

Sensoriamento Remoto Aplicado à Neotectônica da Faixa Litorânea Oriental do Estado do Rio Grande do Norte

FRANCISCO HILÁRIO REGO BEZERRA^{1,2}

VENERANDO EUSTÁQUIO AMARO¹

¹UFRN-Departamento de Geologia

Caixa Postal 1639, 59072-970 Natal, RN, Brasil

²Department of Geological Sciences

University College London

Gower Street, Londres WC1E 6BT, Reino Unido

Abstract. Sattelite imagery, in addition to borehole and geophysical works across the area between Natal and Baía Formosa, clearly indicate a continuous faulting process from the Tertiary, at least Miocene, to the Quaternary. Three main sets of faults (NE-, NW- and NS-trending faults), which display both a strike-slip and a dip-slip component of movement, were recognised. The NE- and NW-trending faults represent reactivation of Precambrian shear zones and are the master faults of *grabens* and *horsts* across the study area. The brittle neotectonic reactivation of faults in NE Brazil may be related to EW-oriented maximum stresses.

Keywords: Remote Sensing, Neotectonics, Tertiary, Quaternary

1 Introdução

A região costeira do Nordeste Brasileiro tem sido descrita como palco de intensa deformação frágil durante o Cenozóico. No litoral oriental do Rio Grande do Norte, diversos estudos envolvendo dados geológicos, geomorfológicos e geofísicos demonstraram a relevância do tectonismo cenozóico e a existência de *grabens* e *horsts* em alguns setores da costa.

Costa e Salim (1972) identificaram preliminarmente os blocos abatidos dos *grabens* de Natal e Parnamirim através da análise de poços, mostrando que as falhas limites dessas estruturas acompanham vales de rios e apresentam orientação NE e NW.

Posteriormente, Queiroz *et al.* (1985) realizaram um levantamento geoeletrico na área de Canguaretama e detectaram o condicionamento do Vale do rio Curimataú por falhas, preenchido pela Formação Barreiras e sedimentos quaternários.

Recentemente, Bezerra *et al.* (1993) reportaram a evolução neotectônica da região de Natal baseados na interpretação morfotectônica aliada a dados gravimétricos e de poços, demonstrando o alinhamento direcional entre as zonas de cisalhamento brasileiras e os principais padrões de falhas que controlam *grabens* e *horsts* na cobertura sedimentar.

2 Objetivos

O presente estudo demonstra que a existência de tais *grabens* e *horsts* se estende por uma ampla faixa litorânea, no mínimo desde Natal até Baía Formosa (RN). Paralelamente, este trabalho quantifica os principais rejeitos verticais gerados durante falhamentos cenozóicos, indicando que as principais falhas da área de estudo afetam rochas terciárias e controlam fortemente a sedimentação quaternária. Finalmente, mostra-se a importância do sensoriamento remoto no mapeamento das falhas condicionantes desses blocos crustais, através do tratamento digital de produtos Landsat 5-TM, que se mostrou adequado ao reconhecimento de estruturas neotectônicas na Faixa Costeira do Nordeste do Brasil. Uma breve discussão sobre a origem das falhas neotectônicas é também apresentada.

3 Materiais e Métodos

Os produtos de sensoriamento remoto utilizados compreenderam: (a) cópias *offset* das imagens de radar GEMS/Banda X (escala 1:250000) do Projeto Radambrasil; (b) imagens digitais do Landsat-TM (bandas 1-5 e 7) dos quadrantes 214-64A e 214-64C de 06/Agosto/1993, e a cena 215-64 de 02/Agosto/1989.

Estes dados foram complementados com informações obtidas dos mapas topográficos da SUDENE (escala 1:100000) e fotografias aéreas (escala 1:70000), com recobrimento total da área de interesse. Os dados geométricos foram reinterpretados a partir dos levantamentos realizados por Queiroz *et al.* (1985) e os valores *logs* dos poços foram aqueles da CDM-RN e CAERN.

As imagens digitais do Landsat-TM foram processadas com o *ER-Mapper v.5.2* para UNIX no *Centre for Remote Sensing* do *Imperial College* (Londres, Inglaterra). Nos tratamentos adotados, o intuito principal foi a detecção e o realce de linhas e bordas que definissem variações de contrastes sutis a marcantes nas imagens e que refletissem feições no terreno como os padrões de regularidade e/ou modificações na morfologia dos vales e drenagens, os contatos abruptos entre diferentes litologias, os alinhamentos topográficos, o arranjo geométrico e angularidade entre os platôs e os baixios interiores e costeiros. A caracterização destas feições gerais sugere evidências sobre padrões conjugados de sistemas de falhas e o basculamento alternado do terreno em *grabens* e *horsts*, condicionados às movimentações nas zonas de falhas.

A estratégia de tratamentos das imagens digitais envolveu a análise e avaliação das imagens resultantes da aplicação das técnicas de processamento que se seguem: (a) filtragens direcionais das imagens monocanais; (b) composições coloridas em RGB e IHS; (c) razões de bandas combinadas em RGB.

Diversos filtros direcionais de dimensões 3 x 3 foram testados em áreas com dimensões entre 10 x 10 km e 25 x 25 km, onde os melhores resultados foram obtidos com filtros Prewitt com iluminação a partir das oito principais direções azimutais. Os filtros direcionais de dimensão 5x5 que propiciaram o melhor realce dos lineamentos em macroescala foram os filtros Prewitt [(a) a (d)] e Sobel [(e) e (f)], com ampliação não-linear do contraste por transformante logarítmica:

(a) 0 -1 -1 0 0 (b) 0 0 -1 -1 0 (c) 0 -1 0 1 0 (d) 0 -1 -1 -1 0
 1 0 -1 -1 0 0 -1 -1 0 1 -1 -1 0 1 1 -1 -1 -1 -1 -1
 1 1 0 -1 -1 -1 -1 0 1 1 -1 -1 0 1 1 0 0 0 0 0
 0 1 1 0 -1 -1 0 1 1 0 -1 -1 0 1 1 1 1 1 1 1
 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 -1 0 1 0 0 1 1 1 0

(e) 0 -1 -2 -2 -3 (f) -3 -2 -2 -1 0
 1 0 -3 -4 -2 -2 -4 -3 0 1
 2 3 0 -3 -2 -2 -3 0 3 2
 2 4 3 0 -1 -1 0 3 4 2
 3 2 2 1 0 0 1 2 2 3

Nos procedimentos de realce e detecção através de filtragens direcionais dos elementos lineares de alta frequência nas imagens, foram enfatizados os lineamentos relativos aos elementos da deformação frágil em macroescala: (a) lineamentos tardi- ou pós-deformação brasileira nos terrenos do embasamento cristalino, conforme os princípios de distinção descritos por Jardim de Sá *et al.* (1993) e Amaro e Strider (1994); (b) lineamentos que truncam os terrenos sedimentares e que mostram continuidade geométrica com os lineamentos da deformação dúctil e frágil no embasamento cristalino, provavelmente resultantes de reativações fanerozóicas destes lineamentos; e (c) lineamentos que interceptam indiscriminadamente os terrenos, em orientações variadas e que condicionam feições morfológicas recentes, como padrões geométricos de drenagens e escarpamentos.

A classificação dos lineamentos como referentes às estruturas frágeis foi realizada com base nas características intrínsecas a essa classe de lineamentos, quais sejam: (a) a extensão continental, (b) a orientação azimutal retilínea, (c) a densidade descontínua, (d) os padrões paralelos (diferenças de azimute inferiores a 30°) a ortogonais (diferença de azimute superiores a 60°), (e) a ausência de inflexões num único feixe, (f) o comportamento interseccional, e (g) o caráter interceptor independente dos aspectos geológicos.

4 Fotointerpretação das Imagens Landsat 5-TM e GEMS/Banda X

A fotointerpretação monoscópica das imagens resultantes do tratamento digital por técnicas de filtragem direcional e das cópias *offset* de radar GEMS/Banda X, permitiu a confecção do mapa geológico da **Figura 1** que evidencia os padrões de distribuição espacial e orientação azimutal dos sistemas de lineamentos da deformação frágil a frágil-dúctil. Este mapa mostra ainda a localização das seções realizadas transversalmente aos principais vales desta porção da zona litorânea e apresentados na **Figura 2** com informações geológica, geoeletricas e dados de poços.

As composições coloridas em RGB e IHS selecionadas foram aquelas que propiciaram a melhor distinção visual entre as unidades litoestratigráficas e o destaque das feições geomorfológicas do terreno, quando comparadas às informações geológicas de campo. Os

melhores resultados foram obtidos com as composições das bandas, representadas respectivamente em R-G-B ou I-H-S:

- Bandas 321 em RGB: as imagens com histogramas modificados por aumento não-linear de contraste (Equalize e Gaussiana) permitiram uma excelente distinção entre as extensas unidades geológicas dos terrenos compostos pela Formação Barreiras (arenitos variados), Formação Jandaíra (carbonatos), embasamento gnáissico-migmatítico e coberturas arenosas recentes (areias dunares e aluviões), com aspecto natural da visualização. Estes destaques nas bandas do visível são provavelmente decorrentes da alta reflectância das áreas com sílica-livre se comparadas àquelas com carbonatos e com variações no grau de oxidação do ferro. Nos setores praias foram distintas áreas com vegetação permanente (dunas fixas) daquelas sem vegetação (dunas móveis, não diferenciadas na **Figura 1** por questão de escala).

- Bandas 741 em RGB: com necessidade de pouco ajuste no histograma, além dos mesmos destaques que as imagens anteriores, estas imagens ampliaram as possibilidades de distinção no interior das principais unidades, facilitando assim o detalhamento geológico. O uso da banda 7 favoreceu a detecção das proporções variadas do ferro, em diferentes estados de oxidação, e argilas nas rochas. A arranjo geométrico entre os vales principais e as drenagens estreitas foi favorecido pelo destaque dado à vegetação ciliar na banda 4, que também intensificou a distinção as dunas fixas e os arenitos da Formação Barreiras. As rochas com teores variados de minerais de argila e carbonatos foram discriminadas por influência da banda 1. Desta forma, foram realçadas feições morfotectônicas como a estruturação dos campos dunares e o padrão retangular e anguloso de drenagens, lagoas e lagunas.

- Bandas 543 em IHS: as imagens com aumento linear de contraste enfatizaram o detalhamento em áreas menores com dimensões de até 25 x 25 km. Os setores caracterizados pela presença de sílica-livre, como dunas, praias e aluviões, foram facilmente destacados dos arenitos ferruginosos e áreas com maiores proporções de materiais argilosos. Portanto, esta imagem favoreceu a discriminação dos terrenos do embasamento cristalino dos demais terrenos, e de setores com diferenças composicionais relacionadas aos teores de ferro e argila na Formação Barreiras, dos quais a predominância de limites retilíneos demonstra o controle estrutural sobre os contatos geológicos. Este contraste define o aspecto retiforme e escalonado da linha costeira formada pela Formação Barreiras, e os contatos retilíneos entre os campos dunares e os arenitos ferruginosos. O destaque da vegetação que acompanha os vales, as lagoas e as drenagens menores permitiu a definição dos padrões retangulares das drenagens e a alta angularidade dos escarpamentos.

- Razões de bandas 3/1-5/3-4/2 em RGB: as imagens com aumento não-linear de contraste para cada razão permitiu um amplo detalhamento em áreas com dimensões de até 15 x 15 km contendo unidades de paisagem óxidos de ferro (alta reflectância em 3/1 e 5/3) e vegetação verde (alta reflectância em 4/3). A imagem englobando a cidade de Natal e arredores permitiu a diferenciação entre os campos dunares, manguezais do Rio Potengi, arenitos da Formação Barreiras e áreas urbanas. Contudo, a principal característica nesta imagem foi demonstrada pela predominância de meandros abandonados e a disposição assimétrica dos manguezais do Rio Potengi melhor desenvolvidos em sua margem norte, feições que sugerem o rebatimento

assimétrico em meio-*graben* do bloco a norte da Falha Potengi, de *trend* geral N60°E que ocorre ao longo do vale do Rio Potengi.

5 Resultados e Discussões

Os principais conjuntos de zonas de falhas reconhecidos na faixa costeira apresentam direções N40-60°E, N40-60°W e NS. Os conjuntos com *trends* gerais NE e NW são dominantes na área estudada e mostram relações de intersecção de padrões conjugados, enquanto o conjunto NS tem comportamento subordinado mas determinante no controle do forte alinhamento NS da linha costeira.

As correlações geológicas sugerem que estas zonas de falhas formadas ou reativadas no Terciário, Quaternário. As principais evidências de processos de falhamentos no Terciário e Quaternário são as variações na espessura dos depósitos sedimentares entre as principais zonas de falhas, escarpas de falhas e alinhamentos de escarpas de falhas do Quaternário e lineamentos tectônicos que interceptam os depósitos do Terciário Superior e Quaternário. As principais feições topográficas lineares e padrões angulares de drenagens ocorrem igualmente controlados por falhas do Terciário e Quaternário.

As falhas de *trends* gerais NE e NW são amplamente condicionantes dos padrões retangulares e paralelos das drenagens. Estes padrões de drenagens são comuns nos platôs compostos pelas superfícies aplainadas da Formação Barreiras, que correspondem aos blocos soerguidos, dissecados e capeados por terraços aluvionares e campos dunares. Os dados de sensoriamento remoto e de campo, como interrupções abruptas de níveis faciológicos e a geometria retilínea dos planos de falhas, evidenciam para os conjuntos de falhas componentes de deslocamento normal e transcorrente. As quebras topográficas e escarpamentos relacionados a escarpas de falhas mostram desníveis verticais de cerca de 30-40 m como resultado de compensações cumulativas no Terciário Superior e Quaternário. Entretanto, as principais estimativas sobre os movimentos ao longo das zonas de falhas provém das seções geológicas e geofísicas.

A análise dos produtos de sensoriamento remoto demonstrou o importante contraste textural/estrutural entre os terrenos do embasamento cristalino, marcado por superfícies relativamente dissecadas e rugosas, com padrões dendríticos de drenagens e de alta densidade, e as superfícies aplainadas com padrões retangulares de drenagens que caracterizam os terrenos sedimentares.

O vale de Canguaretama é limitado por falhas normais de direção N60°E que possuem evidências de movimentos transcorrentes e normais. O rios principais mantém o curso condicionados a esta direção, com defleções marcantes para N40°W próximo à linha costeira, definindo o padrão retangular controlado por falhas conjugadas. A seção AA' da **Figura 2** foi confeccionada com base em perfis geoeletricos de Queiroz *et al.* (1985) e dados de novos poços. O bloco central rebatido (teto) possui altitudes entre 2-12 m, enquanto os blocos laterais (muros) possuem altitudes superiores a 70 m e maiores espessuras de sedimentos. Uma camada de calcários do Cretáceo ocorre no bloco soerguido entre 5,5 e 7,0 km a partir do ponto A e não ocorre no bloco central ou no outro bloco soerguido. Esta feição sugere uma evolução em multi-

falhamentos com diversas fases de soerguimento/submergência combinadas, ou movimentos intensos de transcorrência.

O vale de Guaraíra, que inclui a lagoa Guaraíra, está condicionado às zonas de falhas normais de direção N50°E, com componente transcorrente associada. A área do vale corresponde ao bloco rebaixado com desnível vertical superior a 40 m na base da Formação Barreiras (seção BB' da **Figura 2**). As bordas da lagoa Guaraíra estão limitadas ao par conjugado de zonas de falhas NE e NW que representam a reativação das zonas de cisalhamento brasileiras.

O vale do Trairí ocorre limitado às zonas de falhas normais de direção N40-50°W paralelas às zonas de cisalhamento brasileiras. Diversas lagoas ocorrem no bloco soerguido a norte orientadas nas direções N60°E e N40°W sugerindo um controle tectônico das feições morfológicas. A Formação Barreiras possui espessura superior a 80 m no bloco rebaixado e entre 20-50 m nos blocos soerguidos (seção CC' da **Figura 2**).

O meio-*graben* do Rio Potengi tem extensão superior a 20 km desde a linha costeira até a cidade de Macaíba, controlado pela Falha do Potengi de direção N60°E localizada nas margens direitas dos rios Potengi e Jundiá. A Falha do Potengi intercepta toda a seqüência estratigráfica da área desde o embasamento cristalino e provavelmente continua para *offshore*. A área do meio-*graben* é intensamente interceptada pelo sistema de zonas de falhas de direção NS, que condicionam inúmeras feições morfológicas. A principal expressão topográfica da Falha do Potengi indica desníveis verticais de 40-60 m freqüentemente recobertos por campos dunares. As seções DD' e EE' da **Figura 2** sugerem para as rochas sedimentares que preenchem o meio-*graben* do Potengi uma espessura superior a 350 m. A espessura da Formação Barreiras varia desde cerca de 100 m nos blocos soerguidos até valores superiores a 250 m no bloco rebaixado (seção EE'), com a base indicando desnível vertical superior a 250 m. Os terraços aluvionares do Rio Potengi são melhor desenvolvidos na margem esquerda (largura superior a 5 km) do que na margem direita do rio (largura inferior a 1 km), acompanhado de inúmeros paleomeandros. Estes elementos sugerem uma inclinação contínua do bloco rebatido controlando a migração lateral dos canais do rio em direção à Falha do Potengi, feições consistentes com as principais características da estrutura de meio-*graben*.

A geometria dos terraços aluvionares estão fortemente controlados pelas principais zonas de falhas nos vales de Canguaretama, Guaraíra e Trairí, sugerindo que as falhas que condicionam os vales exerceram intensa atividade modeladora dos níveis superiores da crosta e da superfície após a deposição da Formação Barreiras e têm permanecido ativas no Quaternário.

6 Conclusões

O presente estudo demonstrou a existência dum expressivo tectonismo atuante na região de idade terciária, pelo menos miocênica, a quaternária. Um par conjugado de falhas de direção NE e NW é o principal condicionante de *grabens* e *horsts* ao longo da área. Tais falhas são paralelas e coincidentes aos gradientes Bouguer que marcam a continuidade de zonas de cisalhamento brasileiras abaixo da cobertura sedimentar costeira (Bezerra *et al.* 1993), indicando reativação dessas últimas em regime frágil no Cenozóico. Os procedimentos de filtragens direcionais e composições coloridas de trios de bandas (RGB, IHS e razões de bandas) contribuíram no realce de falhas quilométricas e na distinção das unidades litoestratigráficas, freqüentemente

condicionadas às feições morfotectônicas de superfície. O par conjugado de falhas NE-NW forma um ângulo agudo de 60°-70° cujo eixo bissetor é a compressão máxima horizontal (stress horizontal máximo) de direção EW na área (Assumpção 1992). Tal compressão máxima EW, aliada à distensão NS pode ser o principal mecanismo gerador de tais falhas, explicando sua atuação no Cenozóico.

7 Referências Bibliográficas

- Amaro, V.E. & Strieder, A.J. *Análise de Fotolineamentos e Padrões Estruturais em Imagens de Satélite*. In: XXXVII Congresso Brasileiro de Geologia, Camburiú, Anais, pp.443-444, 1994.
- Assumpção, M. *The Regional Intraplate Stress Field in South America*. Jour. Geophys. Res., vol. 97, pp.11889-11903, 1992.
- Bezerra, F.H.R.; Saadi, A.; Moreira, J.A.M.; Lins, F.A.P.L.; Nogueira, A.M.B.; Macedo, J. W. P.; Lucena, L.F. & Nazaré Jr., D. *Estruturação Neotectônica do Litoral de Natal-RN, Com Base na Correlação Entre Dados Geológicos, Geomorfológicos e Gravimétricos*. In: IV Simp. Nac. Estudos Tectônicos, Belo Horizonte, Atas, Bol.12:317-321, 1993.
- Costa, W.D. & Salim, J. *Aspectos Estruturais da Faixa Sedimentar Costeira da Região de Natal, Rio Grande do Norte*. Imp. Univ., Ver. Est. Sedimentar 2(½):133-143, jan/dez, 1972.
- Jardim de Sá, E.F.; Amaro, V.E.; Hollanda, M.H.M.; Duarte, M.I.M. *Mapeamento por Sensores Remotos das Estruturas Transcorrentes/Transpressionais Brasileiras na Faixa Seridó, NE do Brasil*. In: VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, Anais, pp 221-225, 1993.
- Queiroz, M.A.; Macedo, J.W.P.; De Rooy, C. & Araújo, T.C.M. *Contribuição da Geofísica ao Mapeamento Geológico da Área de Canguaretama/RN*. Boletim DG-UFRN, Vol. 10:58-67, 1985.

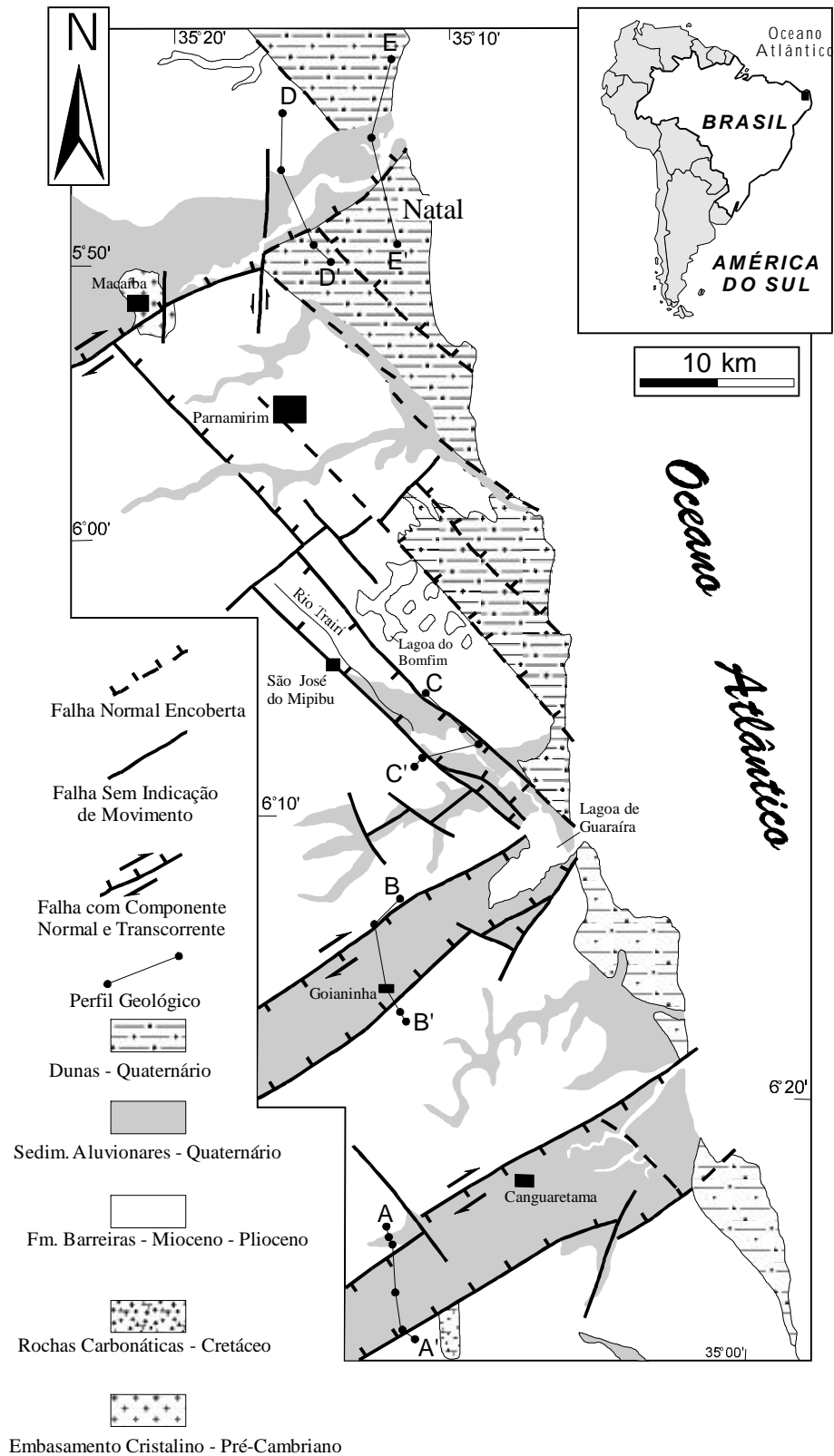


Figura 1 - Mapa geológico simplificado da Faixa Litorânea Oriental do Estado do Rio Grande do Norte, entre as cidades de Natal e Baía Formosa.

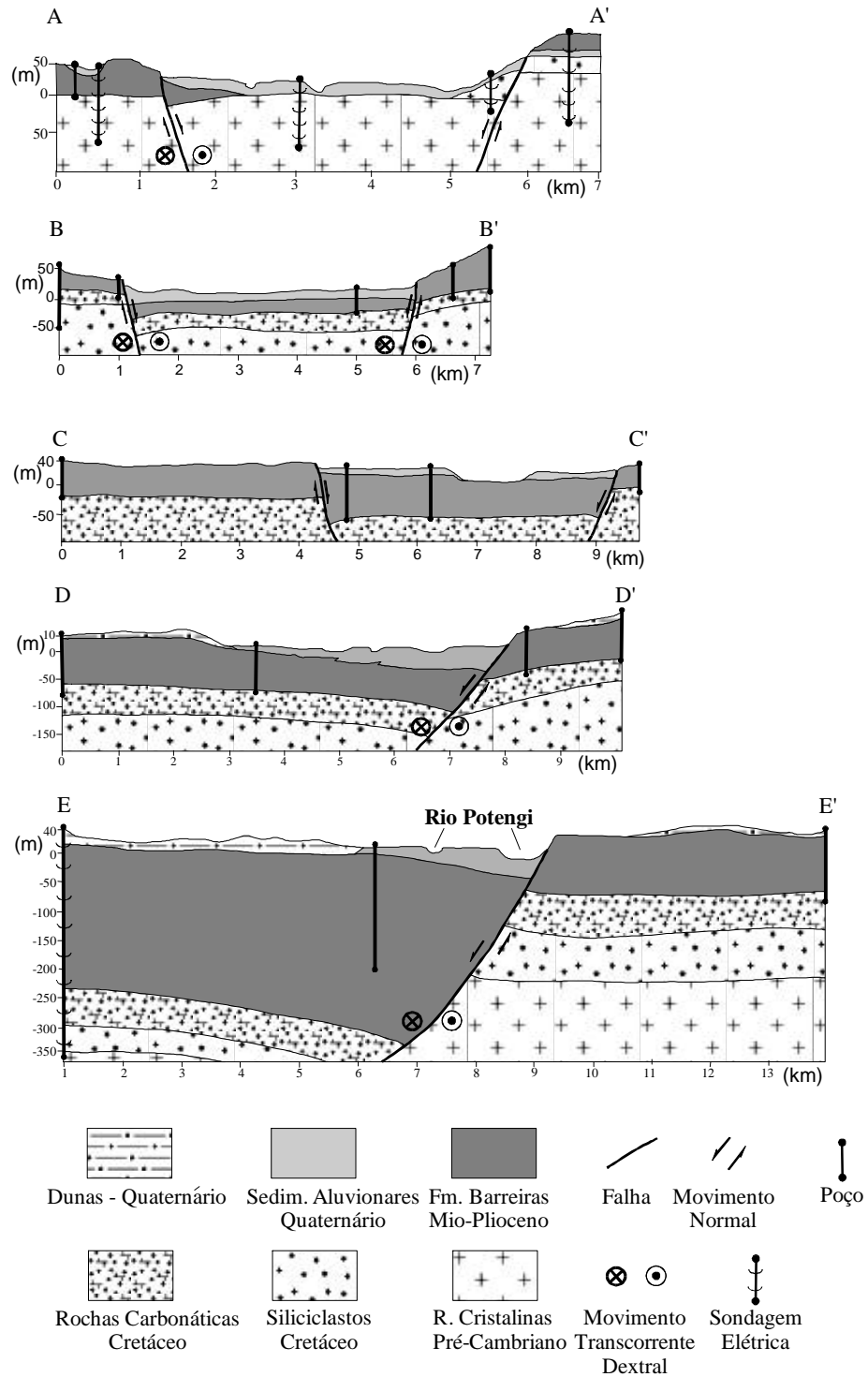


Figura 2 - Seções geológicas nos principais vales da Faixa Litorânea entre Natal/RN e Baía Formosa/RN. Os dados geoeletricos foram levantados por Queiroz et al. (1985). As localizações das seções estão na **Figura 1**.