

## UTILIZAÇÃO DE IMAGENS AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS, LANDSAT 7 ETM+ E AEROMAGNÉTICAS NO ESTUDO DO ARCABOUÇO CRUSTAL DA PORÇÃO CENTRAL DO DOMÍNIO DA ZONA TRANSVERSAL, PROVÍNCIA BORBOREMA, NE DO BRASIL

Vladimir Cruz de Medeiros<sup>1</sup>, Walter Eugênio de Medeiros<sup>2</sup> e Emanuel Ferraz Jardim de Sá<sup>3</sup>

Recebido em 25 junho, 2010 / Aceito em 12 novembro, 2010  
Received on June 25, 2010 / Accepted on November 12, 2010

**ABSTRACT.** In the central portion of the Transversal Zone (Borborema Province, northeastern Brazil), field geological mapping combined with interpretation of airborne gammaspectrometric, magnetic and satellite imagery (Landsat 7 ETM+) data were performed in order to evaluate the importance (especially, continuation at depth) of shear zones as potential candidates to represent terrain boundaries and sutures. This integrated analysis emphasized three deeper structures which separate crustal blocks, including as such the Serra do Caboclo and the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zones. A deep anomaly, located between those two structures, may represent the continuation, horizontally displaced, of one of them, or a third, non outcropping but interconnected shear zone. The favored interpretation considers this sector of the Transversal Zone as formed by deep-rooted, northeast-southwest trending shear zones (with tops of anomalies reaching 6 to 16 km depths), cut by shallower structures (tops of the anomalies reaching, at maximum, 2 to 6 km depth), with east-west trends. In this context, the importance and continuity at depth of the Serra do Caboclo shear zone is highlighted, and as such inferred to be the suture between Piancó-Alto Brígida and Alto Pajeú terranes, in accordance with field geological data.

**Keywords:** aerogammaspectrometric, aeromagnetic, Landsat 7, transversal zone, Borborema Province.

**RESUMO.** Na porção central do Domínio da Zona Transversal (Província Borborema, Nordeste do Brasil), foram desenvolvidos estudos de cartografia geológica em campo e interpretação de produtos aerogamaespectrométricos, aeromagnéticos e imagens de satélite (Landsat 7 ETM+), no intuito de avaliar a importância (em especial, a continuidade em profundidade) de zonas de cisalhamento, candidatas a representarem suturas e limites de terrenos. A análise conjunta desses produtos permitiu ressaltar a existência de três estruturas de maior profundidade, as quais representam limites de blocos crustais, dentre elas as zonas de cisalhamento Serra do Caboclo e Congo-Cruzeiro do Nordeste. Uma anomalia profunda, localizada entre aquelas duas estruturas, pode representar a continuidade de uma delas, horizontalmente deslocada, ou uma terceira zona, não aflorante mas a ela(s) conectada. A interpretação favorecida propõe que este setor da Zona Transversal seria formado por zonas de cisalhamento com direção nordeste-sudoeste, mais profundas (topos das anomalias atingindo 6 a 16 km de profundidade), seccionado por estruturas mais rasas (topos das anomalias atingindo no máximo 2 a 6 km de profundidade), com direção este-oeste. Neste contexto, ressalta a importância e continuidade em profundidade da zona de cisalhamento Serra do Caboclo, inferida como a sutura entre os terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, em conformidade com os dados geológicos de campo.

**Palavras-chave:** aerogamaespectrometria, aeromagnetometria, Landsat 7, zona transversal, Província Borborema.

<sup>1</sup>CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Núcleo de Apoio de Natal/Superintendência Regional de Recife (NANA/SUREG-RE), R. Prof. Antônio Henrique de Melo, 2010, Capim Macio, 59078-580 Natal, RN, Brasil – E-mail: vladimir@re.cprm.gov.br

<sup>2</sup>Departamento de Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (DGEF/UFRN) e Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG/UFRN), UFRN/CCET, Campus Universitário, Lagoa Nova, 59078-970 Natal, RN, Brasil – E-mail: walter@geofisica.ufrn.br

<sup>3</sup>Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (DG/UFRN) e Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG/UFRN), UFRN/CCET/LGGP, Cx. Postal 1596, Lagoa Nova, 59078-970 Natal, RN, Brasil – E-mail: emanuel@ccet.ufrn.br

## INTRODUÇÃO

A região estudada situa-se, geologicamente, na porção central do Domínio da Zona Transversal (DZT), sendo este um segmento da Província Borborema, Nordeste do Brasil (Fig. 1). Geograficamente, a região situa-se na porção sul-sudoeste do Estado da Paraíba e centro-norte do Estado de Pernambuco (Fig. 2).

Alternativamente às interpretações clássicas ensiáticas, implicando em um segmento litosférico contínuo para o interior da Província Borborema (Santos & Brito Neves, 1984; Santos et al., 1984; Jardim de Sá et al., 1988, 1990; Neves & Mariano, 1997, 2001; Mariano et al., 2001; dentre outros), alguns autores (Jardim de Sá et al., 1992; Jardim de Sá, 1994; Santos, 1995, 1996, 1999; Santos et al., 1997, 1999; Santos & Medeiros, 1999), a partir da década de 90, sugeriram que esta província esteja compartimentada em terrenos exóticos (alóctones), segundo a concepção de Coney et al. (1980), Jones et al. (1982), Howell (1985, 1989, 1995) e Coney (1989), dentre outros.

Nesse modelo geodinâmico, cada terreno teria sido originado em contexto geológico e geográfico distinto e a sua justaposição com os terrenos vizinhos envolveria deslocamentos consideráveis e, conseqüentemente, sua delimitação através de descontinuidades profundas (falhas ou zonas de cisalhamento importantes).

A aplicação do modelo de terrenos exóticos/alóctones, em áreas da Província Borborema, constitui uma tarefa complexa em função do seu caráter poliorogênico relacionado aos eventos paleoproterozóicos, Cariris Velhos e Brasileiro, aos quais poderiam estar associados a diferentes episódios de amalgamação de terrenos. Em adição, o(s) evento(s) mais jovem(ns) dificulta(m) a caracterização dos terrenos/estruturas mais antigas, pela superimposição de novas feições tectonometamórficas. É neste contexto que o aporte de dados geofísicos contribui para o conhecimento da estruturação profunda de uma região, torna-se uma ferramenta importante para caracterizar a presença de diferentes segmentos crustais e/ou litosféricos.

Considerando que os terrenos são delimitados por zonas de cisalhamento (sutura, no caso de terrenos alóctones ou exóticos) de expressão considerável, Medeiros (2004) utilizou de mapeamento geológico (escala 1:250.000 e maiores) e interpretação de imagens Landsat 7 ETM+, aerogamaespectrométricas e aeromagnéticas, para a caracterização dessas estruturas (zonas de cisalhamento) no tocante a seu significado como limites de blocos crustais ou litosféricos.

Para avaliar a continuidade/profundidade destas estruturas em subsuperfície, foram processados e interpretados dados aeromagnéticos, que constituem o enfoque principal do presente trabalho.

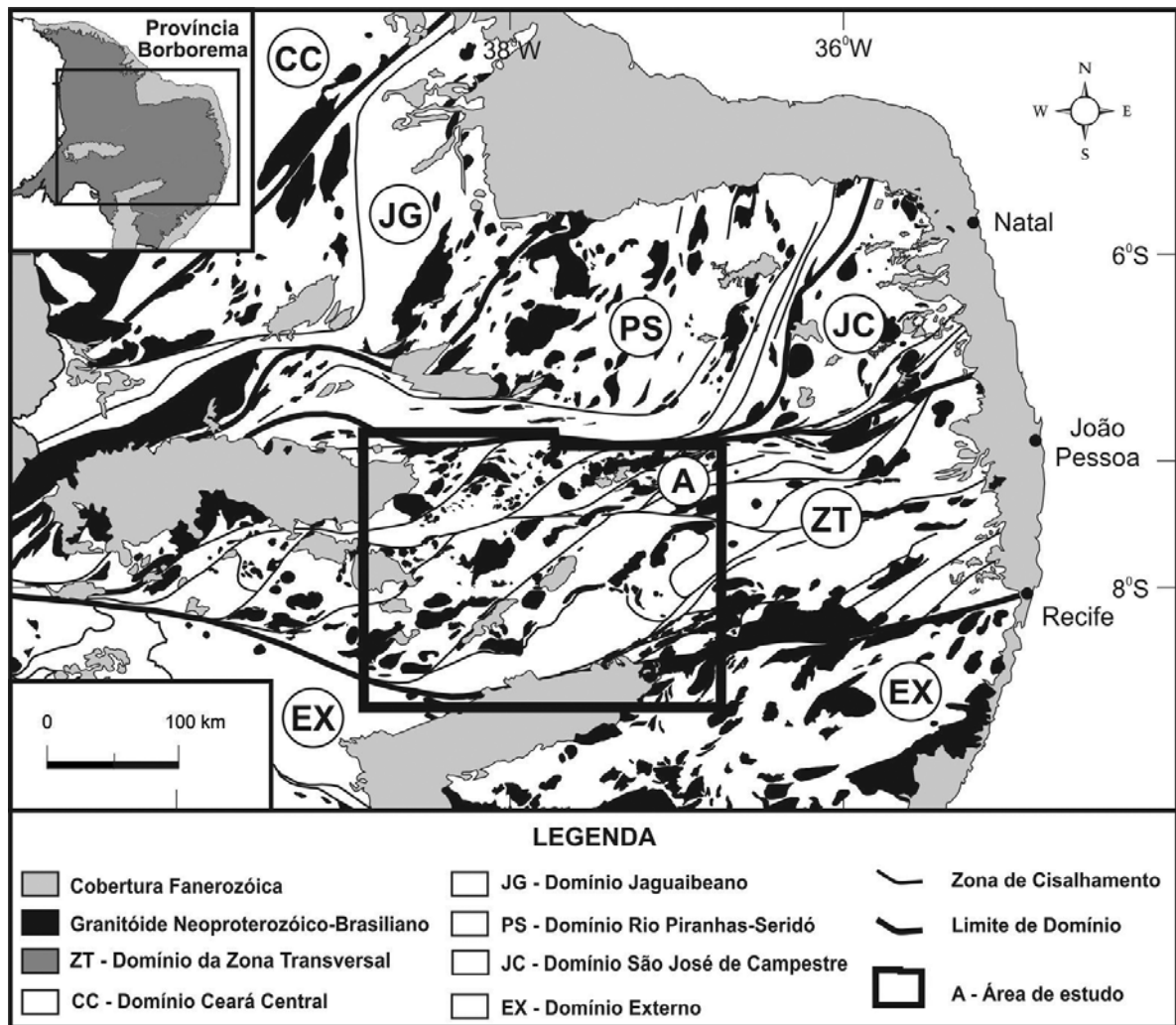
## ARCABOUÇO GEOLÓGICO

A região enfocada corresponde à porção central dos terrenos Piancó-Alto Brígida – TPAB e Alto Pajeú – TAP (Domínio da Zona Transversal), propostos por Santos & Medeiros (1998, 1999), Santos (1999), Santos et al. (2002), entre outros. Tais autores sugerem que o limite/sutura entre estes terrenos esteja situado, aproximadamente, ao longo da linha sienítica de Sial (1986), conforme ilustrado na Figura 3. Posteriormente, Medeiros et al. (2001) e Medeiros (2004), utilizando, além de dados geológicos de campo, imagens aeromagnéticas, aerogamaespectrométricas e de satélite (Landsat 7 ETM+) e da literatura (Bittar, 1998; Delgado et al., 2003; entre vários outros), propuseram que o limite entre estes dois blocos seja demarcado pela zona de cisalhamento Serra dos Caboclos (Fig. 4), o que é ressaltado no presente trabalho, e considerado por Oliveira (2008).

Na região estudada, Medeiros (2004) descreve o TPAB como constituído por litotipos paleoproterozóicos (Ortognaisses de Piancó e Paragnaisses de Bom Jesus), metassedimentos ediacaranos (formações Santana dos Garrotes e Serra do Olho d'Água, respectivamente as seções inferior e superior do Grupo Cachoeirinha, segundo proposta de Medeiros & Jardim de Sá, 2009) e granitóides brasileiros (ediacaranos). Bittar (1998) também reconhece estes litotipos, entretanto sugere uma interpretação alternativa para as metassupracrustais ediacaranas.

O TAP na área enfocada é constituído por unidades gnáissicas paleoproterozóicas (Complexo Serra Talhada-Afogados da Ingazeira), metavulcanossedimentares (Complexo Riacho Gravatá) e metaplutônicas (*augen* gnaisses e ortognaisses de granulação média a grossa) tonianas (Cariris Velhos), e granitóides ediacaranos/brasileiros (ver também Bittar, 1998).

Com relação à evolução estrutural da região, foram observados dois eventos principais impressos nas rochas metassupracrustais e ortognaisses/granitóides, designados de D<sub>1</sub> e D<sub>2</sub> por Medeiros (2004). O primeiro evento (D<sub>1</sub>) corresponde a uma deformação tangencial com transporte para noroeste, enquanto que no segundo (D<sub>2</sub>) a feição marcante são as zonas de cisalhamento transcorrentes, associadas ao evento Brasileiro (Serra do Caboclo, Juru, Afogados da Ingazeira, Pernambuco e Patos, como as principais). Estes dois eventos estão documentados tanto em litotipos do TPAB como do TAP.



**Figura 1** – Localização geológica do Domínio da Zona Transversal no contexto da Província Borborema, segundo Medeiros & Jardim de Sá (2009). (A) região abordada através de processamento de imagens Landsat 7 ETM+, aerogamaespectrométricas e aeromagnéticas.

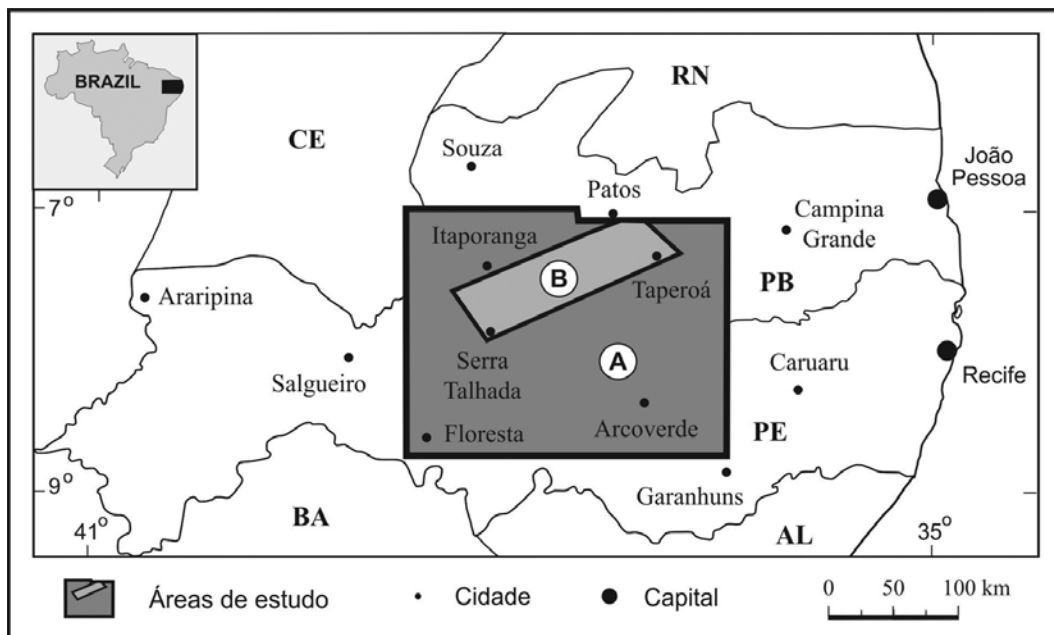
Neste contexto, a zona de cisalhamento Serra do Caboclo (estrutura a ser enfocada no presente trabalho) exhibe cinemática  $D_2$  transcorrente dextral (por vezes variando a uma cinemática contracional oblíqua), com o plano da foliação  $S_2$  apresentando direção NE e forte mergulho ( $70^\circ$  a  $90^\circ$ ) para SE, enquanto que a lineação  $L_2^x$  é de baixo *rake*, com direção NE-SW. Este *fabric* representa uma reativação desta zona de cisalhamento, que teria sido inicialmente estruturada no evento  $D_1$  (Medeiros, 2004).

Tendo em vista a interpretação, por aqueles autores como a estrutura que delimita o TPAB do TAP, os dados aeromagnéticos aqui abordados enfocarão a continuidade da zona de cisalhamento Serra do Caboclo (e outras estruturas) em subsuperfície, no intuito de avaliar o seu significado como uma sutura crustal, limite desses segmentos.

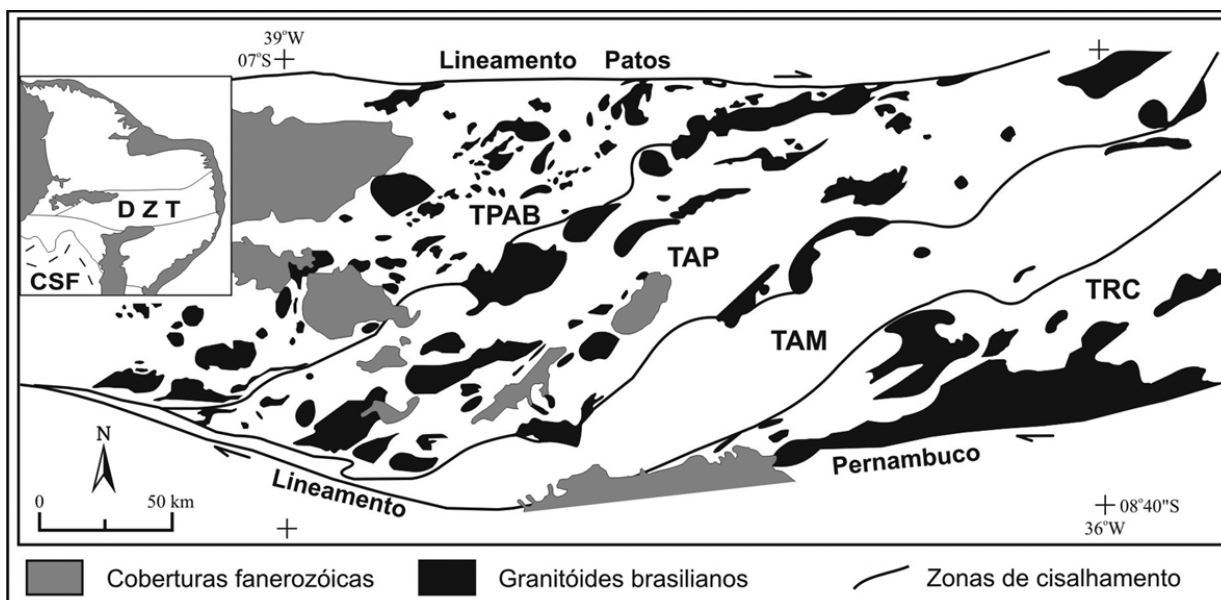
## DADOS UTILIZADOS E PROCESSAMENTOS

Além dos dados obtidos em campo e na literatura, foram processadas e interpretadas imagens do satélite Landsat 7 ETM+ e dados do levantamento aerogeofísico do Projeto Cariris Velhos (aerogamaespectrométricos e aeromagnéticos), cedidos pelo PPGG – Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e pela CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil (Tab. 1).

As imagens de satélite utilizadas (bandas 1 a 8 do Landsat 7 ETM+) correspondem a períodos de 2000 e 2001, as quais foram processadas nos programas ER Mapper e ENVI (detalhes em Medeiros, 2004), com o objetivo de apoio aos trabalhos de campo e integração com os dados e interpretações aerogeofísicas.



**Figura 2** – Mapa de localização geográfica da área estudada. (A) região abordada através de processamento de imagens Landsat 7 ETM+, aerogamaespectrométricas e aeromagnéticas. (B) região abordada com levantamentos geológicos de campo.

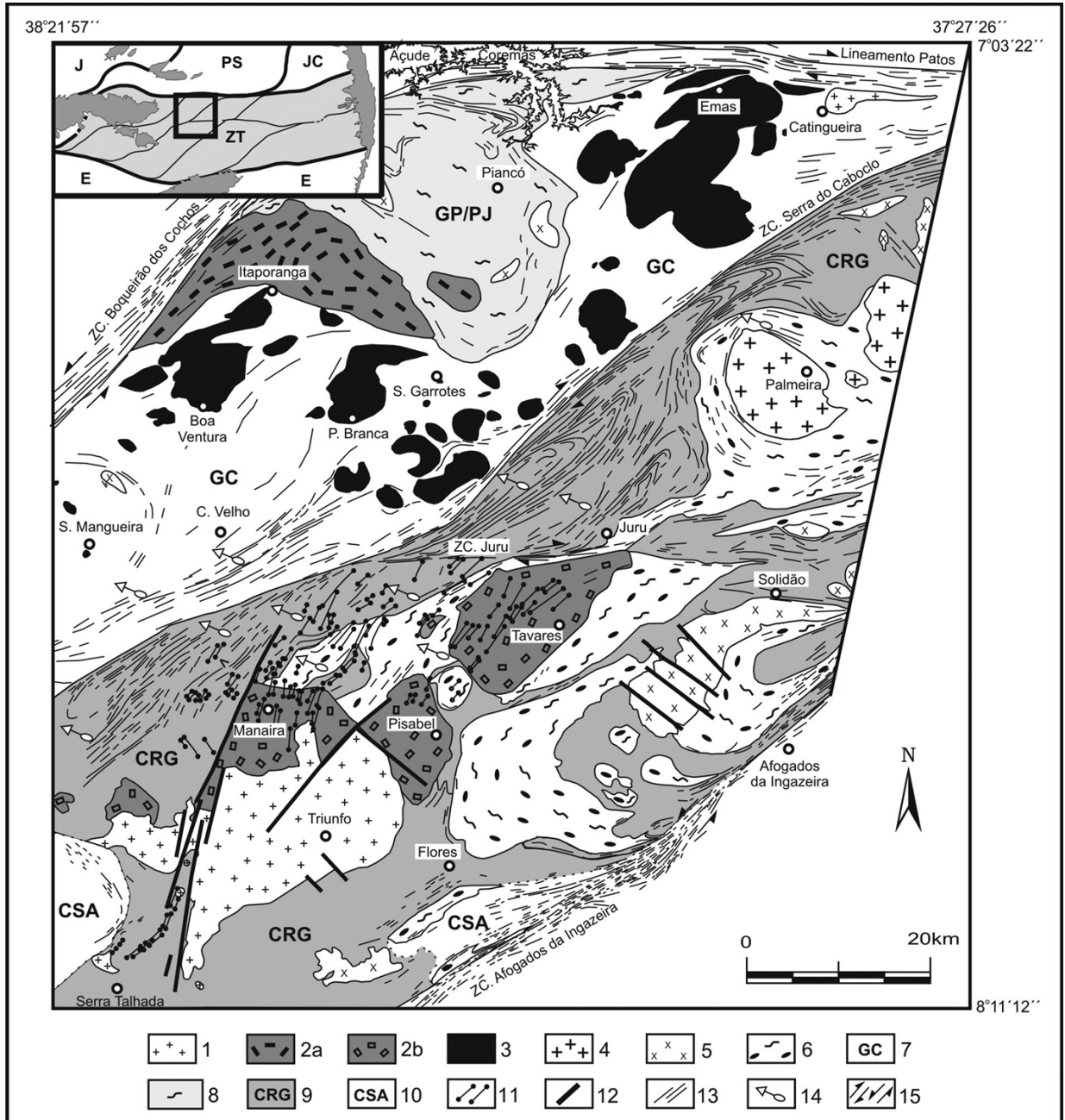


**Figura 3** – Mapa esquemático dos terrenos da Zona Transversal, Nordeste do Brasil, segundo Santos & Medeiros (1999). CSF = Cráton São Francisco; DZT = Domínio da Zona Transversal; TPAB = Terreno Piancó-Alto Brígida; TAP = Terreno Alto Pajeú; TAM = Terreno Alto Moxotó; TRC = Terreno Rio Capibaribe.

Os dados aerogeofísicos do Projeto Cariris Velhos foram originalmente obtidos pelo DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) através da GEOFOTO S.A. (1977), a partir de um aerolevantamento (altura de voo de 150 m) segundo linhas de voo norte-sul, espaçadas de 2 km (dados coletados com

espaçamento médio de 110 m ao longo das linhas), cobrindo uma área de 68.000 km<sup>2</sup>.

Os dados aerogamaespectrométricos, coletados nesse projeto, foram posteriormente processados pelo Brazil Airborne Radiometric Mapping Project – BARMP (GSC, CPRM & PGW,



**Figura 4** – Mapa geológico simplificado da região entre Serra Talhada-PE e Catingueira-PB, 1 – granitoides ultrapotássicos/peralcalinos (tipo Triunfo/Catingueira); 2 – granitoides K-cálcio-alcálicos (2a – tipo Itaporanga e 2b – tipo Tavares); 3 – granodioritos e tonalitos cálcio-alcálicos (tipo Conceição); 4 – granitoides de afinidade trondjemítica (tipo Palmeira/Serrita); 5 – outros granitoides; 6 – *augen* gnaisses e ortognaisses; 7 – Grupo Cachoeirinha (GC); 8 – Gnaiss Piancó/paragnaisses de Bom Jesus (GP/PJ); 9 – Complexo Riacho Gravatá (CRG); 10 – Complexo Serra Talhada-Afogados da Ingazeira (CSA); 11 – diques sieníticos (tipo Manaira/Princesa Isabel); 12 – falhas; 13 – lineamentos associados a estruturas dúcteis; 14 – vetores da cinemática tangencial ( $D_1$ ); 15 – cisalhamento transcorrente ( $D_2$ ). Domínios: J = Jaguaribeano; PS = Rio Piranhas-Seridó; JC = São José do Campestre; ZT = Zona Transversal; E = Externo; ZC = Zona de Cisalhamento.

**Tabela 1** – Relação dos dados/imagens digitais utilizadas.

Imagem/Dados		Órbita/Projeto (data)	Concessão
Satélite	Landsat 7 ETM+	WRS 217/65 (25/10/2000)	PPGG/UFRN
		WRS 217/66 (10/09/2001)	
		WRS 216/65 (12/01/2001)	CPRM
		WRS 216/66 (06/10/2001)	PPGG/UFRN
		WRS 215/65 (21/10/2001)	
		WRS 215/66 (07/05/2001)	
Avião	Aeromagnetometria	Cariris Velhos (1977)	CPRM
	Aerogamaespectrometria		

1997). No projeto BARMP, os canais de K, Th e U, originalmente em CPS (contagem por segundo) foram convertidos para valores em percentagem (canal do K) e ppm (canais de equivalente Th e equivalente U).

Os dados aeromagnéticos foram interpolados em uma malha de  $500 \times 500$  m e filtrados para a remoção de ruídos.

Tanto os dados aerogamaespectrométricos como aeromagnéticos foram processados e interpretados em ambiente Oasis Montaj/GEOSOFT.

### Processamento de imagens de satélite

Imagens Landsat 7 ETM+ foram utilizadas com o intuito de reconhecer unidades de paisagens (geológicas) e feições estruturais (traços de foliações e lineações, zonas de cisalhamento, dobras, falhas, diques, entre outras), como subsídio para campanhas de campo e integração de dados ao longo das regiões mapeadas.

Para os trabalhos de maior detalhe, foram processadas parte das cenas WRS 215/065 e 216/065, aplicando-se os seguintes procedimentos:

- i) Importação das cenas/imagens para o programa ER Mapper;
- ii) seleção das partes das cenas nos limites geográficos da região a ser estudada;
- iii) cálculo de estatística das bandas;
- iv) geração das imagens por APC's (Análise por Principais Componentes);
- v) geração de razões de bandas e composições coloridas em RGB, RGBI, HRGB e IHS (utilizando as bandas originais e razões de bandas); aplicação de realce de contraste (geralmente do tipo equalize ou gaussiano), no intuito de realçar as unidades de paisagem;

vi) aplicação de filtragens direcionais com matrizes  $3 \times 3$  e  $5 \times 5$  para realçar feições lineares/lineamentos;

vii) vetorização de lineamentos e bordas das unidades de paisagens, a partir das imagens processadas.

Entre as combinações geradas, a RGB531 foi a que melhor expressou as feições geológicas da região, tendo em vista apresentar uma forte correlação com os dados de campo e aerogeofísicos, enquanto que, com relação aos filtros direcionais aplicados, o de Prewitt (1970), matriz  $5 \times 5$ , permitiu ressaltar as estruturas da área, em consonância às técnicas de filtragem referidas por Amaro (1998).

Para o estudo de cunho regional, no âmbito da Zona Transversal, e integração com os dados aerogeofísicos disponíveis (magnéticos e gamaespectrométricos), foi realizado o processamento digital de seis cenas Landsat (WRS 215/065, 215/066, 216/065, 216/066, 217/065 e 217/066) com as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, seguindo a metodologia acima descrita, após a mosaicagem das cenas (banda a banda).

### Processamento de dados aerogamaespectrométricos

Os dados aerogamaespectrométricos do Projeto Cariris Velhos (K, eTh e eU) foram processados em ambiente Oasis Montaj/GEOSOFT, aplicando o seguinte procedimento:

- i) Importação dos dados para o programa Oasis Montaj/GEOSOFT;
- ii) análise espacial das linhas de voo;
- iii) gridagem bidirecional para os três canais (K, eTh e eU), utilizando uma malha regular de  $500 \times 500$  m;
- iv) testes de filtragens (filtros passa alta, passa baixa e direcionais) nos três canais;

- v) mascaramento de bordas e geração das imagens mono-canaís e ternária;
- vi) análise/interpretação das imagens geradas, incluindo correlações com dados obtidos em campo, imagens de satélite e mapas aeromagnéticos;
- vii) vetorização das unidades aerogamaespectrométricas.

### Processamento de dados aeromagnéticos

Os dados aeromagnéticos do Projeto Cariris Velhos também foram tratados em ambiente Oasis Montaj/GEOSOFT, uma vez realizada a análise espacial das linhas de voo, gridagem numa malha regular de 500×500 m e filtragens (filtros passa alta, passa baixa e direcionais), o que constituiu a etapa de nivelamento dos dados. Este nivelamento teve o objetivo de obter uma melhor representatividade gráfica/geológica dos dados gerados. Entretanto, podem ser observadas porções com ruídos de sinal elevado (por exemplo na borda norte da área), em função do forte efeito de ruído de borda e problemas na captação do dado original. Posteriormente foi obtido, por filtragem direcional e mascaramento de bordas, o mapa de campo total e do sinal analítico da região. Para os demais processamentos, foram seguidos os passos abaixo relacionados:

- i) Preparação/expansão da malha/grid (conversão para o domínio do número de onda/Transformada de Fourier);
- ii) geração e análise do espectro de potência (Fig. 5), para obter os valores de *cut off* a serem utilizados nas filtragens regionais/residuais. Utilizando o modelo de Spector & Grant (1970), foram identificados valores espectrais do sinal que permitiram representar os topos das anomalias (modelo prisma) nas profundidades menores que 2 km (comprimento de onda menor que 10,1 km), entre 2 a 6 km (comprimento de onda entre 10,1 e 125,6 km) e entre 6 a 16 km (comprimento de onda maior que 125,6 km);
- iii) elaboração dos mapas aeromagnéticos com os topos das anomalias nas profundidades menores que 2 km, entre 2 a 6 km e entre 6 a 16 km;
- iv) análise/interpretação dos mapas gerados e integração com os dados obtidos em campo, imagens de satélite e mapas aerogamaespectrométricos;
- v) vetorização dos lineamentos aeromagnéticos e elaboração do mapa de lineamentos aeromagnéticos em correlação aos elementos estruturais e unidades geológicas.

## RESULTADOS OBTIDOS

### Imagens Landsat e aerogamaespectrométricas

#### A) Unidades de paisagens (geológicas) e aerogamaespectrométricas

Conforme citado anteriormente, as unidades de paisagens demarcadas nas imagens Landsat 7 ETM+ foram obtidas em combinações coloridas de bandas originais e razões de bandas, onde as unidades geológicas foram melhor ressaltadas na combinação RGB531, aplicando realce de contraste (equalize) às três bandas individualmente (Fig. 6d e Tab. 2).

Com relação às imagens aerogamaespectrométricas, a do canal do K e o mapa ternário K-eTh-eU (Fig. 6) foram as que apresentaram melhor resultado para o objetivo do trabalho, por permitirem uma boa correlação com as unidades geológicas da região (Fig. 4).

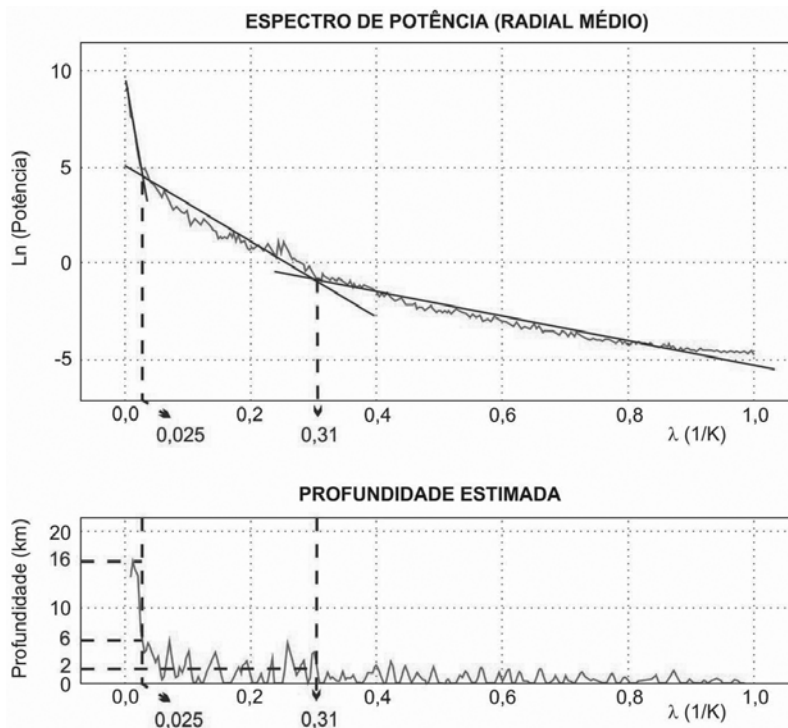
Na imagem do canal do K (Fig. 6a), observam-se anomalias altas (atingindo 7% de K) associadas ao sienito ultrapotássico de Triunfo-PE, moderadas a altas em suítes K-cálcio-alcálicas (por exemplo, granitóide de Itaporanga-PB), intermediárias em granitóides cálcio-alcálicos (tipo Conceição), enquanto que os valores mais baixos são registrados nas sequências metasupracrustais do Grupo Cachoeirinha e do Complexo Riacho Gravatá. Tais valores são compatíveis/correlacionáveis aos dados litogeoquímicos (rocha total) referidos na literatura para estas unidades.

Com relação ao mapa ternário K-eTh-eU (Fig. 6b), as unidades e os lineamentos demarcados apresentam uma boa correlação com aqueles realçados nas imagens Landsat 7 ETM+, e confirmados em campo, os quais correspondem, respectivamente, às principais unidades geológicas e zonas de cisalhamento da região.

#### B) Lineamentos

Estas estruturas foram extraídas de imagens Landsat geradas pela filtragem direcional (Prewitt, 1970) em matrizes 5×5, aplicadas às bandas 4, 5 e PC1 (esta obtida a partir das bandas 1 a 7), com apoio da combinação RGB531 e do mapa ternário K-eTh-eU, onde foram ressaltados os seguintes tipos (Fig. 7):

- i) **Lineamentos retilíneos e espaçados (LRE)** – cortam/truncam unidades geológicas, os quais foram observados apenas nas imagens Landsat 7 ETM+; correspondem a estruturas tardias/frágeis do final do Neoproterozóico (ou mais jovens?), podendo estarem associadas a diques de sienito (tipo Manaíra-Princesa Isabel), veios de quartzo ou falhas;



**Figura 5** – Espectro de potência obtido para os dados aeromagnéticos da porção central da Zona Transversal. A relação entre comprimento de onda ( $\lambda$ ) e número de onda ( $K$ ) é dada por  $\lambda = (2\pi/K)\delta$ , onde  $\delta$  é o tamanho da malha.

**Tabela 2** – Principais feições obtidas para as unidades geológicas (unidades de paisagem) da região entre Serra Talhada-PE e Assunção-PB.

Unidade geológica	Imagem RGB531	UG
Complexo Serra Talhada	Róseo claro	6
Grupo Cachoeirinha	Róseo acinzentado a azulado	7
Complexo Riacho Gravatá	Amarelado, castanho esverdeado, cinza/marrom escuro e róseo	8
Ortognaisses	Róseo, vermelho-amarelado e marrom escuro	6
Sienitóide Tipo Triunfo	Marrom escuro a amarelado	1
Suíte Tipo Itaporanga	Marrom escuro	2
Suíte Tipo Conceição	Róseo escuro	3
Suíte Tipo Palmeira	Esbranquiçado	5
Suíte Tipo A (Solidão)	Tons amarronzado e azulado	4

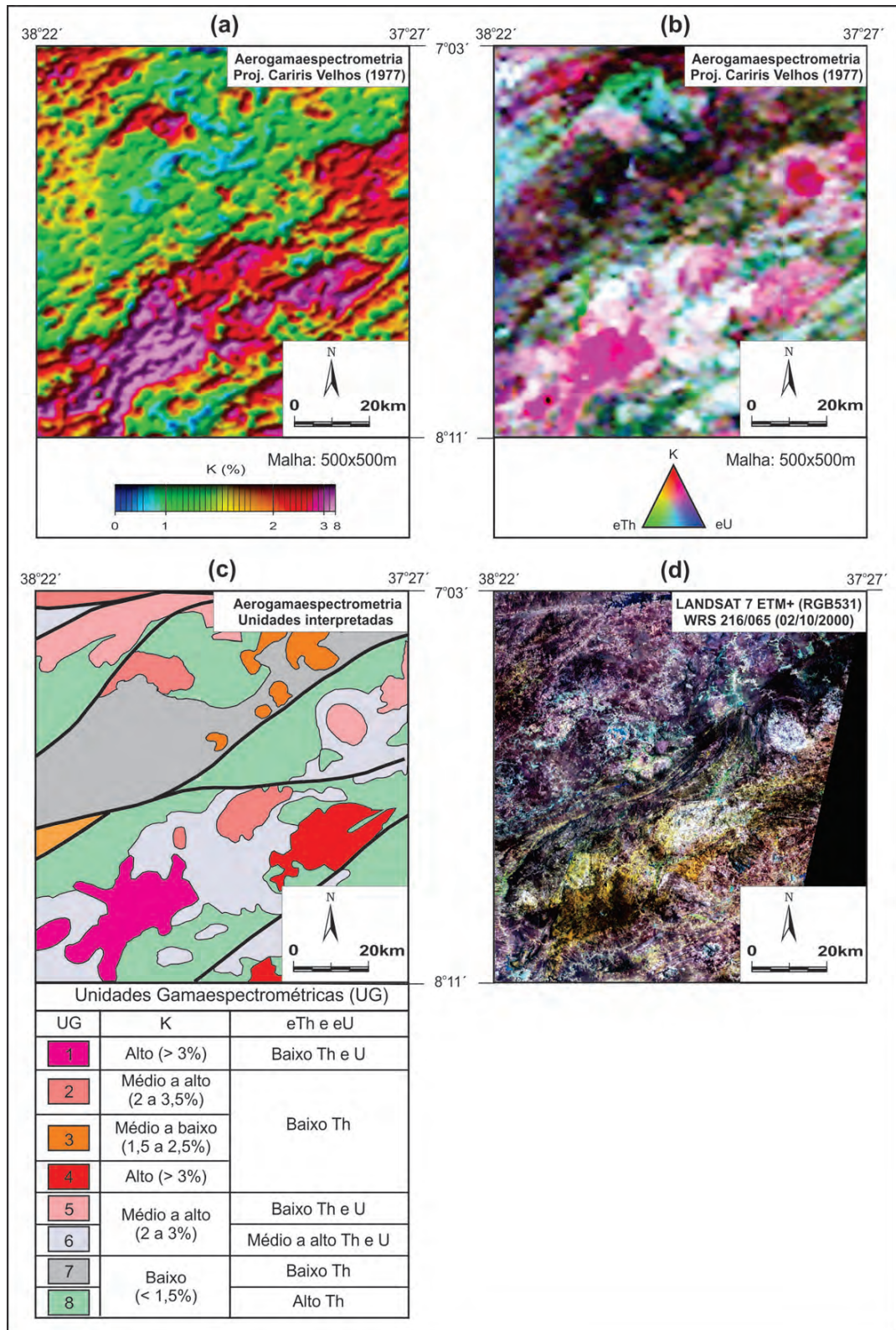
UG = Unidades gamaespectrométricas referidas na Figura 6. As unidades geológicas estão enfatizadas na Figura 4.

ii) **Lineamentos retilíneos e adensados (LRA)** – ocorrem em enxames e alguns destes exibem tendências curvilineares; entretanto, nas regiões de maior adensamento, apresentam direção nordeste-sudoeste ou aproximadamente este-oeste, as quais demarcam zonas de cisalhamento transcorrentes (ou com forte componente transcorrente) brasileiras (deformação  $D_2$ ), tais como Patos, Juru,

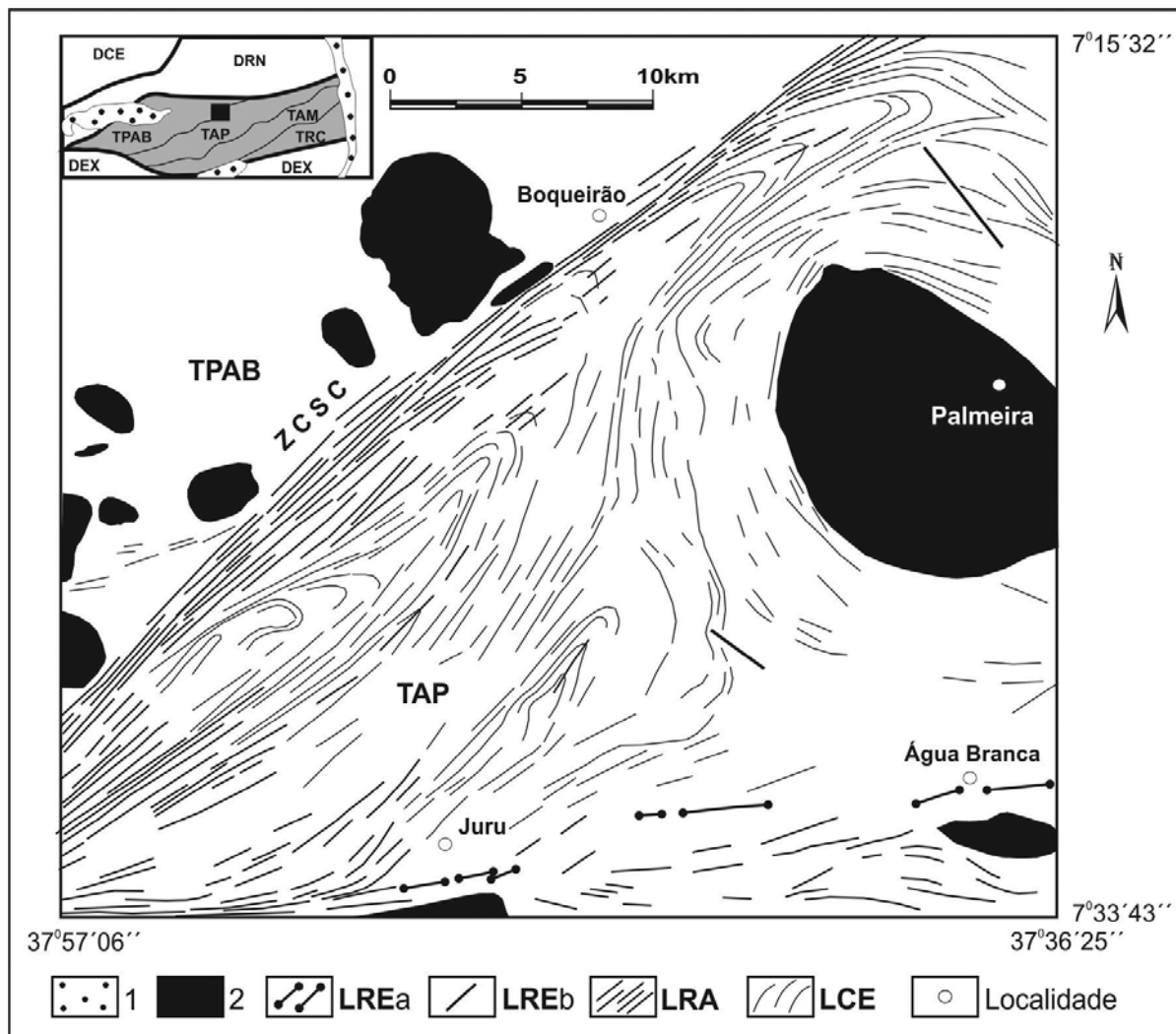
Coxixola, Boqueirão dos Cochós, Serra do Caboclo e Afogados da Ingazeira;

iii) **Lineamentos com formas geralmente curvilíneas, espaçados (LCE)** – apresentam alguns segmentos retilíneos, quando da presença/aproximação dos LRA. Geralmente representam traços, em superfície, de ele-





**Figura 6** – Mapas aerogamaespectrométricos (a – canal do K; b – mapa ternário K-eTh-eU; c – unidades aerogamaespectrométricas interpretadas) e imagem Landsat 7 (d), correspondente à área da Figura 4.



**Figura 7** – Mapa de lineamentos e granitoides neoproterozóicos da porção centro-norte da zona de cisalhamento Serra do Caboclo (ZCSC). 1 – coberturas fanerozóicas; 2 – granitoides ediacaranos (brasilianos); LRE – lineamentos associados a veios de quartzo (a) ou falhas (b); LRA – lineamentos associados a estruturas/feições transcorrentes-D<sub>2</sub>; LCE – lineamentos associados a estruturas/feições da cinemática tangencial – D<sub>1</sub>. Domínios: DCE – Cearense; DRN – Rio Grande do Norte; DEX – Externo. Terrenos da Zona Transversal: TPAB – Piancó-Alto Brígida; TAP – Alto Pajeú; TAM – Alto Moxotó; TRC – Rio Capibaribe.

mentos da primeira fase de deformação na região (D<sub>1</sub>, deformação tangencial com transporte para noroeste); entretanto, alguns dos LCE estão relacionados com estruturas de fluxo magmático (S<sub>0</sub>) em granitoides neoproterozóicos/brasilianos ou acamamento/estruturas sedimentares (S<sub>0</sub>) em metassedimentos.

### Imagens aeromagnéticas

As imagens aeromagnéticas foram utilizadas com o objetivo de extrair lineamentos magnéticos associados a zonas de cisalhamento observadas em superfície (dados de campo e imagens Landsat 7 ETM+ e aerogamaespectrométricas), permitindo as-

sim avaliar a continuidade destes cisalhamentos em profundidade. Para a interpretação das imagens aeromagnéticas admitiu-se a seguinte premissa: *uma zona de cisalhamento pode promover a justaposição de unidades/blocos com susceptibilidades magnéticas distintas, além de permitir que fluidos e/ou magmas (com susceptibilidades magnéticas distintas) percolem e/ou se alojem ao longo/adjacentes a tais estruturas.*

Neste contexto a interpretação das imagens aeromagnéticas permitiu o delineamento de feições geológicas e unidades estratigráficas com susceptibilidades magnéticas distintas, onde os segmentos lineares observados puderam ser associados com zonas de cisalhamento cartografadas em superfície.

Considerando da metodologia utilizada e o espectro de potência dos dados (Fig. 5), as unidades/anomalias foram analisadas nas profundidades de 2 km, 2 a 6 km e 6 a 16 km (Fig. 8), profundidades essas que corresponderiam aos limites de espessura (mínimos) de blocos tectônicos e/ou zonas de cisalhamento.

Os lineamentos aeromagnéticos foram traçados nos intervalos de profundidade supracitados (Fig. 8), com o intuito de verificar a continuação, até os mesmos, das estruturas observadas/cartografadas em superfície. Tendo em vista os resultados obtidos (Fig. 8), pode-se constatar que:

- As zonas de cisalhamento de Juru e Coxixola (direção aproximadamente este-oeste) são as estruturas mais rasas, considerando que são observadas apenas no mapa de anomalias entre 0 e 2 km, apesar de que alguns segmentos destas estruturas também possam ser observados no mapa de profundidades entre 2 a 6 km (Figs. 8a e 8b).
- Na região enfocada, as zonas de cisalhamento de Boqueirão dos Cochós, Serra do Caboclo, Afogados da Ingazeira/Jabitacá e Congo-Cruzeiro do Nordeste possuem maior expressividade em subsuperfície, considerando que os topos de suas anomalias aeromagnéticas atingem profundidades no intervalo entre 6 a 16 km (Fig. 8c).
- A presença de lineamentos aeromagnéticos indicando a continuidade em profundidade da zona de cisalhamento Serra do Caboclo (topos das anomalias nos intervalos entre 6 e 16 km), e a ausência destas feições ao longo da linha sienítica (Sial, 1986 e colaboradores), corroboram com o modelo proposto por Medeiros et al. (2001) e Medeiros (2004) para o limite entre os terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, o qual seria demarcado pela zona de cisalhamento Serra do Caboclo. A continuação desta estrutura para sudoeste é ressaltada nos trabalhos de Delgado et al. (2003), Brito Neves et al. (2005) e Medeiros & Jardim de Sá (2009). Com relação às demais estruturas/zonas de cisalhamento importantes, presentes na região estudada e candidatas a demarcarem limites de terrenos/suturas, os dados aeromagnéticos indicam, como estruturas profundas: (i) a zona de cisalhamento de Congo-Cruzeiro do Nordeste, limite entre os segmentos Alto Moxotó e Rio Capibaribe; (ii) a provável continuidade, em profundidade e na direção SE, da zona de cisalhamento de Afogados da Ingazeira, que poderia, eventualmente, constituir o limite entre os terrenos (?) Alto Pajeú e Alto Moxotó.

Neste contexto é possível sugerir um modelo 3D esquemático para as estruturas internas da Zona Transversal, constituída por um feixe de zonas de cisalhamento com direção nordeste-sudoeste, as quais seriam seccionadas por estruturas internas e mais rasas, com direção este-oeste (Fig. 9).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As unidades de paisagens e aerogamaespectrométricas, e os lineamentos obtidos no processamento digital de imagens Landsat, com apoio de dados de campo, permitiram associar as informações obtidas nos processamentos de imagens com as unidades geológicas e as estruturas/zonas de cisalhamento aflorantes na área enfocada.

A integração entre as informações de superfície com as imagens aeromagnéticas, em diferentes intervalos de profundidade, permitiu a análise da continuidade das estruturas da região em subsuperfície, onde ficou ressaltado que as estruturas mais profundas e candidatas a limites de terrenos são as zonas de cisalhamento Serra do Caboclo, Congo-Cruzeiro do Nordeste e uma terceira, cuja continuação em profundidade situa-se entre os cisalhamentos de Afogados da Ingazeira e da Serra de Jabitacá.

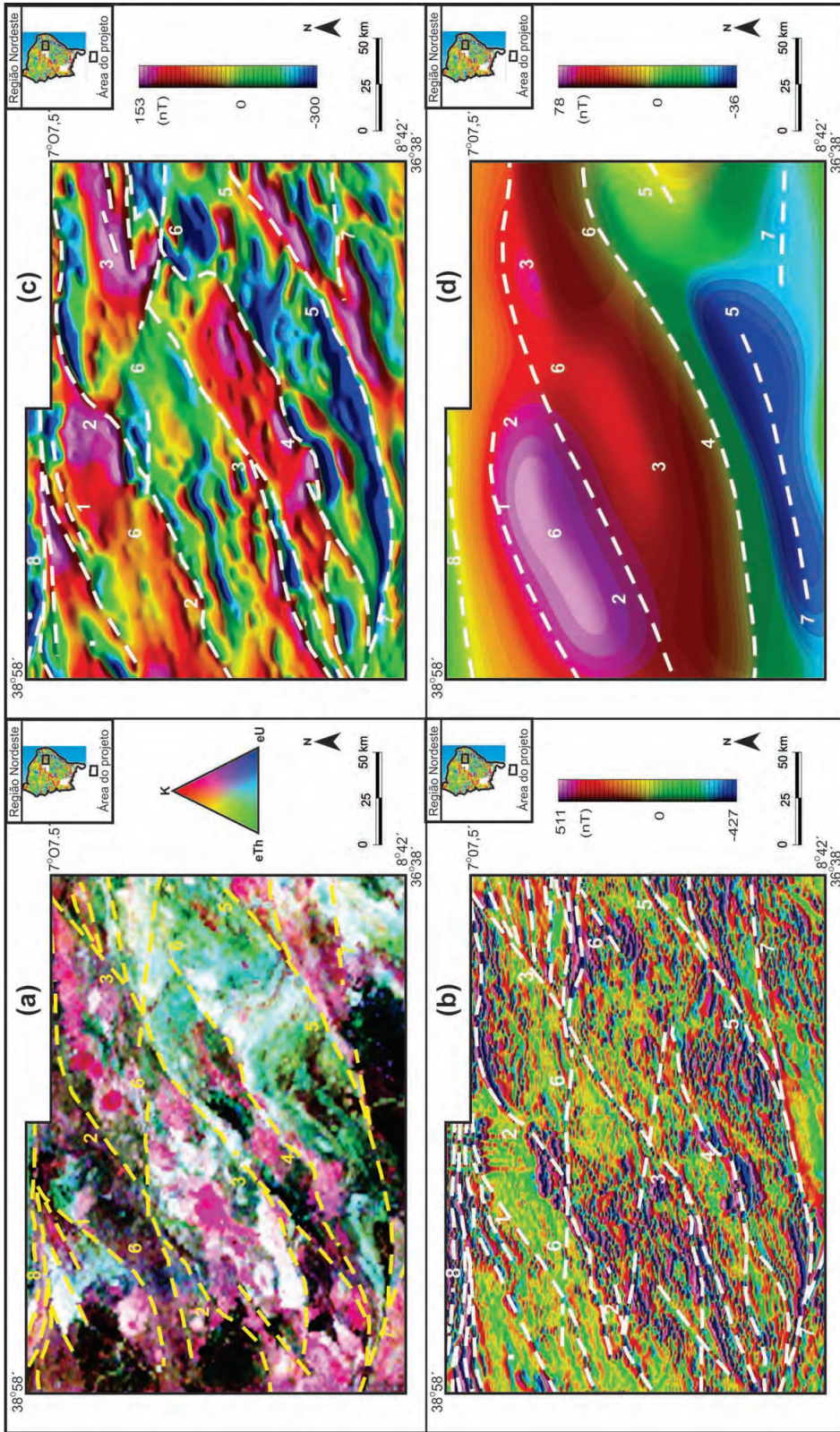
Estas interpretações e análises integradas apoiam a interpretação da zona de cisalhamento Serra do Caboclo como o limite/sutura entre os terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, e permitem visualizar um arcabouço crustal (tridimensional) no interior da Zona Transversal, formada por cisalhamentos com direção nordeste-sudoeste, seccionados por estruturas mais rasas com direção este-oeste.

Considerando a boa correlação obtida entre os dados de campo, e as imagens Landsat e aerogeofísicas utilizadas, tal fato permite ressaltar a importância da utilização integrada destas ferramentas para a cartografia geológica e modelos de subsuperfície de regiões cristalinas.

## AGRADECIMENTOS

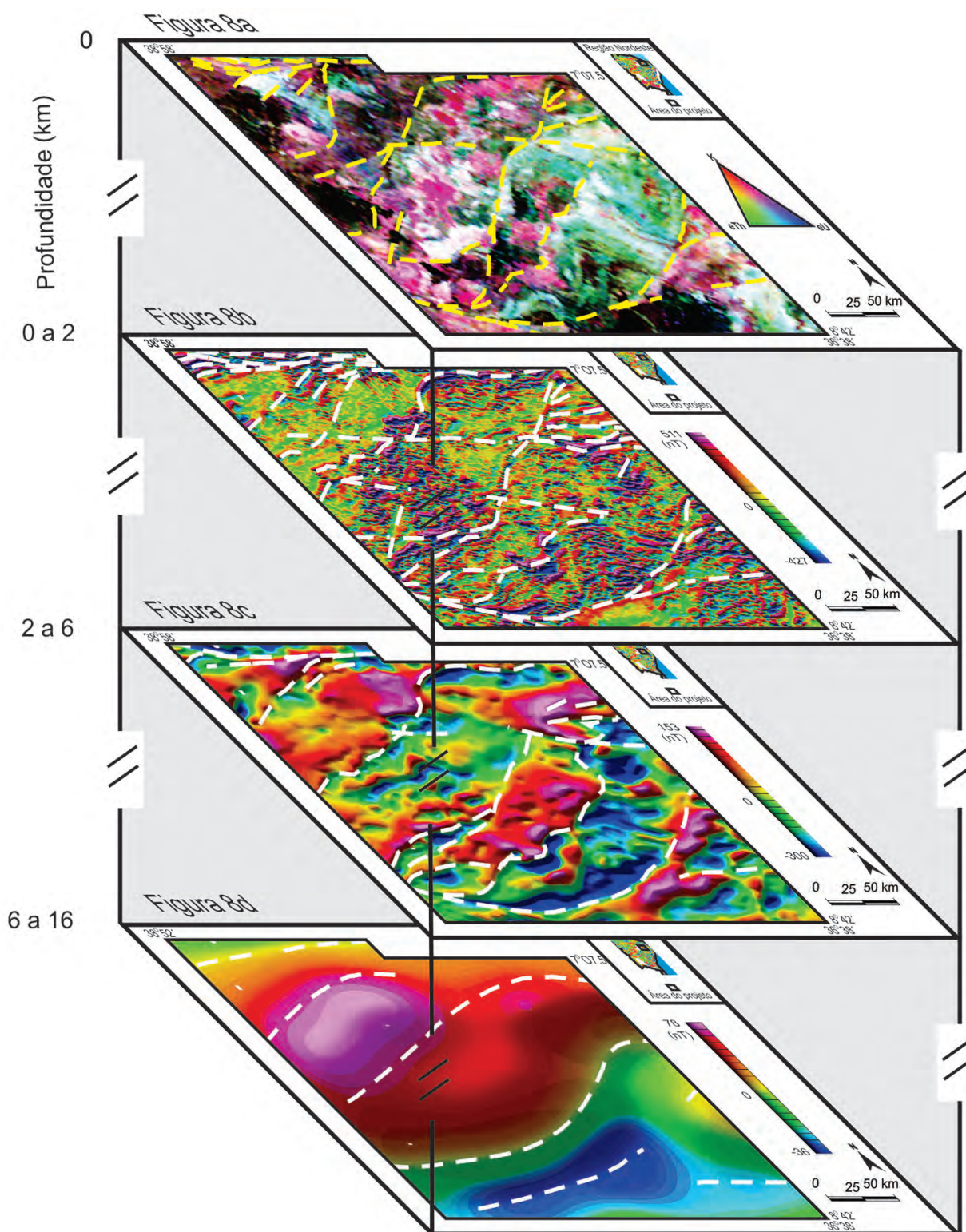
Os autores agradecem à CPRM-Serviço Geológico do Brasil e ao PPGG – Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (UFRN) pelo apoio e concessão de dados, bem como ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo auxílio concedido (Proc. 03-GMT-01/97-03/02-11). WE MEDEIROS agradece ao CNPq a bolsa de pesquisa PQ (Proc. 301.568/2008-1) e Grant associada. Os autores também agradecem aos revisores anônimos pelas considerações sugeridas para a consolidação do presente artigo.





**Figura 8** – Imagem aerogamaespectrométrica (a) para correlação em superfície com imagens aeromagnéticas (b, c, d) e respectivos lineamentos magnéticos associados a zonas de cisalhamento (linhas tracejadas). (b) topos das anomalias inferiores a 2 km de profundidade; (c) topos das anomalias entre 2 a 6 km de profundidade; (d) topos das anomalias entre 6 a 16 km. Zonas de Cisalhamento: 1 – Boqueirão dos Cochos; 2 – Serra do Caboclo; 3 – Afogados da Ingazeira; 4 – Serra de Jabitacá; 5 – Congo/Cruzeiro do Nordeste; 6 – Juru/Coxixola; 7 – Pernambuco; 8 – Patos. Para comparação os números relativos às estruturas foram mantidos no mesmo posicionamento.





**Figura 9** – Superposição das imagens aerogeofísicas (gamaespectrométrica e magnéticas) apresentadas na Figura 8 para realce, em profundidade, dos lineamentos aerogeofísicos (cisalhamentos) observados. Linhas tracejadas em branco e amarelo representam os lineamentos aeromagnéticos associados às zonas de cisalhamento.

## REFERÊNCIAS

- AMARO VE. 1998. Análise conjunta de dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto do setor extremo nordeste da Província Borborema, nordeste do Brasil, com ênfase nas zonas de cisalhamento dúcteis neoproterozóicas. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 393 p.
- BITTAR SMB. 1998. Faixa Piancó-Alto Brígida: Terrenos tectono-estratigráficos sob regimes metamórficos e deformacionais contrastantes. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 126 p.
- BRITO NEVES BB, VAN SCHMUS WR, KOZUCH M, SANTOS EJ & PETRONILHO L. 2005. A Zona tectônica Teixeira Terra Nova – ZTTN – Fundamentos da geologia regional e Isotópica. Revista do Instituto de Geociências – USP. Série Científica, 5: 57–80.
- CONEY PJ. 1989. Structural aspects of suspect terranes and accretionary tectonics in western North America. *Journal of Structural Geology*, 11: 107–125.
- CONEY PJ, JONES DL & MONGER JWH. 1980. Cordilleran suspect terranes. *Nature*, 288: 329–333.
- DELGADO IM, SOUZA JD, SILVA LC, SILVEIRA FILHO NC, SANTOS RG, PEDREIRA AJ, GUIMARÃES JT, ANGELIM LAA, VASCONCELOS AM, GOMES IP, LACERDA FILHO JV, VALENTE CR, PERROTTA MM & HEINECK CA. 2003. Geotectônica do Escudo Atlântico. In: BIZZI LA, SCHOBENHAUS C, VIDOTTI RM & GONÇALVES JH (Eds.). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas & SIG*. CPRM, p. 227–334.
- GEOFOTO S.A. 1977. Projeto Cariris Velhos (levantamento aeromagnético e aerogamaespectrométrico). DNPM/CPRM. Relatório final. Rio de Janeiro.
- GSC, CPRM & PGW. 1997. Brazil airborne radiometric mapping project (BARMP), Technical Report and Survey Atlas, Ottawa. 30 p.
- HOWELL DG. 1985. Terranes. In: MOORES E (Ed.). 1990. *Shaping the Earth – Tectonics of Continents and Oceans*. 7, Chapman & Hall, p. 112–124.
- HOWELL DG. 1989. *Tectonics of suspect terranes mountain building and continental growth*. Chapman & Hall, 232 p.
- HOWELL DG. 1995. *Principles of terrane analysis. New applications for global tectonics*. Chapman & Hall, 245 p.
- JARDIM DE SÁ EF. 1994. A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan-Africana. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 803 p.
- JARDIM DE SÁ EF, MACEDO MHF, TORRES HHL & KAWASHITA K. 1988. Geochronology of metaplutonics and the evolution of supracrustal belts in the Borborema Province, NE Brazil. In: Cong. Latino-Amer. Geol., 7., 1988, Belém. Anais... Belém: SBG/DNPM, 1988. p. 49–62.
- JARDIM DE SÁ EF, SÁ JM & MACEDO MHF. 1990. Monocyclic and polycyclic supracrustal belts in NE Brazil: correlation with the Pan-African belt in West Africa. In: ROCCI G & DESCHAMPS M (Eds.). *Études récentes sur la géologie de l'Afrique*, Nancy, Colloque de Géologie Africaine, 15, Publ. Occas., 22: 296–299.
- JARDIM DE SÁ EF, MACEDO MHF, FUCHS RA & KAWASHITA K. 1992. Terrenos proterozóicos na Província Borborema e a margem norte do Cráton São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 22(4): 472–480.
- JONES DL, COX A, CONEY P & BECK M. 1982. The Growth of Western North America. In: MOORES E (Ed.). 1990. *Shaping the Earth – Tectonics of Continents and Oceans*. 11, Chapman & Hall, p. 156–176.
- MARIANO G, NEVES SP, SILVA FILHO AF & GUIMARÃES IP. 2001. Diorites of the high-K calc-alkalic association: geochemistry and Sm-Nd data and implications for the evolution of the Borborema Province, Northeast Brazil. *Inter. Geol. Rev.*, 43: 921–929.
- MEDEIROS VC. 2004. Evolução geodinâmica e condicionamento estrutural dos terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, Domínio da Zona Transversal, NE do Brasil. Tese de Doutorado. Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 200 p.
- MEDEIROS VC & JARDIM DE SÁ EF. 2009. O Grupo Cachoeirinha (Zona Transversal, NE do Brasil): redefinição e proposta de formalização. *Revista de Geologia*, 22: 124–136.
- MEDEIROS VC, JARDIM DE SÁ EF, ALVES DA SILVA FC & MAFRA JWA. 2001. O Limite entre os Terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú (Superterreno/Domínio da Zona Transversal, NE do Brasil). In: *Simp. Geol. Nord.*, 19., 2001, Natal. Resumos... Natal: SBG, 2001. p. 330–331.
- NEVES SP & MARIANO G. 1997. Segmentação lateral e transversal da porção leste do Lineamento Pernambuco e implicações tectônicas. In: *Simp. Geol. Nord.*, 17., 1997, Fortaleza. Resumos Expandidos... Fortaleza: SBG, 1997. p. 91–94.
- NEVES SP & MARIANO G. 2001. Província Borborema: orógeno acrescionário ou intracontinental. I.G.; série B, Estudos e Pesquisas, 11: 26–37.
- OLIVEIRA RG. 2008. Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozóico da Província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil). Tese de Doutorado. Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 411 p.
- PREWITT J. 1970. Object enhancement and extraction. In: LIPKIN BS & ROSENFELD A (Eds.). *Picture processing and psychopictorics*. Academic Press, New York. p. 75–149.
- SANTOS EJ. 1995. O complexo granítico Lagoa das Pedras: acreção e colisão na região de Floresta (Pernambuco), Província Borborema. Tese

- de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 219 p.
- SANTOS EJ. 1996. Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema. In: Cong. Bras. Geol., 39., 1996, Salvador. Anais... Salvador: SBG, 1996. p. 47–50.
- SANTOS EJ. 1999. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: carta geológica. Belém do São Francisco, Folha SC.24-X-A. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM. CD-ROM.
- SANTOS EJ & BRITO NEVES BB. 1984. Província Borborema. In: ALMEIDA FFM & HASUI Y (Eds.). O Pré-Cambriano do Brasil. Edgard Blucher, p. 123–186.
- SANTOS EJ & MEDEIROS VC. 1998. New insights on Grenville-age and brasileiro granitic plutonism of the Zona Transversal, Borborema Province, NE Brazil. In: Cong. Latino-Amer. Geol., 10., 1998, Buenos Aires. Actas... Buenos Aires: ASGMIA, 1998. v. 2, p. 427–432.
- SANTOS EJ & MEDEIROS VC. 1999. Constraints from granitic plutonism on proterozoic crustal growth of the Transverse Zone, Borborema Province, NE Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 29: 73–84.
- SANTOS EJ, COUTINHO MGN, COSTA MPA & RAMALHO R. 1984. A região de dobramentos Nordeste e a bacia do Parnaíba, incluindo o Cráton de São Luís e as bacias marginais. In: SCHOBENHAUS C, CAMPOS DA, DERZE GR & ASMUS HE (Eds.). *Geologia do Brasil*. DNPm, 5, Brasília, p. 131–189.
- SANTOS EJ, OLIVEIRA RG & PAIVA IP. 1997. Terrenos do Domínio Transversal da Província Borborema: controles sobre acreção e retrabalhamento crustais ao sul do Lineamento Patos. In: *Simp. Geol. Nord.*, 17., 1997, Fortaleza. *Resumos Expandidos...* Fortaleza: SBG, 1997. p. 11–14.
- SANTOS EJ, VAN SCHMUS WR, BRITO NEVES BB, OLIVEIRA RG & MEDEIROS VC. 1999. Terranes and their boundaries in the proterozoic Borborema Province, northeast Brazil. In: *Simp. Nac. Est. Tect.*, 7., 1999, Lençóis – Bahia. *Resumos Expandidos...* Lençóis: SBG, 1999. p. 121–124.
- SANTOS EJ, FERREIRA CA & SILVA JÚNIOR JMF. 2002. *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba*. Escala 1:500.000. Recife: CPRM, 142 p.
- SIAL AN. 1986. Granite-types in Northeast Brazil: Current knowledge. *Revista Brasileira de Geociências*, 16: 54–72.
- SPECTOR A & GRANT FS. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35: 293–302.

## NOTAS SOBRE OS AUTORES

**Vladimir Cruz de Medeiros.** Geólogo (UFRN-1992), Mestre em Geociências (UFPE-1995) e Doutor em Geodinâmica (UFPE-2004). Atualmente é Geólogo/Pesquisador em Geociências da CPRM, onde atua desde 1994 na área de mapeamento geológico. A partir de 2007 exerce as funções de Supervisor de Área da Gerência de Geologia e Recursos Minerais da Superintendência Regional de Recife (GEREMI/SUREG-RE/CPRM) e Chefe (interino) do Núcleo de Apoio de Natal (NANA/SUREG-RE/CPRM). Atua principalmente nos temas: Cartografia Geológica, Geologia Regional da Província Borborema e Sensoriamento Remoto.

**Walter Eugênio de Medeiros.** Engenheiro civil (UFRN-1981), Mestre (UFBA-1987) e Doutor em Geofísica (UFPA-1993). Atualmente é Professor Titular do Departamento de Geofísica da UFRN e coordenador da graduação em Geofísica. Atua em geofísica aplicada (problemas inversos, tectonofísica, avaliação do potencial exploratório de bacias sedimentares, prospecção de água subterrânea e geofísica rasa) em articulação com a pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN, onde orientou 9 trabalhos de mestrado e 6 de doutorado. Em parceria com vários pesquisadores, publicou 32 artigos em revistas nacionais e internacionais e 1 livro-texto. É pesquisador 1A do CNPq e membro do conselho editorial do *Journal of Applied Geophysics* e da *Revista Brasileira de Geofísica*.

**Emanuel Ferraz Jardim de Sá.** Geólogo (UFPE-1973), Mestre em Geociências/Geoquímica (UFBA-1979) e Doutor em Geologia (UnB-1994). Ingressou na UFRN em 1976 e é Professor Titular dessa Universidade desde 2006, atuando nas áreas de graduação e pós-graduação (Geodinâmica e Geofísica), onde ministra(ou) as disciplinas Geologia Estrutural, Geologia de Campo e Geodinâmica, dentre outras. É membro da Academia Brasileira de Ciências e foi pesquisador do CNPq. Atua principalmente nas áreas de Geologia Estrutural e Tectônica, Geologia Regional da Província Borborema, Faixa Seridó e Bacias Sedimentares do Nordeste.