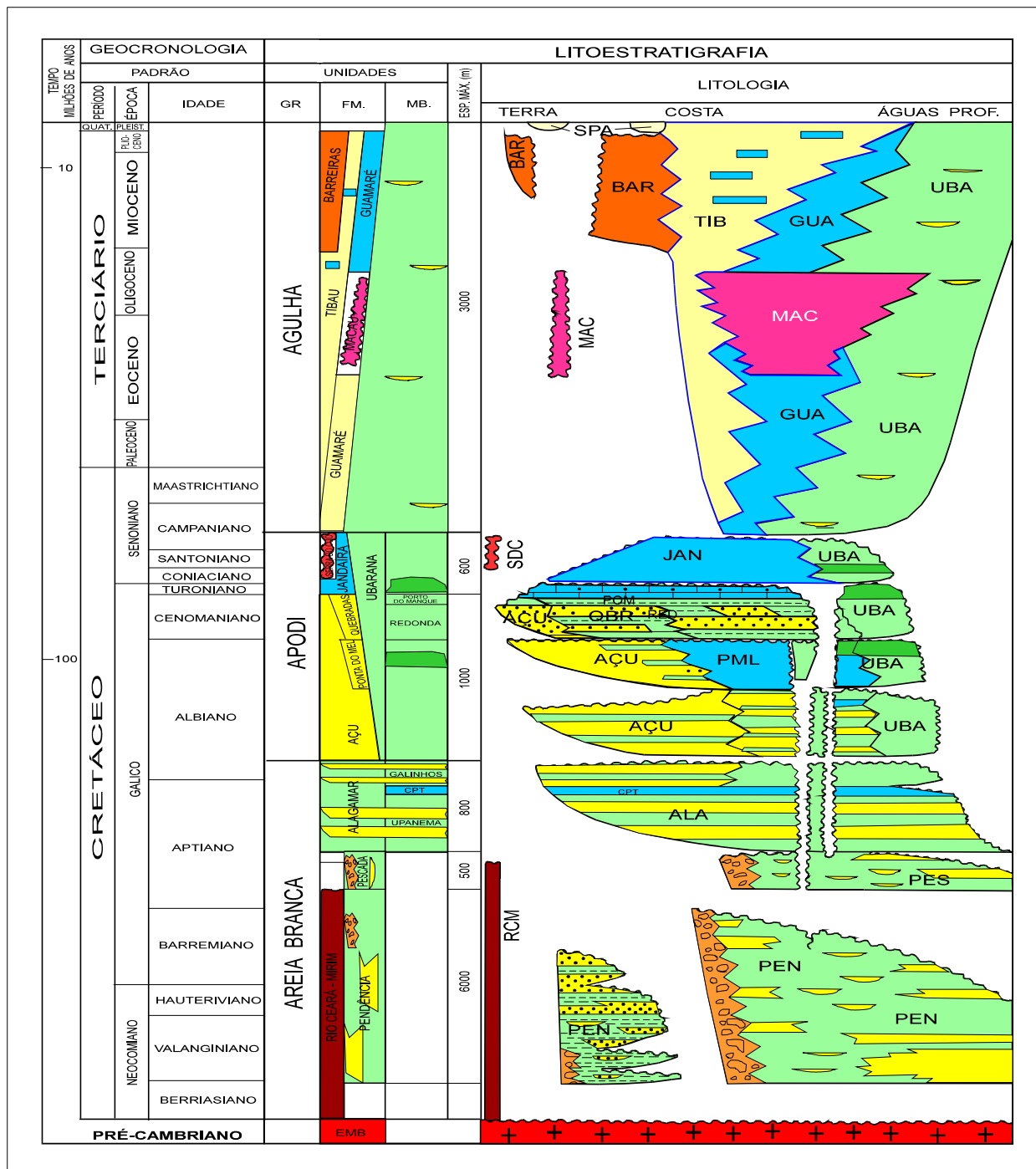


Figura 2.2. Coluna Crono-Estratigráfica da Bacia Potiguar (modificada de Araripe e Feijó 1994).

(a) **Seqüência Transicional** (Neo-Aptiana): foi iniciada com a deposição da Formação Alagamar, que é subdividida em Membro Upanema (arenitos com intercalações de calcários e folhelhos), Camadas Ponta do Tubarão (calcilutito ostracoidal intercalado com folhelho cinza esverdeado) e Membro Galinhos (argilitos). Esta formação atinge em média 800 m de espessura, tendo contato basal discordante, ora com

o embasamento cristalino ora com a Formação Pendências ou com a Formação Pescada. O contato superior é discordante com a Formação Açú, na porção emersa da bacia. Na porção submersa é discordante com a Formação Ubarana e concordante com a Formação Ponta do Mel. O Membro Upanema apresenta uma mudança de sistema fluvial (porção basal) para deltaico lacustre na sua parte superior. O término da deposição lacustre é representado pelas Camadas Ponta do Tubarão. O Membro Galinhos representa um sistema deposicional deltaico com influência marinha.

(b) **Seqüência Flúvio-Marinha Transgressiva** (Albiano-Cenomaniano): iniciou com a deposição da Formação Açú (Figura 2.3), compreendendo conglomerados, arenitos e siltitos e representando depósitos fluviais e deltaico-estuarinos. Em direção ao mar, a Formação Açú grada lateralmente para as formações Ponta do Mel e Ubarana (Membro Quebradas).

A Formação Ponta do Mel é composta por calcarenito oncolítico (basal), arenito fino a médio e calcilutito intercalado com folhelho, além de calcarenito com bioclastos na parte superior. Esta formação ocorre somente na porção submarina da bacia, e sua maior espessura observada é de cerca de 650 m. Lateralmente esta unidade grada para a Formação Açú. Seu contato superior com a Formação Ubarana ora é discordante (erosivo), ora é concordante. O sistema deposicional varia de plataforma rasa (calcarenitos) até mar aberto (calcilutitos).

A Formação Ubarana (Albiano inferior aos dias atuais) é composta por folhelhos, siltitos, calcilutitos, arenitos, diamictitos, conglomerados e, às vezes, olistolitos. Pertencem a esta formação pelitos (folhelhos cinza) intercalados com arenitos, designados de Membro Quebradas, os quais separam a Formação Ponta do Mel da Formação Jandaíra.

A Formação Jandaíra (Turoniano a Campaniano inferior) é composta por calcarenitos com bioclastos e calcilutitos, depositados em planície de maré, laguna rasa, plataforma rasa e mar aberto. Esta formação atinge sua espessura máxima em torno de 600 m. Nas porções leste e oeste da bacia essa espessura torna-se menor.

(c) **Seqüência Flúvio-Marinha Regressiva** (Neocampaniano ao Holoceno): iniciou com a deposição da Formação Tibau, composta por arenitos grossos

de leques costeiros. Esta formação tem contato inferior discordante com a Formação Jandaíra e, na porção submersa da bacia, concordante com a Formação Guimarães. O contato superior com a Formação Barreiras e sedimentos recentes é de difícil definição. Esta seqüência também envolve a deposição da Formação Guimarães, incluindo calcarenitos e calcilitos de sistema de plataforma e talude carbonáticos. Esses sedimentos podem ocorrer intercalados às formações Tibau, Macau e Ubarana, tendo contatos gradacionais ou discordantes em suas porções superior e inferior.

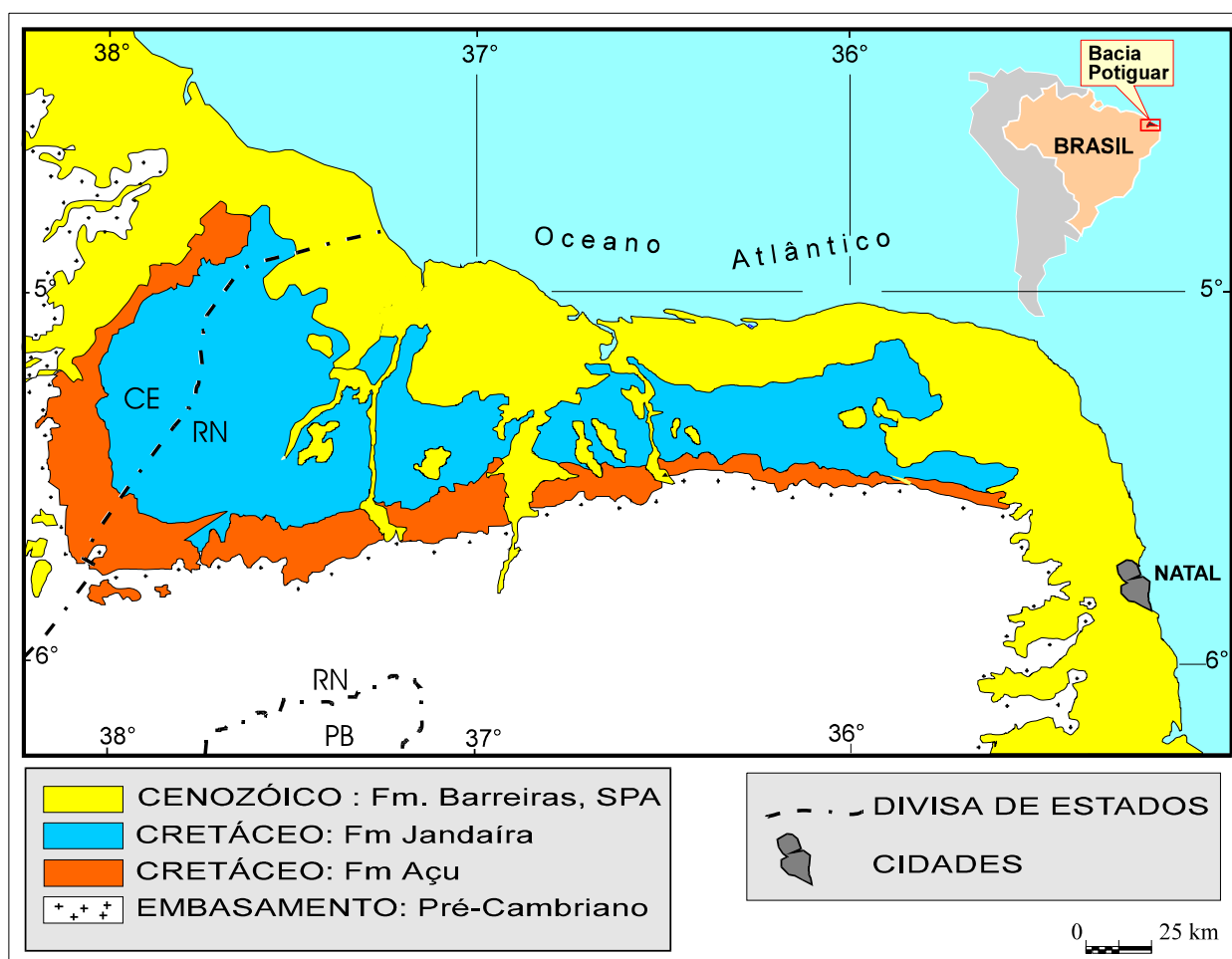


Figura 2.3. Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar. SPA, sedimentos de praia e aluviais.

Segundo os autores acima citados, três eventos de vulcanismo ocorrem associados à evolução da bacia:

(a) Rio Ceará-Mirim: contemporâneo à instalação do rifte (Jurássico a Cretáceo inferior), é composto por diabásios de afinidade toleítica, aflorantes na borda da bacia, na

forma de enxames de diques E-W. Algumas vezes encontram-se intercalados na Formação Pendência;

(b) Serra do Cuó: Santoniano a Campaniano, composto por soleiras básicas que se intercalam na Formação Açú;

(c) Macau: Oligoceno ao Mioceno (Terciário), incluindo derrames, *necks e plugs* de basaltos e diabásios de afinidade alcalina.

A seqüência estratigráfica da Bacia Potiguar finaliza por sedimentos quaternários (eólicos, aluvionares, *beachrocks*, entre outros) e sedimentos do Grupo Barreiras (arenitos variegados e argilosos de ambiente continental) (Figura 2.3). Segundo Lima *et al.* (1990), o Grupo Barreiras dataria do Plioceno (Terciário) na sua parte superior, enquanto na porção basal estaria intercalado por basaltos de idade Oligo-Miocênica (Formação Macau).

2.2. MODELOS GEODINÂMICOS

Estudos realizados nas últimas décadas na porção norte dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará (Szatimari *et al.* 1987; Françaolin e Szatimari 1987; Matos 1992a e 1992b; Cremonini 1993; Fonseca 1996; Caldas 1996 e 1998; Bezerra *et al.* 1998, entre outros), abrangem um período de tempo que vai do Mesozóico ao Cenozóico, representando a história evolutiva do Atlântico Sul e das bacias marginais, dentre elas, a Bacia Potiguar, na qual encontra-se a área objeto deste estudo. Diversos modelos abordam esta história, permanecendo aspectos ainda não solucionados satisfatoriamente.

2.2.1. A EVOLUÇÃO MESOZÓICA

Para o Mesozóico, dois modelos são bastante difundidos: Françaolin e Szatimari (1987) e Matos (1992b). O primeiro assume uma rotação horária do continente Sul-Americano em relação ao Africano, implicando em compressão e distensão. O segundo admite uma evolução puramente extensional (NW-SE e E-W), possuindo três estágios evolutivos: Sin-Rifte I, II e III (ver também Chang *et al.* 1988).

A hipótese elaborada por Françaolin e Szatimari (1987) parte do pressuposto que uma extensa fratura originada na porção sul do supercontinente Gondwana (Jurássico

superior) teria se propagado para norte (durante o Cretáceo inferior), acompanhando as linhas de fraqueza do substrato, concomitante com um movimento divergente E-W (Figura 2.4a). O afastamento continental teria sido maior a sul, originando um polo de rotação no Nordeste brasileiro (Figura 2.4b). Essa rotação horária, tomando-se como referência o continente sul-americano, impôs movimentos compressivos e distensivos na proximidades do polo, o qual permaneceu neste local durante o Neocomiano. Françaolin e Szatimari (1987) colocam o início da evolução da Bacia Potiguar nesse contexto estrutural, situando os riftes Neocomianos como encaixados e controlados por falhas desenvolvidas devido a esses movimentos. Este polo teria migrado para noroeste, em direção ao litoral do Amapá, durante o Aptiano (Figura 2.4c).

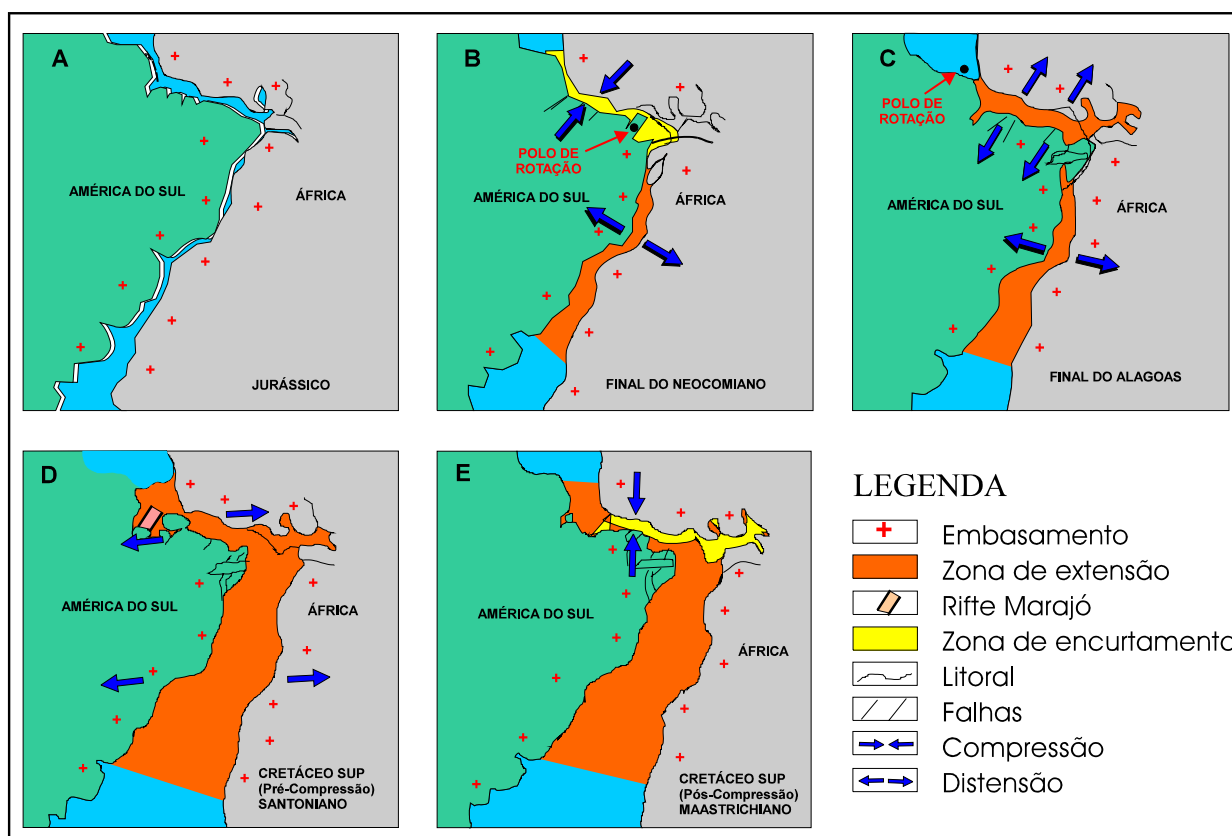


Figura 2.4. Abertura e evolução do Atlântico Sul. (A) Início da separação continental a partir de uma extensa fratura, aproximadamente N-S, no Gondwana; (B) Polo de rotação localizado na região Nordeste do Brasil; (C) Polo de rotação localizado na região Norte do Brasil; (D) Predomínio de movimento transcorrente dextral e (E) evento compressivo de direção N-S. Reproduzido de Françaolin e Szatimari (1987).

Com o rompimento de toda a crosta continental do supercontinente, ao longo da margem atual Sul-Americana (começo do Albiano), teve início a separação E-W entre a

América do Sul e a África. Este fato gerou um cisalhamento lateral dextral (Figura 2.4d) na atual margem equatorial do Brasil, além de marcar o início da sedimentação (Albiano inferior) no extremo norte da costa leste e permitir a entrada do mar que causou a transgressão marinha que atingiu todas as bacias da margem equatorial (Albiano ao Campaniano). A ocorrência de um evento compressivo (após o Campaniano), de direção N-S, pode ser observado na área da Bacia Potiguar. Este evento provocou soerguimento da plataforma carbonática e reativação de numerosas falhas. Françaolin e Szatimari (1987) consideram ser este o último evento deformacional importante ocorrido na margem equatorial (Figura 2.4e).

Apontando inconsistências no modelo de Françaolin e Szatimari (1987), Matos (1992b) desenvolve uma hipótese alternativa sobre a evolução Mesozóica Sul-Americana e, em particular, a origem da Bacia Potiguar. Matos (1992b) afirma que Françaolin e Szatimari (1987) ao basearem seu modelo em rotação de placas rígidas, desconsideraram o fato das placas ainda não estarem definidas geometricamente, o que tornaria improvável qualquer tipo de rotação. Além disso, não existiriam evidências de movimentos transcorrentes nas falhas de direção NE-SW na porção emersa da bacia, como afirmam esses autores. Dessa maneira, a hipótese elaborada por Matos (1992b), baseada no modelo de Chang *et al.* (1988), admite uma evolução puramente extensional, segundo as direções NW-SE e E-W, com três estágios tectônicos: (a) **Fase Sin-Rifte I** (Jurássico superior): formação de bacias rasas a partir do preenchimento de extensas depressões desenvolvidas em estágios iniciais distensivos, (b) **Fase Sin-Rifte II** (Neocomiano inferior): desenvolvimento de riftes associados a extensos fraturamentos da porção superior da crosta e (c) **Fase Sin-Rifte III** (Barremiano superior): Fase extensional, com o desenvolvimento da geometria final das bacias da margem leste.

Segundo este autor, o início do Rifte Potiguar teria ocorrido no Neocomiano-Barremiano. Além disso, o autor associa a evolução da Bacia Potiguar às fases Sin-Rifte II e III. A formação da parte emersa da bacia estaria associada à Fase Sin-Rifte II, resultante de extensões máximas de direção WNW-ESE, tendo originado estruturas de meio-*graben* com direção NE-SW (Figura 2.5A), e à Fase Sin-Rifte III, resultante da

mudança dos esforços distensivos de WNW-ESE para uma direção aproximadamente E-W, a qual atuou principalmente na porção submersa da bacia (Figura 2.5B).

Finalmente, é relevante citar Cremonini (1996) que estudou a porção submersa da Bacia Potiguar, reconhecendo duas fases de rifteamento. Identificou, inicialmente, a formação de zonas de transferência paralelas ao esforço distensivo máximo ocorrido durante a Fase Sin-Rifte II de Matos (1992b). A seguir, reconheceu uma nova fase rifte, gerando falhamentos paralelos à linha de costa e causando o rompimento das placas sul-americana e africana.

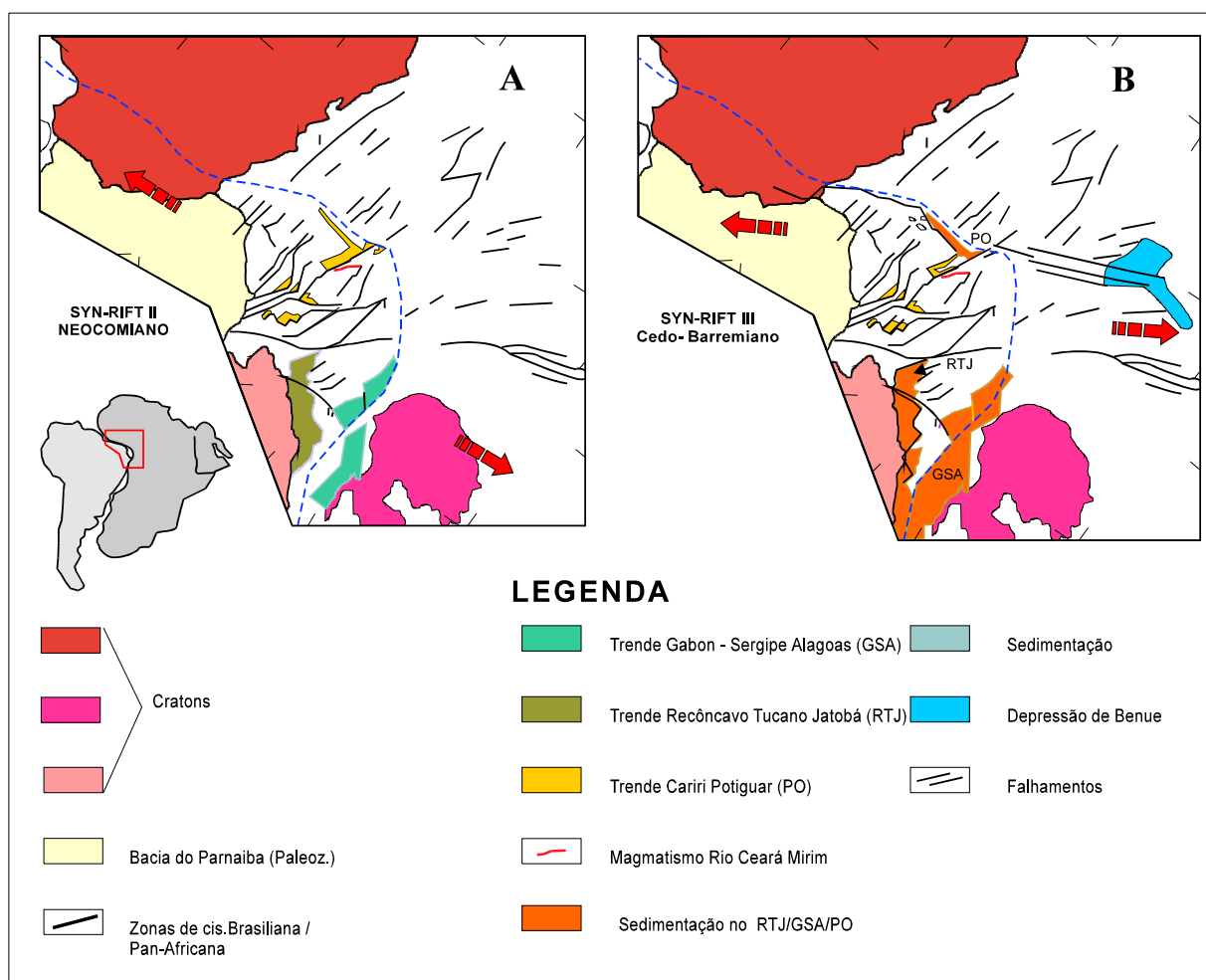


Figura 2.5. Estágios (A) Sin-Rifte II e (B) Sin-Rifte III para a Bacia Potiguar, reproduzido de Matos 1992b.

2.2.2. A EVOLUÇÃO CENOZÓICA

A evolução Cenozóica ainda é controversa. Não há consenso entre os autores e esta Era não possui um modelo considerado definitivo. A própria transição entre as eras

Mesozóica e Cenozóica é um problema em aberto. Na Bacia Potiguar, em particular, esta transição é marcada por uma extensa superfície de erosão, denominada de Discordância Pré-Ubarana, a qual atinge as formações Jandaíra e Ubarana (Figura 2.2). No intuito de explicar esta discordância, Cremonini e Karner (1995) sugeriram que a passagem de um centro de espalhamento oceânico ao longo da margem equatorial brasileira durante o Mesocampaniano teria fornecido calor suficiente para provocar soerguimento na Bacia Potiguar. Esse evento reativou diversas falhas pré-existentes e deflagrou intenso processo erosivo de alcance regional. O processo de resfriamento das litosferas oceânica e continental justapostas, iniciou após a passagem deste centro (Figura 2.6).

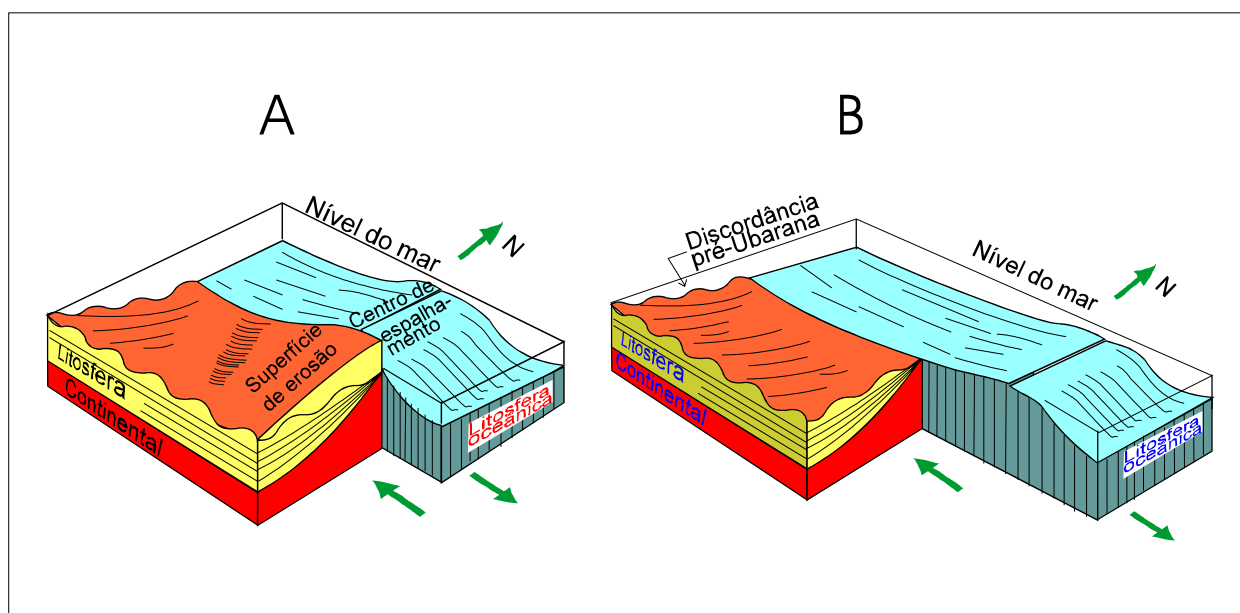


Figura 2.6. (A) Passagem do centro de espalhamento oceânico em frente à Bacia Potiguar, resultando em um soerguimento seguido de erosão e (B) início do estágio de resfriamento e subsidência da Bacia Potiguar, após a passagem do centro de espalhamento. Adaptado de Cremonini e Karner (1995).

Outro evento relacionado à transição entre o Mesozóico e o Cenozóico é a ocorrência dos diques de diabásio que constituem a Formação Serra do Cuó.

A Era Cenozóica é marcada por um tectonismo de menor expressividade regional, ou seja, não determina o surgimento de riftes e bacias sedimentares como no Mesozóico. Nesta Era, contudo, ocorrem eventos como a reativação de importantes falhamentos (sistemas de falhas de Afonso Bezerra e Carnaubais), dobramentos com grande comprimento de onda e eixos orientados na direção N-S, resultantes de esforços compressivos E-W aos quais a Bacia Potiguar esteve submetida no Terciário (Cremonini

1993), e reativações tectônicas associadas a intrusões básicas relacionadas com a Formação Macau (Costa Neto 1985). Além disso, regiões arqueadas durante o Mesozóico teriam sofrido alívio de pressão no Terciário, devido a ajustes internos da placa Sul-Americana, os quais permitiram a ascensão de magmas relacionados aos litotipos da Formação Macau (Sial 1976).

Durante o Quaternário, os processos tectônicos continuaram a ocorrer. Diversos trabalhos pareciam prever o interesse da comunidade científica em torno da neotectônica, a qual obteve maior destaque a partir dos abalos sísmicos que passaram a ocorrer na cidade de João Câmara (RN) e adjacências, a partir do ano de 1986. Pesquisas como as desenvolvidas por Miranda (1983), Barbosa (1984) e Srivastava e Corsino (1984), devem ser consideradas pioneiras na região. Vale salientar que, por neotectônica, admite-se a definição de Saadi (1991), segundo o qual este termo ainda não possuiria uma forma conceitual aceita por todos os autores, existindo, porém, uma tendência de que a neotectônica estaria relacionada a toda e qualquer alteração do nível geodésico de referência. Essas alterações influenciariam nos mecanismos e na própria origem geológica desse nível. O conceito de neotectônica não possuiria limites temporais rígidos para a Terra como um todo, pois cada região estaria submetida a diferentes estágios evolutivos, sendo aceitos limites de tempo que variam desde movimentos instantâneos até movimentos com idade superior a dezenas de milhares de anos, caso esta idade esteja relacionada a eventos que expliquem a origem dos movimentos recentes.

Dentre os trabalhos supracitados, Miranda (1983) estudou as variações morfológicas na região de Macauzinho (RN), relacionando a evolução da área a eventos de progradação da costa, o que resultou em assoreamento de lagoas, ampliação de zonas de mangues ao longo de canais e planícies de marés, entre outras. Esta progadação da linha de costa seria posteriormente sugerida por Fonseca (1996), como relacionada a eventos tectônicos. Por outro lado, estudando uma área a oeste da cidade de Macau (RN), Barbosa (1984) cita exemplos interessantes de atividades tectônicas recentes, tais como o desaparecimento da Ilha de Manoel Gonçalves no ano de 1845, anteriormente localizada na embocadura dos rios dos Cavalos e Amargoso. Comenta também a submersão parcial do povoado de Bela Vista no ano de 1883, situado na foz dos rios dos

Cavalos e Açú, admitindo ainda que a evolução da área estaria intimamente relacionada à reativação recente da Falha de Afonso Bezerra (direção NW). Tais afirmações são consideradas bastante relevantes pois mostram o caráter relativamente recente do tectonismo atuante na área. Um outro estudo, desenvolvido por Srivastava e Corsino (1984), associou a evolução do litoral norte, entre Aracati (CE) e Touros (RN), a movimentos tectônicos verticais. Estes movimentos seriam o resultado de atividade tectônica e reativação de falhas antigas relacionadas à Falha de Afonso Bezerra e à Falha de Carnaubais.

Os estudos mais recentes tentam compor um modelo para a evolução tectônica recente da Bacia Potiguar. Apesar dos diversos trabalhos que foram desenvolvidos, ainda não há um consenso em torno de uma hipótese única. Lima *et al.* (1990) sugerem que um campo de tensões recente, resultante de esforços compressivos regionais E-W (Assumpção 1990, 1992) estaria controlando parte da drenagem na Bacia Potiguar, provocando erosão no Grupo Barreiras quando situado em altos estruturais e preservando-o quando localizado em baixos estruturais.

Fonseca e Cruz Jr. (1995) postularam que a confluência dos rios Açú e Pataxós estaria se comportando como uma bacia sedimentar controlada por tectonismo. Além disto, a nível regional, falhas NE-SW estariam submetendo grandes blocos a um basculamento para leste. Por outro lado, a nível local, uma configuração de *graben* e *horst* estaria sendo refletida pela rede de drenagem e padrão de sedimentação.

Fonseca e Saadi (1995) e Fonseca (1996, 1997) realizaram estudos da morfo-escultura (reconhecimento de anomalias da rede de drenagem que estariam associadas a eventos neotectônicos) e morfo-estrutura (indicações de basculamento de blocos para leste que estariam controlando a migração do Rio Açú segundo esta direção) no baixo curso do Rio Açú (RN). Estabeleceram cinco compartimentos (ou blocos) morfo-tectônicos (Tabela 2.1 e Figura 2.7), alguns dos quais possuindo bons marcadores neotectônicos. Estes autores fazem menção à posição de uma paleolinha de costa (Holoceno), situada na região limítrofe entre a Falha de Afonso Bezerra e a Falha de Carnaubais, e recuada em torno de 10 km em relação à atual linha de costa (Figura 2.8).

Tabela 2.1. A compartimentação do Rio Açú e suas características principais. Adaptado de Fonseca e Saadi (1995).

Blocos	Lito-estratigrafia	Características principais	Observações
Itajá	Rochas precambrianas e partes da Formação Açú.	Relevo irregular com drenagem segundo NE, NW e ENE.	Ausência de marcadores neotectônicos.
Açú	Compreende a sedimentação dos rios Açú e Pataxós.	Forte orientação para NE. Meandros do rio e deposição de sedimentos controlados por movimentos de blocos.	Estrias em planos de falhas. Existência de fraturas e algumas estruturas de liquefação (Fonseca 1996). Dobras em cascalheiras.
Afonso Bezerra	Composto por carbonatos da Formação Jandaira, Arenitos da Formação Açú e uma parte de rochas do embasamento.	Bloco com forte orientação para NW.	Planos de falhas com estrias podem ser observados nos terraços próximo à região de Pendências (RN). São observadas ainda fraturas e estruturas de liquefação.
Macau	Predominância de dunas, sedimentos deltaicos e praias.	O compartimento é delimitado pela orientação NW.	Grande planície de influência marinha. <i>Beachrocks</i> presentes neste bloco apresentam fraturas e estrias em planos de falha.
Serra do Mel	Formação Barreiras e dunas litorâneas.	Dobramentos suaves e basculamento do bloco para SW afetam a Formação Barreiras. A delimitação do bloco é caracterizada por um lineamento principal (NW) e um secundário (NE).	O soerguimento do bloco apresenta característica de ocorrência (sub)-recente.

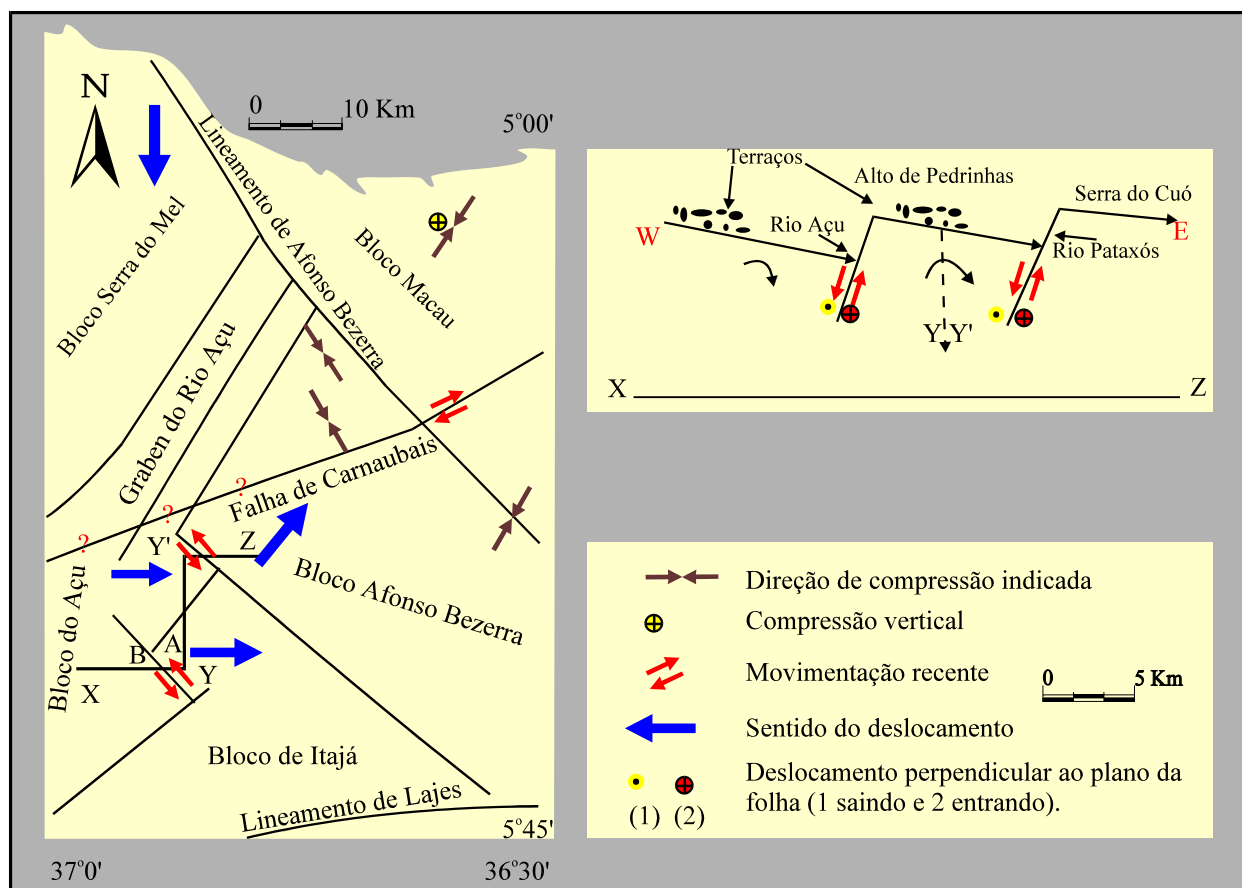


Figura 2.7. A deformação neotectônica e a compartimentação dos blocos morfo-tectônicos no modelo elaborado por Fonseca (1996).

Bezerra *et al.* (1997, 1998) pesquisaram a região costeira entre São Bento do Norte (RN) e Galinhos (RN), enfocando principalmente os *beachrocks* locais (Figuras 2.9 e 2.10), variações em relação ao nível médio dos mares (Curva de Touros) e datações por Carbono 14 dos organismos existentes nos *beachrocks*. Uma das principais conclusões a que chegaram está na comprovação de eventos neotectônicos nas proximidades de São Bento do Norte (RN), onde foi observado soerguimento a leste e subsidência a oeste da Falha de Carnaubais. Esse evento tectônico foi rápido e ocasionou um deslocamento de menos de 5m, ocorrendo num curto período entre cerca de 4.080 a 2.780 anos A.P. (antes do presente).

Caldas *et al.* (1997a) reconheceram a importância dos *beachrocks* localizados no litoral norte do Estado como potenciais marcadores neotectônicos. Nesse estudo, os autores descreveram diversos padrões estruturais análogos às feições clássicas de deformação frágil fornecendo indicações sobre o sistema de tensões gerador.

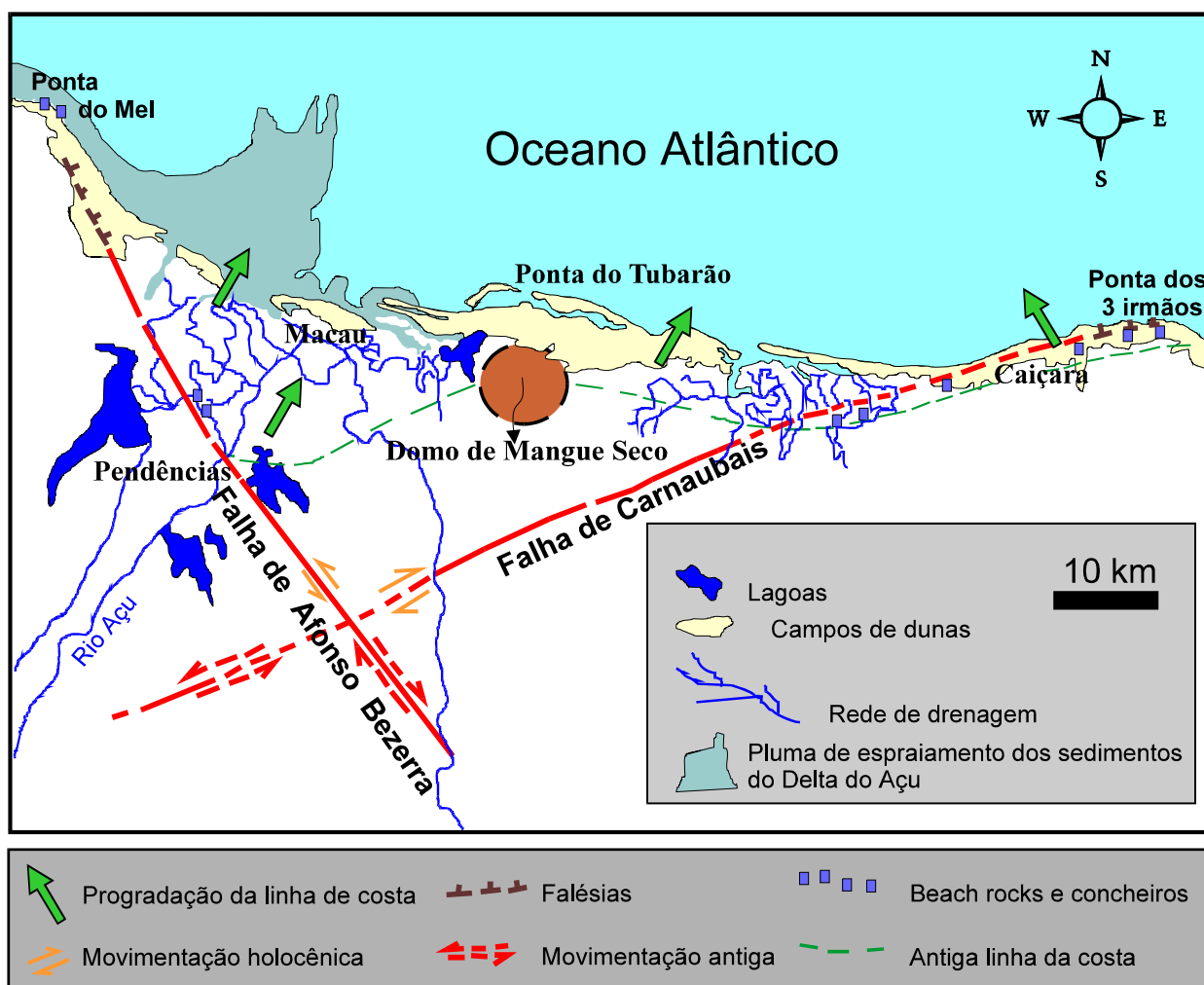


Figura 2.8. Modelo proposto por Fonseca (1996) para a compartimentação do litoral norte entre as falhas de Afonso Bezerra e Carnaubais.

Caldas *et al.* (1997b) integraram dados geológicos e hidrográficos com sondagens de eletrorresistividade na tentativa de caracterizar a estruturação rasa na borda leste do *Graben* de Umbuzeiro, eventualmente demarcando reativações neotectônicas ao longo da Falha de Carnaubais. Os autores concluíram que um sistema de falhas de alto ângulo originou um componente de deslocamento vertical afetando tanto os sedimentos da Formação Jandaíra, quanto os sedimentos superiores das formações Tibau e Guamaré. Além disto, em alguns locais, sedimentos quaternários também seriam afetados por essas falhas.

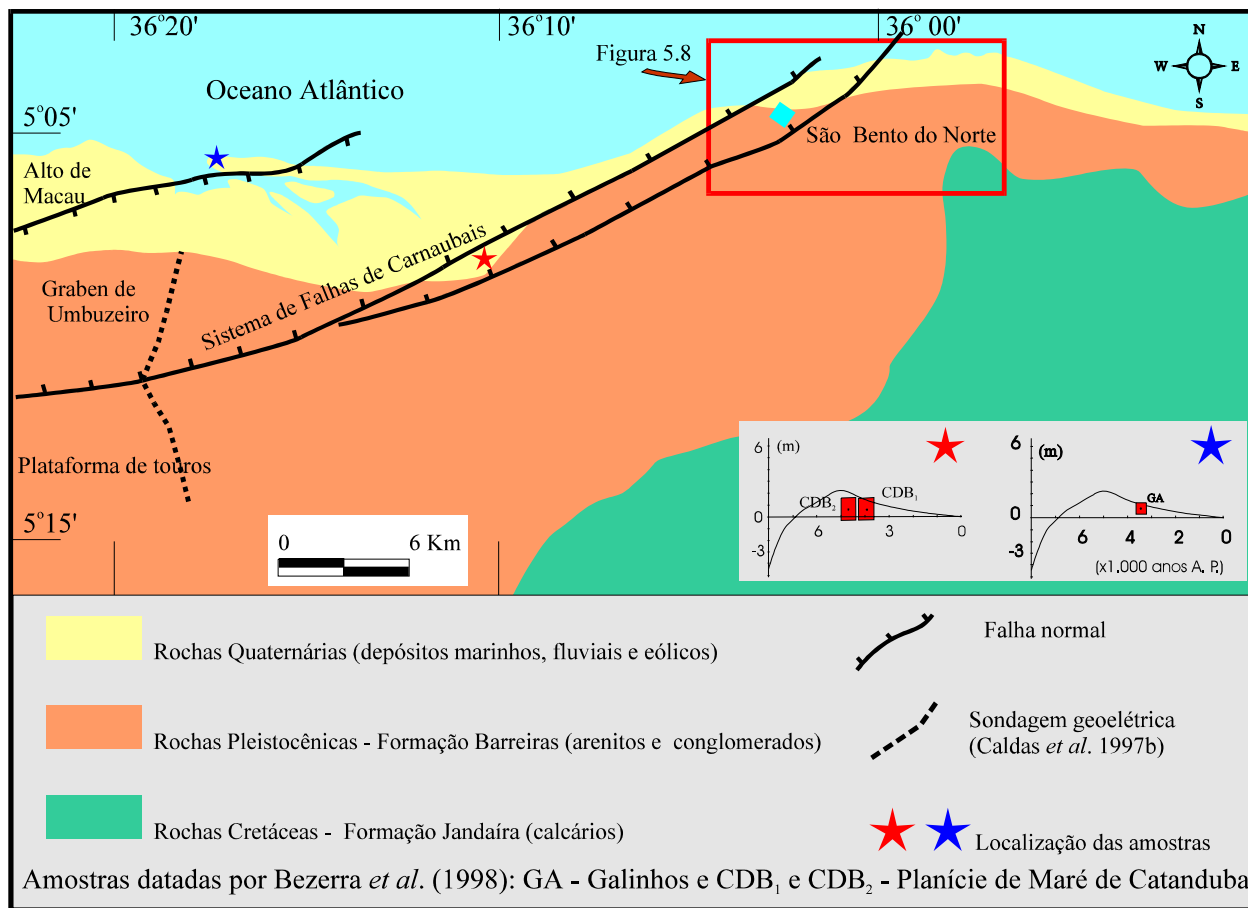


Figura 2.9. Localização da área estudada por Bezerra *et al.* (1998). O beachrock de Galinhos (estrela azul) situa-se apenas ligeiramente abaixo da curva do nível médio dos mares, assim como o beachrock de Catanduba (estrela vermelha). Essas unidades não apresentariam sinais de soerguimento ou rebaixamento, ao contrário do que ocorre na área no quadro, destacada na Figura 2.10. Modificado de Bezerra *et al.* (1998).

Mais recentemente, datações feitas em *beachrocks*, sustentam a hipótese de reativação neotectônica nas de falhas de Afonso Bezerra e Carnaubais.

Assim, *beachrocks* encontrados numa paleopraia próxima à localidade de Logradouro (RN), foram datados através de Carbono 14 por Silva (1991). Tais *beachrocks* são paralelos ao sistema de fraturas NW-SE (SFAB) e estão divididos entre um grupo aflorante e outro, lateralmente equivalente, não aflorante e somente reconhecido por meio de sondagem de *vibracore*. A datação do cimento do *beachrock* superficial ficou em torno de 5.020±120 anos A.P. (antes do presente).

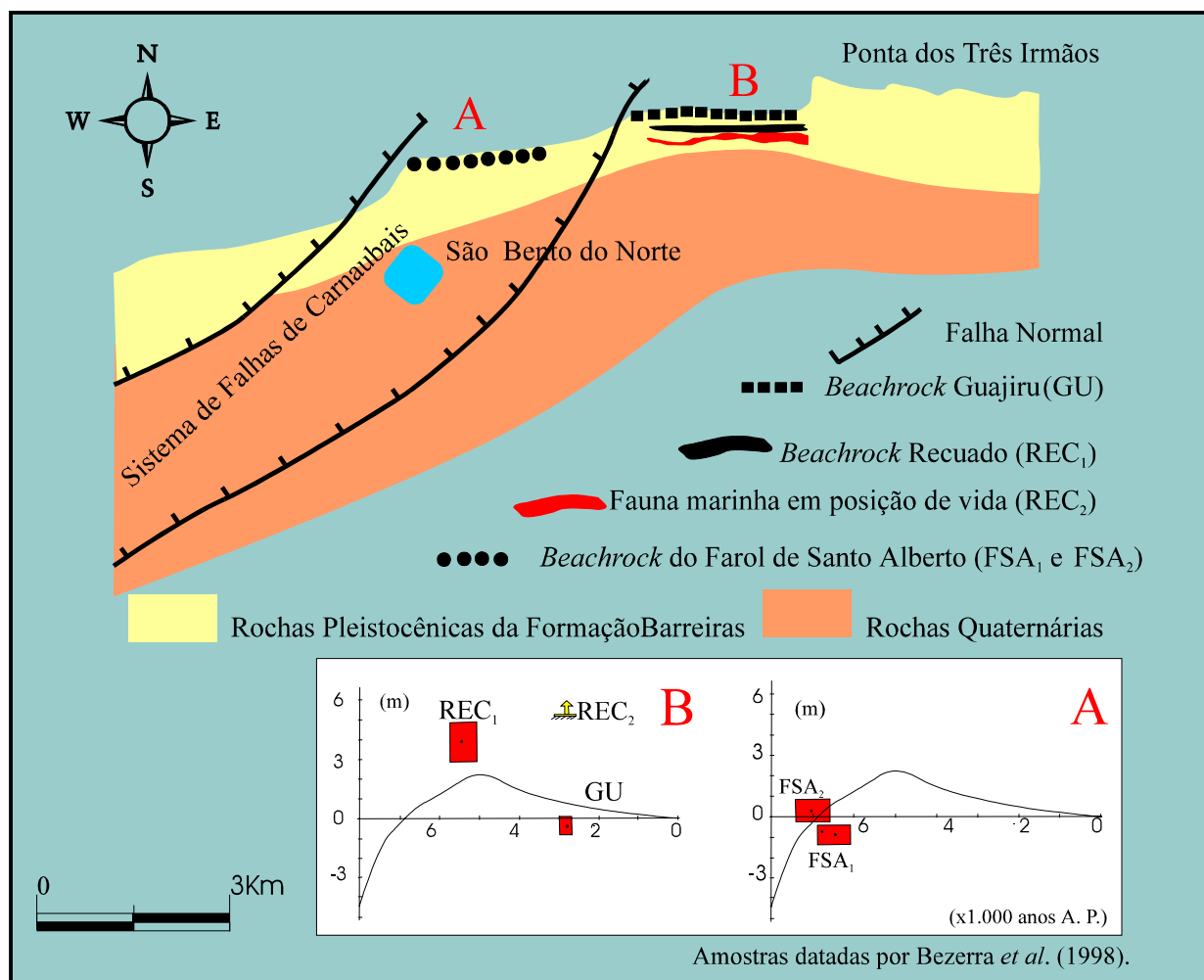


Figura 2.10. Área de destaque na Figura 2.9. Neste local estaria ocorrendo soerguimento a leste do SFC, com subsidência correspondente a oeste. Esta situação é sugerida pela análise da posição dos *beachrocks* em relação à curva do nível médio do mar. Em (A), o FSA₁ situa-se abaixo da curva indicando uma subsidência local, enquanto em (B), REC₁ e REC₂ estão localizadas acima da mesma curva, evidenciando soerguimento. Modificado de Bezerra *et al.* (1998).

O autor sugere que movimentos tectônicos recentes teriam sido responsáveis pelo deslocamento vertical dessas unidades. Este autor apresenta dados (Tabela 2.2) onde todas as datações foram realizadas em conchas, à exceção do *beachrock* de logradouro. Questiona-se aqui, o que realmente significaria a datação do cimento do *beachrock*, se o momento de atuação de um evento tectônico ou de algum processo diagnético provocando recristalização posterior, o que implicaria na invalidação da datação, para esta dissertação. Porém, uma rápida análise na Tabela 2.2 mostra que esta idade está na mesma faixa das outras datações realizadas em organismos, à exceção de uma idade anômala de 30.190 ± 370 anos A.P. Dessa forma, admite-se que a idade de 5.020 ± 120 anos A.P. seria a idade do *beachrock* de logradouro e não um evento tectônico ou

diagenético posterior, implicando em que o falhamento localizado por Silva (1991) seria realmente uma reativação recente do SFAB.

Os estudos desenvolvidos pelos autores supracitados caracterizam uma evolução dos conhecimentos relacionados à atuação de eventos neotectônicos no litoral norte do Estado do Rio Grande do Norte, principalmente na área limitada entre o SFC e o SFAB, durante os últimos 5.000 anos. Essa tectônica estaria reativando parte da estruturação pré-existente e teria modelado a superfície regional, além de influir na evolução e processos de sedimentação costeira.

Amostra	Profundidade (m)	Material datado	Idade (C14) Anos A. P.
S-2	18.5	Concha (<i>Ostrea equestris</i>)	6.060 ± 80
S-3	22.5 - 23.5	Idem	7.020 ± 100
S-5	19.0	Concha (<i>Crassostrea virginica</i>)	30.190 ± 370
S-6	3.0 - 4.0	Concha (<i>Veneridade</i>)	2.340 ± 60
OB-2	2.5 - 3.5	Conchas (<i>Corbula contracta</i> e <i>Diplodonta notata</i>)	4.930 ± 100
PD-3	3.5 - 5.5	Concha (<i>Crassostrea virginica</i>) e outros moluscos	6.730 ± 100
Beachrock de Logradouro	superfície	cimento do beachrock	5.020 ± 120

Tabela 2.2. Datações por Carbono 14 realizadas por Silva (1991).

2.3. SISTEMAS DE FALHAS

Ao longo dos anos, a grande maioria das pesquisas realizadas na região norte do Estado do Rio Grande do Norte, adotaram a nomenclatura de **Falha de Carnaubais** para uma falha de direção NE-SW, bem delimitada por métodos geofísicos, compondo o limite SE do *Graben* da Bacia Potiguar, e **Falha de Afonso Bezerra** ou **Lineamento de Afonso Bezerra**, para um extenso lineamento NW-SE, facilmente identificado por sensoriamento remoto (Hackspacher *et al.* 1985). Entretanto, os estudos realizados nessa dissertação, e descritos nos capítulos seguintes, mostraram que ambas são constituídas

por um conjunto de falhas paralelas, com características geométricas, estruturais e tectônicas semelhantes, definindo dois sistemas orientados de acordo com as direções supracitadas. Sob esse ponto de vista, preferiu-se adotar a nomenclatura de **Sistema de Falhas de Carnaubais (SFC)** e **Sistema de Falhas de Afonso Bezerra (SFAB)**, para os conjuntos de lineamentos com direções NE-SW e NW-SE, respectivamente. Vale salientar que, alguns autores, como por exemplo, Fonseca (1996), utilizam o termo Sistema de Falhas de Carnaubais e Sistema de Falhas de Afonso Bezerra.

Estes sistemas apresentam-se como um importante elemento de estudo, visto que reativações tectônicas recentes influenciam toda uma dinâmica costeira, assim como provocam reativações no arcabouço estrutural da Bacia Potiguar, permitindo a migração e o armazenamento de óleo na parte rasa da bacia.

2.3.1. O SISTEMA DE FALHAS DE CARNAUBAIS (SFC)

A ocorrência de petróleo nos blocos baixo e alto da Falha de Carnaubais foi o fator decisivo para que esta estrutura se tornasse uma das mais estudadas da Bacia Potiguar. Por outro lado, o valor estratégico do ouro negro ditou regras duras, onde muitas informações nunca puderam chegar às mãos dos pesquisadores alheios ao processo exploratório.

Françolin e Szatimari (1987) defendiam que movimentos compressivos E-W e distensivos N-S, durante o Neocomiano, teriam formado e/ou reativado numerosas falhas de direção NE-SW, inclusive o SFC, a partir de movimentos transcorrentes dextrais e movimentação transtraccional. Segundo os autores, este movimento teria cessado durante o Aptiano, quando apenas um evento distensivo N-S teria passado a atuar, interrompendo a movimentação transcorrente dextral e a sedimentação na Bacia Potiguar emersa. Uma nova e última reativação de numerosas falhas nesta bacia, assim como o soerguimento da plataforma carbonática da Formação Jandaíra, decorrentes de um evento compressivo N-S ocorrido durante o Cretáceo superior, foi relatada por estes autores.

Matos (1992b), no entanto, afirma que, durante o Neocomiano, teria ocorrido a abertura dos meio-*graben* NE-SW e que o SFC, representado por falhas lítricas normais

intracrustais (Figura 2.11), teria exercido um forte controle no desenvolvimento do arcabouço tectônico da bacia.

Atualmente, diversos autores relatam a ocorrência de eventos neotectônicos que teriam causado reativação no SFC. Dentre eles, Caldas *et al.* (1997b) e Caldas (1998) caracterizaram localmente o SFC como um sistema de falhas normais subverticais que estariam afetando inclusive sedimentos holocênicos. Bezerra *et al.* (1998) encontraram evidências de soerguimento a leste e subsidência a oeste do SFC, na costa próximo a São Bento do Norte (RN).

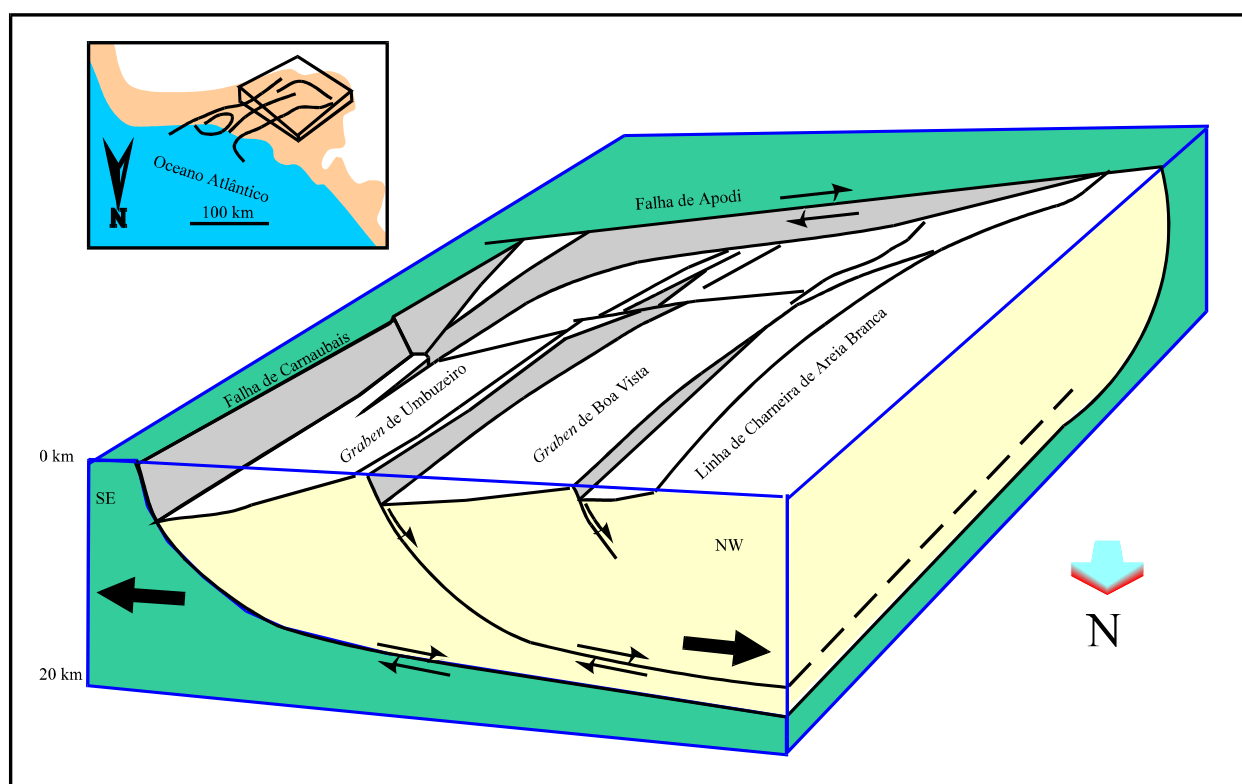


Figura 2.11. Interpretação de Matos (1992b) para a geometria básica da Bacia Potiguar, definida por falhas lístricas normais intracrustais.

2.3.2. O SISTEMA DE FALHAS DE AFONSO BEZERRA (SFAB)

Esta denominação é dada para uma série de falhas paralelas, orientadas segundo a direção NW-SE, cujo expoente máximo se traduz na Falha de Afonso Bezerra. Esta falha possui uma extensão estimada em torno de 150 km, entre as cidades de Afonso Bezerra (RN) e Areia Branca (RN). De acordo com a bibliografia disponível, Fortes (1982) foi o primeiro a descrever sistemas rúpteis orientados segundo as direções NE e NW, na Bacia

Potiguar. O sistema NW estaria associado ao SFAB e, segundo este autor, seria posterior ao sistema NE.

Por outro lado, Hackspacher *et al.* (1985) reconheceram um complexo sistema estrutural onde os lineamentos NE e NW se entrelaçariam e penetrariam por quase toda a Bacia Potiguar (Figura 2.12).

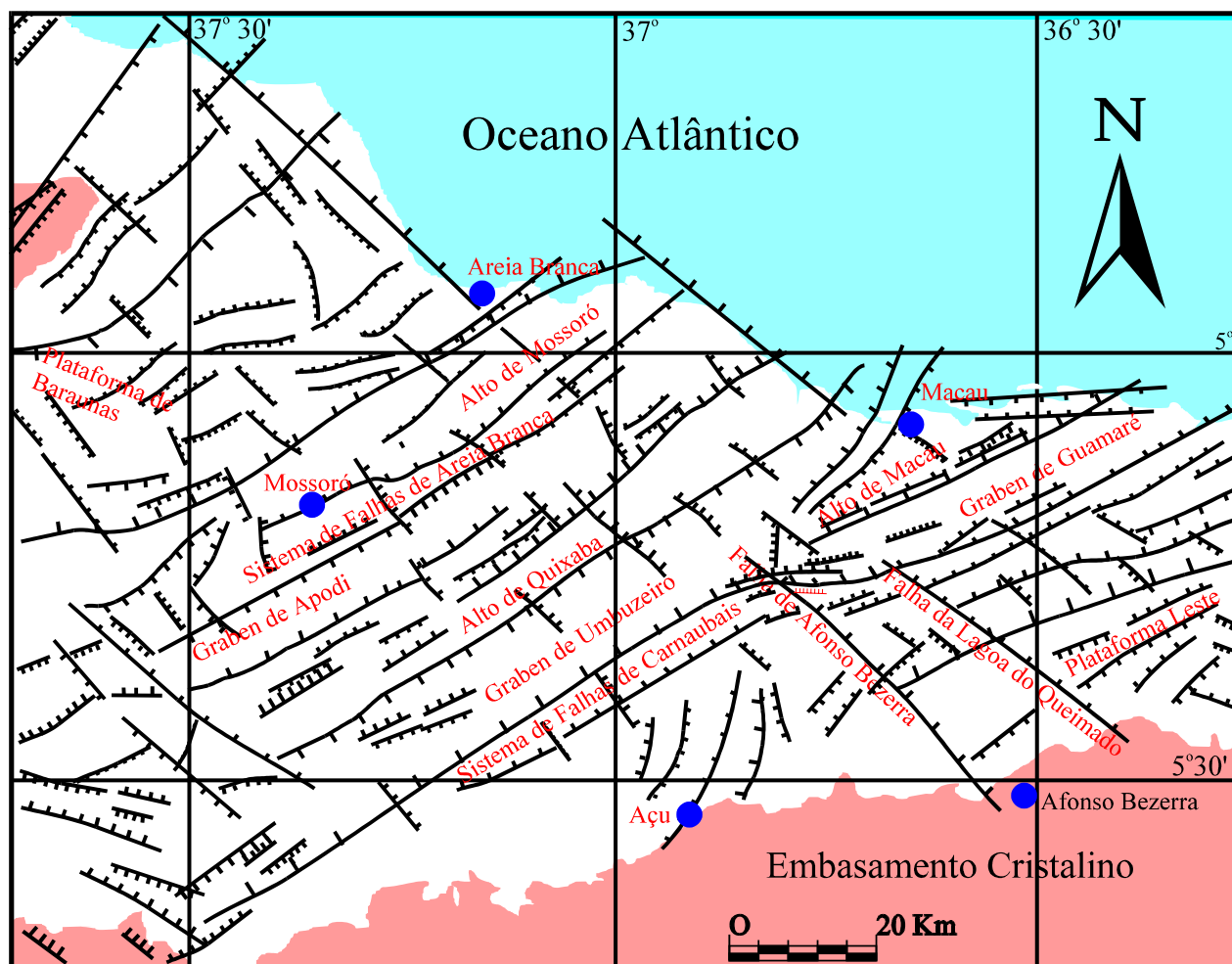


Figura 2.12. Modelo estrutural proposto por Hackspacher *et al.* (1985).

Segundo estes autores, entre o SFC e o Sistema de Falhas de Areia Branca, o *trend* NE tem reconhecida predominância sobre o NW, refletindo uma alternância de falhas escalonadas formando altos (Quixaba e Macau, p. ex.) e baixos (Umbuzeiro e Guamaré, p. ex.). Nas áreas circunvizinhas, haveria uma distribuição mais equilibrada das falhas em ambas as direções. A exemplo de Fortes (1982), estes autores admitem a posterioridade do sistema NW em relação ao NE, associando-o ainda a uma tectônica

distensiva, representada por falhas normais com abatimento de blocos para NE, transversais ao SFC. Hackspacher *et al.* (1985) admitiram uma idade Oligo-Miocênica para o fraturamento NW, associando-o à ocorrência do episódio vulcânico da Formação Macau. Neste caso, Hackspacher *et al.* (1985) estariam retratando uma reativação do sistema NW, e não sua origem.

Oliveira (1992) reconheceu que o fraturamento NW-SE no embasamento cristalino, alinhado com o SFAB, estaria sendo cortado por diques de provável idade brasileira o que, segundo este autor, indicaria uma idade precambriana para o fraturamento NW no cristalino.

Considerado como uma das melhores exposições do SFAB, o “Afloramento de Afonso Bezerra”, localizado próximo à cidade homônima, foi descrito por Oliveira *et al.* (1993). Estes autores concluíram que o SFAB se comportaria como um sistema direcional dextral, resultante de um evento compressivo subhorizontal de direção N-S. Além disso, localizaram falhas normais decamétricas e com planos estriados, paralelas à estruturação principal (NW-SE).

CAPÍTULO III

III. GRAVIMETRIA

Nesta dissertação, o emprego da gravimetria teve por objetivo evidenciar a estruturação profunda e mais antiga (cretácea) da Bacia Potiguar, a qual assume a forma de uma calha central (*graben*) de direção NE, ladeada por altos estruturais (*horsts*). No tratamento gravimétrico, foram empregadas duas técnicas de filtragem para o processamento e a interpretação dos dados. Aplicou-se, inicialmente, um filtro de separação das componentes regionais e residuais do campo gravimétrico total. O método selecionado foi desenvolvido por Beltrão *et al.* (1991), ajustando uma superfície polinomial à componente regional do campo total através de critérios estatísticos robustos. A seguir, foi realizado o estudo pelo método de sombreamento de relevo gravimétrico, através do *software* Surfer 32-v.6.1 (Golden Software 1995), o qual emprega a técnica de reflexão Lambertiana.

As informações utilizadas nas diversas técnicas descritas neste capítulo foram selecionadas a partir de uma base de dados geofísicos reunidos pelo grupo de professores e pesquisadores do PPGG oriundos dos departamentos de Física Teórica e Experimental (DFTE) e de Geologia (DG) da UFRN. O conjunto dos dados gravimétricos da área contém um total de 6796 estações (Figura 3.1), implicando em uma cobertura gravimétrica com densidade média em torno de 7 estações por Km². Esse conjunto de observações geofísicas (gravimétrica, topográfica e batimétrica) é formado por medidas coletadas em vários levantamentos realizados por diversas universidades (UFRN, USP, UFPA, UFOP e UFPE), empresas e órgãos públicos (PETROBRAS, ON, CNEN e IBGE) e instituições de pesquisa internacionais (OSU e NOAA). Castro e Medeiros (1997) realizaram a integração dos dados dos diversos levantamentos para compor o mapa de anomalias gravimétricas do Nordeste Setentrional do Brasil.

Na interpretação dessas informações houve o cuidado de extrapolar os limites da área de estudo com a finalidade de evitar problemas com efeitos de borda, bastantes comuns às técnicas aplicadas, bem como buscando englobar um elevado número de

estações para uma maior consistência dos resultados, auxiliando no reconhecimento de prováveis artefatos originados pelas deficiências inerentes aos métodos supracitados. O mapa de anomalias gravimétricas é apresentado na Figura 3.2.

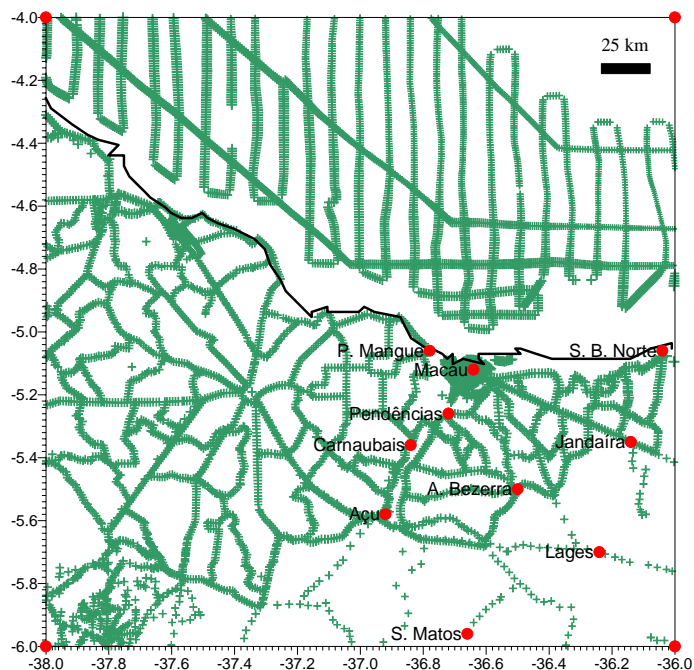


Figura 3.1. Mapa da cobertura gravimétrica da área de estudo e adjacências. As estações são mostradas pelas cruzes de cor verde e a linha de costa está representada em preto.

3.1. PROCESSAMENTO DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS

3.1.1. AJUSTE POLINOMIAL ROBUSTO

Este método permite a separação das componentes regionais e residuais do campo gravimétrico total a partir do ajuste polinomial utilizando critérios estatísticos robustos. Esta técnica foi desenvolvida por Beltrão *et al.* (1991).

A superposição dos efeitos gravitacionais devido a fontes de origens diversas produz o campo gravitacional total. Essas fontes tanto podem ser originadas de massas próximas à superfície (heterogeneidades crustais) quanto estruturas em níveis crustais profundos. No primeiro caso, a anomalia resultante assume um caráter residual perante o campo anômalo, enquanto no segundo, as fontes profundas (interface crosta inferior/manto superior) são responsáveis pela componente regional. A soma algébrica desses efeitos resulta no campo gravimétrico total. Em síntese, esta afirmação é representada por:

$$G_t = G_{reg} + G_{res} \quad (1)$$

onde G_t é o campo gravimétrico total, G_{reg} a anomalia gravimétrica regional e G_{res} a anomalia gravimétrica residual.

Os efeitos gravitacionais provenientes dessas fontes normalmente são de difícil separação através da maioria dos métodos convencionais (ajuste gráfico, filtros espectrais e ajuste polinomiais). Nos métodos de ajuste polinomial tradicionais, a ordem do polinômio controla a suavização do campo regional, assumindo que este campo é modelado por uma superfície polinomial. À medida que se aumenta a ordem do polinômio, serão gerados ruídos provenientes da distribuição generalizada dos erros no sentido dos mínimos quadrados, gerando assim pseudoanomalias e instabilidade do método. Por outro lado, a escolha de um polinômio de grau muito pequeno acarretará a incorporação de efeitos residuais no campo regional.

Tentando solucionar este problema, Beltrão *et al.* (1991) desenvolveram um método de separação regional-residual a partir do ajuste polinomial empregando critérios estatísticos robustos (norma L_1), na tentativa de estabilizar o processo de ajuste e, por conseguinte, solucionar o problema da influência dos efeitos de caráter residual sobre a componente regional. Além disso, a adição de pequenos pesos a grandes resíduos possibilita a aplicação de polinômios de ordens mais altas, em regiões de estrutura geológica mais complexa.

Nesta dissertação, a separação regional *versus* residual, a partir do mapa de anomalias bouguer total, foi realizada pelo método supracitado. A estruturação tectônica da Bacia Potiguar foi fundamental para a escolha do grau do polinômio adequado ao estudo aqui realizado. O polinômio de grau 6 foi o que melhor se ajustou aos dados, e os critérios para sua escolha foram (a) no **mapa de anomalias gravimétricas regionais** (Figura 3.3), o reconhecimento do gradiente associado à subida da interface crosta/manto em direção ao oceano e a distorção desse gradiente pela calha NE da Bacia Potiguar, e (B) no **mapa de anomalias gravimétricas residuais** (Figura 3.4), os efeitos residuais da

calha NE da Bacia Potiguar, delimitando a estruturação rasa do arcabouço tectônico da bacia, assim como a definição de lineamentos na direção NW, associados ao SFAB.

O mapa de anomalias gravimétricas é apresentado na Figura 3.2. Neste mapa, a variação das cores do amarelo para o preto mostra a subida da Moho em direção ao oceano. Este gradiente gravimétrico positivo é o resultado do expressivo afinamento crustal em direção ao oceano, típico de uma zona de transição de crosta continental para crosta oceânica. Além disso, pode-se observar os efeitos da estruturação da calha NE da Bacia Potiguar, identificando-se ainda os *grabens* de Apodi, e Boa Vista (letras **A** e **B** na Figura 3.2)

Os mapas de anomalias gravimétricas regional e residual serão descritos no item **Interpretação Qualitativa dos Mapas Gravimétricos (item 3.2)**, neste capítulo.

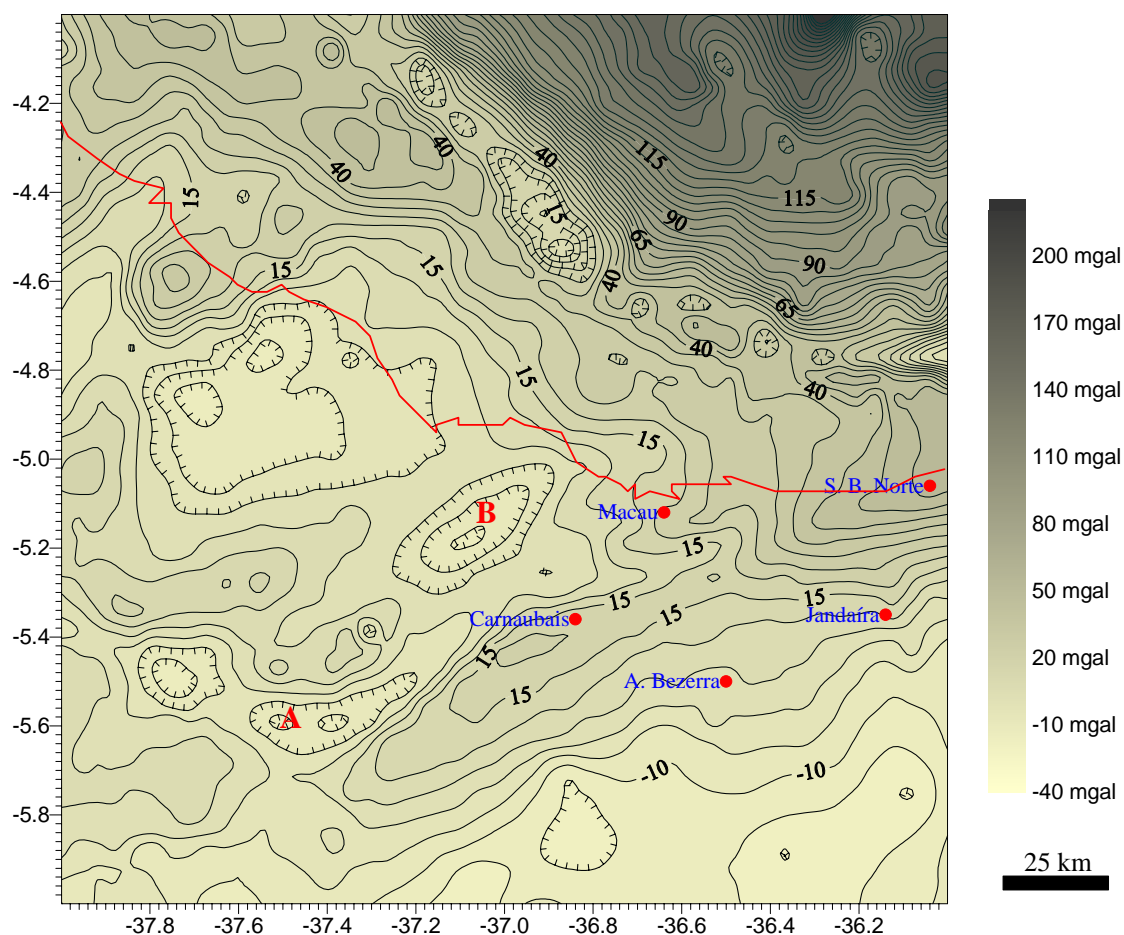


Figura 3.2. Mapa das anomalias gravimétricas. Intervalo das isogálicas de 5 mgal. A linha de costa está representada em vermelho.

3.1.2. SOMBREAMENTO DE RELEVO GRAVIMÉTRICO

O sombreamento do relevo gravimétrico é idealizado a partir de uma fonte de luz que utiliza a Reflexão Lambertiana (Golden Software 1995), como meio matemático, a qual pode ser orientada em qualquer direção (vertical e horizontal). Essa fonte pode ser entendida como um sol brilhando sobre uma superfície topográfica. O azimute é definido como o ângulo horizontal, sendo que o zero grau corresponde à fonte brilhando exatamente para leste. O ângulo vertical corresponde ao percurso da fonte luminosa em um plano horizontal. O zero grau coloca a fonte luminosa, a partir do horizonte, 90° a pino. No caso de ângulos negativos, essa fonte luminosa ficará sob a superfície horizontal.

O controle da suavização, sombreamento e reflexão de luz do mapa de relevo sombreado é feito a partir dos métodos do Gradiente, de Sombreamento e da Reflexão Lambertiana (ou Lei dos Cossenos).

No Método do Gradiente, é feita a média entre a declividade e orientação das superfícies que cruzem duas células (pixels) adjacentes na malha regular. Isso resulta numa suavização da superfície do relevo sombreado. Assim, duas células são requeridas, e o resultado é o branqueamento da fronteira da célula.

O Método de Sombreamento especifica o algoritmo usado para computar a luz refletida em cada célula da malha, determinando como as cores serão distribuídas em relação aos declives e à direção desses declives sobre a extensão do mapa.

A Reflexão Lambertiana assume uma superfície ideal que reflete toda a luz que a atinge. Segundo Novo (1992), a intensidade dessa luz varia com o cosseno do ângulo entre a direção de incidência e a direção normal à superfície difusora perfeita. Matematicamente, esta afirmação pode ser expressa por:

$$L\theta = I_0/\partial A \quad (2)$$

onde $L\theta$ é a radiância ao longo de uma direção com ângulo θ em relação à normal, I_0 é a intensidade na normal à superfície e ∂A a superfície difusora perfeita.

Isto permite afirmar que a intensidade radiante será tanto maior quanto mais próxima estiver da normal à superfície, diminuindo com o cosseno do ângulo θ entre a sua normal e a direção de observação. Além disso, numa superfície Lambertiana, a direção de imageamento não influe na radiância. Entretanto, na natureza, nem todas as superfícies possuem essas propriedades, determinando que, na prática, a radiância medida pelo sensor varia com as condições de imageamento.

No tratamento gravimétrico, a superfície irradiada (cada dado pontual representado por um pixel ou célula) é tratada como uma superfície Lambertiana.

O exagero vertical é dado pelo fator de escala Z. Aumentando esse fator, aumenta-se o efeito do sombreamento e realce dos detalhes, especialmente sobre superfícies relativamente lisas. O valor padrão deste fator é de 1/10 da diagonal da malha fornecida (Golden Software 1995).

3.2. INTERPRETAÇÃO QUALITATIVA DOS MAPAS GRAVIMÉTRICOS

3.2.1. MAPA DE ANOMALIAS GRAVIMÉTRICAS

O mapa de anomalias regionais (Figura 3.3) apresenta um expressivo gradiente gravimétrico com direção geral SW-NE, grosseiramente acompanhando a linha de costa. Tal padrão anômalo reflete o forte afinamento crustal e conseqüente subida do manto em direção ao oceano, nesta região de margem continental passiva. Castro e Medeiros (1997) associaram a reentrância para SW nas isogálicas (área A na Figura 3.3) a uma região de crosta continental relativamente mais fina, subjacente à seqüência de bacias intracratônicas do *trend* Cariri-Potiguar (Matos 1992b).

O mapa de anomalias gravimétricas residuais delimita, de forma precisa, a estruturação da Bacia Potiguar, refletindo o comportamento do relevo do embasamento na sua porção emersa (Figura 3.4). No limite leste, o SFC se exprime por um marcante *trend* SW-NE de anomalias positivas, na fronteira E-SE do *Graben* de Umbuzeiro, enquanto no limite sul da Bacia Potiguar observa-se um alto gravimétrico, localizado a sul da fronteira do *Graben* de Apodi (letra A na Figura 3.4). Observa-se que outros baixos gravimétricos indicam áreas na Bacia Potiguar que também apresentam

espessamento do pacote sedimentar, como nos *graben* Umbuzeiro, Guimarães e Boa Vista (letras **B**, **C** e **D** na Figura 3.4). Anomalias residuais positivas na região da bacia sedimentar indicam a presença de altos do embasamento no substrato da bacia, tais como os altos de Quixaba e Macau (letras **E** e **F** na Figura 3.4). O motivo do SFC estar bem marcado no mapa de anomalias gravimétricas residuais deve-se ao fato da estrutura possuir um grande rejeito vertical, alcançando algumas vezes até 6000 m. Esta estruturação coloca lado a lado rochas sedimentares da fase rifte da Bacia Potiguar com rochas do embasamento cristalino, representando um expressivo contraste de densidade lateral, da ordem de $0,15 \text{ g/cm}^3$.

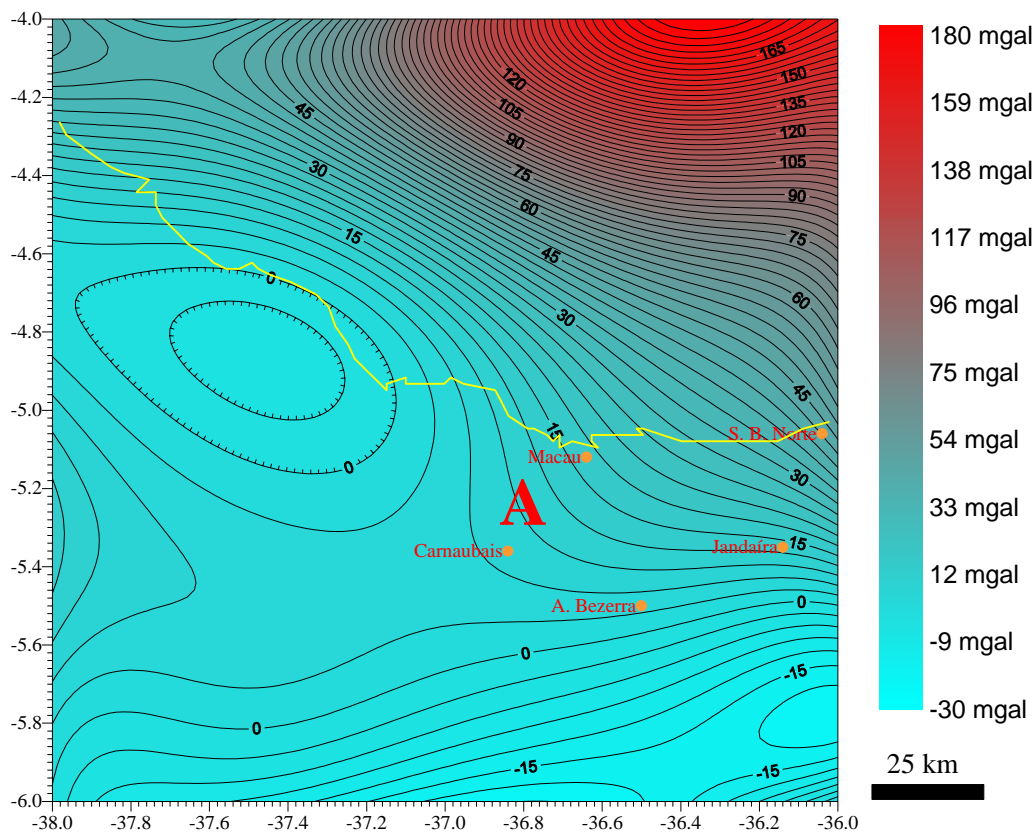


Figura 3.3. Mapa de anomalias gravimétricas regionais (polinômio de grau 6). Intervalo das isogálicas igual a 3 mgal. A linha de costa está representada em amarelo.

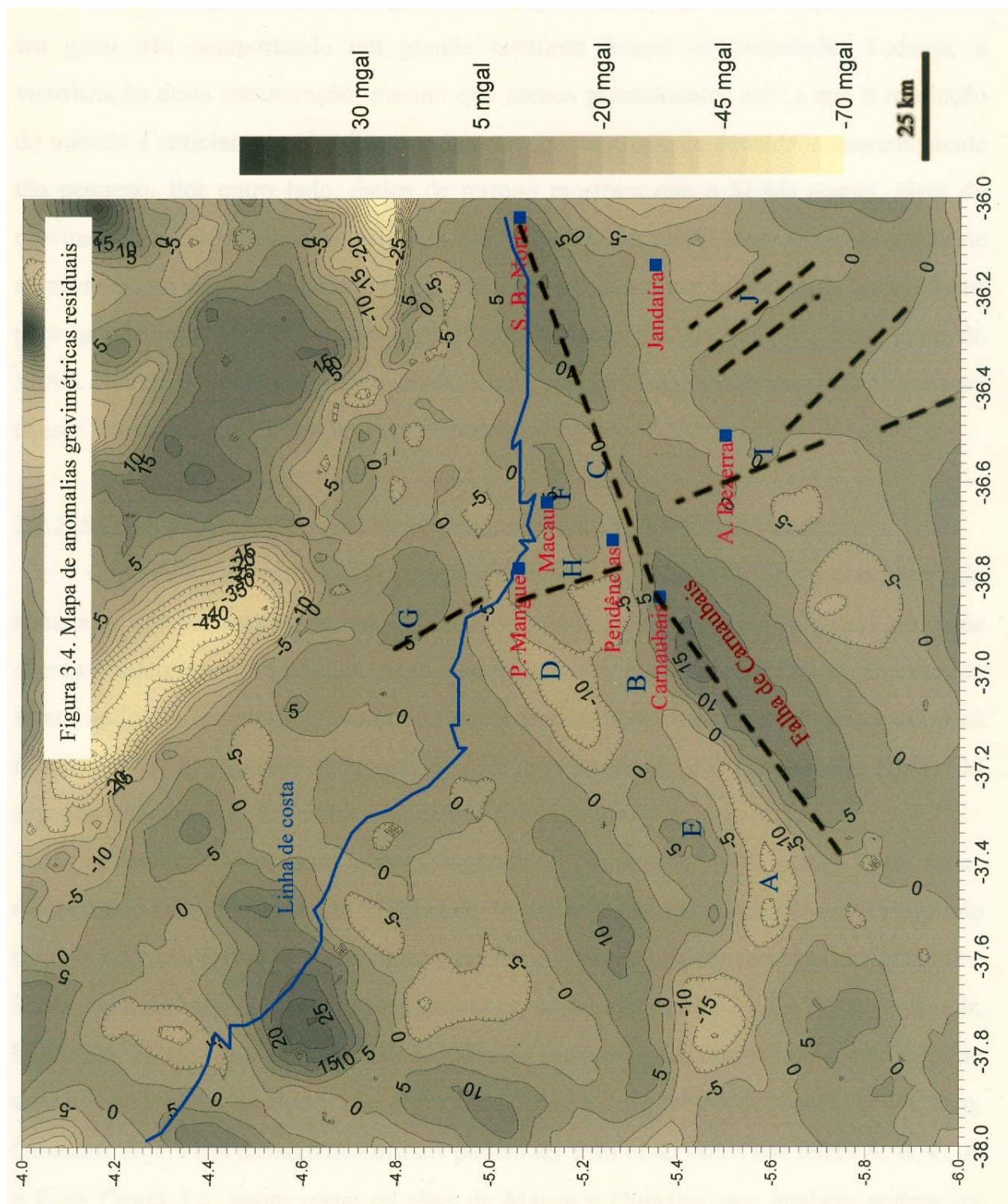


Figura 3.4. Mapa de anomalias gravimétricas residuais

A estruturação associada ao SFAB ainda não havia sido detectada nos mapas gravimétricos. No entanto, lineamentos incipientes foram definidos neste trabalho (letras **G, H, I e J** na Figura 3.4). Isto sugere um componente de rejeito de mergulho reduzido, em geral não comportando um grande contraste lateral de densidade. Todavia, a visualização desta estruturação, mesmo que menos proeminente, indica que a resolução do método é suficientemente alta para detectar um contraste de densidade aparentemente tão pequeno. Por outro lado, dados de terreno mostram que o SFAB possui, além do movimento direcional dextral (Oliveira *et al.* 1993), um movimento vertical, conforme apresentado no capítulo referente ao sensoriamento remoto (capítulo 4). Não houve meios para quantificar o deslocamento vertical em qualquer das falhas que fazem parte do SFAB. Entretanto, este rejeito parece não atingir grandes valores, apenas o suficiente para causar fracos reflexos no mapa gravimétrico residual.

3.2.2. SOMBREAMENTO DO MAPA DE ANOMALIAS RESIDUAIS

O mapa de anomalias gravimétricas residuais foi escolhido para tratamento pela técnica de sombreamento, de vez que o mesmo permite detalhar as estruturas rasas, de eventual interesse neotectônico. Neste processamento, diversas direções de iluminação foram aplicadas ao mapa gravimétrico de anomalias residuais. Os melhores resultados foram obtidos a) segundo o azimute de 135° e elevação de 25° (iluminação NW) e b) segundo o azimute de 45° e elevação de 60° (iluminação NE).

A análise do produto obtido segundo a iluminação NW mostra uma ótima definição da calha NE da bacia, a exemplo de outros tratamentos descritos neste capítulo (Figura 3.5). As falhas de Carnaubais e de Areia Branca, respectivamente os limites E e W da calha da bacia, são muito bem definidas, o que não ocorre com a Falha de Apodi, limite SW. Neste caso, a porção SW da calha da bacia pode ser observada, porém o limite definido pela Falha de Apodi não é preciso. Todavia, os *grabens* de Apodi, Umbuzeiro, Guamaré, Boa Vista e Baixo de Grossos podem ser bem observados nas letras **A, B, C, D** e **E** na Figura 3.5, assim como os altos de Macau e Quixaba, que também podem ser visualizados em áreas bem iluminadas (letras **F** e **G** na Figura 3.5). Outra feição bem observada é a “quebra” da plataforma continental (letra **M** na Figura 3.5), que

acompanha a linha de costa mantendo com esta uma distância regular de aproximadamente 50 km em direção ao oceano.

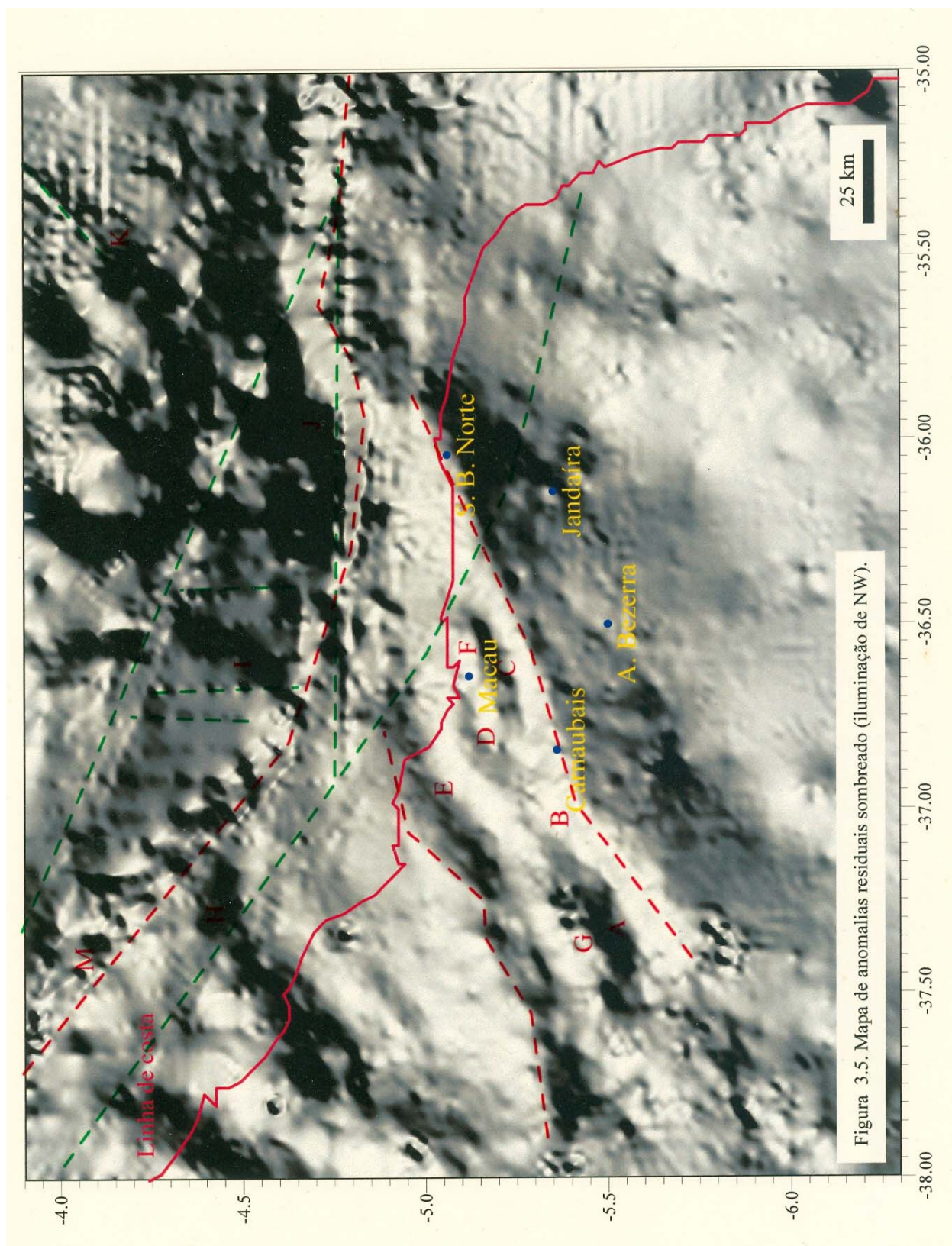
Feições lineares com direções NW-SE, N-S, E-W e SW-NE são observadas no domínio *offshore*, (letras **H**, **I**, **J** e **K** na Figura 3.5, respectivamente). A superposição (Figura 3.6) do mapa de anomalias residuais, iluminado a partir da direção NE, com o mapa das estações, mostra que esses lineamentos são resultantes da própria forma de distribuição espacial dos dados (as medidas apresentariam uma forte concentração segundo a direção do deslocamento do navio). Este fato permitiu a geração de artefatos (entenda-se como falsos lineamentos) no mapa obtido a partir do sombreamento do relevo gravimétrico. Especialmente no tocante ao lineamento **H**, observa-se sua continuidade na porção continental, a sul de São Bento de Norte e seguindo em direção à costa leste do Estado segundo uma direção aproximada SE. A cobertura gravimétrica dessa região (Figura 3.6) sugere que este lineamento, também em sua porção continental, seria um artefato de imagens pois, nesta região, as direções das linhas de aquisição dos dados são todas SE.

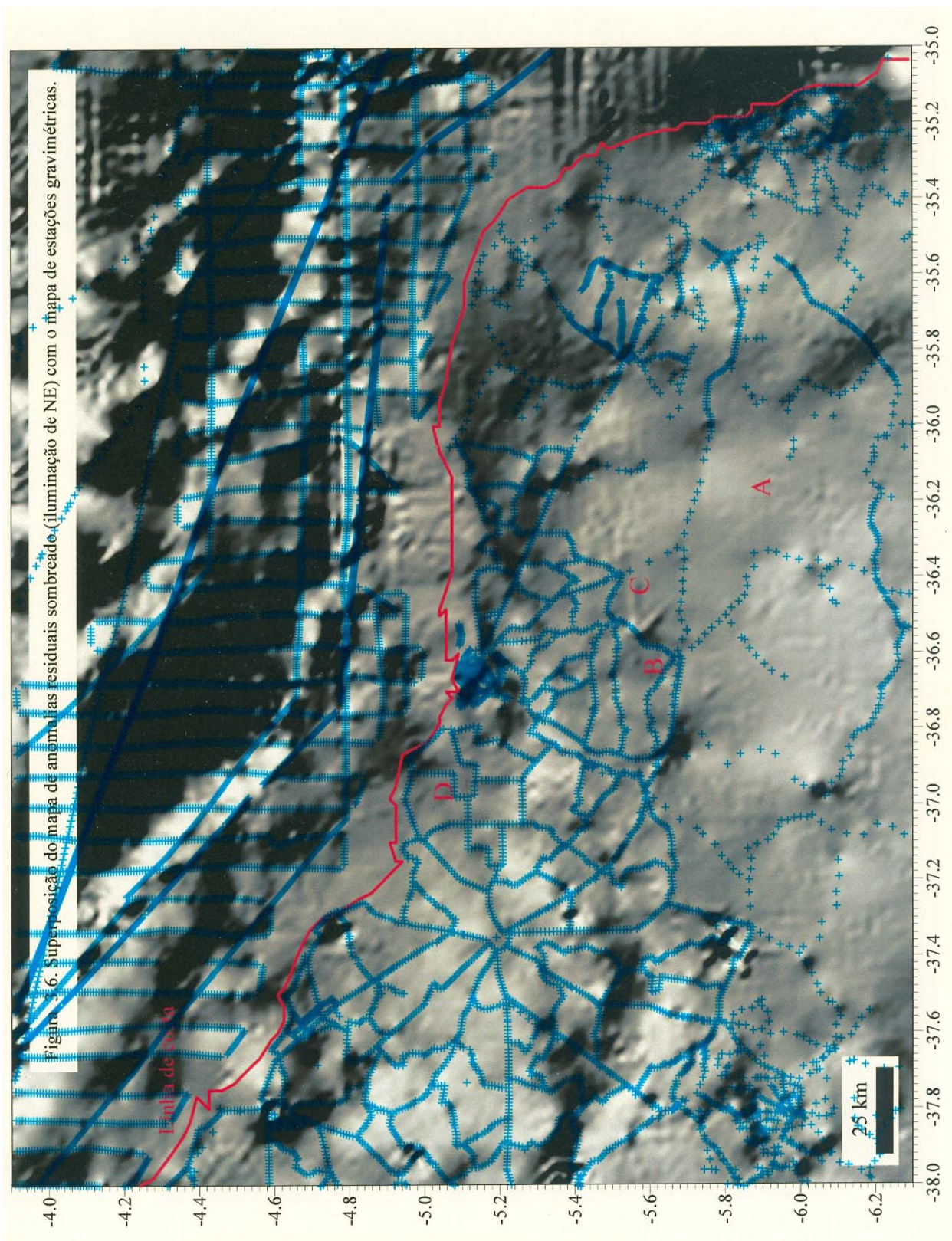
A sobreposição do mapa estrutural da calha NE da Bacia Potiguar (Cremonini *et al.* 1996) sobre o mapa residual iluminado a partir de NW permitiu avaliar os resultados obtidos neste método (Figura 3.7). Observa-se que o mapa sombreado ajusta-se bem ao mapa estrutural, mostrando que o sombreamento é uma técnica confiável para delinear, de forma rápida e direta, os principais traços estruturais da bacia.

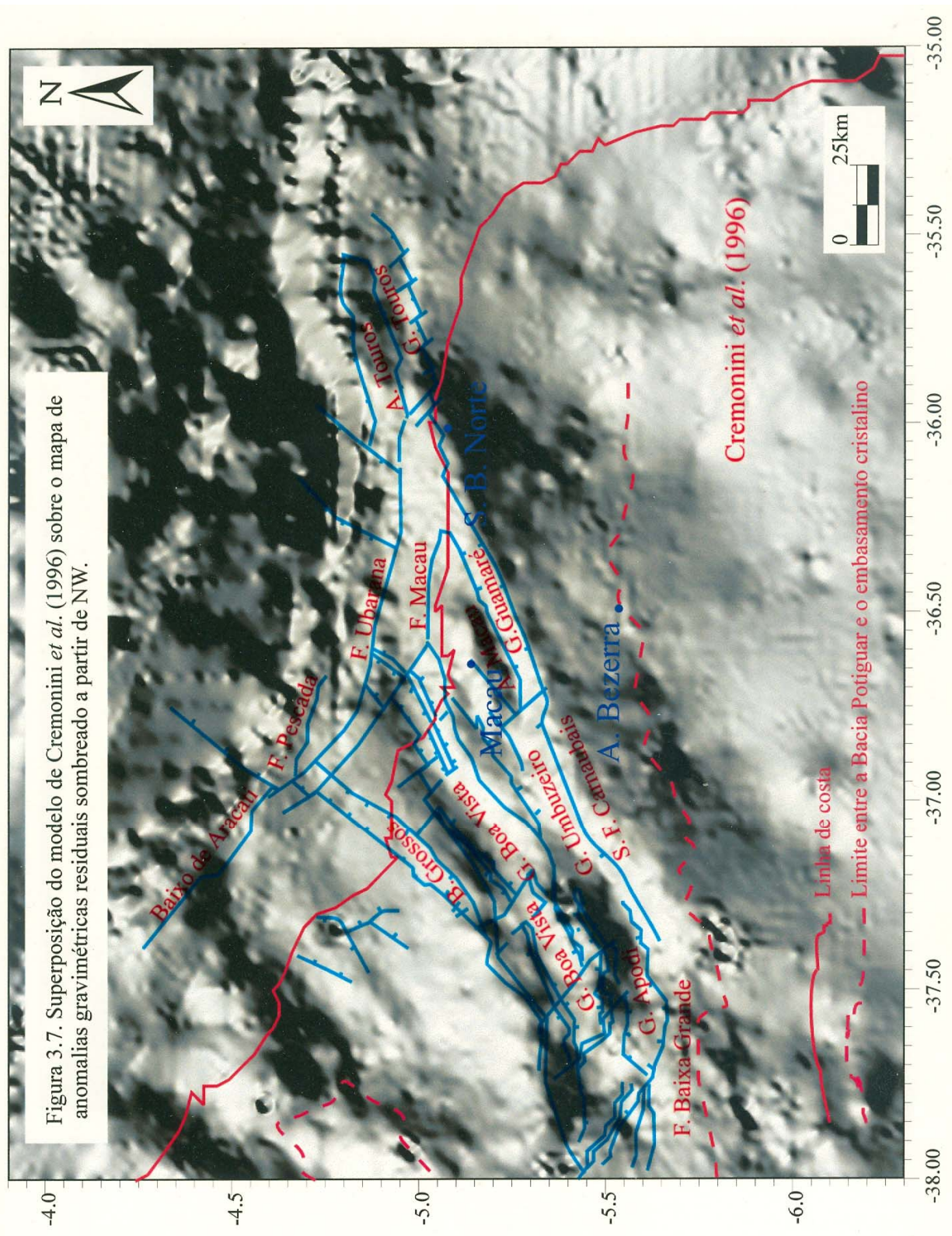
Utilizando a iluminação NE, a calha da bacia não fica bem delimitada. Todavia, agora é possível visualizar lineamentos de direção NW (letras **A**, **B** e **C** na Figura 3.8), associadas ao SFAB. A superposição do mapa de estações com o mapa de anomalias residuais sombreado mostra que o lineamento A, pelo menos no seu extremo sul (letra **A** nas Figuras 3.6 e 3.8), parece tratar-se de um artefato de processamento. Nesse local a cobertura gravimétrica é deficiente o que pode influir na técnica de sombreamento. Todavia, os lineamentos mais superiores (letras **B**, **C** e **D** nas Figuras 3.6 e 3.8), possuem uma cobertura gravimétrica mais abrangente e com distribuição aleatória. Isto permite sugerir que essas porções do lineamento não constituam um artefato, e sim uma feição ligada à estruturação NW que corta a região. Como foi afirmado no item anterior (Mapa

de anomalias gravimétricas), aparentemente, a resolução do método é alta o suficiente para detectar um contraste lateral de densidade em uma falha com pequeno deslocamento vertical.

Novamente foi realizada a sobreposição do mapa estrutural da calha NE da Bacia Potiguar (Cremonini *et al.* 1996) sobre o mapa residual, porém agora com a iluminação a partir de NE (Figura 3.9). O ajuste de ambos, a exemplo da sobreposição supracitada, foi bastante satisfatório. Todavia, neste caso os lineamentos NW, obtidos no sombreamento do mapa residual, representam um avanço em relação ao mapa estrutural. A análise da Figura 3.9 mostra que estes lineamentos, correlatos ao SFAB, coincidem em parte com lineamentos de mesma direção traçados por Cremonini *et al.* (1996) no interior da calha NE da Bacia Potiguar. Este fato justifica a existência dos lineamentos NW traçados no sombreamento do mapa residual mostrando que, apesar do SFAB ser considerado como transcorrente dextral (Oliveira *et al.* 1996, ver capítulo 2), existe um deslocamento vertical detectável pela gravimetria. O fato deste deslocamento não ter sido detectado anteriormente pode estar relacionado à precisão dos métodos empregados. Além disso, como será visto no capítulo 4, dados de terrenos também confirmam um deslocamento vertical associado ao SFAB. Este deslocamento vertical não deve atingir grandes dimensões, caso contrário o seu reflexo na gravimetria seria bem expressivo, a exemplo do SFC. Do ponto de vista estrutural, é preciso notar que os alinhamentos NW podem incluir feições de idades distintas, mais jovens e associadas ao SFAB, e as mais antigas correspondentes a falhas de transferências associadas a tectônica extensional de idade cretácea.







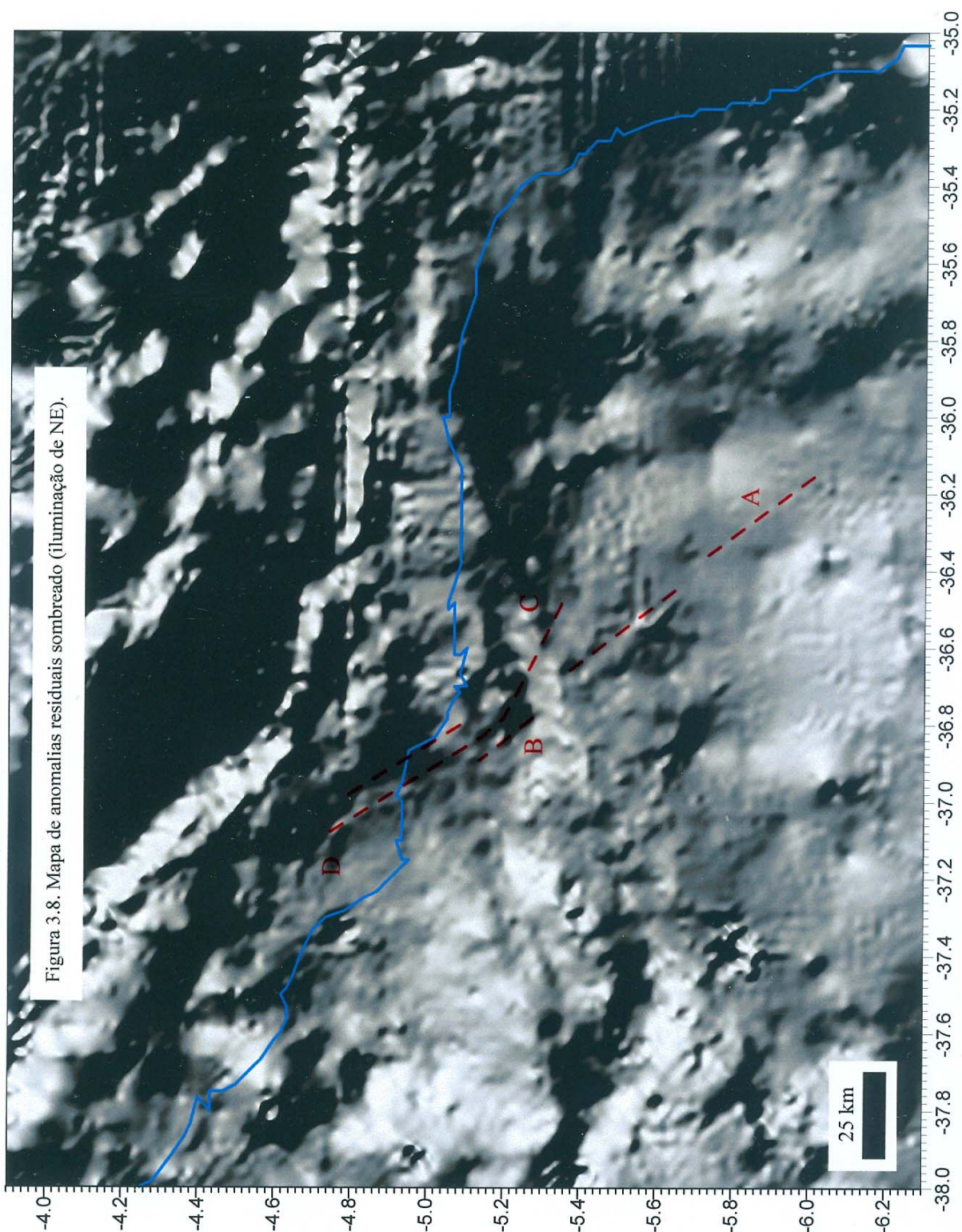


Figura 3.8. Mapa de anomalias residuais sombreado (iluminação de NE).

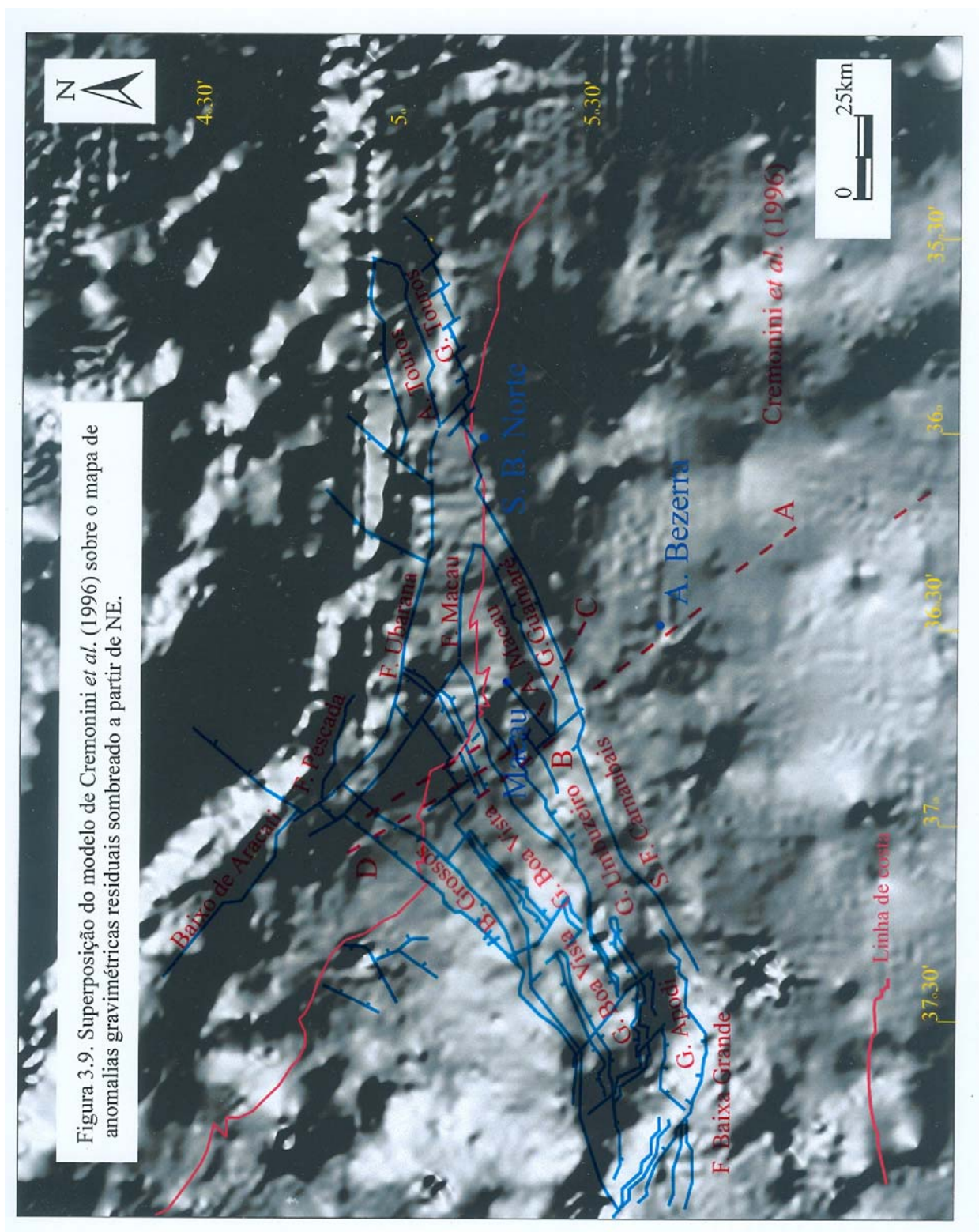


Figura 3.9. Superposição do modelo de Cremonini *et al.* (1996) sobre o mapa de anomalias gravimétricas residuais sombreado a partir de NE.

CAPÍTULO IV

IV. SENSORIAMENTO REMOTO E CORRELAÇÃO COM DADOS DE TERRENO

O Sensoriamento Remoto (SR) é utilizado nos diversos campos do conhecimento. Imagens meteorológicas, de regiões de queimadas, de cidades, de zonas de conflitos internacionais, para confecção de catálogos de viagem, etc, são alguns dos exemplos mais comuns. Crósta (1993) cita estudos geológicos, ambientais, florestais e oceanográficos, dentre outros, como exemplos da utilização do SR sob o ponto de vista técnico-científico. Fatores como a rapidez, a eficiência e a periodicidade na aquisição de imagens justificam sua utilização em ciências como a geologia, agronomia, cartografia, oceanografia, urbanismo, etc, tornando o monitoramento ambiental viável. O uso desta tecnologia resulta em uma grande quantidade de dados, representados na forma de imagens digitais. Aliado a essa enorme quantidade de dados, degradações na área e distorções oriundas do processo de aquisição, transmissão e visualização das imagens contribuem para limitar a capacidade de interpretação do sistema visual humano, implicando na necessidade do tratamento destes dados, o qual permite visualizar apenas partes de interesse, caracterizadas em função das propriedades que compõem as imagens.

A área pesquisada mostra lineamentos que correspondem à expressão superficial dos sistemas de falhas de Afonso Bezerra e Carnaubais, SFAB e SFC, respectivamente. Pelos métodos tradicionais, tais como estudo de fotografias aéreas e imagens de satélites no papel, o SFAB é marcante, enquanto o SFC é praticamente imperceptível. Visando aprimorar o mapeamento destes lineamentos, esta dissertação empregou tratamentos específicos nas imagens digitais, para realçar feições superficiais. Além disto, evidências de reativações recentes encontradas em campo foram associadas à interpretação das imagens. Um terceiro grupo de lineamentos, com direção N-S, também foi reconhecido na área, tanto em campo como nas imagens.

Duas técnicas de tratamento foram aplicadas às imagens digitais: o sombreamento de imagens digitais (SID) e a composição de imagens coloridas (RGB). Associados a essas técnicas, foram testados vários filtros, obtendo-se bons resultados com a aplicação

de um Filtro Gaussiano, o qual suavizou os pixels das imagens tratadas pelo SID, e a aplicação de um Filtro Sobel, que realçou a sensação de relevo em composições coloridas. Além disso, transformações logarítmicas, transformantes *slice-level* e equalizações gaussianas foram utilizadas para intensificação e realce de cores e uma melhor definição dos contornos dos alvos.

Os produtos digitais foram adquiridos junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Cada imagem constitui uma cena cuja varredura está em torno de 26 segundos, permitindo recobrir uma área de 185 x 185 Km. Essa cena, por sua vez, pode ser dividida em quadrantes de varredura de 14 segundos, cobrindo uma área de 92 x 92 Km. Uma subdivisão dos quadrantes em quadrados de 7 segundos de varredura (46 x 46 Km) pode ser feita para o estudo de pequenas áreas. Cenas e quadrantes foram obtidos em formato digital, gravados em CD-ROM e foram adquiridos com o nível de correção 4, o qual consiste numa correção geométrica ao longo de cada linha que compõe uma cena (6208 nos produtos utilizados). Neste caso, são feitas reamostragens de pixels para remover variações do movimento do espelho do satélite (INPE 1995; LANGE Jr., 1998).

Para um aprofundamento no assunto sugere-se a leitura dos seguintes autores: Affonso (1991), Amaro (1998), Novo (1992), Crósta (1993) e EARTH RESOURCE MAPPING PTY LTD. (1995a, 1995b e 1995c).

4.1 O SOMBREAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS (SID)

O processamento das imagens através da técnica de SID simula a iluminação da área escolhida, realçando lineamentos perpendiculares à direção de iluminação e permitindo uma melhor visualização e cartografia. Este processamento é suscetível à geração de artefatos na imagem (falsos lineamentos), causando problemas ao intérprete. Estradas, cercas, rede elétrica e quaisquer outras feições lineares podem vir a ser confundidas com feições geológicas lineares. Uma forma de evitar este problema é ter um bom controle de campo sobre as principais feições que ocorrem na área. Além disso, este controle pode ser exercido à medida que se tenha a mão uma imagem bruta na mesma escala das imagens tratadas, a qual pode ser usada para comparação, identificação e eliminação de artefatos.

4.2. AS COMPOSIÇÕES COLORIDAS (RGB)

O emprego de bandas espectrais para composições **RGB** facilita a interpretação na medida em que realça feições superficiais, não detectadas nas técnicas anteriores. O contraste de cores, resultante dos diferentes comportamentos espectrais dos alvos, auxilia na diferenciação das unidades litológicas e, em diversos casos, no reconhecimento de lineamentos. No entanto, devido à variedade dos resultados, é necessário definir critérios que auxiliem na escolha das melhores imagens. Características como o **emprego da imagem**, a **nitidez**, o **detalhe**, o **realce**, a **visibilidade dos lineamentos** e a **sensação de relevo** são decisivos. No caso do SID, tais critérios auxiliam na eliminação dos artefatos de imagens supracitados. Outro critério importante diz respeito ao *hardware* (disco rígido). O processamento deve evitar sobrecarga na CPU (Unidade Central de Processamento). A técnica de filtragem das frequências espaciais e as composições coloridas exigem **velocidade de processamento**, implicando em consumo de memória RAM (*Randomic Aleatory Memory*), além do espaço no *HardDisk*. Imagens mal selecionadas, excesso de filtros e grandes áreas de trabalho exigem computadores cada vez mais potentes.

Imagens **RGB** devem apresentar **contraste litológico**, auxiliando o estudo geológico. Além disso, a **proximidade com as cores** superficiais e o emprego de **cores harmoniosas** agradam à vista, facilitam a interpretação e permitem o descanso visual.

Finalmente, o **vínculo geológico**, baseado em dados de terreno, permite a definição de litologias e estruturas de difícil interpretação, confirmando ou descartando alvos diferentes, porém com mesma resposta espectral.

4.3. ANÁLISE DOS LINEAMENTOS E CORRELAÇÃO ESTRUTURAL

A análise dos produtos digitais, obtidos segundo as técnicas supracitadas, conduziram a uma série de resultados que, apoiados por dados de terreno, permitiram caracterizar e aprimorar a disposição geográfica dos principais lineamentos da área e sua relação com as unidades aflorantes. Estes dados também permitiram inferir movimentação relativa e respectivas idades, que correspondem aos sistemas de falhas de Carnaubais, com direção NE, e de Afonso Bezerra, com direção NW, além de um

terceiro sistema de fraturas, com direção N-S. A orientação estatística destes lineamentos é mostrada na roseta apresentada a seguir (Figura 4.1).

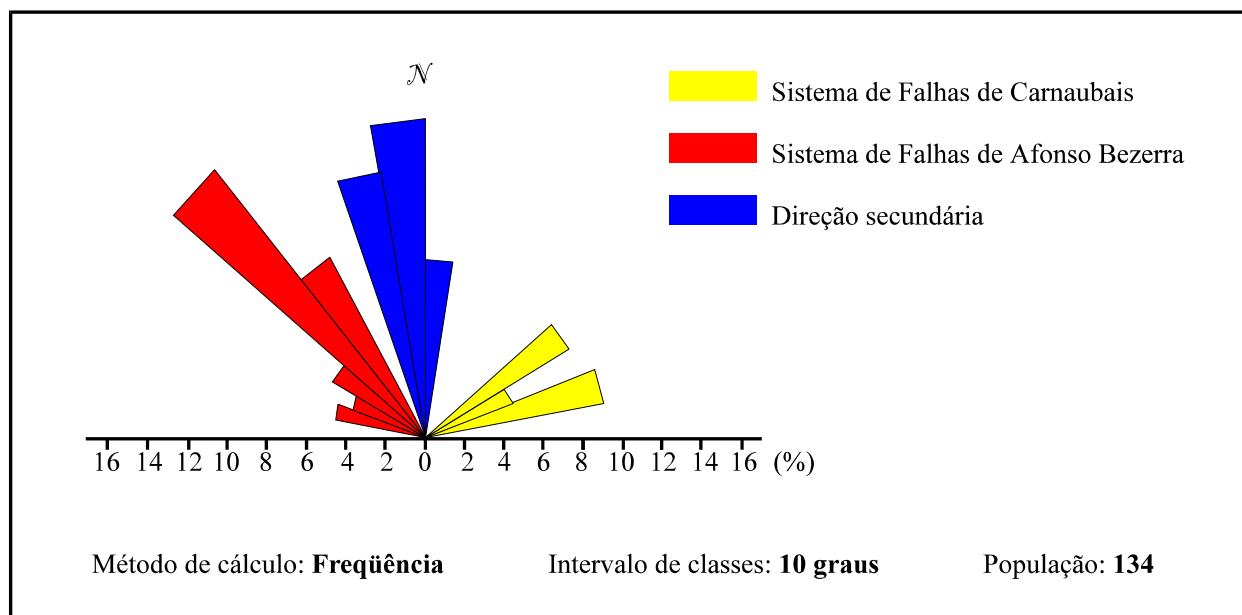


Figura 4.1. Roseta apresentando a orientação estatística dos três grupos de lineamentos encontrados na área.

O emprego do SID mostrou que os melhores resultados foram obtidos quando a fonte luminosa foi direcionada (1) a partir de 315° de azimute e 15° de elevação solar, realçando o SFC (Figura 4.2) e (2) a partir de 45° de azimute e 15° de elevação solar, evidenciando o SFAB e uma direção N-S associada a lineamentos de menor porte (Figura 4.3). Os traços obtidos nesses mapas foram transferidos para uma imagem bruta da banda 4, servindo para comparação com as feições de superfície (Figura 4.4).

No que diz respeito às imagens **RGB**, diversas composições foram elaboradas resultando em variadas respostas espectrais. Dentre elas, a composição utilizando as bandas 1 (região do visível no espectro eletromagnético), 4 (região do infravermelho próximo) e 7 (região do infravermelho médio), resultou numa forte diferenciação de cores, onde as unidades pertencentes ao embasamento cristalino tenderam para um marrom escuro contrastando com a rede de drenagem, enquanto os sedimentos da Bacia Potiguar variaram entre uma tonalidade clara, tendendo para o amarelo, e o verde (Figura 4.5). Além disso, a composição (Figura 4.6), com as bandas 1 (região do visível), 5 e 7 (região do infravermelho médio), forneceu uma imagem predominantemente verde clara,

porém com a peculiaridade de ressaltar em tom vermelho as rochas basálticas terciárias tais como o Pico do Cabugi, próximo à cidade de Lages (RN).

Como citado anteriormente, três direções principais foram obtidas na área: (1) NE-SW, associada ao SFC, (2) NW-SE, associada ao SFAB e (3) N-S, como uma direção secundária. Estes lineamentos possuem uma história geológica comum, onde eventos tectônicos provocaram diversas reativações ao longo do tempo e serão detalhados nos itens a seguir. Em caráter preliminar, são reconhecidas a seguintes hipóteses:

(a) O SFAB e o SFC teriam idades similares (Cretáceo inferior) e, neste caso, o SFAB representaria falhas de transferência do sistema NE extensional;

(b) O SFAB seria um sistema antigo (?) que teria sofrido uma reativação durante o Terciário superior (Oligo-Mioceno), segundo uma direção de extensão SW-NE, resultando num padrão de blocos escalonados. Hackspacher *et al.* (1985) associaram este tectonismo a episódios vulcânicos da Formação Macau (Figura 2.1.2);

(c) O SFAB, cujo expoente máximo é a Falha de Afonso Bezerra, teria sofrido uma reativação durante o Terciário devido a uma compressão N-S. Esta reativação teria gerado um sistema de fraturas extensionais N-S. Nesta hipótese, a intrusão das rochas vulcânicas estaria associada ao evento tectônico. Oliveira *et al.* (1993), descreveram a Falha de Afonso Bezerra, caracterizando-a como uma falha direcional dextral com componente contracional;

(d) O SFAB e o SFC ainda teriam sofrido reativação neotectônica (Holoceno; Lima *et al.* 1990). Vários autores, dentre eles, Caldas *et al.* (1997, 1998), Bezerra *et al.* (1998) e Dantas *et al.* (1997) realizaram estudos neotectônicos no SFC, enquanto Fonseca (1996) e Dantas *et al.* (1997), abordaram o SFAB.

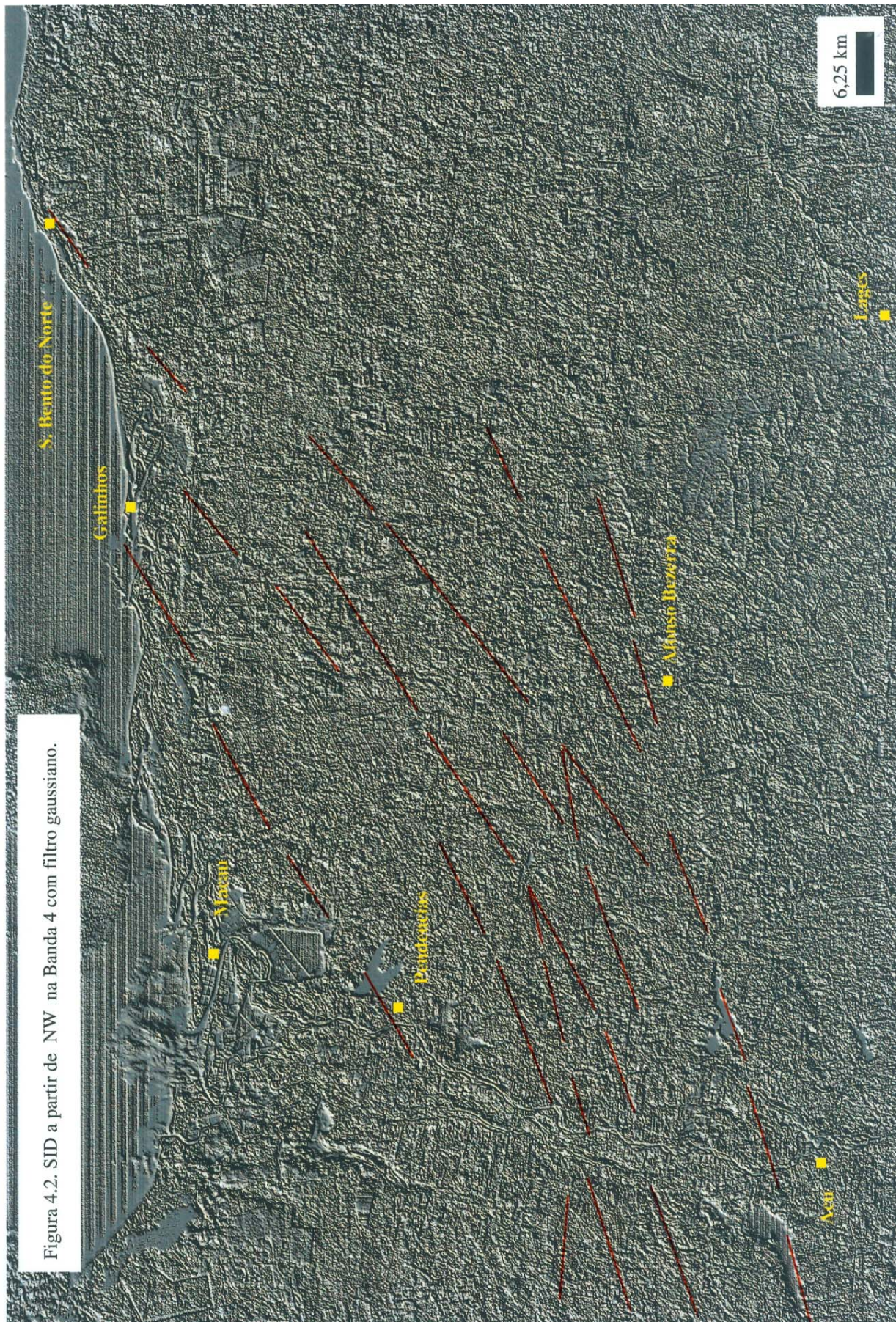


Figura 4.2. SID a partir de NW na Banda 4 com filtro gaussiano.

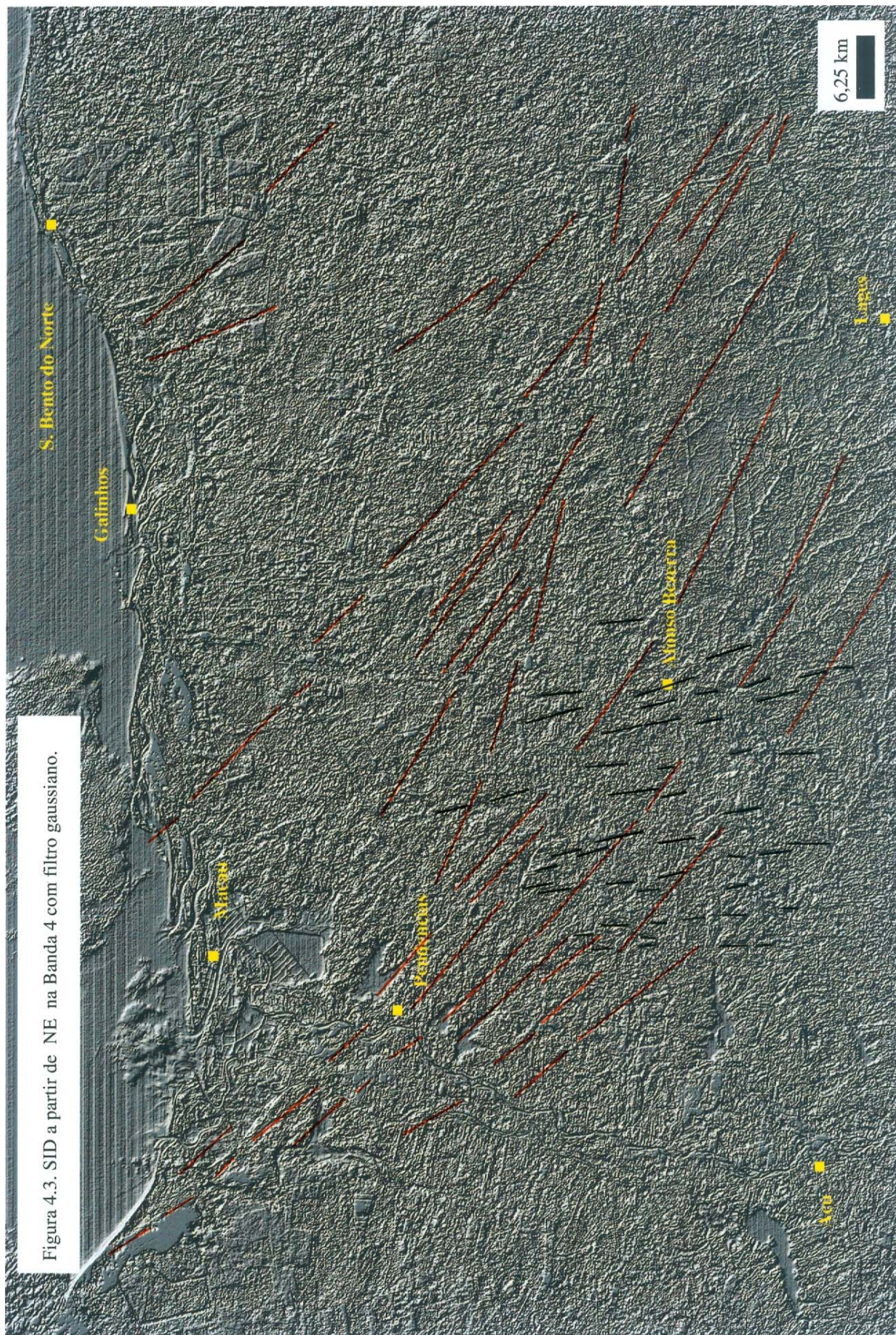


Figura 4.3. SID a partir de NE na Banda 4 com filtro gaussiano.

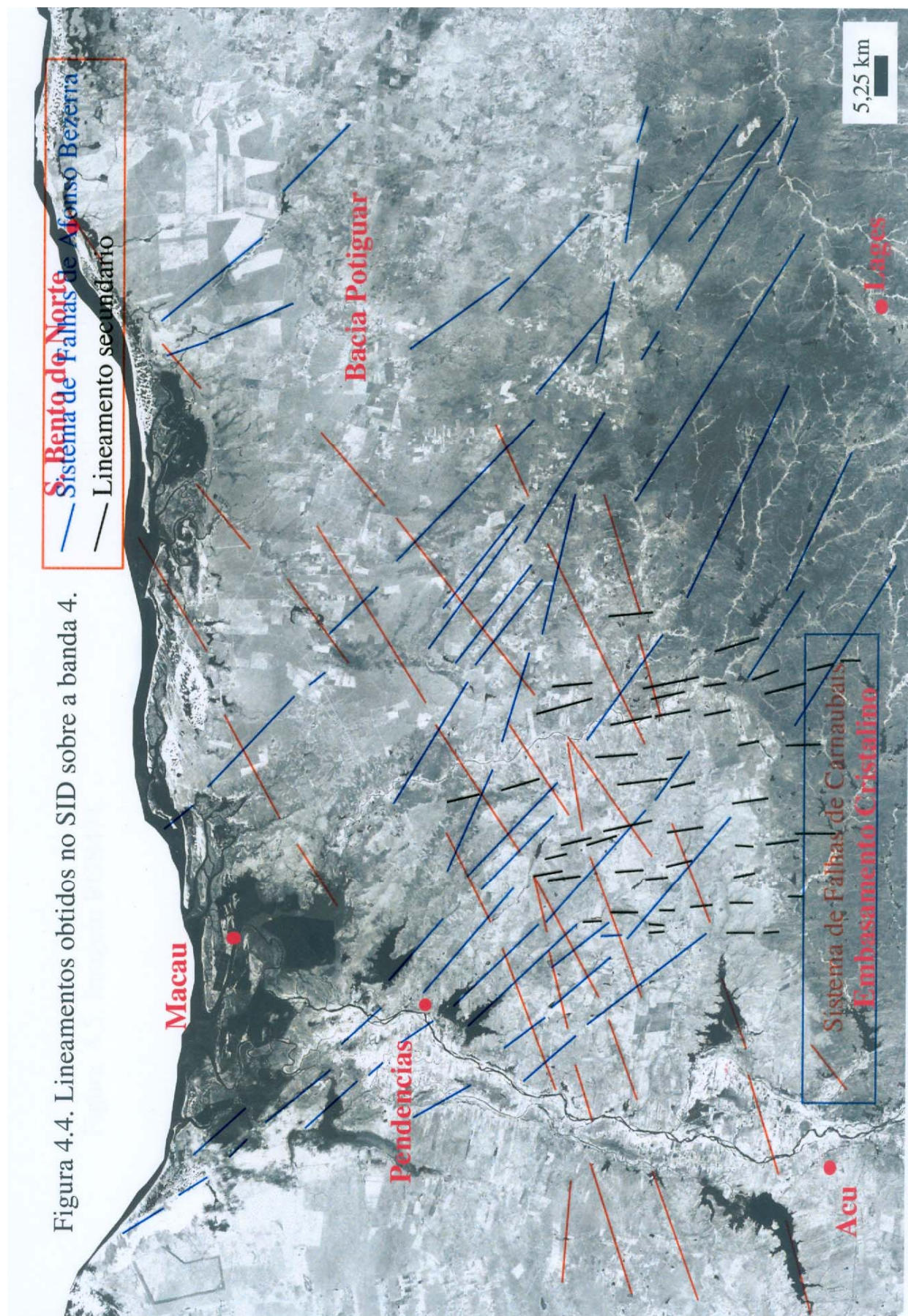


Figura 4.4. Lineamentos obtidos no SID sobre a banda 4.

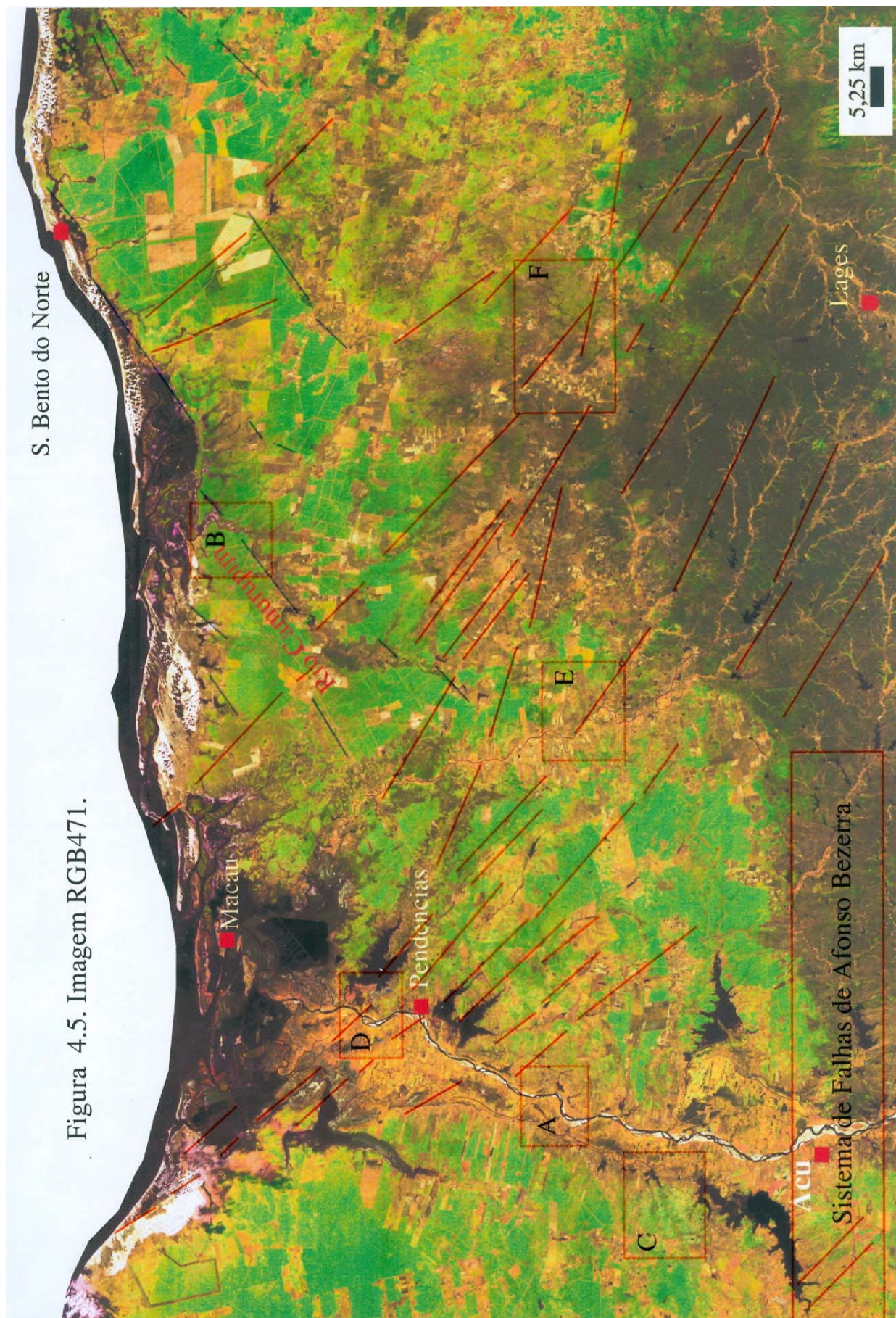


Figura 4.5. Imagem RGB471.

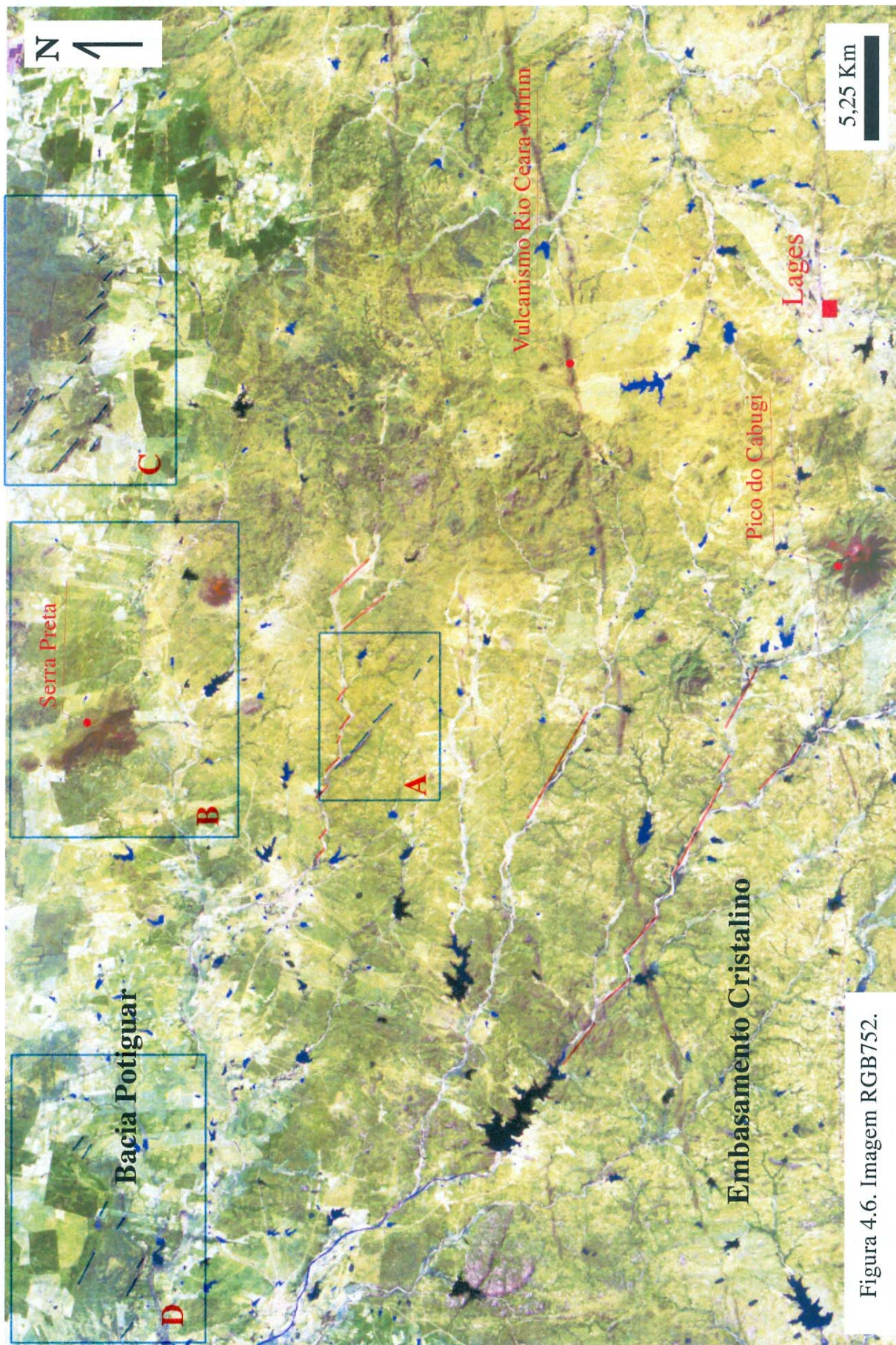


Figura 4.6. Imagem RGB752.

4.3.1. OS LINEAMENTOS NE

A Falha de Carnaubais, expressão máxima dos lineamentos que correspondem ao SFC, possui um importante deslocamento vertical, alcançando até 6000 m de profundidade, evidenciados pela geofísica (ver capítulo 3) e sondagens. Todavia, esta falha cretácea apresenta poucos reflexos superficiais. Em muitos locais, uma extensa cobertura, correspondente a sedimentos da Formação Barreiras e depósitos recentes (Quaternário), encobre eventuais expressões do SFC.

Diversos estudos tratam de reativações no SFC. Cremonini *et al.* (1996) reconhecem uma intensa reativação que teria atingido o extremo Nordeste do Brasil, deformando o Rifte Potiguar. Estes autores consideraram um esforço distensivo máximo segundo a direção WNW-ESE. O autor comparou esta reativação à fase Sin-Rifte II de Matos (1992).

Caberia aqui discutir a possibilidade do SFC, pelo menos em parte, estar controlado por fraturas tardi-brasilianas, de forma semelhante ao SFAB, conforme será visto adiante. Alguns autores (Françolin e Szatimari 1987, p. ex.) levantaram a possibilidade de conexão do SFC com a Zona de Cisalhamento de Portalegre. Todavia, o *trend* mapeado dessa zona (N40-45E), diverge daquele do SFC e não permite confirmar essa sugestão. Na região de João Câmara, a sul da Bacia Potiguar, Coriolano *et al.* (1997) mostram que fraturas tardi-brasilianas de direção NE (40Az) apresentam um movimento transcorrente dextral. Todavia, a diferença da direção aceita para o SFC, em torno de N50-60E (Figuras 4.1, 4.2 e 4.4), parece ser significativa, sugerindo que este sistema de falhas não teria sido controlado pelas fraturas tardi-brasilianas.

Dados sobre reativações recentes no SFC foram levantadas por Bezerra *et al.* (1997 e 1998), Caldas *et al.* (1997a, 1997b), Caldas (1998) e Dantas *et al.* (1997), dentre outros. De uma maneira geral, esses autores reconhecem uma reativação recente no SFC, ocorrida durante o Quaternário, que teria provocado subsidência a NW e soerguimento a SE da Falha de Carnaubais, próximo à região de São Bento do Norte (RN).

Os lineamentos NE, evidenciados neste trabalho, são correlatos ao SFC e mostram uma menor densidade de traços, se comparados aos NW, correlatos ao SFAB. A Figura 4.1 mostra que esses lineamentos possuem duas orientações próximas, porém distintas.

Na Figura 4.4 observa-se que os lineamentos do quadrante NE da área seguem a direção N50-60E, enquanto no quadrante SW, sofrem uma inflexão para a direção N70-80E.

As imagens coloridas permitiram o estudo das relações entre os lineamentos de direção NE e as unidades lito-estratigráficas, e colocam em evidência a rede de drenagem da região (ver Figura 4.5 e mapa geológico no Anexo 01). Este estudo revelou algumas peculiaridades: (1) Apesar de ser menos freqüente, ocorre um controle desta direção (NE) sobre a rede de drenagem. Observa-se que os lineamentos NE provocam inflexões em trechos de rios, como por exemplo a inflexão marcada pelo quadrado **A** na Figura 4.5, e o controle exercido sobre o Rio Camurupim (quadrado **B** na Figura 4.5). Além disto, alguns pequenos afluentes do Rio Açu, no quadrante SW, indicam que o controle tectônico pela direção NE também ocorre nesse local (quadrado **C** na Figura 4.5). (2) No mapa geológico da área, observa-se que os contatos entre os sedimentos das formações Barreiras e Jandaíra podem estar parcialmente alinhados na direção NE, sugerindo uma reativação pós-Barreiras do SFC, a qual estaria controlando o padrão de denudação dessa cobertura. Estas feições podem ser observadas na Figura 4.5, onde foram traçadas linhas de cor azul na direção NE; (3) a SW de São Bento do Norte (RN), o contato entre a Formação Barreiras a planície de maré também parece ser controlado por esse *trend*, sugerindo um significado similar.

A partir do estudo de eletro-resistividade em uma área a SW de São Bento do Norte (RN), Caldas *et al.* (1997b) e Caldas (1998) caracterizaram um sistema de falhas de alto ângulo com movimentação normal-dextral, resultado de uma extensão NE-SW. Estes autores afirmaram que o Rio Camurupim estaria controlado pelo SFC, sendo este rio o limite entre um bloco rebaixado a norte e outro soerguido, a sul. A ocorrência de deslocamento vertical de blocos na região, assim como o fato da direção (NE) do Rio Camurupim ser paralela ao alinhamento formado pelos contatos destas unidades, transforma-se numa informação relevante para este estudo, pois corrobora a hipótese de que falhamentos de alto ângulo estariam controlando as relações de contatos entre as unidades lito-estratigráficas supracitadas. Todos esses dados indicam que a reativação pós-Barreiras aqui reconhecida teria provocado soerguimento e rebaixamento de blocos, provavelmente combinado a um componente transcorrente dextral observado na região

costeira (ver adiante). Esta estruturação permitiu preservar os sedimentos da Formação Barreiras em baixos estruturais orientados segundo a direção NE, explicando o alinhamento dos contatos das unidades lito-estratigráficas segundo esta direção. Nos altos estruturais esta formação teria sido erodida, aflorando o Calcário Jandaíra e gerando escarpas de linha de falha (Figura 4.7).

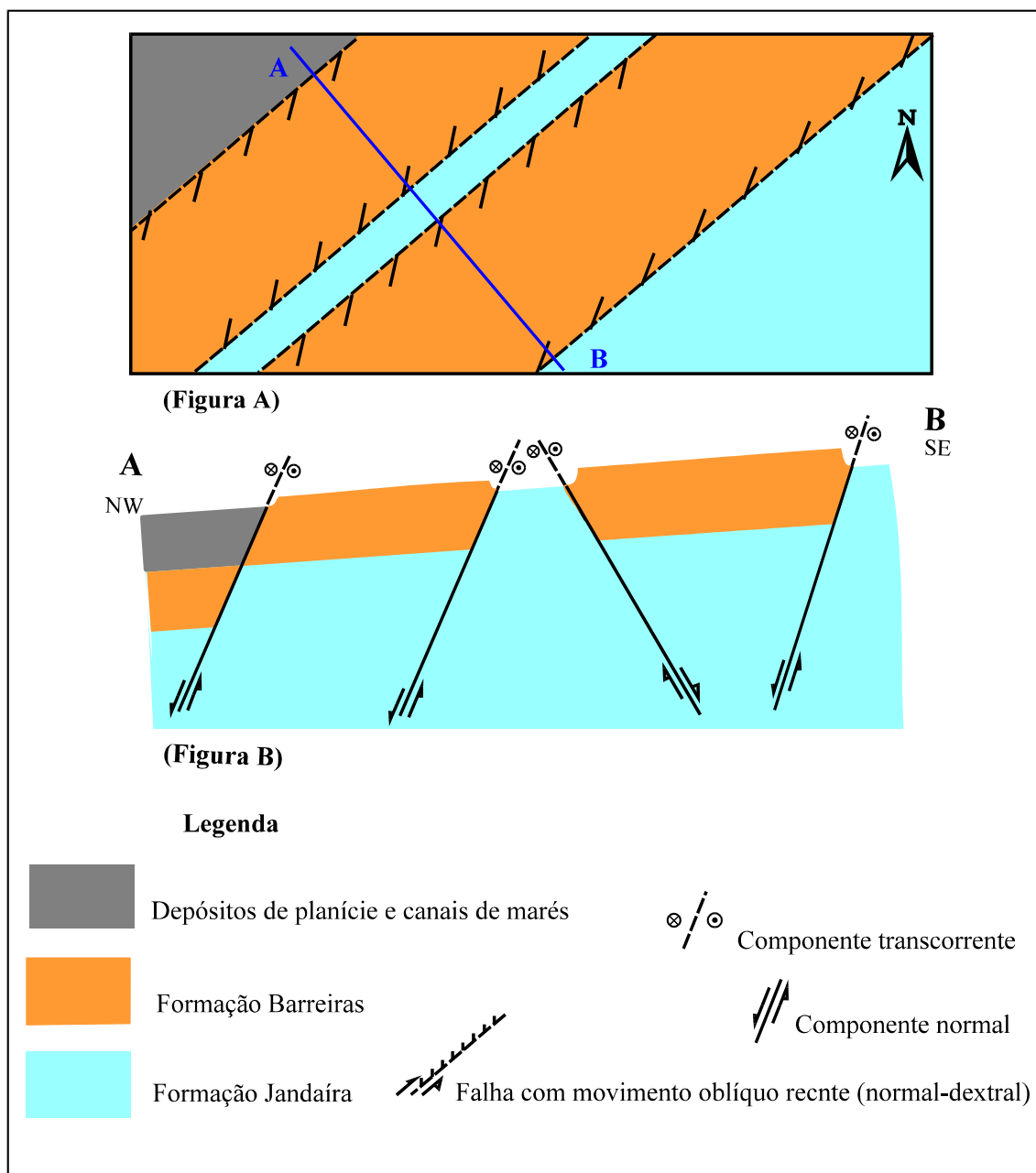


Figura 4.7. Modelo sugerido para a reativação pós-Barreiras recente que afetou o SFC. Falhas extensionais com componente transcorrente dextral permitiram a preservação dos sedimentos da Formação Barreiras em baixos estruturais. Visão (A) em mapa e (B) em perfil; o caimento para NW e as escarpas de linha de falha podem ser observadas em campo e/ou no mapa topográfico. O movimento transcorrente foi deduzido por Caldas (1998) a partir de estudos de *beachrocks* na região de São Bento do Norte (RN). Observar mapa geológico no Anexo 01.

Na correlação com dados de terreno, o maior problema para caracterização dos lineamentos NE foi a pequena quantidade de afloramentos na região. A maior parte dos lineamentos encontra-se em áreas da Formação Jandaíra (Turoniano-Campaniano). Em menor número, são também encontrados nos sedimentos das formações Açú (Albiano-Cenomaniano) e Barreiras (Oligoceno-Plioceno). Além disso, exposições restritas de sedimentos da Formação Tibau (Campaniano aos dias atuais), depósitos de cascalheiras associados ao Rio Açú, e sedimentos recentes (depósitos de planícies e canais de marés), além dos basaltos da Formação Macau (Oligoceno-Mioceno), também estão cortados por estes lineamentos (ver lineamentos sobrepostos ao mapa geológico no Anexo 01).

Pesquisas desenvolvidas em conjunto com Caldas *et al.* (1997a) revelaram a ocorrência de *beachrocks* ao longo do litoral norte do Rio Grande do Norte, entre as localidades de Galinhos e São Bento do Norte. Estas rochas apresentam indícios de uma reativação recente do SFC, já no Holoceno. Ocorrência de falhas (Foto 4.1) e evidências de movimentação dextral, incluindo um componente extensional de direção N-S (Figura 4.8), levaram Caldas (1998) a propor o rebaixamento da área a NW do SFC. Coincidente com a projeção do SFC no litoral, estes *beachrocks* mostram escarpas pontiagudas recortando a linha de praia, além de mergulharem em torno de 5° na direção das escarpas, sugerindo um movimento extensional ao longo das fraturas ENE, em ângulo com a linha de costa. Os estudos de Bezerra *et al.* (1998) corroboram as observações de Caldas (1998), pois aqueles autores teriam encontrado evidências de soerguimento a SE, e subsidência a NW do SFC, próximo a São Bento do Norte (RN), com base nas datações e faciologia dos *beachrocks*.

O condicionamento morfotectônico aqui proposto difere daquele descrito por Lima *et al.* (1990), cuja direção ENE de compressão máxima implicaria num rejeito essencialmente normal para a reativação holocênica do SFC. Nessa dissertação, os dados estruturais obtidos nos *beachrocks* de São Bento do Norte (Caldas *et al.* 1997a) nos conduziram à interpretar uma reativação oblíqua, normal-dextral do SFC.



Foto 4.1. Registro de falhas nos *beachrocks* entre Galinhos (RN) e São Bento do Norte (RN), representado numa brecha tectônica (Folha SB-24-X-D-III, UTM: 811,346kmE e 9.436,042kmN).

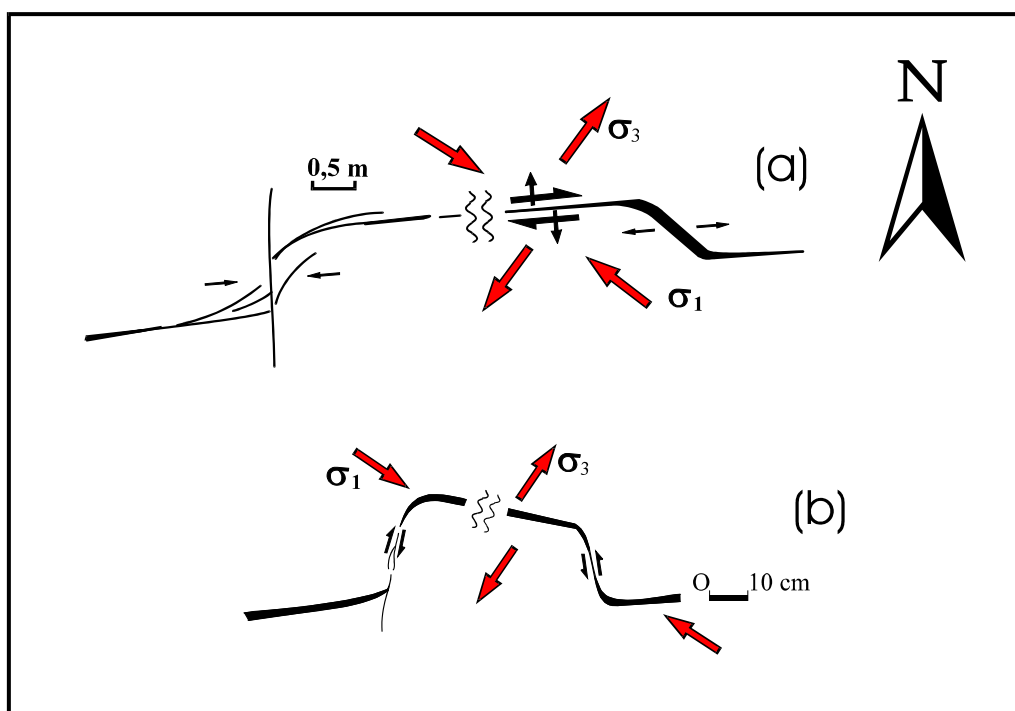


Figura 4.8. Indicadores cinemáticos encontrados nos *beachrocks* de São Bento do Norte (RN). Em (A) zonas de transpressão (esquerda) e transtração (direita) revelam uma cinemática transtracional dextral, e em (B) falhas extensionais com zonas de transferências, caracterizando uma cinemática extensional com componente direcional dextral. Os traços cheios, em preto, representam um preenchimento por carbonato de cálcio e/ou areia cimentada. Reproduzido de Caldas *et al.* (1997a).

4.3.2. OS LINEAMENTOS NW E N-S

Os lineamentos NW, correlatos ao SFAB, são bem marcados na área e exercem forte controle sobre a rede de drenagem. A análise da distribuição espacial e da geometria do sistema de falhas NW, mostrou que, sobre o embasamento cristalino, os lineamentos possuem uma extensão em torno de 17 a 43 km. Por outro lado, sobre a Bacia Potiguar, duas faixas de comprimento podem ser identificadas: (1) na porção central da área, entre o embasamento cristalino e o litoral e (2) próximo ao litoral, a oeste da cidade de Macau (RN), está em torno de 3 a 11 km (Figuras 4.3 e 4.4).

As imagens coloridas ressaltaram o comportamento da rede de drenagem, assim como também a relação entre os lineamentos de direção NW e as litologias da área, além de revelar a relação destes lineamentos com rochas vulcânicas e graníticas. O mapeamento de rochas basálticas é facilitado pela composição **RGB** 7, 5 e 2 pois ela imprime, nas rochas supracitadas, um tom avermelhado que contrasta com o verde claro exibido pelas outras litologias da área (Figura 4.6).

A composição **RGB** 7, 5 e 2 revelou feições de relevância: (1) diques de granito alinhados na direção NW (letra **A** na Figura 4.6); (2) alinhamento das serras formadas por rochas basálticas, tais como o *neck* de Serra Preta (letra **B** na Figura 4.6), segundo a direção supracitada, e (3) ocorrência de escarpas orientadas segundo a mesma direção, em calcários da Formação Jandaíra (letras **C** e **D** na Figura 4.6 e **F** na Figura 4.5). Estas evidências sugerem diversas movimentações do SFAB ao longo do tempo geológico.

No que diz respeito à rede de drenagem, o Sistema de Falhas de Afonso Bezerra (direção NW) exerce um controle mais intenso do que o exercido pelo Sistema de Falhas de Carnaubais (direção NE), provocando inflexões no curso dos rios Açu e Amargoso (letras **D** e **E** na Figura 4.5). Além disso, percebe-se que este controle existe tanto na Bacia Potiguar quanto no embasamento cristalino. Isto fica evidente quando se observam os lineamentos NW na Figura 4.5 (Bacia Potiguar) e as linhas vermelhas traçadas na Figura 4.6 (embasamento cristalino).

A expressão máxima dos lineamentos NW é representada pela Falha de Afonso Bezerra, caracterizada por Hackspacher *et al.* (1985) como um sistema de falhas normais. Posteriormente, Oliveira *et al.* (1993) reconheceram uma cinemática transcorrente dextral

nesta falha, como resultado de um evento compressivo de direção N-S. Estes autores identificaram uma zona de transpressão a norte da cidade de Afonso Bezerra (RN), onde pode ser observada uma falha direcional dextral com componente contracional (Foto 4.2 e Figura 4.9), na forma de uma estrutura em “flor” positiva, associada a uma dobra cônica periférica. A idade dessa estruturação não pôde ser precisada pelos autores, pela falta de dados. A Foto 4.3 mostra as estrias de baixo *rake* (horizontais) no calcário, associadas a esta movimentação transcorrente.



Foto 4.2. Visão do Afloramento de Afonso Bezerra, descrito por Oliveira *et al.* (1993), onde pode ser observada a falha direcional dextral (falha principal do afloramento, ver Figura 4.10) com componente de empurrão. Segundo estes autores, a falha teria uma direção aproximada E-W com mergulho variando entre 40° e 70° (Folha SB.24-X-D-II, UTM: 775,942kmE e 9.396,664kmN).

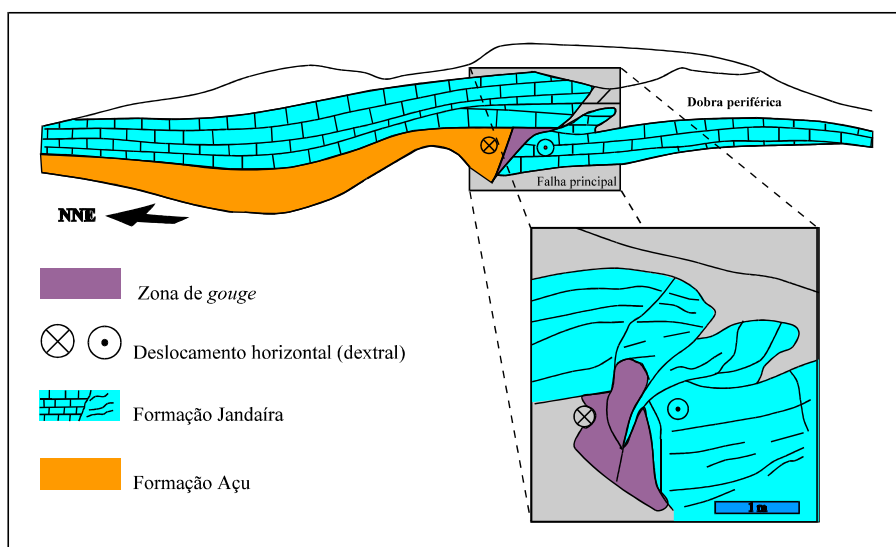


Figura 4.9. Esquema do Afloramento de Afonso Bezerra. No detalhe, a falha principal do afloramento, constituindo uma “flor” positiva, como resultado do componente contracional. (Reproduzido de Oliveira *et al.* 1993) (Fol. SB.24-X-D-II, UTM: 775,942kmE e 9.396,664kmN).

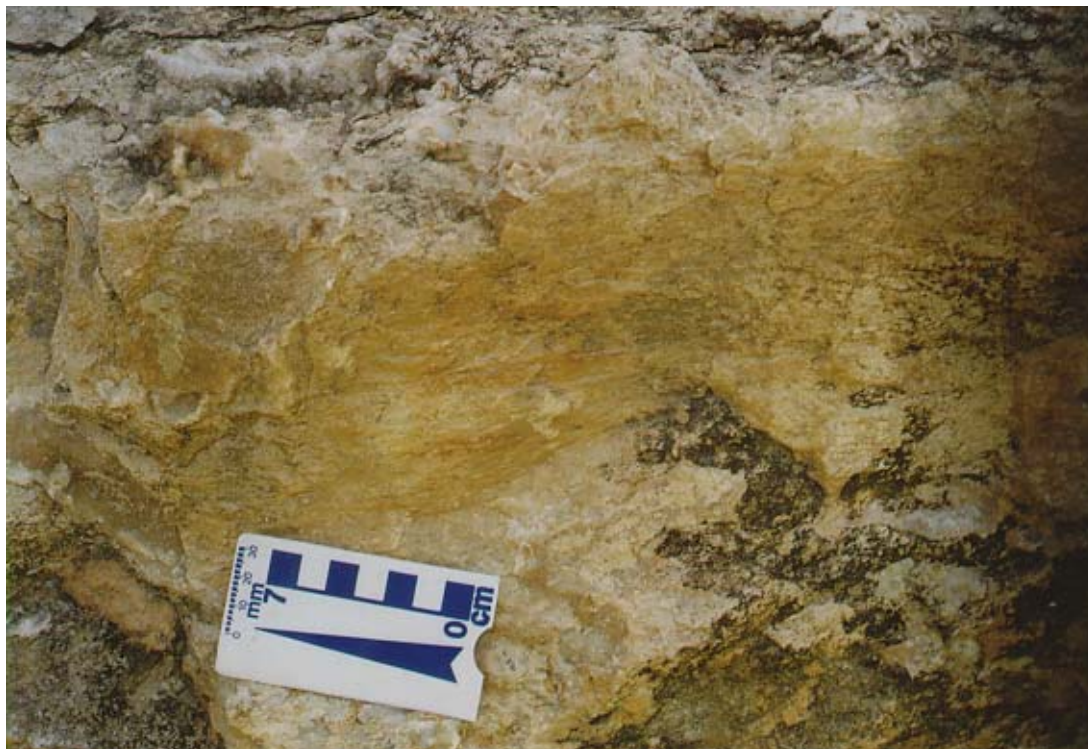


Foto 4.3. Estrias de baixo rake encontradas no Afloramento de Afonso Bezerra e descritas por Oliveira *et al.* (1993) (Folha SB.24-X-D-II, UTM: 775,942kmE e 9.396,664kmN).

Em outro afloramento, localizado sob um pontilhão da ferrovia que liga as cidades de Macau e Afonso Bezerra (RN), o qual dista aproximadamente 2 km na direção SW do cruzamento entre esta ferrovia e a estrada do óleo, foram observadas juntas de extensão com direção N-S e um conjunto de dobras com eixo E-W (Foto 4.4, 4.5 e 4.6, Figura 4.10). Estas estruturas também podem ser relacionadas ao esforço compressivo N-S proposto para a Falha de Afonso Bezerra (Oliveira *et al.* 1993).

A nível regional, os lineamentos N-S são encontrados na porção central da área e estão orientados entre as direções N0-10W e N-S (Figuras 4.1, 4.3 e 4.4, além do mapa geológico no Anexo 01), sendo aproximadamente paralelos à denominada Falha do Rio Amargoso (Hackspacher *et al.* 1985). A falha supracitada pode ser reconhecida como uma extensa linha que inicia no embasamento cristalino e termina na planície de maré próxima à cidade de Macau (RN), controlando o curso do Rio Amargoso. Em geral, os lineamentos N-S são formados por segmentos menores, os quais possuem uma extensão em torno de 2 a 8 km (Figuras 4.3 e 4.4, e o mapa geológico no Anexo 01). A análise do anexo supracitado mostra que estes lineamentos atingem desde rochas do embasamento até os sedimentos da Bacia Potiguar, onde puderam ser traçados principalmente sobre as

formações Açú e Jandaíra. Além disto, o mapa mostra que, na porção central da área, os contatos entre as formações Tibau, Jandaíra, Barreiras e Açú também mostram uma certa linearidade na direção N-S. A correlação dessas estruturas é compatível com um movimento extensional para a Falha do Rio Amargoso, concomitante ao rejeito dextral do SFAB. A extensão E-W associada aos lineamentos N-S também permitiria acomodar os *plugs* e edifícios subvulcânicos da Formação Macau, que formam um *trend* geral N-S (Sial *et al.* 1981, 1991).



Foto 4.4. Visão geral do Afloramento sob o pontilhão da linha férrea de Afonso Bezerra. Juntas extensionais de direção N-S são encontradas no canto direito inferior da foto, enquanto dobras E-W podem ser observadas na porção central, sobre o calcário Jandaíra (ver esquema na Figura 4.11) (Folha SB.24-X-D-II, UTM: 773,620kmE e 9.417,693kmN).

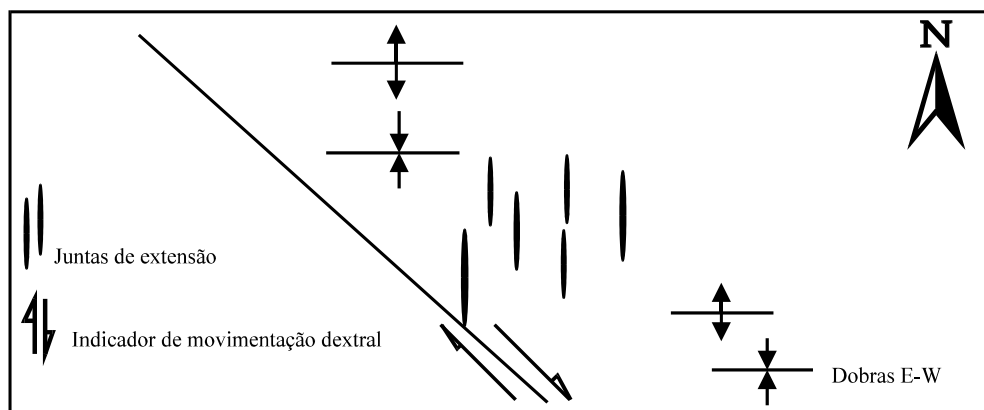


Figura 4.10. Esquema mostrando a estruturação encontrada no pontilhão da estrada de ferro Macau-Afonso Bezerra (RN). O movimento direcional dextral do SFAB, devido a uma compressão N-S, teria gerado juntas de extensão N-S e dobras E-W. (Folha SB.24-X-D-II, UTM: 773,620kmE e 9.417,693kmN).



Foto 4.5. Detalhe do afloramento do pontilhão da via férrea Macau-Afonso Bezerra (RN). Paralelo à direção indicada pelo martelo (aproximadamente N-S), encontram-se fraturas de extensão preenchidas por carbonato (ver esquema na Figura 4.11) (Folha SB.24-X-D-II, UTM: 773,620kmE e 9.417,693kmN).



Foto 4.6. Detalhe do afloramento do pontilhão da via férrea Macau-Afonso Bezerra (RN). Em primeiro plano, pode-se notar uma zona brechada. Ao fundo observam-se mini dobras no calcário, com eixo E-W paralelo à régua; o cabo do martelo aponta para norte (ver esquema na Figura 4.11) (Folha SB.24-X-D-II, UTM: 773,620kmE e 9.417,693kmN).

Outras feições relacionadas à movimentação do SFAB foram descritas por Hackspacher *et al.* (1985) e Costa Neto (1985), que registraram a presença do calcário Jandaíra brechado, aflorando às margens da Lagoa do Queimado, a NE da cidade de

Pendências (RN). Neste local, as rochas foram submetidas a um intenso processo de cataclase, resultando em brechação e silicificação (Fotos 4.7 e 4.8 e Figura 4.11).



Foto 4.7. Aspecto do calcário da Lagoa do Queimado (Pendências/ RN), submetido a uma intensa brechação e silicificação (Folha SB.24-X-D-II, UTM:755,864kmE e 9.419,923kmN).



Foto 4.8. Detalhe da brechação do calcário da Lagoa do Queimado (Pendências - RN). Notar que, além da intensa brechação, ocorreu a deposição de calcedônia em interstícios e fraturas, formando nódulos nas cores marrom, vermelho e branco (Folha SB.24-X-D-II, UTM: 757,826kmE e 9.420,104kmN).

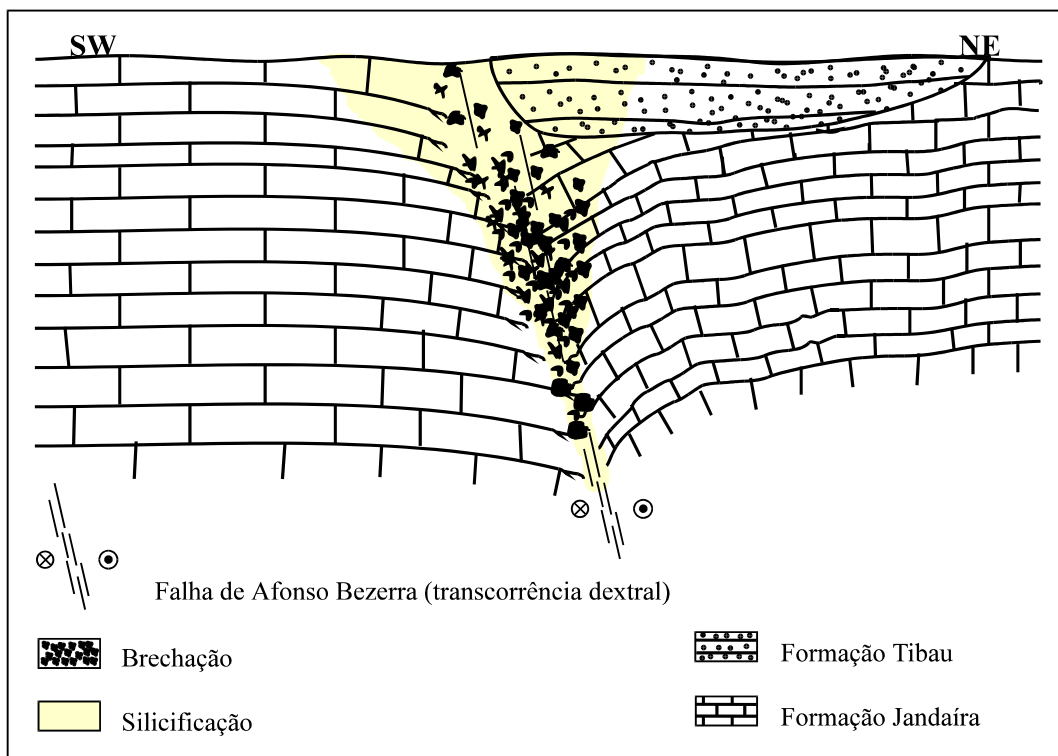


Figura 4.11. Esquema mostrando a brechação/silicificação que atingiu o calcário Jandaíra e o arenito Tibau. Perfil perpendicular ao SFAB e ao trend da Lagoa do Queimado, NE de Pendências (Folha SB.24-X-D-II, UTM: 757,826kmE e 9.420,104kmN).

O mesmo processo tectônico que afetou o carbonato, aparentemente também atingiu arenitos pertencentes à Formação Tibau, depositados sobre o Calcário Jandaíra (Foto 4.9). Estas rochas não mostram brechação, mas exibem um intenso processo de silicificação, inclusive com deposição de calcedônia nos interstícios e fraturas (Foto 4.10), analogamente ao calcário supracitado. Esta silicificação pode representar um evento tardio ou de reativação do SFAB, cuja movimentação principal, relacionada à brechação, seria precedente ou concomitante à deposição da Formação Tibau (neste caso, em bacia suprajacente). Esta última poderia ter sido afetada, com maior intensidade, apenas pelos fluidos associado ao processo termo-tectônico. A Formação Tibau é composta por arenitos grossos de leques costeiros e geralmente mostra intercalações de calcarenitos e calcilutitos de plataforma e talude carbonártico (Souza 1982, Araripe e Feijó 1994), sendo atribuída ao intervalo Campaniano até o Recente (ver coluna lito-estratigráfica na Figura 2.2). O fluido aquecido que provocou a silicificação do calcário e do arenito provavelmente percolou através da zona brechada no calcário e atingiu a Formação Tibau, depositada em nível mais raso (Figura 4.11). A origem deste fluido

pode estar relacionada ao aquecimento regional associado ao Magmatismo Macau (Oligo-Mioceno), o qual teria solubilizado quartzo presente nos sedimentos da Formação Açú ou nos calcarenitos da Formação Jandaíra.



Foto 4.9. Arenito silicificado da Lagoa do Queimado (Pendências - RN). Estes sedimentos pertencem à Formação Tibau e foram atingidos por um processo tectônico resultando em intensa silicificação (Folha SB.24-X-D-II, UTM: 757,826kmE e 9.420,104kmN).



Foto 4.10. Detalhe do arenito silicificado da Lagoa do Queimado (Pendências - RN). Notar a deposição de calcedônia nos interstícios e fraturas da rocha, representada pelo material de cor marrom (Folha SB.24-X-D-II, UTM: 757,826kmE e 9.420,104kmN).

Na margem NE da lagoa supracitada o calcário, preservado da brechação (Foto 4.11, ver esquema na Figura 4.11), apresenta um mergulho em torno de 25° contra o plano da falha que compõe o SFAB, o que é compatível com um movimento transcorrente (estrutura em flor) ou, alternativamente, um *roll-over* associado a movimento extensional (como efeito de reativação; ver adiante).



Foto 4.11. Calcário na margem NE da Lagoa do Queimado (Pendências - RN). Notar o mergulho anômalo, em torno de 25°, de encontro ao plano da falha NW. Isto sugere uma movimentação extensional (*roll-over*) ou transcorrente (estrutura em flor) do SFAB. (Folha SB.24-X-D-II, UTM: 757,826kmE e 9.420,104kmN).

A Formação Macau também mostra evidências da atividade tectônica que atingiu o SFAB. Além do alinhamento das serras formadas por rochas basálticas, segundo a direção NW (já citado por Hackspacher *et al.* 1985; letra **B** na Figura 4.6), foi observado um sinclinal próximo à cidade de Macau (RN), provavelmente resultado do efeito *roll-over* ou em associação com o movimento transcorrente do sistema de falhas (Foto 4.12).

Vale salientar que Hackspacher *et al.* (1985), autor do primeiro estudo sobre a Falha de Afonso Bezerra, admitia a hipótese desta falha ter sido ativa durante o Terciário, associando-a ao evento efusivo que deu origem à Formação Macau (Oligo-Mioceno). Nesta dissertação, a atividade transcorrente do SFAB, atribuída como sincrônica à deposição da Formação Tibau, é uma evidência adicional para a idade desse lineamento (em detrimento de uma ativação no final do Cretáceo).



Foto 4.12. Sinclinal com eixo na direção 315°Az , observado nos basaltos alterados da Formação Macau, próximo à cidade homônima. A movimentação do SFAB nessa região poderia explicar a ocorrência da dobra nesse local, como um efeito roll-over ou associado a um movimento transcorrente (Folha SB.24-X-D-II, UTM: 766,218kmE e 9.428,731kmN).

Além das evidências de movimentação do SFAB durante o Terciário superior, é necessário registrar que esse sistema de falhas está refletindo, na cobertura, lineamentos antigos. Os diques de granito alinhados na direção NW (letra A na Figura 4.6) indicam que o *trend* do SFAB no cristalino está relacionado à deformação frágil-dúctil tardi-brasileira, acompanhada pela intrusão dos diques de leucogranito tardios, próximo a Pedro Avelino (RN). Isto confirma uma herança tectônica precambriana para os lineamentos que compõem o SFAB, um aspecto já levantado por Oliveira *et al.* (1993).

A partir de estudos realizados na região de João Câmara (RN), Coriolano *et al.* (1997) caracterizaram a Falha Sísmica de Samambaia (FSS) e estudaram o comportamento das estruturas frágeis e dúcteis-frágeis tardi-brasileiras (juntas de extensão, estruturas em dominó e deslocamento de marcadores pré-existentes). Para as fraturas de direção NW, foi sugerido um movimento transcorrente sinistral, enquanto as fraturas com direção NE exibem um movimento transcorrente dextral. Juntas de extensão, preenchidas por pegmatitos e quartzo, estão alinhadas na direção E-W. Estes dados levaram os autores a inferirem um tensor σ_1 com direção E-W, ativo ao final do Ciclo Brasileiro (Cambriano; Figura 4.12), representando o predomínio do componente de achatamento em seqüência à deformação brasileira principal, dúctil, de caráter transpressional (Jardim de Sá 1994). A sul de Pedro Avelino (RN), ocorrem zonas

miloníticas E-W, de baixa temperatura, que correspondem às falhas extensionais da Figura 4.12.

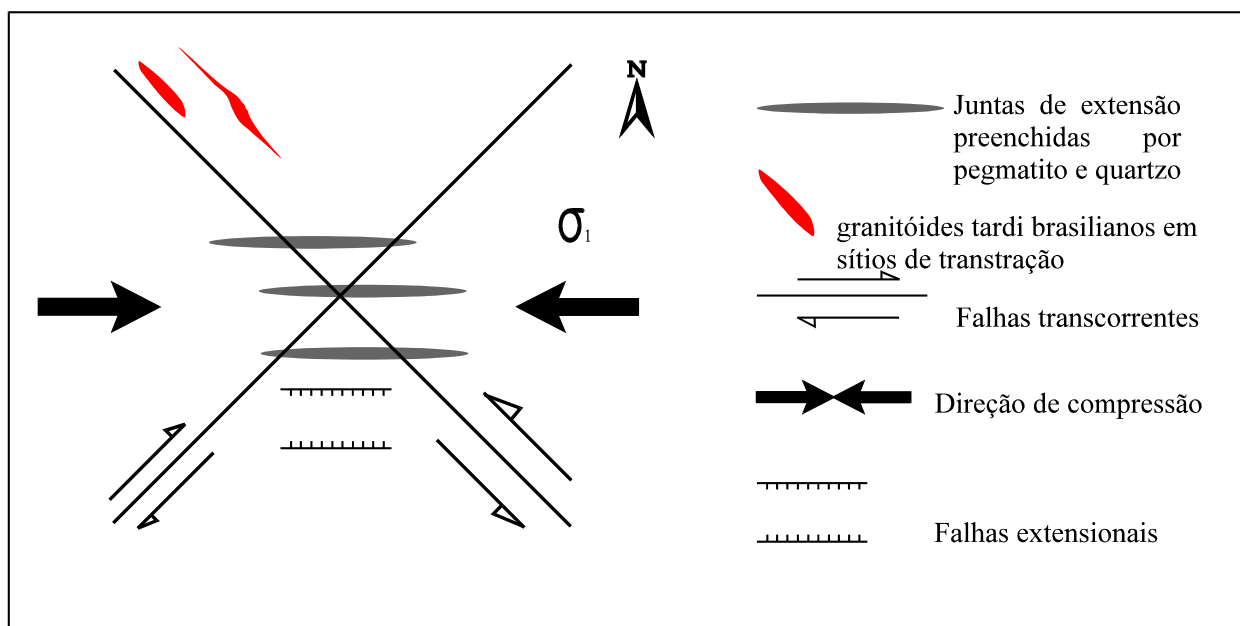


Figura 4.12. Estruturas frágeis-dúcteis tardi-brasilianas na região de João Câmara (borda sul da Bacia Potiguar). A partir de uma compressão E-W, foram formadas juntas de extensão e falhas normais de direção E-W, havendo ainda a intrusão de granitos tardi-brasilianos aproveitando sítios de transtensão em fraturas NW (adaptado de Coriolano *et al.* 1997).

Estes dados mostram um quadro em que os lineamentos NW na Bacia Potiguar (ou pelo menos, parte deles) correspondem ao reflexo, na cobertura, da reativação de estruturas precambrianas.

Em adição à movimentação principal, transcorrente, do SFAB, evidências relacionadas a uma reativação com movimento vertical de blocos também foram observadas em vários locais. *Slickenlines* fibrosos de alto *rake* ocorrem em pedreiras próximas à Lagoa do Queimado, a NNE de Pendências-RN (Foto 4.13). Estas estruturas estão contidas em planos orientados segundo a direção NW, sendo inclusive observadas no “Afloramento de Afonso Bezerra”, descrito por Oliveira *et al.* (1993). Este movimento vertical é de idade pós-transcorrência, com base no truncamento das estrias.



Foto 4.13. Estrias de alto *rake* observadas em uma pedreira para extração de calcário, situada aproximadamente 13 km a SW de Pendências (RN), na estrada para Afonso Bezerra (Folha SB.24-X-D-II, UTM: 765,717kmE e 9.413,968kmN).

Uma feição que desperta atenção e já foi objeto de referência por outros pesquisadores (Hackspacher *et al.* 1985; Lima *et al.* 1990) diz respeito ao controle dos lineamentos NW sobre os contatos das unidades lito-estratigráficas, tais como sedimentos da formações Tibau (Campaniano aos dias atuais) e Barreiras (Oligoceno-Plioceno), assim como as cascalheiras encontradas na porção central da área, próximo à cidade de Pendências (RN), conforme pode ser observado no mapa geológico (Anexo 01). Observa-se que essas unidades lito-estratigráficas apresentam-se como faixas alongadas orientadas segundo a direção NW. Sedimentos mais recentes (Quaternário), próximos ao litoral e localizados a oeste da cidade de Macau (RN), também mostram contatos de direção NW.

A exemplo do que foi descrito para os lineamentos NE, nos quais falhas de rejeito oblíquo (normal-dextral) escalonaram blocos e aprisionaram os sedimentos da Formação Barreiras em baixos estruturais, as feições associadas ao SFAB sugerem um comportamento semelhante, porém mostrando um componente direcional sinistral (com base no *rake* das estrias) subordinado ao movimento normal/extensional (Figura 4.13).

Esse componente sinistral para a reativação do SFAB já havia sido proposto por Fonseca (1996). O quadro que está se esboçando sugere que ambos os sistemas de falhas (SFC e SFAB), submetidos a uma compressão WNW, ainda de idade incerta, mas provavelmente Neoterciária (Oligo-Mioceno) a holocênica, teriam provocado extensão NNE, acarretando escalonamento de blocos em ambas as falhas, aprisionamento de unidades lito-estratigráficas em baixos estruturais e a formação das estrias de alto rake.

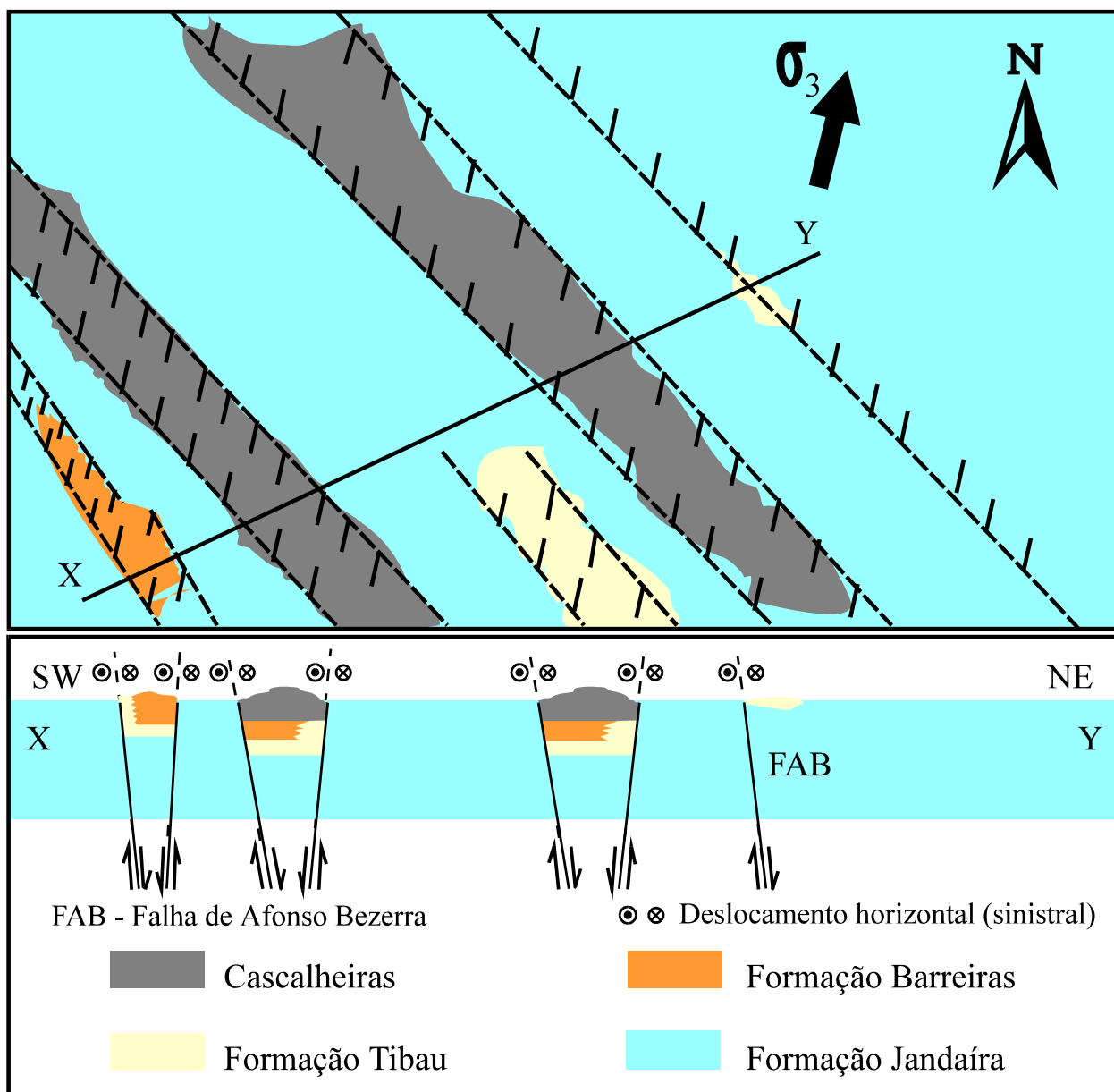


Figura 4.13. Mapa (A) e perfil (B) esquemáticos dos lineamentos NW na porção central da área de estudo. Falhas normais com componente transcorrente sinistral escalonaram blocos e aprisionaram os sedimentos das formações Barreiras e Tibau, além de cascalheiras associadas ao Rio Açú, em baixos estruturais. X e Y indicam a localização do perfil no mapa geológico do Anexo 01.

A orientação das escarpas de calcário (letra **F** na Figura 4.5 e letras **C** e **D** na Figura 4.6) pertencentes à Formação Jandaíra, também deve estar relacionada a esta reativação do SFAB (pós-Barreiras), que prossegue no Holoceno.

Reativações recentes foram ainda sugeridas por Silva (1991), após realizar datações em *beachrocks* na região de Logradouro (RN). As datações por Carbono-14 mostraram uma idade em torno de 5.020 ± 120 anos para essas rochas, que formam uma escarpa paralela à Falha de Afonso Bezerra. Por outro lado, Fonseca (1996) encontrou evidências de reativação no SFAB a partir do estudo de feições geomorfológicas, tais como o alinhamento de falésias na região de Ponta do Mel (RN) e o controle do delta do Rio Açu, pelos sistemas de falhas de Afonso Bezerra e Carnaubais. Além disto, este autor também identificou anomalias da rede de drenagem associadas à reativação holocênica do SFAB, assim como indicações de basculamento de blocos para leste, os quais estariam controlando a migração do Rio Açu nesta direção.

CAPÍTULO V

V. TOPOGRAFIA

Muitas vezes, o conhecimento da topografia do terreno auxilia os pesquisadores a identificar estruturas em áreas com deficiência de afloramentos. Nesta dissertação, a análise topográfica foi utilizada como suporte adicional no sentido de evidenciar a ocorrência de reativações recentes que estariam influenciando no modelamento topográfico. Todavia, os dados topográficos foram processados de forma diferente do tratamento clássico. Neste caso, foi aplicado o método de ajuste polinomial robusto (Beltrão 1989 e Beltrão *et al.* 1991), descrito no capítulo referente ao tratamento gravimétrico (Capítulo 3). O resultado esperado é a identificação de possíveis relações entre a morfologia do terreno e os sistemas de falhas de Carnaubais e Afonso Bezerra (SFC e SFAB, respectivamente). Este procedimento foi empregado em conjunto com Caldas (1998) para o SFC, no qual o autor concluiu que o mapa topográfico regional refletiria a reativação recente desses lineamentos, admitindo uma associação entre a paleolinha de costa de Fonseca (1996) e as curvas de 5 m e 10 m deste mapa. Este autor relata que esta paleolinha de costa (Holoceno) estaria recuada em torno de 10km em relação a atual linha de costa e que estaria situada na junção do SFC e do SFAB.

O conjunto dos dados altimétricos foi obtido no âmbito de levantamentos gravimétricos realizados por diversas universidades (UFRN, USP, UFPA, UFOP e UFPE), órgãos públicos (PETROBRAS, ON, CNEN e IBGE) e das cartas topográficas na escala 1:100.000 de São Bento do Norte (SB-24-X-D-III) e Macau (SB-24-X-D-II), totalizando 1997 estações topográficas (Figura 5.1).

O emprego de imagens de satélite neste capítulo, teve como objetivo fornecer suporte à análise topográfica. Estas imagens, cujo tratamento foi descrito no capítulo relativo ao sensoriamento remoto (Capítulo 4), foram utilizadas quando permitiam, principalmente, para obter um maior contraste entre a rede de drenagem e os alvos imageados por toda a área, tais como os sedimentos da Bacia Potiguar e as rochas do

embasamento cristalino, além de alvos relacionados à atividade antrópica (áreas de cultivo, p. ex.).

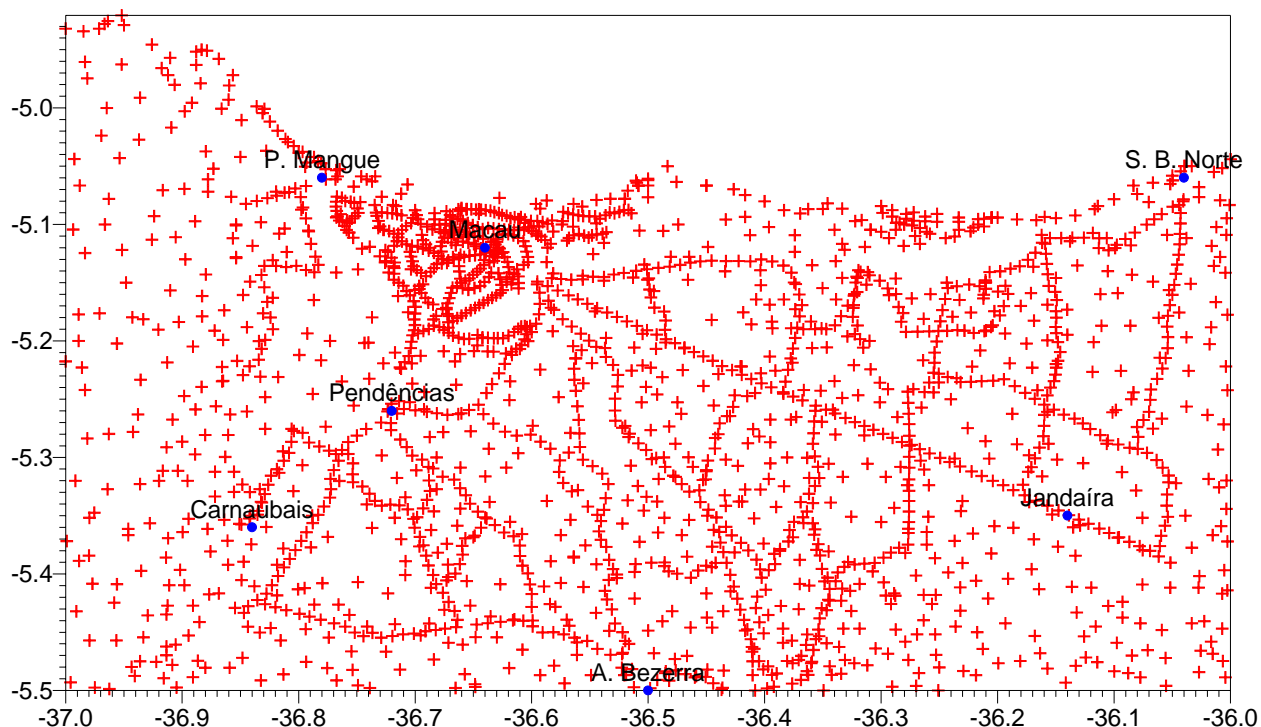


Figura 5.1. Mapa da cobertura topográfica da área de estudo e adjacências.

5.1. OS TRAÇOS PRINCIPAIS DO RELEVO E DA HIDROGRAFIA

O relevo da área se traduz em uma paisagem monótona próximo ao litoral, com a existência de uma ampla planície de maré, utilizada para exploração do sal marinho, próximo à cidade de Macau (RN). Nessa faixa litorânea, as altitudes geralmente estão situadas ao nível médio dos mares. Em direção ao interior do continente, na parte NW da área, ocorre a Serra do Mel, cuja altitude máxima, na área abrangida por este trabalho, atinge 222 m; na porção SSE, a Serra Preta tem pico em torno de 250 m.

No que diz respeito à rede de drenagem, pode-se destacar alguns rios de maior expressão na área: Açú, Panon, Pataxós, Amargoso e Camurupim (Figura 5.2).

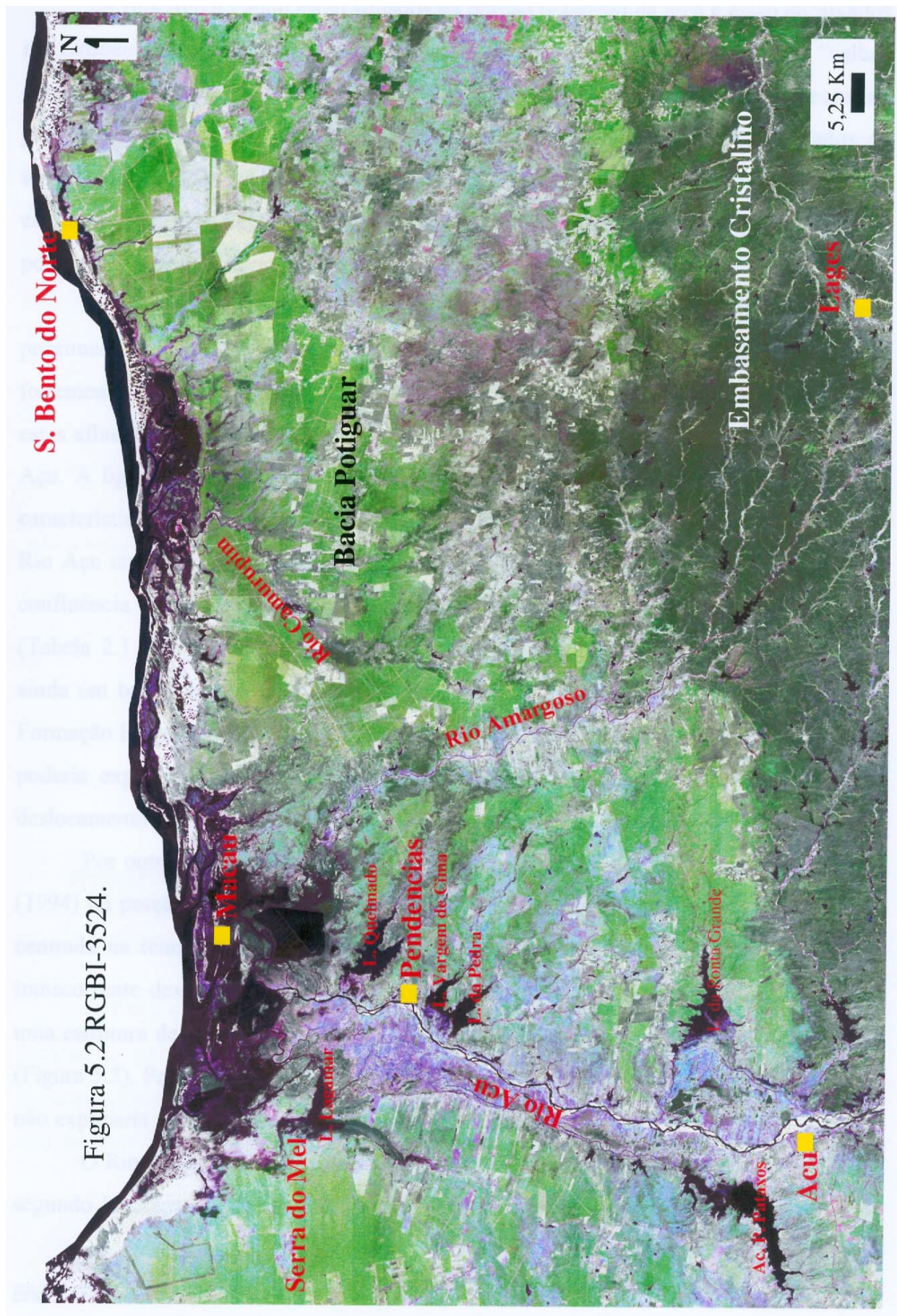


Figura 5.2 RGBI-3524.

Os rios Açu e Panon estão situados na porção ocidental da área e estão encaixados no *Graben* do Rio Açu. Segundo Fonseca (1996), este *graben* seria uma “calha” controlada por uma estruturação NE-SW, cuja expressão máxima estaria representada pela Falha do Rio Açu, com direção N10-20E. O autor apresenta também dados de terreno, relatando a ocorrência de estruturas extensionais, tais como *mini-grabens* e estruturas em “flor negativa”. O delta do Rio Açu estaria controlado pelo SFAB na porção NW e pelo SFC na porção SE.

A drenagem secundária associada ao Rio Açu, assim como algumas lagoas próximas, tais como as lagoas do Queimado, da Pedra e Vargem de Cima estão fortemente orientada segundo a direção NW-SE, sugerindo o controle do SFAB sobre estes afluentes (Figura 5.2). Uma observação interessante diz respeito à borda W do Rio Açu. A figura 5.2 mostra uma borda bem definida, contrastando com a borda E. Esta característica poderia estar relacionada a um basculamento para W do piso do *graben* do Rio Açu ou da Serra do Mel para E ou SSW. Fonseca (1996) mostrou que, próximo à confluência dos rios Açu e Pataxós, região denominada pelo autor de “Bloco Açu” (Tabela 2.1 e Figura 2.7), estaria ocorrendo um basculamento para E. O autor sugere ainda um basculamento para SW associado a um suave dobramento dos sedimentos da Formação Barreiras, que compõem a Serra do Mel (“Bloco Serra do Mel”). Esta situação poderia explicar a boa definição da borda W do *graben* do Rio Açu, assim como o deslocamento do fluxo deste rio, em toda a sua extensão, na direção E.

Por outro lado, zonas de extensão e encurtamento foram identificadas por Torres (1994) na porção centro-norte do Estado do Rio Grande do Norte, cuja interpretação é centrada na reativação holocênica dos lineamentos E-W, consoante a uma cinemática transcorrente dextral. Segundo este autor, o *graben* do Rio Açu estaria implantado em uma estrutura de 2ª ordem, segundo a direção N10-20E, correspondente ao X de Riedel (Figura 5.3). Fonseca (1996) discordou desta hipótese, afirmando que o modelo sugerido não explicaria as feições morfo-estruturais existentes na área.

O Rio Amargoso, situado no centro da área, flui segundo a direção SSE-NNW e, segundo Hackspacher *et al.* (1985), representaria uma falha associada ao SFAB. Neste

rio, os afluentes também mostram uma orientação NW, que é melhor visualizado quando estão situados sobre o embasamento cristalino (Figura 5.2).

O Rio Pataxós situa-se no quadrante NW da área, próximo à cidade de Açú (RN). Este rio flui na direção NE, paralelo ao Rio Açú e, nas proximidades da Lagoa da Ponta Grande, vira 90° para NW, formando uma espécie de romboedro junto com o Rio Açú (Figura 5.2). Esta mudança brusca de curso está relacionada ao basculamento de blocos para leste, que ocasiona a migração dos rios Açú e Pataxós na direção E (Fonseca 1996).

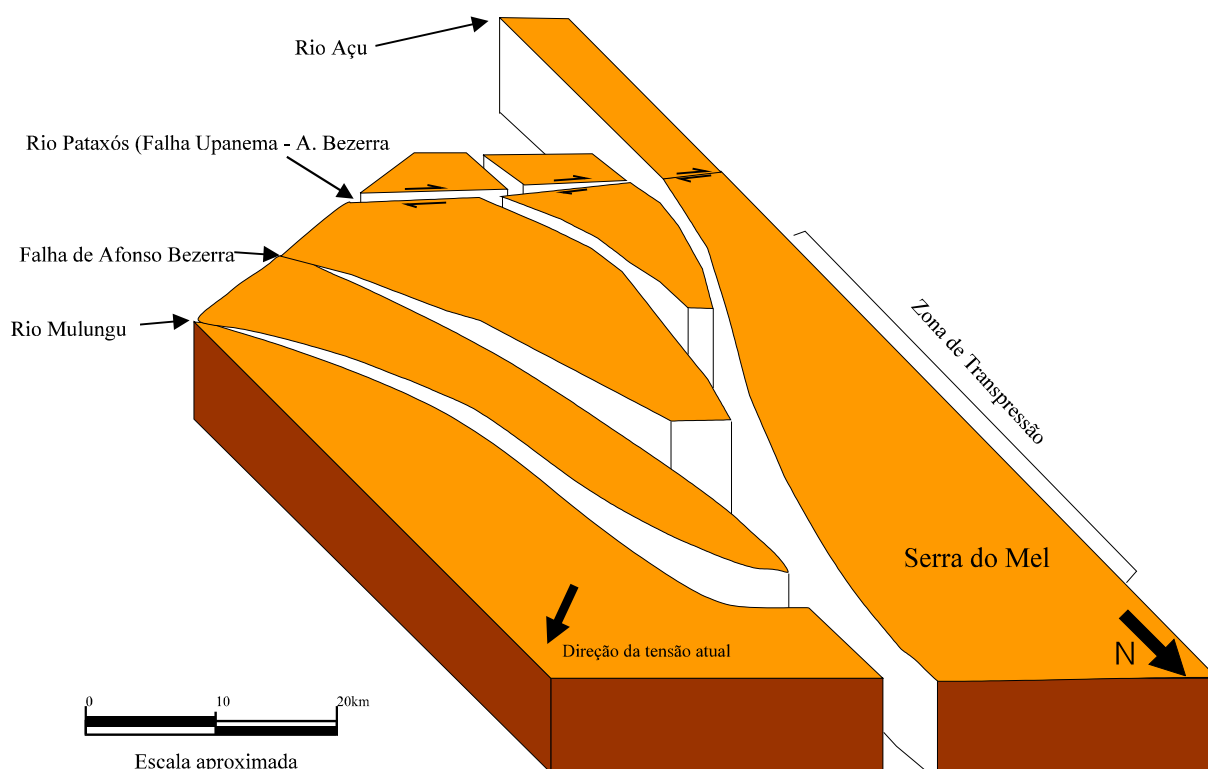


Figura 5.3. Modelo proposto para a abertura do graben do Rio Açú. Reproduzido de Torres (1994).

O Rio Camurupim, no quadrante NE da área, flui para NE, mostrando inflexões bruscas no seu curso, segundo ângulos de 90°, para NE e NW alternadamente, o que, segundo Caldas (1998), estaria associado à reativação do SFC (Figura 5.4). A exemplo dos cursos d’água supracitados, os afluentes deste rio encontram-se orientados NW.

5.2. ANÁLISE DOS DADOS TOPOGRÁFICOS

O método de ajuste polinomial robusto aplicado aos dados topográficos, conduz à separação dos efeitos regional e local refletidos pela topografia. A soma desses efeitos é representada pelo mapa topográfico da região (Figura 5.5). Nesse tratamento, o polinômio de ordem 6 foi o que melhor ajustou os efeitos regional e residual da topografia. Este grau de polinômio foi determinado quando (a) no **mapa topográfico regional** ficaram evidentes as feições associadas à Serra do Mel, aos *platôs* de calcário pertencentes à Formação Jandaíra e ao *graben* do Rio Açu (respectivamente as letras **A**, **B** e **C** na Figura 5.6), e (b) no **mapa topográfico residual**, ficaram evidentes os lineamentos de direção NW (Figura 5.7).

O mapa topográfico da área (Figura 5.5) mostra, ao mesmo tempo, os efeitos regional e residual da topografia, revelando uma tendência de mergulho da superfície na direção NNW até o *graben* do Rio Açu, provavelmente subordinado ao abatimento do “Bloco Macau” (Fonseca 1996) e ao processo de subsidência da área a norte do SFC, conforme Bezerra *et al.* (1998). No extremo oeste do mapa, a diminuição dos valores das curvas de nível em direção ao *graben* representa os limites da Serra do Mel. Neste mapa, a “calha” NNE do *graben* do Rio Açu mostra a borda W bem marcada, assim como ocorre nas imagens obtidas nas composições **RGB**, como pode ser visto na Figura 5.2. Uma borda tão bem delimitada parece sugerir uma falha com afundamento do bloco leste (o *graben*). Além de revelar a ocorrência de estruturas extensionais ao longo da “calha” do Açu, Fonseca (1996) sugeriu a existência de um processo diferenciado de afundamento nesta “calha”, o qual seria mais veloz na confluência dos rios Açu e Pataxós.

O mapa topográfico regional retira os efeitos locais da topografia, realçando estruturas de escala regional tais como a Serra do Mel, os *platôs* de calcário do Formação Jandaíra e a “calha” do Rio Açu (respectivamente as letras **A**, **B** e **C** na Figura 5.6). Neste mapa, a estruturação do *graben* associado à “calha” do Rio Açu torna-se bastante evidente, seguindo a direção SW-NE. A porção a leste do *graben* mostra o declive da topografia para NNW, seguindo um padrão onde as curvas de nível são aproximadamente paralelas ao SFC (Sistema de Falhas de Carnaubais). Por outro lado, na porção ocidental

da região, onde encontra-se a Serra do Mel, as curvas de nível mostram-se paralelas ao SFAB (Sistema de Falhas de Afonso Bezerra) apenas no extremo NW do litoral, próximo à cidade de Porto do Mangue (RN). A região a sul da cidade de Jandaíra (RN), em cores escuras, marca o local da ocorrência de *platôs* de calcário da Formação Jandaíra. Estas feições também podem ser observadas a partir de imagens de satélite, como visto na Figura 4.7, no capítulo referente ao sensoriamento remoto (Capítulo 4). O aumento do gradiente topográfico nos limites da área, junto aos topos da Serra do Mel e dos *platôs* provavelmente se deve a efeitos de borda, bastante comuns no processamento empregado. Por fim, vale salientar que a curva de nível de 0 m ajusta-se relativamente bem ao traçado da atual linha de costa.

O mapa topográfico residual delimita os contornos superficiais da região à medida que elimina os efeitos regionais da topografia. Neste mapa, são realçadas feições de menor ordem, em especial os vales onde fluem os rios (Figura 5.7). Observa-se inicialmente que a “calha” associada ao *graben* do Rio Açu torna-se menos evidente.

Uma maneira de visualizar como se apresenta a superfície do terreno na atualidade e o controle que os sistemas de falhas (SFC e SFAB) exercem sobre os vales e a rede de drenagem é através da representação 3D da topografia (Golden Software 1995). Este processamento fornece uma representação em perspectiva, o qual gera uma superfície em 3 dimensões que pode ser rotacionada tanto a partir de um eixo horizontal quanto de um eixo vertical, permitindo observar diferentes ângulos da mesma superfície. O método foi empregado no mapa topográfico residual, gerando a perspectiva observada na Figura 5.8. Este bloco diagrama apresenta um exagero vertical de 100 em relação a escala horizontal, para realce das feições.

O bloco diagrama da Figura 5.8 mostra de forma clara o mergulho da topografia para NW. Todavia, deve-se considerar a existência do exagero vertical, que transforma pequenas elevações em escarpas íngremes. Desta forma, um suave caimento deve ser admitido para a direção NW, encaixando-se neste contexto a área do Rio Camurupim (quadrado A na Figura 5.8), onde foi elaborado o perfil mostrado na Figura 4.8. Outra observação diz respeito à rede de drenagem. O Vale do Rio Açu, que flui sobre o *graben* homônimo, aparece como o maior receptor dos cursos d’água da região. Novamente é

preciso descontar o exagero vertical e verificar que as lagoas da área (do Queimado, da Pedra e Vargem de Cima, dentre outras) não aparecem neste modelo. Assim, a direção NW, que controla grande maioria dos cursos d'água afluentes do Rio Açu e das lagoas próximas, tem uma parcela significativa de contribuição da topografia. Nesta representação topográfica 3D, a borda W do Rio Açu aparece ainda mais destacada (**B** na Figura 5.8). Neste caso, o exagero vertical contribuiu para realçar esta feição, mostrando-a na forma de uma escarpa íngreme, bem definida e orientada na direção NNE-SSW.

No que diz respeito ao SFAB e ao SFC, a situação mostra-se diferente quando observada em sua individualidade. Enquanto o SFAB pode ser delimitado pelos vales orientados NW, bem visíveis devido ao exagero vertical, tais feições não são visualizadas na direção do SFC. Neste caso, a identificação desse sistema de falhas baseia-se em pequenas inflexões (letras **C**, **D** e **E** na Figura 5.8) observadas nos vales NW, que representam o reflexo do SFC na topografia. Esta situação já era esperada a partir das análises precedentes (capítulos 3 e 4), pois observou-se que o SFC corresponde a uma estruturação profunda com poucos reflexos superficiais, enquanto o SFAB, embora também possua raízes profundas, mostra reflexos mais evidentes em superfície. De todo modo, a topografia mostra reflexos de ambos os sistemas, seja na forma de vales orientados NW no caso do SFAB, seja pelo mergulho regional da topografia para NW, acompanhando o escalonamento de blocos em falhas do SFC nesta direção, conforme visto no capítulo 4. Isto sugere que ambos os sistemas de falhas evidenciam uma reativação recente, provavelmente holocênica, com um componente de movimento normal/extensional.

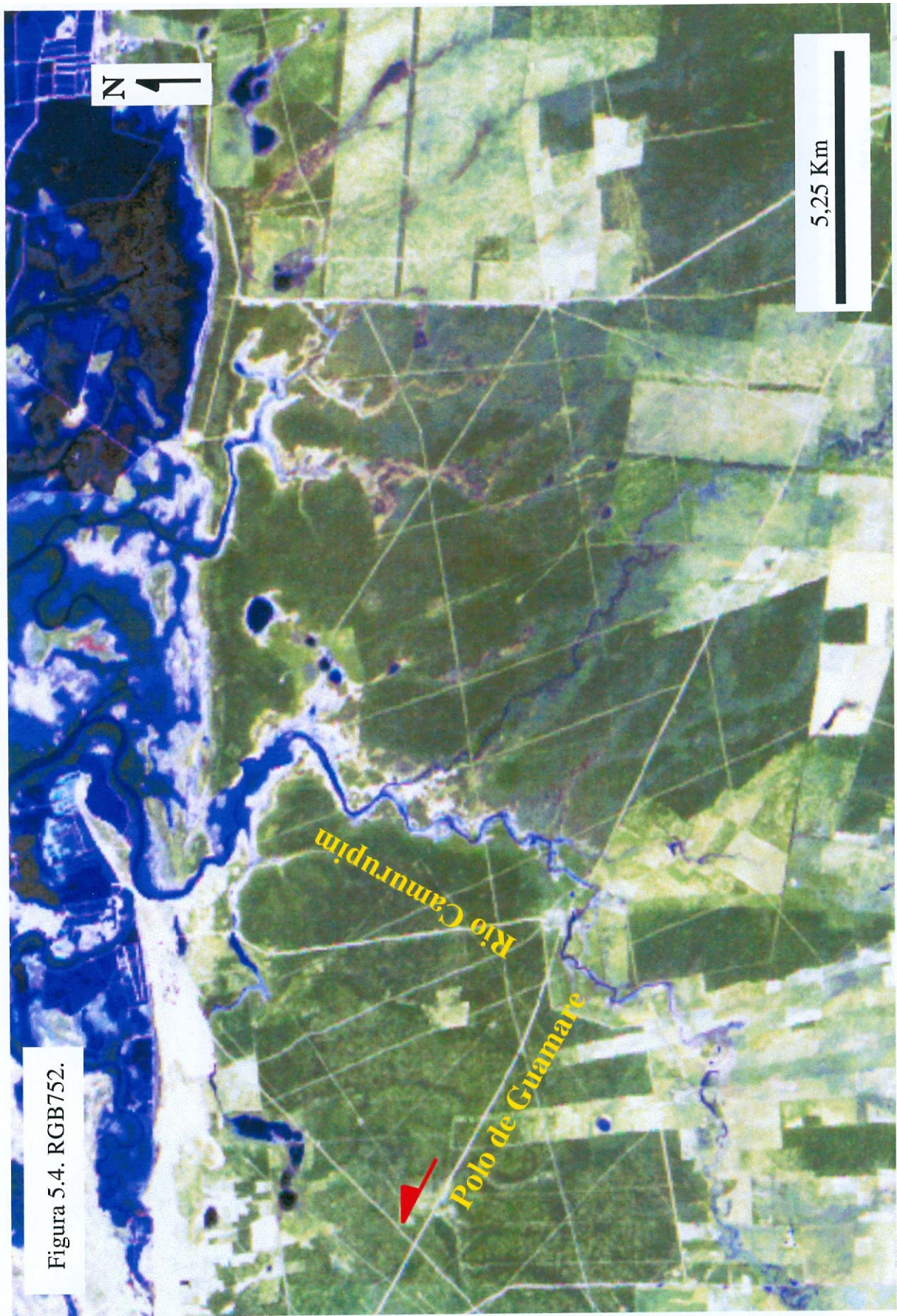
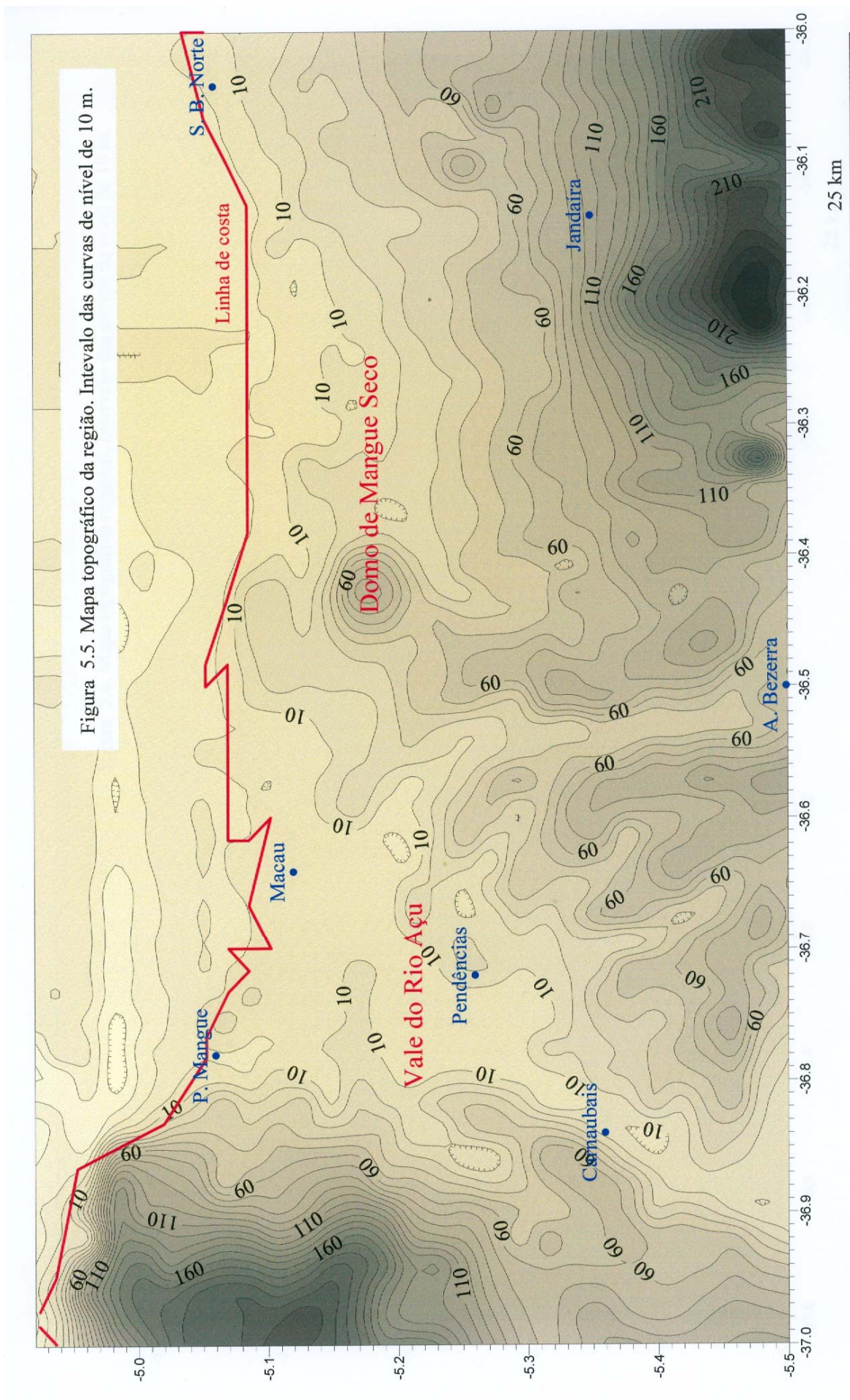
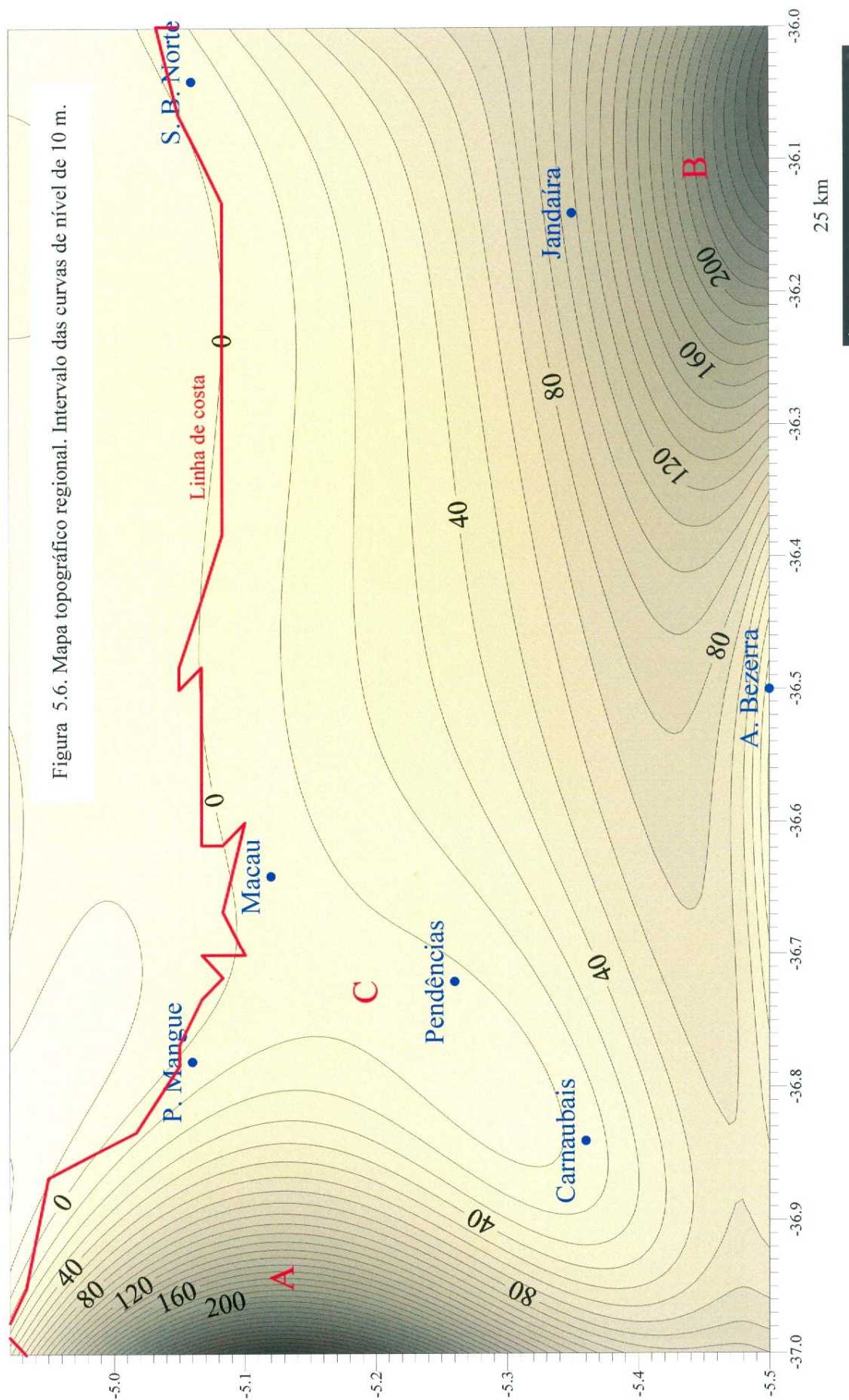
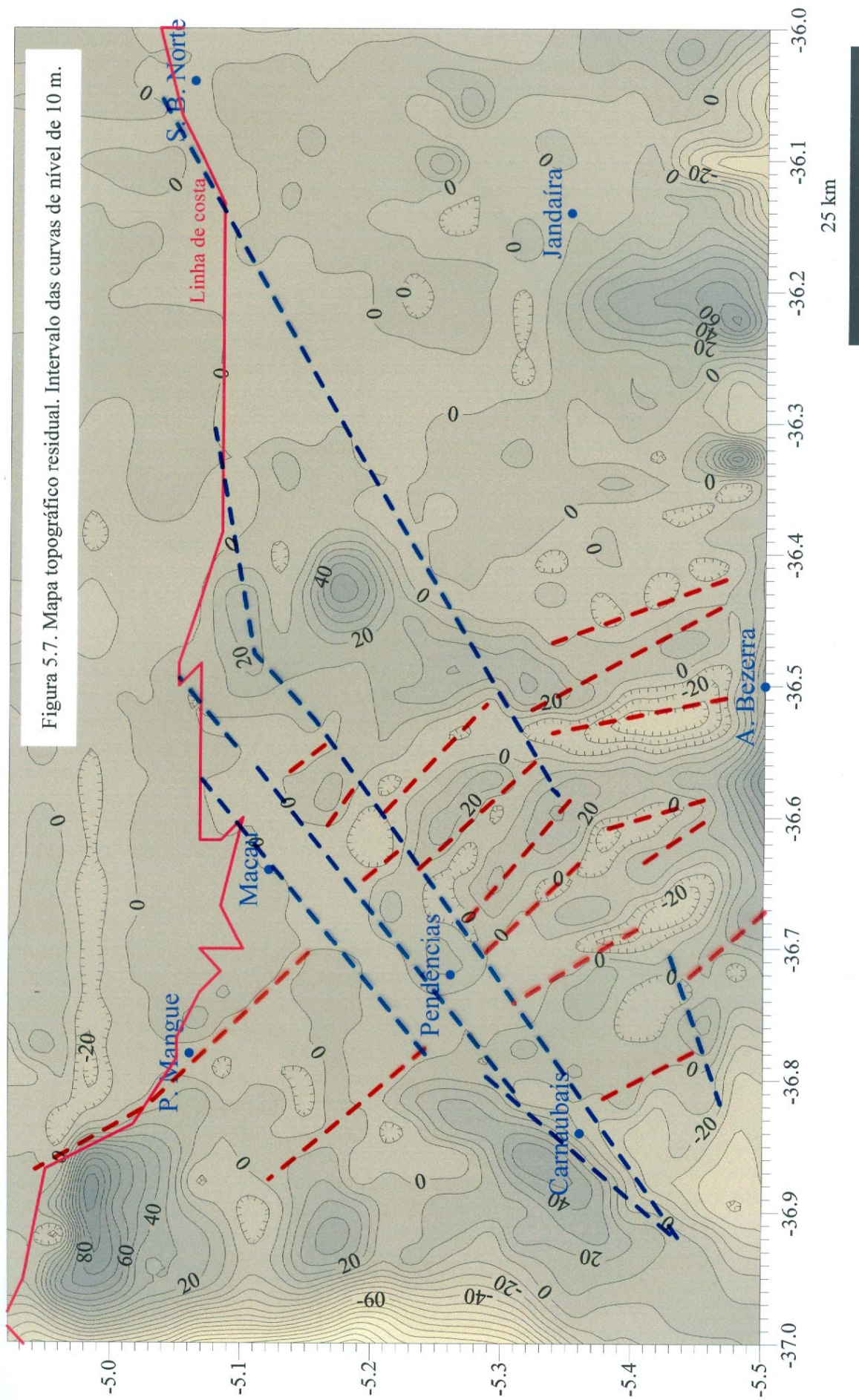


Figura 5.4. RGB752.

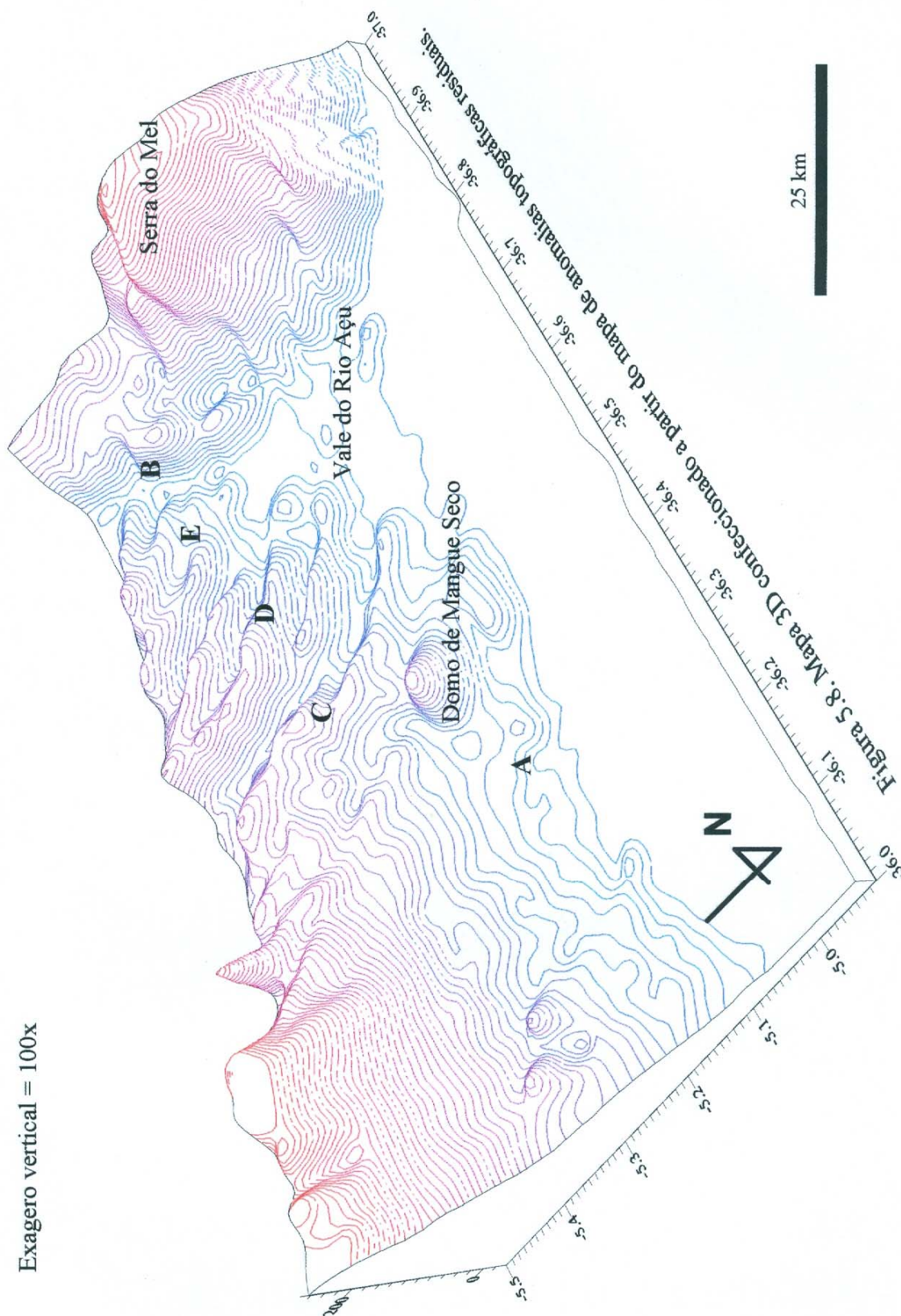






Perspectiva segundo uma rotação de 220 graus em torno do eixo vertical e 41 graus em torno do eixo horizontal.

Exagero vertical = 100x



CAPÍTULO VI

VI. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A pesquisa aqui realizada caracterizou a trama de lineamentos que afeta a região estudada, permitindo detalhar um pouco de sua história geológica. Tais lineamentos, identificados por diversos autores (Hackspacher *et al.* 1985, Oliveira *et al.* 1993, dentre outros), encontram-se orientados segundo as direções: (1) NE, para o Sistema de Falhas de Carnaubais (SFC); (2) NW, para o Sistema de Falhas de Afonso Bezerra (SFAB); (3) N-S, para um sistema de fraturas de menor expressão. Ao longo do tempo geológico, esta rede de lineamentos esteve submetida a esforços tectônicos que induziram a sua reativação.

No que diz respeito à gravimetria, este método forneceu um arcabouço da estruturação profunda da Bacia Potiguar, produto da tectônica de falhas, durante o Cretáceo inferior. A aplicação de um filtro para separação das componentes regionais e residuais do campo gravimétrico total, segundo o método de Beltrão *et al.* (1991) e a utilização do método de sombreamento do relevo gravimétrico, gerou os mapas de anomalias gravimétricas regionais e residuais, assim como as “imagens” da calha NE, na parte central da bacia. Tradicionalmente, o Sistema de Falhas de Carnaubais é bem visualizado a partir de estudos gravimétricos devido ao grande deslocamento vertical que as falhas associadas a este sistema possuem (em torno de 6000 m na área estudada, como no caso da Falha de Carnaubais), implicando em forte contraste lateral de densidade.

Por outro lado, o SFAB, com um componente de movimento transcorrente e com relevante expressão superficial, não mostra o mesmo resultado quando tratado por métodos clássicos. Todavia, o processamento por meio do método de ajuste polinomial robusto (Beltrão *et al.* 1991) permitiu a visualização deste sistema de falhas, marcando a sua estruturação em profundidade.

Com relação ao sensoriamento remoto (SR), o emprego do Sombreamento de Imagens Digitais (SID) e das composições coloridas, registrou a estruturação superficial da Bacia Potiguar na forma de enxames de lineamentos. O Sistema de Falhas de Afonso

Bezerra (SFAB) provavelmente, originado no final do Precambriano e submetido a diversas reativações ao longo do tempo geológico, é de fácil visualização tanto a partir de fotografias aéreas como de produtos de imagens de satélites, devido à sua forte expressão superficial. Por outro lado, o SFC, bem visualizado pela gravimetria, não apresenta uma expressão superficial significativa. O emprego do SID realçou os reflexos superficiais do SFC, permitindo cartografar este sistema de forma mais detalhada. Em adição, foi reconhecido um sistema de fraturas de direção N-S, o qual foi corroborado por dados de terreno.

Associado ao SR, foi aplicado o método de ajuste polinomial robusto (Beltrão *et al.* 1991) à análise topográfica. Esta ferramenta permitiu a visualização do caráter mais local do relevo, livre das feições topográficas regionais, e com isso possibilitando um melhor entendimento do seu condicionamento neotectônico.

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram ainda elaborar um quadro para a história geológica destes lineamentos, a qual abrange um período de tempo que varia entre o Precambriano e os dias atuais. Uma síntese da evolução tectônica da área é apresentada a seguir:

Com respeito ao SFAB, a observação dos diques de granito tardi-brasilianos, orientados NW, próximos a Pedro Avelino (RN), mostra que este sistema de falhas teve sua origem no final do Neoproterozóico. A comparação com o quadro da cinemática tardi-brasiliana na região (Coriolano *et al.* 1997, p. ex.) indica que esse *trend* corresponderia a cisalhamentos dúcteis-frágeis com movimento sinistral.

Para o Cretáceo inferior, reconhecemos que a hipótese de Matos (1992) sobre uma extensão máxima de direção WNW-SSE, que teria gerado o Rifte Potiguar durante a fase Sin-Rifte II, condicionado a falhamentos de direção NE (SFC), seria plenamente aceitável. Em acréscimo a esta idéia, poderíamos afirmar que, durante este período de tempo, o SFAB então já existente como uma linha de fraqueza no substrato cristalino, poderia ter se comportado como uma falha de transferência, tal como Cremonini *et al.* (1996) reportaram na porção submersa da Bacia Potiguar (Figura 6.1).

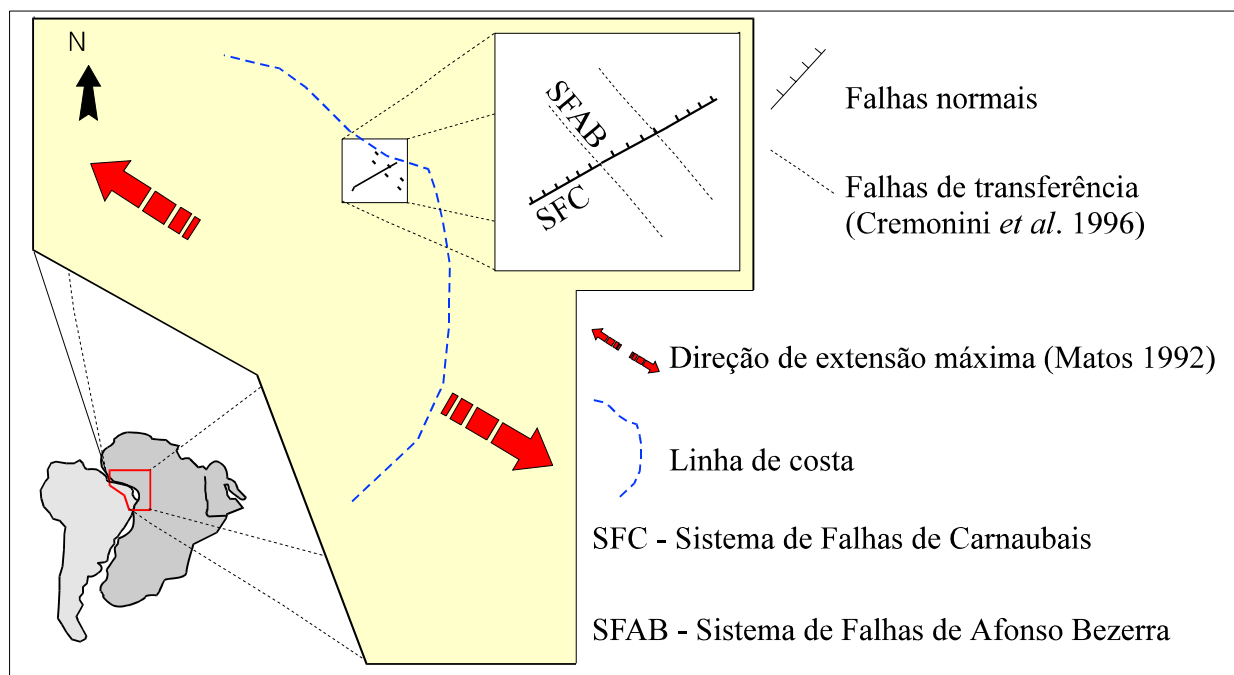


Figura 6.1. Durante o Cretáceo inferior, o SFAB teria se comportado como falhas de transferência (modelo elaborado a partir de Matos 1992).

No que diz respeito ao Terciário, a movimentação dos sistemas de falhas supracitados foi bem mais complexa. Durante esse intervalo, o SFAB desenvolveu sua expressão principal na bacia, segundo uma cinemática transcorrente dextral. Considerando que o SFAB compõe um par conjugado com o SFC, este último deve ter possuído um movimento sinistral (Figura 6.2). A extensão E-W envolvida produziu estruturas tipo *graben* e subsidência na região limitada pelos sistemas de falhas de Carnaubais e Afonso Bezerra, a exemplo do proposto “*graben* do Rio Amargoso”. Neste contexto, pode-se ainda especular sobre uma possível invasão marinha nesta região (Figura 6.3 e mapa geológico no Anexo 01). A área de ocorrência dos sedimentos da Formação Tibau (arenitos grossos de leques costeiros depositados durante a seqüência flúvio-marinha regressiva) coincide com esta zona de afinamento crustal. Estes sedimentos siliciclásticos geralmente estão intercalados com os carbonatos da Formação Guimarães (calcarenitos e calcilitos de sistema de plataforma e talude carbonáticos) ou interdigitados aos sedimentos da Formação Barreiras (arenitos variegados e argilosos de ambiente continental). A extensão E-W verificada na porção emersa da bacia permitiria o abatimento de blocos, facilitando nova entrada do mar no Terciário superior.

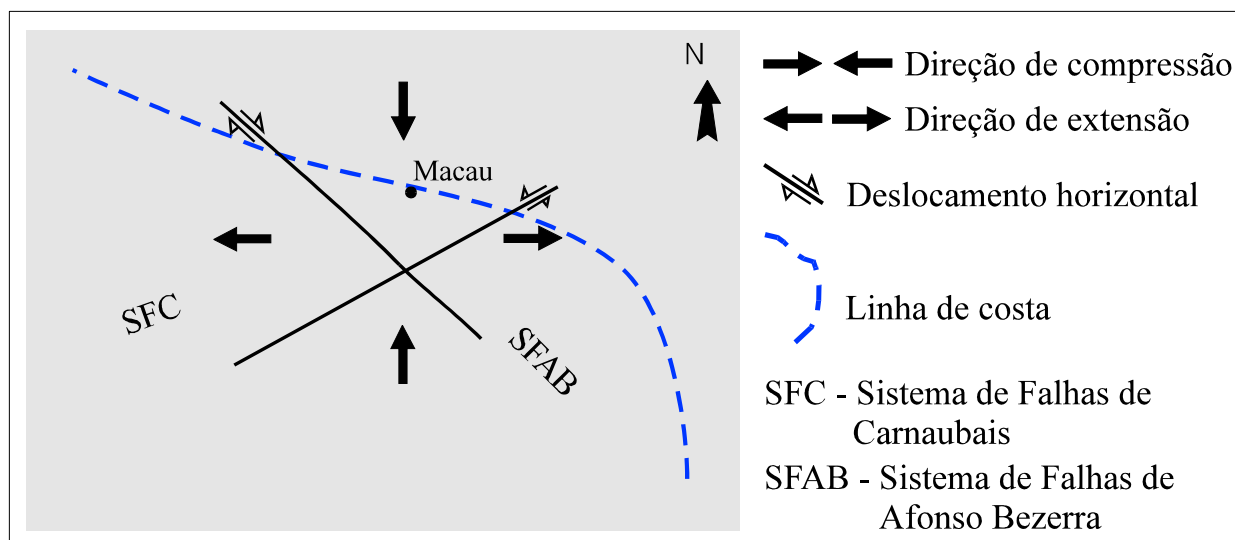


Figura 6.2. Modelo proposto para área durante o Terciário (Oligo-Mioceno). Uma compressão N-S provoca deslocamento horizontal dextral no SFAB e sinistral no SFC.

Um problema relacionado ao Terciário diz respeito ao mecanismo de origem da compressão N-S que teria afetado a região, o que pode ser abordado apenas de forma especulativa. Uma primeira hipótese seria relacioná-la a uma tectônica compressional (colisional ?) N-S, em região não distanciada. Todavia, o candidato mais lógico (fechamento do Mediterrâneo) parece inadequado pelo grande distanciamento. Um outro modelo poderia ser baseado em um período de quiescência tectônica na Cadeia Meso-Atlântica, na Cadeia Andina ou em ambas. Especula-se que, durante esse período, poderia haver extensão na direção E-W inclusive mais forte que a extensão N-S; a depender das tensões verticais, esta situação poderia simular a compressão N-S (Figura 6.4).

Uma terceira possibilidade, avaliada como mais provável, baseia-se no relacionamento aparente da Formação Macau com as estruturas extensionais com trend N-S, e a disposição geral N-S dessas ocorrências vulcânicas (Figura 6.5). A ocorrência de um domo de origem termal, com alongação N-S, associado ao Vulcanismo Macau, induziria extensão em superfície, sendo que o eixo E-W experimentaria uma extensão maior que a direção N-S (Figuras 6.6 e 6.7). Este tipo de situação é discutido por Price e Cosgrove (1990; p. 209-210), podendo gerar estruturas extensionais e transcorrentes, como observado na região.

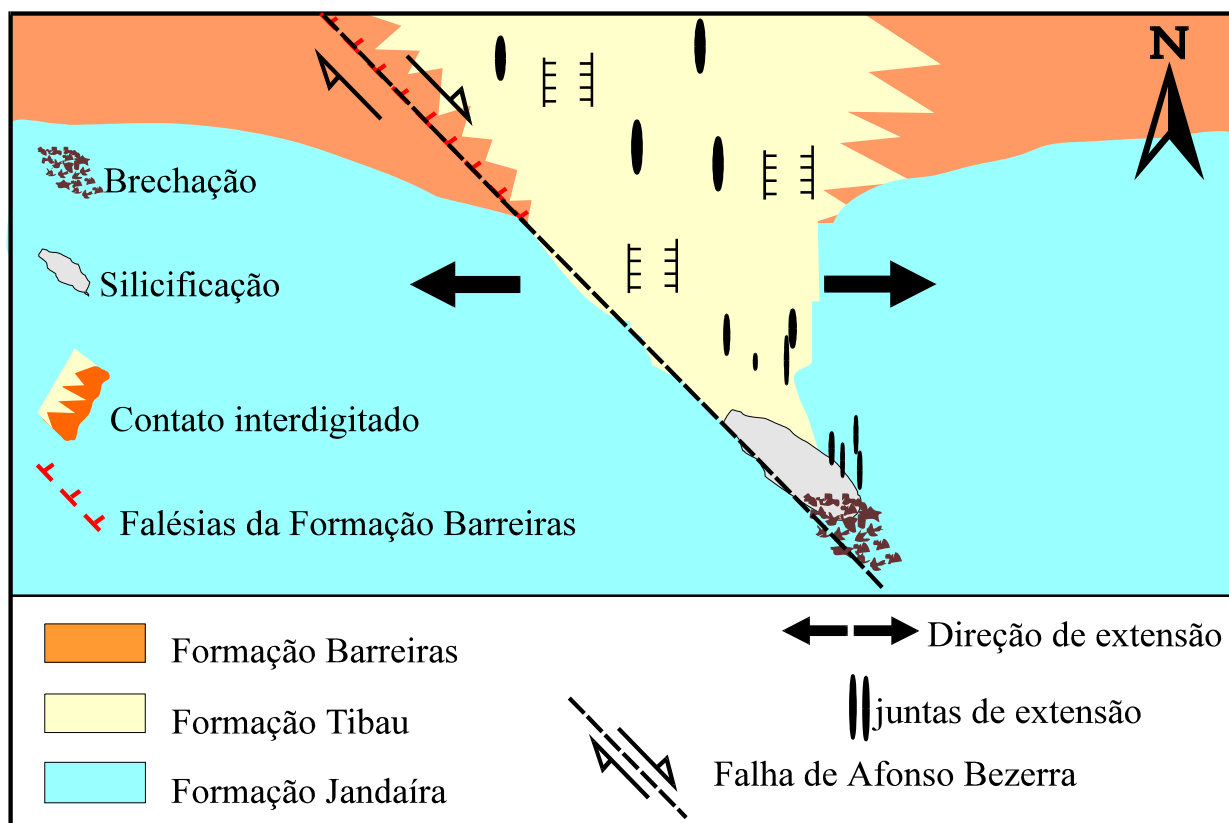


Figura 6.3. Mapa esquemático mostrando a brechação no calcário da Formação Jandaíra e a silicificação que atingiu tanto o calcário como o arenito da Formação Tibau. Uma compressão N-S teria provocado o movimento transcorrente dextral (Oliveira *et al.* 1993), a abertura das juntas de extensão de direção N-S, assim como falhas normais que teriam controlado a deposição da Formação Tibau e um avanço do mar, em relação às áreas adjacentes, ao longo desse trend.

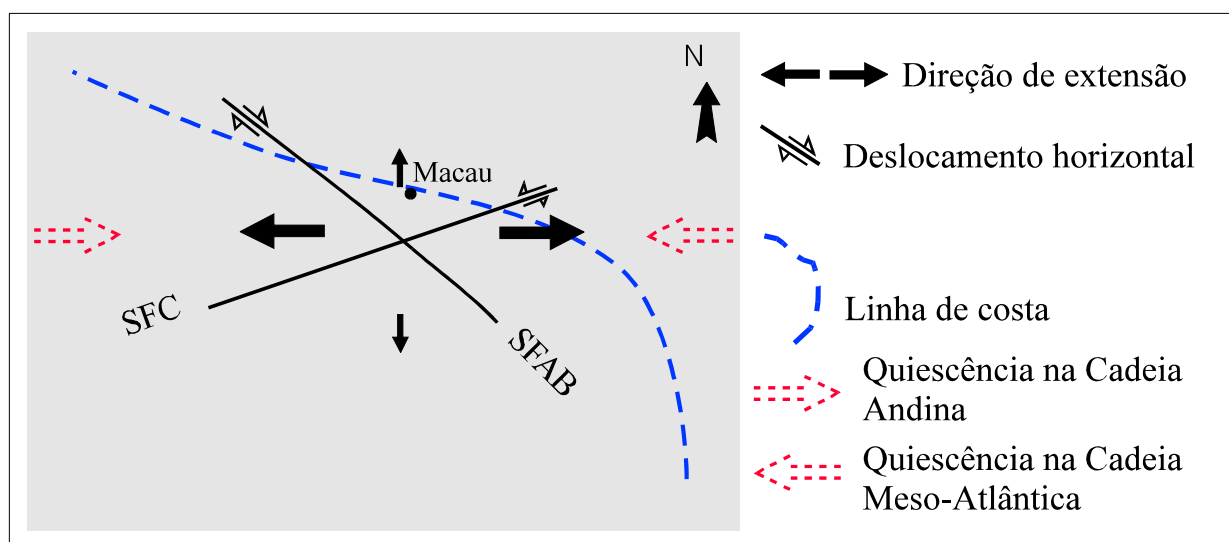


Figura 6.4. Um intervalo de quiescência tectônica da Cadeia Meso-Atlântica e/ou da Cadeia Andina, ou ambas, poderia explicar a extensão em todas as direções, com extensão N-S de menor expressão em relação à extensão E-W, implicando na equivalência da extensão N-S como um eixo “compressional”. A mesma situação poderia ser gerada por um domo térmico associado ao Vulcanismo Macau (ver Figura 6.5).

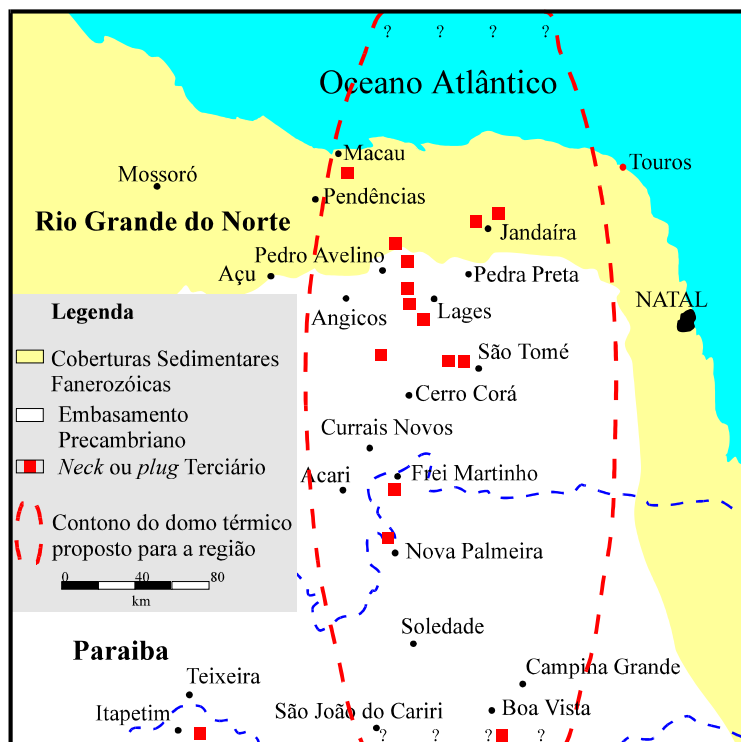


Figura 6.5. Localização dos basaltos (necks e plugs) datados como do Terciário (Sial 1991). Observar a disposição destes corpos orientados na direção N-S, sugerindo a ocorrência de um domo térmico em profundidade.

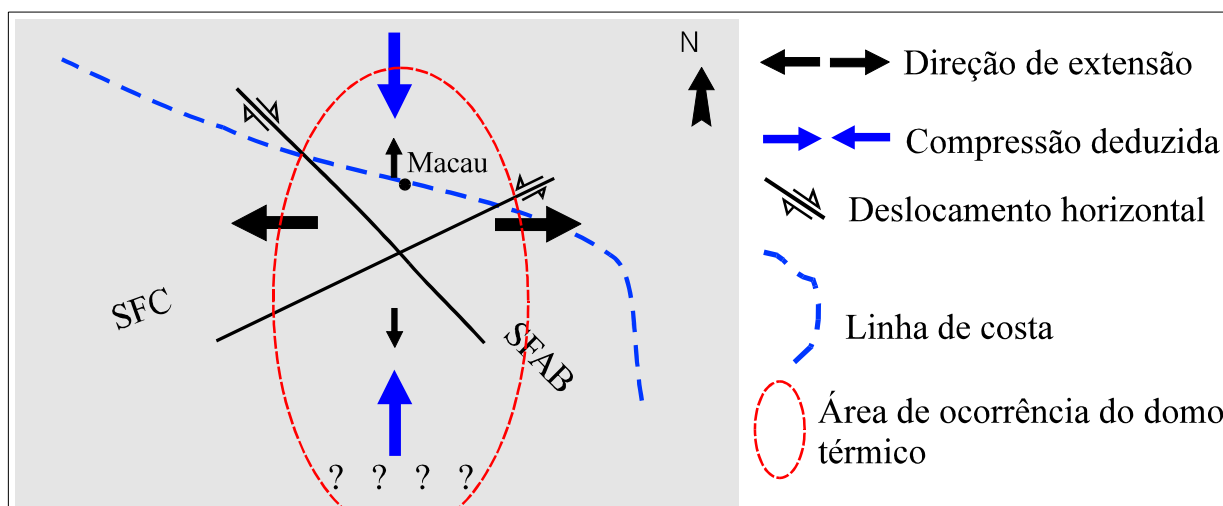


Figura 6.6. Modelo proposto para explicar a compressão N-S na área, a partir da ocorrência de um domo térmico.

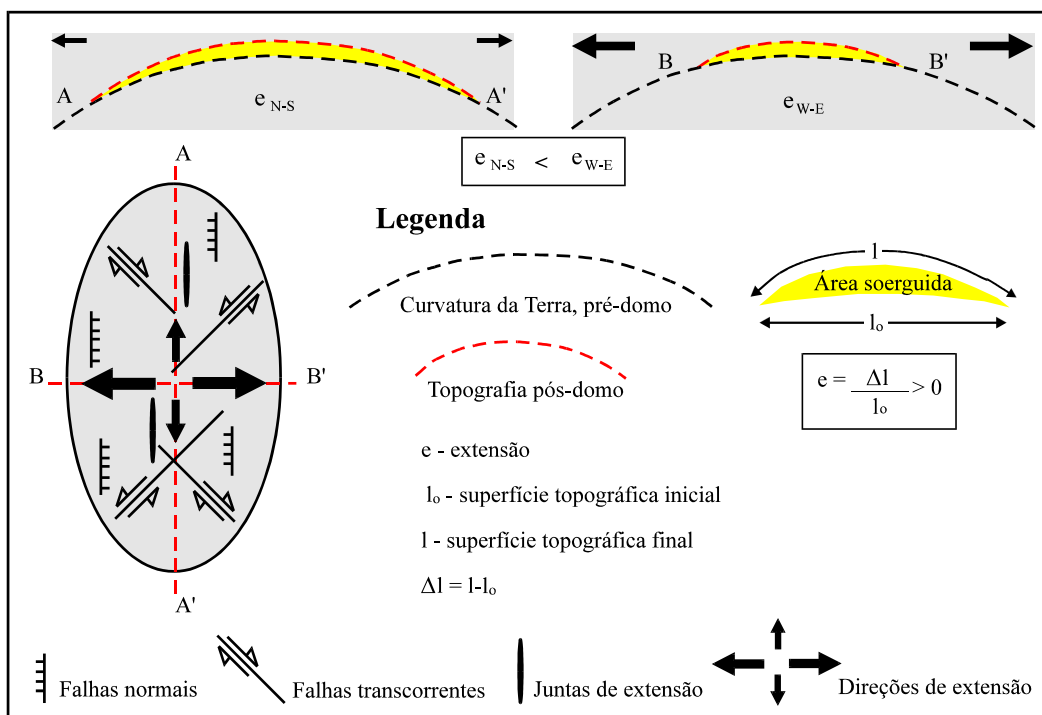


Figura 6.7. Esquema mostrando como um domo térmico produziria extensão N-S de menor expressão do que a extensão E-W, desta maneira explicando uma “compressão” aparente N-S. A extensão ao longo de cada eixo da elipse é calculada pela fórmula $e = \Delta l / l_0$, levando em conta a curvatura da Terra. Juntas de extensão N-S (um jogo E-W subordinados também poderia ser desenvolvido), falhas normais e transcorrentes (dextral na direção NW e sinistral na direção NE) são previstas pelo modelo, com boa correspondência à estruturação terciária da região (baseado em Price e Cosgrove 1990, Figuras 9.25 e 9.26).

Outra conclusão relacionada à estruturação terciária diz respeito à idade da movimentação principal do SFAB. Quando se analisa a Figura 4.12, percebe-se que a brechação que atingiu o calcário Jandaíra na Lagoa do Queimado, NE de Pendências (RN), não afetou os sedimentos da Formação Tibau. Todavia, a silicificação que atingiu o calcário também atingiu parte dessa formação. Isto implica em que o falhamento foi penecontemporâneo à deposição da Formação Tibau. Sabe-se também que, durante o Terciário, houve a extrusão dos basaltos da Formação Macau (Oligo-Mioceno; Sial 1981, 1991; Figura 6.5), inclusive aproveitando as fraturas NW. Este evento poderia ter ativado células de convexão com fluidos aquosos solubilizando quartzo dos sedimentos subjacentes à Formação Tibau, possibilitando a sua silicificação. Todas essas feições sugerem um inter-relacionamento entre os processos tectônicos (SFAB), deposicionais (Formação Tibau-Guamaré) e magmáticos (Formação Macau).

Durante o Quaternário, os sistemas de falhas de Carnaubais e Afonso Bezerra estiveram submetidos a uma compressão WNW a qual, aparentemente, perdura até os

dias atuais. Tentativamente, propomos que esta compressão seria uma resultante da expansão da Cadeia Meso-Atlântica (Assumpção 1990, 1992) e do movimento dextral no prolongamento ocidental das falhas transformantes ao longo da margem equatorial brasileira (Figura 6.8). A Figura 6.9 explica o mecanismo proposto para ativar um par cisalhante dextral ao longo da extensão ocidental (classicamente considerada como “inativa”) das zonas transformantes (*Chain e Fernando de Noronha-Jean Charcot; Gorini e Bryan 1976*). Este movimento seria responsável pela reativação oblíqua, normal-dextral, do SFC, como deduzido de estudos geofísicos e das estruturas em *beachrocks* na região de São Bento do Norte (Caldas *et al.* 1997b; Caldas 1998; Bezerra *et al.* 1998). Por outro lado, o SFAB teria sido reativado como um sistema normal, com um componente de movimento sinistral (Fonseca 1996). Este regime de esforços teria aprisionado sedimentos das formações Barreiras e Tibau, além de cascalheiras associadas ao Rio Açú, em baixos estruturais, conforme observado nas figuras 4.8 e 4.14, tanto no SFC como no SFAB.

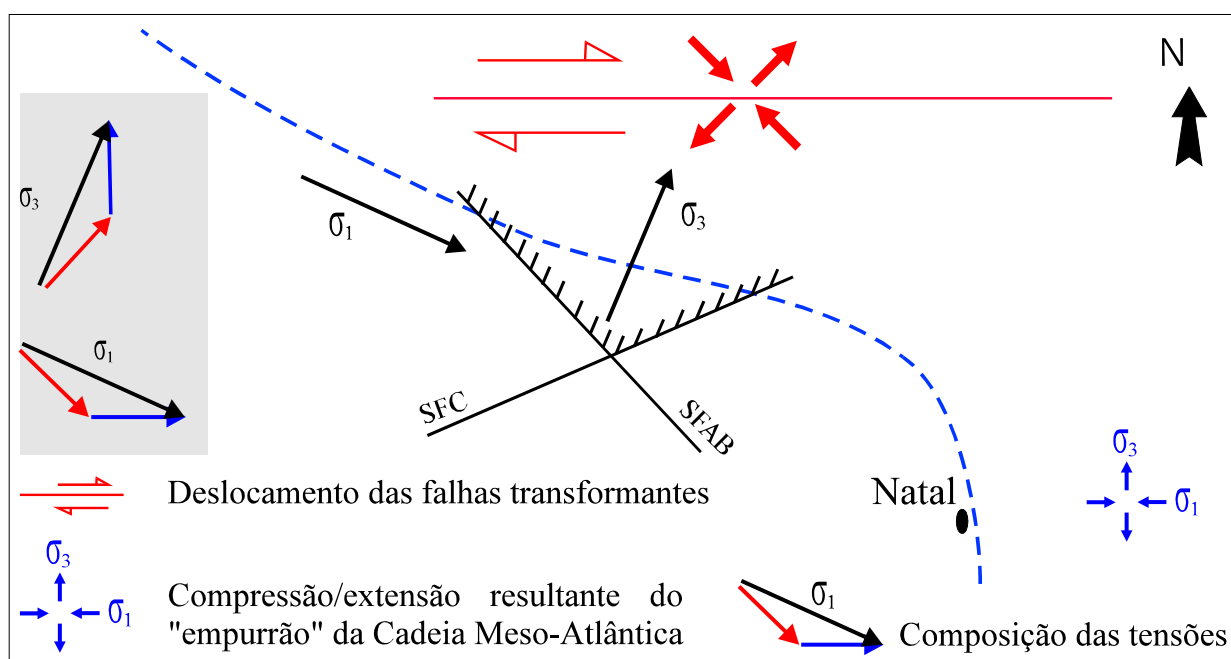


Figura 6.8. Modelo estrutural proposto para o Quaternário. A reativação dos sistemas de falhas de Carnaubais e Afonso Bezerra estaria relacionada à resultante do movimento transcorrente das falhas transformantes e da expansão da Cadeia Meso-Atlântica. Seguindo este modelo, o SFC seria reativado com falhas oblíquas normais-dextras, e o SFAB, com falhas normais exibindo componente sinistral.

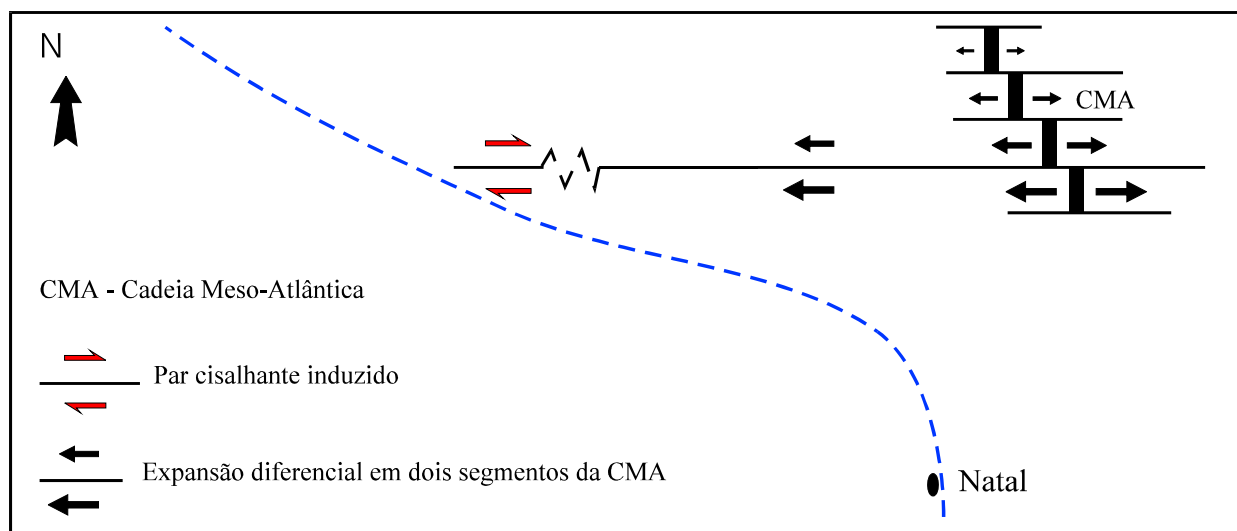


Figura 6.9. O mecanismo proposto para gerar um par cisalhante ao longo da zona transformante é baseado na geometria esférica do sistema, gerando um aumento nas taxas de expansão da cadeia, da região atlântica equatorial para sul. O comprimento das setas na CMA é proporcional à taxa de expansão da cadeia.

Muitas das dúvidas que não puderam ser esclarecidas neste trabalho são creditadas a fatores como a falta de datações ou de um maior número de informações estruturais, de campo e geofísicas, dentre outros. Desta forma, alguns procedimentos ficam como sugestões para futuros trabalhos. É o caso da realização de campanhas de aquisição de dados geofísicos, visando um maior detalhamento da estruturação rasa da bacia. A datação de minerais associados aos planos de falhas (fibras carbonáticas, p. ex.) possibilitaria uma melhor definição da idade em que ocorreram as reativações. Outro aspecto relevante diz respeito à caracterização de níveis argilosos para coleta de dados paleontológicos das unidades Cenozóicas. Por último, sugere-se o emprego do sensoriamento remoto para mapeamento lito-faciológico da área. Neste trabalho, o emprego de composições coloridas associadas à filtragem das frequências espaciais, pode oferecer um potencial discriminante para aplicação neste tipo de terreno.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- Affonso, A.O. 1991. *Estudo das feições lineares observadas em dados aeromagnéticos da Bacia do Solimões a partir de imagens digitais de sombreamento do relevo anômalo total*. Universidade Federal do Pará, Belém, Dissertação de Mestrado, 109 p.
- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B. & Fuck, R.A. 1977. Províncias estruturais brasileiras. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 2, Campina Grande, *Anais*, 242-258.
- Amaro, V.E. 1998. *Análise conjunta de dados geológicos, geofísicos, sensoriamento remoto, do setor extremo Nordeste da Província Borborema, Nordeste do Brasil, com ênfase nas Zonas de Cisalhamento Dúcteis Neoproterozóicas*. Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado. 397 p.
- Araripe, P.T. & Feijó, F. 1994. Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*. 8(1):127-141.
- Assumpção, M. 1990. *Direções dos esforços intraplaca na América do Sul*. Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Livre Docência. 59 p.
- Assumpção, M. 1992. The regional intraplate stress field in South America. *Journal Geophysic Research*. 97(138):11889-11903.
- Barbosa, R.V.N. 1984. *Evolução morfológica, ambiental e estrutural da área situada na confluência dos rios dos Cavalos e das Conchas, no litoral norte do RN*. Natal, UFRN/CCE/DG. 55p. (Boletim 8).
- Beltrão, F.J. 1989. *Uma nova abordagem para interpretação de anomalias gravimétricas regionais e residuais aplicada ao estudo da organização crustal: exemplo da região norte e noroeste do Ceará*. Universidade Federal do Pará, Belém, Tese de Doutorado, 156 p.
- Beltrão, J.F.; Silva, J.B.C.; Costa, J.C. 1991. Robust polynomial fitting Method for regional gravity estimation. *Geophysic*. 56(1):80-89.

- Bertani, R.T.; Neto, A.F.A.; Matos, R.M.D. 1987. O habitat do petróleo da Bacia Potiguar Emersa. *Boletim de Geociências da Petrobras*. 1(1):41-49.
- Bezerra, F.H.R.; Lima Filho, F.P.; Amaral, R.F.; Caldas, L.H.O.; Costa Neto, L.X. 1997. Quaternary coastal tectonics and sea-level changes in a passive margin: the example of Northeastern Brazil. In: Quaternary Coastal Tectonics Meeting. *Abstracts volume*.
- Bezerra, F.H.R.; Lima Filho, F.P.; Amaral, R.F.; Caldas, L.H.O.; Costa Neto, L.X. 1998. Using beachrock and hydro-isostatic predictions to identify Holocene coastal tectonics in NE Brazil. *Coastal Tectonics*. Geological Society Special Publication.
- Caldas, L.H.O. 1996. *Geologia costeira da região de São Bento do Norte e Caiçara, litoral norte potiguar*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Relatório de Graduação, 83 p.
- Caldas, L.H.O. 1998. *Estudo geológico e geofísico da Falha de Carnaubais, Bacia Potiguar - RN, e implicações neotectônicas*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Dissertação de Mestrado, 89 p.
- Caldas, L.H.O.; Coriolano, A.C.; Dantas, E.P.; Jardim de Sá, E.F. 1997a. Os beachrocks no litoral do Rio Grande do Norte: potencial como marcadores neotectônicos. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 17, Fortaleza, *Boletim 15*, 369-374.
- Caldas, L.H.O.; Medeiros, W.E.; Dantas, E.P.; Jardim de Sá, E.F. 1997b. Caracterização geológica e geofísica de uma estrutura na borda leste do Graben de Umbuzeiro, Bacia Potiguar/RN, e implicações neotectônicas. In: SBGf, Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 5, São Paulo, *Anais*, 2:885-890.
- Castro, D.L. & Medeiros, W.E. 1997. Afinamento crustal associado à implantação das bacias intracratônicas do Trend Cariri-Potiguar. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 17, Fortaleza, *Boletim 15*, 334-338.
- Chang, H.K.; Roswmann, R.O.; & Figueiredo, A.M.F. 1988. New concepts on the development of east brazilian basin. *Episodes*. 11(3):194-202.
- Coriolano, A.C.; Jardim de Sá, E.F.; Cowie, P.A.; Amaral, C.A. 1997. Estruturas frágeis no substrato da região de João Câmara (RN): correlação com a Falha Sísmica de Samambaia? In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 17, Fortaleza, *Boletim 15*, 325-329.

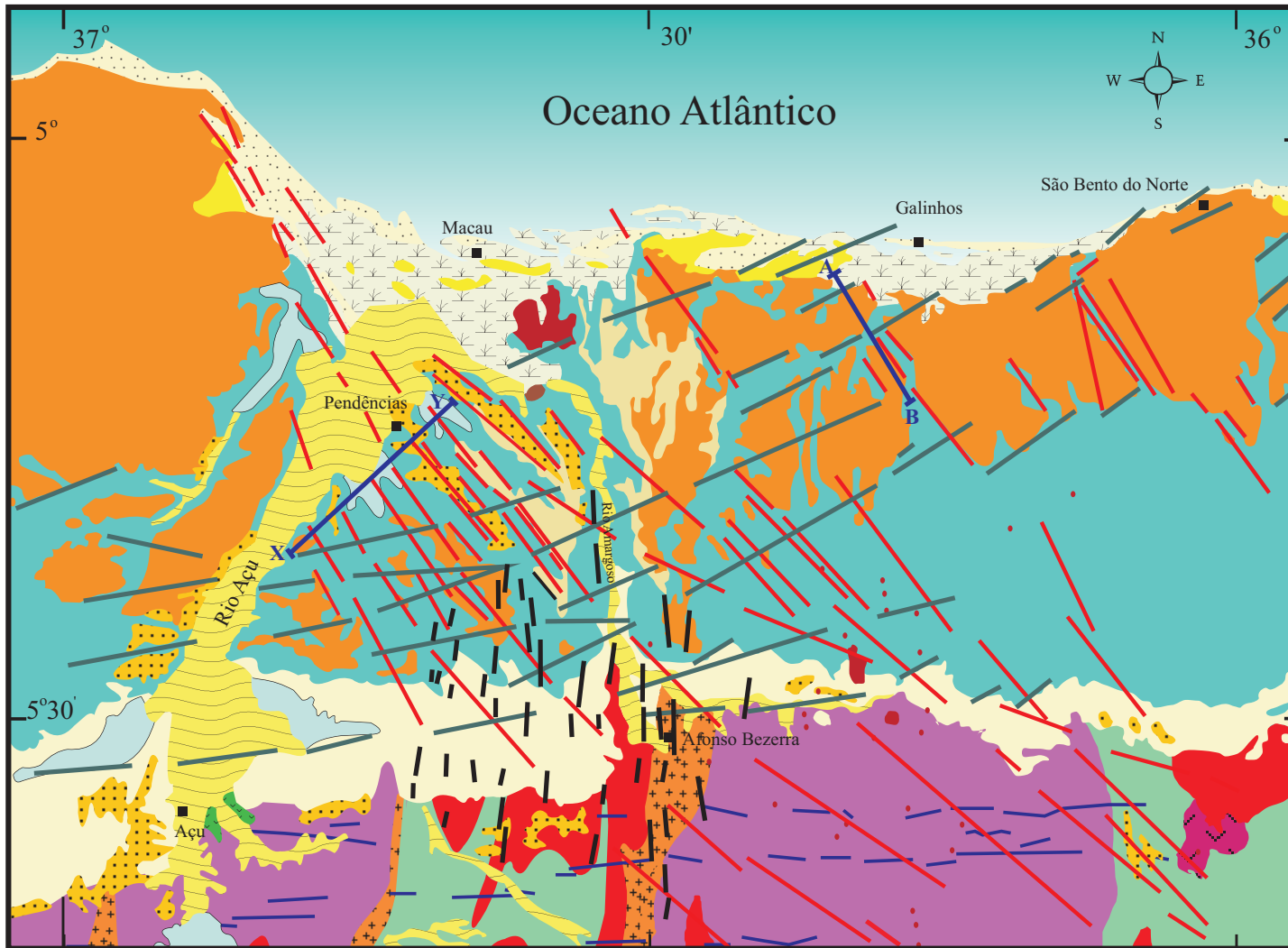
- Costa Neto, L.X. 1985. *Geologia da área entre Macauzinho e Boa Vista (sul de Macau - RN)*. Natal, UFRN/CCE/DG. 61p. (Boletim 9).
- Cremonini, O.A. & Karner, G.D. 1995. Soerguimento termal e erosão na Bacia Potiguar submersa e seu relacionamento com a evolução da margem equatorial brasileira. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 16, Recife, *Boletim 14*, 181-184.
- Cremonini, O.A. 1993. *Caracterização estrutural e evolução tectônica da área de Ubarana, porção submersa da Bacia Potiguar, Brasil*. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 143 p.
- Cremonini, O.A.; Goulart, J.P.M.; Soares, U.M. 1996. O Rifte Potiguar: novos dados e implicações tectônicas. In: UNESP, Simpósio Sobre o Cretáceo do Brasil, 4, São Paulo, *Boletim*, 89-93.
- Crósta, A.P. 1993. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. ed. rev. Campinas, IG/UNICAMP. 70 p.
- Dantas, E.P.; Caldas, L.H.O.; Castro, D.L.; Jardim de Sá, E.F. 1997. Gravimetria e sensoriamento remoto aplicados na caracterização do Lineamento de Afonso Bezerra e do Sistema de Falhas Carnaubais (RN). In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 17, Fortaleza, *Boletim 15*, 343-347.
- EARTH RESOURCE MAPPING PTY LTD. 1995a. *Applications*. In: __. 7 ed. ER Mapper 5.0. Helping People Manage the Earth: Tutorial. San Diego, Earth Resource Mapping Pty Ltd. 372 p.
- EARTH RESOURCE MAPPING PTY LTD. 1995b. *Reference*. In: __. 7 ed. ER Mapper 5.0. Helping People Manage the Earth: Tutorial. San Diego, Earth Resource Mapping Pty Ltd, 58-59.
- EARTH RESOURCE MAPPING PTY LTD. 1995c. *Using spatial filters*. In: __. 7 ed. ER Mapper 5.0. Helping People Manage the Earth: Tutorial. San Diego, Earth Resource Mapping Pty Ltd, 89-100.
- Fonseca, V.P. 1996. *Estudos morfo-neotectônicos na área do baixo curso do Rio Açu (Açu - Macau) Rio Grande do Norte*. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, 103 p.

- Fonseca, V.P. 1997. Comportamento litorâneo entre Ponta do Mel e Ponta dos Três Irmãos, litoral do Rio Grande do Norte. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 17, Fortaleza, *Boletim 15*, 374-378.
- Fonseca, V.P. & Cruz Jr., F.W. 1995. Comportamentos morfo-neotectônicos no baixo do Rio Açu (Açu - Macau) RN. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 16, Recife, *Boletim 14*, 172-176.
- Fonseca, V.P. & Saadi, A. 1995. Feições geomorfológicas associadas à confluência dos rios Açu e Pataxós (Açu-Ipanguaçu-Itajá) RN. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 16, Recife, *Boletim 14*, 191-194.
- Fortes, F.P. 1982. Utilização combinada de fotogeologia com magnetometria e sísmica, na prospecção de petróleo na Bacia Potiguar. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 32, Salvador, *Anais*, p. 2407-2411.
- Françolin, J.B.L. & Szatimari, P. 1987. Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem norte brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, **17**(2):196-207.
- GOLDEN SOFTWARE, INC. 1995. *Surface mapping system*. Version 6.01. (win32). Golden Software, Incorporation. Copyright©, 1993-95. Colorado, U.S.A.
- Gorini, M.A. & Bryan, G.M. 1976. The tectonic fabric of the equatorial atlantic and adjoining continental margins: Golf of Guinea to Northeastern Brazil. *Anuário da Academia Brasileira de Ciências*. **48**:115-122 (suplemento).
- Hackspacher, P.C.; Corsino, A.R.; Srivastava, N.K.; Tiriba, V.F. 1985. *A Falha de Afonso Bezerra como evidência de significativo tectonismo frágil NW-SE, na Bacia Potiguar Emersa - RN*. Natal, UFRN/CCE/DG. 68p. (Boletim 10).
- INPE. 1995. *CD-ROM da órbita 215, no ponto 064 do Satélite LADSAT 5 TM*. Divisão de Geração de Imagens. Brasil.
- Jardim de Sá, E.F. 1984. A evolução Proterozóica da Província Borborema. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 11, Recife, *Atas*, 297-271.
- Jardim de Sá, E. F. 1994. *A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan-Africana*. Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado. 803 p.

- Lange Jr., F. L. 1998. Cotação. *Fator GIS: a revista do geoprocessamento*. 21(4):26-27.
- Lima, C.C.; Viviers, M.C.; Moura, J.R.S.; Santos, A.M.; Carmo, I.O. 1990. O Grupo Barreiras na Bacia Potiguar: relações entre o padrão de afloramento, estruturas Pré-Barreiras e neotectonismo. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 36, Natal, *Anais*, 2:607-620.
- Matos, R.M.D. 1992a. The northeast brazilian rift system. *Tectonics*. 11(4):766-791.
- Matos, R.M.D. 1992b. *Deep seismic profiling, basin geometry and tectonic evolution of intracontinental rift basins in Brazil*. Cornell University, United States, Doctor Philosophy Theses, 276 p.
- Miranda, F.M. 1983. *Geologia da área de Macauzinho, litoral leste do Estado do Rio Grande do Norte*. Natal, UFRN/CCE/DG. 49p. (Boletim 7).
- Novo, E.M.L.M. 1992. *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. 2 ed. São Paulo, Edgard Blüncher, 308 p.
- Oliveira, D.C. 1992. *O Papel do enxame de diques Rio Ceará Mirim na evolução tectônica do Nordeste Oriental (Brasil): implicações na formação do Rifte Potiguar*. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 172 p.
- Oliveira, D.C. 1993. Contribuição ao estudo das estruturas rasas na Bacia Potiguar: análise estrutural do afloramento Afonso Bezerra (RN) e adjacências. In: SBG, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 4, Belo Horizonte, *Boletim* 12, 306-311.
- Price, N.J. & Cosgrove, J.W. 1990. *Analysis of geological structures*. Cambridge Univ. Press. Cambridge, 502 p.
- Saadi, A. 1991. *Ensaio sobre a morfotectônica de Minas Gerais*. Tese para admissão ao Corpo de Prof. Titular IGC/UFGM. 300 p. + anexos. (inédito).
- Sial, A.N. 1976. The Rio Grande do Norte allkali-olivine-basalt association, Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*. 6(1):1-14.
- Sial, A.N.; Fodor, R.V.; Long, L.E. 1991. Peridotite xenoliths and Tertiary alkaline-basalts in Northeastern Brazil. In: International Kimberlite Conference, 50, Brasília, *Field guide book*, 3-13.

- Sial, A.N.; Long, L.E; Pessoa, D.A.R.; Kawashita, K. 1981. Potassium-Argon ages and Isotope geochemistry of Mesozoic and Tertiary basaltic rocks, Northeastern Brazil. *Anuário da Academia Brasileira de Ciências*. **53** (1):115-122.
- Silva, C.G. 1991. *Holocene stratigraphy and evolution of the Açu River Delta, Rio Grande do Norte State, Northeastern Brazil*. Duke University, United States, Doctor Philosophy Theses, 359 p.
- Souza, S.M. 1982. Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. In: SBG, Congresso Brasileiro Geologia, 32, Salvador, *Anais*, **5**:2392-2406.
- Srivastava, N.K. & Corsino A.R. 1984. Os carbonatos de Touros: petrografia e estratigrafia. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 11, Recife, *Atas*, 165-176.
- Szatimari, P.; Françolin, J.B.L.; Zanotto, O.; Wolff, S. 1987. Evolução tectônica da Margem Equatorial Brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*. **17**(2):180-188.
- Torres, H.H.F. 1994. *Metodologia para estudos neotectônicos regionais: o caso João Câmara*. Recife, CPRM, 50 p.

ANEXOS



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
 Centro de Ciências Exatas e da Terra
 Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica

ANEXO 01

Mapa Geológico da Porção Centro-Norte do Rio Grande do Norte

Tema de Dissertação:
 Gravimetria e Sensoriamento Remoto: Uma Aplicação ao Estudo da Tectônica Recente entre Macau e São Bento do Norte (RN)

Autor: Eugênio Pacelli Dantas

Orientação: Dr. David Lopes de Castro (UFC)

Co-Orientação: Prof. Dr. Emanuel Ferraz Jardim de Sá (UFRN)

Dissertação
 Nº 06

Fonte: Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte (1:500.000)
 DNPM-UFRN-PETROBRAS-GOVERNO DO RIO GRANDE DO NORTE (1997)

Legenda Estratigráfica Simplificada

Quaternário	(01)	(02)	(03)
Terciário	(04)	(05)	(06)
	(07)		(08)
	(09)		
Cretáceo		(10)	
		(11)	
Jurássico		(12)	
Proterozóico	(13)	(14)	
		(15)	
Paleo e/ou Meso-Proterozóico		(16)	
Arqueano a Paleoproterozóico		(17)	

- | | |
|--|---|
| (01) Depósitos praias e eólicos recentes | (02) Depósitos aluvionares |
| (03) Depósitos de planícies e canais de marés | (04) Formação Barreiras |
| (05) Depósitos eólicos antigos | (06) Depósitos de cascalheiras |
| (07) Formação Tibau | (08) Formação Macau |
| (09) Magmatismo Serra do Cuó | (10) Formação Jandaira |
| (11) Formação Açú | (12) Enxame de diques Rio Ceará-Mirim |
| (13) Granitóides brasileiros | (14) Suítes básicas a interm. brasileiras |
| (15) Granitóides Transamazônicos | (16) Grupo Seridó |
| (17) Complexo Gnáissico-Migmatítico (Complexo Caicó) | |



Os lineamentos deste mapa (SFC, SFAB e N-S) foram obtidos a partir das Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 (Capítulo IV).

Legenda

▣ ▣ Povoados e cidades

☪ Lagoas e açudes

— Limite de estados

— Vias de acesso: estradas e rodagens

▬▬▬ Sistema de Falhas de Carnaubais (SFC)

▬▬▬ Sistema de Falhas de Afonso Bezerra (SFAB)

▬▬▬ Sistema de fraturas N-S

A-B - Perfil esquemático da Figura 4.7

X-Y - Perfil esquemático da Figura 4.13



Escala 1:500.000



RESUMO

Esta dissertação aborda uma ampla área na porção central da Bacia Potiguar, abrangendo as cidades de Macau, São Bento do Norte e Pendências, no Estado do Rio Grande do Norte. Pesquisas anteriores (Hackspacher *et al.* 1985, p. ex.) mostraram a existência de uma rede de lineamentos nessa região, orientados segundo as direções NE-SW (Sistema de Falhas de Carnaubais - SFC) e NW-SE (Sistema de Falhas de Afonso Bezerra - SFAB). Neste trabalho, foi aprimorada a cartografia desses lineamentos e caracterizadas as diferentes etapas de movimentação e reativações recentes. Para tanto, foi utilizado um conjunto de técnicas envolvendo sensoriamento remoto, gravimetria e análise topográfica, com suporte de dados geológicos obtidos no terreno e análise do material bibliográfico disponível. O quadro geológico-estrutural identificado na área de estudo abrange um período que vai desde o final do Precambriano aos dias atuais. Esta história geológica pode ser assim resumida:

- As estruturas mais antigas do SFAB teria se formado no final do Precambriano ao Cambriano, como falhas tardi-brasilianas controlando a intrusão de diques de granitos tardios, próximo a Pedro Avelino (RN);

- No Cretáceo inferior, durante a abertura do Rifte Potiguar, o SFC foi implantado consoante a uma extensão principal WNW-SSE (Matos 1992), enquanto o SFAB deve ter se comportado como falhas de transferência;

- Durante o Terciário, uma importante reativação atingiu ambos os sistemas. Uma compressão N-S teria provocado transcorrência dextral no SFAB e sinistral no SFC. O mecanismo que deu origem a esta compressão ainda não está totalmente esclarecido, sendo, tentativamente, associado a um domo térmico delineado pelas ocorrências de vulcânicas básicas alcalinas da Formação Macau. Neste evento, falhas extensionais favoreceram a ocorrência de um depocentro com orientação N-S, propiciando o desenvolvimento de fácies marinhas na região limitada pelos sistemas de falhas de Afonso Bezerra e Carnaubais, como indicado pelas formações Tibau-Guamaré, em ambiente costeiro, lateralmente associada aos clásticos continentais da Formação Barreiras;

Finalmente, durante o Quaternário, uma nova reativação afetou ambos os sistemas, permitindo a preservação de litotipos das formações Tibau e Barreiras, além das cascalheiras do Rio Açu e sedimentos costeiros, em baixos estruturais. Nesse período, quando ambos os sistemas estiveram subordinados a uma compressão WNW-SSE, o SFC apresentou um movimento oblíquo normal-dextral, enquanto o SFAB obedeceu a um movimento normal com componente sinistral. Esse sistema de tensões é, hipoteticamente, relacionado à composição de um par cisalhante dextral nas zonas transformantes ao longo da margem equatorial brasileira (atribuído a taxas de expansão distintas em diferentes segmentos da cadeia Meso-Atlântica), com a tensão compressiva E-W (Assumpção 1992) gerada pela expansão da cadeia.

ABSTRACT

This dissertation deals with a large area in the central part of the Potiguar basin, including the villages of Macau, São Bento do Norte and Pendências, in the State of Rio Grande do Norte. Previous research identified different lineament sets in this region, trending NE-SW (Carnaubais Fault System - SFC) and NW-SE (Afonso Bezerra Fault System - SFAB). The present work improved the cartography of these lineaments, characterizing different movement episodes and recent reactivations. The adopted approach integrated data obtained by remote sensing, gravimetry and topographic analysis techniques, supported by field-collected and bibliographic information. The geological-structural framework identified in the area encompasses events ranging in age from the end of the Precambrian to the present day. This geological history may be summarized as follows:

- The oldest SFAB structures were formed between the end of Precambrian and the Cambrian period, as indicated by late-Brasiliano faults that control the intrusion of late granite dykes near Pedro Avelino (RN);

- In the early Cretaceous, during the opening of the Potiguar Rift, the SFC was developed following the main WNW-ESE extension direction (Matos 1992), while the SFAB probably behaved as transfer faults;

- During the Tertiary, an important reactivation affected both fault systems. A N-S compression induced dextral strike-slip movements along the SFAB and a sinistral component in the SFC. The mechanism that originated this compression is not perfectly understood, being tentatively related to a thermal doming associated with the alkaline basic volcanics of the Macau Formation. In this event, N-S trending extensional faults produced subsidence and allowed the deposition of marine facies along the region delimited by the Afonso Bezerra and the Carnaubais fault systems, as indicated by the Tibau-Guamaré formations of coastal environment occurring, as lateral equivalents of the Barreiras Formation continental clastics;

Finally, during the Quaternary, a younger event reactivated once again both fault systems, partially with a major influence in the outcrop patterns of the Tibau and Barreiras formations, besides the Açu river gravel deposits and coastal sediments, all of them mostly preserved in down-faulted blocks. During this time interval, when both fault systems were subjected to a WNW-ESE compression, the SFC displays an oblique, normal-dextral movement, while the SFAB has a major normal movement conjugated with a minor sinistral one. This stress regime is hypothetically related to a composition between a dextral shear couple due to the transform zones along the Brazilian equatorial margin (ascribed to distinct spreading rates in different segments of the Mid-Atlantic ridge), with an E-W compression (Assumpção 1992) generated by the spreading of the ridge.