



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

***SISTEMAS ORBITAIS E AÉREOS APLICADOS À
ANÁLISE MULTI-ESCALA DE LINEAMENTOS NA
BORDA SUDESTE DA BACIA DO PARNAÍBA***

Autora:

ANA PAULA JUSTO

Dissertação n° 56/ PPGG

Orientador:

Prof. Dr. Francisco Hilário Rego Bezerra (DG/PPGG-UFRN)

Natal – RN, agosto de 2006.

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



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

*SISTEMAS ORBITAIS E AÉREOS APLICADOS À
ANÁLISE MULTI-ESCALA DA TECTÔNICA RÚPTIL
ATUANTE NA BORDA SUDESTE DA BACIA DO
PARNAÍBA*

Autora:

ANA PAULA JUSTO

*Dissertação de Mestrado
apresentada em 25 de agosto de
2006, para obtenção do título
de Mestre em Geodinâmica
pelo Programa de Pós-
Graduação em Geodinâmica e
Geofísica da UFRN.*

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Francisco Hilário Rego Bezerra (DG/PPGG-UFRN)

Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro (DG/PPGG-UFRN)

Prof. Dr. Cláudio Limeira Mello (IG/UFRJ)

Natal – RN, agosto de 2006.

RESUMO

A atividade tectônica atuante na borda sudeste da Bacia do Parnaíba resultou em ampla gama de estruturas rúpteis que afetaram rochas sedimentares siliciclásticas. Esta atividade tectônica e as falhas, juntas e dobras são pouco conhecidas.

Os principais objetivos deste estudo foram (1) identificar lineamentos através de sistemas de sensores remotos, (2) checar como a interpretação com base nestes sistemas em diversas escalas influencia a identificação de lineamentos, e (3) contribuir para o conhecimento da tectônica rúptil na borda sudeste da Bacia do Parnaíba.

A integração de sistemas orbitais e aéreos permitiu a identificação, classificação e quantificação multi-escala de lineamentos. Mapas de lineamentos foram elaborados nas seguintes escalas: 1:200.000 (radar da *SRTM – Shuttle Radar Topographic Mission*), 1:50.000 (satélite *Landsat 7 ETM+*), 1:10.000 (fotografias aéreas) e 1:5.000 (satélite *Quickbird*). A classificação das feições com significado estrutural possibilitou a determinação de quatro conjuntos estruturais: NW, NS, NE, e EW. Eles geralmente foram identificados em todos os sistemas de sensores remotos. O conjunto NE não foi facilmente identificado nas fotografias aéreas. Este conjunto, bem como o NW, foram visualizados mais nitidamente nas imagens dos sistemas de média resolução (*SRTM e Landsat 7 ETM+*). Os conjuntos NS e EW foram melhores identificados nos produtos de sensores de alta resolução (fotografias aéreas e satélite *Quickbird*).

O significado estrutural dos lineamentos foi estabelecido após o trabalho de campo. O conjunto NE está associado a falhas normais e transcorrentes, inclusive bandas de deformação. Estas são as estruturas mais antigas identificadas na região e são relacionadas à reativação de estruturas do embasamento Pré-Cambriano. O conjunto NW representa falhas transcorrentes e normais subordinadas. A dispersão deste conjunto sugere uma origem mais recente que as estruturas inseridas no conjunto NE. O conjunto NW pode estar relacionado ao Lineamento Picos-Santa Inês. Os conjuntos NS e EW correspondem a juntas de grande porte (comprimentos de 100 m a 5 km). As relações de truncamento entre estes conjuntos de juntas indicam que o conjunto EW é mais antigo que o NS.

A metodologia desenvolvida pelo presente trabalho é uma ferramenta excelente para o entendimento das estruturas regionais e locais na Bacia do Parnaíba. Isto auxilia na escolha do sistema de sensor remoto mais indicado para identificar feições rúpteis em uma bacia sedimentar pouco conhecida.

Palavras-chaves: análise multi-escala, lineamentos, sensores orbitais e aéreos, estruturas rúpteis, Bacia do Parnaíba.

ABSTRACT

The tectonics activity on the southern border of Parnaíba Basin resulted in a wide range of brittle structures that affect siliciclastic sedimentary rocks. This tectonic activity and related faults, joints, and folds are poorly known.

The main aims of this study were (1) to identify lineaments using several remote-sensing systems, (2) to check how the interpretation based on these systems at several scales influence the identification of lineaments, and (3) to contribute to the knowledge of brittle tectonics in the southern border of the Parnaíba Basin.

The integration of orbital and aerial systems allowed a multi-scale identification, classification, and quantification of lineaments. Maps of lineaments were elaborated in the following scales: 1:200,000 (*SRTM – Shuttle Radar Topographic Mission*), 1:50,000 (*Landsat 7 ETM+* satellite), 1:10,000 (aerial photographs) and 1:5,000 (*Quickbird* satellite). The classification of the features with structural significance allowed the determination of four structural sets: NW, NS, NE, and EW. They were usually identified in all remote-sensing systems. The NE-trending set was not easily identified in aerial photographs but was better visualized on images of medium-resolution systems (*SRTM* and *Landsat 7 ETM+*). The same behavior characterizes the NW-trending. The NS- and EW-trending sets were better identified on images from high-resolution systems (aerial photographs and *Quickbird*).

The structural meaning of the lineaments was established after field work. The NE-trending set is associated with normal and strike-slip faults, including deformation bands. These are the oldest structures identified in the region and are related to the reactivation of Precambrian basement structures from the Transbrazilian Lineament. The NW-trending set represents strike-slip and subordinated normal faults. The high dispersion of this set suggests a more recent origin than the previous structures. The NW-trending set may be related to the Picos-Santa Inês Lineament. The NS- and EW-trending sets correspond to large joints (100 m - 5 km long). The truncation relationships between these joint sets indicate that the EW- is older than the NS-trending set.

The methodology developed by the present work is an excellent tool for the understanding of the regional and local tectonic structures in the Parnaíba basin. It helps the choice of the best remote-sensing system to identify brittle features in a poorly known sedimentary basin.

Key-words: *multi-scale analysis, lineaments, orbital and aerial sensors, brittle structures, Parnaíba Basin.*

AGRADECIMENTOS

Neste espaço reservado aos agradecimentos, lembro com gratidão das pessoas e instituições que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação, em especial:

Ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGG/UFRN) e ao Instituto de Geociências da Universidade da São Paulo (IG/USP), que através de seus corpos docentes e discentes forneceram a oportunidade de aprendizado.

Ao orientador desta dissertação, Prof^o Francisco Hilário Rego Bezerra, pelo constante apoio e confiança dedicados. Ao Prof^o Francisco Pinheiro de Lima Filho pela contribuição desde o início, na idealização e realização da presente pesquisa; bem como ao projeto por ele coordenado (*PARAMETRIX*), responsável pelo financiamento desta pesquisa. A secretária do PPGG/UFRN, Nilda de Araújo Lima, pela prontidão e carinho sempre presentes.

Aos professores Venerando Eustáquio Amaro, Valéria Córdoba, Walter de Medeiros, Marcelo Rocha, Maria Osvalneide Lucena, Cynthia Romariz, Paulo César Araújo, Narendra Srivatava, Marcelo Simões, Hans Shorscher, Antônio Romalino Fragoso Cesar, Renato Paes de Almeida, Jorge Hachiro, Gelson Fambrinni, Benjamin Bley de Brito-Neves, Francisco Oliveira, Wanildo Fonseca, Fernando Lins, Paulo Boggianni, Jorge Kazuo Yamamoto, Wellington Ferreira, Venâncio Camões, Ana Maria Góes e José Alberto Quintanilha.

Aos geólogos doutores, mestres, pós-graduandos e graduandos, pela amizade e auxílio: Milena, César, Ana Paula, Soraia, Júlio, Nilton, Moacir, Ana Pauletti, Marcus, Roberto Gusmão, Valdir, Miriam, Ronaldo, Mary, Sânzio, Périckles, Vladimir, Rodrigo, Allany, Ana Gesinki, Anelise, Liliane Janikian e Juliana Leme.

Sou grata em especial à administração e equipe responsável pela Unidade de Conservação do IBAMA - Parque Nacional da Serra das Confusões, com sede em Caracol-PI, por proporcionar infraestrutura, segurança, aprendizado e amizade durante as etapas de campo: Seu Adão, Seu Mitinha, Carlinhos, Júnior, Neri, Ney, Josiel, Renato, Júlio, Márcio, Edmilson, Neto, Costantino, Odécio e Aurenir.

À equipe da pesquisa mineral da CVRD, agradeço à compreensão e ao apoio dedicados: Carmen Nunes, Novaldo Teixeira, Antônio Rabelo, Marcelo Leão, Gilberto Menegusso, Lineu Sabóia, Leandro Vieira, Francisco de Assis Damasceno, Cornélio Batista Neto, Francisco Robert, Wolney Rosa, Beth Marques, Danielle Magalhães, Pedro Leite e Fabiano Bandeira.

À CAPES, pela concessão de bolsa de estudos durante um ano.

Aos amigos de jornada Jiva Chandra, Emanuel Vibhuti e outros que ficaram por listar.

Aos meus pais e irmãos por tudo aquilo que são.

Esta dissertação é dedicada a Krishna.

ÍNDICE

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
ÍNDICE.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xii
I. INTRODUÇÃO.....	1
<i>I.1 - Objetivos.....</i>	<i>2</i>
<i>I.2 - Justificativa.....</i>	<i>2</i>
<i>I.2 - Localização e vias de acesso.....</i>	<i>3</i>
II. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	5
<i>II.1 - Posicionamento geotectônico da Bacia do Parnaíba.....</i>	<i>6</i>
<i>II.2 - Estratigrafia da Bacia do Parnaíba.....</i>	<i>8</i>
<i>II.3 - Estratigrafia da área de estudos na borda Sudeste da Bacia do Parnaíba.....</i>	<i>11</i>
<i>II.4 - Arcabouço estrutural da Bacia do Parnaíba.....</i>	<i>13</i>
<u>II.4.1 - O Lineamento Transbrasiliano.....</u>	<u>15</u>
<u>II.4.2 -O Lineamento Picos – Santa Inês.....</u>	<u>16</u>
<i>II.5 - Contexto estrutural da borda Sudeste da Bacia do Parnaíba.....</i>	<i>16</i>
III. ASPECTOS DA GEOLOGIA LOCAL.....	21
IV. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLÓGICA DA EXTRAÇÃO DE LINEAMENTOS.....	30
<i>IV.1 - Fundamentação Teórica da extração, análise e interpretação de lineamentos através de sistemas orbitais e aéreos.....</i>	<i>31</i>
<u>IV.1.1 - Conceituação teórica.....</u>	<u>31</u>
<u>IV.1.2 - Análise de lineamentos no Nordeste do Brasil.....</u>	<u>32</u>
<i>IV.2 - Identificação e extração de lineamentos em produtos de sistemas de</i>	

<i>sensores</i>	33
<u>IV.2.1 - Extração de lineamentos em macro e meso-escalas</u>	34
<i>IV.2.1.i - Radar SIR-C/X-SAR da SRTM</i>	34
<i>IV.2.1.ii - Satélite Landsat 7ETM+</i>	35
<u>IV.2.2 - Extração de lineamentos em meso e micro-escalas</u>	36
<i>IV.2.2.i - Fotografias aéreas</i>	36
<i>IV.2.2.ii - Satélite Quickbird</i>	38
IV.3 - Classificação dos lineamentos	39
IV.4 - Análise estatística de lineamentos	40
<u>IV.4.1 - Orientação azimutal</u>	40
<u>IV.4.2 - Densidade de fraturamento</u>	41
V. ANÁLISE DE LINEAMENTOS ATRAVÉS DE SENSORES ORBITAIS E AÉREOS	51
<i>V.1 - Subdivisão dos sets de lineamentos</i>	52
<i>V.2 - Densidade de lineamentos</i>	59
VI. SIGNIFICADO GEOLÓGICO DOS LINEAMENTOS	69
<i>VI.1 - Inferência do significado geológico dos lineamentos através de critérios de sensoriamento remoto</i>	70
<i>VI.2 - Determinação do significado geológico dos lineamentos através de critérios de campo</i>	86
<u>V.2.1 - Juntas</u>	87
<i>V.2.1.i - Juntas de grande porte</i>	87
<i>V.2.1.ii - Juntas de pequeno porte</i>	88
<i>V.2.1.iii - Juntas intraestratais</i>	91
<u>V.2.2 - Falhas</u>	94
<i>V.2.2.i - Falhas com deslocamento sub-vertical: normais e reversas</i> ...94	
<i>V.2.2.ii - Falhas transcorrentes</i>	94
(a) Falhas sem preenchimento de sílica.....	94
(b) Falhas com preenchimento de sílica (bandas de deformação).....	98
(c) Falhas em flor.....	98

VII. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.....	102
<i>VII.1 – Análise multi-escala de lineamentos</i>	<i>103</i>
<u>VII.1.1 – Conjuntos de lineamentos NS e EW.....</u>	104
<u>VII.1.2 - Conjuntos de lineamentos NE e NW.....</u>	105
<i>VII.2 – Interpretação geodinâmica preliminar da evolução tectônica na borda sudeste da Bacia do Parnaíba.....</i>	<i>107</i>
VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Localização e vias de acesso para a área de estudos.....	4
Figura 2.1: Mapa de localização das sinéclises da Plataforma Brasileira indicando a posição da área de estudos (modificado da CPRM, 2001 e Rossetti, 2003).....	6
Figura 2.2: Esboço do posicionamento geotectônico do início da sedimentação da Bacia do Parnaíba (Grupo Serra Grande) no Gondwana Ocidental durante o fim d Ciclo Pan-Africano/Brasiliano (desconsideradas as coberturas do Pré Cambriano Final - modificado de Cunha, 1986).....	8
Figura 2.3: Estratigrafia da Bacia do Parnaíba (modificado de Góes & Feijó, 1994).....	10
Figura 2.4: Perfil esquemático da Bacia do Parnaíba (segundo Góes & Feijó, 1994).....	11
Figura 2.5: Mapa geológico da área de estudos, na porção sudeste da Bacia do Parnaíba (CPRM, 2001).....	14
Figura 2.6: Mapa regional de lineamentos e alinhamentos aerogeofísicos (modificado de Oliveira, 1998 e Góes & Feijó,1993).	17
Figura 2.7: Domínios Geofísicos-Geotectônicos da borda SE da Bacia do Parnaíba, interpretados através da correlação entre dados geológicos, aeromagnéticos e gravimétricos (modificado de Oliveira, 1998).	18
Figura 2.8: Mapa aeromagnético do campo total sombreado em tons de cinza. Fonte luminosa a 300° Az, com inclinação de 45°. O mapa enfatiza alinhamentos aeromagnéticos de direção NE-SW, relacionados com falhas, diques e outras estruturas rasas ou aflorantes. Projeção Equatorial Mercator, Meridiano Central 39° (Oliveira, 1998).....	20
Figura 3.1: Morro do Cruzeiro, situado na porção sul da sede municipal de Caracol. Neste morro aflora o contato dos gnaisses do embasamento da província geotectônica do São Francisco com a Bacia do Parnaíba.....	21
Figura 3.2: Seixos oblatos, com superfícies planas e polidas, inseridos na fácies basal de arenito conglomerático a conglomerado grosso, polimítico e mal-selecionado.....	22
Figura 3.3: Brecha ferruginosa presente em uma camada de até 3,0 m de espessura, no topo do Morro do Cruzeiro: (a) aspecto geral do afloramento; (b) detalhe da brecha onde o maior seixo visível é um arenito.	22
Figura 3.4 a-e: <i>Porção de borda da bacia</i> : (a) seção estratigráfica de detalhe do Morro do Cruzeiro; (b) fácies siltico-arenosas finamente laminadas, com folhelhos arroxeados; (c) fácies de arenito conglomerático a conglomerado grosso, polimítico e mal-selecionado; <u>Porção à NW da borda da bacia</u> : (d) fácies argilo-siltosas situadas nos fundos dos vales da área de estudos; (e) fácies areno-conglomeráticas presentes nas porções superiores das escarpas da Serra das Confusões e demais estações de coleta de dados.....	23
Figura 3.5 a-f: Associação de fácies argilo-siltico-arenosa sotoposta à associação de fácies areno-conglomeráticas do topo do empilhamento: (a-b-c) icnofósseis - provável icnofáceis <i>Cruziana</i> ; (d-e-f) bioturbações - <i>Skólitos</i>	24
Figura 3.6 a-b: <i>Porção à NW da borda da bacia</i> : fácies de arenito conglomerático grosso, mal-selecionado, com intraclastos de: (a) siltito e (b) arenito conglomerático estratificado cruzadamente, atingindo dimensões de matacão.....	25
Figura 3.7 a-c: Fácies arenosa interpretada como estrutura de liquefação: (a) pilares de areia (estação do CAJU); (b) pilares de areia e (c) bolsão (estação CONF). Para localização das estações de coleta, vide Figura 6.2.....	26

- Figura 3.8 a-h: Fácies arenosa interpretada como estruturas de liquefação: (a), (b) e (e) - tipo dique de areia com intraclastos arrancados do nível pelítico inferior, em meio a camadas não deformadas; (c) - intraclasto de argila arrancado no nível pelítico próximo à base ao dique de areia; (d), (f), (g) e (h) - mistura de uma camada pelítica com depósito arenoso cuja estrutura primária foi obliterada pelo intenso escape d'água decorrente do mecanismo de fluidificação; (d), (f) e (h) - setas indicando camada pelítica de baixa permeabilidade capeando sedimentos fluidificados.....27**
- Figura 3.9 a-c: Estação de coleta Guaribas (GARB – vide figura 6.2 para localização da estação de coleta de dados de campo): (a) vista do possível contato entre os pelitos da Formação Tianguá (Grupo Serra Grande) ou Formação Pimenteira (Grupo Canindé) na base e os arenitos conglomeráticos da Formação Jaicós (Grupo Serra Grande) ou Formação Cabeças (Grupo Canindé) do topo; (b) fácies pelítica da Formação Tianguá ou Formação Pimenteira (Grupo Canindé); (c) fácies de arenito médio e arenito conglomerático a conglomerados finos, com estratificação cruzada acanalada da Formação Jaicós (Grupo Serra Grande) ou Formação Cabeças (Grupo Canindé).....28**
- Figura 4.1: Áreas de cobertura dos sistemas de sensores e escalas compatíveis às respectivas resoluções espaciais.....37**
- Figura 4.2 a-b: (a) imagem bruta dos dados do radar SIR-C/X-SAR com ajuste pelo desvio padrão (obtidos pela SRTM); (b) total de lineamentos, extraídos da imagem de radar na escala 1:200.000, classificados segundo as categorias: *escarpas, vales e fraturas/vegetação*.....43**
- Figura 4.3 a-b: Visualização na escala 1:200.000: (a) da imagem de radar com relevo sombreado (realce para as estruturas NE, direção de iluminação 315°, inclinação solar 45°); (b) detalhe do total de lineamentos extraídos dos produtos de radar, classificados segundo as categorias: lineamentos representantes de *escarpas, vales e fraturas/vegetação*.....44**
- Figura 4.4 a-b: (a) composição colorida da porção sudeste da cena 219/66 do satélite Landsat 7 ETM+ - bandas R:7, G:5, B:4 + fusão com a PAN, adequada para o realce de estruturas geológicas; (b) total de lineamentos extraídos da imagem do satélite Landsat 7 ETM+ na escala 1:50.000, classificados segundo as categorias: lineamentos representantes de *escarpas, vales, fraturas e vegetação*.....45**
- Figura 4.5 a-b: Visualização na escala 1:50.000: (a) do destaque para as estruturas NW através da aplicação do filtro direcional N 315° na banda 5 da fusão R:7G:5B:4+PAN do satélite Landsat 7 ETM+; (b) dos lineamentos extraídos dos produtos do satélite Landsat 7 ETM+, classificados segundo as categorias: lineamentos representantes de *escarpas, vales, fraturas e vegetação*.....46**
- Figura 4.6 a-b: (a) Fotomosaico com 19 fotografias aéreas originalmente na escala 1:32.000; (b) total de lineamentos extraídos do fotomosaico com o auxílio do zoom na escala 1:10.000, classificados segundo as categorias: lineamentos representantes de *escarpas, vales, fraturas e vegetação*.47**
- Figura 4.7 a-b: Visualização na escala 1:10.000: (a) do mosaico das fotografias aéreas digitalizadas; (b) dos lineamentos extraídos do mosaico das fotografias aéreas, classificados segundo as categorias: lineamentos representantes de *escarpas, vales, fraturas e vegetação*.....48**
- Figura 4.8 a-b: (a) imagem pancromática do satélite Quickbird com ajuste pelo desvio padrão; (b) total de lineamentos, extraídos da imagem Quickbird na escala 1:5.000, classificados segundo as categorias: lineamentos representantes de *escarpas, vales, fraturas e vegetação*.....49**
- Figura 4.9 a-b: Visualização na escala 1:5.000: (a) da imagem pancromática do satélite Quickbird com ajuste pelo desvio padrão; (b) do total de lineamentos extraídos da imagem do satélite Quickbird, classificados segundo as categorias: lineamentos representantes de *escarpas, vales, fraturas e vegetação*.50**

- Figura 5.1:** Histogramas relacionando o total de lineamentos dos produtos da *SRTM*, conforme: (i) azimute vs. frequência relativa dos lineamentos (coluna à esquerda) e (ii) azimute vs. comprimento total (coluna à direita). Nos histogramas da primeira linha os lineamentos estão classificados por tipo; nos da segunda está o total e nos da terceira foram representados apenas os lineamentos (e seus comprimentos associados) considerados de significado tectônico.....53
- Figura 5.2:** Histogramas relacionando o total de lineamentos dos produtos das imagens do satélite *Landsat 7 ETM+*, conforme: (i) azimute vs. frequência relativa dos lineamentos (coluna à esquerda) e (ii) azimute vs. comprimento total (coluna à direita). Nos histogramas da primeira linha os lineamentos estão classificados por tipo; nos da segunda está o total e nos da terceira foram representados apenas os lineamentos (e seus comprimentos associados) considerados de significado tectônico.54
- Figura 5.3:** Histogramas relacionando o total de lineamentos das fotografias aéreas, conforme: (i) azimute vs. frequência relativa dos lineamentos (coluna à esquerda) e (ii) azimute vs. comprimento total (coluna à direita). Nos histogramas da primeira linha os lineamentos estão classificados por tipo; nos da segunda está o total e nos da terceira foram representados apenas os lineamentos (e seus comprimentos associados) considerados de significado tectônico.55
- Figura 5.4:** Histogramas relacionando o total de lineamentos das imagens pancromática do satélite *Quickbird*, conforme: (i) azimute vs. frequência relativa dos lineamentos (coluna à esquerda) e (ii) azimute vs. comprimento total (coluna à direita). Nos histogramas da primeira linha os lineamentos estão classificados por tipo; nos da segunda está o total e nos da terceira foram representados apenas os lineamentos (e seus comprimentos associados) considerados de significado tectônico.56
- Figura 5.5:** Rosetas do total de lineamentos realçados pelos quatro sensores. Dois tipos de classificação azimutal, a partir: (i) do comprimento acumulado dos lineamentos (rosetas da linha superior); e (ii) da frequência relativa dos lineamentos (rosetas da linha inferior).....57
- Figura 5.6 a-b:** Mapas com o total de lineamentos contidos nas 21 subestações de coleta de dados, as quais foram subdivididas para a análise comparativa da densidade de lineamentos, através da integração dos produtos dos sistemas de sensores de média resolução: (a) radar *SIR-C/X-SAR*; (b) satélite *Landsat 7 ETM+*. A seta indica a subestação com maior densidade de lineamentos de acordo com cada sensor usado.....62
- Figura 5.7 a-b:** Mapas com o total de lineamentos contidos nas 21 subestações de coleta de dados, as quais foram subdivididas para a análise comparativa da densidade de lineamentos, através da integração dos produtos dos sistemas de sensores de alta resolução: (a) fotografias aéreas; (b) satélite *Quickbird*. As setas indicam a subestação com maior densidade de lineamentos de acordo com cada sensor usado.63
- Figura 5.8 a-d:** Gráficos comparativos entre as densidades de lineamentos para cada um dos quatro produtos de sensores: (a) radar da *SRTM*, (b) satélite *Landsat 7 ETM+*; (c) fotografias aéreas, (d) satélite *Quickbird*; conforme as 21 subestações delimitadas para a análise de densidade. As 21 subestações estão enumeradas em ordem crescente da esquerda para a direita, cada coluna corresponde à respectiva área ilustrada nas figuras 5.6 e 5.7.....64
- 5.9 a-d:** Mapa com o total de lineamentos contidos na subestação de coleta n° 3, e extraídos a partir dos produtos dos sistemas de sensores: (a) radar da *SRTM*, (b) satélite *Landsat 7 ETM+*, (c) fotografias aéreas, (d) satélite *Quickbird* . A estação n° 3 apresentou as maiores densidades de fraturamento das 21 subestações de coleta de lineamentos para cada um dos três sensores: *Landsat 7 ETM+* (9,41%), fotos aéreas (8,71%) e *Quickbird* (26,86%).....67
- 5.10 a-d:** Mapa com o total de lineamentos contidos na subestação de coleta n° 7, e extraídos a partir dos produtos dos sistemas de sensores: (a) radar da *SRTM*, (b) satélite *Landsat 7 ETM+*, (c) fotografias aéreas, (d) satélite *Quickbird* . A estação n° 7 apresentou a maiore

densidade de fraturamento dentre as 21 subestações de coleta de lineamentos, somente através dos produtos do radar da <i>SRTM</i> (1,83%).....	68
Figura 6.1: Modelo digital de terreno (MDT) elaborado a partir da integração dos dados do radar da <i>SRTM</i> com a imagem gerada pela fusão da banda pancromática do satélite <i>Landsat 7 ETM+</i> com a composição R:7 G:5 B:4 das bandas deste satélite (exagero vertical = 20 m).....	71
Figura 6.2: Estações de coleta de dados estruturais de campo.....	72
Figura 6.3 a-d: Mapas de lineamentos da estação ANDO_I extraídos dos produtos de sensores de média resolução: (a-b) mapas com o total de lineamentos identificados na área; e (c-d) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW. As figuras (a) e (c) correspondem aos lineamentos extraídos do radar da <i>SRTM</i> ; e as (b) e (d) aos lineamentos extraídos do satélite <i>Landsat 7 ETM+</i>	73
Figura 6.4 a-b: Mapas de lineamentos da estação ANDO_I, extraídos das fotografias aéreas: (a) mapa com o total de lineamentos identificados na área; e (b) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW.	74
Figura 6.5 a-b: Mapas de lineamentos da estação ANDO_I, extraídos da imagem do satélite <i>Quickbird</i> : (a) mapa com o total de lineamentos identificados na área; e (b) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW.	75
Figura 6.6 a-d: Mapas de lineamentos da estação ANDO_II extraídos dos produtos de sensores de média resolução: (a-b) mapas com o total de lineamentos identificados na área; e (c-d) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW. As figuras (a) e (c) correspondem aos lineamentos extraídos do radar da <i>SRTM</i> ; e as (b) e (d) aos lineamentos extraídos do satélite <i>Landsat 7 ETM+</i>	76
Figura 6.7 a-d: Mapas de lineamentos da estação CAJU extraídos dos produtos de sensores de média resolução: (a-b) mapas com o total de lineamentos identificados na área; e (c-d) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW. As figuras (a) e (c) correspondem aos lineamentos extraídos do radar da <i>SRTM</i> ; e as (b) e (d) aos lineamentos extraídos do satélite <i>Landsat 7 ETM+</i>	77
Figura 6.8 a-b: Mapas de lineamentos da estação CAJU extraídos das fotografias aéreas: (a) mapa com o total de lineamentos identificados na área; e (b) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW.	78
Figura 6.9 a-b: Mapas de lineamentos da estação CAJU extraídos da imagem do satélite <i>Quickbird</i> : (a) mapa com o total de lineamentos identificados na área; e (b) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW.	79
Figura 6.10 a-d: Mapas de lineamentos da estação CCOL extraídos dos produtos de sensores de média resolução: (a-b) mapas com o total de lineamentos identificados na área; e (c-d) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW. As figuras (a) e (c) correspondem aos lineamentos extraídos do radar da <i>SRTM</i> ; e as (b) e (d) aos lineamentos extraídos do satélite <i>Landsat 7 ETM+</i>	80
Figura 6.11 a-d: Mapas de lineamentos da estação CONF extraídos dos produtos de sensores de média resolução: (a-b) mapas com o total de lineamentos identificados na área; e (c-d) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW. As figuras (a) e (c) correspondem aos lineamentos extraídos do radar da <i>SRTM</i> ; e as (b) e (d) aos lineamentos extraídos do satélite <i>Landsat 7 ETM+</i>	81
Figura 6.12 a-b: Mapas de lineamentos da estação CONF extraídos das fotografias aéreas: (a) mapa com o total de lineamentos identificados na área; e (b) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW.	82

- Figura 6.13 a-b:** Mapas de lineamentos da estação CONF extraídos da imagem do satélite *Quickbird*: (a) mapa com o total de lineamentos identificados na área; e (b) somente lineamentos inseridos nos *sets* NW, NS, NE e EW.83
- Figura 6.14 a-d:** Mapas de lineamentos da estação GARB extraídos dos produtos de sensores de média resolução: (a-b) mapas com o total de lineamentos identificados na área; e (c-d) somente lineamentos inseridos nos *sets* NW, NS, NE e EW. As figuras (a) e (c) correspondem aos lineamentos extraídos do radar da *SRTM*; e as (b) e (d) aos lineamentos extraídos do satélite *Landsat 7 ETM+*.84
- Figura 6.15 a-d:** Mapas de lineamentos da estação JAPE extraídos dos produtos de sensores de média resolução: (a-b) mapas com o total de lineamentos identificados na área; e (c-d) somente lineamentos inseridos nos *sets* NW, NS, NE e EW. As figuras (a) e (c) correspondem aos lineamentos extraídos do radar da *SRTM*; e as (b) e (d) aos lineamentos extraídos do satélite *Landsat 7 ETM+*.85
- Figura 6.16 a-f:** Juntas de grande porte localizadas nas estações de coleta: (a) ANDO_II; (b) CAJU; (c) JAPE; (d) GARB; (e) CONF e (f) ANDO_I. Relação temporal entre os *sets* NS e EW nas fotos (d), (e) e (f), nas quais o *set* de juntas EW trunca o NS, evidenciando que este sucede àquele.89
- Figura 6.17 a-e:** Diagramas de igual área com projeção no hemisfério sul de juntas de grande porte localizadas nas estações de coleta: (a) ANDO_II; (b) ANDO_I; (c) CAJU; (d) GARB e (e) CONF. Conforme relação de truncamento observada em campo, as juntas mais novas estão representadas em vermelho, e as mais antigas em azul. De um modo geral os estereogramas indicam o predomínio de juntas NS mais novas que as EW.90
- Figura 6.18 a-c:** Juntas de pequeno porte: (a) ANDO_I e (b) GARB – cabo do martelo indicando a direção E; (c) CONF – bússola na direção NW.91
- Figura 6.19 a-g:** Juntas intraestratais localizadas nas estações de coleta: (a) ANDO_I; (b) CONF; (c-f) GARB; e (g) CAJU, onde se percebe em planta a morfologia poligonal associada às juntas intraestratais.92
- Figura 6.20 a-h:** Diagramas de igual área com projeção no hemisfério sul dos *sets* NE e NW das juntas intraestratais, nas estações: (a) ANDO_I; (b) CONF; e (c-d) GARB. Estas juntas se distribuem por todo a área: (e) ANDO_I; (f) CONF; (g) GARB e (h) CAJU.93
- Figura 6.21 a-e:** Evidências de falhas normais na estação CONF: (a-c) rejeitos submilimétricos a subcentimétricos; (d) estrias no plano de falha; (e) falha normal associada à banda de deformação.95
- Figura 6.22 a-f:** Diagramas de igual área com projeção no hemisfério sul das falhas com deslocamento sub-vertical: reversas nas estações - (a) ANDO_II e (b) CONF; e normais nas estações - (c) ANDO_II, (d) CAJU, (e) GARB, e (f) CONF.96
- Figura 6.23:** Gruta dos Bois situada na porção noroeste da estação de coleta CONF; o desenvolvimento desta zona de fraqueza na direção NW está associado a uma falha transcorrente.97
- Figura 6.24 a-e:** Evidências de falhas com rejeito lateral/oblíquo: (a) CAJU - cinemática dextral; (b) ANDO_I - cinemática sinistral; (c-e) ANDO_II: - cinemática sinistral - (c) aspecto do afloramento, (d) estrias nos degraus do plano de falha, e (e) estrias no plano de falha.99
- Figura 6.25 a-g:** Diagramas de igual área com projeção no hemisfério sul das falhas com deslocamento lateral/oblíquo nas estações: (a) e (b) ANDO_II; (c) CAJU; (d) GARB; (e) e (f) ANDO_I; e (g) CONF. Cinemáticas: dextral - vermelho; sinistral - verde; e sem informação cinemática - azul.100

Figura 6.26 a-h: Diagramas de igual área com projeção no hemisfério sul das bandas de deformação: (a) ANDO_I; (b-c) CONF; (d) GARB; e (e) CAJU. Cinemáticas: destal - vermelho e sinistral - verde. Bandas de deformação (CONF): (f) afloramento; (g) sinistral e (h) destal.101

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Parâmetros relevantes dos produtos dos sistemas orbitais e aéreos utilizados na análise multi-escala do padrão estrutural rúptil da área de estudos.....	34
Tabela 4.2: Matrizes dos filtros direcionais <i>Prewitt</i> borda de matriz 3x3, correspondentes às direções das estruturas destacadas : N-S (i), NE-SW (ii), E-W (iii) e NW-SE (vi).....	38
Tabela 5.1: Intervalos azimutais em graus dos <i>sets</i> identificados para cada sistema de sensor. Para a definição dos intervalos azimutais dos <i>sets</i> , dentre as classes de lineamentos definidas (fraturas, drenagens, vegetação e escarpas), foram desconsiderados os lineamentos não diretamente associados a condicionantes tectônicos: (i) <i>escarpas</i> - para os sensores de média resolução; e (ii) <i>escarpas</i> e <i>vales</i> - para os sensores de alta resolução.....	58
Tabela 5.2: Dados quantitativos relativos à densidade de lineamentos para o total de feições lineares associadas a condicionantes tectônicas inseridas nas respectivas áreas de cobertura de cada sensor; (n° = número de lineamentos; ΣL = somatória do comprimento de lineamentos; A = área de cobertura do sensor considerada no cálculo da densidade de lineamentos; ρ = densidade de lineamentos).....	59
Tabela 5.3: Síntese dos dados de densidade de fraturamento obtidos para cada <i>set</i> e para o total de lineamentos. Os valores à esquerda foram obtidos considerando os <i>sets</i> de lineamentos inseridos nas respectivas áreas de cobertura de cada sistema de sensor; os valores à direita consideram os <i>sets</i> de lineamentos inseridos apenas na área de cobertura do satélite <i>Quickbird</i> , comum à cobertura dos demais sensores. (n° = n° de lineamentos; ΣL = somatória do comprimento de lineamentos; A = área de cobertura do sensor considerada no cálculo da densidade de lineamentos; ρ = densidade de lineamentos).	61
Tabela 5.4 Número total de lineamentos e a somatória do comprimento dos lineamentos extraídos pelos quatro produtos de sensores remotos, para cada um das 21 subestações inseridas na área de cobertura do satélite <i>Quickbird</i>	65
Tabela 5.5: Resultados dos cálculos de densidade de lineamentos (em %) para cada subestação de 4 km ² inserida na área de cobertura do satélite <i>Quickbird</i>	66
Tabela 6.1: Relação entre os <i>sets</i> de estruturas identificados e os principais tipos de estruturas identificados, para cada estação de coleta de dados. J peq – juntas de pequeno porte; Jgde – juntas de grande porte; J int – juntas intraestratais; FN – falha normal; FS – falha sinistral; FD – falha destal; BD S – banda de deformação sinistral; BD D – banda de deformação destal.....	87

I. INTRODUÇÃO

I. INTRODUÇÃO

1.1 – Objetivos

A análise de lineamentos na borda sudeste da Bacia do Parnaíba realizada no presente trabalho consistiu na integração de imagens de sistemas orbitais e aéreos, interpretadas com base em dados coletados no campo. Os dados resultantes da interpretação das imagens, fotos-aéreas e do trabalho de campo foram correlacionados sobre uma plataforma de sistema de informações geográficas (SIG).

A fusão de dados multi-sensores visou aproveitar as peculiaridades de cada produto, a partir da integração de três tipos de informações: espectrais, espaciais e topográficas. O produto de tal compilação constituiu-se em uma ferramenta precisa no realce de feições estruturais regionais e locais, o que favoreceu uma classificação mais adequada dos lineamentos identificados.

O presente trabalho teve por objetivos verificar como os lineamentos variam de acordo com a resolução das imagens analisadas, e compreender a influência de cada escala de observação na análise dos lineamentos. Buscou-se determinar, dentre os sistemas de sensores orbitais e aéreos utilizados, aqueles mais adequados para a identificação, classificação e análise de lineamentos. Sendo esta uma questão de escala, a informação coletada no campo tornou-se essencial na compreensão do significado geológico expresso pelos lineamentos identificados nas diferentes escalas de observação.

A integração dos dados relacionados à deformação rúptil, através de sensores remotos e de observações de campo, permitiu contribuir de modo preliminar para a compreensão da evolução geodinâmica da borda sudeste da Bacia do Parnaíba.

1.2 – Justificativa

A análise de feições lineares impressas na superfície terrestre, e a adequada interpretação de eventuais condicionamentos estruturais, são possíveis através de uma abordagem sinóptica capaz de integrar produtos digitais de sistemas de sensores remotos e dados de campo.

A relevância do uso do sistema de informações geográficas está na integração de imagens de diversos sensores remotos, como as de satélites orbitais, imagens SAR (*Synthetic Aperture Radar*), fotos aéreas ortorretificadas, bem como mapas topográficos e geológicos, informações auxiliares obtidas através de trabalhos de campo em escala de detalhe e furos de sondagem. Tal integração permite o estudo de grandes áreas a partir de diferentes escalas de observação, o que favorece a diminuição do tempo gasto com campanhas de campo durante a coleta de um número representativo de dados estruturais.

Até o presente, são relativamente poucos os trabalhos de geologia desenvolvidos na Bacia do Parnaíba, embora a mesma seja composta por excelentes exposições de rochas sedimentares siliciclásticas, com extensões quilométricas, e desníveis topográficos da ordem de dezenas de metros.

O contexto geológico de uma bacia intracratônica, submetida especialmente ao tectonismo rúptil, somado à cobertura vegetal característica da caatinga brasileira, a pouca interferência antrópica, e às extensas exposições rochosas, mostraram-se favoráveis para o estudo proposto. A utilização do sensoriamento remoto em conjunto com os dados de afloramento se adequou ao estudo em função da realidade da área.

O resultado do presente trabalho, ao contrário do que em geral se espera no estudo de feições estruturais em bacias intracratônicas, aparentemente sem deformação, mostrou considerável atuação de atividade tectônica rúptil durante a evolução geodinâmica da Bacia do Parnaíba.

Os lineamentos apresentaram assinaturas muito expressivas nos sensores remotos. No campo, a situação favorável não foi diferente, a abundância de exposições contribuiu para a quantidade de informação observada; como planos de juntas e de falhas.

A compreensão bidimensional do padrão de deformação em diferentes escalas favorece a caracterização geométrica de zonas de fraquezas de magnitudes distintas em superfície, e conseqüentemente, a partir da integração ao estudo de dados sísmicos, de GPR ou de furos de sondagem, auxilia na inferência do grau de influência destas na permeabilidade do pacote rochoso.

A metodologia desenvolvida no presente trabalho, por pretender auxiliar na caracterização da estrutural local e regional de uma determinada área, se aplicada a outras bacias intracratônicas, pode contribuir para estudos relacionados ao entendimento da tectônica regional e à parametrização estrutural de reservatórios fraturados. Adicionalmente, no que se refere aos procedimentos adotados na análise estrutural, é possível utilizá-los na parametrização estrutural aplicada à geotecnia de pedreiras, minas e maciços rochosos fraturados, bem como a estudos que envolvam uma análise fractal para o conjunto de estruturas rúpteis identificadas.

1.3 - Localização e Vias de Acesso

A área de estudos localiza-se no extremo sudeste do Piauí, próximo à divisa com o estado da Bahia; abrange parcialmente os municípios de Caracol e Guaribas-PI, e as dependências do Parque Nacional da Serra das Confusões (**Figura 1.1**). Os limites aproximados da área são: **NW**: 43°53'00''W / 8°56'00''S (UTM: 622400, 9012350); **SE**: 43°15'00''W / 9°25'00''S (UTM: 689915, 8954910)].

O acesso norte à região pode ser feito a partir da BR-230 (partindo de Floriano-PI ou Picos-PI) até cidade de Oeiras-PI. Segue-se para sul pela PI-143 até o município de Simplício Mendes, onde há o cruzamento com a BR-020. Segue-se pela BR-020, passando por São João do Piauí e São Raimundo Nonato, até o município de Caracol. O acesso sul pode ser feito partindo-se de Petrolina-BA pela BR-324, passando pelo município de Remanso-BA e Dirceu Arcoverde-PI, até o cruzamento com a BR-020 em São Raimundo Nonato-PI.

Nesta região, a BR-020 encontra-se em bom estado de conservação, majoritariamente asfaltada, com pequenos trechos não pavimentados.

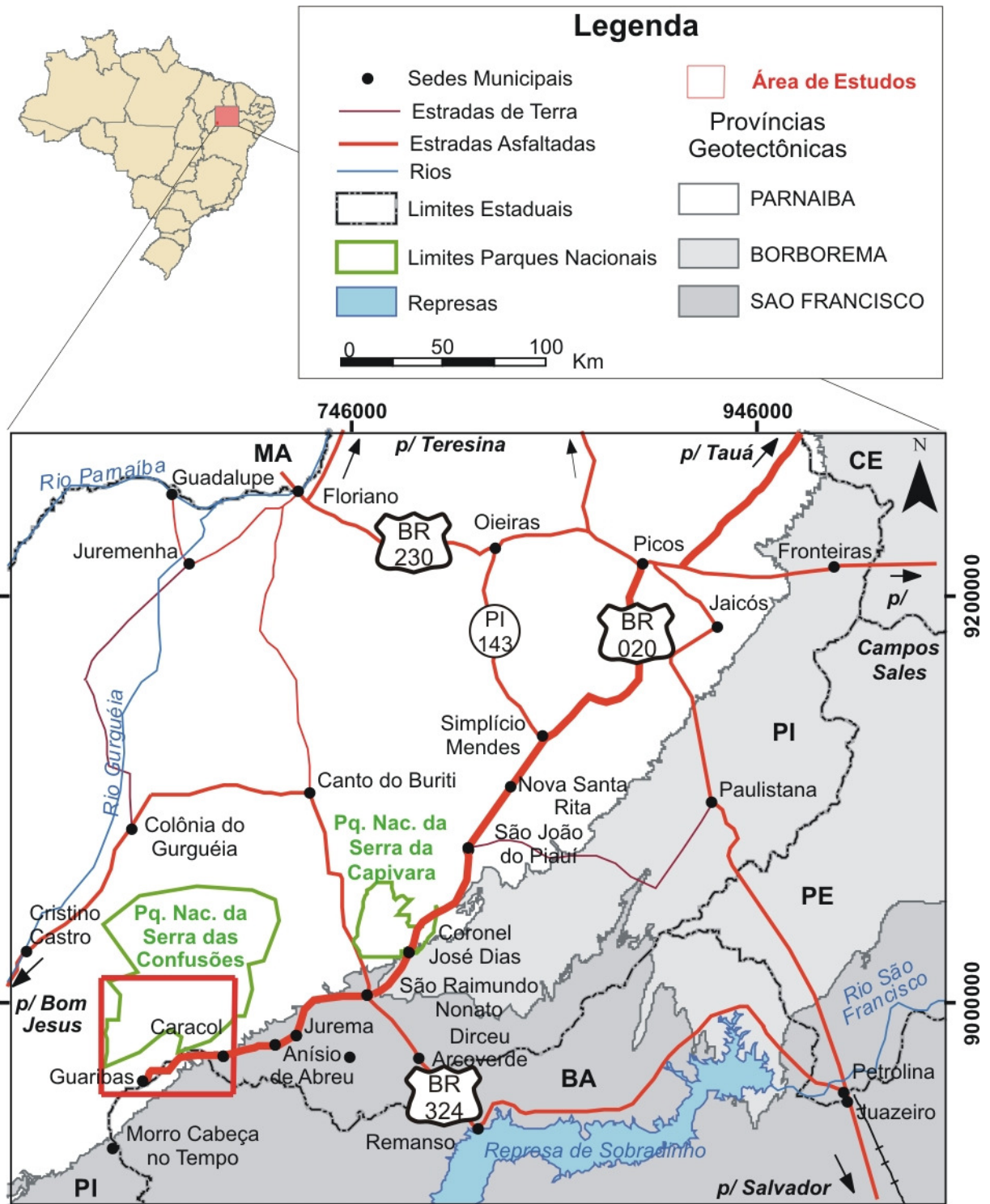


Figura 1.1: Localização da área de estudos.

II. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

II. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

II.1 - Posicionamento geotectônico da Bacia do Parnaíba

A Bacia do Parnaíba está localizada na porção nordeste da Plataforma Sul-Americana, onde ocupa em grande parte dos estados do Piauí e do Maranhão e recobre parcialmente os estados do Pará, Ceará, Bahia, Tocantins e Goiás. Ela corresponde a uma sinéclise, bacia intracratônica, com dimensões da ordem de 600.000 km² e espessuras de até 3.500 m (Figura 2.1). A Bacia do Parnaíba apresenta forma elipsoidal com diâmetros maior (NE-SW) e menor (NW-SE) de 1.000 e 800 km, respectivamente, e está posicionada sobre área de remobilização Brasileira. A área original ocupada pela Bacia do Parnaíba, durante sua evolução paleozóica, excedeu 0,7 milhão de km², tendo acumulado em seu depocentro 2.500 m de sedimentos detríticos (Almeida, 1969).

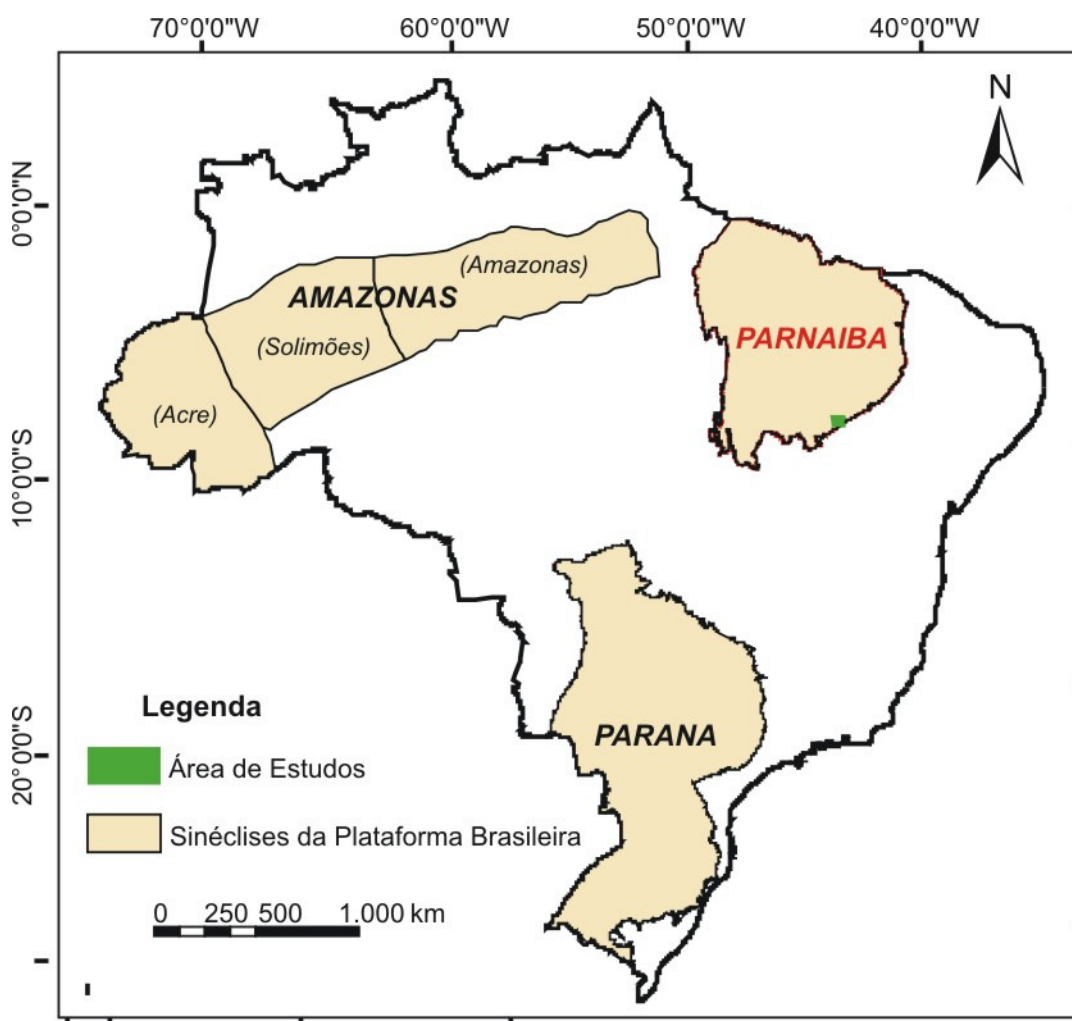


Figura 2.1: Mapa de localização das sinéclises da Plataforma Brasileira indicando a posição da área de estudos (modificado da CPRM, 2001 e Rossetti, 2003).

A subsidência da Bacia do Parnaíba iniciou-se no Siluriano Inicial ou ainda no Ordoviciano Final, após longa fase de erosão das rochas do embasamento da Plataforma Sul-Americana. As

diversas descontinuidades estruturais impressas no embasamento influenciaram a evolução tectono-sedimentar da região aonde a Bacia do Parnaíba veio a se desenvolver, cuja configuração herdou muito dos *trends* estruturais do embasamento (**Almeida et al., 1977**).

A evolução paleogeográfica, posição de depocentro e áreas fontes, os tratos geomórficos, as assinaturas gravimétricas e a geometria atual da Bacia do Parnaíba registram a marcante dependência desta em relação às estruturas brasileiras (Brito Neves, 1983).

Alguns trabalhos associaram a formação da Bacia do Parnaíba com o esfriamento da crosta no final do Ciclo Brasileiro. Cunha (1986) atribui ao resfriamento e à decompressão da litosfera no término do Ciclo Brasileiro (500-450 Ma), a causa da reativação das antigas zonas de cisalhamento pré-Brasilianas e Brasileanas. Com conseqüência, tensões cisalhantes, normais e transcorrentes passaram a atuar na região, originando fossas precursoras (riftes precursores) delimitadas por extensas falhas normais, profundamente instaladas ao longo destas zonas tectonicamente instáveis da crosta terrestre (Figura 2.2). Góes et al. (1993) relataram que o processo de lenta subsidência epirogenética foi desencadeado com o término da orogênese brasileira, conforme as condições térmicas originais da litosfera eram restabelecidas, e a conseqüente contração e adensamento da litosfera ocorriam. Para Góes e Feijó (1994), no final do Ciclo Brasileiro, os grábens e meio-grábens instalados ao longo das principais zonas de fraquezas crustais herdadas foram preenchidos simultaneamente por sedimentos imaturos. Encontrados em furos de sondagem, estes foram interpretados como pertencentes às denominadas formações Riachão (Neoproterozóico) e Mirador (Cambro-Ordoviciano), correspondendo às unidades encontradas entre a base da pilha de sedimentos da bacia e o embasamento.

A partir do Ordoviciano Final, com o término da influência tardi-brasileana, a subsidência ocorreu de forma mais lenta e gradual, unicamente em resposta ao resfriamento termal. **Zalán (inf. oral – 42º CBG)** descreveu o mecanismo de subsidência das sinéclises através de uma curva única e longa de subsidência exponencial pontuada por deflexões de alta frequência; ora negativas, resultando em sedimentação; ora positivas, desencadeando erosão.

Do Ordoviciano Final em diante, um grande sítio deposicional foi instalado sobre o Supercontinente Gondwana, na porção correspondente ao atual nordeste brasileiro, denominado por **Cunha (1986)** como Bacia do Parnaíba – Sekondi – Takoradi - Volta. Esta bacia sobrepôs um embasamento caracterizado pelo encontro de três grandes crátons (Amazônico, Congo-São Francisco e África Ocidental - São Luiz), através de diversas faixas móveis a eles adjacentes (Araguaia, Brasília, Rio Preto, Riacho do Pontal, Médio Coreau, Gurupi). Estas faixas provavelmente envolveram um possível núcleo cratônico subafiorante na porção central da bacia, sugerido por **Cordani et al. (1984)** e denominado por **Cunha (1986)** como Núcleo Cratônico Central do Maranhão.



Figura 2.2: Esboço do posicionamento geotectônico do início da sedimentação da Bacia do Parnaíba (Grupo Serra Grande) no Gondwana Ocidental durante o fim do Ciclo Pan-Africano/Brasiliano (desconsideradas as coberturas do Pré-Cambriano Final, modificado de Cunha, 1986).

II.2 - Estratigrafia da Bacia do Parnaíba

As unidades litoestratigráficas que constituem as sucessões sedimentares da Bacia do Parnaíba foram sistematizadas em colunas estratigráficas por diversos autores (*e.g.* Kegel, 1953; Mesner & Wooldridge, 1962 e 1964; Rodrigues, 1967; Aguiar, 1969 e 1971; Carozzi *et al.*, 1975; Lima & Leite, 1978; Quadros, 1982; Caputo & Lima, 1984; Góes *et al.*, 1990; Góes *et al.*, 1993).

Góes et al. (1993) caracterizam o preenchimento sedimentar da Bacia do Parnaíba como predominantemente siliciclástico, com camadas subordinadas de calcário, gipsita e sílex. Os autores demarcaram duas unidades litoestratigráficas, de idades triássica-jurássica e eocretácica, relacionadas aos eventos magmáticos responsáveis pela ocorrência de rochas ígneas básicas intrusivas e extrusivas dentre a pilha de sedimentos fanerozóicos. Os eventos magmáticos apresentaram idade variando entre 215 e 110 Ma.

Góes e Feijó (1994) sintetizaram a estratigrafia da bacia em quatro grupos: Serra Grande, Canindé, Balsas e Mearim. Estes grupos são sobrepostos pelas formações Grajaú, Codó, Itapecuru, Urucua e Areado (**Figuras 2.3 e 2.4**).

Góes e Feijó (1994) reconstituíram a evolução paleogeográfica a partir da subdivisão de cinco seqüências deposicionais de segunda ordem. As seqüências Siluriana e Devoniana seriam representativas de dois ciclos transgressivos-regressivos completos. A seqüência Carbonífera-Permiana também seria representativa de um ciclo transgressivo-regressivo, no entanto indicando a continentalização da bacia no Triássico. As seqüências Jurássica e Cretácica apresentariam sedimentação continental concomitante aos pulsos de magmatismo fissural atribuídos respectivamente às formações Mosquito e Sardinha, e associados à abertura do Oceano Atlântico Sul.

Desta forma, cada grupo, definido com base em atributos litoestratigráficos pode ser referido alternativamente como uma seqüência deposicional de segunda ordem, conforme a definição que **Sloss (1963)** utilizou para as bacias intracratônicas da América do Norte, e que **Soares et al. (1978)** empregou para as bacias intracratônicas brasileiras. Tal correspondência se torna possível, pois cada unidade litoestratigráfica, assim como cada seqüência deposicional, corresponde a um pacote de rochas com ampla distribuição, geneticamente relacionado a um ciclo tectônico limitado no topo e na base por discordâncias de caráter regional.

Conforme estabelecido por **Góes e Feijó (1994)**, o período de tempo no qual a maior parte da sedimentação ocorreu nomeia uma seqüência. Assim, as cinco seqüências deposicionais e suas unidades litoestratigráficas correspondentes são as seguintes:

- 1 - Seqüência Siluriana** - Grupo Serra Grande: é composto por arenitos, folhelhos, siltitos, conglomerados e raros diamictitos. Estas rochas ocorrem nas formações Ipu, Tianguá e Jaicós, que corresponde à primeira incursão marinha na bacia.
- 2 - Seqüência Devoniana** - Grupo Canindé: é composto por folhelhos, arenitos e siltitos, distribuídos nas formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti, que corresponde à segunda incursão marinha na bacia.
- 3 - Seqüência Carbonífera-Permiana** - Grupo Balsas: é composto por arenitos, siltitos, folhelhos, calcáreos, anidritas, silixitos e restos de madeira petrificada (*Psaronius*), distribuídos nas formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba, que corresponde a deposição em mares com circulação restrita.

Geocronologia		LITOESTRATIGRAFIA		Sequências deposicionais	Evolução Tectônica	Formações Lito-estratigráficas	Ambiente Depositional
Período	Época	NW	SE				
Terciário							Flúvio-lacustre
Cretáceo				K	Rifte	Itapecuru	Flúvio-lacustre
						Grajaú/Codó	Marinho restrito
Jurássico				J	Sinéclise	Sardinha	Vulcanismo
						Corda	Flúvio-lacustre desértico
						Pastos Bons	Flúvio-lacustre desértico
Triássico				Orogenia Gondwanide		Mosquito	Vulcanismo
Permiano				C - Tr	Sinéclise	Sambaíba	Desértico
						Motuca	Desértico/lacustre
						Pedra de Fogo	Nerítico Litorâneo Tempestades Sabkha
						Piauí	Litorâneo Desértico
Carbonífero	Pensilvaniano			Orogenia Eoherciniana			
	Mississippiano						
Devoniano				D - C	Sinéclise	Poti	Flúvio-deltaico marés tempestades
						Longá	Plat.tempestades
						Cabeças	Flúvio-deltaico marés
						Pimenteiras	Plat. Tempestades
Siluriano				Orogenia Caledoniana		Itaim	Delta/marés tempestades
Ordoviciano				OS	Sinéclise	Jaicós	Fluvial entrelaçado
						Tianguá	Nerítico
						Ipú	Fluvial Flúvio-glacial
Cambriano				CO	Rifte	Mirador	Fluvial aluvial/lacustre?
Proterozóico				EC	Rifte	Riachão	Flúvio-aluvial
Arqueano							

Figura 2.3: Estratigrafia da Bacia do Parnaíba (modificado de Góes & Feijó, 1994).

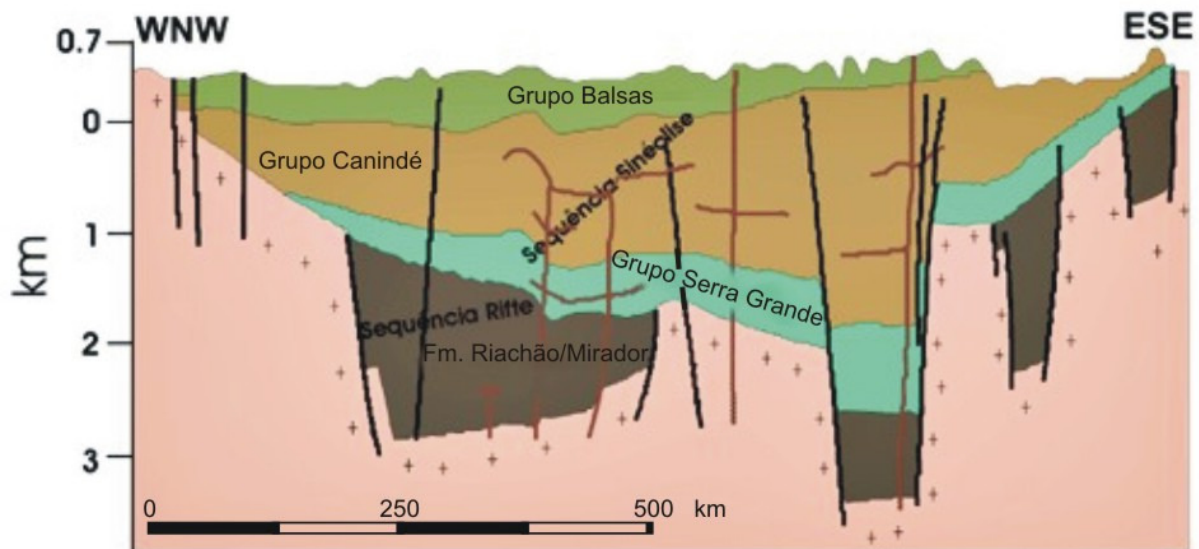


Figura 2.4: Perfil esquemático da Bacia do Parnaíba (Góes & Feijó, 1994).

4 - Seqüência Jurássica - Grupo Mearim: é composto por arenitos, siltitos e folhelhos das formações Pastos Bons e Corda, depositados em ambiente desértico, predominantemente flúvio-lacustre com retrabalhamento eólico. Atividade vulcânica atribuída à Formação Mosquito.

5 - Seqüência Cretácica: arenitos, argilitos, folhelhos, carbonatos e anidritas correspondentes às Fm. Itapecuru, Fm. Codó e Fm. Grajaú, depositados em ambiente epicontinental com eventuais incursões marinhas restritas à base da seqüência. Atividade vulcânica atribuída à Formação Sardinha. As formações Areado (siltitos e folhelhos) e Urucua são de pouca expressão e restritas ao sul da bacia.

Os depósitos de cobertura na região ocupada pela Bacia do Parnaíba foram designados por **Góes e Feijó (1994)** como uma sexta seqüência (Seqüência Terciária), correspondente às formações Nova Iorque (folhelhos e siltitos com restos de plantas e peixes) e Pirabas (margas e calcários).

II.3 - Estratigrafia da área de estudos na borda Sudeste da Bacia do Parnaíba

O Grupo Serra Grande aflora principalmente nas bordas da Bacia do Parnaíba. Ele apresenta-se de modo contínuo ao longo de praticamente toda a borda leste da Bacia do Parnaíba, se estendendo desde o nordeste do Ceará até a divisa do noroeste da Bahia com o sudeste do Piauí. Esta unidade litoestratigráfica condiciona um típico relevo cuestiforme, com a escarpa voltada para leste e o reverso para oeste, em direção ao centro da bacia (**Brito, 1979**).

Diversos trabalhos descreveram a geologia da parte sudeste da Bacia do Parnaíba, em especial a unidade estratigráfica que ocorre na borda da Bacia denominada de Serra Grande. Entre eles destacam-se os trabalhos de **Albuquerque & Dequech (1946)**, **Kegel (1953)**, **Brito & Santos (1964)**, **Aguiar (1969)**, **Mabessone (1971)** e **Nunes et al. (1973a)**. **Nunes et al. (1973a)** posiciona o contato inferior da Formação Serra Grande através de nítida discordância angular sobre as rochas metamórficas do Pré-Cambriano e do Grupo Jaibas (correlato às formações Riachão e Mirador), e o

contato superior desta com os folhelhos da Formação Pimenteira de maneira concordante, em certos lugares marcados por uma superfície ferruginosa endurecida.

Os trabalhos mais recentes, sobre os quais se baseou o presente estudo, foram feitos por **Caputo & Lima (1984)** e **Góes e Feijó (1994)**. **Caputo & Lima (1984)** classificaram a Formação Serra Grande, definida nos trabalhos acima citados, como grupo, cujas unidades litoestratigráficas são as formações Ipú, Tianguá e Jaicós. Os autores atribuem idade Ordoviciano-Siluriana ao Grupo Serra Grande devido às evidências de glaciação nos sedimentos da Fm. Ipú, os quais são correlacionados com unidades de posição crono-estratigráfica bem definida em outras bacias (Formação Mulungu - Bacia Sergipe-Alagoas; Formação Nhamundá - Bacia do Amazonas; Grupo Tichit - Bacia Taoudeni; formações Asenkaw e Ajua - Acra e Gana, respectivamente; e Série N'khom do Gabão). De acordo com **Caputo & Lima (1984)** as unidades do Grupo Serra Grande apresentam as características descritas a seguir:

Formação Ipú: composta por arenitos, conglomerados, arenitos conglomeráticos e diamictitos. Estes autores sugeriram para esta unidade e suas equivalentes, desde a costa do nordeste do Brasil até o interior da Bacia do Parnaíba, deposição em leques glaciais e periglaciais em toda a área dos afloramentos atuais, deposição em leques deltaicos e frente de leque deltaico no interior da bacia, e marinho raso nas partes distais da bacia.

Formação Tianguá: caracterizada por folhelhos, siltitos e arenitos finos, e posicionada concordantemente sobre a Fm. Ipú e sob a Fm. Jaicós. Esta unidade teria deposição em ambiente marinho raso, durante a fase de máxima extensão da transgressão glacioeustática mundial que se seguiu ao degelo no norte da África.

Formação Jaicós: composta por arenitos médios e grossos a conglomeráticos, situada concordantemente sobre a Fm. Tianguá e discordantemente sob as formações Itaim (eodevoniense) ou Urucuia (cretácica). Sua deposição seria em ambiente de leques aluviais e deltaicos.

O Grupo Serra Grande foi detalhado por **Metelo (1999)**. Os depósitos siliciclásticos expostos nas dependências do Parque Nacional da Capivara (São Raimundo Nonato - PI), distante cerca de 100 km do Parque Nacional da Serra das Confusões (Caracol - PI) foram descritos. Esta autora classificou como aspecto estratigráfico mais marcante identificado uma discordância angular separando duas unidades, compostas predominantemente por arenitos e conglomerados. A autora propôs que tal discordância representaria o limite entre os grupos Serra Grande e Canindé, sendo a unidade inferior correspondente ao à Formação Ipu, e a superior à Formação Itaim (base do Grupo Canindé). Esta observação sugeriria que as unidades superiores do Grupo Serra Grande não aflorariam nesta região da bacia.

Metelo (1999) descreveu a Formação Ipú como um pacote de arenitos sobrepostos por um pacote de conglomerados, com espessura estimada em, no mínimo, 80 m. Os arenitos seriam depositados em canais fluviais entrelaçados, efêmeros, rasos, de baixa sinuosidade e pouco definidos, possibilitando a formação de barras arenosas, com a ocorrência de eventos torrenciais responsáveis

pela formação de barras de cascalho. Ao pacote conglomerático atribui-se deposição em canais fluviais entrelaçados, rasos, de baixa sinuosidade. A este sistema deposicional podem estar associados leques aluviais, indicativos de atividade tectônica sin-sedimentar.

No intervalo conglomerático, ocorrem discordâncias angulares, as quais, juntamente com a granulometria grossa, persistência faciológica e a espessura relativamente espessa, favoreceriam a interpretação da influência de certa atividade tectônica durante sua sedimentação. Neste caso, ela sugeriu a existência de um alto estrutural que controla a sedimentação da Formação Ipú, cujas paleocorrentes no sentido sul, indicariam a continuidade da bacia nesta direção. O provável alto estrutural parece não afetar a Formação Itaim, cujo sentido de paleocorrentes aponta para o interior da bacia (sentido WNW).

A determinação da unidade litoestratigráfica que aflora na região estudada da Borda Sudeste da Bacia do Parnaíba ainda é controversa, devido à falta da observação clara de marcadores litoestratigráficos e à insuficiência no estudo sobre a distribuição espacial das associações de litofácies.

Segundo levantamento geológico elaborado para o Plano de Manejo do Parque Nacional da Serra das Confusões (**Gonçalves, 2003**), os conglomerados grossos do Grupo Serra Grande, com evidências de transporte glacial, afloram com espessura menor que 30 m, limitados na base pelo embasamento cristalino e no topo com o Grupo Canindé. Neste caso, a ocorrência do Grupo Serra Grande estaria restrita à borda da bacia, e o Grupo Canindé, portanto, seria a unidade predominante na área de estudos.

De modo análogo, o mapeamento da **CPRM (2001)** identificou o Grupo Canindé como a unidade litoestratigráfica predominante na área de estudos; restringido a área de ocorrência do Grupo Serra Grande a uma faixa de poucos metros a noroeste do contato com o embasamento gnáissico pertencente à Província São Francisco (**Figura 2.5**).

II.4 - Arcabouço estrutural da Bacia do Parnaíba

Loczy & Ladeira (1976) interpretaram a Bacia do Parnaíba como um golfo (*embayment*) intracratônico suavemente deformado e assimétrico segundo a direção NW. Os estratos paleozóicos na parte ocidental da bacia apresentam mergulhos (4° - 5°) para o centro da bacia, maiores que aqueles observados na borda oriental (2° - 4°). Segundo estes autores, as falhas apresentam direções predominantes ENE e NNW, às quais se paralelizam vários sistemas de juntas. Falhas que limitam *grabens* e *horsts* apresentam rejeitos de até 100 e 200 m.

Fortes (1978) apontou as falhas e os lineamentos como os principais elementos estruturais da Bacia do Parnaíba, os quais interferiram na definição de sua forma, estrutura e composição. Segundo o autor, a bacia se assemelha em forma a um hexágono, cujos limites são relacionados a sistemas de falhas e flexuras de enormes extensões.

Cunha (1986), após analisar os mapas de isópacas das unidades litoestratigráficas paleozóicas da bacia, concluiu que do Paleozóico Inicial até o Pensilvaniano o preenchimento da bacia esteve condicionado a dois eixos deposicionais ortogonalmente dispostos e orientados para NE-SW e NW-SE, coincidindo aproximadamente às direções dos lineamentos Transbrasiliano e Picos-Santa-Inês. O primeiro acumulou maior subsidência e com isso desenvolveu as maiores espessuras sedimentares da bacia; o segundo, é menos expressivo, com acúmulo maior de sedimentos durante o Devoniano Inicial (Formação Pimenteiras).

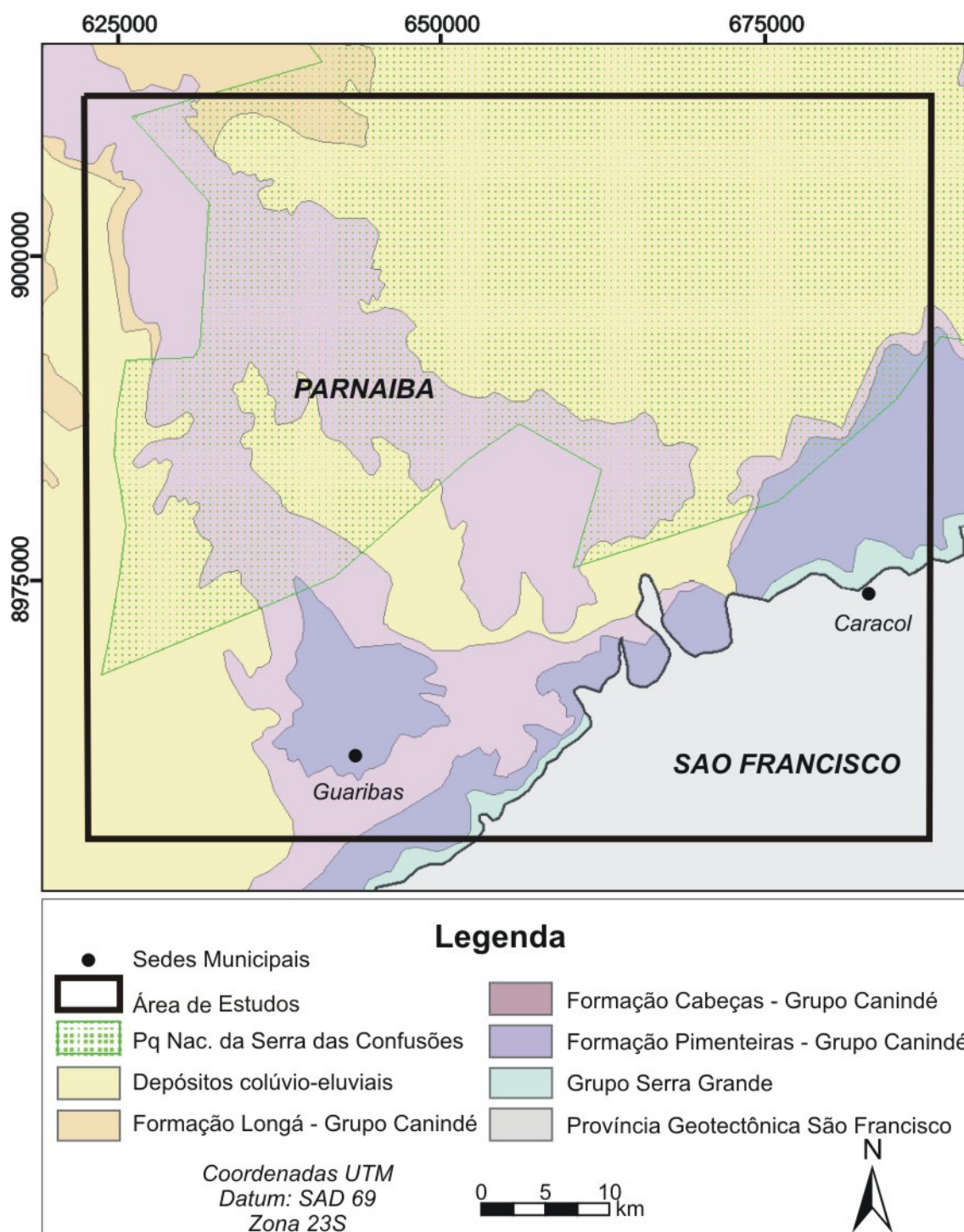


Figura 2.5: Mapa geológico da área de estudos, na porção sudeste da Bacia do Parnaíba (CPRM, 2001).

Góes et al. (1993) dividiram a Bacia do Parnaíba em três compartimentos estruturais distintos (Homoclinal Norte, Homoclinal Sudoeste e Bloco Sudeste), com base na arquitetura concêntrica das camadas e menor grau no estilo estrutural e na escala de deformação. Seus limites correspondem às principais feições estruturais da bacia, como a Zona de Falha Transbrasiliana e a calha atual da bacia, desenvolvida ao longo de zonas de fraqueza que apresentam correlação aos lineamentos Picos – Santa Inês e Marajó – Parnaíba.

Dois sistemas de lineamentos têm significado tectônico importante na evolução da Bacia do Parnaíba: lineamentos Transbrasiliano e Picos-Santa Inês. Ambos são descritos em detalhe a seguir.

II.4.1 - O Lineamento Transbrasiliano

Schobbenhaus et al. (1975) definiram como Lineamento Transbrasiliano uma faixa cataclasada de direção NE-SW com cerca de 2700 km de extensão, que atravessa o Brasil do Ceará ao Mato Grosso do Sul, adentrando o Paraguai e a Argentina. Esta megaestrutura foi posteriormente descrita por **Cordani et al. (1984)**, que atentaram para a presença de uma faixa NE-SW com alto grau de estruturação na porção do embasamento coberta pelos depósitos da Bacia do Parnaíba. Estes autores associaram esta faixa estruturada ao Lineamento Transbrasiliano. Paralelamente, **Marini et al. (1984)** associaram às estruturas relacionadas ao Lineamento Transbrasiliano as reativações, em várias épocas e por tensões diferentes, de falhas inicialmente instaladas no Arqueano. A largura do Lineamento Transbrasiliano foi estimada por **Cunha (1986)** entre 75-100 km, tomando como base as áreas de afloramento daquela estrutura.

Góes et al. (1993) identificaram o Lineamento Transbrasiliano, em trabalhos de campo, imagens de satélite, fotografias aéreas e em mapa magnético de campo total, como lineamentos de direção NE-SW cortando a porção leste-sul da Bacia do Parnaíba. Tais estruturas foram interpretadas como extensas faixas de cisalhamento de caráter policíclico. Eles modelaram *grabens* alongados, com espessuras sedimentares superiores a 4.000 m, na área de influência da assinatura magnética correspondente à faixa cataclasada em questão.

Milani & Zalán (1999) classificam o Lineamento Transbrasiliano como a mais importante zona de falha brasileira de escala continental. De acordo com estes autores, nos domínios da Bacia do Parnaíba a zona de falha é expressa como uma larga faixa em superfície e subsuperfície, que controlou antigos aulacógenos e depocentros paleozóicos. Fora dos limites deste lineamento, a deformação na bacia não é intensa, representada em sua maioria por tectônica de blocos falhados de modo sutil (*fault-block tectonics*).

O Lineamento Transbrasiliano condicionou a deposição das primeiras coberturas sedimentares, ainda sob a influência dos pulsos finais da atividade brasiliana. Estas coberturas foram instaladas em *grabens* e *hemi-grabens* alinhados segundo zonas de fraquezas subparalelas à orientação preferencial deste lineamento, formando riftes precursores à subsidência da Bacia Gondwânica

(Parnaíba – Sekondi – Takoradi – Volta); estes se estruturam coincidente e concordantemente com o Lineamento Transbrasiliano, no Brasil, e o Lineamento Benin-Hoggar, na África, cujos depósitos afloram e subafloram em suas abrangências (Cunha, 1986) (Figura 2.2).

II.4.2 -O Lineamento Picos – Santa Inês

A Bacia do Parnaíba apresenta também uma faixa caracterizada e composta por uma série de alinhamentos de direção NW-SE, denominada de Lineamento Picos-Santa Inês. Esta faixa tem 160 km de extensão e rejeito vertical que varia entre 2000 e 300 m (Nunes *et al.*, 1973 b). O Lineamento Picos – Santa Inês corresponde a uma extensa faixa cataclásada, que corta na direção NW-SE rochas da Bacia do Parnaíba, transversalmente ao Lineamento Transbrasiliano. Esta faixa estaria relacionada à zona de cisalhamento instalada no Proterozóico Final, a qual, na região do rio Gurupi, separa domínios geológicos e geocronológicos diferentes (Hasui *et al.*, 1984b). Tal feição linear posteriormente sofreu influência da reativação Wealdeniana sugerida por Almeida (1967) e renomeada como evento Sul-Atlântico por Schobbenhaus & Campos (1984).

Na zona de abrangência do Lineamento Picos–Santa Inês alternam-se altos e baixos gravimétricos lineares, dispostos paralelamente, que definem um padrão gravimétrico diferente daquele observado no embasamento noroeste da bacia. Este padrão é similar àqueles encontrados nas bacias do Baixo Amazonas e do Marajó, registrando fraturas profundas originadas por esforços tensionais atuantes durante o Proterozóico Final (Almeida *et al.*, 1981).

O Lineamento Picos – Santa Inês influenciou o desenvolvimento da bacia, condicionando um eixo deposicional atuante a partir do Devoniano Inferior e favorecendo a ligação da bacia com o mar aberto (Cunha, 1986).

II.5 - Contexto estrutural da borda Sudeste da Bacia do Parnaíba

A área de estudos situa-se a leste do Lineamento Transbrasiliano e Senador Pompeu, estando mais próxima do último, a sudoeste do Lineamento Pernambuco (Figura 2.6). Corresponde à escarpa da Serra das Confusões, onde afloram as unidades basais da Bacia do Parnaíba.

Góes *et al.* (1993), a partir de dados aerogeofísicos, identificaram grábens precursores da Bacia do Parnaíba sotopostos por cobertura sedimentar. Esta região corresponde a um compartimento estrutural designado pelos autores como Bloco Sudeste, limitado a noroeste pela Zona de Falha Transbrasiliana e contendo a partir desta, para sudeste, os lineamentos magnéticos de Palmeiras – São Julião, Valença – Cococi, Manoel Emídio – Cococi, entre outros.

Oliveira (1998) integrou aos levantamentos gravimétricos por ele executados, dados aeromagnéticos do Projeto Aerogeofísico Borda Sul da Bacia do Parnaíba (PROSPEC S.A./DNPM/CPRM – PROSPEC, 1978) e dados gravimétricos do DNPM-CPRM, CPRM-

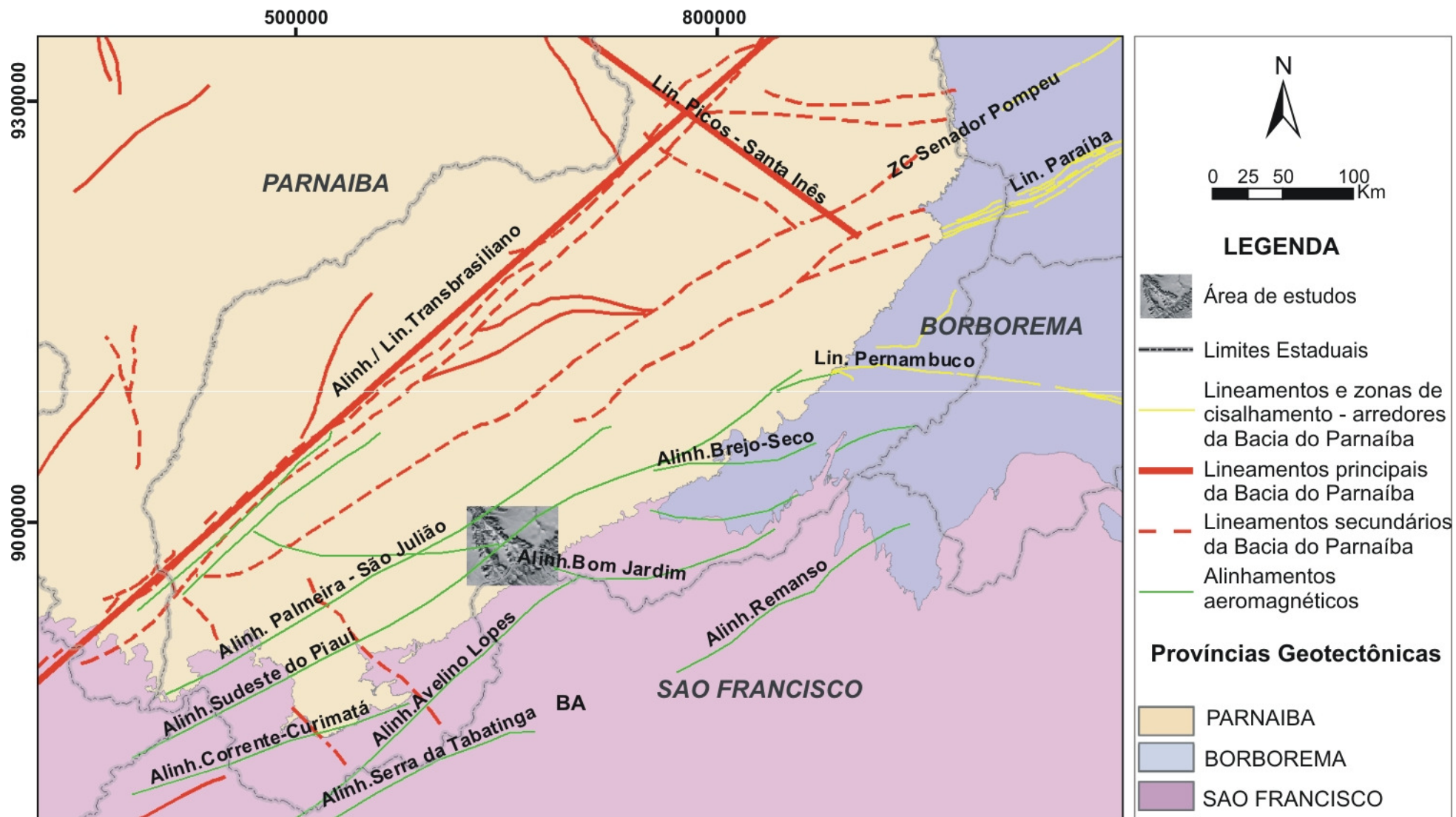


Figura 2.6: Mapa regional de lineamentos e alinhamentos aerogeofísicos (modificado de Oliveira, 1998 e Góes & Feijó, 1993).

Observatório Nacional (1987) e **Silva Jr. (1997)**, para compreender a estrutura profunda e a articulação tectônica do embasamento da área abrangida pelo estudo proposto. A integração dos dados permitiu a visualização em profundidade da estruturação tridimensional simplificada da porção sudeste do Piauí, por intermédio de mapas regionais. **Oliveira (1998)** identificou os prolongamentos das estruturas pré-cambrianas sob rochas fanerozóicas da Bacia do Parnaíba.

A interpretação e correlação geológica discriminaram falhas e blocos crustais com características litológicas e geofísicas distintas, e caracterizaram no embasamento da bacia um grande volume de rochas magnéticas e grábens cambrianos, alongados ou sigmoidais, controlados por zonas de cisalhamentos correlacionadas com alinhamentos aeromagnéticos na direção NE-SW (**Oliveira, 1998**). Ele identificou ainda três domínios geofísicos-geotectônicos capazes de conciliar os dados geofísicos do estudo com um modelo geológico dinâmico, compatível com as estruturas e rochas da região. Os limites destes domínios foram definidos basicamente pelos alinhamentos e unidades aeromagnéticas e gravimétricas: (1) Domínio do Cráton São Francisco (extremo quadrante sudeste da área); (2) Domínio Marginal (porção intermediária entre 1 e 3) e (3) Domínio Interno (extremo noroeste) (**Figura 2.7**).

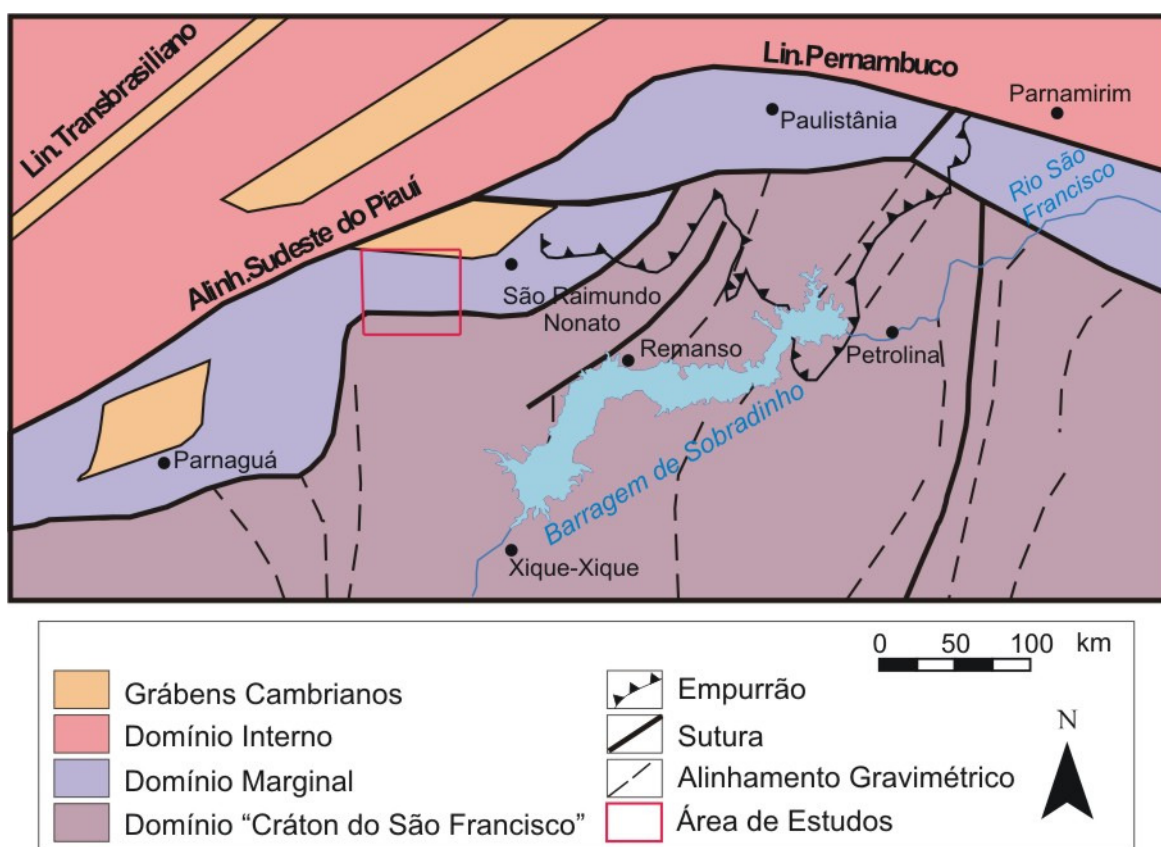


Figura 2.7: Domínios Geofísicos-Geotectônicos da borda SE Bacia do Parnaíba, interpretados através da correlação entre dados geológicos, aeromagnéticos e gravimétricos (modificado de Oliveira, 1998).

Dentre os três domínios identificados por **Oliveira (1998)**, o Domínio Interno é o que desperta maior interesse para o atual trabalho, uma vez que aquele engloba o limite da bacia do Parnaíba com o embasamento (Província Borborema a norte, e Faixa Riacho do Pontal a sul). Na porção encoberta por rochas fanerozóicas, este domínio reflete o embasamento da bacia, onde se constatou a presença de grábens cambrianos alongados na direção NE-SW. Este seria o caso dos grábens de Jaibaras, Cococi e Martinópolis, os quais podem ser interpretados como registros dos primeiros mecanismos de subsidência atuantes na região.

Oliveira (1998) definiu também alinhamentos como assinaturas aeromagnéticas lineares, relacionadas a estruturas profundas e possivelmente associados com a delimitação de blocos crustais e alinhamentos relacionados com falhas, diques e outras estruturas rasas ou aflorantes (**Figura 2.8**).

Embora diversos alinhamentos tenham sido observados por **Oliveira (1998)**, dois deles, com direção NE-SW, merecem destaque no presente trabalho: Alinhamento do Sudeste do Piauí e o Alinhamento Transbrasiliano. O primeiro ocorre na área de estudos, e o segundo correspondente à extremidade nordeste do Lineamento Transbrasiliano.

O Alinhamento do Sudeste do Piauí possui azimute 70°, paralelo à borda erosiva da bacia; as estruturas e litologias a ele associadas encontram-se totalmente encobertas pelos sedimentos da Bacia do Parnaíba. Ao longo do *trend* NE-SW daquele alinhamento, encontram-se estruturas de extensão com características de evolução *pull-apart*; tal panorama favorece a correlação do alinhamento com uma zona de cisalhamento, pois além de dispor-se paralelamente ao Lineamento Transbrasiliano, este trunca e inflete sinistralmente o prolongamento do alinhamento aeromegnético correlacionado ao o Lineamento Pernambuco (Alinhamento Pernambuco) (**Oliveira, 1998**).

A noroeste da cidade de São Raimundo Nonato, numa anomalia positiva controlada pelos alinhamentos Sudeste do Piauí (NE-SW) e Brejo Seco (E-W), um poço de 700 m perfurado pela CPRM atravessa arenitos grosseiros e esbranquiçados, possíveis representantes da seção cambriana. Através de levantamentos magnetotelúricos realizados por **Metelo (1999)** foi identificada uma estrutura em forma de gráben, orientada segundo a direção NE-SW, próxima à borda da bacia, a qual possivelmente afetou as rochas do Gr. Serra Grande, sendo responsável pelo basculamento dos estratos deste grupo para NW. **Metelo (1999)** observou ainda falhas sub-verticais com azimute 340°, afetando tanto o embasamento, quanto os depósitos sedimentares.

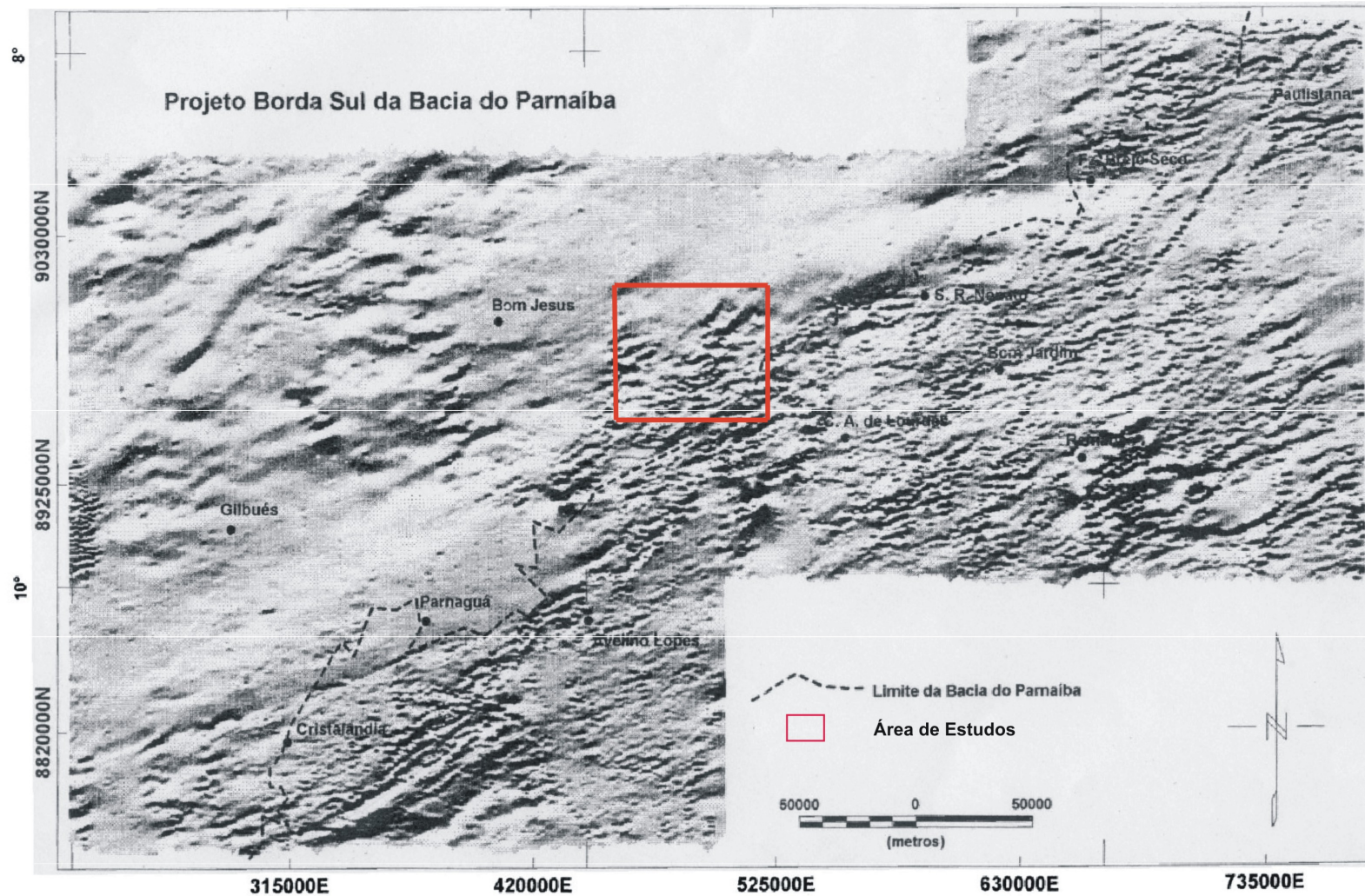


Figura 2.8: Mapa aeromagnético do campo total sombreado em tons de cinza. Fonte luminosa a 300° Az, com inclinação de 45°. O mapa enfatiza alinhamentos aeromagnéticos de direção NE-SW, relacionados com falhas, diques e outras estruturas rasas ou aflorantes. Projeção Equatorial Mercator, Meridiano Central 39°.de alinhamentos (Oliveira, 1998).

III. ASPECTOS DA GEOLOGIA LOCAL

III. ASPECTOS DA GEOLOGIA LOCAL

O presente capítulo tem por objetivo fornecer um panorama geral da geologia local com destaque para os aspectos sedimentares e estratigráficos observados na área de estudos. Embora o tema desta dissertação esteja diretamente relacionado ao estudo dos lineamentos e suas associações com a deformação rúptil atuante na borda sudeste da Bacia do Parnaíba, este capítulo visa contribuir com novos dados estratigráficos para esta área até o momento pouco estudada. Adicionalmente, a identificação de estruturas de liquefação motivou em especial a inserção deste capítulo na presente dissertação, haja vista a relevância de tais estruturas para a compreensão da evolução geodinâmica das unidades basais da Bacia do Parnaíba. De modo geral, as observações feitas apontam à necessidade de estudos mais aprofundados para a definição precisa quanto à estratigrafia local desta região.

Na escapa norte do *Morro do Cruzeiro* (a sul da sede municipal de Caracol – **Figura 3.1**) aflora o contato do embasamento com a Bacia do Parnaíba. O depósito correspondente à base da bacia caracteriza-se por intercalações de fácies de arenito conglomerático a conglomerado grosso, polimítico e mal-selecionado, em contato com gnaisses do embasamento. As estruturas primárias variam entre porções maciças a organizadas por estratificações cruzadas acanaladas, sustentadas por arcabouço composto predominantemente por rochas do embasamento. Os fragmentos possuem até 15 cm ao longo de seu eixo longitudinal. Comumente se observa presença de seixos oblatos, com superfícies planas e polidas (**Figura 3.2**).

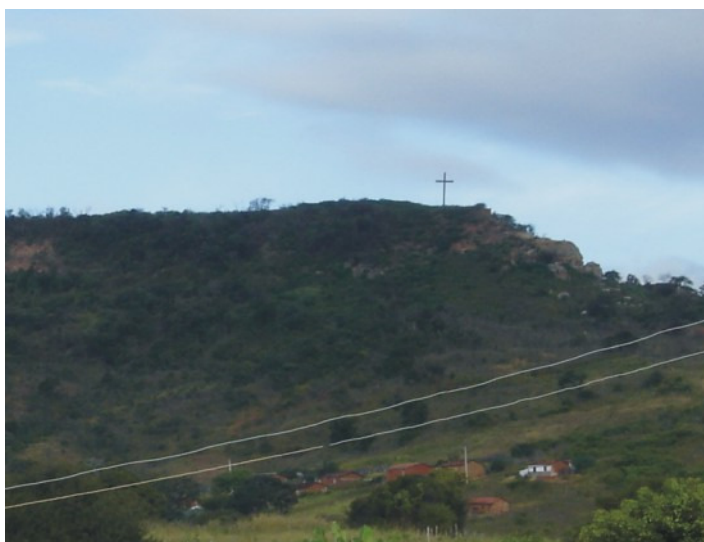


Figura 3.1: Morro do Cruzeiro, situado na porção sul da sede municipal de Caracol. Neste morro aflora o contato dos gnaisses do embasamento da província geotectônica do São Francisco com a Bacia do Parnaíba.

O pacote sedimentar descrito acima, de granulometria grossa e feições de transporte glacial (*eg.*: seixos com forma de ferro de engomar), aflora por no máximo 40 m, sobre os quais passam a ocorrer de forma concordante, pelos próximos 60 m, intercalações de fácies síltico-arenosas finamente laminadas, com folhelhos arroxeados. Tais depósitos de granulometria fina, presentes próximos à

borda da bacia, são limitados no topo por brecha ferruginosa em camada com espessura inferior a 3,0 m (**Figura 3.3a-b**).



Figura 3.2: Seixos oblatos, com superfícies planas e polidas, inseridos na fácies basal de arenito conglomerático a conglomerado grosso, polimítico e mal-selecionado.

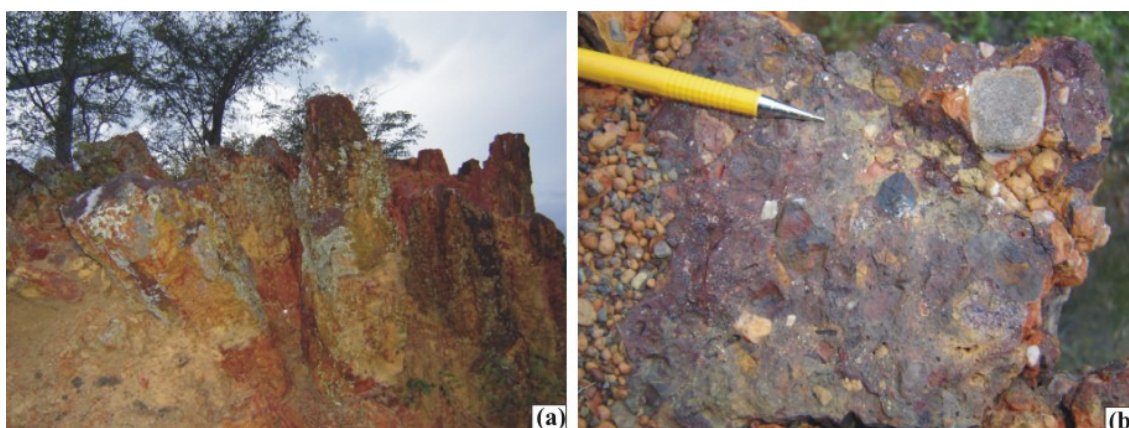


Figura 3.3: Brecha ferruginosa presente em uma camada de até 3,0 m de espessura, no topo do Morro do Cruzeiro: (a) aspecto geral do afloramento; (b) detalhe da brecha onde o maior seixo visível é um arenito.

As associações de fácies descritas acima se encontram ilustradas e representadas através de uma coluna estratigráfica (**Figura 3.4a**). Atenção especial foi dada para a associação de fácies siltico-arenosa (**Figura 3.4b**) que ocorre entre a associação de fácies conglomerática basal (**Figura 3.4c**) e a brecha ferruginosa presente no topo do Morro do Cruzeiro (**Figura 3.4d**). A associação de fácies siltico-arenosa em questão aparenta corresponder àquela que aflora entre as fácies argilo-siltosas situadas nos fundos dos vales da área de estudos (**Figura 3.4e**) e as fácies areno-conglomeráticas, presentes nas porções superiores das escarpas da Serra das Confusões e demais estações de coleta selecionadas para aquisição de dados (**Figura 3.4f**).

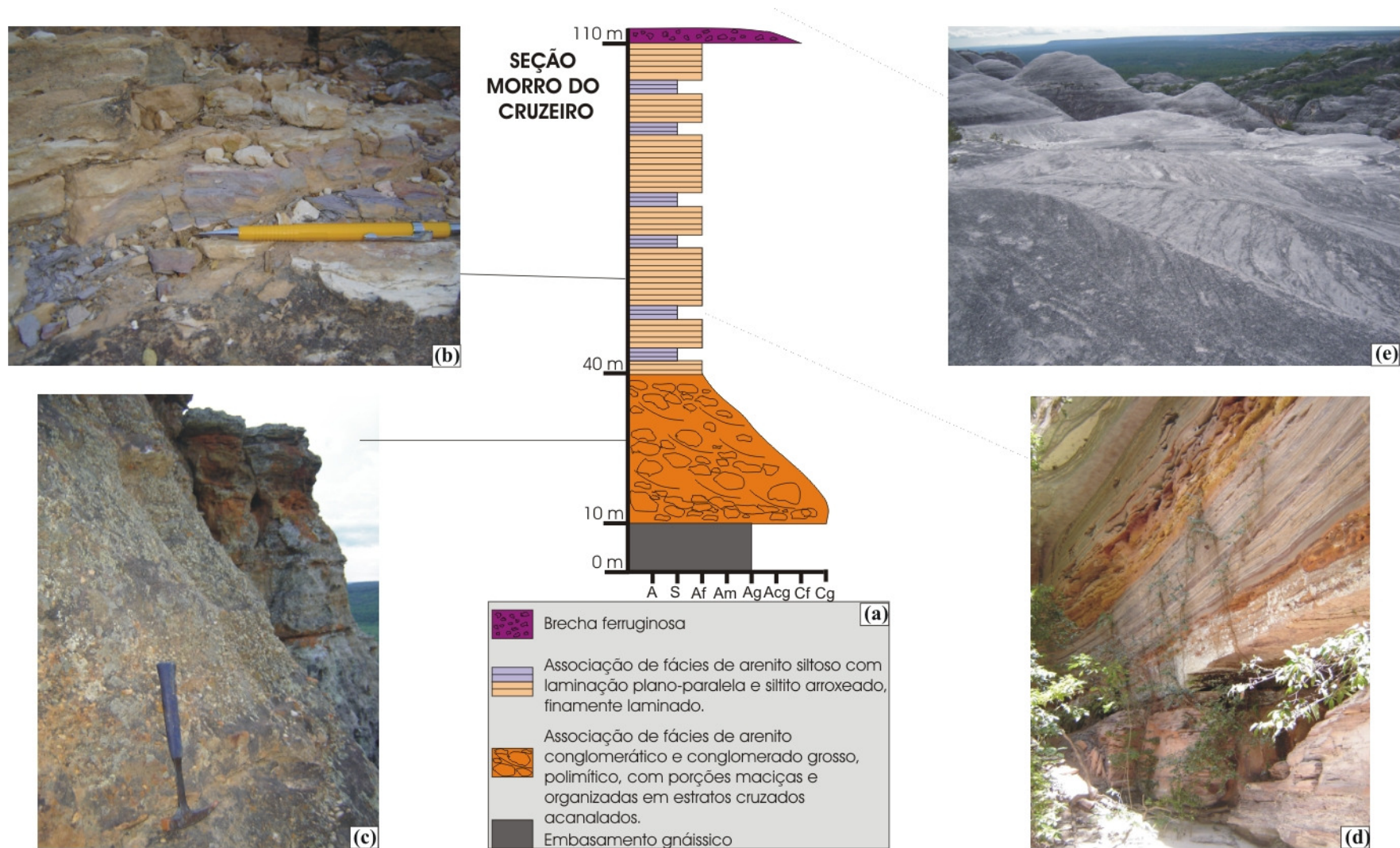


Figura 3.4 a-e: Porção de borda da bacia: (a) seção estratigráfica de detalhe do Morro do Cruzeiro; (b) fácies siltico-arenosas finamente laminadas, com folhelhos arroxeados; (c) fácies de arenito conglomerático a conglomerado grosso, polimítico e mal-selecionado; Porção à NW da borda da bacia: (d) fácies argilo-siltosas situadas nos fundos dos vales da área de estudos; (e) fácies areno-conglomeráticas presentes nas porções superiores das escarpas da Serra das Confusões e das demais estações de coleta de dados.

Nas porções mais interiores da bacia, cerca de 20 km a noroeste do Morro do Cruzeiro, foram encontrados icnofósseis (**Figuras 3.5a,b,c**) e bioturbações (**Figura 3.5d,e,f**). Estes estavam inseridos em meio às associações de fácies argilo-siltico-arenosas, localizadas em níveis estratigráficos inferiores aos dos arenitos conglomeráticos a conglomerados, do topo da Serra das Confusões.

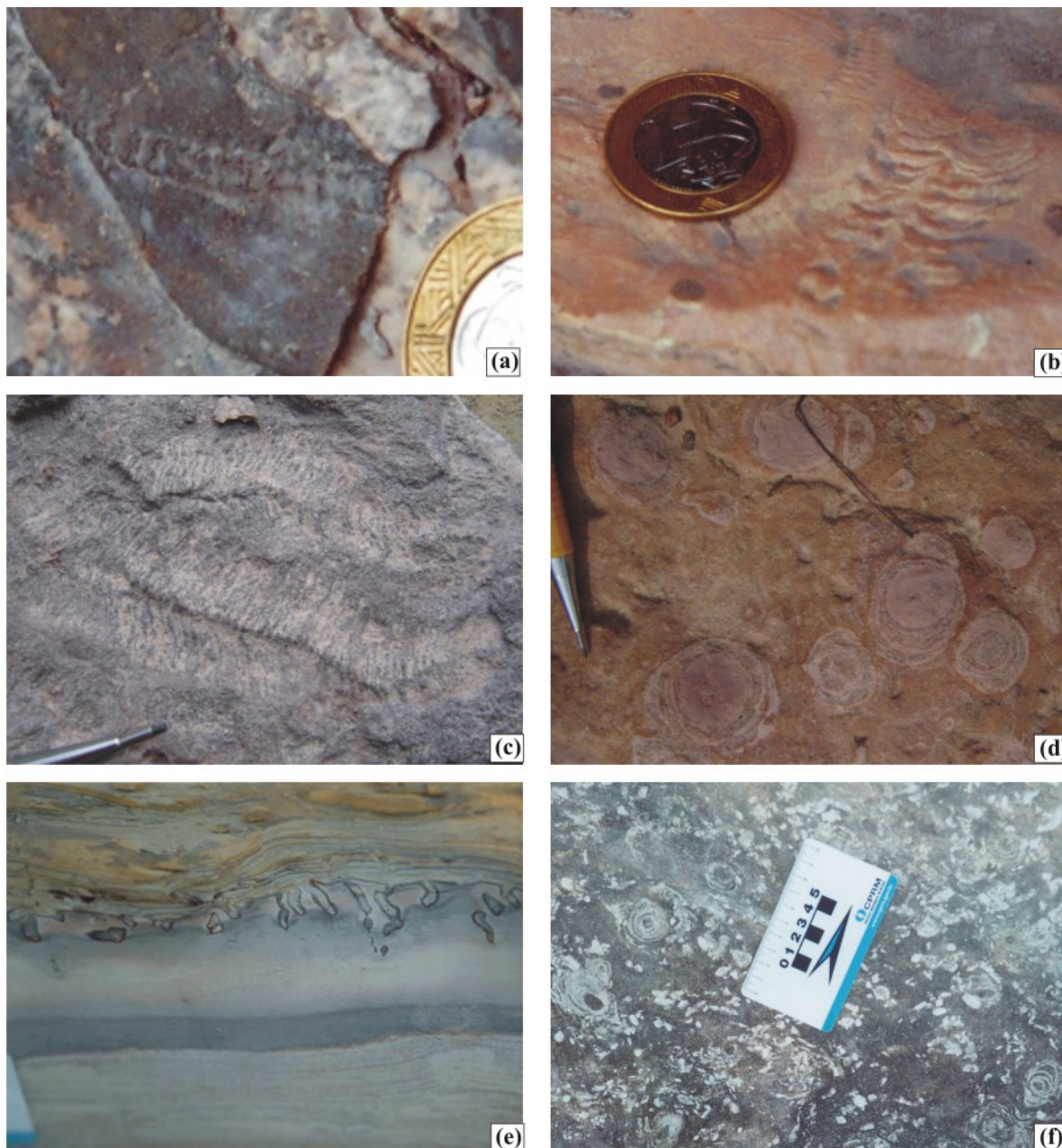


Figura 3.5 a-f: Associação de fácies argilo-siltico-arenosa sotoposta à associação de fácies areno-conglomeráticas do topo do empilhamento: (a-b-c) icnofósseis - provável icnofáceis *Cruziana*; (d-e-f) bioturbações - *Skólitos*.

Os depósitos de topo das porções mais internas da bacia são caracterizados por intercalações de fácies de arenito médio e arenito conglomerático a conglomerados finos, com estratificação cruzada acanalada e fragmentos em média de 3 a 4 cm de eixos longitudinais. Associada a tal depósito ocorre uma fácies sedimentar muito peculiar, caracterizada por arenito conglomerático grosso, mal-

selecionado com intraclastos de siltito (**Figura 3.6a**) e arenito conglomerático estratificado cruzadamente, atingindo dimensões de matacão (**Figura 3.6b**). Esta fácies ocorre associada a níveis arenosos com estruturas de liquefação (**Figuras 3.7a-c e 3.8a-h**).

Estruturas de liquefação são feições geradas por terremotos em sedimentos não-consolidados. A gênese de tais depósitos é controlada pela combinação das características dos sedimentos afetados pelo(s) sismo(s), da atividade sísmica e da profundidade da coluna d'água (**Obermeier, 1996a,b**).

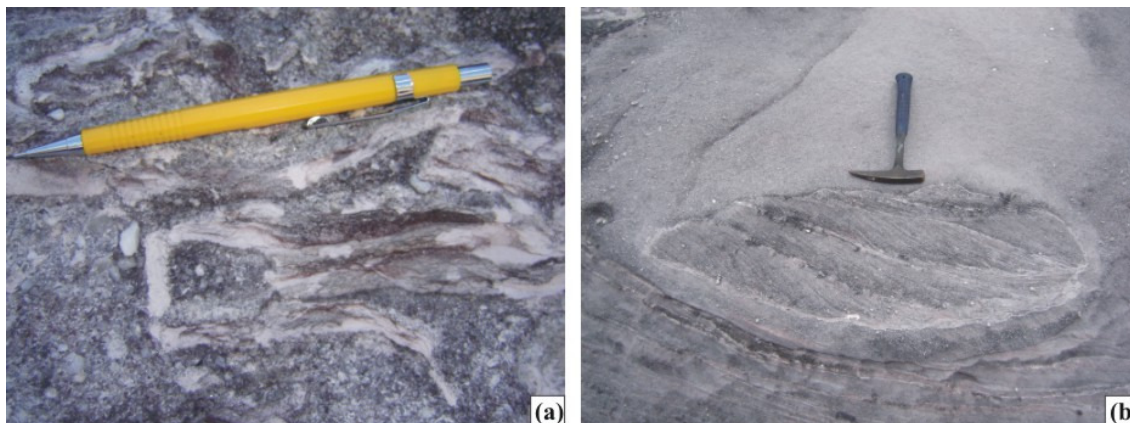


Figura 3.6: Porção à NW da borda da bacia: fácies de arenito conglomerático grosso, mal-selecionado, com intraclastos de: (a) siltito e (b) arenito conglomerático estratificado cruzadamente, atingindo dimensões de matacão.

Os condicionantes sísmicos na origem de liquefação referem-se à intensidade sísmica, magnitude, distância entre o depósito susceptível à liquefação e a fonte do terremoto, atenuação sísmica, distância do hipocentro, duração do tremor, amplitude das tensões cisalhantes cíclicas e número de ciclos de descarga de acúmulo de tensões (**Allen, 1984**).

Do ponto de vista sedimentar, o desenvolvimento de estruturas de liquefação está associado a sedimentos não-consolidados, geralmente bem-selecionados, com alta permeabilidade, baixa viscosidade e baixa densidade da mistura de água e sedimentos. A ausência de minerais de argila, bolhas de gás e matéria orgânica também contribuem para a geração daqueles. A profundidade favorável para a formação destas estruturas geralmente varia entre dois a dez metros.

As estruturas encontradas na área de estudos podem ser classificadas como estruturas de liquefação por apresentarem vários dos requisitos associados a tal denominação, dentre os quais se listam: (1) ocorrência em locais múltiplos (*eg*: **Figura 3.7** – estações: (a) CONF e (b) CAJU); (2) ocorrem em meio a camadas não deformadas (**Figura 3.8a-b**); (3) os diques e sills têm origem em camadas inferiores à da hospedeira, cortando as camadas mais jovens (**Figuras 3.7a-b e 3.8a-c,e,g**); (4) o preenchimento daqueles é distinto da rocha hospedeira (**Figuras 3.7e 3.8**); (5) são capeadas por uma camada pelítica de baixa permeabilidade (**Figura 3.8d,f,h**); (6) desenvolvem-se em depósitos sedimentares típicos de ambientes deposicionais saturados em água e cuja coluna d'água não atinge grandes profundidade; (7) apresentam deslocamento horizontal limitado, raramente relacionados a estruturas puramente direcionais; (8) são restritos a poucas camadas correlacionáveis por longas áreas.

Foram identificados estruturas de liquefação como diques de areia com intraclastos de argila (**Figuras 3.8a,b,e**), camadas de areia carregando argilas (**Figura 3.8d,f,h**) e pequenos pilares associados a diques maiores (**Figura 3.7a-c**).

Com base nas informações supracitadas neste sub-item optou-se levantar duas hipóteses para a determinação da situação litoestratigráfica exposta na área: (1) Grupo Serra Grande; ou (2) zona de contato entre os grupos Serra Grande e Canindé, estando o primeiro restrito às exposições pouco espessas associadas ao Morro do Cruzeiro.

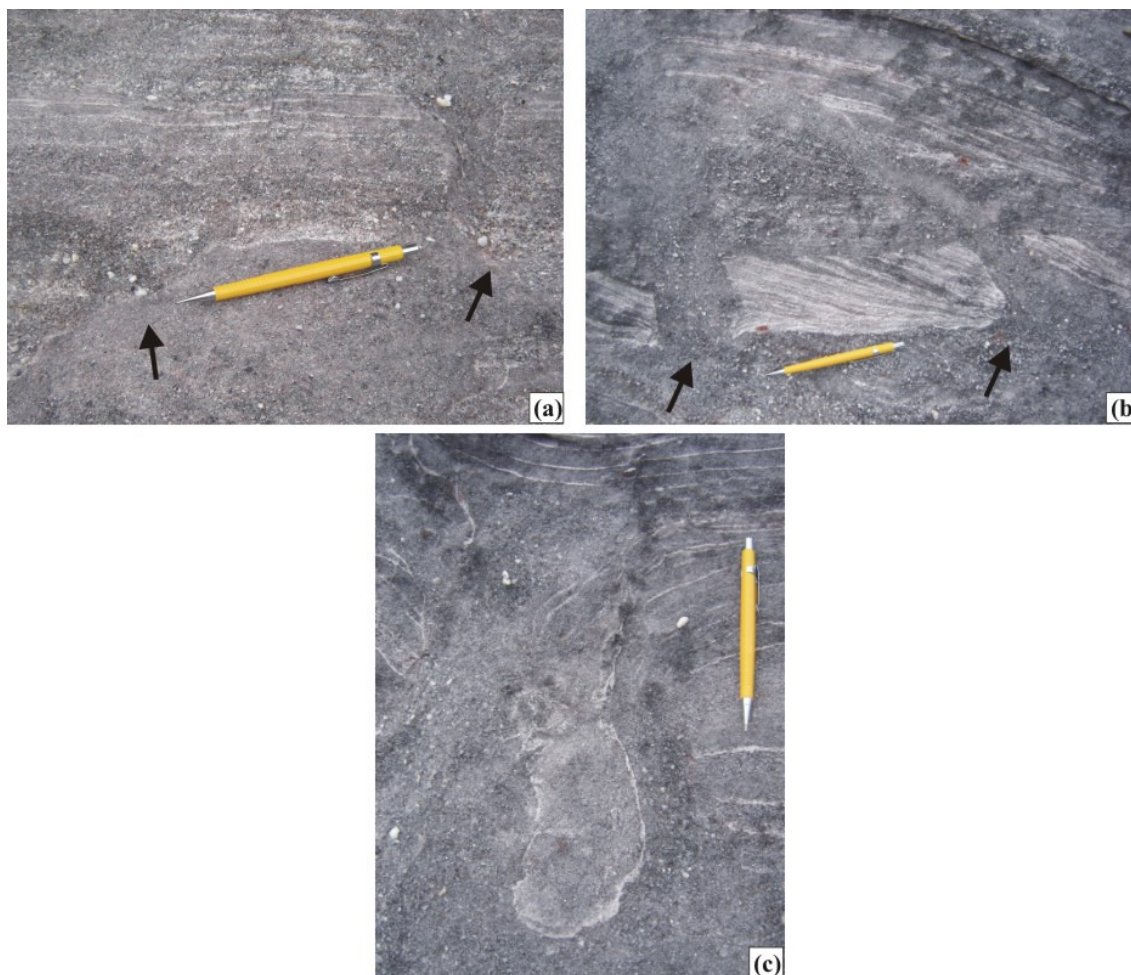


Figura 3.7 a-c: Fácies arenosa interpretada como estrutura de liquefação: (a) pilares de areia (estação do CAJU); (b) pilares de areia e (c) bolsão (estação CONF). Para localização das estações de coleta, vide Figura 6.2.

A primeira hipótese fundamenta-se principalmente na associação de litofácies amplamente distribuída pelas escarpas da Serra das Confusões e demais estações de coleta de dados. Tais associações areno-conglomeráticas sugerem deposição em ambiente continental, e representam barras de amplos canais fluviais entrelaçados. Estas condições paleoambientais são condicionantes dos depósitos siliciclásticos da Formação Jaicós. Neste caso, o Morro do Cruzeiro testemunharia o contato concordante entre os depósitos de leques glaciais e periglaciais da formação Ipú e os folhelhos de ambiente marinho raso da Formação Tianguá, os últimos representantes de uma fase de máxima transgressão glacioeustática mundial.

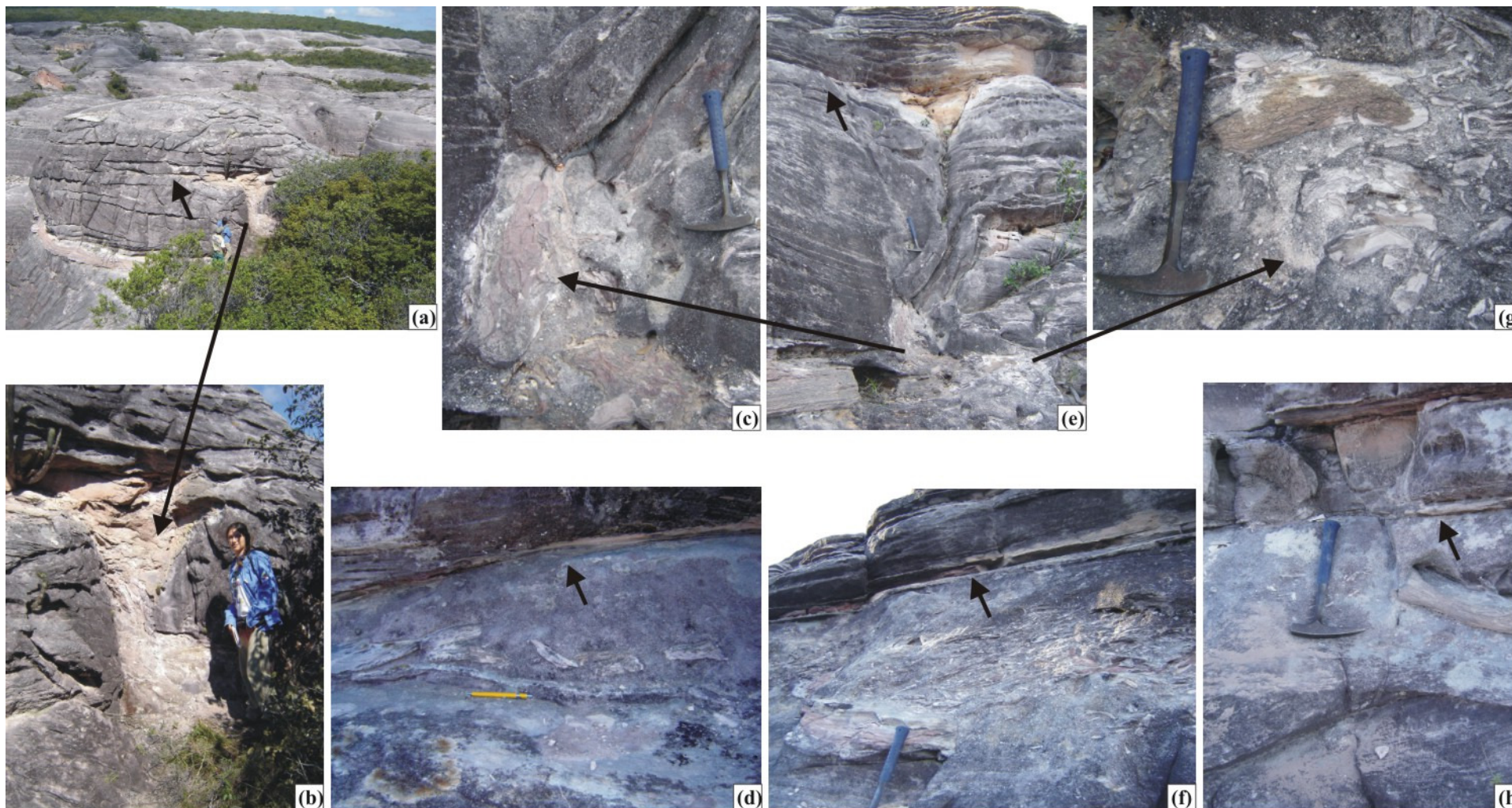


Figura 3.8 a-h: Fácies arenosa interpretada como estruturas de liquefação: (a), (b) e (e) - tipo dique de areia com intraclastos arrancados do nível pelítico inferior, em meio a camadas não deformadas; (c) - intraclasto de argila arrancado no nível pelítico próximo à base ao dique de areia; (d), (f), (g) e (h) - mistura de uma camada pelítica com depósito arenoso cuja estrutura primária foi obliterada pelo intenso escape d'água decorrente do mecanismo de fluidificação; (d), (f) e (h) - setas indicando camada pelítica de baixa permeabilidade capeando sedimentos fluidificados.

Ainda de acordo com a primeira hipótese, cerca de 20 km para noroeste do contato com o embasamento gnáissico, os folhelhos da Formação Tianguá estariam sobrepostos por contato concordante com os arenitos médios a conglomeráticos da Formação Jaicós. Próximo à sede do município de Guaribas, observa-se em um afloramento contínuo (**Figura 3.9a**), a unidade pelítica possivelmente correlata à Formação Tianguá (**Figura 3.9b**) sob os depósitos areno-conglomeráticos provavelmente da Formação Jaicós (**Figura 3.9c**).

A hipótese a favor do Grupo Serra Grande foi sugerida por **Freire (2006)**, através da aquisição de dados tridimensionais em afloramentos por *Laserscanner* (tecnologia *LIDAR - Light Detection and Ranging - Airbone*), realizada parcialmente na Serra das Confusões em conjunto ao presente trabalho.

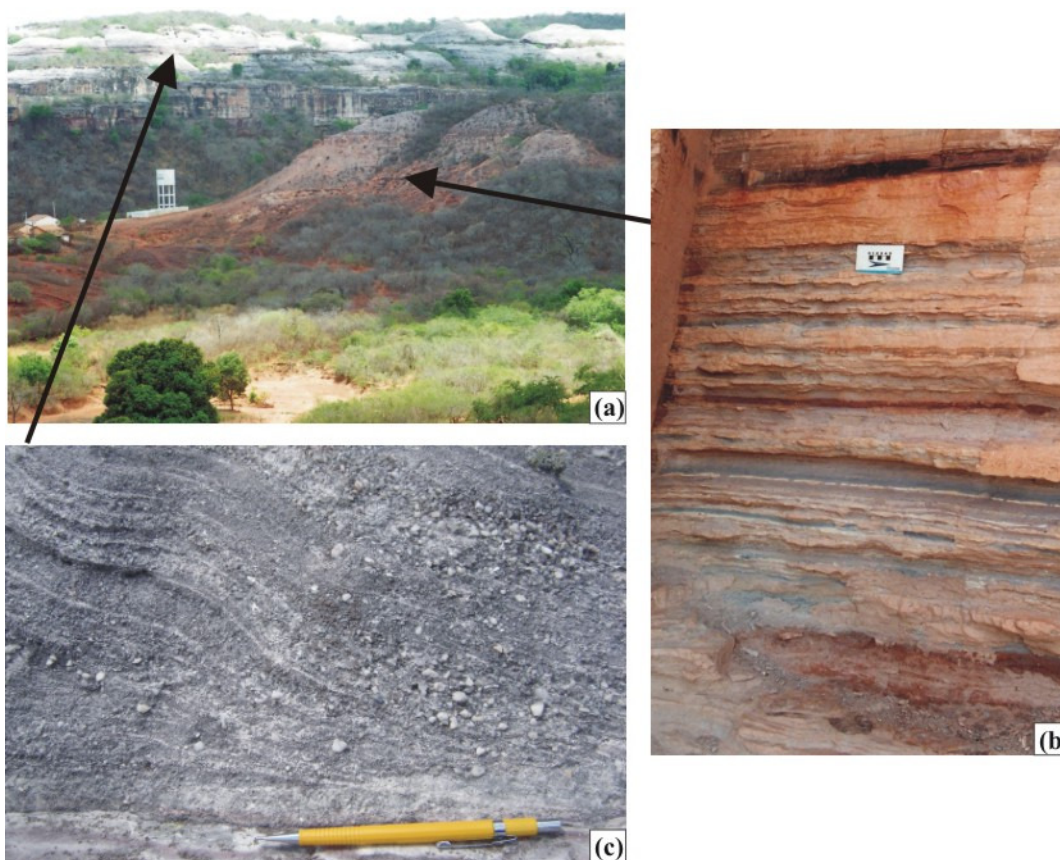


Figura 3.9 a-c: Estação de coleta Guaribas (GARB – vide figura 6.2 para localização da estação de coleta de dados de campo): (a) vista do possível contato entre os pelitos da Formação Tianguá (Grupo Serra Grande) ou Formação Pimenteira (Grupo Canindé) na base e os arenitos conglomeráticos da Formação Jaicós (Grupo Serra Grande) ou Formação Cabeças (Grupo Canindé) do topo; (b) fácies pelítica da Formação Tianguá ou Formação Pimenteira (Grupo Canindé); (c) fácies de arenito médio e arenito conglomerático a conglomerados finos, com estratificação cruzada acanalada da Formação Jaicós (Grupo Serra Grande) ou Formação Cabeças (Grupo Canindé).

A segunda hipótese, favorável ao Grupo Canindé, baseia-se na análise de algumas observações de campo à luz de dados bibliográficos sobre a geologia local, os quais permitem correlacionar os conglomerados grossos presentes no Morro do Cruzeiro (**Figura 3.4c**) à Formação Ipú do Grupo Serra Grande. Esta associação de fácies areno-conglomerática ocorre em contato com o embasamento e apresenta espessura entre 30 e 40 m. **Nunes et al. (1973a)**, **Metelo (1999)**, **CPRM**

(2001) e **Gonçalves (2003)** atribuíram espessura média de 40 m, para os depósitos com características de deposição em ambiente glacial encontrados na Borda Sudeste da Bacia do Parnaíba.

Para os autores acima citados, a Formação Ipú foi a única do Grupo Serra Grande que foi preservada. No lugar das unidades superiores erodidas foi desenvolvido um contato concordante com os folhelhos da Formação Pimenteira, contato este bem marcado pelo nível ferruginoso referido por **Nunes et al. (1973a)** como camada guia na identificação do contato concordante entre a Formação Ipú e o Grupo Canindé. É sugestiva a correlação deste nível ferruginoso citado por **Nunes et al. (1973a)**, com a observação de campo quanto à presença de brecha ferruginosa (**Figuras 3.3 e 3.4d**) no topo do Morro do Cruzeiro. Entretanto, esta brecha polimítica apresenta inclusive seixos de arenito, e pode corresponder a uma cobertura posterior mesmo aos depósitos do Grupo Canindé.

Embora não necessariamente associada a determinações litoestratigráficas, a presença de icnofósseis e bioturbações favorece a hipótese do Grupo Canindé. **Agostinho et al. (2002)** notificaram pela primeira vez a ocorrência de icnofósseis no Parque Nacional da Serra da Capivara, localizado a menos de 150 km da área de estudos. Segundo estes autores, afloram na área do parque as formações Ipú, Tianguá, Jaicós, Itaim, Pimenteira e Cabeças da Bacia do Parnaíba. Contudo, os icnofósseis só foram observados na Formação Pimenteira, os quais estavam associados a arenitos médios a finos, vermelhos, micáceos com marcas de ondas, correspondendo à parte superior daquela formação, caracterizada por uma fácies de mar raso. Foram identificados os seguintes icnogêneros: *Planolites/Palaeophycus*, *Arenicolites*, *Bifungites* e *Phycosiphon*. *Planolites/Palaeophycus*, podendo este conjunto ser associado à icnofácies *Cruziana*, característica de ambiente de plataforma rasa.

Um posicionamento preciso na estratigrafia local requer o estudo mais aprofundado e o levantamento de seções estratigráficas de detalhe espalhadas pela área, para posteriores correlações entre elas e com perfis de poços escavados para obtenção de água na região.

IV. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E
METODOLÓGICA DA EXTRAÇÃO DE
LINEAMENTOS

IV. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLÓGICA DA EXTRAÇÃO DE LINEAMENTOS

IV.1 - *Fundamentação teórica da extração, análise e interpretação de lineamentos por sistemas orbitais e aéreos*

IV. 1.1 - Conceituação teórica

O termo lineamento foi pioneiramente definido por **Hobbs (1904)** como sendo a expressão espacial de feições morfológicas da paisagem, tais quais: (1) cristas de cordilheiras ou limites de áreas elevadas, (2) linhas de drenagens, (3) linhas de costa e (4) linhas limítrofes de formações, de tipos petrográficos de rochas ou linhas de afloramentos. Posteriormente, **Hobbs (1912)** ampliou a definição do termo para “linhas significativas da paisagem que revelam a arquitetura escondida das rochas do embasamento”. A esta redefinição uma importante conotação tectônica foi adicionada através da afirmação de que “muitos lineamentos são idênticos às linhas sismotectônicas e, portanto, permitem, até certo ponto, uma maneira de determinação adiantada das linhas de maior perigo devido aos terremotos”.

Com base em informações geológicas de campo e dados geofísicos coletados em vários locais do mundo, **O'Leary & Simpson (1975)** e **Sabins (1978)** adotaram uma definição mais abrangente do termo lineamento, como "feições lineares de âmbito regional que se expressam na topografia pela morfologia de vales, cristas, segmentos de drenagens e anomalias tonais, controladas estruturalmente por foliações, juntas/fraturas e falhas". Tal concepção tratava indistintamente os lineamentos associados à deformação rúptil e dúctil, ocupando-se apenas dos aspectos descritivos destes.

Wheeler (1983) propôs alguns critérios para avaliar a validade das feições lineares identificadas via sensoriamento remoto, a saber: (1) objetividade das feições numa definição a priori; (2) reprodutibilidade (persistência) das feições quanto à direção azimutal, comprimento e continuidade espacial; (3) certeza de uma classificação capaz de distinguir entre feições reais e especulativas; (4) coincidência com elementos geológicos cartografados.

Para **Wise et al. (1985)** e **Hancock et al. (1987)**, os lineamentos estão predominantemente associados aos elementos da deformação frágil, devido àqueles serem os mais conspícuos, extensos e os principais modeladores da topografia recente; somado ao fato da história geodinâmica complexa das estruturas dúcteis mostrarem, por vezes, inúmeras reativações da crosta em ambiente frágil.

Santos (1986) desenvolveu um método para a identificação de descontinuidades pré-existentes influentes em rochas relativamente mais jovens. A técnica consiste na contagem ponderada de fraturas foto-interpretadas, as quais ao serem interpoladas geram mapas de frequência de fraturas. A análise conjunta dos mapas gerados define as principais descontinuidades antigas, que durante a evolução geológica da área em estudo foram determinantes no condicionamento do arcabouço tectônico-estrutural da região pesquisada. Tal análise é feita através da observação dos máximos de frequência de fraturas dos diversos sistemas que apresentem um posicionamento coincidente.

Os lineamentos refletem zonas de fraqueza com expressão superficial. Tais planos de fraquezas, uma vez instalados, são preferencialmente atingidos pela percolação diferencial de água ao longo de suas extensões, ressaltando-os progressivamente, seja pelo crescimento de vegetação ao longo do traçado destes na superfície do terreno ou devido ao desenvolvimento preferencial de redes de drenagens controladas por falhas ao redor das quais se alinham matas ciliares. Este fato levou **Summerfield (1988)** a afirmar que, embora algumas feições geomorfológicas originadas por processos tectônicos (endógenos) possam ser mascaradas por feições de origem exógena, a erosão e outros processos exógenos comumente tendem a agir em conformidade com as tensões litosféricas.

IV.1.2 - Análise de lineamentos no Nordeste do Brasil

A análise de lineamentos para fins de estudos estruturais no Nordeste do Brasil é relativamente recente. **Amaro (1998)** constatou a utilidade da integração de informações geológicas, geofísicas (gravimétricas e aeromagnéticas) e de sensoriamento remoto (Landsat 5-TM e GEMS/ banda X) no mapeamento geológico de reconhecimento e semi-detalle em rochas pré-cambrianas da porção nordeste da Província Borborema. Neste trabalho ficou evidente que o ajuste existente entre as assinaturas geofísicas e as feições geológicas marca o enraizamento mantélico das zonas de cisalhamento.

O trabalho de **Amaro (1998)** detalhou a extração e análise de lineamentos, tanto em terrenos sedimentares, quanto em terrenos cristalinos. Nos produtos digitais do satélite *Landsat 5 TM*, o autor utilizou técnicas de realce geométrico sobre imagens monocromáticas das bandas 4 e 5 para a extração de lineamentos. Os procedimentos por ele utilizados modificam os valores dos brilhos dos *pixels* com base nos valores dos brilhos dos *pixels* da vizinhança. Isto ocorre através de operações sobre a vizinhança mais próxima, nas quais os *pixels* envolvidos nos cálculos são relacionados por uma matriz.

Em seu trabalho, **Amaro (1998)** definiu o uso de filtros de convolução capazes de examinar cada *pixel* na imagem em relação à sua vizinhança, quantificando a inclinação e a direção da transição dos níveis de cinza. O número de *pixels* da vizinhança envolvidos nos cálculos e o valor estipulado para o coeficiente central da matriz são determinados pela dimensão desta. As dimensões utilizadas podem ser 3×3 e 5×5 . A primeira é mais adequada no realce de lineamentos com dezenas de quilômetros e larguras superiores a algumas centenas de metros; e a segunda é eficaz para lineamentos com centenas de quilômetros e larguras superiores a alguns quilômetros.

Dentre os filtros de convolução, os direcionais permitem uma análise direcional completa do padrão de lineamentos da imagem e requer a avaliação da posição da iluminação nos oito sentidos principais (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW). A avaliação visual pode ser regulada por critérios como a quantidade de ruídos, nitidez das linhas e bordas, continuidade dos lineamentos realçados e aparência do alisamento.

A classificação proposta por **Amaro (1998)** para os lineamentos utiliza, para defini-los, as seguintes características: (i) extensão continental; (ii) orientação azimutal retilínea; (iii) densidade descontínua, (iv) padrões paralelos (diferença entre azimutes inferior a 30°) a ortogonais (diferença entre azimutes superior a 60°); (v) ausência de inflexões num único feixe; (vi) comportamento interseccional; e (vii) caráter interceptor independente dos aspectos geológicos.

Para a detecção de lineamentos na Faixa Seridó (RN), **Souza (2000)** aplicou à banda 5 do Landsat 5 – TM, em tons de cinza, filtros *direcionais* em conjunto a outros filtros com o objetivo de ressaltar lineamentos rúpteis (Filtros *Sobel 3x3*) e dúcteis (Filtros *Kirsh*), ressaltando direções antes pouco evidentes.

IV.2 - Identificação e extração de lineamentos em produtos de sistemas de sensores

Informações espaciais multiespectrais são importantes para o uso em combinações coloridas, aumentando consideravelmente a capacidade de percepção humana em relação às imagens em tons de cinza. Há vasta quantidade de trabalhos para a determinação das composições coloridas de imagens multiespectrais com aplicação adequada a diversas finalidades.

No presente trabalho, a composição multiespectral das imagens *Landsat 7 ETM+* escolhida foi a *RGB 754*, devido às características espectrais ressaltadas respectivamente por estas bandas: (7) diferenças entre tipos de rochas e minerais; (5) umidade no solo; e (4) padrão e densidade de vegetação na faixa do infravermelho. Tais critérios atuam de maneira sinérgica na identificação de estruturas geológicas e contatos lito-estruturais nas composições coloridas (**Chatterjee, 2003**). A composição *RGB 431* também foi utilizada, dada sua capacidade em ressaltar as drenagens presentes na região, as quais ficam representadas por um vermelho intenso muito característico.

As imagens geradas por quatro sistemas de sensores remotos foram utilizadas para a análise, integração e interpretação dos lineamentos presentes na área, visando à caracterização da deformação frágil na borda sudeste da Bacia do Parnaíba (SE do PI). Estes sensores foram os seguintes: (1) ativos - dados do radar *SIR-C/X-SAR* da *SRTM – Shuttle Radar Topographic Mission*; (2) passivos - fotografias aéreas e imagens dos satélites *Landsat 7 ETM+* e *Quickbird*).

As rotinas dos processamentos digitais das imagens foram realizadas sobre uma base SIG, através da utilização conjunta dos *softwares ENVI 4.0* e *ArcGIS 8.3*.

A escala da caracterização estrutural na área de trabalho variou conforme a resolução espacial de cada um dos sistemas de sensores utilizados, cujos produtos podem fornecer informações em maior e menor escala. Os produtos dos sensores orbitais *Landsat 7 ETM+* e *SRTM* apresentam resolução média (na casa das centenas a dezenas de metros). Os produtos do sensor orbital *Quickbird* e do sensor aéreo (fotografias aéreas na escala 1:32.500) utilizados apresentam resolução alta (de ordem métrica a decimétrica). Devido à diversidade dos produtos de sistemas de sensores utilizados, a análise e interpretação dos lineamentos foram realizadas em escalas compatíveis às resoluções das imagens.

A **Tabela 4.1** resume os parâmetros relevantes para a aplicação dos quatro produtos de sensores selecionados para a extração e análise dos lineamentos.

PRODUTOS DE SISTEMAS DE SENSORES ORBITAIS E AEREOS				
sistema de sensores	ativo	passivo		
	SIR-C/X-SAR (SRTM)	LANDSAT 7 ETM+	FOTOS AÉREAS	QUICKBIRD
resolução espectral	C e X	1,2,3, 4, 5,7 e 8 (PAN)	visível	PAN
resolução espacial	90 m	30m e 15m (PAN)	5 m	0,61m
dados altimétricos	sim	não	não	não
escala de trabalho	1 200.000	1 50.000	1 10.000	1 5.000
área de cobertura	3753 km ²	3753 km ²	456 km ²	149 km ²
perímetro da área	245 km	245 km	95 km	58 km
data de imageamento	11-22/2/2000	23/8/2001	10/6/1987 6/7/1987 20/6/1988	5/2/2005

Tabela 4.1: Parâmetros relevantes dos produtos dos sistemas orbitais e aéreos utilizados na análise multi-escala do padrão estrutural rúptil da área de estudos.

IV.2.1 - Extração de lineamentos em macro e meso-escala

Um sistema de sensor ativo (radar da *SRTM*) e um passivo (satélite *Landsat 7 ETM+*) foram os dois sistemas de sensores remotos de resolução média utilizados no presente trabalho. Estes demonstraram ser adequados para a análise e interpretação de lineamentos em escala regional. Além disso, os dois sensores auxiliaram na identificação e seleção de áreas com boa exposição de rochas e com grau de estruturação alto a moderado, as quais foram selecionadas para serem cobertas pelos sensores de alta resolução e para a checagem de campo.

IV.2.1.i - Radar SIR-C/X-SAR da SRTM

A Missão Topográfica do Radar *Shuttle* (*Shuttle Radar Topographic Mission - SRTM*) destinou-se à coleta de medições tridimensionais da superfície da Terra. A *SRTM* converte e ortorretifica dados de reflexão captados por radar para *pixels* com valores altimétricos e fornece como produto final, uma base de dados gridados empregados na restituição da topografia. O sensor utilizado opera com antenas nas faixas de frequências das bandas X (2,4 cm a 3,8 cm) e C (3,8 cm a 7,5 cm). O instrumento de radar utilizado na *SRTM* é o mesmo que constituiu o *Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR)*, o qual voou duas vezes na *Space Shuttle Endeavour* em 1994 (***METAFILE do produto da SRTM obtido livre de taxas pela internet 2003***).

A presente pesquisa utilizou dados de radar gerados para uma área de 3.753 km² (coincidente àquela coberta pelo *Landsat 7 ETM+*), com resolução espacial de 90 m (quadrado em azul na **Figura 4.1**).

A partir dos dados de radar foram gerados mapas de relevo sombreado visando análises tridimensionais da superfície do terreno. Estes produtos permitiram o controle sobre a posição da

iluminação, em relação à inclinação do ângulo de incidência e à orientação do feixe de luz a partir do norte geográfico. Tais parâmetros, definidos no presente estudo, delimitaram uma zona de sombra aproximadamente perpendicular à direção de emissão do feixe de luz. Ao longo desta zona de sombra, o conseqüente realce do contraste favoreceu o destaque das estruturas subparalelas à mesma. Esta zona, também conhecida como zona de invisibilidade, compreende uma faixa de aproximadamente 20° a partir da direção de iluminação (Yamaguchi 1985, Bonham-Carter *et al.* 1985, Lowman *et al.* 1987, Amaro, 1998).

Os dados de radar possibilitaram a elaboração de modelos digitais de elevação (MDE) através de um processo automático de extração dos dados de elevação de cada *pixel* da imagem. Isto foi possível devido às informações altimétricas que o mesmo possui. A extração foi realizada tanto através do programa *ENVI 4.0*, quanto do *ArcGIS 8.3*. Nestes programas foram integrados os dados do radar da *SRTM* à imagem gerada a partir da fusão da banda pancromática do *Landsat 7 ETM+*, com a composição *RGB 754* das bandas deste satélite. As rotinas dos programas acima mencionados, usadas para a geração do MDE, diferem em poucos detalhes. Entretanto, seus resultados não apresentar diferenças significativas entre si.

IV.2.1.ii - Satélite Landsat 7 ETM+

A área de 3.753 km², estudada através da imagem *Landsat 7 ETM+*, encontra-se inserida na porção SE da cena 219/66 (quadrado em azul da **Figura 4.1**), imageada em 23/08/2001.

A etapa do processamento digital das imagens teve início com o programa *ENVI 4.0*. Diversas composições *RGB* foram geradas. As composições *RGB 754* e *431* apresentaram maior utilidade para o propósito do trabalho. Na primeira composição, os elementos estruturais foram destacados e, na segunda, a rede de drenagens mostrou-se com melhor nitidez.

Com o objetivo de aumentar a resolução do produto digital em 15 m foi efetuada, no *ENVI 4.0*, a fusão das composições selecionadas (*RGB 754* e *431*) com a banda pancromática (8) de alta resolução, originando arquivos aqui denominados *RGB(754)_{PAN}* e *RGB(431)_{PAN}*, respectivamente.

Para o realce e a detecção dos elementos lineares de alta freqüência nas imagens utilizou-se de filtragens direcionais na banda 5, extraída do arquivo *RGB(754)_{PAN}*. Neste procedimento foram aplicados os filtros direcionais *Prewitt 3x3*, que favoreceram o realce dos contornos dos objetos da imagem (Prewitt, 1970). O alinhamento dos valores nulos da matriz corresponde às direções das estruturas destacadas, conforme indicado na **Tabela 4.2**.

Um novo arquivo foi gerado para cada um dos oito filtros aplicados à banda 5, a partir do arquivo *RGB(754)_{PAN}*. Estes oito novos arquivos foram realçados por matrizes de convoluções direcionais em oito sentidos principais de iluminação (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW). A experiência de se utilizar oito sentidos principais de iluminação visou checar eventuais diferenças no realce direcional de lineamentos em decorrência do sentido de iluminação; no entanto, se constatou que as filtragens direcionais em apenas quatro sentidos, contemplando quatro direções (N, NE, E e NW), são

suficientes para o realce dos lineamentos de um modo geral. Em cada um dos arquivos foram registrados os elementos lineares de alta frequência, possivelmente correlacionados às feições estruturais presentes na área, e, por conseguinte, às direções das tendências estruturais preferenciais da região.

A etapa de digitalização dos lineamentos teve início com a análise conjunta das imagens dos arquivos $RGB(431)_{PAN}$, $RGB(754)_{PAN}$, e as oito filtragens direcionais sobre a imagem monocromática da banda 5 do arquivo $RGB(754)_{PAN}$, em um projeto comum no programa *ArcGIS* 8.3. A resolução espacial de 15 m atingida com os produtos processados permitiu que os lineamentos fossem digitalizados na escala 1:50.000 a partir da análise integrada. Esta abordagem sinóptica possibilitou a classificação dos lineamentos conforme os critérios estabelecidos para os sistemas passivos descritos mais adiante.

IV.2.2 - Extração de lineamentos em meso e micro-escalas

Os sistemas de sensores de alta resolução (fotos aéreas e satélite *Quickbird*) permitiram uma caracterização estrutural detalhada das áreas selecionadas.

IV.2.2.i - Fotografias aéreas

Fotografias aéreas na escala 1:32.500 foram utilizadas em duas etapas na identificação, extração, análise e interpretação dos lineamentos presentes em uma área de 456 km². A primeira etapa consistiu na análise estereoscópica dos pares das 19 fotografias correspondentes a uma porção menor da área coberta pelos sensores *Landsat 7* e *SRTM* (polígono em lilás da **Figura 4.1**). A foto-interpretação através dos estereoscópios de mesa e de bolso foi uma etapa muito importante para a continuidade do trabalho, pois permitiu a visualização tridimensional de ampla porção da região. Na segunda etapa foi gerado um único fotomosaico das 19 fotos, evidenciando a continuidade do padrão de fraturamento. Após digitalização e análise dos lineamentos no *software ArcGIS* 8.3, as informações geradas em ambas etapas puderam ser comparadas. Observou-se, conforme esperado, a repetição do mesmo padrão estrutural.

Com base nos procedimentos descritos acima se aconselha, como metodologia mais adequada; ao invés de digitalizar e georreferenciar o mapa de lineamentos elaborado a partir da análise estereoscópica; primeiramente foto interpretar os lineamentos com o estereoscópio, digitalizar cada foto individualmente e elaborar o mosaico georreferenciado em meio digital. Após este procedimento é possível finalmente identificar, extrair e analisar os lineamentos diretamente da tela, tendo em mente a análise estereoscópica previamente realizada. Isto porque o georreferenciamento dos mapas de lineamentos fotos interpretados por estereoscopia apresentou deslocamento espacial mais elevado que aquele feito diretamente em meio digital.

As fotografias aéreas não precisaram ser restituídas, uma vez que a distorção decorrente do georreferenciamento ficou restrita às áreas densamente vegetadas, onde lineamentos não foram observados. Entretanto, embora não tenha sido o caso do presente trabalho, a restituição de fotos aéreas georreferenciadas é de extrema importância para o correto posicionamento espacial de lineamentos presentes em áreas atingidas pela distorção decorrente do georreferenciamento.

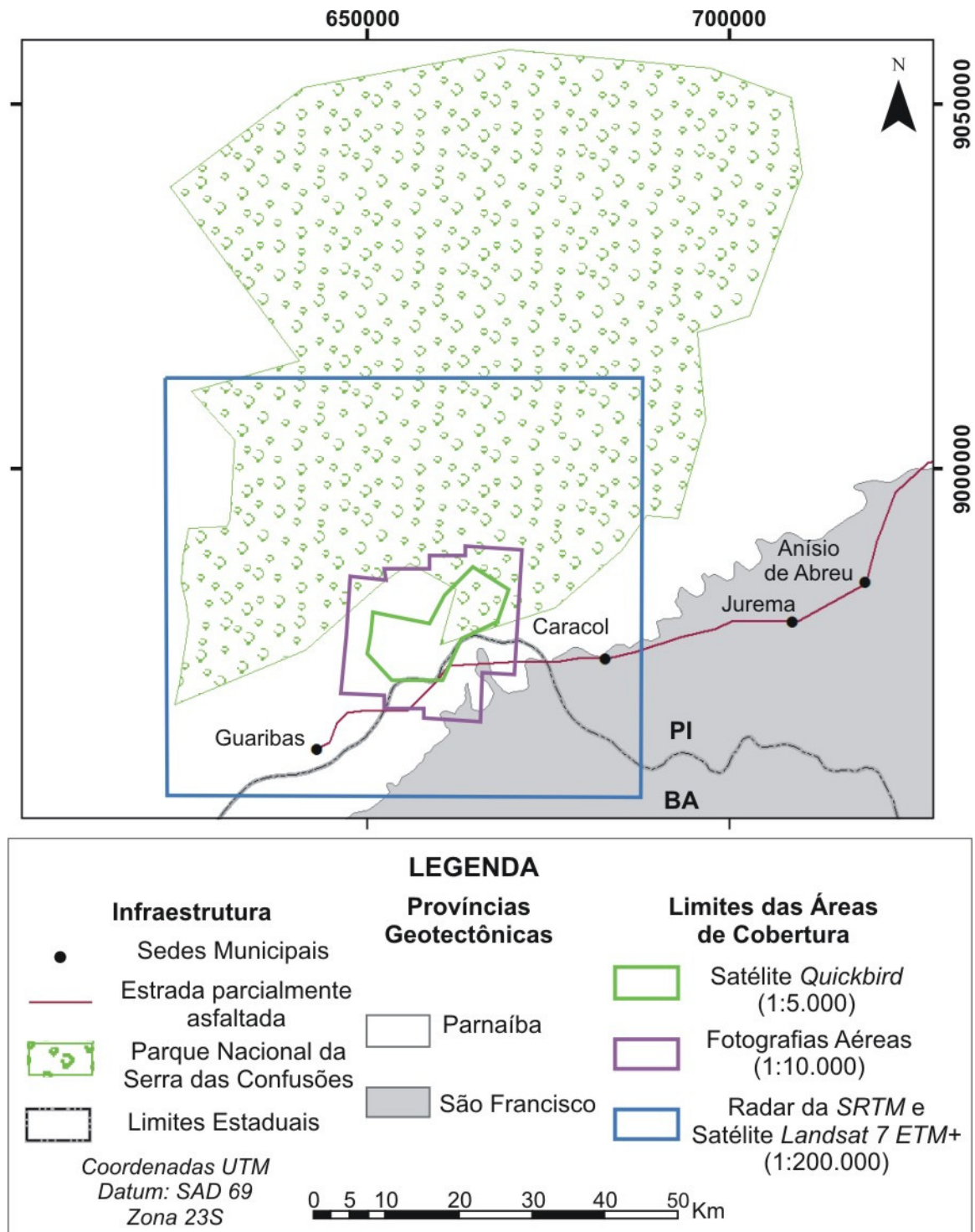


Figura 4.1: Áreas de cobertura dos sistemas de sensores e escalas compatíveis às respectivas resoluções espaciais.

00°			(I) N-S			180°		
-1.000	0.0000	1.000	1.0000	0.0000	-1.0000			
-1.000	0.0000	1.000	1.0000	0.0000	-1.0000			
-1.000	0.0000	1.000	1.0000	-0.0000	-1.0000			
45°			(II) NE-SW			225°		
-1.4142	-0.7071	0.0000	1.4142	0.7071	-0.0000			
-0.7071	0.0000	0.7071	0.7071	0.0000	-0.7071			
0.0000	0.7071	1.4142	0.0000	-0.7071	-1.4142			
90°			(III) E-W			270°		
-1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	1.000			
0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000			
1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	-1.000			
315°			(IV) NW-SE			135°		
0.0000	0.7071	1.4142	0.0000	-0.7071	-1.4142			
-0.7071	0.0000	0.7071	1.0000	0.0000	-0.7071			
-1.4142	-0.7071	0.0000	1.4142	0.7071	0.0000			

Tabela 4.2: Matrizes dos filtros direcionais *Prewitt* borda de matriz 3x3, correspondentes às direções das estruturas destacadas: N-S (i), NE-SW (ii), E-W (iii) e NW-SE (vi).

IV.2.2.ii - Satélite *Quickbird*

Optou-se pela utilização da imagem pancromática do satélite *Quickbird* por esta apresentar a melhor resolução espacial (tamanho dos *pixels* *x* e *y* igual a 0,60 m) dentre os produtos orbitais disponíveis no mercado até o presente momento. No dia 05/02/2005 foi programada a cobertura do satélite para uma área de 149 km², somando informações mais detalhadas a uma porção menor da área coberta pelos demais sensores (polígono em verde na **Figura 4.1**).

Apesar de a resolução espacial da imagem possibilitar a identificação de feições de terreno até na escala 1:750, a escala que se mostrou mais adequada à digitalização dos lineamentos foi a de 1:5.000.

No programa *ENVI 4.0*, a aplicação dos filtros direcionais *Prewitt 3x3* na imagem *Quickbird* monocromática não se mostrou eficiente devido ao alto grau de detalhe captado pelo sensor em questão. O produto filtrado ressaltou grande quantidade de feições sem significado estrutural, como por exemplo, as copas das árvores, fator que mascarou os lineamentos verdadeiramente condicionados pela deformação rúptil. O processamento da imagem do satélite *Quickbird* resumiu-se a um realce do tipo “desvio padrão” no programa *ArcGIS 8.3*, proporcionando maior nitidez entre os tons de cinza.

IV.3 - Classificação dos lineamentos

A classificação dos lineamentos foi realizada através da extração e análise das feições lineares visualizadas a partir da análise individual e integrada de cada produto de três sistemas orbitais e um sistema aéreo, conforme os critérios e processamentos digitais descritos no capítulo anterior. A digitalização dos lineamentos em ambiente SIG permitiu que os valores de comprimento, azimute e as coordenadas espaciais do ponto médio de cada lineamento fossem automaticamente extraídos.

Os lineamentos foram extraídos e classificados primeiramente conforme suas características geométricas, texturais e genéticas com o objetivo de avaliar, em diversas escalas, a possível associação entre as feições geomorfológicas (vales e escarpas) e as estruturas tectônicas (fraturas distribuídas segundo um padrão geométrico característico). As características físicas da área permitiram a subdivisão dos lineamentos imageados pelos sistemas ativos em quatro tipos designados: (1) *fraturas*, (2) *vales*, (3) *escarpas* e (4) *solos úmidos*.

Abaixo, são apresentados os critérios adotados para a classificação acima mencionada:

- (1) *fraturas*: lineamentos observáveis nos produtos de média resolução espacial em regiões desprovidas de densa cobertura vegetal e lineamentos visíveis diretamente sobre afloramentos rochosos nos produtos de alta resolução. Neste caso, as estruturas aqui identificadas representam fraturas no afloramento, com ou sem desenvolvimento de vegetação; esta quando presente como um elemento linear não ultrapassa 10 m de largura.
- (2) *vales*: lineamentos correspondentes às porções retilíneas da rede de drenagens. Os lineamentos de vales correspondem a (1) vales encaixados que atuam como vias para o escoamento da água meteórica desde as porções mais elevadas do terreno ou a (2) canais fluviais maiores que ocorrem em altitudes menores que aqueles anteriores. Tanto nos produtos de média, como nos de alta resolução, as matas ciliares desenvolvidas nas margens das drenagens auxiliaram na identificação dos lineamentos de vales. Para os produtos de alta resolução foi estabelecida uma largura mínima de 10 m, como critério de classificação para esse tipo de lineamento, diferenciando-o daqueles englobados pela categoria *fraturas*. Nestes produtos de maior escala, os lineamentos de vale representam majoritariamente as cabeceiras e drenagens preferencialmente instaladas ao longo de superfícies de fraturas subverticais.

(3) *escarpas*: lineamentos presentes em áreas íngremes, delimitadores de grandes desníveis topográficos. A digitalização desta categoria de lineamentos delimitou as regiões ocupadas por vastos platôs.

(4) *solos úmidos*: São lineamentos observáveis em áreas densamente vegetadas, possivelmente em associação a zonas de maior umidade no solo ao longo de uma direção preferencial, uma vez que a impressão de linearidade geralmente é dada por intermédio de mudanças texturais na vegetação segundo um padrão linear.

A classificação dos lineamentos para os produtos do sistema orbital ativo manteve-se a mesma daquela elaborada para o sistema aéreo passivo e os sistemas orbitais passivos, com exceção das categorias (1) *fraturas* e (4) *solos úmidos*, as quais foram consideradas indistintamente como uma única categoria para os produtos do radar. Isto foi feito devido à ausência de informações que permitissem a distinção entre as duas categorias nas imagens obtidas pela *SRTM* de menor resolução espacial. No produto do radar, a resolução espacial de 90 m limitou o trabalho à escala 1:200.000; e a resolução espectral dos mapas de relevo sombreado reteve-se aos tons de cinza, não favorecendo a classificação da área de ocorrência de lineamentos quanto ao grau de desenvolvimento da cobertura vegetal.

As etapas de interpretação, classificação e digitalização dos lineamentos seguiram praticamente as mesmas rotinas para os sistemas de sensores ativos e passivos. Tais etapas compreenderam a análise integrada, em ambiente SIG, do conjunto dos produtos de sensores utilizados.

Conforme dito anteriormente, a escala de trabalho variou de acordo com a resolução espacial de cada sistema de sensor. Os produtos gerados a partir do radar *SRTM* foram analisados na escala 1:200.000 (**Figura 4.2 a-b**); os do satélite *Landsat 7 ETM+* na escala 1:50.000 (**Figura 4.3 a-b**); as fotografias aéreas na escala 1:10.000 (**Figura 4.4 a-b**); e a imagem do satélite *Quickbird* na escala 1:5.000 (**Figura 4.5 a-b**).

IV.4 - Análise estatística de lineamentos

Após a digitalização dos lineamentos, a aplicação de métodos estatísticos pode ser realizada a partir dos atributos de comprimento, azimute e coordenadas do ponto médio atribuídos automaticamente a cada lineamento no ambiente SIG. Estas tabelas foram tratadas no programa *Excel*, passando a servir como base de dados para as análises estatísticas descritas abaixo.

IV.4.1 - Orientação azimutal

O total de lineamentos digitalizados para cada sensor foi analisado integralmente para a definição dos principais *sets* de elementos lineares. As informações de comprimento e frequência dos lineamentos originaram os histogramas e as rosetas para a determinação dos principais *sets* de

lineamentos. A análise estatística dos lineamentos utilizou como base de dados as tabelas associadas a cada conjunto de lineamentos analisado.

A finalidade dos histogramas foi relacionar os intervalos azimutais dos lineamentos, tanto com base na somatória dos comprimentos dos lineamentos, quanto com base na frequência absoluta destes (número de lineamentos existentes), imageados a partir de cada sensor. Seis histogramas foram gerados para cada sensor, os quais estão apresentados no capítulo seguinte (**Figuras 5.1 a 5.4**): (1) dois histogramas considerando a subdivisão das categorias estabelecidas para os lineamentos (*fraturas, solos úmidos, vales e escarpas*); (2) dois histogramas onde todos os lineamentos foram tratados em conjunto, independentemente de sua classificação; e (3) dois histogramas considerando somente os dados dos lineamentos interpretados como de algum significado tectônico. O objetivo deste procedimento foi testar a influência ou não dos processos tectônicos nos elementos geomorfológicos associados aos lineamentos ressaltados em cada produto.

Com base nos lineamentos de significado tectônico, foram geradas rosetas com classes de intervalos azimutais de 10°, tanto para a somatória dos comprimentos dos lineamentos, quanto para a frequência destes (número de lineamentos existentes), as quais estão apresentadas no capítulo seguinte (**Figura 5.5**).

Através da análise conjunta das rosetas e dos histogramas, os principais *sets* de lineamentos identificados foram individualizados no SIG, a partir do atributo referente à orientação azimutal. A seleção do intervalo azimutal referente ao *set* desejado foi individualizada em um novo arquivo através da rotina “*dissolve*” do *Geoprocessing Wizard*.

IV.4.2 – Densidade de fraturamento

As análises bidimensionais da densidade dos lineamentos puderam ser feitas com os dados coletados. A densidade de lineamentos, identificada em cada um dos quatro produtos de sistemas orbitais, contribuiu para a caracterização do padrão estrutural.

Os lineamentos contidos nas respectivas áreas de cobertura foram submetidos ao seguinte cálculo com vistas à determinação da densidade de fraturamento, para cada produto de sensor:

$$\rho_f = \sum li / A$$

onde: ρ_f = densidade de fraturamento,

l = comprimento do lineamento,

A = área considerada para a análise da densidade.

Os cálculos das densidades de fraturamento (ρ_f), considerando como área (A) os limites do imageamento, permitiram analisar a densidade total de fraturamento assinalada por cada um dos quatro sensores utilizados.

A comparação entre as densidades de fraturamento assinaladas por cada sensor remoto utilizado, foi feita para uma área coberta igualmente pelos quatro sensores. Considerando a

sobreposição espacial das áreas das imagens analisadas quanto à densidade de lineamentos, o cálculo de (ρ_f) ficou restrito a uma área de 149 km², a qual corresponde à extensão do terreno coberta pelos quatro sistemas de sensores utilizados.

A seguir, foram selecionadas 21 áreas com 4 km² cada com o intuito de determinar as porções mais densamente deformadas a partir do cálculo da densidade de lineamentos interpretados como de origem tectônica. A escolha da quantidade e das dimensões das áreas envolvidas na análise de densidade comparativa visou fazer esta mais representativa para a toda a abrangência do polígono de 149 km², coberto igualmente pelos quatro sistemas de sensores. Para tanto, 4 km² se mostraram adequados para representar consideravelmente os lineamentos identificados nas imagens dos quatro sensores, e para fornecer um número considerável de áreas para a análise comparativa, inseridas igualmente no polígono de cobertura comum aos quatro sistemas de sensores. As regiões cobertas por nuvens na imagem do satélite *Quickbird* foram desconsideradas. As 21 áreas de análise permitiram identificar até que ponto a escolha entre os sensores influenciou na detecção de zonas fraturadas.

Para a subdivisão dos quatro arquivos *.shp, (com o total de lineamentos para a área de 149 km², interpretados como de significado tectônico a partir de cada produto de sensor analisado) cada qual submetidos à rotina *clip* do *Geoprocessing Wizard* no *Arc Map*, foi aplicada 21 vezes para cada um dos quatro arquivos (uma vez para cada subestação). Esta rotina consiste na criação de um novo arquivo *.shp apenas com os lineamentos inseridos na subestação determinada para cálculo das densidades bidimensionais de fraturamento.

A densidade de fraturamento (ρ_f), relativa a cada uma das áreas selecionadas, foi calculada para os lineamentos extraídos através dos quatro produtos de sensores.

A análise de (ρ_f) contou com a elaboração de quatro gráficos de colunas gerados para os quatro produtos de sensores, tendo as áreas de análises discriminadas na abscissa e o valor da densidade de fraturamento na ordenada. A análise integrada destes gráficos permitiu a identificação da área mais densamente fraturada, bem como a determinação do produto de sensor mais adequado para percebê-la como tal.

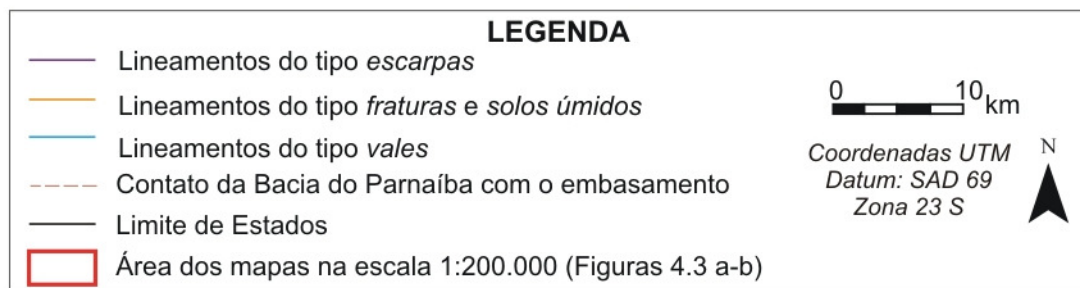
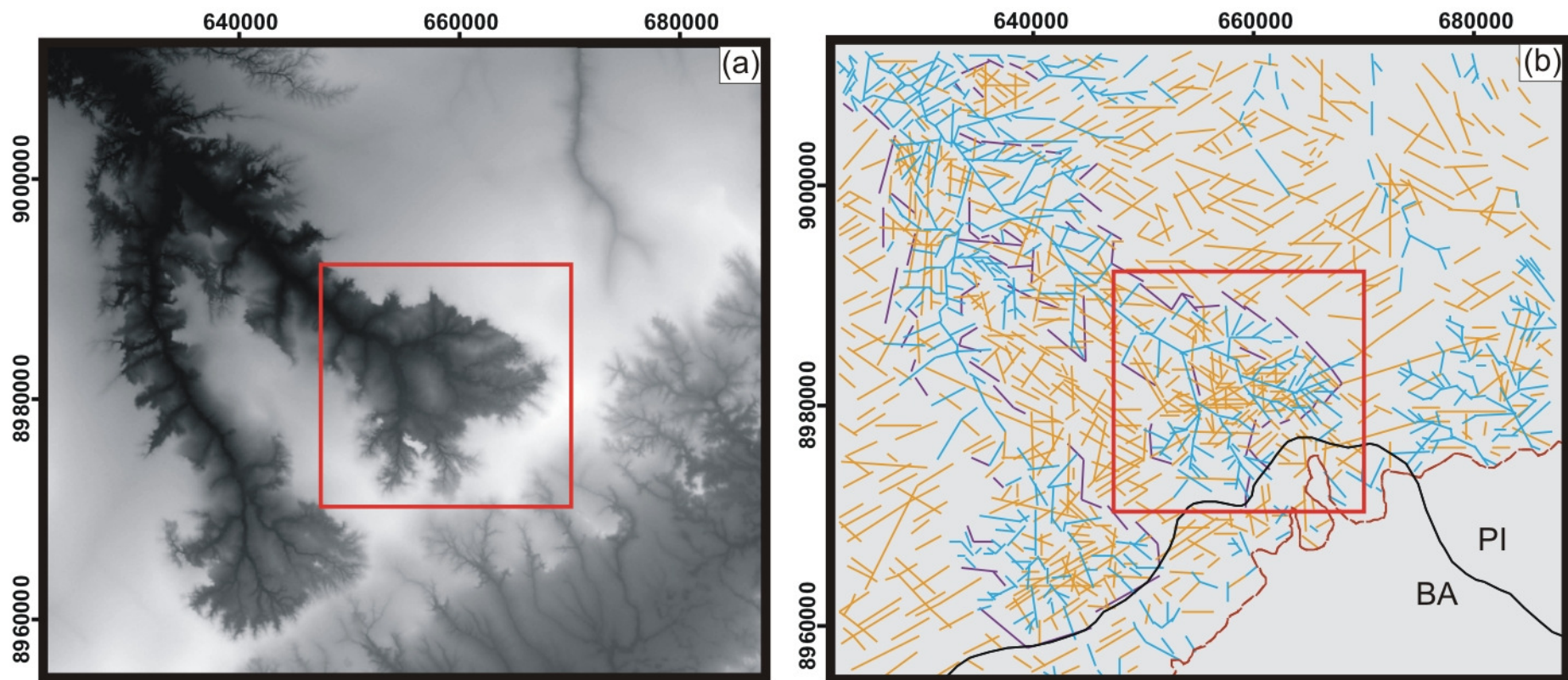


Figura 4.2a-b: (a) imagem bruta dos dados do radar *SIR-C/X-SAR* com ajuste pelo desvio padrão (obtidos pela *SRTM*); (b) total de lineamentos, extraídos da imagem de radar na escala 1:200.000, classificados segundo as categorias: *escarpas*, *vales* e *fraturas / solos úmidos*.

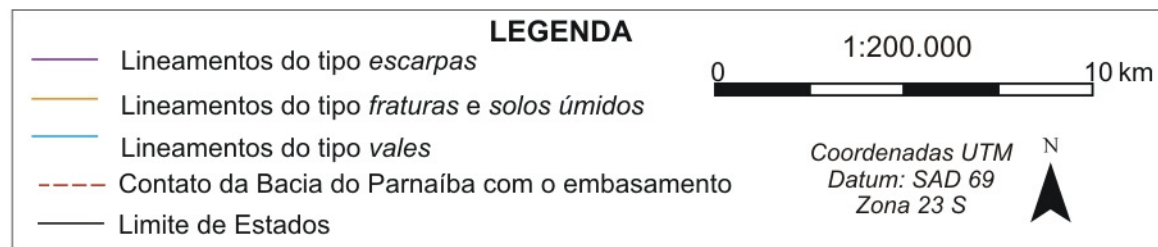
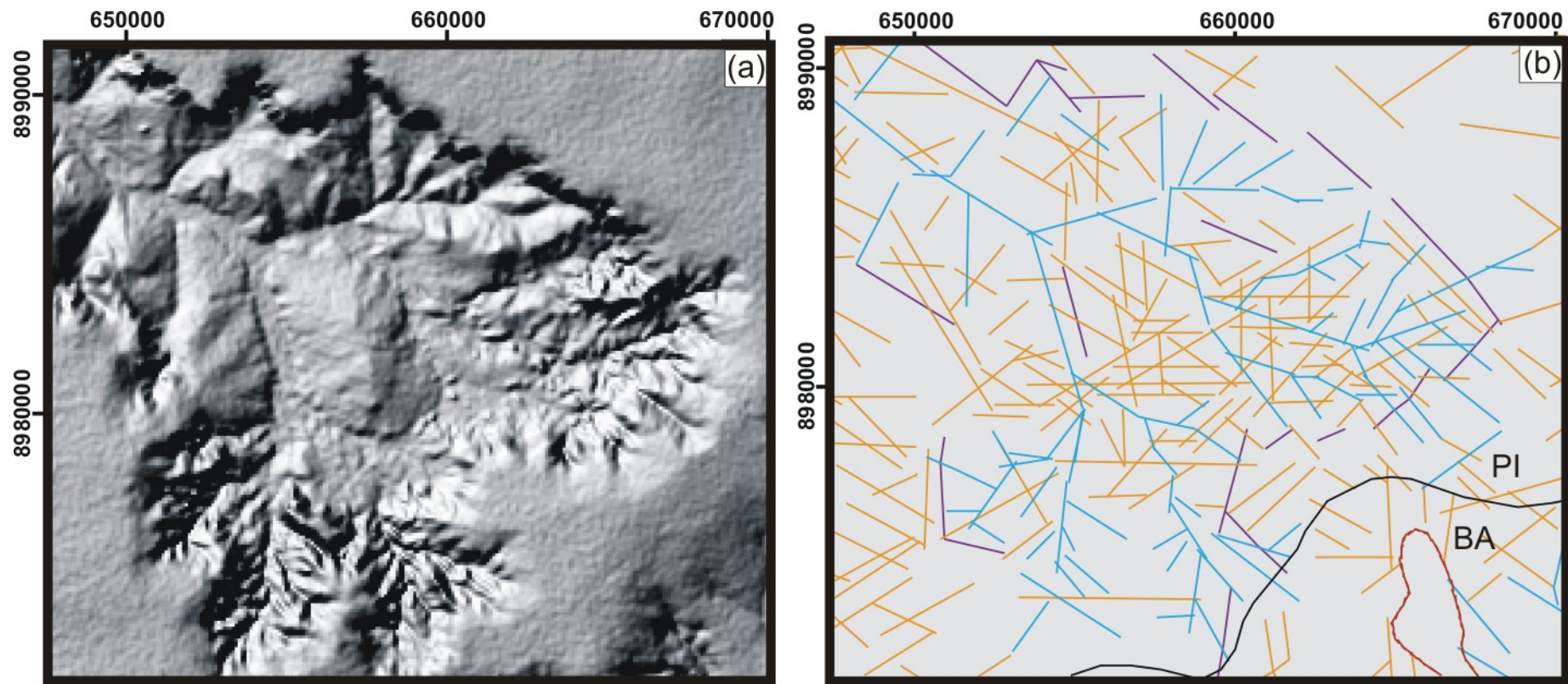


Figura 4.3 a-b: Visualização na escala 1:200.000: (a) da imagem de radar com relevo sombreado (realce para as estruturas NE, direção de iluminação 315°, inclinação solar 45°); (b) detalhe do total de lineamentos, extraídos dos produtos de radar, classificados segundo as categorias: lineamentos representantes de *escarpas*, *vales* e *fraturas / solos úmidos*.

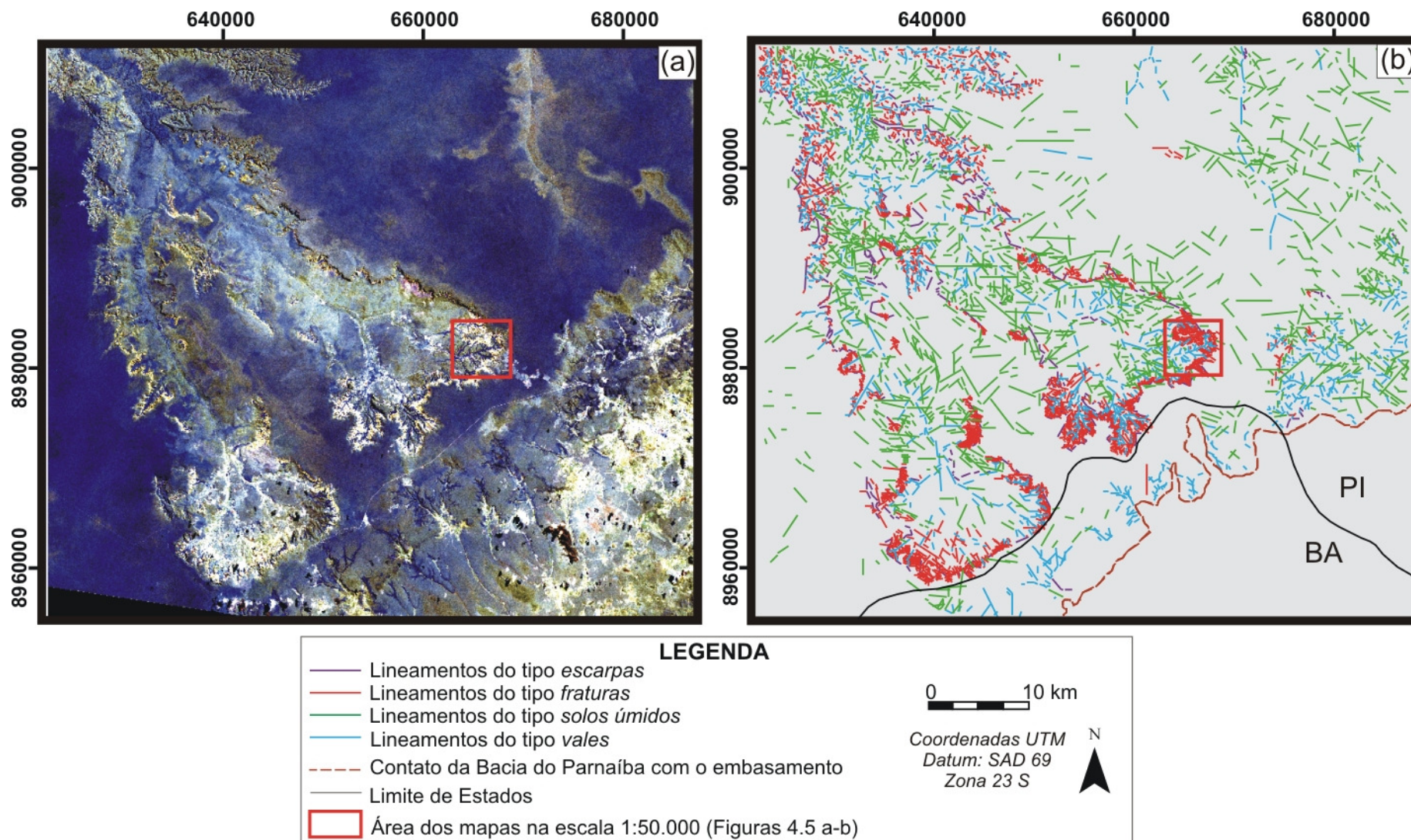


Figura 4.4 a-b: (a) composição colorida da porção sudeste da cena 219/66 do satélite *Landsat 7 ETM+* - bandas R:7, G:5, B:4 + fusão com a PAN, adequada para o realce de estruturas geológicas; (b) total de lineamentos, extraídos da imagem do satélite *Landsat 7 ETM+* na escala 1:50.000, classificados segundo as categorias: lineamentos representantes de *escarpas*, *vales*, *fraturas* e *solos úmidos*.

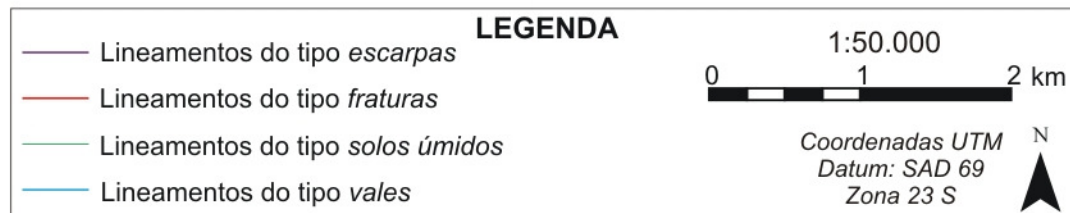
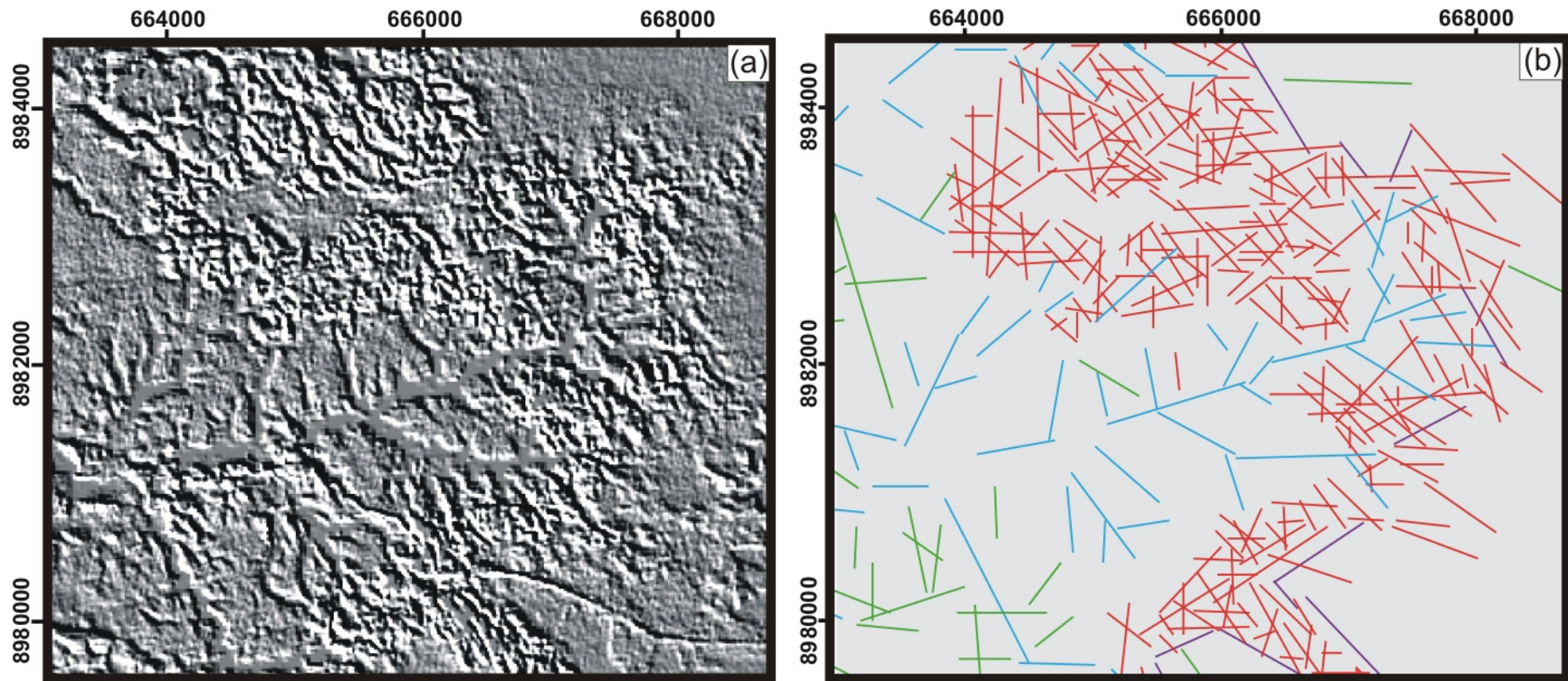


Figura 4.5 a-b: Visualização na escala 1:50.000: (a) do destaque para as estruturas NW através da aplicação do filtro direcional N 315 na banda 5 da fusão R:7G:5B:4+PAN do satélite *Landsat 7 ETM+*; (b) dos lineamentos extraídos dos produtos do satélite *Landsat 7 ETM+*, classificados segundo as categorias: lineamentos representantes de *escarpas*, *vales*, *fraturas*, e *solos úmidos*.

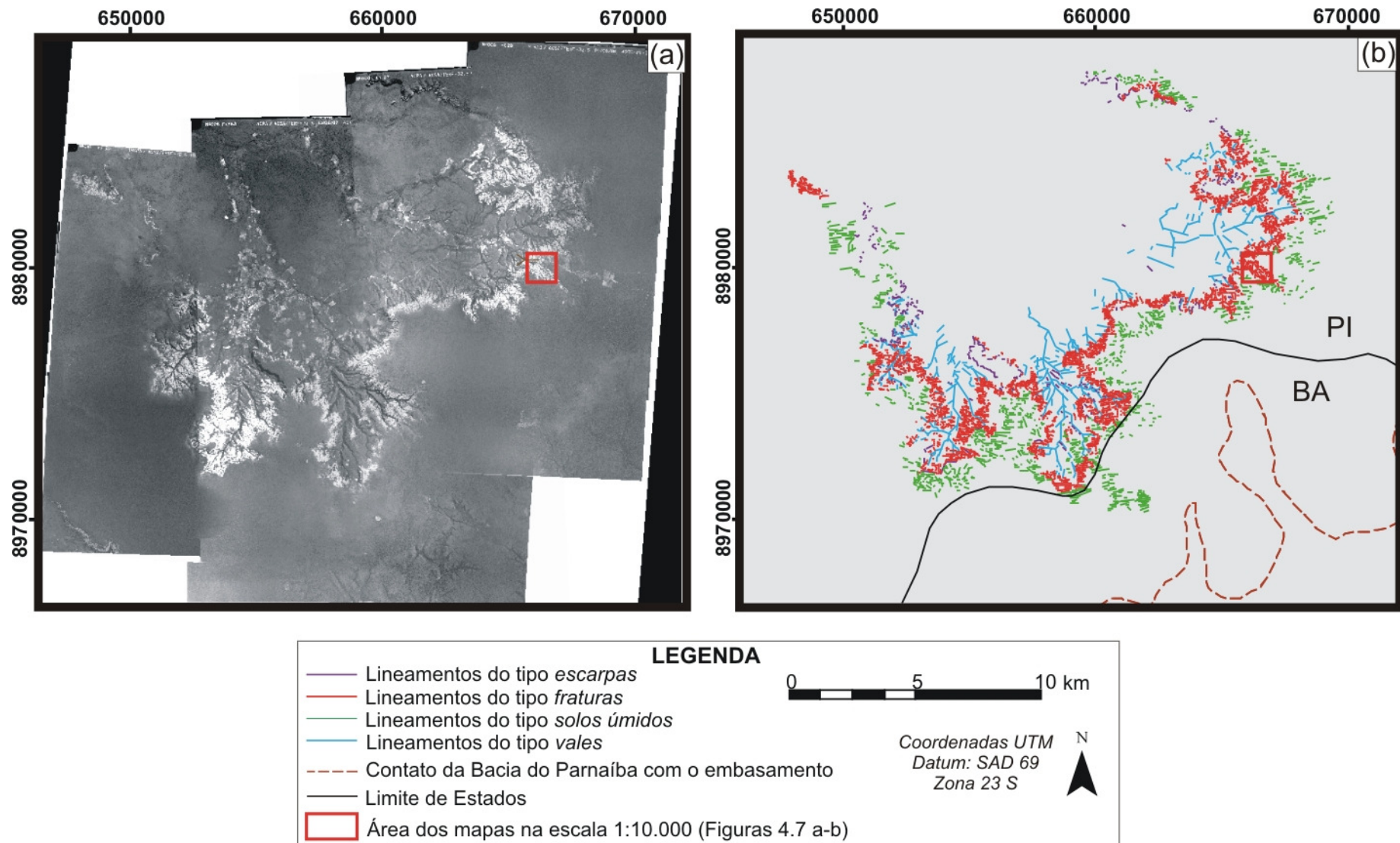


Figura 4.6 a-b: (a) Fotomosaico com 19 fotografias aéreas originalmente na escala 1:32.000; (b) total de lineamentos extraídos do fotomosaico com o auxílio do zoom na escala 1:10.000, classificados segundo as categorias: lineamentos representantes de *escarpas*, *vales*, *fraturas* e *solos úmidos*.

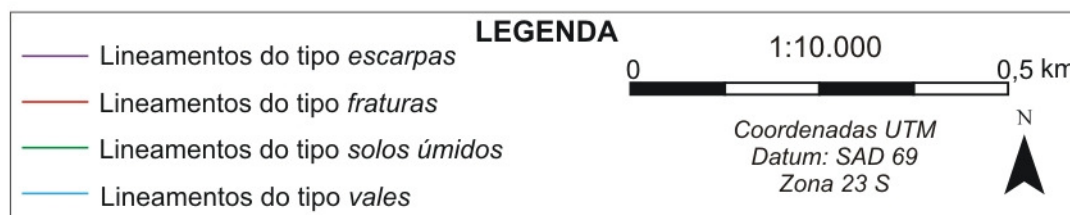
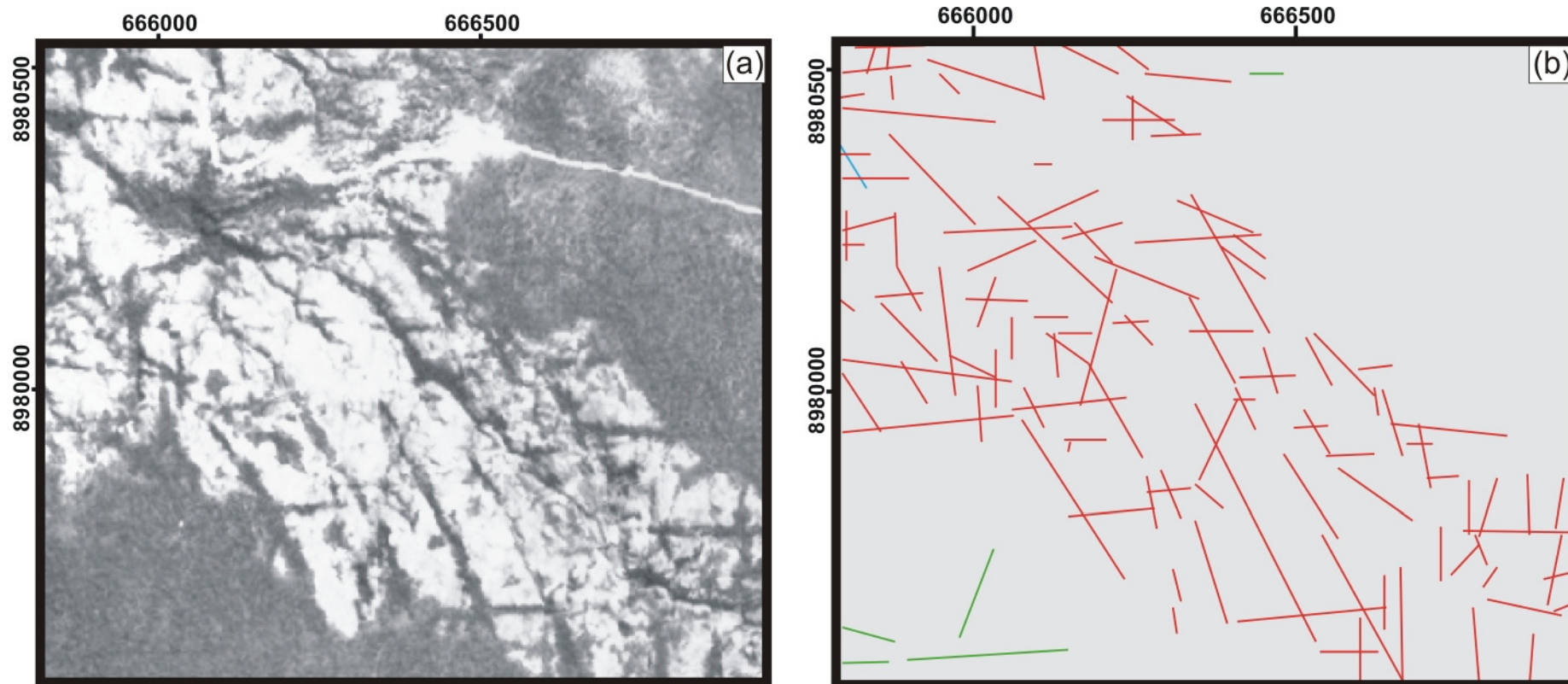


Figura 4.7 a-b: Visualização na escala 1:10.000: (a) do mosaico das fotografias aéreas digitalizadas; (b) dos lineamentos extraídos do mosaico das fotografias aéreas, classificados segundo as categorias: lineamentos representantes de *escarpas*, *vales*, *fraturas* e *solos úmidos*.

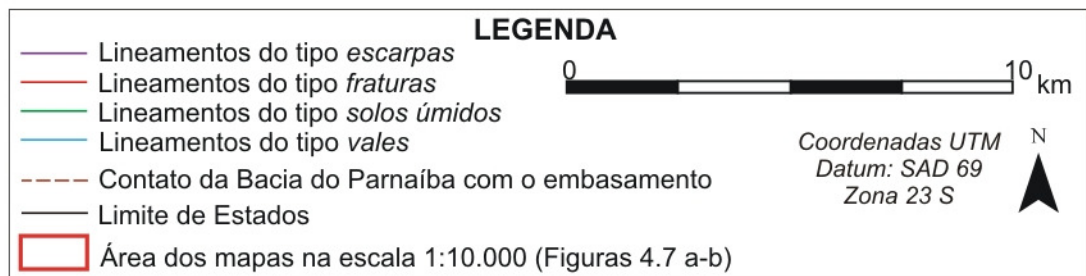
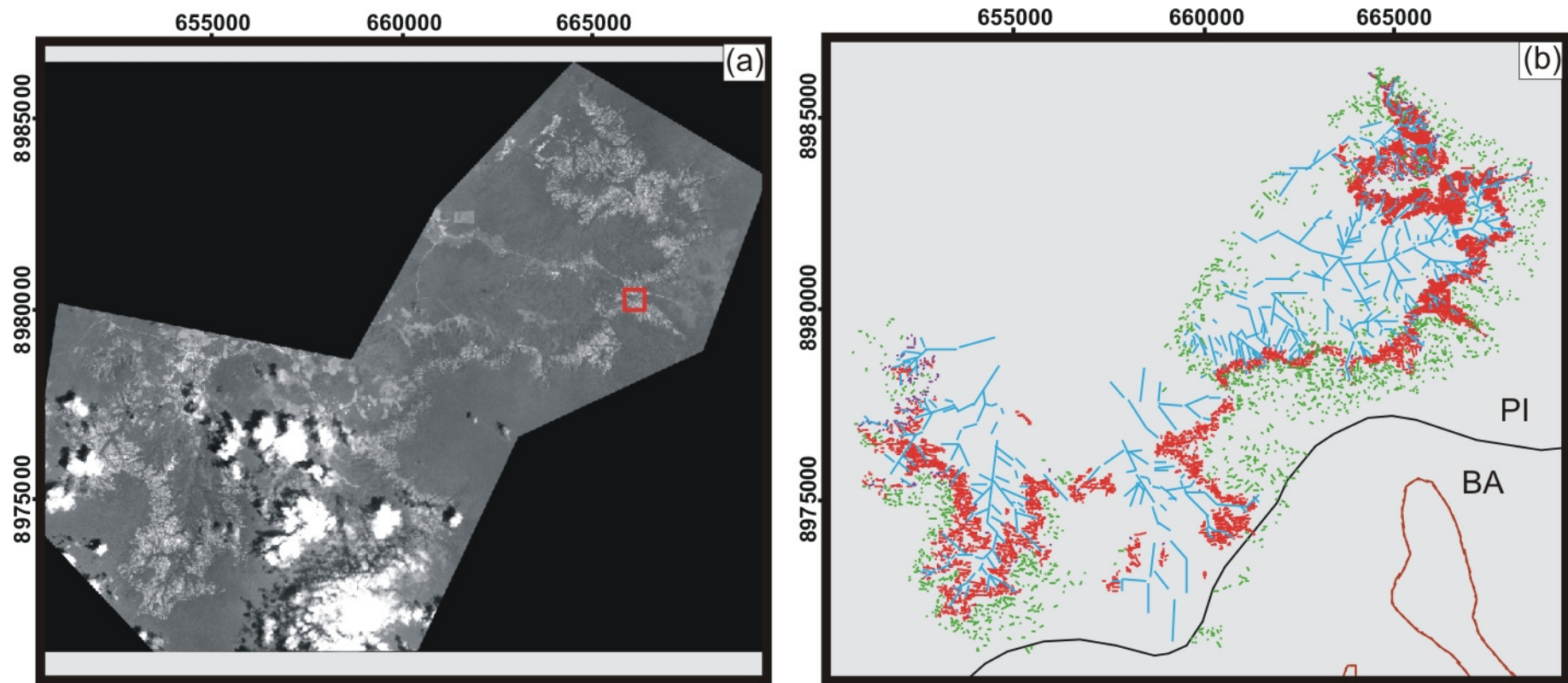


Figura 4.8 a-b: (a) imagem pancromática do satélite *Quickbird* com ajuste pelo desvio padrão; (b) total de lineamentos, extraídos da imagem *Quickbird* na escala 1:5.000, classificados segundo as categorias: lineamentos representantes de *escarpas*, *vales*, *fraturas* e *solos úmidos*.

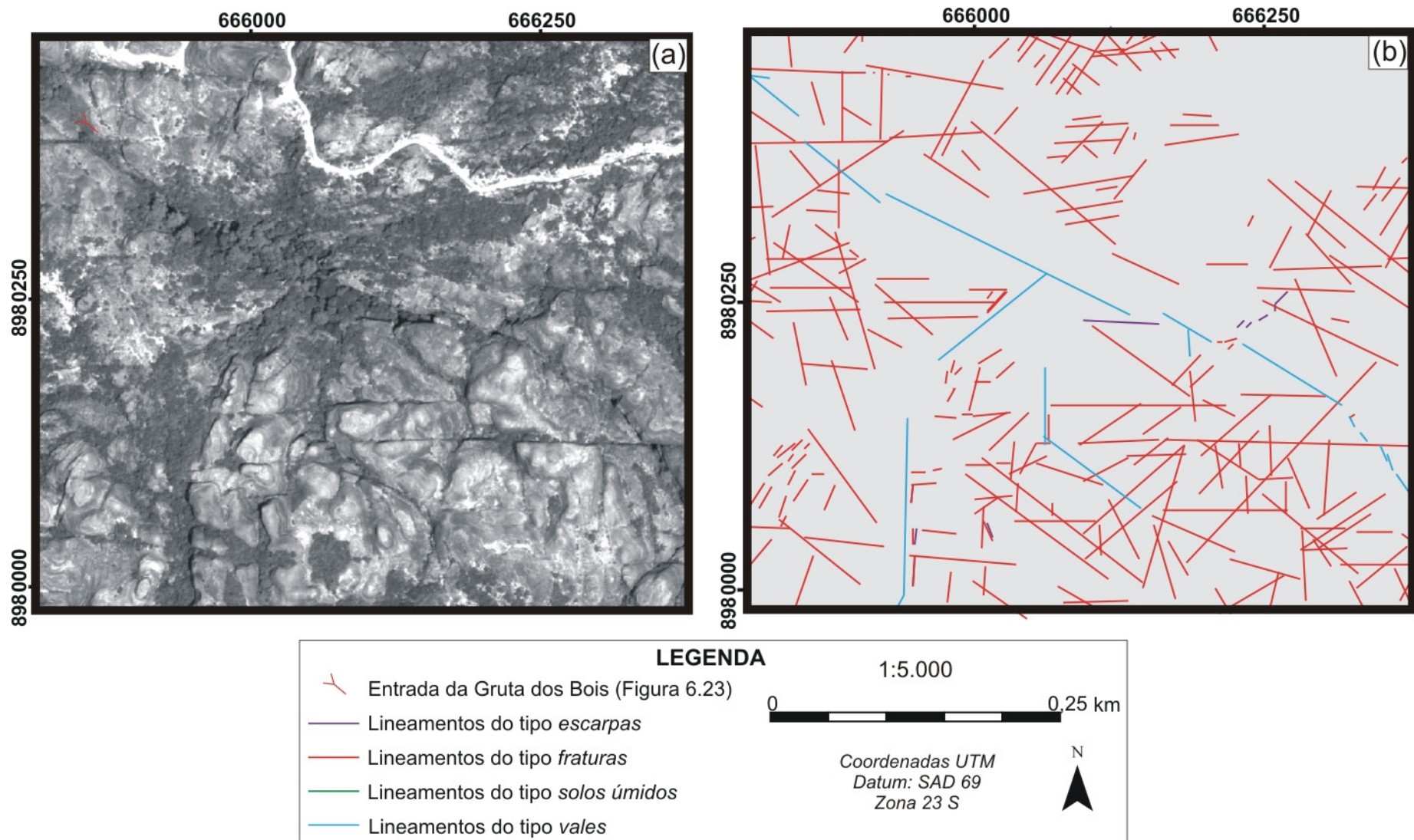


Figura 4.9 a-b: Visualização na escala 1:5.000: (a) da imagem pancromática do satélite *Quickbird* com ajuste pelo desvio padrão; (b) do total de lineamentos extraídos da imagem do satélite *Quickbird*, classificados segundo as categorias: lineamentos representantes de *escarpas, vales, fraturas e solos úmidos*.

V. ANÁLISE DE LINEAMENTOS ATRAVÉS DE SENSORES ORBITAIS E AÉREOS

V. ANÁLISE DE LINEAMENTOS ATRAVÉS DE SENSORES ORBITAIS E AÉREOS

Este capítulo tem por objetivo apresentar o resultado das análises estatísticas às quais foram submetidos os dados coletados e os mapas de lineamentos gerados para cada tipo de imagem digital.

Após os processamentos digitais descritos no capítulo anterior, a análise de lineamentos constituiu-se de quatro etapas: (1) subdivisão dos *sets* de lineamentos; (2) cálculo da densidade de lineamentos; (3) subdivisão dos mapas de lineamentos para cada uma das sete estações de coleta de dados de campo, detalhadas no capítulo VI (**Figura 6.2**). Estas etapas são descritas a seguir.

V.1 - Subdivisão dos Sets de Lineamentos

Os principais *sets* de lineamentos foram subdivididos através da análise dos histogramas e das rosetas gerados separadamente para produtos de três sistemas orbitais e um sistema aéreo, conforme metodologia descrita no capítulo anterior.

Os seis histogramas gerados para cada um dos quatro produtos de sensores (**Figuras 5.1 - 5.4**) permitiram a análise estatística quanto à orientação azimutal, frequência de lineamentos e a somatória do comprimento destes. A classificação dos lineamentos segundo os critérios expostos no capítulo anterior (*vales, escarpas, fraturas e solos úmidos*) foi integrada à informação gráfica dos picos de frequência e de comprimento total de lineamentos. Os histogramas elaborados de acordo com a classificação dos lineamentos permitiram a individualização dos lineamentos com gêneses associadas a eventos da deformação rúptil, durante a interpretação. Isto possibilitou o tratamento estatístico apenas dos dados com condicionante tectônica aparente.

Os picos de frequência e de somatória de comprimentos de lineamentos evidenciados pelos histogramas foram determinantes na delimitação dos principais *sets* de lineamentos para cada produto de sensor. Foram identificados quatro *sets* nos produtos dos sensores *Landsat 7 ETM+*, *Quickbird* e *SRTM* (NW, NS, NE, EW) e três *sets* nas fotografias aéreas (NW, NS, EW). Não foram observados picos nos histogramas relacionados aos lineamentos de escarpas derivados de produtos de média resolução espacial (*Landsat 7 ETM+* e *SRTM*); conseqüentemente, os lineamentos relacionados às escarpas foram interpretados com lineamentos não condicionados pela deformação rúptil. O mesmo ocorreu com as categorias dos lineamentos associados às escarpas e aos vales nos produtos de alta resolução (*Quickbird* e Foto Aérea).

As rosetas (**Figura 5.5**) foram feitas somente com base nos lineamentos associados à deformação tectônica. Foram geradas rosetas tanto para a frequência de lineamentos, quanto para a somatória dos comprimentos destes. Integradas aos histogramas, as rosetas se mostraram úteis na individualização dos principais *sets* de lineamentos identificados por cada um dos quatro produtos de sensores.

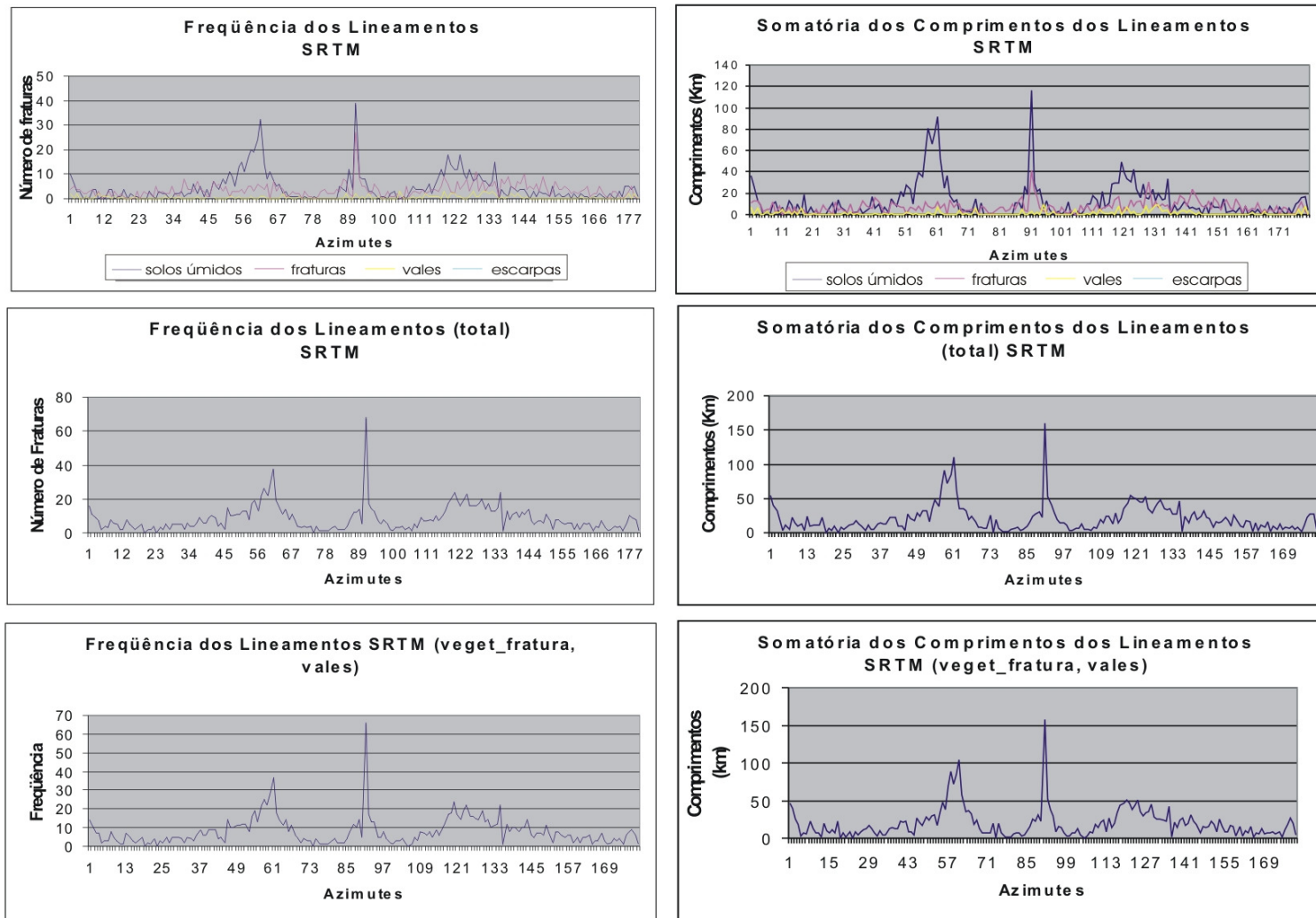


Figura 5.1: Histogramas relacionando o total de lineamentos dos produtos da *SRTM*, conforme: (i) azimute vs. frequência relativa dos lineamentos (coluna à esquerda) e (ii) azimute vs. comprimento total (coluna à direita). Nos histogramas da primeira linha os lineamentos estão classificados por tipo; nos da segunda está o total e nos da terceira foram representados apenas os lineamentos (e seus comprimentos associados) considerados de significado tectônico.

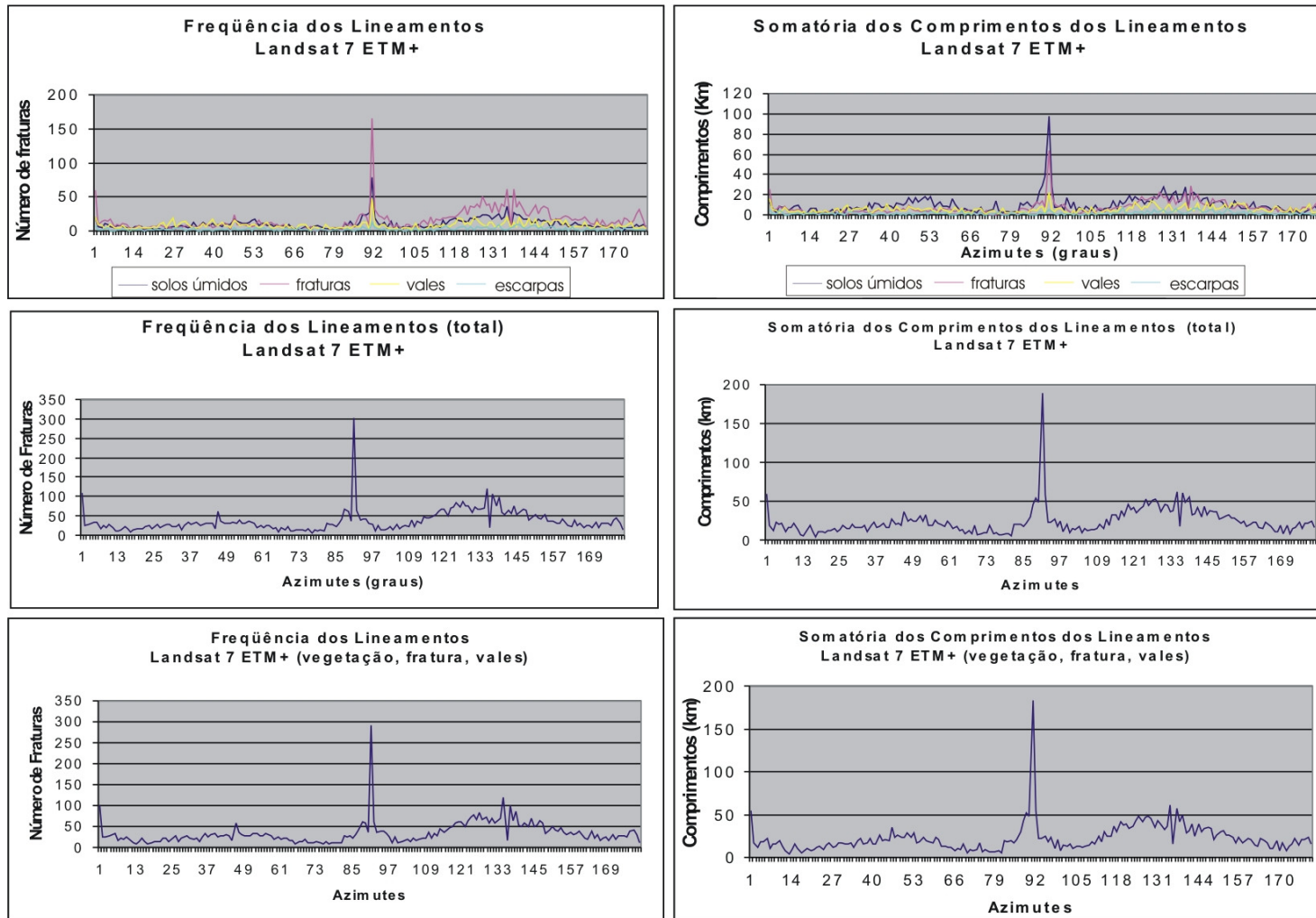


Figura 5.2: Histogramas relacionando o total de lineamentos dos produtos das imagens do satélite *Landsat ETM+7*, conforme: (i) azimuth vs. frequência relativa dos lineamentos (coluna à esquerda) e (ii) azimuth vs. comprimento total (coluna à direita). Nos histogramas da primeira linha os lineamentos estão classificados por tipo; nos da segunda está o total e nos da terceira foram representados apenas os lineamentos (e seus comprimentos associados) considerados de significado tectônico.

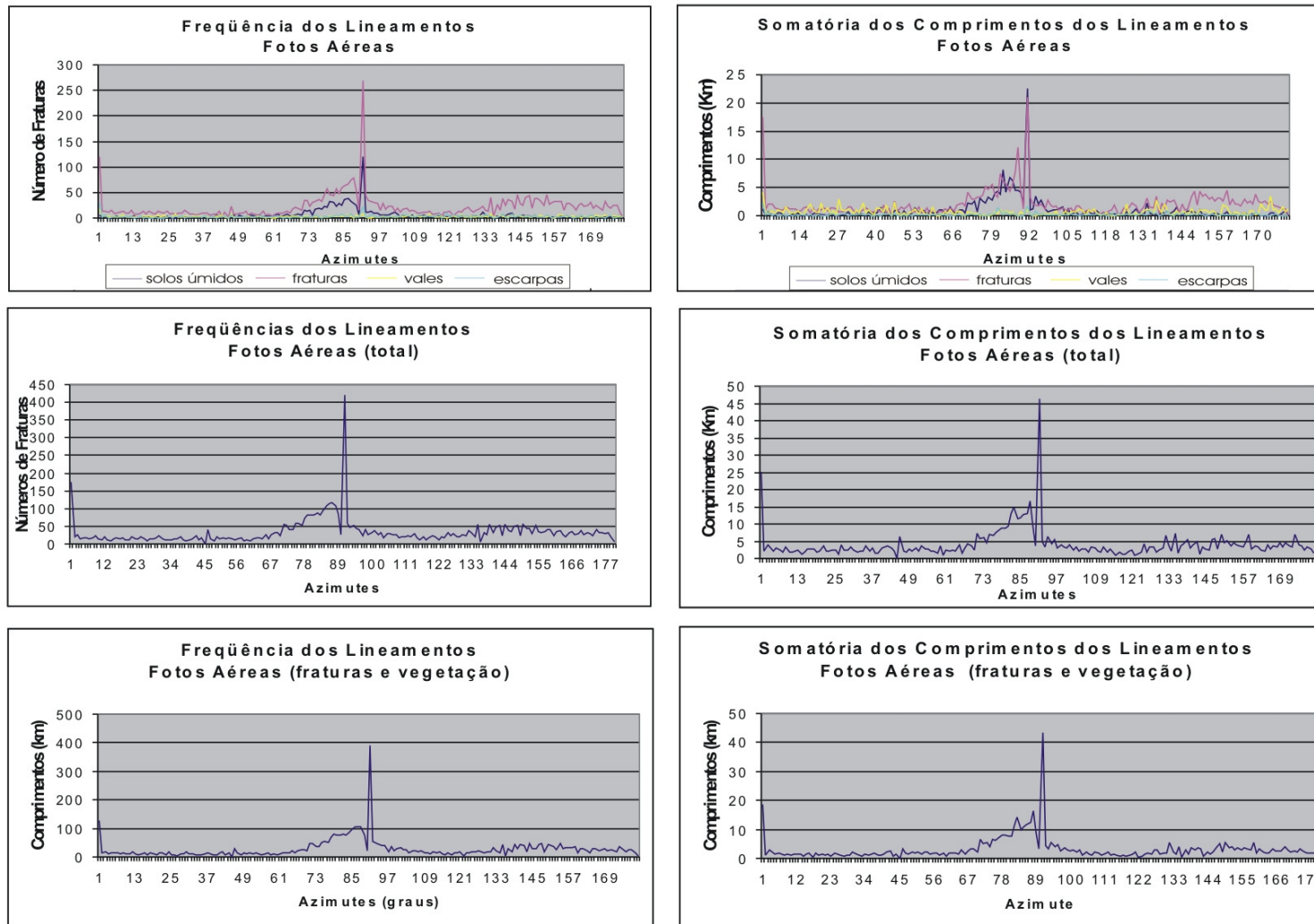


Figura 5.3: Histogramas relacionando o total de lineamentos das fotografias aéreas, conforme: (i) azimuth vs. frequência relativa dos lineamentos (coluna à esquerda) e (ii) azimuth vs. comprimento total (coluna à direita). Nos histogramas da primeira linha os lineamentos estão classificados por tipo; nos da segunda está o total e nos da terceira foram representados apenas os lineamentos (e seus comprimentos associados) considerados de significado tectônico.

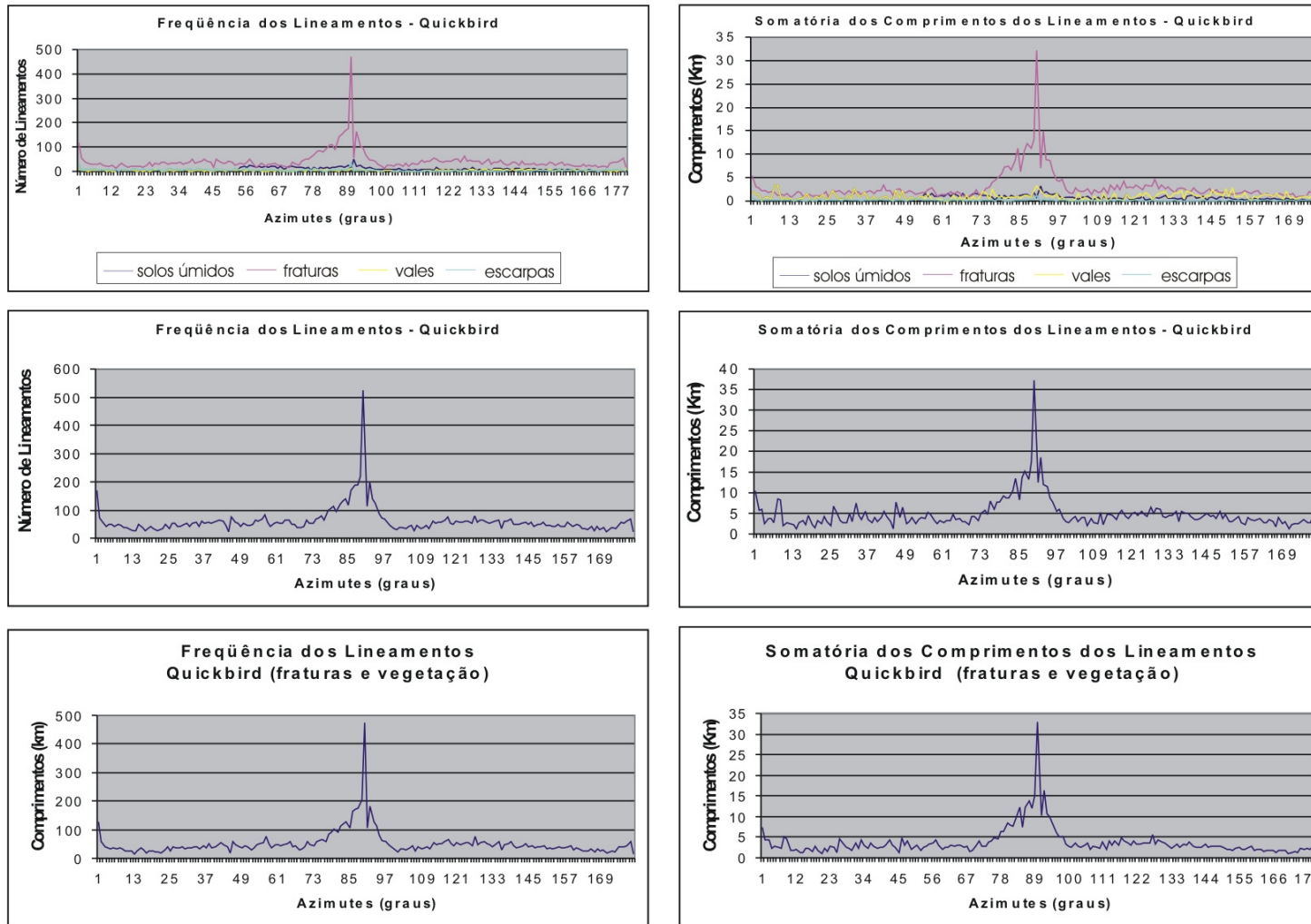


Figura 5.4: Histogramas relacionando o total de lineamentos das imagens pancromática do satélite *Quickbird*, conforme: (i) azimuth vs. frequência relativa dos lineamentos (coluna à esquerda) e (ii) azimuth vs. comprimento total (coluna à direita). Nos histogramas da primeira linha os lineamentos estão classificados por tipo; nos da segunda está o total e nos da terceira foram representados apenas os lineamentos (e seus comprimentos associados) considerados de significado tectônico.

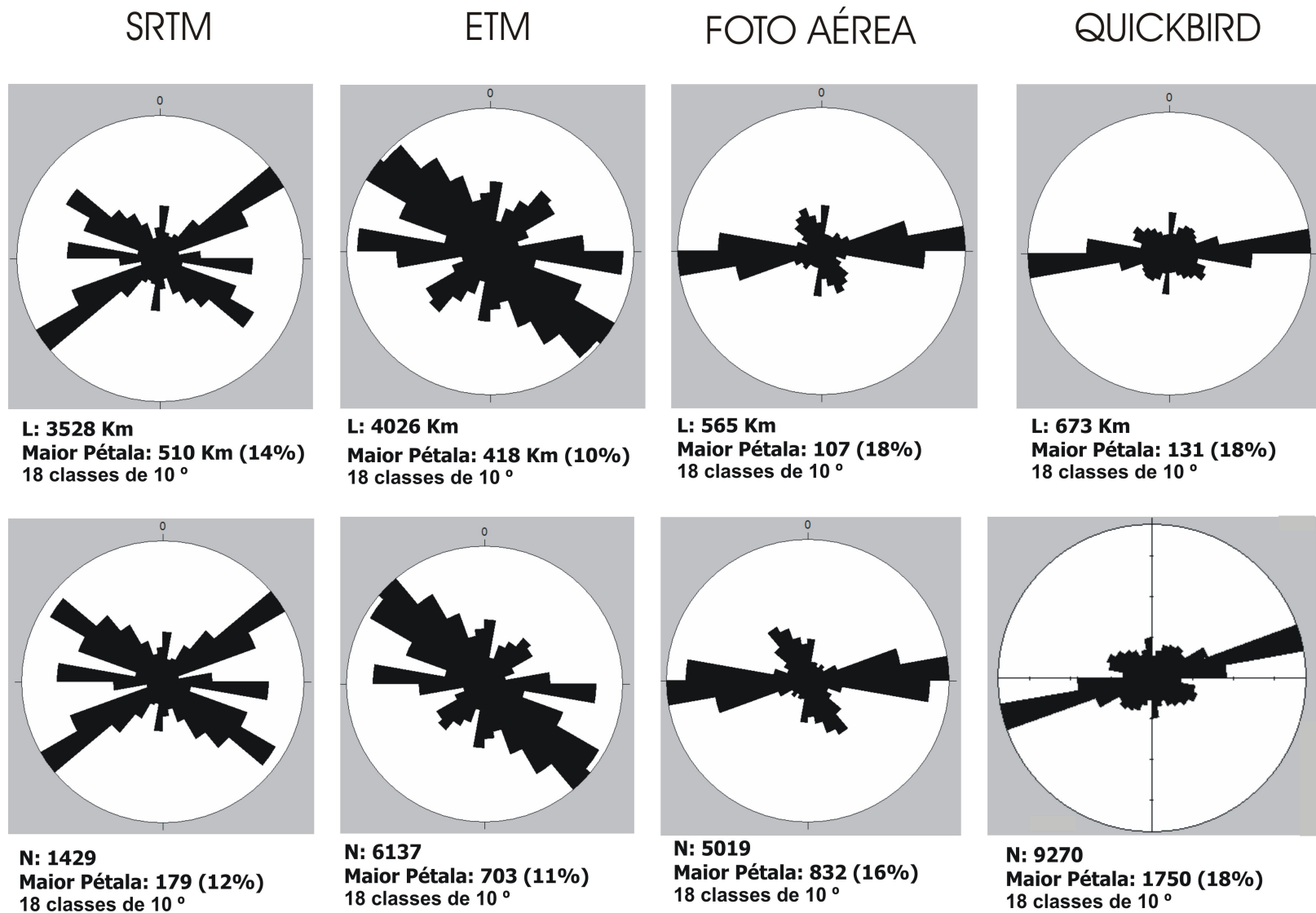


Figura 5.5: Rosetas do total de lineamentos realçados pelos quatro sensores. Dois tipos de classificação azimutal, a partir: (i) do comprimento acumulado dos lineamentos (rosetas da linha superior); e (ii) da frequência relativa dos lineamentos (rosetas da linha inferior).

Em todas as rosetas foram identificados quatro *sets* preferenciais (NW, NS, NE, EW), com exceção das fotografias aéreas, onde o *set* NE não foi identificado. A análise das rosetas permitiu atribuir ao *set* NS a menor dispersão e comportamento constante nas diversas escalas, permanecendo com frequência intermediária em relação aos demais *sets*. O *set* NE obteve melhor destaque através do produto do radar da *SRTM*, aumentando em dispersão com o crescimento da escala de trabalho – exceção da fotografia-aérea. O *set* NW, embora muito disperso (cerca de 30°) foi identificado mais nitidamente nas imagens do satélite *Landsat 7 ETM+* e indicou dispersão crescente com o aumento da escala de trabalho. O *set* EW, de baixa dispersão, foi bem definido em todas as rosetas, embora sua maior frequência tenha sido nos produtos de alta resolução espacial.

De um modo geral, os *sets* NE e NW foram melhor ressaltados e se mostraram menos dispersos nos produtos de sensores de menor resolução espacial; enquanto os *sets* NS e EW predominaram nitidamente nos produtos de sensores de maior resolução espacial, apresentando dispersão constante em todas as escalas. Tais observações sugerem que os *sets* NE e NW estejam relacionados a estruturas regionais, cuja visualização se torna mais definida em imagens de menor resolução; já os *sets* NS e EW tendem a corresponder a estruturas locais ressaltadas preferencialmente pelos produtos de maior resolução.

A **Tabela 5.1** expressa para cada produto de sensor o intervalo azimutal dos *sets* NS, NE, EW e NW. Estes *sets* foram definidos com base nas classes de lineamentos (*fraturas, escarpas, solos úmidos e vales*).

Sensores de média resolução			
(-) escarpas			
SRTM		LANDSAT 7 ETM+	
NS	347 a 017	NS	348 a 015
NE	026 a 067	NE	018 a 068
EW	072 a 102	EW	072 a 102
NW	288 a 333	NW	289 a 345
Sensores de alta resolução			
(-) escarpas e vales			
FOTOS AÉREAS		QUICKBIRD	
NS	0 a 012	NS	354 a 008
NE	-	NE	025 a 066
EW	064 a 102	EW	069 a 105
NW	306 a 354	NW	290 a 341

Tabela 5.1: Intervalos azimutais em graus dos *sets* identificados para cada sistema de sensor. Para a definição dos intervalos azimutais dos *sets*, dentre as classes de lineamentos definidas (*fraturas, drenagens, vegetação e escarpas*), foram desconsiderados os lineamentos não diretamente associados a condicionantes tectônicos: (i) *escarpas* - para os sensores de média resolução; e (ii) *escarpas e vales* - para os sensores de alta resolução.

Dentre as classes de lineamentos existentes (*fraturas, vales, solos úmidos e escarpas*), os lineamentos classificados como escarpas do relevo não contribuíram para definição dos *sets* e, conseqüentemente, foram desconsiderados na determinação dos intervalos azimutais dos produtos do radar da *SRTM* e do satélite *Landsat ETM7+*. Isto ocorreu porque estes lineamentos não apresentaram picos significativos nos histogramas elaborados a partir dos sensores de média resolução. Por motivos

análogos, os lineamentos classificados como escarpas do relevo e os lineamentos classificados como vales com larguras superiores a 10 m também não foram considerados na delimitação dos intervalos azimutais dos *sets* nos produtos de sensores de alta resolução (fotos aéreas e satélite *Quickbird*).

V.2 - Densidade de Lineamentos

A densidade de lineamentos foi calculada separadamente para cada produto de sensor com base na área de cobertura imageada por todos os sensores (área de cobertura do satélite *Quickbird*) e com base nas respectivas áreas de cobertura de cada sensor. Este cálculo foi feito para (1) o total de lineamentos (**Tabela 5.2**); (2) o total de lineamentos pertencentes apenas aos *sets* NE, NW, NS e EW; e feito (3) individualmente nos lineamentos pertencentes a cada *set* (**Tabela 5.3**). Optou-se por discriminar os valores relativos ao número, à somatória dos comprimentos e à densidade dos lineamentos.

A **Tabela 5.2** lista à esquerda, o número, a somatória dos comprimentos e a densidade do total de lineamentos identificados a partir de cada sistema de sensor com suas respectivas áreas de cobertura; e à direita aqueles valores calculados a partir da área imageada igualmente pelos quatro sensores.

SENSORES	nº	ΣL (km)	A (km ²)	ρ ($\Sigma L / \text{km}^2$)	nº	ΣL (km)	A (km ²)	ρ ($\Sigma L / 149 \text{ km}^2$)
SRTM	1429	3528	3.753	0,94	359	234,78	149	1,58
LANDSAT 7 ETM+	6137	4026	3.753	1,07	3527	597,62		4,01
FOTOS AÉREAS	5019	565	456	1,24	7347	498,49		3,35
QUICKBIRD	9270	673	149	4,52	9270	673,00		4,52

Tabela 5.2: Dados quantitativos relativos à densidade de lineamentos para o total de feições lineares associadas a condicionantes tectônicas inseridas nas respectivas áreas de cobertura de cada sensor; (nº = número de lineamentos; ΣL = somatória do comprimento de lineamentos; A = área de cobertura do sensor considerada no cálculo da densidade de lineamentos; ρ = densidade de lineamentos).

Os resultados obtidos indicaram que as maiores densidades de lineamentos foram encontradas através dos produtos de sensores de maior resolução espacial. Exceção ocorre para os valores obtidos com base nos produtos do satélite *Landsat 7 ETM+* considerando para o cálculo a área de cobertura do satélite *Quickbird*; isto provavelmente devido ao incremento de detalhes conferido às imagens do satélite pelo uso das filtragens direcionais. O realce dos lineamentos conforme a variação da direção de iluminação não pôde ser feito para as fotografias aéreas por estas serem um arquivo *raster*. No caso do satélite *Quickbird*, a aplicação de filtragens direcionais resultou em enorme quantidade de ruídos, mascarando a identificação dos quatro *sets* de lineamentos.

A **Tabela 5.3** sintetiza os dados de densidade de fraturamento obtidos para o total de lineamentos inseridos dentro dos quatro *sets* e para os lineamentos contidos em cada um destes. Com base nas densidades de lineamentos obtidas separadamente para cada *set*, tanto para as áreas de

coberturas respectivas a cada sensor, quanto para a área de cobertura comum aos quatro sensores, observaram-se maiores valores correspondentes aos *sets* NE e NW para os produtos de sensores de média resolução, bem como maiores valores correspondentes ao *set* EW para os produtos de sensores de alta resolução. O *set* NS indicou as menores densidades em todos os produtos de sensores, com exceção daqueles extraídos através dos produtos de satélite *Landsat 7 ETM+*, inseridos na área de cobertura do satélite *Quickbird*.

Para a comparação da resposta dos diversos sensores quanto à densidade de lineamentos, foi necessária a delimitação de polígonos de mesmas dimensões igualmente inseridos na área de cobertura imageada pelos quatro sensores. Este polígono corresponde à área de cobertura do satélite *Quickbird*. Para cada um dos quatro sensores foram gerados mapas com os respectivos lineamentos inseridos nas 21 subestações delimitadas (**Figuras 5.6a-b** a **5.7a-b**). As densidades de fraturamento foram calculadas para cada subestação, as quais em seguida foram submetidas a uma análise comparativa.

Para cada um dos quatro sensores, as densidades de lineamento contidos em cada uma das 21 subestações (de 4 km² cada), se encontram expressas na forma de gráficos de colunas (**Figuras 5.8**). Os gráficos de colunas mostram que a subestação n° 3 é a que apresenta maior densidade de lineamentos expressos pelos satélites *Landsat 7 ETM+*, *Quickbird* e pelas fotografias aéreas. A subestação n° 8 apresentou maior densidade de lineamentos de acordo com o imageamento do radar *SRTM* (**tabelas 5.4 e 5.5**).

Em todas as análises, independentemente do sensor utilizado, a subestação que apresentar maior densidade de fraturamento (ρ_f) deve obrigatoriamente apresentar maior somatória dos comprimentos dos lineamentos (ΣL), já que estas variáveis se relacionam pela fórmula $\rho_f = \Sigma L/A$, onde A corresponde à área considerada para a análise, no caso 4 km² para cada subestação.

O n° de lineamentos não necessariamente se comporta de modo análogo, devido ao fato desta variável discreta estar sujeita ao “efeito de truncamento” (*truncation effects* – **Olding, 1997**). Este efeito foi identificado por **Olding (1997)** durante análise fractal de lineamentos realizada pelo autor. **Olding (1997)** constatou que quando a área de um mapa de lineamentos é redimensionada para uma área menor, a continuidade dos lineamentos que atravessam o novo limite estipulado é interrompida, fazendo com que a relação n° de lineamentos/somatória de comprimentos de lineamentos aumente com a diminuição da área considerada para o cálculo de densidade. Isto é, a relação entre n° de lineamentos e somatória de comprimento de lineamentos sofre variações conforme o tamanho inserido de um mesmo lineamento na área considerada. Este fato favorece o estabelecimento da somatória do comprimento dos lineamentos como parâmetro mais aceitável para a subdivisão dos conjuntos de lineamentos e para o cálculo de densidade destes, ao invés da quantidade (número) de lineamentos. Tal parâmetro é importante tanto na determinação do intervalo azimutal dos conjuntos de estruturas, quanto na determinação da densidade de fraturamento de uma determinada região; a somatória do comprimento das fraturas, ao invés da quantidade (número) delas.

A densidade de lineamentos nas diversas subestações é apresentada em duas tabelas. A **Tabela 5.4** sintetiza dois parâmetros para cada um das 21 subestações: (1) o número total de lineamentos e (2)

a somatória do comprimento dos lineamentos extraídos pelos quatro produtos de sensores remotos. Nesta tabela, os elevados números de lineamentos observados para os produtos de sensores de alta resolução são exemplos clássicos dos efeitos de truncamento, referidos anteriormente. Este é o motivo pelo qual a quantidade total de lineamentos contidos nas subestações superou a quantidade total de lineamentos inseridos na área total de cobertura dos respectivos sensores de alta resolução. Na **Tabela 5.5** estão listados os resultados dos cálculos de densidade de lineamentos (em km/km² e em porcentagem) para cada subestação de 4 km².

SETS	SRTM				SRTM			
	nº	ΣL (km)	A (km ²)	ρ (ΣL/ 3753 km ²)	nº	ΣL (km)	A (km ²)	ρ (ΣL/149 km ²)
total	1.162	2.994,41	3.753	0,80	140	324,2683	149	2,18
NS	138	385,80		0,10	15	36,11139		0,24
NE	399	1.069,76		0,29	41	104,66085		0,70
EW	185	464,96		0,12	28	61,57862		0,41
NW	440	1.073,89		0,29	56	121,91744		0,82
SETS	LANDSAT 7 ETM+				LANDSAT 7 ETM+			
	nº	ΣL (km)	A (km ²)	ρ (ΣL/ 3753 km ²)	nº	ΣL (km)	A (km ²)	ρ (ΣL/149 km ²)
total	3.267	2.719,04	3.753	0,72	1.332	654,32	149	4,39
NS	530	373,65		0,10	174	77,8053		0,52
NE	817	691,37		0,18	216	118,22236		0,79
EW	664	598,03		0,16	253	121,07261		0,81
NW	1.256	1.055,99		0,28	689	337,22347		2,26
SETS	FOTOS AÉREAS				FOTOS AÉREAS			
	nº	ΣL (km)	A (km ²)	ρ (ΣL/ 456 km ²)	nº	ΣL (km)	A (km ²)	ρ (ΣL/149 km ²)
total	2.222	324,5107	456	0,71	3.603	407,87	149	2,74
NS	171	18,22116		0,04	262	22,58225		0,15
NE								
EW	1.415	237,5316		0,52	2.046	279,64615		1,88
NW	636	68,75794		0,15	1.295	105,64168		0,71
SETS	QUICKBIRD				QUICKBIRD			
	nº	ΣL (km)	A (km ²)	ρ (ΣL/ 149 km ²)	nº	ΣL (km)	A (km ²)	ρ (ΣL/149 km ²)
total	6.805	499,81	149	3,35	6.805	499,81	149	3,35
NS	574	34,35		0,23	574	34,35		0,23
NE	1.532	94,98		0,64	1.532	94,98		0,64
EW	2.753	235,34		1,58	2.753	235,34		1,58
NW	1.946	135,14		0,91	1.946	135,14		0,91

Tabela 5.3: Síntese dos dados de densidade de fraturamento obtidos para cada set e para o total de lineamentos. Os valores à esquerda foram obtidos considerando os conjuntos de lineamentos inseridos nas respectivas áreas de cobertura de cada sistema de sensor; os valores à direita consideram os conjuntos de lineamentos inseridos apenas na área de cobertura do satélite Quickbird, comum à cobertura dos demais sensores. (nº = nº de lineamentos; ΣL = somatória do comprimento de lineamentos; A = área de cobertura do sensor considerada no cálculo da densidade de lineamentos; ρ = densidade de lineamentos).

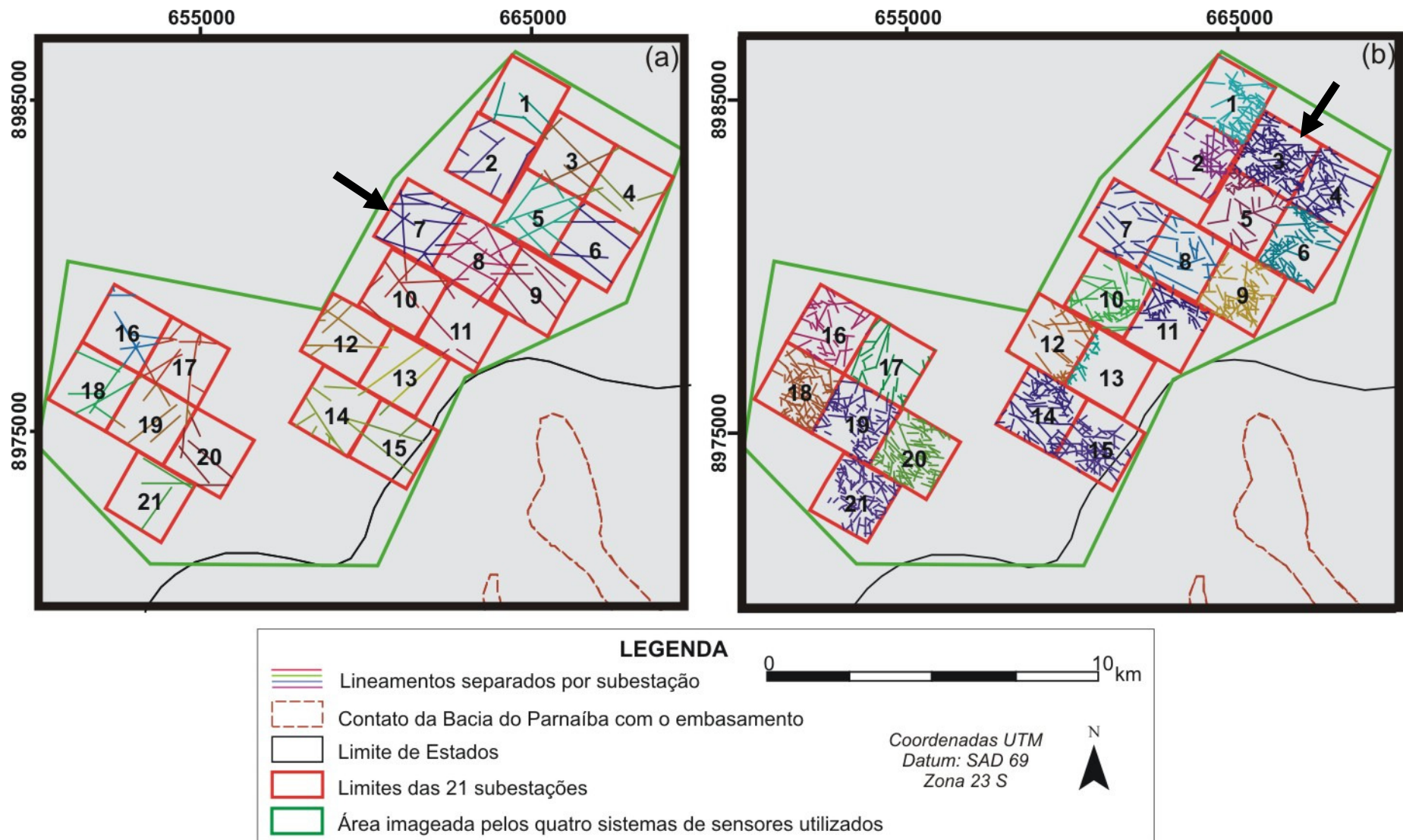


Figura 5.6 a-b: Mapas com o total de lineamentos contidos nas 21 subestações de coleta de dados, as quais foram subdivididas para a análise comparativa da densidade de lineamentos, através da integração dos produtos dos sistemas de sensores de média resolução: (a) radar SIR-C/X-SAR; (b) satélite Landsat 7 ETM+. A seta indica a subestação com maior densidade de lineamentos de acordo com cada sensor usado.

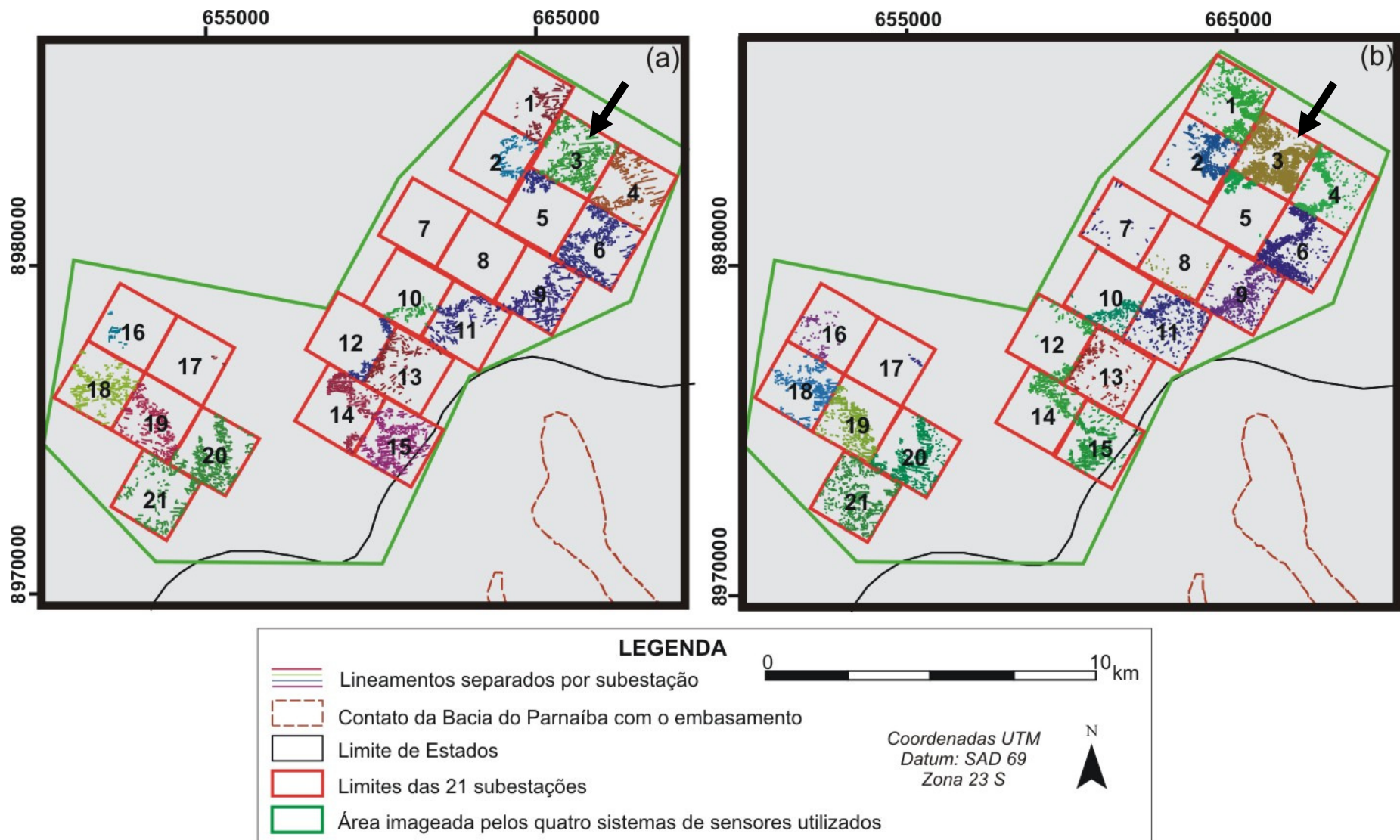


Figura 5.7 a-b: Mapas com o total de lineamentos contidos nas 21 subestações de coleta de dados, as quais foram subdivididas para a análise comparativa da densidade de lineamentos, através da integração dos produtos dos sistemas de sensores de alta resolução: (a) fotografias aéreas; (b) satélite *Quickbird*. A seta indica a subestação com maior densidade de lineamentos de acordo com cada sensor usado.

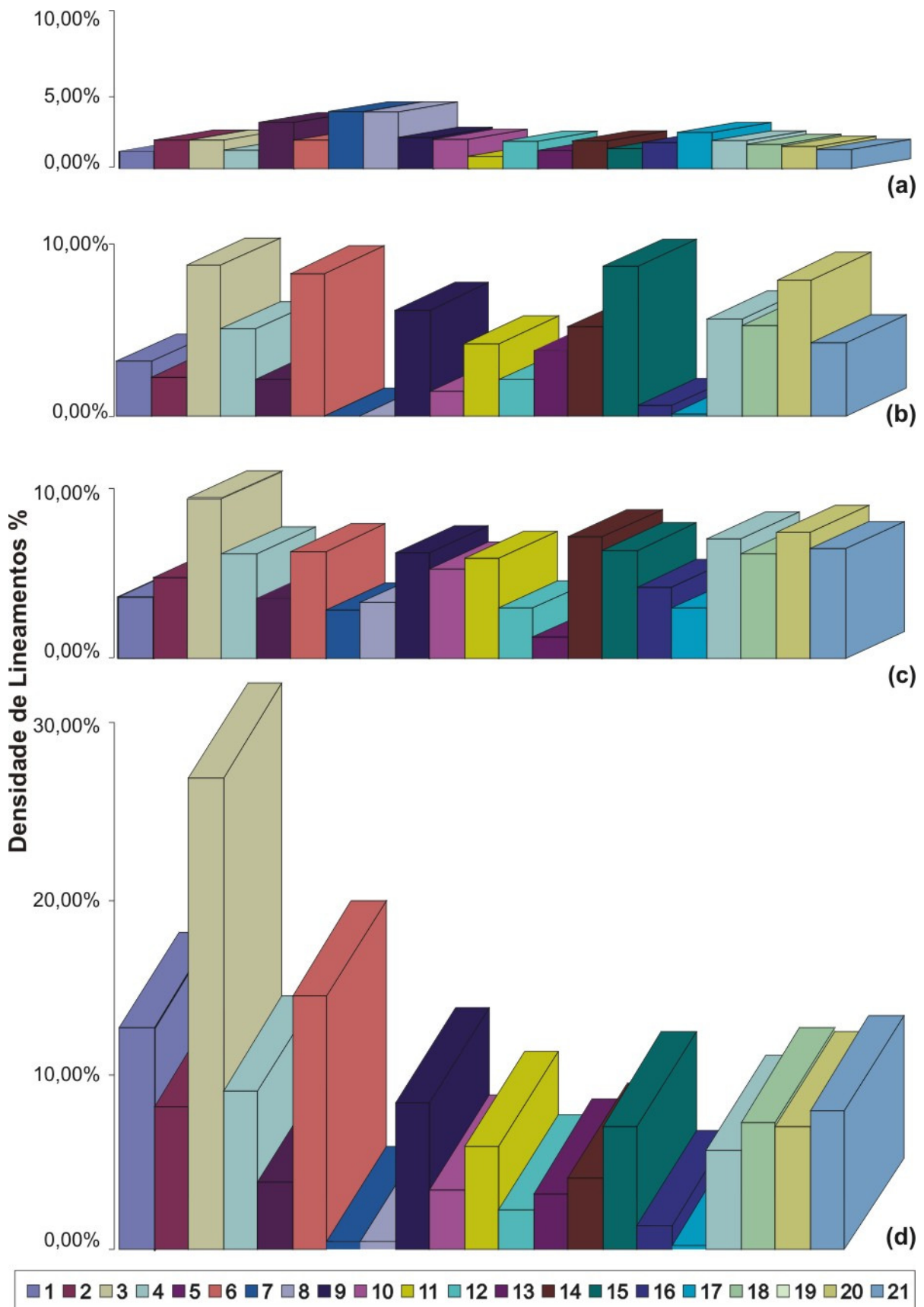


Figura 5.8 a-d: Gráficos comparativos entre as densidades de lineamentos para cada um dos quatro produtos de sensores: (a) radar da *SRTM*, (b) satélite *Landsat 7 ETM+* (c) fotografias aéreas, (d) satélite *Quickbird*; conforme as 21 subestações delimitadas para a análise de densidade. As 21 subestações estão enumeradas em ordem crescente da esquerda para a direita, cada coluna corresponde à respectiva área ilustrada nas figuras 5.6 e 5.7.

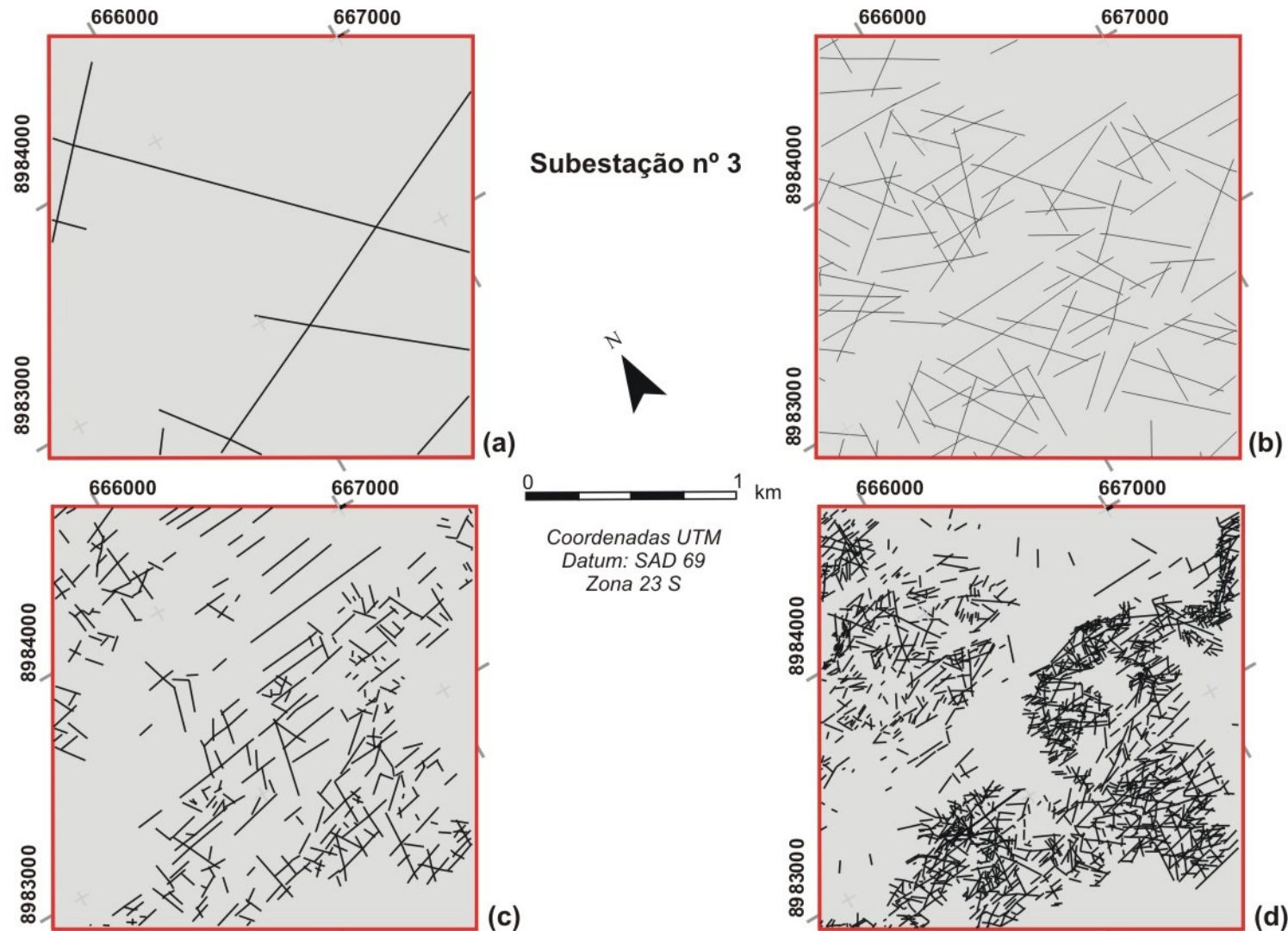
código da área	QUICKBIRD		FOTOS AÉREAS		LANDSAT 7 ETM+		SRTM	
	nº	ΣL (km)	nº	ΣL (km)	nº	ΣL (km)	nº	ΣL (km)
1	2.093	51,27	194	12,60	88	14,44	8	4,41
2	1.132	32,91	134	8,92	137	19,18	13	7,29
3	4.564	107,44	568	34,86	324	37,65	18	7,32
4	1.595	36,21	351	20,09	157	24,67	8	4,69
5	694	15,64	222	8,43	72	14,29	25	11,81
6	2.412	58,22	569	33,02	194	25,35	10	7,26
7	24	2,17	0	0,00	32	11,47	43	14,57
8	30	1,92	0	0,00	39	13,23	47	14,50
9	798	33,87	365	24,51	207	24,94	9	7,97
10	346	13,97	97	5,59	118	21,07	14	7,47
11	472	24,19	238	16,72	173	23,78	9	3,13
12	189	9,28	194	8,35	67	11,95	14	7,02
13	230	13,06	245	15,13	47	5,15	4	4,64
14	336	16,85	399	20,68	189	28,85	12	7,10
15	591	28,68	528	34,69	200	25,59	6	5,11
16	111	6,23	21	2,29	73	16,94	19	6,68
17	12	0,99	6	0,41	32	12,02	23	9,26
18	393	22,73	311	22,52	204	28,35	13	7,16
19	522	28,96	327	21,04	179	24,60	8	6,23
20	476	28,86	535	31,53	172	29,72	7	5,77
21	702	32,08	266	17,00	185	25,92	5	4,92
total	17.722	565,53	5.570	338,37	2.889	439,17	315	154,31

Tabela 5.4 Número total de lineamentos e a somatória do comprimento dos lineamentos extraídos pelos quatro produtos de sensores remotos, para cada um das 21 subestações inseridas na área de cobertura do satélite *Quickbird*.

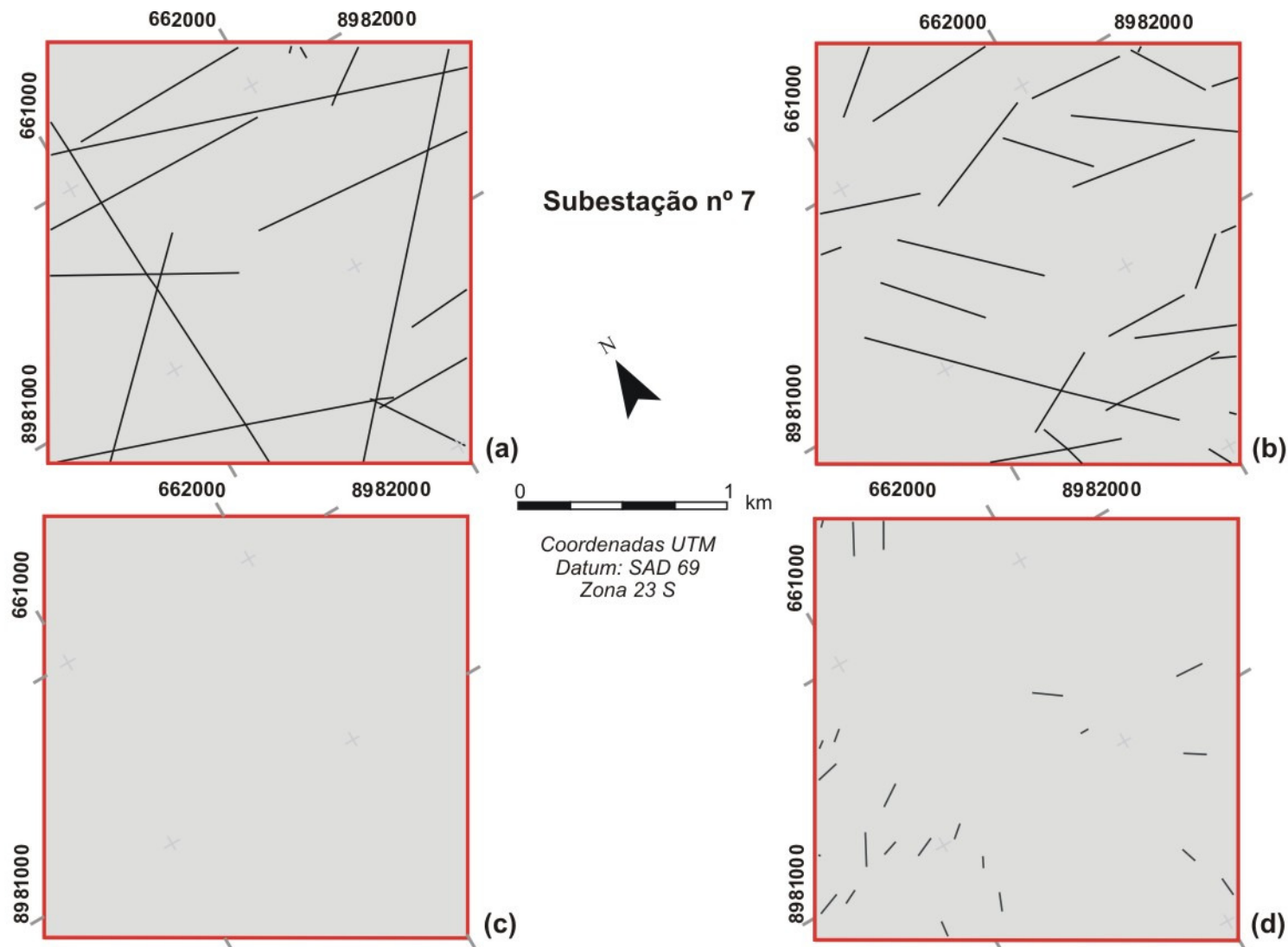
código da área	ρ (km/ km ²)			
	QUICKBIRD	FOTOS AÉREAS	LANDSAT 7 ETM+	SRTM
1	12,82%	3,15%	3,61%	1,10%
2	8,23%	2,23%	4,79%	1,82%
3	26,86%	8,71%	9,41%	1,83%
4	9,05%	5,02%	6,17%	1,17%
5	3,91%	2,11%	3,57%	2,95%
6	14,56%	8,26%	6,34%	1,81%
7	0,54%	0,00%	2,87%	3,64%
8	0,48%	0,00%	3,31%	3,63%
9	8,47%	6,13%	6,23%	1,99%
10	3,49%	1,40%	5,27%	1,87%
11	6,05%	4,18%	5,95%	0,78%
12	2,32%	2,09%	2,99%	1,76%
13	3,27%	3,78%	1,29%	1,16%
14	4,21%	5,17%	7,21%	1,77%
15	7,17%	8,67%	6,40%	1,28%
16	1,56%	0,57%	4,24%	1,67%
17	0,25%	0,10%	3,01%	2,32%
18	5,68%	5,63%	7,09%	1,79%
19	7,24%	5,26%	6,15%	1,56%
20	7,21%	7,88%	7,43%	1,44%
21	8,02%	4,25%	6,48%	1,23%
total	7,26%	4,15%	5,37%	1,85%

Tabela 5.5: Resultados dos cálculos de densidade de lineamentos (em %) para cada subestação de 4 km² inserida na área de cobertura do satélite *Quickbird*.

As Figuras 5.9a-d e 5.10a-d ilustram as subestações mais densamente fraturadas com base nos lineamentos interpretados por cada um dos sensores. A subestação de coleta nº 3 é a que possui a maior densidade de lineamentos, identificados nos produtos de sensores dos satélites *Landsat 7 ETM+* e *Quickbird* e fotografias aéreas. A subestação nº 7 apresentou maior densidade de lineamentos através dos produtos do radar da *SRTM*. Nesta subestação, lineamentos associados às grandes estruturas regionais se encontram melhor representados.



5.9 a-d: Mapa com o total de lineamentos contidos na subestação de coleta nº 3, e extraídos a partir dos produtos dos sistemas de sensores: (a) radar da *SRTM*, (b) satélite *Landsat 7 ETM+*, (c) fotografias aéreas, (d) satélite *Quickbird*. A estação nº 3 apresentou as maiores densidades de fraturamento das 21 subestações de coleta de lineamentos para cada um dos três sensores: *Landsat 7 ETM+* (9,41%), fotos aéreas (8,71%) e *Quickbird* (26,86%).



5.10 a-d: Mapa com o total de lineamentos contidos na subestação de coleta nº 7, e extraídos a partir dos produtos dos sistemas de sensores: (a) radar da *SRTM*, (b) satélite *Landsat 7 ETM+*, (c) fotografias aéreas, (d) satélite *Quickbird*. A estação nº 7 apresentou a maior densidade de fraturamento dentre as 21 subestações de coleta de lineamentos, somente através dos produtos do radar da *SRTM* (1,83%).

VI. SIGNIFICADO GEOLÓGICO DOS LINEAMENTOS

VI. SIGNIFICADO GEOLÓGICO DOS LINEAMENTOS

VI.1 - Inferência do significado geológico dos lineamentos através de critérios de sensoriamento remoto

A interpretação do significado geológico de lineamentos via sistemas de sensores orbitais e aéreos integra dados referentes ao comprimento, espaçamento, distribuição espacial, densidade, orientação e idade relativa do conjunto de lineamentos. Os dados podem ser visualmente analisados através dos mapas de lineamentos gerados para cada produto dos sistemas de sensores utilizados. Tais procedimentos devem também levar em consideração o tratamento estatístico realizado principalmente para parâmetros como orientação, comprimento e densidade dos lineamentos.

Nas imagens e nas fotos de sensores remotos, a idade relativa dos conjuntos de lineamentos foi tentativamente determinada com base em suas relações de truncamento. Estas se caracterizam, no caso das juntas, pela interrupção de um lineamento mais novo por um mais antigo; e, no caso das falhas, pelo cruzamento de um lineamento mais novo por sobre um mais antigo. Entretanto, somente em alguns casos foi verificada a relação de truncamento, devido à limitação da resolução espacial dos sistemas sensores, a qual condiciona o contraste dos tons de cinzas e a textura das imagens. Tais limitações fizeram com que a determinação da idade relativa entre os conjuntos de lineamentos levasse em conta principalmente as observações de campo, em detrimento apenas das análises via produtos de sensores remotos. A análise dos lineamentos em uma etapa pré-campo permitiu várias inferências, confirmadas no campo. A aplicação de tal análise para os mapas apresentados a seguir conduziu às seguintes interpretações:

- Os conjuntos de lineamento EW e NS ocorrem nos quatro produtos de sensores, mas são mais destacados nos produtos de maior resolução (fotos aéreas e satélite *Quickbird*). Cada um dos dois conjuntos apresenta espaçamentos entre seus lineamentos relativamente regulares, o que sugere que os mesmos representam conjuntos de juntas ortogonais. É notável a maior continuidade dos lineamentos do conjunto EW sobre o conjunto NS. O conjunto EW corresponde aos lineamentos mais contínuos e serve como barreira para a propagação do conjunto NS. Tais observações favorecem a classificação do conjunto EW como sendo mais antigo que o conjunto NS.
- O conjunto de lineamentos NE é expressivo nos produtos dos sensores de menor resolução, não chegando a definir um conjunto nas fotografias aéreas. Os lineamentos deste conjunto apresentam grandes comprimentos e espaçamentos variáveis, o que sugere que estes correspondam a grandes falhas geológicas, dada à menor dispersão e maior dimensão destas em meio ao contexto regional. Como este conjunto afeta rochas ordovício-silurianas e é paralelo aos lineamentos transbrasilianos referidos no Capítulo II, sugere-se aqui que o mesmo pode representar reativações pós-ordovício-silurianas de zonas de cisalhamento pré-cambrianas.

- O conjunto NW foi identificado nos quatro produtos de sensores. Ele é o mais disperso e aleatoriamente distribuído, possivelmente indicando estruturação mais tardia, influenciada e, portanto, desviada pelas estruturas pré-existentes. A interpretação realizada a partir dos produtos do satélite *Landsat 7 ETM+* mostrou notável correspondência deste conjunto com as principais drenagens da região, condicionadas pelas estruturas pré-existentes (juntas e falhas).

A confirmação do significado geológico dos lineamentos e sistemas de fraturas superficiais foi auxiliada por um modelo digital de elevação em escala regional, elaborado a partir da integração dos dados do radar da *SRTM* à imagem gerada pela fusão da banda pancromática do *Landsat 7 ETM+* com a composição *RGB 754* das bandas deste satélite. O produto gerado destacou vales encaixados e escarpas significativas no relevo (**Figura 6.1**).

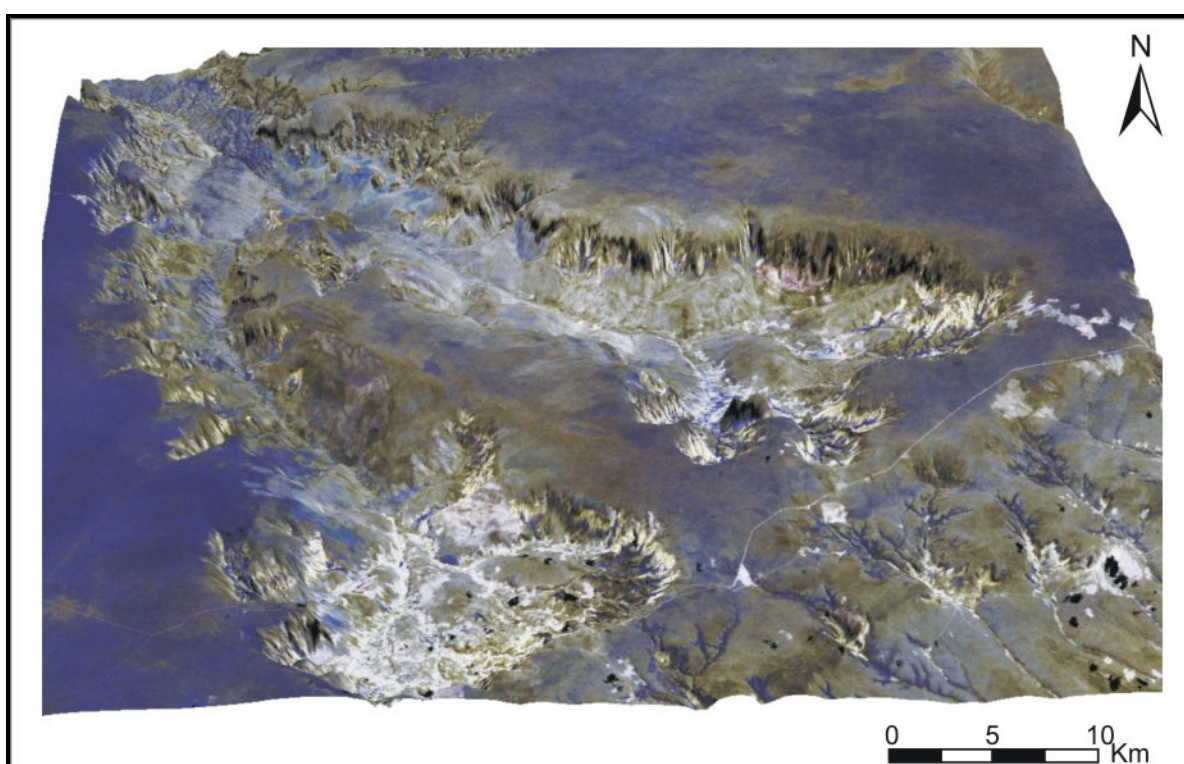


Figura 6.1: Modelo digital de elevação (MDE) elaborado a partir da integração dos dados do radar da *SRTM* com a imagem gerada pela fusão da banda pancromática do satélite *Landsat 7 ETM+* com a composição *RGB 754* das bandas deste satélite.

No entanto, a determinação mais acurada do significado geológico dos lineamentos necessitou de uma checagem de campo. O objetivo do trabalho de campo foi caracterizar as estruturas rúpteis segundo parâmetros observáveis em escala de afloramento, tais como abertura, tipo de preenchimento, relações de truncamento para determinação da idade relativa, indicador cinemático e rejeito.

As feições estruturais observadas em campo e suas possíveis correlações com os lineamentos analisados serão analisadas no tópico seguinte. As observações de campo foram realizadas em sete estações de coleta de dados distribuídas ao longo das áreas de cobertura dos sistemas de sensores (**Figura 6.2**). As estações foram selecionadas com base na quantidade de lineamentos observadas via

sensoriamento remoto e na possibilidade de acesso às áreas. Os mapas de lineamentos gerados para cada estação de coleta encontram-se a seguir (Figuras 6.3 a 6.15). Para todas as estações, os mapas referentes a cada produto de sensor representaram (1) o total de lineamentos e (2) apenas os lineamentos que se encontravam inseridos no intervalo azimutal dos conjuntos determinados nos histogramas, rosetas e tabelas mostrados anteriormente.

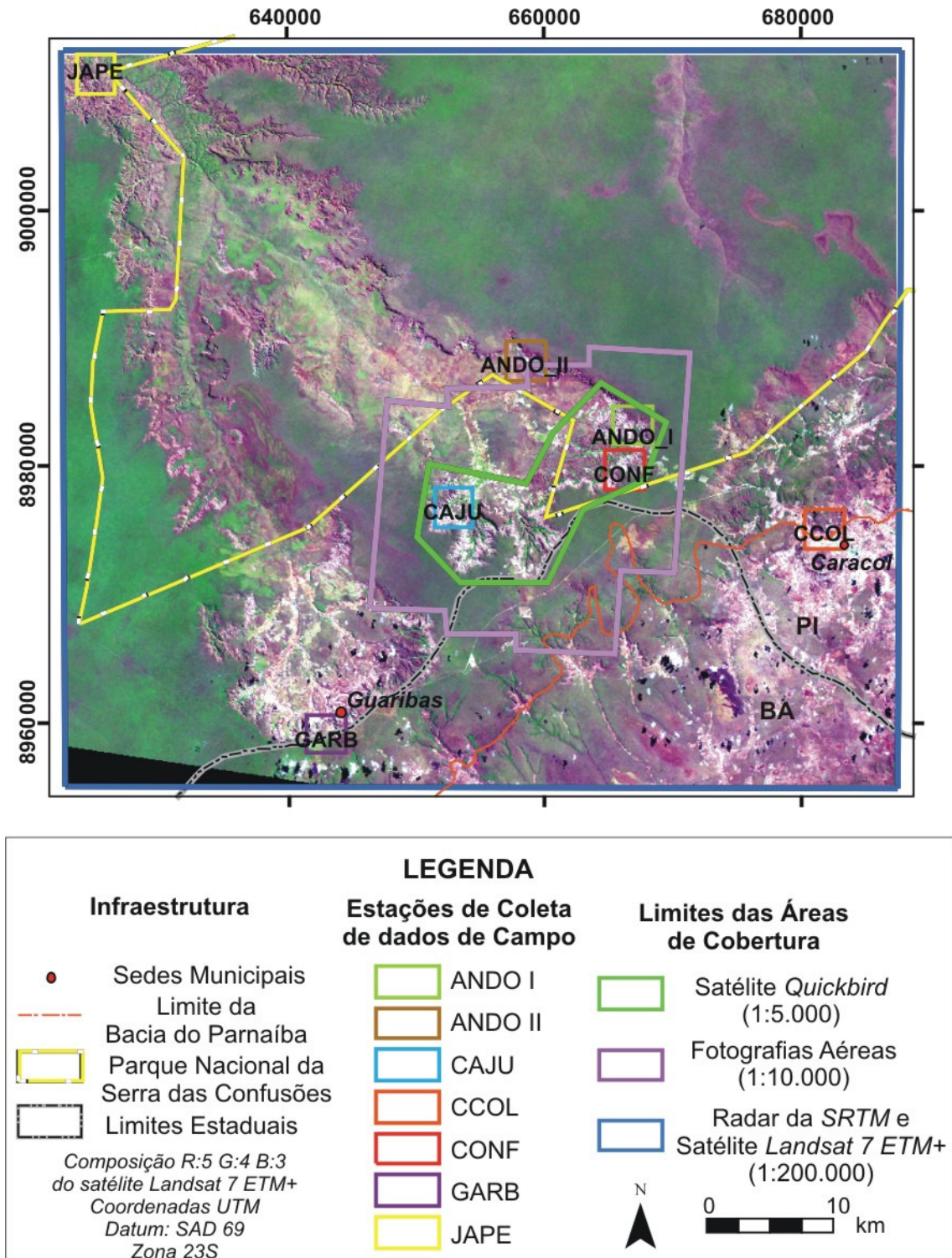


Figura 6.2: Estações de coleta de dados estruturais de campo.

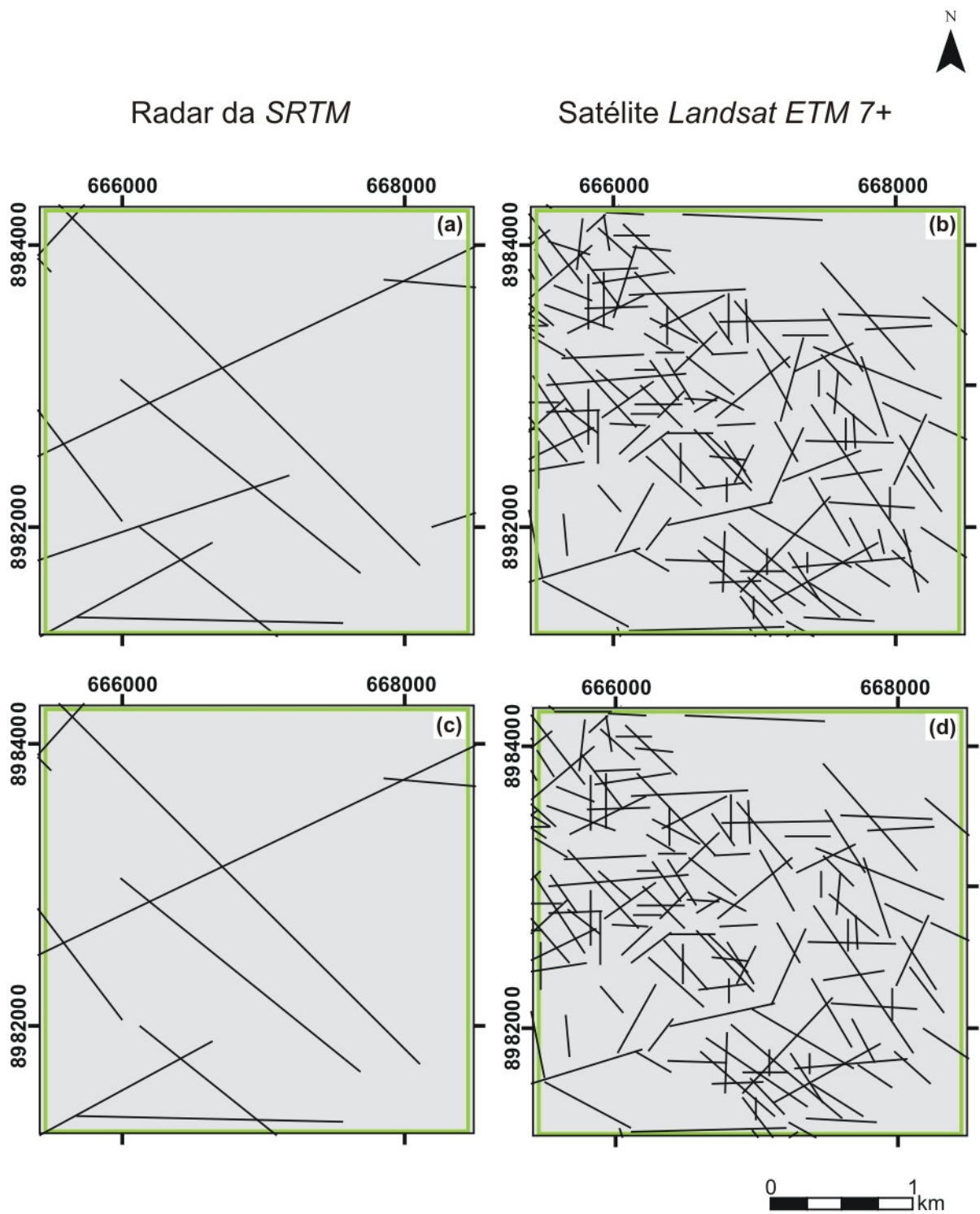


Figura 6.3 a-d: Mapas de lineamentos da estação ANDO_I extraídos dos produtos de sensores de média resolução: (a-b) mapas com o total de lineamentos identificados na área; e (c-d) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW. As figuras (a) e (c) correspondem aos lineamentos extraídos do radar da *SRTM*; e as (b) e (d) aos lineamentos extraídos do satélite *Landsat 7 ETM+*.

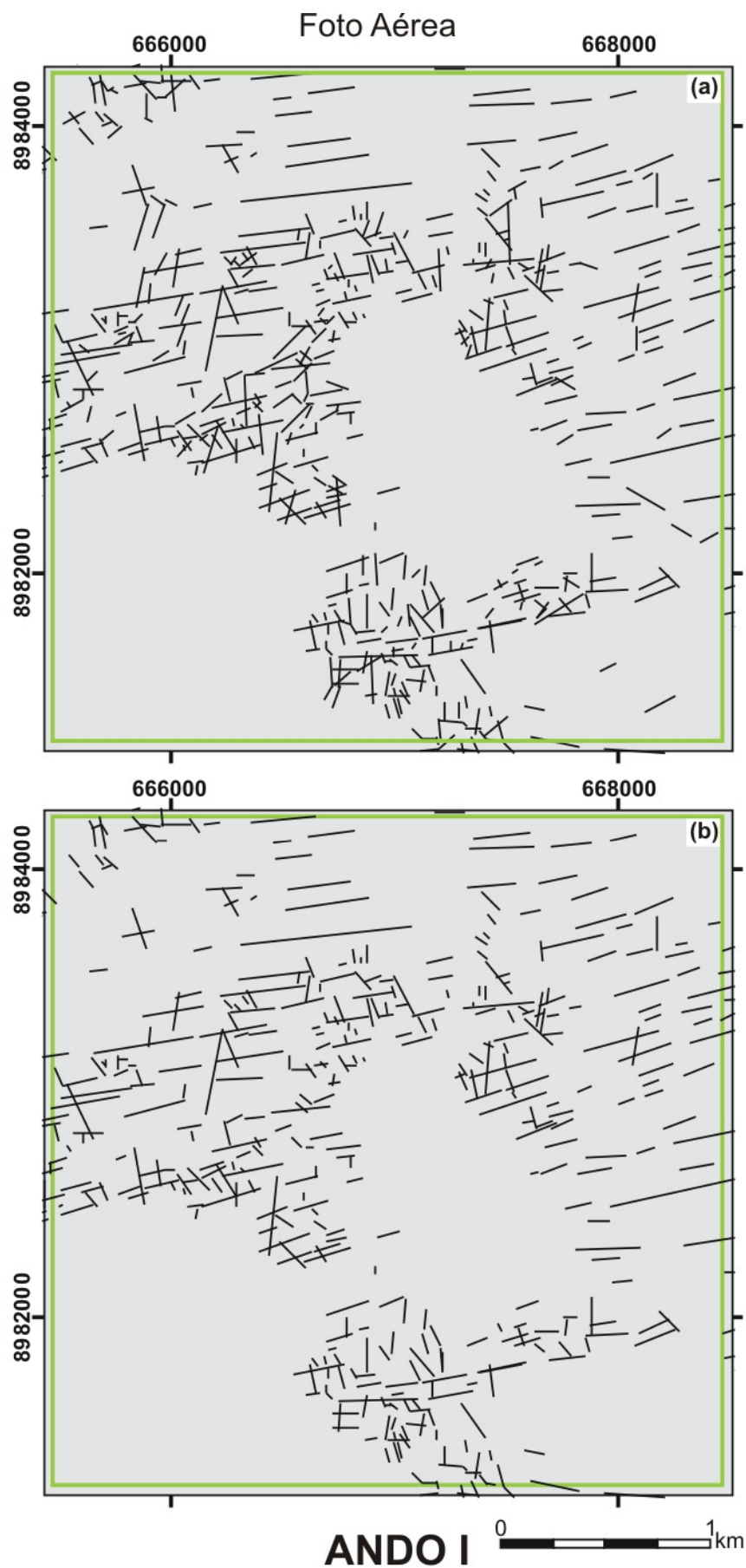


Figura 6.4 a-b: Mapas de lineamentos da estação ANDO_I, extraídos das fotografias aéreas: (a) mapa com o total de lineamentos identificados na área; e (b) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW.

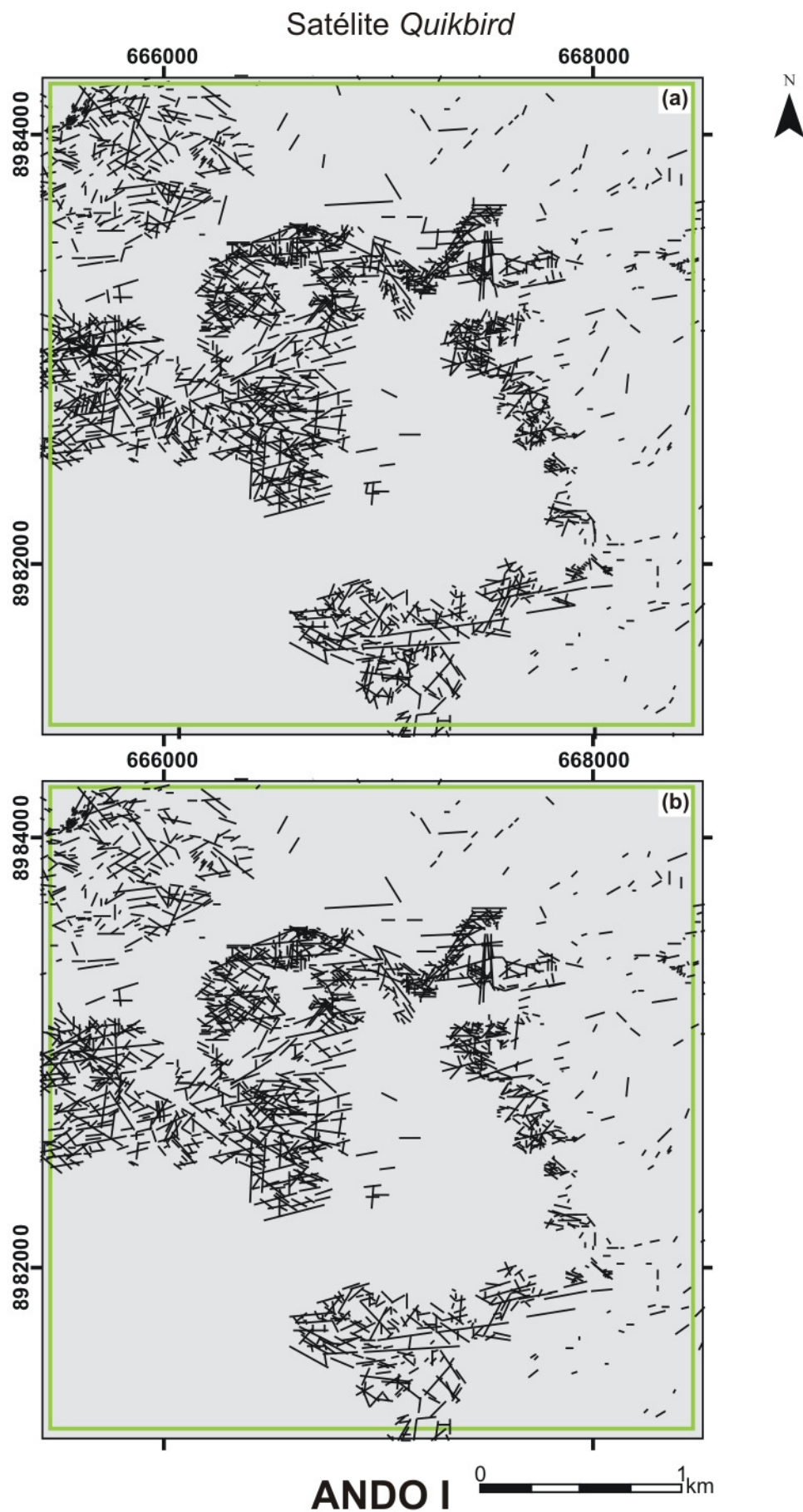


Figura 6.5 a-b: Mapas de lineamentos da estação ANDO_I, extraídos da imagem do satélite *Quikbird*: (a) mapa com o total de lineamentos identificados na área; e (b) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW.

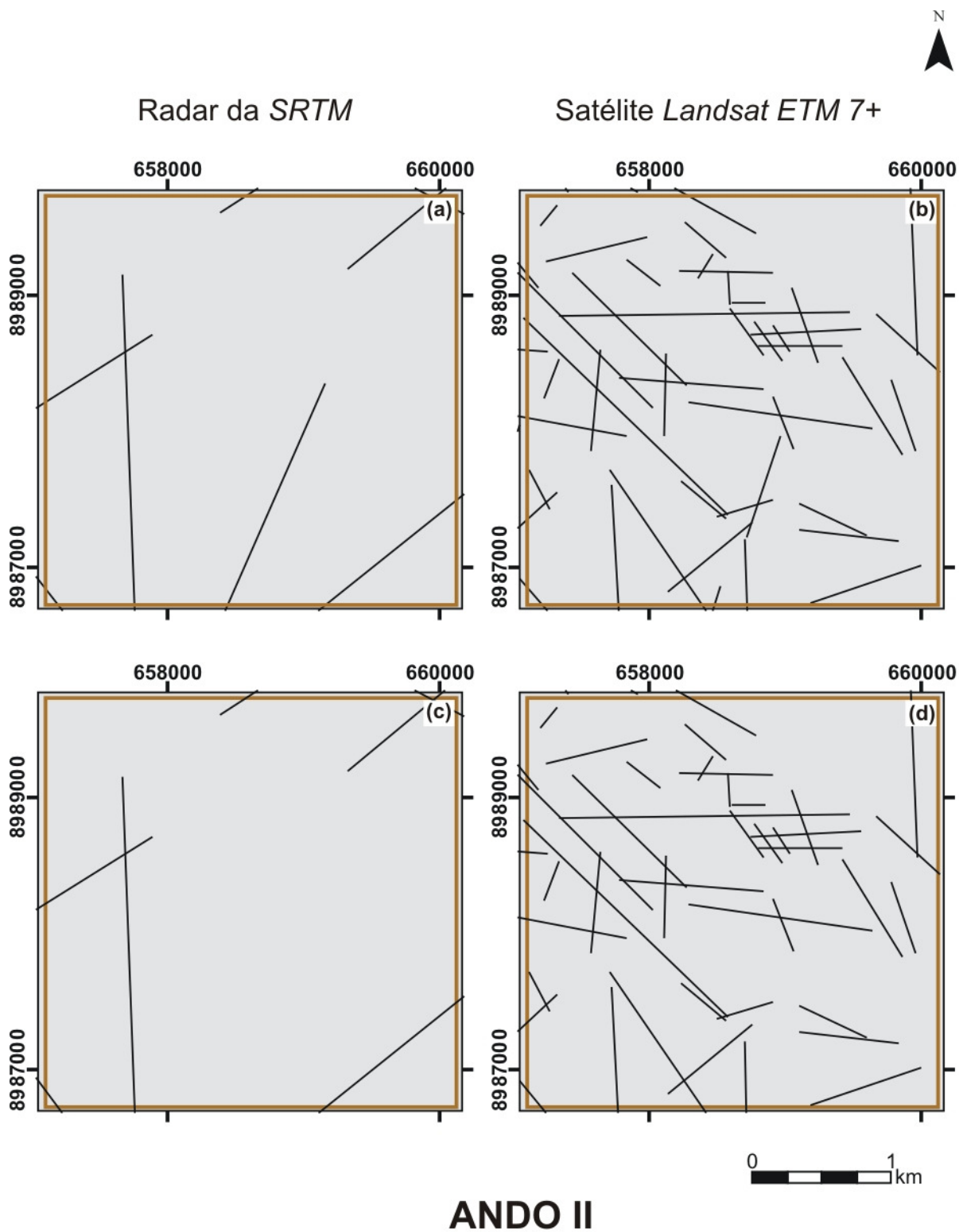


Figura 6.6 a-d: Mapas de lineamentos da estação ANDO_II extraídos dos produtos de sensores de média resolução: (a-b) mapas com o total de lineamentos identificados na área; e (c-d) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW. As figuras (a) e (c) correspondem aos lineamentos extraídos do radar da *SRTM*; e as (b) e (d) aos lineamentos extraídos do satélite *Landsat 7 ETM+*.

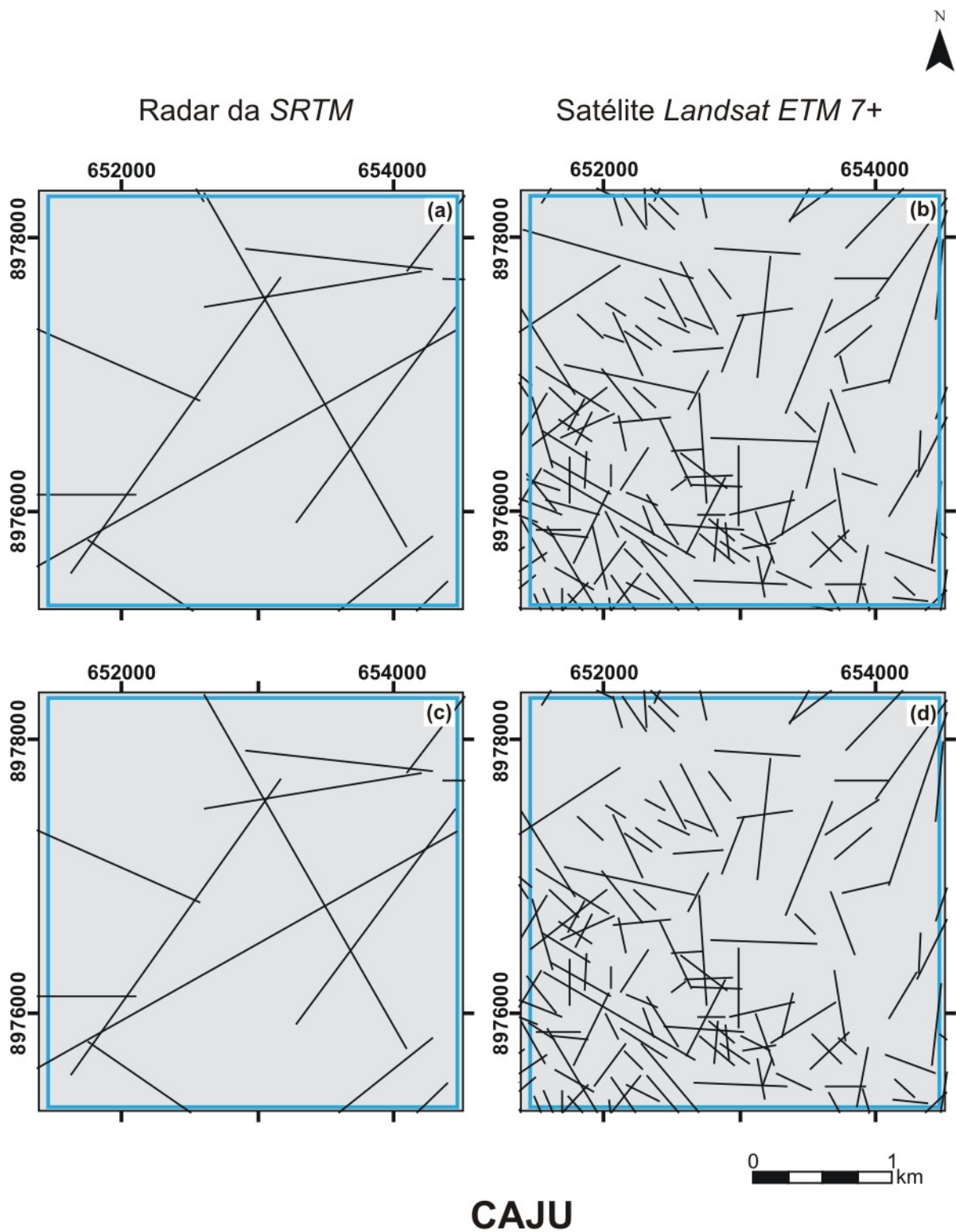


Figura 6.7 a-d: Mapas de lineamentos da estação CAJU extraídos dos produtos de sensores de média resolução: (a-b) mapas com o total de lineamentos identificados na área; e (c-d) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW. As figuras (a) e (c) correspondem aos lineamentos extraídos do radar da *SRTM*; e as (b) e (d) aos lineamentos extraídos do satélite *Landsat 7 ETM+*.

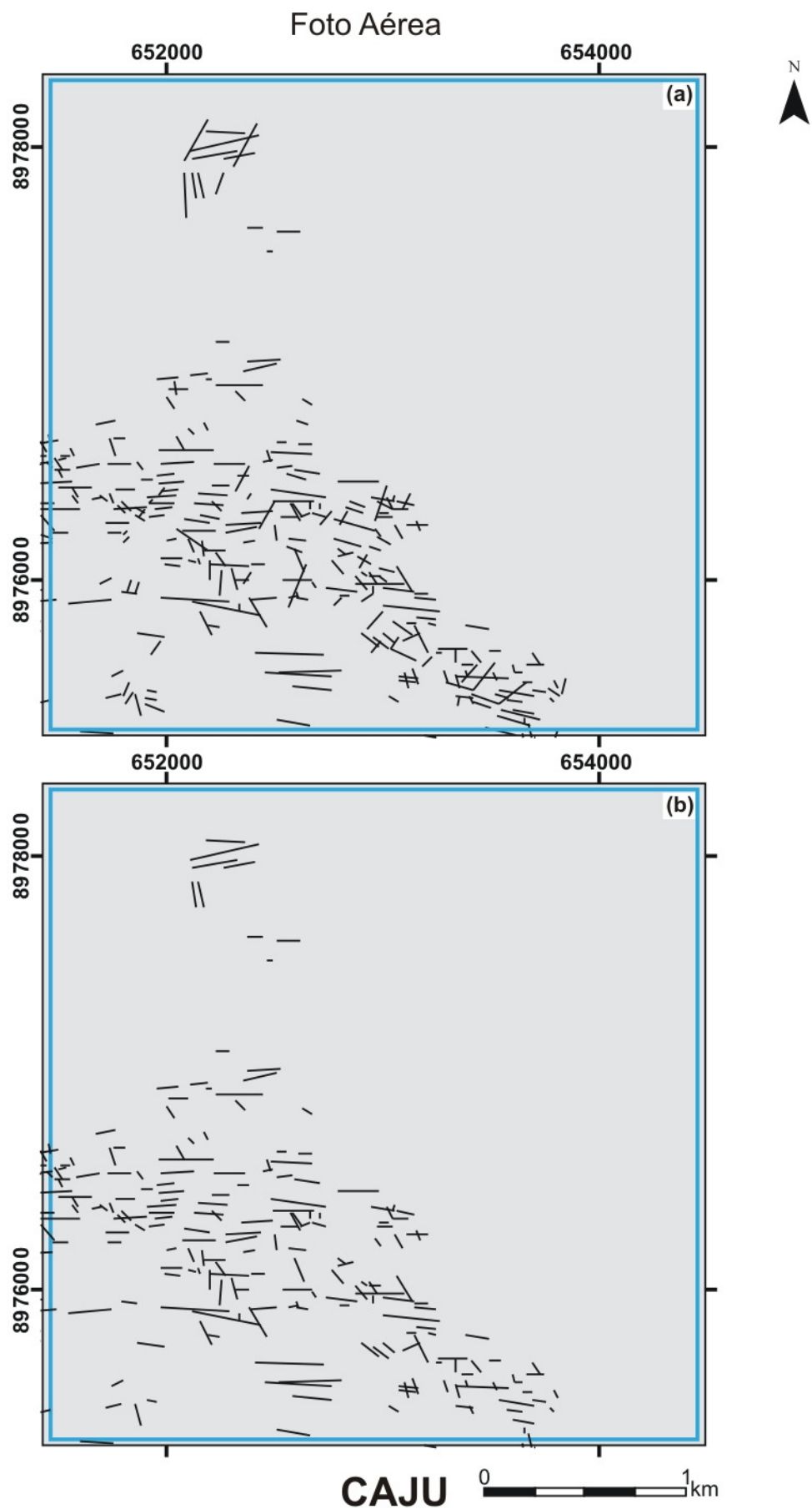


Figura 6.8 a-b: Mapas de lineamentos da estação CAJU extraídos das fotografias aéreas: (a) mapa com o total de lineamentos identificados na área; e (b) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW.

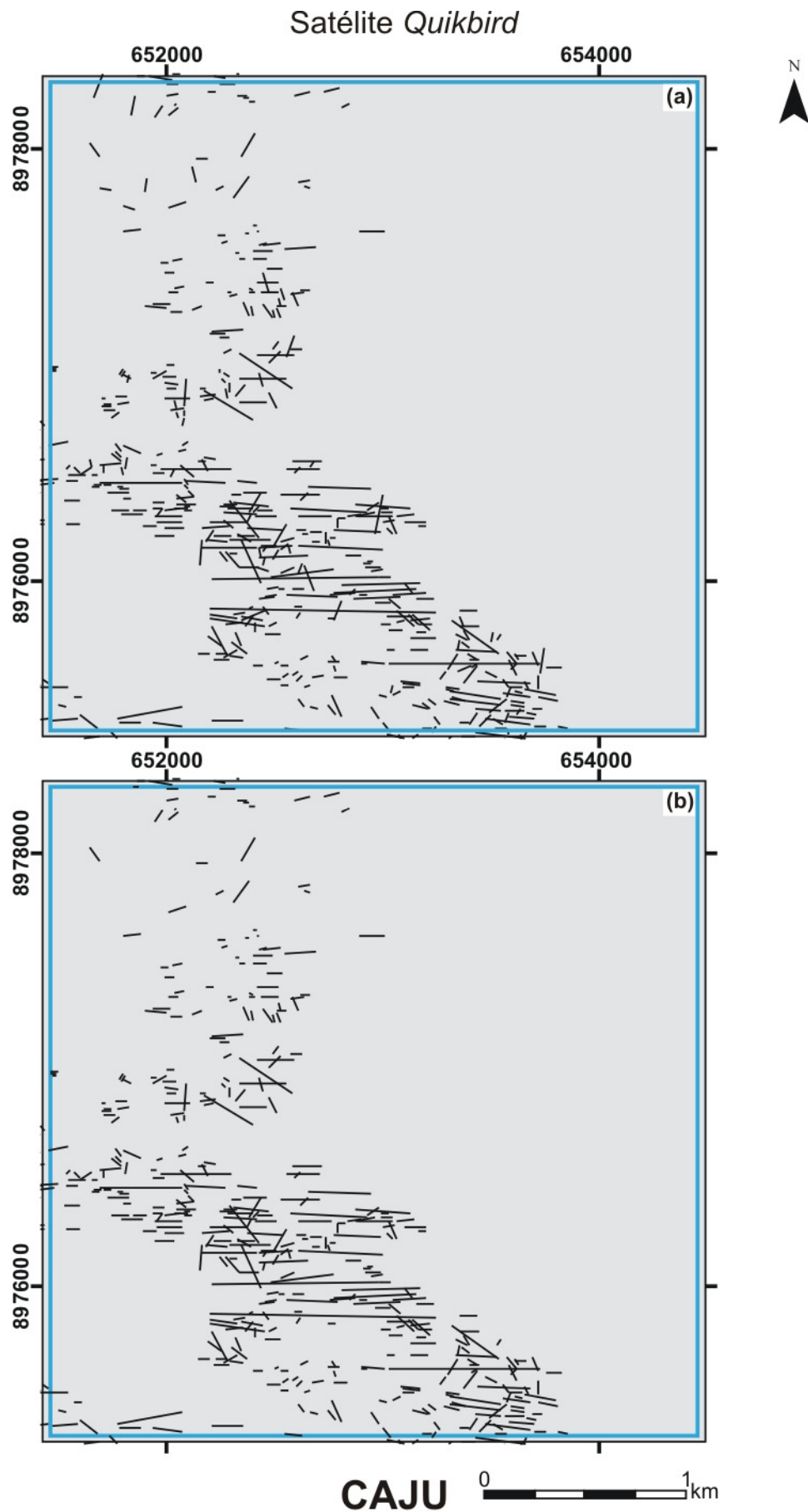


Figura 6.9 a-b: Mapas de lineamentos da estação CAJU extraídos da imagem do satélite *Quikbird*: (a) mapa com o total de lineamentos identificados na área; e (b) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW.

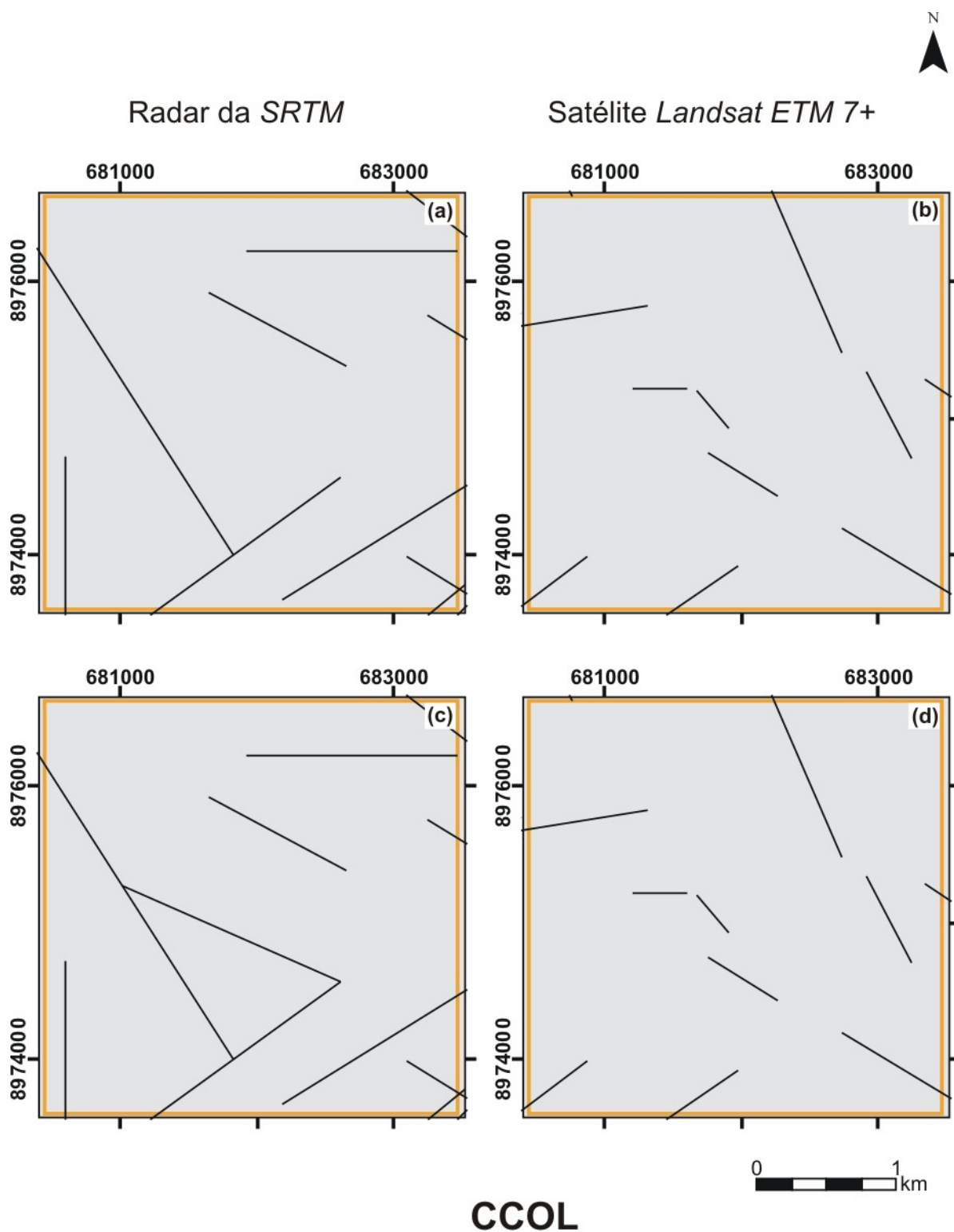


Figura 6.10 a-d: Mapas de lineamentos da estação CCOL extraídos dos produtos de sensores de média resolução: (a-b) mapas com o total de lineamentos identificados na área; e (c-d) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW. As figuras (a) e (c) correspondem aos lineamentos extraídos do radar da *SRTM*; e as (b) e (d) aos lineamentos extraídos do satélite *Landsat 7 ETM+*.

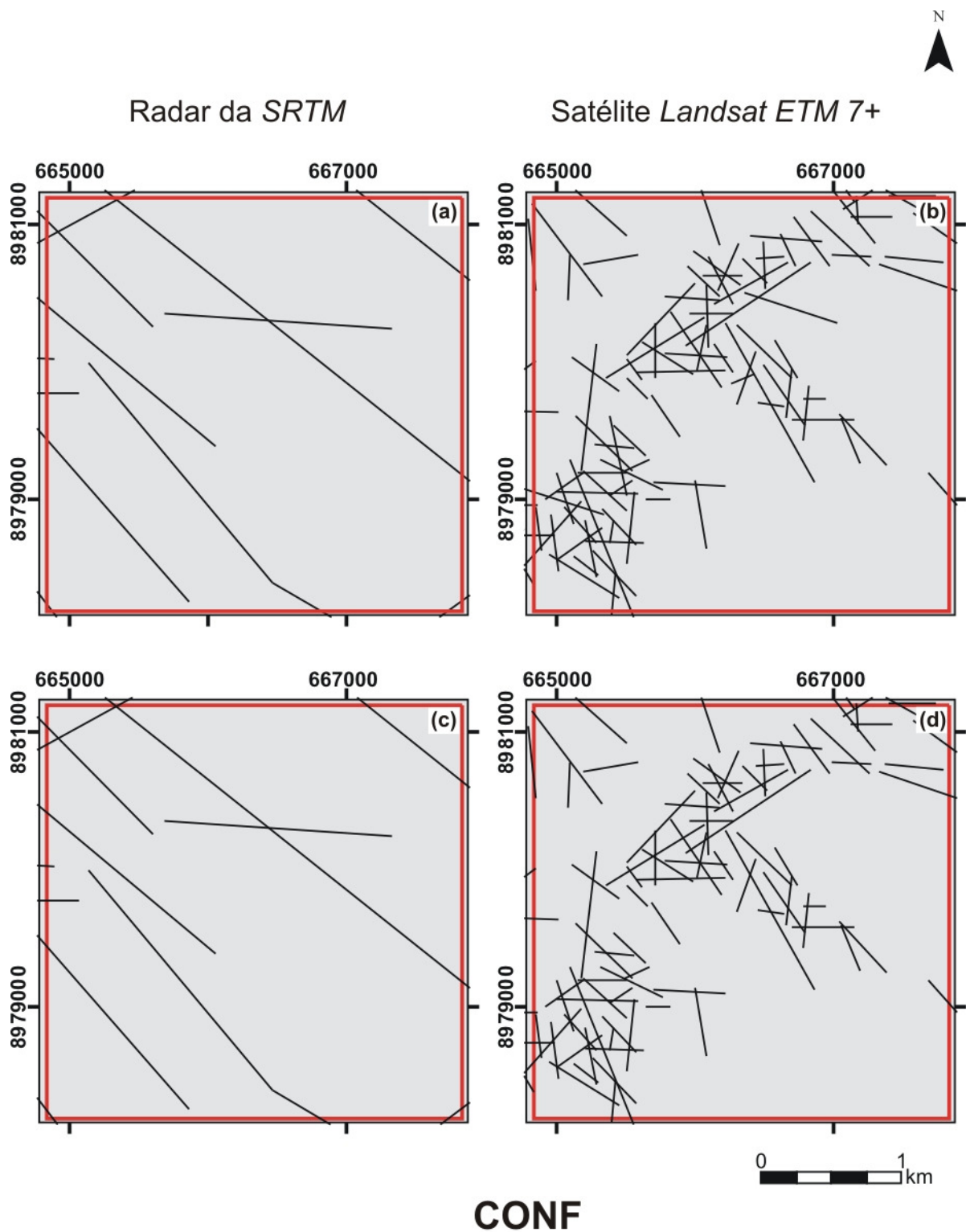


Figura 6.11 a-d: Mapas de lineamentos da estação CONF extraídos dos produtos de sensores de média resolução: (a-b) mapas com o total de lineamentos identificados na área; e (c-d) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW. As figuras (a) e (c) correspondem aos lineamentos extraídos do radar da *SRTM*; e as (b) e (d) aos lineamentos extraídos do satélite *Landsat 7 ETM+*.

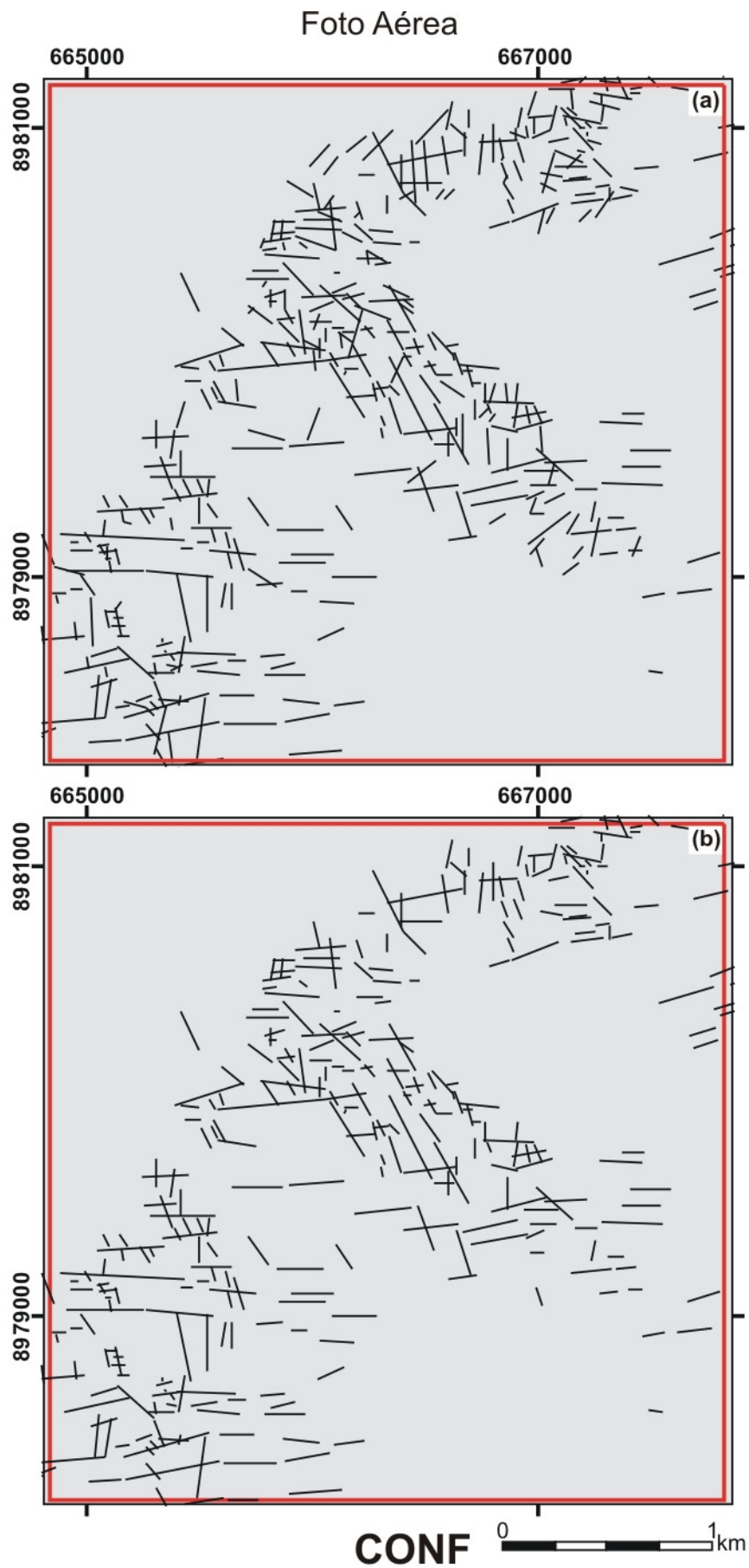


Figura 6.12 a-b: Mapas de lineamentos da estação CONF extraídos das fotografias aéreas: (a) mapa com o total de lineamentos identificados na área; e (b) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW.

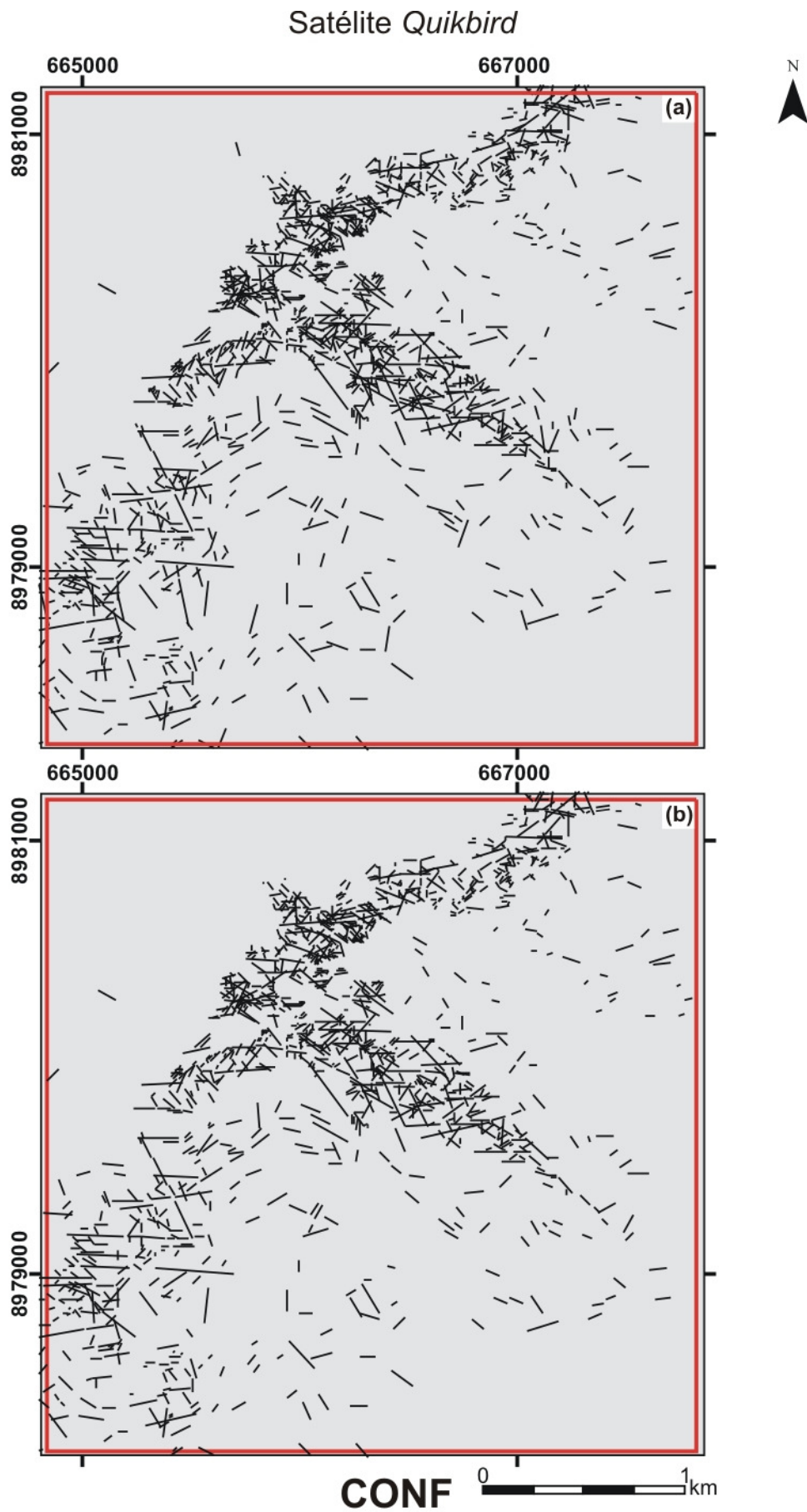


Figura 6.13 a-b: Mapas de lineamentos da estação CONF extraídos da imagem do satélite *Quikbird*: (a) mapa com o total de lineamentos identificados na área; e (b) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW.

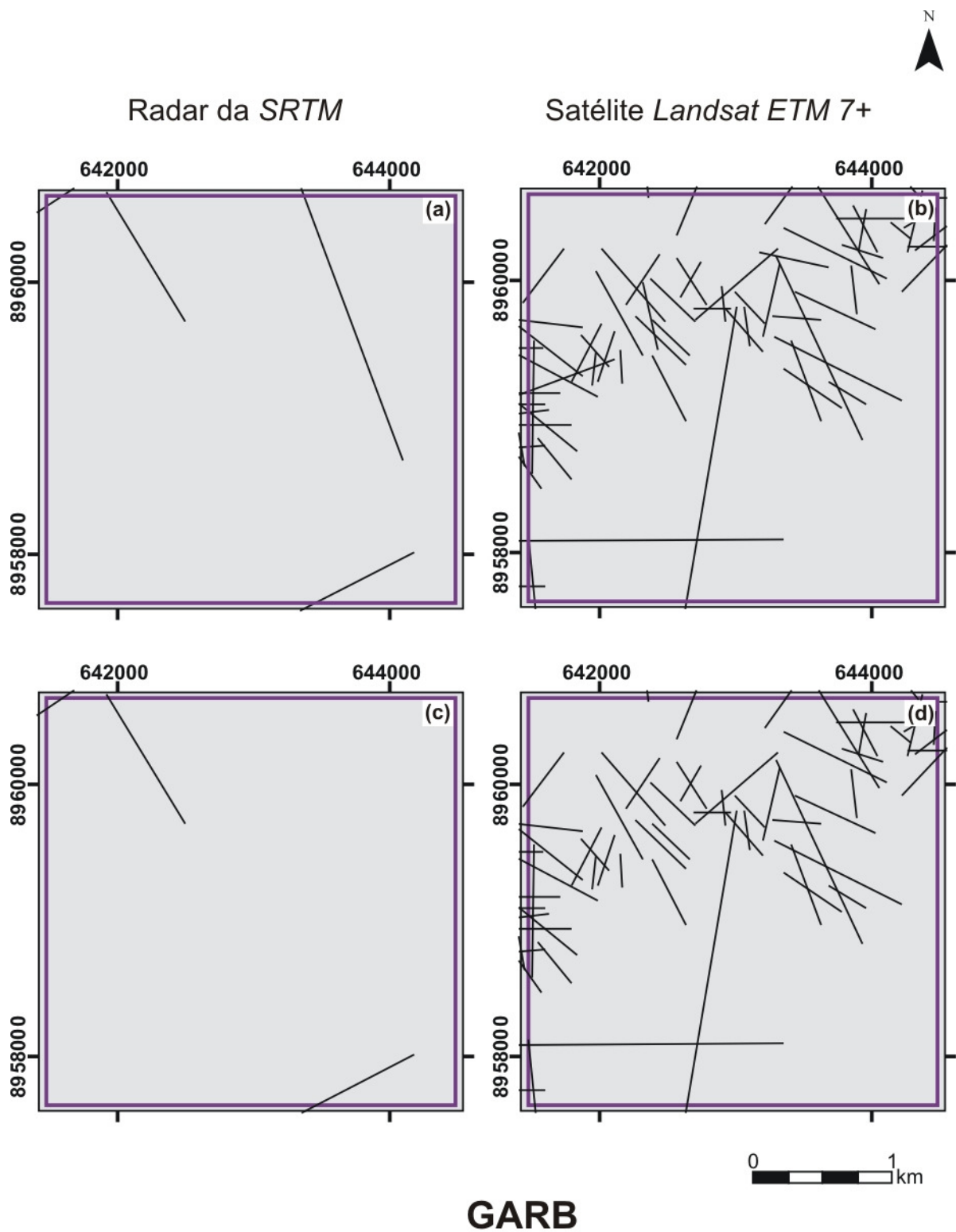


Figura 6.14 a-d: Mapas de lineamentos da estação GARB extraídos dos produtos de sensores de média resolução: (a-b) mapas com o total de lineamentos identificados na área; e (c-d) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW. As figuras (a) e (c) correspondem aos lineamentos extraídos do radar da *SRTM*; e as (b) e (d) aos lineamentos extraídos do satélite *Landsat 7 ETM+*.

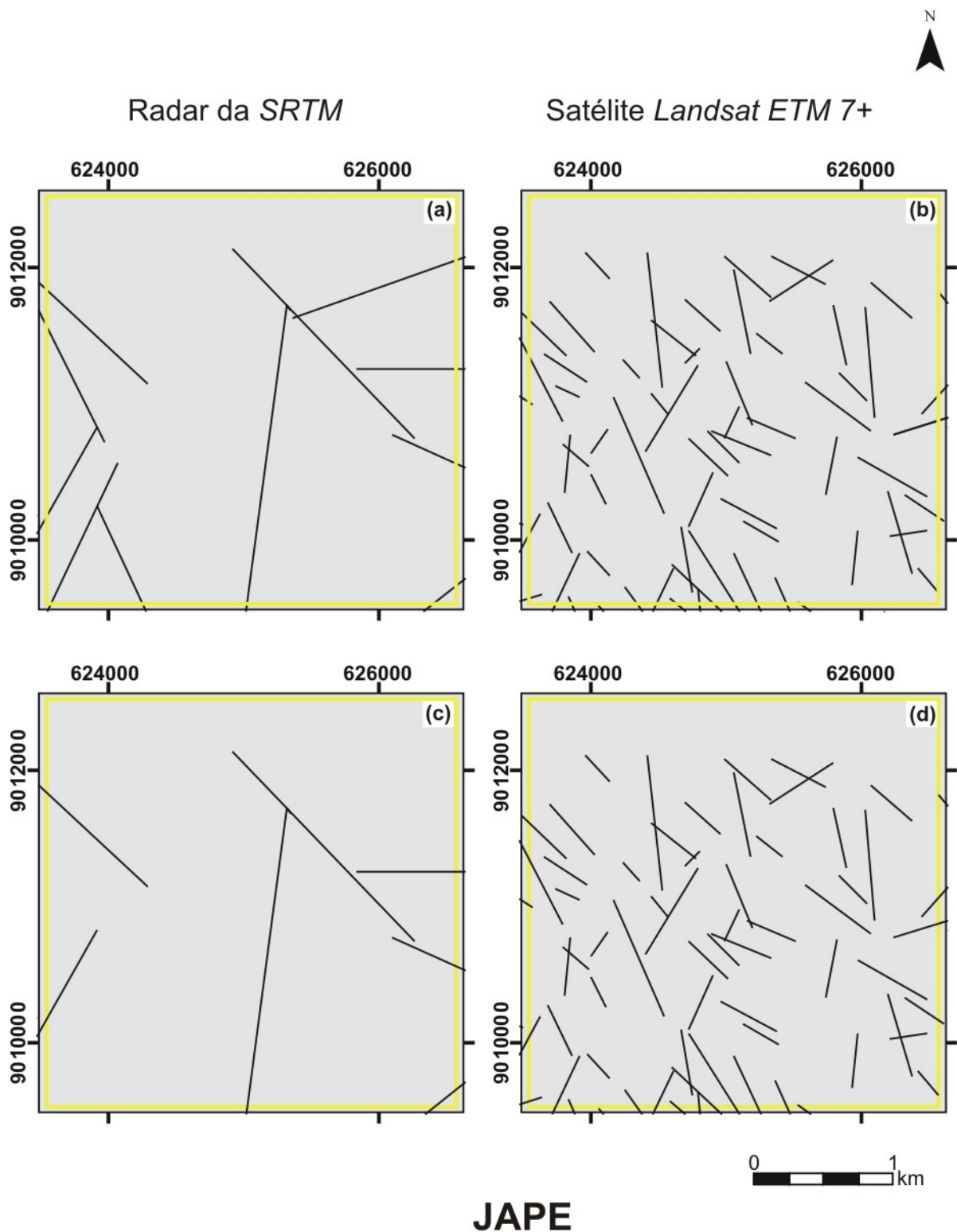


Figura 6.15 a-d: Mapas de lineamentos da estação JAPE extraídos dos produtos de sensores de média resolução: (a-b) mapas com o total de lineamentos identificados na área; e (c-d) somente lineamentos inseridos nos sets NW, NS, NE e EW. As figuras (a) e (c) correspondem aos lineamentos extraídos do radar da *SRTM*; e as (b) e (d) aos lineamentos extraídos do satélite *Landsat 7 ETM+*.

VI.2 - Determinação do significado geológico dos lineamentos através de critérios de campo

Este sub-item tem por objetivo caracterizar as principais estruturas rúpteis encontradas em cada estação de coleta, analisar comparativamente estas estruturas e compará-las com os mapas de lineamentos elaborados para cada estação de coleta e apresentados no sub-item anterior.

O mapeamento das estruturas rúpteis em escala de afloramento foi executado durante três campanhas de campo. O trabalho de campo teve por objetivo a compreensão do significado geológico dos lineamentos extraídos dos produtos de sensores nas diversas escalas.

Para a aquisição de dados foram selecionadas sete estações de coleta, cujos critérios foram: presença de grandes extensões de afloramento, quantidade de lineamentos visíveis nas imagens, quantidade de estruturas rúpteis visíveis no campo e acesso. Estas estações, com nove km² cada, são as seguintes: (i) ANDO I: Baixão das Andorinhas I; (ii) ANDO II: localidades de Andorinhas e de Muquém; (iii) CAJU: Baixão do Cajueiro; (iv) CCOL: próxima à sede municipal de Caracol; (v) CONF: Baixão das Confusões; (vi) GARB: Baixão das Guaribas; e (vii) JAPE: próxima à guarita de acesso à parte noroeste do Parque Nacional da Serra das Confusões. De sete estações, três receberam cobertura dos quatro sistemas de sensores (ANDO I, CAJU; CONF). As demais contaram somente com a cobertura do *SRTM* e do *Landsat 7 ETM+* (**Figura 6.2**).

Através dos dados estruturais coletados em todas as estações, as principais estruturas rúpteis puderam ser monitoradas qualitativamente quanto à orientação, dimensão, tipo de preenchimento, idade relativa e cinemática (no caso das falhas). Os dados coletados nas estações JAPE e CCOL foram utilizados apenas de forma ilustrativa, como auxílio na compreensão da distribuição espacial das principais estruturas, devido às exposições das estruturas rúpteis presentes nestas estações não terem permitido clareza na interpretação.

A primeira etapa de campo ocorreu entre os dias 31/10 e 03/11/2004 e teve como objetivo a escolha e o reconhecimento da área de estudos, bem como a caracterização inicial dos tipos de estruturas nela presentes. Nesta etapa de reconhecimento foram visitadas duas estações de coleta de dados (CONF e GARB). A segunda etapa de campo, entre os dias 18 e 20/07/2005, possibilitou a coleta de dados estruturais em duas estações (CONF e ANDO_I). Na terceira etapa de campo, entre 06 e 17/05/2006, foram coletados dados nas sete estações selecionadas.

A análise e interpretação dos dados estruturais foram realizadas através do programa *StereoNett 2.46*, onde foram construídos estereogramas para cinco das sete estações de coleta. Esta análise e classificação foram feitas em dois principais grandes conjuntos de dados: juntas e falhas.

Foram elaborados mapas de lineamentos extraídos pelos quatro sensores para cada estação de coleta. Os dois tipos de mapas, um com a representação de todo o conjunto de lineamentos indicado pelo sensor especificado, e outro somente com os lineamentos dentro do intervalo de definição do conjunto de estruturas existentes, encontram-se no sub-item anterior (**Figuras 6.3 a 6.15**).

A **Tabela 6.1** relaciona, para cada estação de coleta de dados, os principais tipos de estruturas encontrados no campo com os respectivos conjuntos de lineamentos. Descrevem-se abaixo estas relações.

V.2.1 - Juntas

As juntas se organizam em quatro direções preferenciais: EW, NS, NE, NW. Diferem entre si basicamente quanto às dimensões que apresentam. De acordo com as características apresentadas pelas juntas é possível dividi-las em três conjuntos mais freqüentes: (1) juntas de grande porte – apresentam comprimentos superiores dezenas de metros raramente atingindo poucos quilômetros; (2) juntas de pequeno porte – apresentam comprimentos de poucos metros; e (3) juntas intraestratais – estão restritas aos estratos sedimentares e apresentam alturas geralmente inferiores a um metro.

ESTAÇÕES	NS	NE	EW	NW
ANDO_I	J peq (1ª) J gde (2ª) FS	J peq (1ª) J int	J peq (2ª) J gde (1ª) FS	J peq (2ª) BD S FS
ANDO_II		J gde (2ª) FN	FS / FD	J gde (2ª) FS / FD
CAJU	J gde (2ª) BD S	FN	J gde (1ª)	FN FS
CCOL		J peq (2ª)		J peq (1ª)
CONF	J gde (2ª)	J peq (2ª) J int BD S / BD D FN FS / FD	J gde (1ª)	J peq (1ª) J int BD S / BD D FN FS / FD
GARB	J peq (1ª - superior 2ª - inferior) J gde (2ª)	J int	J peq (2ª- superior 1ª - inferior) J gde (1ª)	J int BD D

Tabela 6.1: Relação entre os sets de estruturas identificados e os principais tipos de estruturas identificados, para cada estação de coleta de dados. J peq – juntas de pequeno porte; Jgde – juntas de grande porte; J int – juntas intraestratais; FN – falha normal; FS – falha sinistral; FD – falha dextral; BD S – banda de deformação sinistral; BD D – banda de deformação dextral.

V.2.1.i - Juntas de Grande Porte

As juntas de grande porte são representadas por lineamentos contínuos, distribuídos por toda a área de estudos. Estes se encontram bem marcados especialmente nas áreas de exposição de rochas. As juntas de grande porte se distribuem preferencialmente em conjuntos de direções NS e EW e consistem em planos contínuos, não raro admitindo suaves curvaturas, preenchidos por óxido de ferro. A abertura de ambos os conjuntos varia entre poucos centímetros até mais de dois metros, nas quais chega a crescer vegetação (**Figura 6.16a**). Estes conjuntos ocasionalmente podem constituir grandes

escarpas (**Figura 6.16b**). O espaçamento entre os planos varia entre algumas dezenas de metros. A distribuição espacial dos conjuntos abrange as estações de coleta ANDO_I, ANDO_II, CAJU, CONF, GARB e JAPE (**Figura 6.16a-f**).

Relação temporal confiável só pôde ser estabelecida nas estações ANDO_I, CAJU, CONF e GARB (**Figura 6.17a-e**), com base no critério de truncamento entre os planos. Houve predomínio das juntas NS, que são interrompidas pelas juntas EW. Esta relação sugere que as últimas são mais antigas que as primeiras (**Figura 6.16a,e,f**). Esta observação corrobora a interpretação quanto à relação temporal entre os conjuntos EW e NE resultante da análise de lineamentos, feita exclusivamente com os sensores orbitais e aéreos.

Os conjuntos de juntas EW e NS foram observados em todos os mapas de lineamentos gerados para os diversos sensores utilizados. Entretanto, apenas os sensores de alta resolução (fotos aéreas e *Quickbird*) mostraram imagens cujas representações estatísticas em rosetas e histogramas resultaram em picos mais precisos para definição de conjuntos (**Figuras 5.1 a 5.5**).

V.2.1.ii - Juntas de Pequeno Porte

As juntas de pequeno porte correspondem aos lineamentos mais curtos e de maior dispersão. Estas juntas estão relacionadas principalmente aos lineamentos NW, que apresentam elevada dispersão em diagramas de roseta e no mapa elaborado a partir dos produtos do satélite *Landsat ETM7+* (**Figura 4.4b**). As juntas de pequeno porte consistem em planos de ruptura com comprimentos de poucos metros e espaçamentos de algumas dezenas de centímetros a um metro. As aberturas são submilimétricas a métricas, com ausência de preenchimento. Estas juntas constituem preferencialmente conjuntos com direções NE e NW. Nas estações ANDO_I, CCOL, CONF e GARB as juntas de pequeno porte se orientam também segundo as direções NS e EW, coincidindo com a orientação dos conjuntos das juntas de grande porte.

A relação temporal entre as juntas de pequeno porte observadas nas estações ANDO_I, ANDO_II, CCOL, CONF e GARB apresentam as seguintes variações:

- (1) nas estações ANDO_I e ANDO_II, a relação de truncamento entre os planos NE e NW sugeriu idade mais antiga para o conjunto NE. Dentre os planos NS e EW, o EW aparenta anteceder ou ser contemporâneo ao conjunto NS (**Figura 6.18a**);
- (2) estações CONF e GARB indicaram idade mais antiga para o conjunto EW e mais nova para o conjunto NS (**Figura 6.18b**). Na estação CONF também foram observadas relações de truncamento entre juntas de pequeno porte onde o conjunto NW mostrou-se anteceder o NE (**Figura 6.18c**), fato que se repetiu na estação CCOL.

Concluiu-se, então, que em posse dos dados levantados pelo presente trabalho, relação cronológica consistente não pode ainda ser estabelecida entre os conjuntos de juntas de pequeno porte. Sugere-se que estas sucedam as juntas de grande porte, devido aos comprimentos relativamente maiores apresentados pelas últimas.

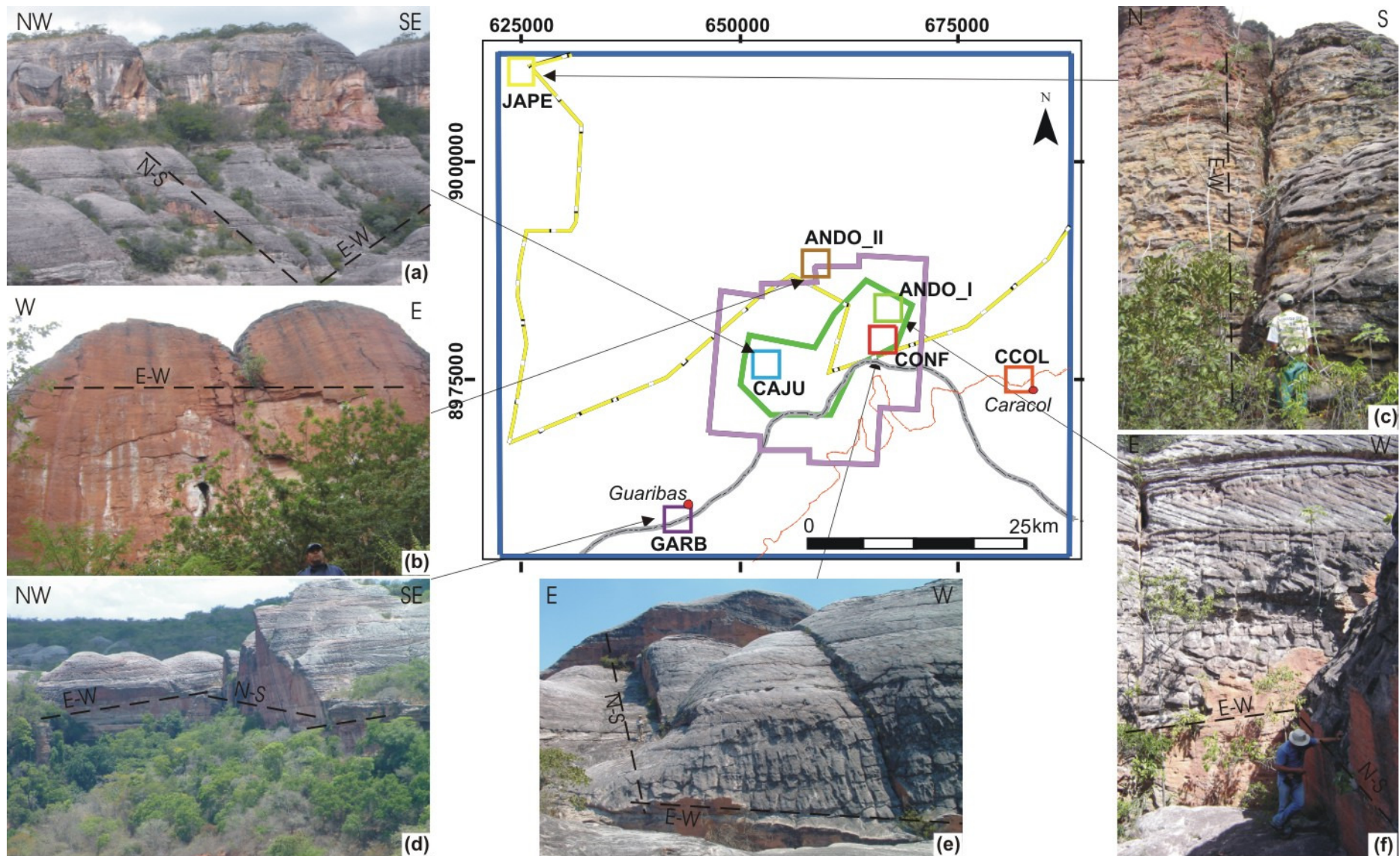


Figura 6.16 a-f: Juntas de grande porte localizadas nas estações de coleta: (a) ANDO_II; (b) CAJU; (c) JAPE; (d) GARB; (e) CONF e (f) ANDO_I. A relação temporal entre os sets NS e EW nas fotos (d), (e) e (f), nas quais o set de juntas EW trunca o NS, evidenciando que este sucede àquele.

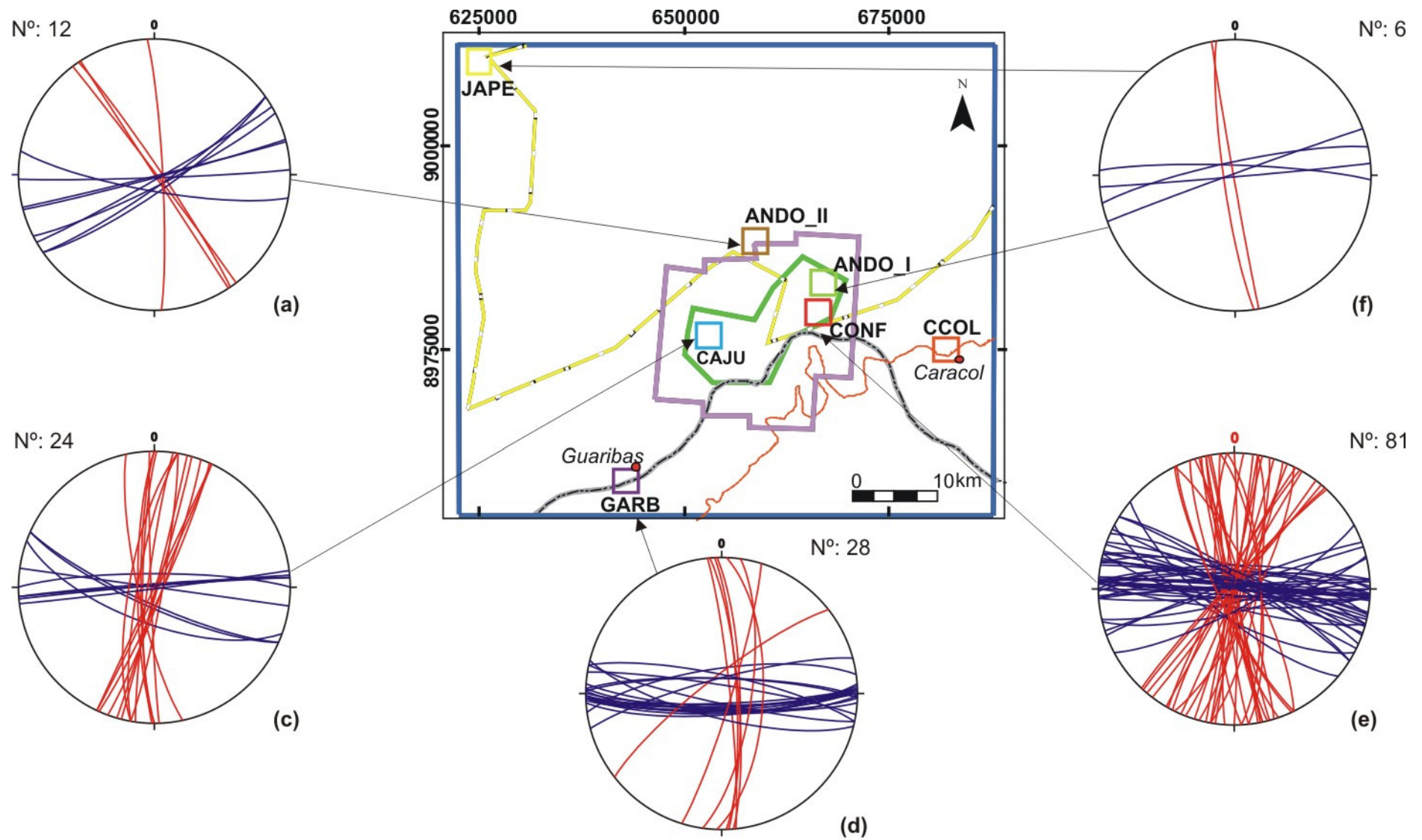


Figura 6.17 a-e: Diagramas de igual área com projeção no hemisfério sul de juntas de grande porte localizadas nas estações de coleta: (a) ANDO_II; (b) ANDO_I; (c) CAJU; (d) GARB e (e) CONF. Os estereogramas (b), (c), (d) e (e) indicam o predomínio de juntas NS mais novas que as EW.

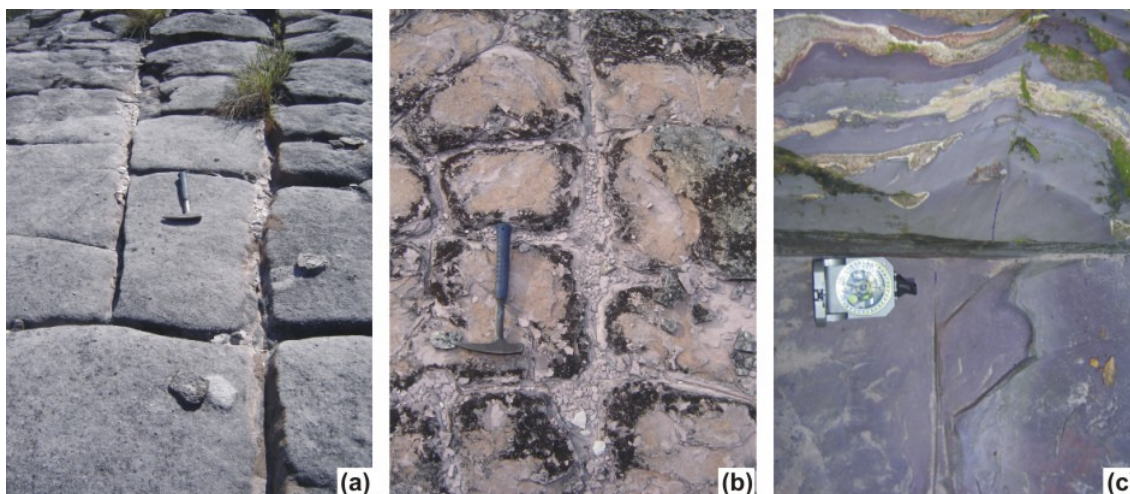


Figura 6.18: Juntas de pequeno porte: (a) ANDO_I e (b) GARB – cabo do martelo indicando a direção E; (c) CONF – bússola na direção NW.

V.2.1.iii - Juntas Intraestratais

As juntas intraestratais são estruturas muito pervasivas ao longo de todas as estações de coleta. O padrão estrutural das mesmas geralmente está intimamente associado àquele de poligonização encontrado em outras exposições de sedimentos siliciclásticos da Bacia do Parnaíba, como no Parque Nacional das Sete Cidades-PI.

Em perfil, o conjunto de juntas intraestratais apresenta espaçamentos geralmente inferiores a um metro e aberturas sem preenchimento que variam entre submilimétricas a poucos centímetros (**Figuras 6.19a-g; e 6.20e-h**). Durante a coleta de dados para caracterizar o padrão estrutural deste conjunto de juntas, foram considerados apenas os planos com altura de poucas dezenas de centímetros a até cerca de dois metros, limitados pelas descontinuidades deposicionais dos estratos sedimentares (**Figuras 6.19c**).

Nas estações ANDO I, CONF e GARB as juntas intraestratais estão organizadas em conjuntos com direção NE e NW (**Figuras 6.20a-d**). As dimensões não muito significativas destas estruturas as impedem de serem visualizadas nos produtos de sensores.

A estação GARB mostrou ser o local mais favorável para o estudo das juntas intraestratais. Nesta estação há poucas falhas. No entanto, boas exposições de juntas intraestratais permitiram o controle temporal preliminar quanto aos conjuntos identificados, os quais se mostraram ser contemporâneos. Tal conclusão fundamenta-se em observações da relação de truncamento entre os conjuntos de juntas ortogonais, onde, em estrato inferior, o conjunto EW é mais antigo que o conjunto NS, enquanto que em estrato superior, o conjunto NS é mais antigo que o conjunto EW (**Figuras 6.19d-f**).

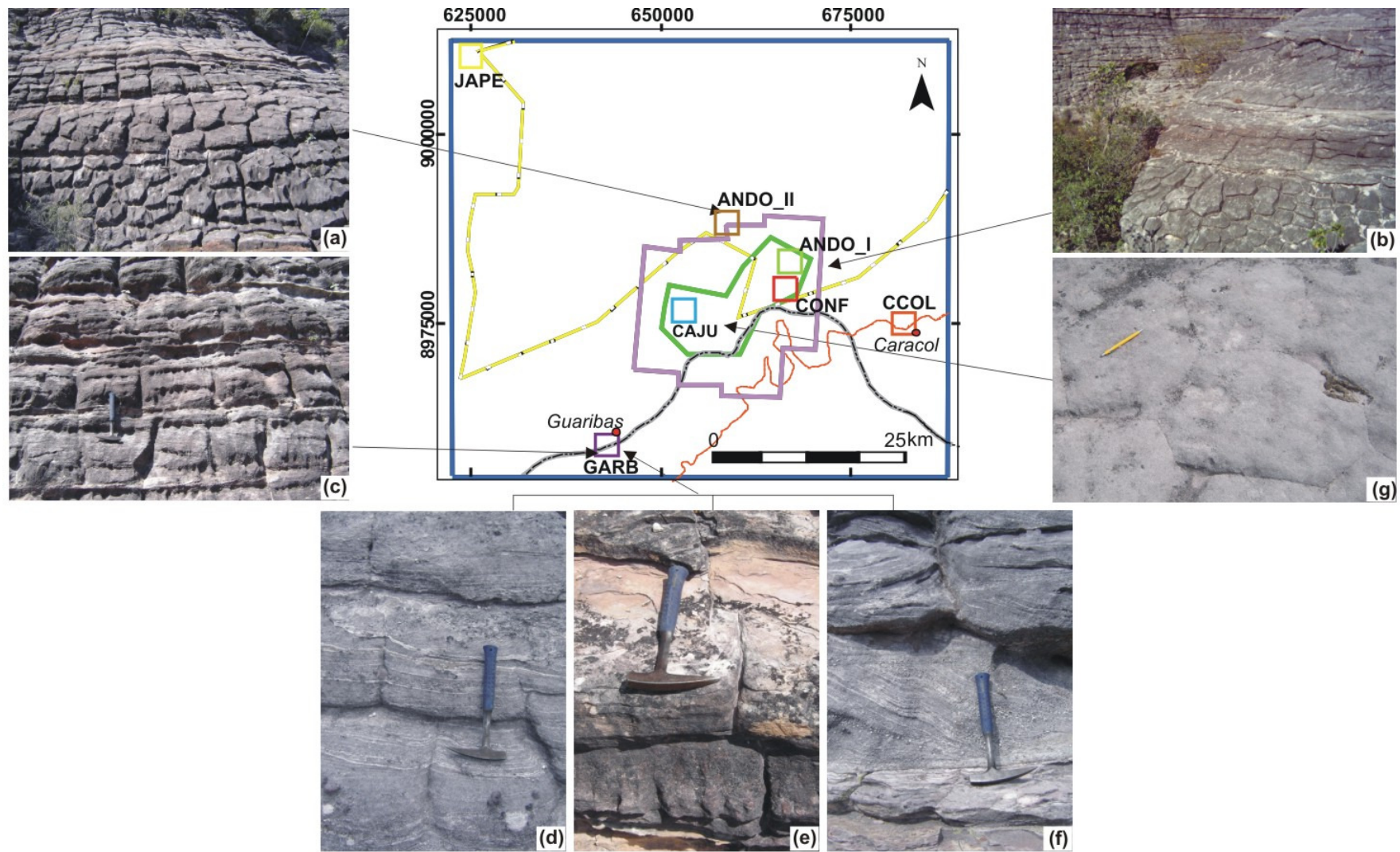


Figura 6.19 a-g: Juntas intraestratais localizadas nas estações de coleta: (a) ANDO_I; (b) CONF; (c-f) GARB; e (g) CAJU, onde se avista em planta da morfologia poligonal associada as juntas intraestratais.

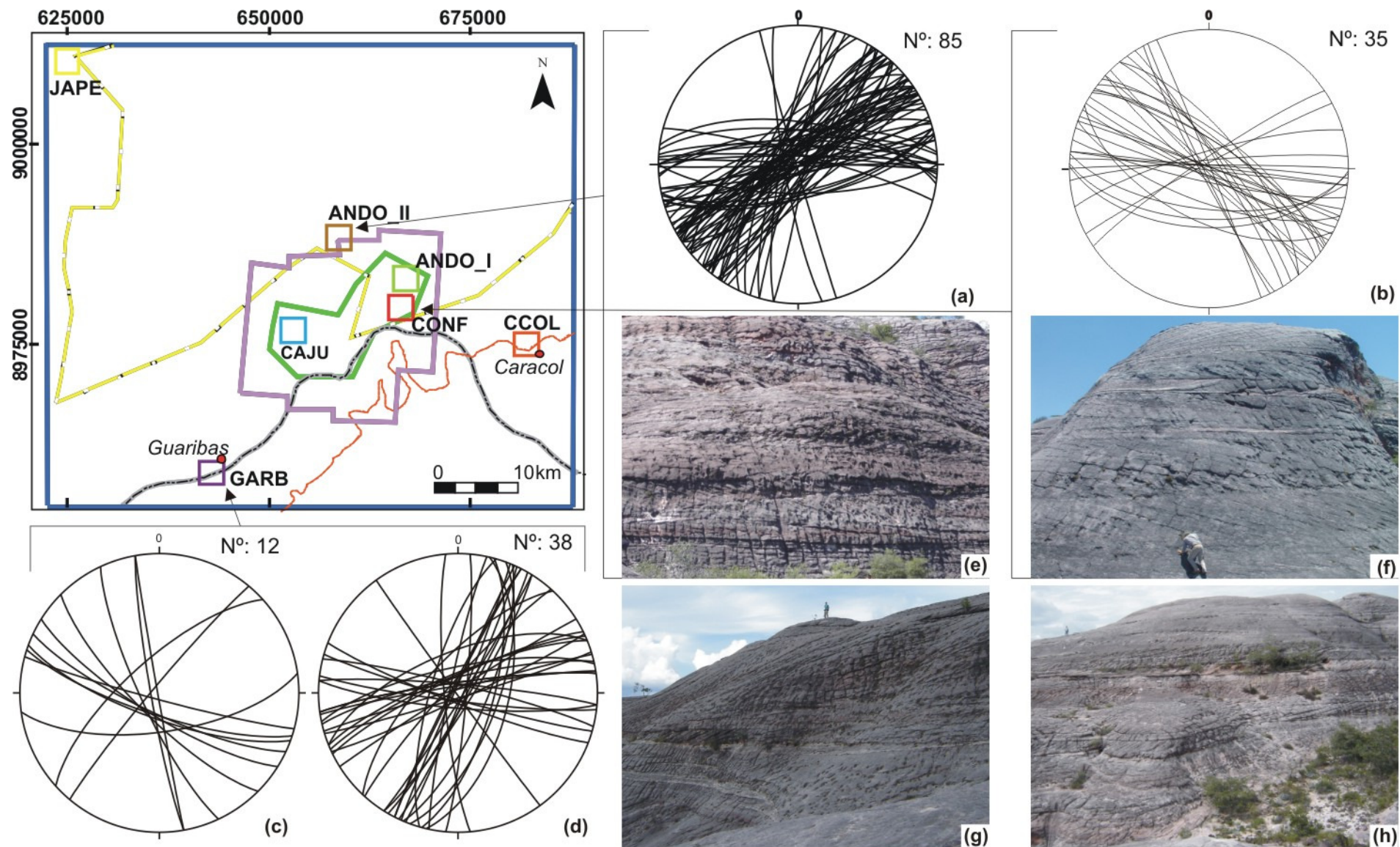


Figura 6.20: Diagramas de igual área com projeção no hemisfério sul dos sets NE e NW das juntas intraestratais, nas estações: (a) ANDO_I; (b) CONF; e (c-d) GARB. Estas juntas se distribuem por toda a área: (e) ANDO_I; (f) CONF; (g) GARB e (h) CAJU.

V.2.2 – Falhas

Diversos tipos de falhas encontram-se irregularmente distribuídas ao longo da área de estudos, as quais variam em tamanho, sendo mais notórias as falhas com comprimentos de poucos a dezenas de quilômetros. Quanto ao tipo de cinemática as falhas são: (1) falhas normais (incluindo estruturas em flor), (2) reversas e (3) oblíquas. Quanto ao tipo de preenchimento elas se classificam em: (1) falhas sem preenchimento de sílica; e (2) falhas com preenchimento de sílica (incluindo bandas de deformação).

V.2.2.i - Falhas com deslocamento sub-vertical: normais e reversas.

Em sua maioria, correspondem às falhas normais que apresentam abertura submilimétrica e rejeitos centimétricos (**Figuras 6.21a-e**). Os pequenos deslocamentos sub-verticais entre os estratos sedimentares dos blocos falhados, em algumas raras ocasiões, representam falhas reversas.

As falhas com deslocamento sub-vertical não se mostraram muito freqüentes. Entretanto, falhas normais com orientação NE foram identificadas nas estações ANDO_II, CAJU e CONF. Somente nas estações CAJU e CONF, falhas normais na direção NW foram observadas (**Figura 6.22**). As falhas normais NE, observadas nos pacotes arenosos da estação CONF, são concordantes com superfícies de bandas de deformação (**Figuras 6.21e**).

Nas porções rochosas afetadas por falhas normais, ocorrem níveis possivelmente deformados por estruturas de liquefação citadas no Capítulo III (**Figuras 3.7a-c; e 3.8 a-h**). Nas **Figuras 3.8c-h** é possível observar um nível pelítico deformado em estado plástico. Este nível foi fragmentado e incorporado como intraclastos em um dique de areia. A **Figura 3.8f** mostra plano de falha normal com rejeito centimétrico, espacialmente relacionada com as estruturas de liquefação. O comentário quanto a estas fotografias no presente capítulo visa caracterizar tais estruturas geradas possivelmente pela atividade sísmica sin-deposicional.

Devido às pequenas dimensões apresentadas pelas falhas normais, salvo as situações nas quais estas se encontram associadas às bandas de deformação de grandes extensões, estas estruturas possivelmente não correspondem diretamente aos lineamentos apresentados nos mapas. As falhas normais predominantemente organizadas em conjuntos NE (ANDO_I, CAJU e CONF) e subordinadamente em conjuntos NW.

V.2.2.ii - Falhas transcorrentes

(a) Falhas sem Preenchimento de Sílica

As falhas transcorrentes são caracterizadas por extensas superfícies de ruptura. Assemelham-se, quanto às grandes dimensões e ao tipo de preenchimento de óxido de ferro, às juntas de grande porte, chegando a condicionar o desenvolvimento de grandes fendas e cavernas (**Figura 6.23**).

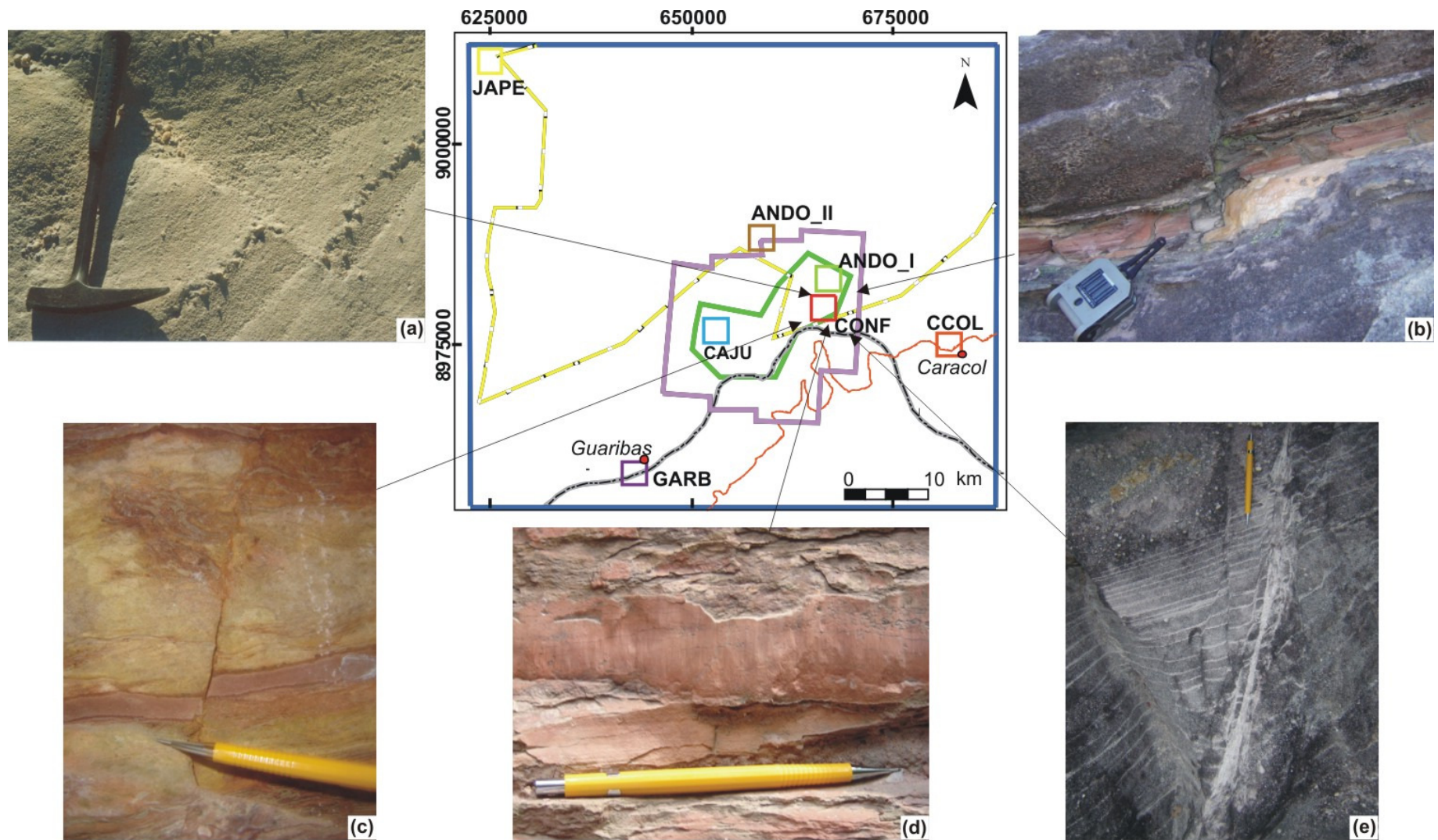


Figura 6.21: Evidências de falhas normais na estação CONF: (a-c) rejeitos submilimétricos a subcentimétricos; (d) estrias no plano de falha; (e) falha normal associada à banda de deformação.

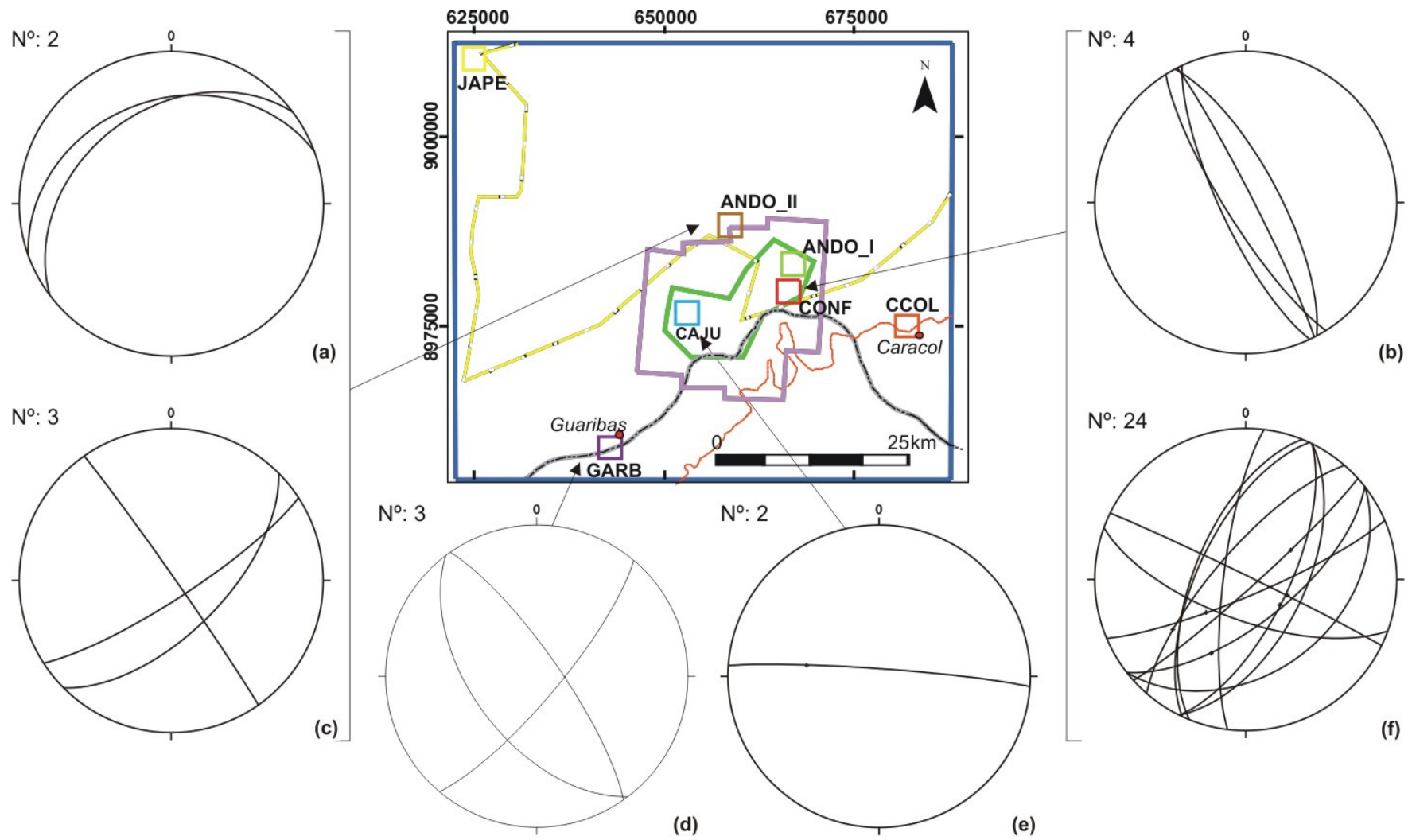


Figura 6.22 a-f: Diagramas de igual área com projeção no hemisfério sul das falhas com deslocamento sub-vertical: reversas nas estações: (a) ANDO_II e (b) CONF; e normais nas estações: (c) ANDO_II, (d) CAJU, (e) GARB, e (f) CONF.



Figura 6.23: Gruta dos Bois, situada na porção noroeste da estação de coleta CONF. O desenvolvimento desta zona de fraqueza na direção NW está associado a uma falha transcorrente.

Como principais critérios para o estabelecimento do controle cinemático destas estruturas foram adotados as feições de rugosidade nos planos de ruptura (degraus estriados segundo **Petit, 1987**) e o modelo de cisalhamento de *Riedel* (*Riedel shears*) (**Figura 6.24a-e**).

As falhas transcorrentes apresentaram componente cinemática tanto dextral (**Figura 6.25a,d,f**), como sinistral (**Figura 6.25c,e,g**). As primeiras ocorrem segundo as direções NE, NW e EW, e as últimas segundo as direções NS, EW e NW.

Nos estereogramas da **Figura 6.25a-g**, estão projetadas falhas com componentes sinistrais encontradas nas estações ANDO_I (conjuntos NS, EW e NW) e CAJU (conjunto NW); bem como falhas com significativas componentes dextrais e sinistrais identificadas nas estações ANDO_II (conjuntos NW e EW) e CONF (NE e NW).

Ao contrário das falhas com deslocamento sub-vertical, as falhas transcorrentes estão organizadas preferencialmente no conjunto NW e subordinadamente no conjunto NE. Em alguns pontos, estas estão orientadas segundo a direção EW. Devido às grandes dimensões por elas apresentadas, as falhas transcorrentes correspondem aos lineamentos identificados preferencialmente nos produtos de sensores de média resolução e decrescem em importância na representação nos produtos de alta resolução (vide gráficos em rosetas da **figura 5.5**).

(b) Falhas com Preenchimento de Sílica - bandas de deformação

As bandas de deformação são falhas comuns em arenitos porosos e conglomerados de granulação média a grossa, onde a tensão efetiva sobre o plano de falha causa o trituramento e posterior recristalização dos grãos de quartzo. Este mecanismo resulta na diminuição da granulometria da rocha ao longo de uma faixa coincidente com o plano de falha e cuja espessura variável pode evoluir para o desenvolvimento de zonas de bandas de deformação. Estas correspondem a faixas mais largas de material cominuído, em meio aos quais pode haver "corredores" de rocha sã (**Antonellini & Aydin, 1995**).

As bandas de deformação se caracterizam por extensas superfícies ao longo das quais se desenvolvem sigmóides com dimensões decimétricas a métricas. As superfícies das bandas são preenchidas por material silicoso, produto gerado a partir da recristalização do arenito concomitante à movimentação relativa entre os blocos falhados, sob um campo de tensões transpressivas.

Os sigmóides característicos dos cortes transversais às superfícies das bandas de deformação são excelentes indicadores cinemáticos. A informação cinemática provém da estruturação interna dos sigmóides interpretada com base no modelo de cisalhamento de *Riedel*. A forma de recristalização da sílica é condicionada pelo desenvolvimento de fraturas R, cujas orientações em relação à falha principal (banda de deformação) indicam movimentos ora destrais, ora sinistrais (**Figura 6.26a-h**).

Bandas de deformação foram encontradas nas estações de coleta ANDO_I, CAJU, CONF e GRAB. Os estereogramas gerados para as bandas de deformação permitiram a subdivisão destas estruturas em três conjuntos principais: NW, NS e NE. Este último é mais freqüente no campo (**Figura 6.26a-e**). Observações de campo indicaram cinemática sinistral para as bandas NS, identificadas somente na estação CAJU. A presença do conjunto NW de bandas de deformação sinistral foi constatada na estação ANDO_I. Na estação GARB foi identificada apenas uma banda de deformação destal NW.

O local de maior ocorrência das bandas de deformação foi a estação CONF. Nesta estação foi observada a alternância de movimentação sinistral (**Figura 6.26g**) e destal (**Figura 6.26h**) associada aos conjuntos de falhas NW e NE.

As bandas de deformação correspondem aos lineamentos mais compridos, evidenciados principalmente pelos sensores de menor resolução. Os conjuntos NE e NW apresentam um decréscimo na dispersão das pétalas da rosetas, com a diminuição da escala de trabalho (**Figura 5.5**).

(c) Falhas em Flor

Este tipo de falha foi encontrado associado aos conjuntos NE das bandas de deformação e das falhas normais, estando localmente em associação às estruturas de liquefação. São caracterizadas por um plano de falha principal de dimensões que variam de poucos metros a mais de dez metros.

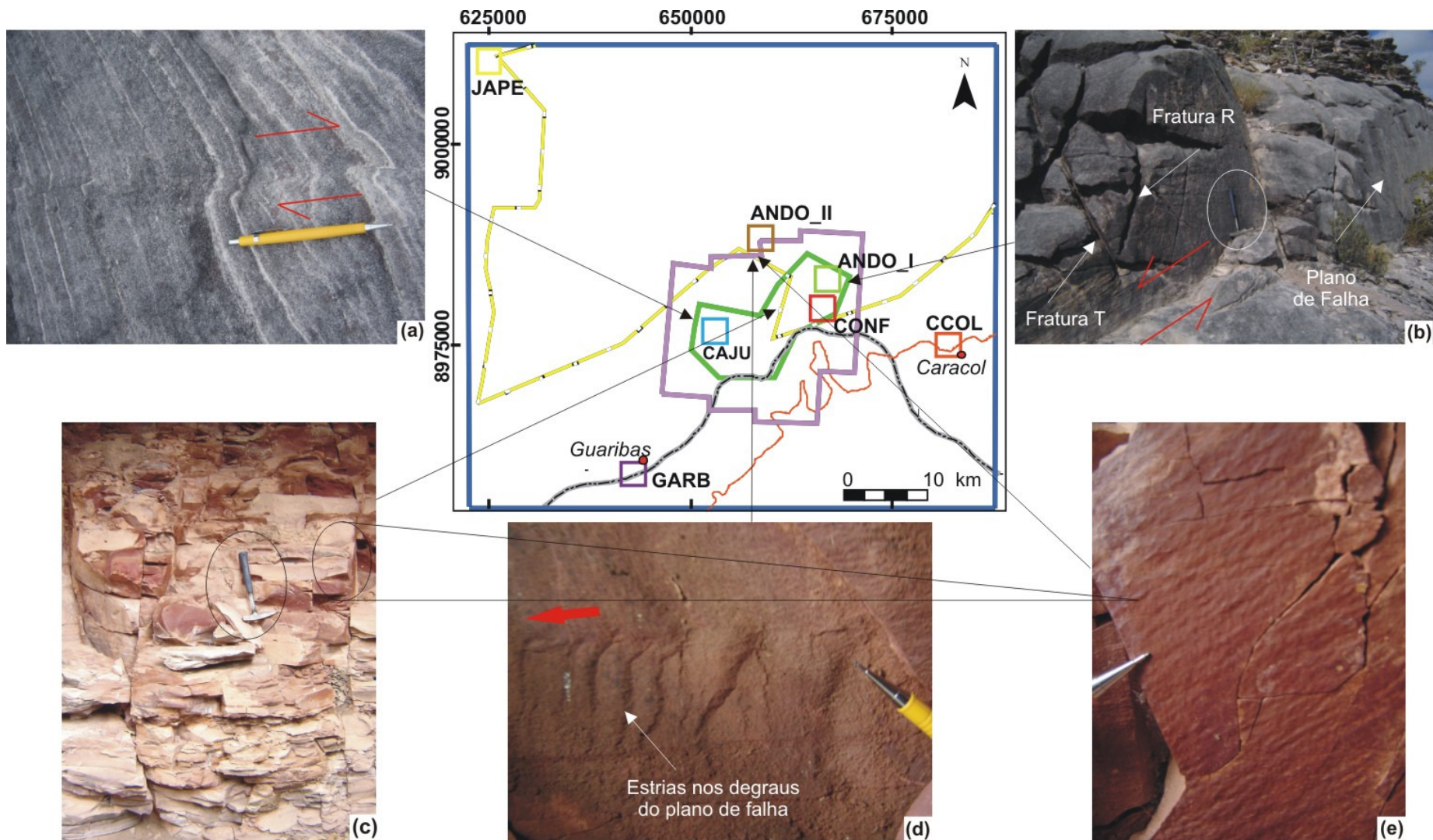


Figura 6.24: Evidências de falhas com rejeito lateral/oblíquo: (a) CAJU - cinemática destal; (b) ANDO_I - cinemática sinistral; (c-e) ANDO_II - cinemática sinistral - (a) aspecto do afloramento, (d) estrias nos degraus do plano de falha, e (e) estrias no plano de falha.

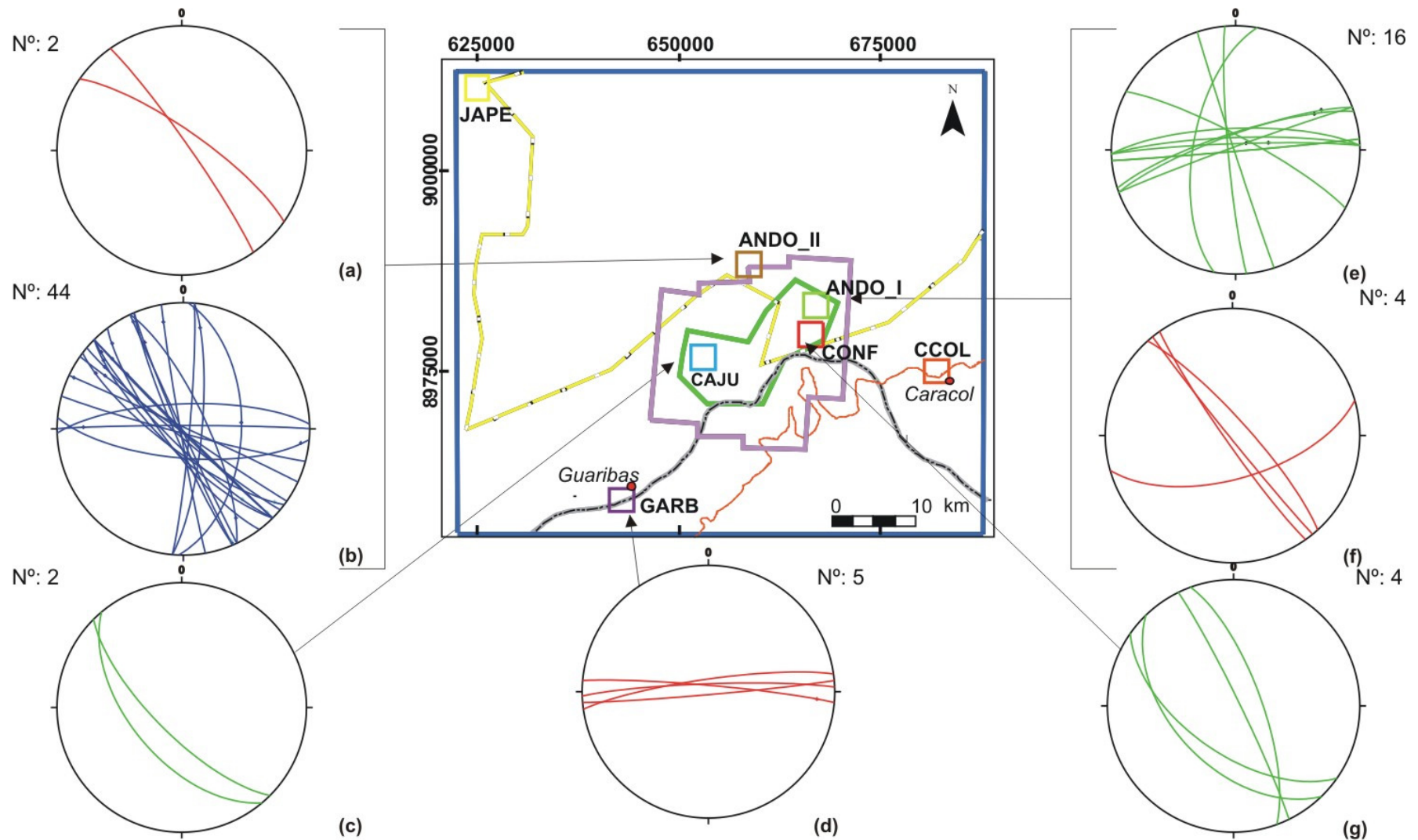


Figura 6.25 a-g: Diagramas de igual área com projeção no hemisfério sul das falhas com deslocamento lateral/oblíquo nas estações: (a) e (b) ANDO_II; (c) CAJU; (d) GARB; (e) e (f) ANDO_I; e (g) CONF. Cinemáticas: destal - vermelho; sinistral - verde; e sem informação cinemática - azul.

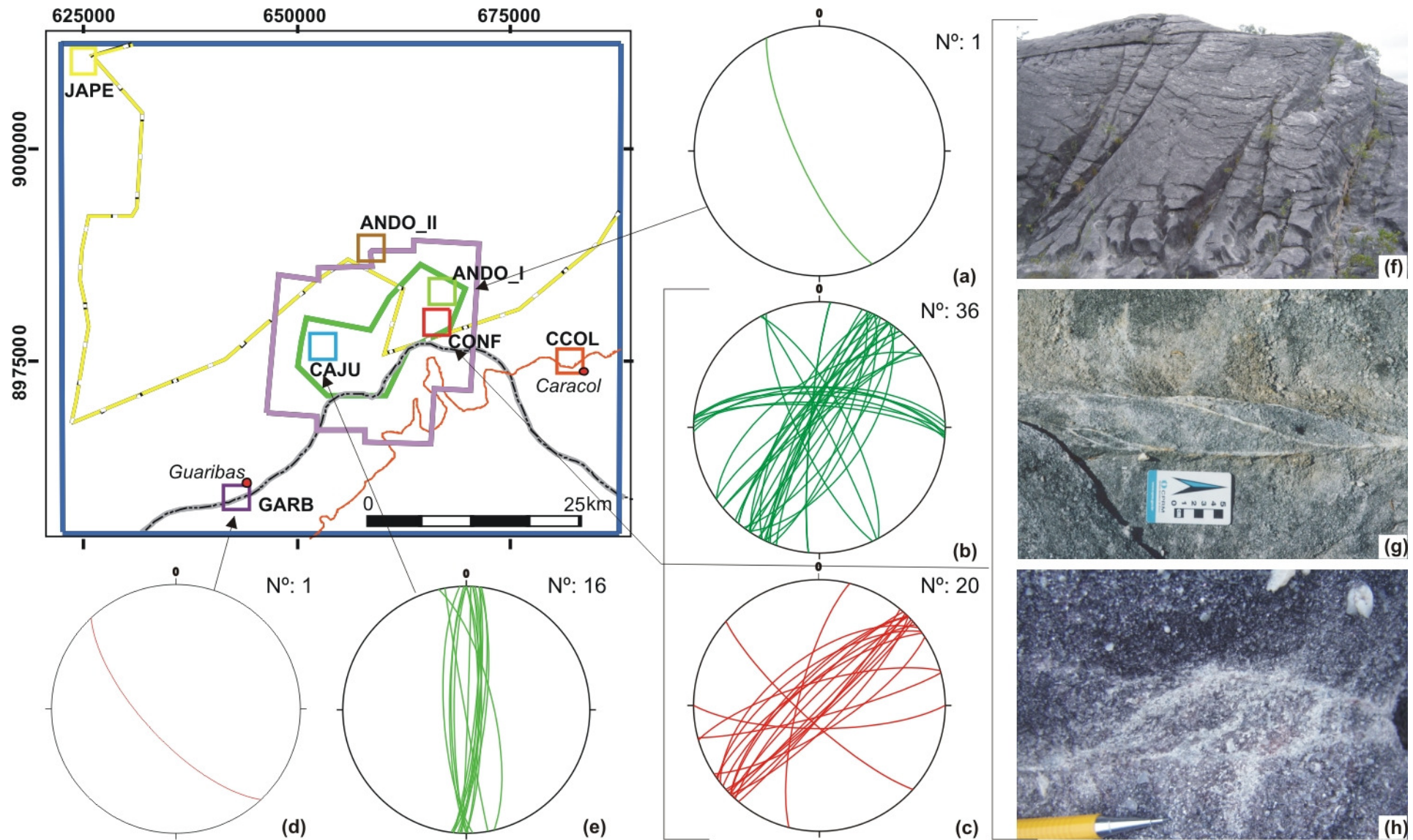


Figura 6.26 a-h: Diagramas de igual área com projeção no hemisfério sul das bandas de deformação: (a) ANDO_I; (b-c) CONF; (d) GARB; e (e) CAJU. Cinemáticas: dextral - vermelho e sinistral - verde. Bandas de deformação (CONF): (f) afloramento; (g) dextral e (h) sinistral.

VII. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

VII. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

VII.1 – Análise multi-escala de lineamentos

O uso integrado dos quatro sistemas de sensores remotos aplicado à análise estrutural multi-escala foi fundamental para a caracterização mais completa do padrão de fraturamento na área contemplada pelo presente estudo.

A classificação, extração e análise dos lineamentos resultaram na subdivisão de quatro conjuntos preferenciais de feições lineares com significado tectônico: NW, NS, NE e EW. Os dados estruturais coletados em campo dotaram de significado geológico a análise multi-escala dos lineamentos na borda sudeste da Bacia do Parnaíba. Através da interpretação integrada de produtos de sensores orbitais e aéreos, com observações de campo, foram destacadas as seguintes estruturas presentes na região:

- (1) dois conjuntos ortogonais de juntas de grande porte com direção NS e EW;
- (2) dois conjuntos ortogonais de juntas de pequeno porte com direção preferencialmente NE e NW e subordinadamente NS e EW;
- (3) dois conjuntos ortogonais de juntas intraestratais com direção NE e NW;
- (4) falhas normais de direção preferencialmente NE e subordinadamente NW;
- (5) falhas transcorrentes sem preenchimento, com cinemáticas sinistrais e destrais e organizadas preferencialmente em conjuntos de direção NW e subordinadamente NE, NS e EW;
- (6) falhas transcorrentes com preenchimento de sílica (bandas de deformação), indicando cinemáticas sinistrais e destrais e organizadas preferencialmente em conjuntos de direção NE e subordinadamente NW e NS.

Observou-se que para a determinação dos intervalos azimutais dos conjuntos de lineamentos, bem como para o cálculo das densidades destes, é mais adequado o uso da somatória dos comprimentos de lineamentos ao invés da frequência (número) destes. A somatória dos comprimentos atribui pesos diferentes aos lineamentos em proporção aos tamanhos destes; enquanto, ao se utilizar a frequência de lineamentos, os diferentes tamanhos existentes são considerados para os cálculos indistintamente.

Nas análises de densidade de lineamentos, identificou-se a sub-estação de coleta nº 3 como a mais afetada pela deformação rúptil. Entretanto, a expressão das grandes estruturas regionais se mostrou mais nítida na subestação nº 7, onde a densidade de fraturamento foi maior para os produtos do radar da *SRTM*.

Os sensores de resolução média (radar da *SRTM* e satélite *Landsat 7 ETM+*) se mostraram adequados para a identificação dos lineamentos de maiores dimensões, os quais, após checagem de campo, puderam ser correlacionados a falhas regionais, em geral transcorrentes, com comprimentos de poucos quilômetros a dezenas de quilômetros.

O radar da *SRTM* propiciou resolução suficiente (90 m) para a extração de lineamentos na escala 1:200.000, através da qual o conjunto de lineamentos NE se apresentou quantitativamente mais significativo. O uso do produto de radar foi especialmente importante para a definição do conjunto de estruturas relacionadas ao arcabouço tectônico da bacia e seu embasamento, pois este sensor realçou apenas os lineamentos maiores, correspondentes a estruturas com dimensões quilométricas.

As imagens do satélite *Landsat 7 ETM+*, com resolução de 15 m após fusão com a banda pancromática, permitiram a extração de lineamentos na escala 1:50.000. Nesta escala pôde ser identificado um intervalo mais amplo de dimensões dos lineamentos, em relação àquele monitorado pelo radar. Os conjuntos NE e NW foram quantitativamente os mais significativos, cujas relações de escala com as estruturas monitoradas em campo, sugeriram estes corresponderem a falhas de caráter regional e local. Dentre os produtos utilizados pelo presente trabalho, as imagens *Landsat 7 ETM+* demonstraram ser as mais versáteis para uma caracterização geral da área de estudos, pois, além de serem capazes de captar lineamentos de caráter regional e local, auxiliam na classificação de lineamentos devido às combinações de composições coloridas que podem ser elaboradas de acordo com o escopo do trabalho.

Os sensores de alta resolução (fotografias aéreas e satélite *Quickbird*) se mostraram mais adequados para a identificação de lineamentos representativos de estruturas rúpteis locais, com comprimentos de poucos metros até dezenas metros, como conjuntos de juntas, especialmente o expressivo conjunto EW.

As fotografias aéreas atingiram resolução aproximada de 05 m, possibilitando que os lineamentos fossem extraídos na escala 1:10.000. As fotografias se mostraram de grande utilidade para a análise de lineamentos, especialmente devido à possibilidade da visualização 3D através do estereoscópio. No entanto, o uso deste produto demanda maior tempo e trabalho, dada a necessidade na maioria das vezes de restituir as fotografias aéreas georreferenciadas para que o posicionamento espacial de lineamentos presentes não sofra distorção decorrente do georreferenciamento.

O satélite *Quickbird* foi o sensor utilizado com a maior resolução espacial (0,61 m). A escala 1:5.000 se mostrou adequada para a extração de lineamentos através deste produto, o qual apresentou grande vantagem sobre os demais na extração de lineamentos correspondentes a fraturas de dimensões métricas, em geral classificadas em campo como juntas. Devido a excelente resolução espacial da imagem pancromática do satélite *Quickbird*, não só a classificação dos lineamentos, mas também a caracterização geral da área de estudos pode ser aprimorada, pois, foi possível identificar desde as copas das árvores, fendas estreitas nos afloramentos, vales encaixados, até os contornos precisos das escapas da Serra das Confusões.

VII.1.1 - Conjuntos de lineamentos NS e EW

Os lineamentos correspondentes aos conjuntos NS e EW foram identificados pelos quatro produtos de sensores remotos, sendo melhores caracterizados pelos sensores de alta resolução espacial

(fotos aéreas e satélite *Quickbird*). As estruturas orientadas segundo os conjuntos NS e EW encontradas no campo foram classificadas como juntas de grande e pequeno porte, falhas transcorrentes sem preenchimento e bandas de deformação. As últimas não ocorreram na direção EW. Dado o marcante predomínio das juntas de grande porte em detrimento das demais estruturas listadas, os conjuntos de lineamentos NS e EW foram interpretados como expressões das juntas de grande porte. Esta interpretação se baseou na regularidade dos espaçamentos entre os lineamentos, evidenciada pelas imagens e pela distribuição das estruturas no campo e também na ausência de deslocamento relativo entre os blocos fraturados, constatada durante os trabalhos de campo. Os conjuntos de juntas de grande porte NS e EW se caracterizaram no campo como extensos planos de fraquezas, da ordem de centenas de metros a poucos quilômetros, com aberturas de dezenas de centímetros a poucos metros, geralmente preenchidos por óxidos de ferro.

VII.1.2 - Conjuntos de lineamentos NE e NW

Os lineamentos correspondentes aos conjuntos NE e NW foram identificados nos quatro produtos de sensores remotos, com exceção do conjunto NE não muito bem definido através das fotografias aéreas. No entanto, os conjuntos NE e NW foram preferencialmente realçados pelos produtos de sensor de média resolução (radar da *SRTM* e satélite *Landsat 7 ETM+*). Estes conjuntos apresentaram um decréscimo na dispersão das pétalas da rosetas com a diminuição da escala de trabalho. Por intermédio dos quatro produtos de sensores foi observada no conjunto NW elevada dispersão (30°) através de diagramas em roseta e especialmente através do mapa elaborado a partir dos produtos do satélite *Landsat 7 ETM+*. A associação espacial do conjunto NW com as principais drenagens que cortam a região é também particularmente evidenciada pelos produtos do satélite *Landsat 7 ETM+*.

Aos conjuntos NE e NW puderam ser atribuídos variados tipos de estruturas: juntas de pequeno porte, juntas intraestratais, falhas normais, falhas transcorrentes sem preenchimento, bandas de deformação. Na estação do Baixão das Confusões (CONF), diferente do ocorrido com os conjuntos NS e EW, onde as juntas de grande porte corresponderam à maioria das estruturas presentes, os conjuntos NE e NW mostraram uma distribuição mais homogênea entre tipos de estruturas presentes.

Inseridas nos conjuntos NE e NW, as juntas de pequeno porte corresponderam aos lineamentos mais curtos e de maior dispersão. No campo, as juntas de pequeno porte consistiram em planos de ruptura com comprimentos de poucos metros e espaçamentos de algumas dezenas de centímetros a um metro. As aberturas variaram entre submilimétricas a métricas, com ausência de preenchimento.

As dimensões não muito significativas das juntas intraestratais as impedem de serem visualizadas nos produtos de sensores. As juntas intraestratais são estruturas de menores dimensões, limitadas às espessuras dos estratos sedimentares, regularmente espaçadas, com ausência de preenchimento e localmente delineiam na superfície dos afloramentos rochosos formas poligonadas.

As juntas intraestratais se distribuem de modo pervasivo por todas as estações de coleta e, ao que tudo indica, seus conjuntos preferencialmente orientados segundo NE e NW ocorrem associados aos conjuntos de juntas de pequeno porte de mesmas direções.

Fortes (1996), em publicação sobre a geologia do Parque Nacional das Sete Cidades, interpretou as morfologias poligonadas em questão como parcialmente condicionadas por fraturas, as quais ao aliviar a tensão perpendicular e manter a tensão paralela a elas, acabam por favorecer o aparecimento de polígonos dispostos perpendicularmente aos seus planos de ruptura associados à deformação rúptil. A imbricação das formas poligonais nos flancos dos afloramentos arredondados, em conformidade com o campo gravitacional, deriva principalmente do fluxo lamelar das águas das chuvas sobre a face dos afloramentos. Os afloramentos arredondados são testemunhos de um pacote sedimentar isolado pela erosão que remove o arenito ao longo dos feixes entrecruzados de fraturas e arredonda as arestas.

Assim como as juntas intraestratais, as falhas com deslocamento sub-vertical possivelmente não correspondem diretamente aos lineamentos apresentados nos mapas, devido às pequenas dimensões apresentadas pelas estruturas em questão (salvo as situações nas quais estas se encontram associadas às bandas de deformação de grandes extensões).

As falhas normais, predominantemente organizadas em conjuntos NE e subordinadamente em conjuntos NW, não se mostraram muito freqüentes. Elas apresentaram abertura submilimétrica e rejeitos centimétricos. Os pequenos deslocamentos sub-verticais entre os estratos sedimentares dos blocos falhados, em algumas raras ocasiões, representam falhas reversas.

Devido às grandes dimensões apresentadas pelas falhas transcorrentes sem preenchimento de sílica, estas corresponderam aos lineamentos identificados preferencialmente nos produtos de sensores de média resolução (radar da *SRTM* e satélite *Landsat 7 ETM+*), e decrescem em importância na representação nos produtos de alta resolução. Estas falhas, ao contrário das falhas com deslocamento sub-vertical, estão organizadas preferencialmente em conjuntos NW e subordinadamente em conjuntos NE. As falhas transcorrentes, sem preenchimento de sílica e com cinemáticas sinistras e dextras, são mais abundantes que as bandas de deformação predominantemente orientadas na direção NE. Isto está associado ao fato do conjunto de lineamentos NW ser mais pervasivo que o conjunto NE nos mapas de lineamentos do radar *SRTM* e do satélite *Landsat ETM7+* na maioria das estações de coleta.

A maior expressividade das bandas de deformação de direção preferencial NE, e subordinada NW, permitiu que estas fossem caracterizadas especialmente pelos sistemas de sensores de média resolução espacial (radar *SRTM* e *Landsat 7 ETM+*) sendo indistinguível nas fotografias aéreas. O conjunto de lineamentos relacionados a tais estruturas apresenta comprimentos maiores e espaçamentos variáveis. No campo, as bandas de deformação se caracterizam por extensas superfícies preenchidas por material silicoso, ao longo das quais se desenvolvem sigmóides com dimensões decimétricas a métricas. Na estação CONF ocorre a maior concentração de bandas de deformação, onde se observou a alternância de movimentação sinistral e dextral associada aos conjuntos NW e NE.

Falhas em flor foram encontradas associadas aos conjuntos NE das falhas normais e das bandas de deformação, as quais podem corresponder, juntamente a estas, aos lineamentos do set NE. As falhas em flor são caracterizadas por um plano de falha principal, de dimensões que variam de poucos metros a mais de dez metros. Este tipo de falha está localmente em associação às estruturas de liquefação.

Estruturas de liquefação não puderam ser percebidas por nenhum dos sistemas de sensores orbitais, nem pelas fotografias aérea utilizadas. As evidências de liquefação foram encontradas em campo, com melhor expressão na estação de coleta do Baixão das Confusões (CONF). Nesta estação se concentra o maior número de dados, com a presença de todas as estruturas citadas acima. Estruturas de liquefação são indicativas de possível atividade sísmica sin a pós-deposicional.

VII.2 – Interpretação geodinâmica preliminar da evolução tectônica na borda sudeste da Bacia do Parnaíba

A compilação, em ambiente SIG, de dados aeromagnéticos (Oliveira, 1998) com os produtos de sistemas de sensores analisados auxiliou na compreensão da influência da estruturação pré-cambriana na evolução tectônica da borda sudeste da Bacia do Parnaíba. Pode-se sugerir que o *trend* de fraturas NE identificado na região principalmente a partir dos dados do radar da SRTM está relacionado ao limite entre unidades geotectônicas pertencentes a diferentes eóns geológicos (Pré-Cambriano: Cráton São Francisco e faixas Riacho do Pontal e Rio Preto; e Fanerozóico: Bacia do Parnaíba e sedimentação Quaternária) e aos alinhamentos e lineamentos regionais ativos pelo menos desde o ciclo transbrasiliiano, como o Lineamento Transbrasiliiano (Figura 2.6).

Portanto, a estruturação deste limite aparenta ter sofrido a influência de um campo de tensões análogo àquele atuante durante a transição entre o Neoproterozóico e o Eopaleozóico. O contato entre a bacia e seu embasamento, embora não necessariamente controlado pelo campo de tensões atuantes durante o Ciclo Brasileiro, mostra-se condicionado pela zona de fraqueza ativa durante este evento tectono-magmático.

As bandas de deformação indicam deformação rúptil atuante em níveis crustais mais profundos às demais estruturas encontradas. A análise geométrica das bandas de deformação encontrada no campo (conjuntos NS, NE e NW) induz à sugestão deste tipo de falha ter afetado os depósitos arenosos pré-devonianos na borda sudeste da Bacia do Parnaíba em dois pulsos distintos, correspondentes a dois campos de tensões com sigma 1 horizontal. Um campo com tensão máxima aproximadamente NS, responsável pelo desenvolvimento de um par conjugado de bandas de deformação NE e NW, e outro campo com tensão máxima NWSE, responsável pela formação das bandas de deformação sinistrais com direção NS. A distribuição irregular das bandas de deformação e o fato destas estarem preferencialmente inseridas no conjunto NE sugerem que estas estruturas correspondam a reativações pós-devonianas de grandes falhas geológicas pré-cambrianas, dada às

maiores dimensões destas em meio ao contexto regional. Por último, falhas normais de pequena expressão espacial e rejeitos centimétricos também foram observadas, mas suas ocorrências estão restritas a esta estação.

As falhas transcorrentes sem preechimento ocorrem distribuídas de modo homogêneo por todas as estações de coleta de dados. Ao considerar os indicadores cinemáticos sinistrais e destrais, apresentados por tais falhas organizadas em conjuntos preferencialmente NW, porém subordinadamente NE, EW e NS, permite que se sugira a influência dos dois prováveis campos de tensão responsáveis pela gênese das bandas de deformação. Tais campos de tensões teriam sido reativados e afetaram o pacote sedimentar estudado, quando este já se encontrava em níveis crustais relativamente mais rasos.

A elevada dispersão do conjunto de falhas transcorrentes NW pode indicar uma origem mais recente deste conjunto em relação aos demais, o que ocasionaria na inflexão de seus planos de fraqueza à medida que estes truncassem as estruturas mais antigas durante a propagação. No contexto regional, este conjunto, pode ter sido influenciado por algum lineamento NW mais regional, correlato ao evento responsável pela instalação do Lineamento Picos-Santa Inês.

Embora na zona de abrangência deste lineamento alternem-se paralelamente altos e baixos gravimétricos lineares, correspondentes a uma zona de cisalhamento profunda originada por esforços tensionais atuantes durante o Proterozóico Superior (**Almeida *et al.*, 1981**). A partir do Devoniano Inferior, o Lineamento Picos – Santa Inês condicionou um eixo deposicional atuante o que favoreceu a ligação da bacia com o mar aberto (**Cunha, 1986**). Este fato pode representar atividade tectônica deste lineamento mais jovem que o Lineamento Transbrasiliano.

Os conjuntos de juntas estão organizados em quatro direções preferenciais. Algumas juntas foram reativadas como falhas o que envolve a sucessão de no mínimo dois estados de tensões (**Wilkins *et al.* 2001**). A marcante existência de fraturas nitidamente sem evidências de movimentação entre os blocos fraturados, assinala uma sucessão de no mínimo dois campos de tensões ortogonais entre si. Tais tensões trativas foram responsáveis pela abertura consecutiva de dois pares ortogonais de sistemas de juntas: NE/NW - juntas de pequeno porte; e NS/EW - juntas de grande porte. A maior continuidade de juntas do conjunto EW sobre o conjunto NS, observada em imagens, em conjunto com as observações de truncamento em campo, indicam que o conjunto NS é mais recente que o conjunto EW. Dada à expressiva continuidade das juntas de grande porte, estas aparentam ser mais antigas que as juntas de pequeno porte; as quais ocorrem orientadas segundo dois conjuntos NE e NW. A elevada dispersão associada ao set NW sugere que esta seja posterior ao NE. As juntas intraestratais organizadas preferencialmente nas mesmas direções NE e NW podem estar associadas ao campo de tensões, posterior àquele responsável pela formação das juntas de grande porte. O conjunto de no mínimo quatro campos de tensões responsáveis pela formação dos conjuntos das juntas de um modo geral, provavelmente teve suas tensões procedentes do fenômeno de compactação da bacia.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOSTINHO S., MOURA C.R., NASCIMENTO DO M.C., VIANA M.S.S., LIMA FILHO M.F., VALENÇA L.M.M. 2002. Os icnofósseis do Parque Nacional da Serra da Capivara – Formação Pimenteira (Devoniano da Bacia do Parnaíba). *Paleo 2002 – Nordeste*, Aracajú – SE, 16 a 18 de janeiro de 2003.
- AGUIAR G.A. 1969. Bacia do Maranhão – Geologia e possibilidade de petróleo. Belém/PA, PETROBRÁS/DENOR, 1969 (relatório interno) 55 p.
- AGUIAR G.A. 1971. Revisão Geológica da Bacia paleozóica do Maranhão. *Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia*, São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia 113-122.
- ALBURQUERQUE O.R. & DEQUECH V. 1946. Contribuição para a geologia do meio-norte, especialmente Piauí e Maranhão, Brasil. *II Congresso Panamericano de Engenharia de Minas e Geologia*, Petrópolis, 1946, (3):69-109.
- ALLEN J.R.L. 1984. *Sedimentary Structures – Their Character and Physical basis*. Amsterdam. Elsevier. 663 p.
- ALMEIDA F.F.M. 1967. Origem e Evolução da Plataforma Brasileira. Div. Geol. Mineral, DNPM – Rio de Janeiro. *Bol.* **241**:36p.
- ALMEIDA F.F.M. 1969. Diferenciação tectônica da plataforma brasileira. *Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Geologia*, Salvador, Sociedade Brasileira de Geologia: 29-46.
- ALMEIDA F.F.M. de, HASUI Y., BRITO NEVES B.B., FUCK R.A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. *Atas do VIII Simpósio de Geologia do Nordeste*. Campina Grande – PB, 363-391 pp.
- ALMEIDA F.F.M. de, HASUI, Y. NEVES B.B. & FUCK, R.A. 1981. Brazilian Structural Provinces: an introduction. São Paulo, SP. *Earth-Sci. Rev.* (17):1-29.
- AMARO V.E. 1998. *Análise Conjunta de dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto do setor extremo do nordeste da Província Borborema, nordeste do Brasil, com ênfase nas zonas de cisalhamento dúcteis Neoproterzóicas*. Tese de Doutorado - IG/USP, São Paulo, S.P., 397 p.
- ANTONELLINI M. & AYDIN A. 1995. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: geometry and spatial distribution. *AAPG Bull.* **79**(5), 642-671.
- BONHAM-CARTER G.F., RENCZ A.N., & HARRIS J.R. 1985a. Spatial relationship of gold occurrences with lineaments derived from Landsat and Seasat imagery, Meguma Group, Nova Scotia, *Proc. 4th Thematic Conference, Remote Sensing for Exploration Geology*, San Francisco, April 1985,755-768.
- BORBA C., AGUIAR L.A.M., MACIEL W.B., ALMEIDA M.S., DIAS FILHO D.C., SOUZA R.S. 2004. Aspectos controladores do potencial selante de falhas: exemplo do campo de Pilar, Bacia Sergipe-Alagoas, Brasil. *B. Geoci. Petrobrás*, **12**(1), p. 125-147. Rio de Janeiro, nov.2003/ maio 2004.
- BRITO I.M. 1979. Estratigrafia da Bacia do Parnaíba I – A seqüência sedimentar inferior. *An. Acad. Brasil. Ciênc.* (1979) 51(4):695-727.
- BRITO NEVES B.B. 1983. *O mapa geológico do nordeste oriental do Brasil – Escala 1:1.000.000*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo – S.P. Tese de Livre Docência, 177 p.

- BRITO I.M. & SANTOS A.S. 1965. Contribuição ao conhecimento dos microfósseis silurianos e devonianos da Bacia do Maranhão. Parte I – Os Netromorphita (Leiofusidalia). Div. Geol. Mineral, DNPM - Rio de Janeiro. *Nota Prel.*, 129:28p.
- CAPUTO M.V. & LIMA E.C. 1984. Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande. *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia*, Rio de Janeiro, 1984, SBG- Núcleo RJ/ES, (2):740-753.
- CAROZZI A.V., FALKENHEIN F.U.H, CARNEIRO R.G., ESTEVES F.R., CONTREIRAS C.J.A. 1975. Análise ambiental e evolução tectônica sinsedimentar da seção siluro-eocarbonífera da Bacia do Maranhão. Rio de Janeiro, *Ciência técnica-petróleo*. Seção de Petróleo, (7):48p.
- CFCFF. 1996. *Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications* / Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow. National Academy Press. Washington, D.C. (1996).
- CHATERJEE R.S. 2003. Structural pattern of Holenarsipur Supracrustal Belt, Karnataka, Índia as observed from digitally enhanced high-resolution multi-sensor optical remote sensing data aided by field survey. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, (4): 195-215.
- CORDANI U.G., BRITO NEVES B.B., FUCK R.A., PORTO R., THOMAZ FILHO A. & CUNHA F.M.B. 1984. Estudo preliminar de integração do Pré-cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. *Ciência técnica-petróleo*. Seção de Petróleo, (15):1-7.
- CPRM 2001. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Sistemas de Informação Geográficas & Mapas na escala 1:2.500.000, 3ª edição – meio digital.
- CUNHA F.M.B. 1986. *Evolução Paleozóica da Bacia do Parnaíba e seu arcabouço tectônico*. UFRJ, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado 101p.
- DEMAISO G. & HUIZINGA B.J. 1994. Genetic classification of petroleum systems using three factors: charge, migration and entrapment. In: MAGOON L.B. & DOW W.G. (eds.) 1994. The petroleum system – from source to trap. *AAPG Memoir* 60: 73-89
- FORTES F.P. 1978. Geologia estrutural e tectônica da bacia sedimentar do meio-norte do Brasil (Uma síntese com implicações metalogenéticas). *Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia*, Recife, 1978, (1):321-336.
- FORTES F.P. 1996. *Geologia de Sete Cidades*. Teresina, Fundação Cultural Monsenhor Chaves, 144.
- FREIRE R.C. 2006. *Técnicas de aquisição de dados geológicos com a tecnologia LIDAR*. Dissertação de Mestrado nº 54/PPGG/UFRN, Natal, 2006.
- GILLESPIE P.A., HOWARD C.B., WALSH J.J. & WATTERSON J. 1993. Measurement and characterisation of spatial distributions of fractures. *Tectonophysics* 226: 113-141. Elsevier Science Publishers B.V, Amsterdam.
- GÓES A.M.O., SOUZA J.M.P., TEIXEIRA L.B. 1990. Estágio exploratório e perspectivas petrolíferas da Bacia do Parnaíba. *Boi Geoc. PETROBRÁS*,4(1):55-64.
- GÓES A.M.O, TRAVASSOS W.A.S, NUNES K.C. 1993. Projeto Parnaíba: Reavaliação da Bacia e Perspectivas Exploratórias. Belém – PA, 106 p.
- GÓES A.M.O & FEIJÓ F.J. 1994. Bacia do Parnaíba. *B. Geoci. Petrobrás* (8):57-67.

- GOLÇALVES M.R. 2003. Plano de Manejo do Parque nacional da Serra das Confusões. Instituto Desert, Brasília-DF.
- GUO C., GEORGE S.A., LINDSEY R.P. 1999. Statistical analysis of surface lineaments and fractures for characterizing naturally fractured reservoirs. *In: Schatzinger R. & Jordan J. (eds), Reservoir Characterization-Recent Advances. AAPG Memoir # 71*, p. 221-250.
- HANCOCK P.L., AL-HADHI A., BARKA A.A. & BEVAN T.G. 1987. Aspects of analysing brittle structures. *Annales Tectonicae 1 (1)*:5-19.
- HASUI Y., COSTA, J.B.S. AND ABREU. F.A.M. 1984a. Província Tocantins Setor Setentrional. *In: ALMEIDA F.F.M. & HASUI, Y. (coord). O Pré-Cambriano no Brasil. São Paulo, SP. Edgard Blucher, 187-204.*
- HINDLE A.D. 1997. Petroleum Migration Pathways and Charge Concentration: A Three-Dimensional Model. *AAPG Bulletin*, **81(9)**: 1451-1481.
- HOBBS W. H. 1904. Lineament of the Atlantic border region. *Geol.Soc.Amer.Bull*, **(15)**:483-506.
- HOBBS W. H. 1912. *Earthfeatures and their meaning*. MacMillan, New York, 506 p.
- JOSNIN J.Y., JOURDE H., FÉNART P. & BIDAUX P. 2002. A three-dimensional model to simulate joint networks in layered rock. *Can. J. Earth Sci.* **39**: 1443-1445. NRC Canada.
- KEGEL W. 1953. Contribuição para o estudo do Devoniano da bacia do Parnaíba. Rio de Janeiro, DNPM/Divisão e Geologia e Mineralogia, *Bolletim* nº141, 58 p.
- LEICA GEOSYSTEMS 2004. Manual de Modelamento – *Laserscanner* - modelo HDS 3000.
- LIMA E.A.A. & LEITE J.F. 1978. Projeto estudo global dos recursos minerais da bacia sedimentar do Parnaíba: Integração geológica-metalogenética – *Relatório final da etapa III*. Recife, PE, MME/DNPM/CPRM, 1978, 437 p.
- LOCZY L. & LADEIRA E.A. 1976. *Geologia estrutural e introdução à geotectônica*. São Paulo, SP, Ed. Blücher, 528 p.
- LORENZ J.C., WARPINSKI N.R., TEUFEL L.W. 1996. Natural fracture characteristics and effects. *The Leading Edge* -Agosto(1996):909-911 pp.
- LOWMAN P.D.JR, HARRIS J., MASUOKA P.M., SINGHROY V.H., SLANEY V.R. 1987. Shuttle imaging radar (SIR-B) investigations of the canadianshield: inicial report. *IEEE Trans.Geosc. Rem. Sens.*, **25**:139-159.
- MABESOONE J.M. 1971. Sediments of the Intracontinental Cretaceous Basins in Northeastern Brazil. – Natal. *Est. sedimentol.* **1(2)**:33-52p.
- MARINI O.J., FUCK R.A., DARDENNE M.A. & DANNI J.M.C *In: ALMEIDA F.F.M. & HASUI, Y. (coord). O Pré-Cambriano no Brasil. São Paulo, SP. Ed. Edgard Blücher, 1984, 205-264 pp.*
- MARRET R. 2004. Fracture scaling exercises: Analysis of extension fracture size and spacial distribution scaling based on data collected at Pedernales Falls State Park. *Curso ministrado por Randall Marrett pelo Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade do Rio Grande do Norte. Natal, 18-19 de Maio, 2004*
- MESNER J.C & WOOLDRIDGEL.C.P. 1962. The Maranhão study revision. Belém, PA, petrobrás/denor, 1962 (*relatório interno*).

- MESNER J.C & WOOLDRIDGELC.P. 1964. Maranhão Paleozoic basin and cretaceous coastal basins, north Brasil. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, Tulsa, Oklahoma, (48):1475-1512.
- METELO C.M.S. 1999. *Caracterização Estratigráfica do Grupo Serra Grande (Siluriano) na Borda Sudeste da Bacia da Parnaíba*. UFRJ, Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado 102p.
- MILANI E.J. & ZALÁN P.V. 1999. An Outline of the Geology and Petroleum Systems of the Paleozoic Interior Basins of South America. *Episodes* 22,(3). *Special Issue dedicated to the 31st International Geological Congress Rio de Janeiro, Brazil, 6 -17 August 2000*.
- NUNES A.B. *et al.* 1973a. Geologia de parte das folhas SC. 23, Rio São Francisco e SC. 24 Aracaju. Rio de Janeiro, RJ, DNPM, 1973 a, (*PROJETO RADAM*, v.1).
- NUNES A.B. *et al.* 1973b. Geologia da Folha SA.23 Teresina e parte da Folha Fortaleza SA.24. Rio de Janeiro, RJ, , DNPM, 1973 b, (*PROJETO RADAM*).
- OBERMEIER S.F. 1996a. Use of liquefatio-induced features for paleoseismic analysis – An overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from others features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes. *Engineering Geology*, 44: 1-76.
- OBERMEIER S.F. 1996b. Using liquefaction-induced features for paleoseismic analysis. In: McCalpin J.P. (ed.) *Paleoseismology*. London, Academic Press, 331-396.
- OBSERVATÓRIO NACIONAL – CPRM. 1987. Relação dos valores de gravidade da Região Nordeste. Rio de Janeiro, Observatório Nacional.
- OLDING N.L. 1992. Network properties of a two-dimensional nature fracture pattern, *Pageoph*, 138(95):114p.
- OLDING N.L. 1997. Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from Norway. *Journal of Structural Geology*, 19(10): 1257-1271. Elsevier Science Ltd., Great Britain, 1997.
- OLDING N.L., GILLESPIE P.A., BOURGINE B., CASTAING C., CHILÉS J-P., CHRISTENSEN N.P., FILLION E., GENTER A., OLSEN C. THRANE L., TRICE R. AARSETH E., WALSH J.J., WATTERSON J. 1999. Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractured hydrocarbon reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 5:373-384.
- O'LEARY D.W. & SIMPSON S. 1975. Lineaments and tectonism in the northern part of the Mississippi embayment. *Ann Arbor, Michigan*, 965-974.
- OLIVEIRA R.G. 1998. *Arcabouço geotectônico da região da Faixa Riacho do Pontal, nordeste do Brasil: dados aeromagnéticos e gravimétricos*. Dissertação de Mestrado – IG/USP, São Paulo, S.P., 157 p.
- PETIT J.P. 1987. Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology*, 9(5/6):597-608.
- POLETTO C.A. 1996. *Object based modeling and stochastic simulation of the geometry of fluvial reservoirs*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, UNICAMP.
- PREWITT J. 1970. Object enhancement and extration. LIPKIN B. & ROSENFELD A. (eds.). *Picture processing and psychopictorics*. Acedemic Press, New York.
- PROSPEC S.A. 1978. Projeto Borda Sul da Bacia do Parnaíba. MME/DNPM/CPRM/ Convênio DNPM/CPRM. *Relatório Final*, texto e anexos, Rio de Janeiro. 119 p.

- QUADROS L.P. 1982. *Distribuição bioestratigráfica dos Chitinozoa e Acritarchae na Bacia do Parnaíba – Rio de Janeiro, R.J.* PETROBRÁS/CEMPES/SINTEP, 1982, - Tese de Mestrado. (Série Ciência-técnica-petróleo. Seção: Exploração de Pateóleo (12), 76 p.
- RODRIGUES R. 1967. Estudo sedimentológico e estratigráfico dos depósitos silurianos e devonianos da Bacia do Parnaíba. Belém/PA, PETROBRÁS/DENOR, 1967 (*relatório interno*) 48 p.
- ROSSETTI D.F. 2003. Bacias Sedimentares Brasileiras – Bacia de São Luís - Grajaú. *Phoenix*, Ano 5, nº 58, outubro, 2003.
- SABINS F.F. -1978 - *Remote Sensing. Principles and Interpretation*. Freeman, New York.
- SANTOS A.R. dos 1986. O sensoriamento remoto e a estrutura rúptil: exemplos de aplicações em estudos tectônicos. *Simpósio Latino-Americano de Sensoriamento Remoto, Gramado, RS (1986) (1):*429-434.
- SCHOBENHAUS FILHO C. 1975. Carta geológica do Brasil ao Milionésio – Folha Tocantins (SC.22). DNPM-DGM, Brasília, 57 p.
- SCHOBENHAUS FILHO C. & CAMPOS D.A. 1984. A evolução da plataforma sul-americana no Brasil e suas principais concentrações minerais. In: SCHOBENHAUS FILHO C., CAMPOS D.A., DERZE G.R., ASMUS H.E. (coords.). *Geologia do Brasil (texto explicativo)*. Brasília, DNPM, 9-53.
- SILVA JR. J.M.F. 1997. *Um regime rúptil pós-Siluriano-Devoniano no Domínio da Zona Transversal, Província Borborema – NE do Brasil*. Departamento de Geologia, UFOP, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 137 p.
- SLOSS L.L. 1963. Sequences in the cratonic interior of North America. *Geological Society of America Bulletin (14):*93-114.
- SOARES P.C., LANDIM P.M.B., FÚLFARO V.J. 1978. Avaliação preliminar da evolução geotectônica das bacias intracratônicas brasileiras. *Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia*, 1978, 61-83.
- SOUZA M.G. 2000. *Aeromanetometria e Sensoriamento Remoto da Faixa Seridó/RN: Aplicações em tectônica e em controle de depósitos*. Dissertação de Mestrado, 17 - PPGG-UFRN. Natal-RN, 119 p.
- SUMMERFIELD, 1988. Systems theory of landscape evolution – principle of tectonic predesign. In: SCHEIDEGGER A.E. 1990 (ed.) *Theoretical Geomorphology*, 433 p.
- THURMOND J.B. 2004. From collection to utilization: outcrop analog data in 3D world. *Search and Discovery Article #40126 (2204) - poster presentation AAPG Annual Meeting*, Dallas, Texas, 18-21 de abril, 2004.
- TINSLEY J.C., YOUD T.L., PERKINS D.M. & CHEN A.T.F. 1985. Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region – An earth science perspective. Washington, D.C., U.S. Geological Survey (*Geological Survey Professional Paper*, n. 1360).
- TWISS R.J. & MOORES E.M. 1992. *Structural Geology*. 513 p.
- WHEELER R.L. 1983- Linesmanship and the practice of linear geo-art: Discussion. *Geol. Socie. Am. Bull. (94):*1377-1379.
- WILKINS S.J., GROSS M.R., WACKER M., EYAL Y. ENGELDER T. 2001. Faulted joints: kinematics, displacement-length scaling relations and criteria for their identification. *Journal of Structural Geology* **23**:315-327.

- WISE D.U., FUNICELLO R., PAROTTO M. & SALVINI F. 1985 – Topographic lineaments swarms: clues to their origin from domain analysis of Italy. *Geol. Soc. Am. Bull.* (96):952-967.
- YAMAGUCHI, Y. 1985. Image-scale and look-direction effects on the detectability of lineaments in radar images: *Remote Sensing of Environment*, 17:117-127.
- YIELDING G., FREEMAN B.E., NEEDHAM D.T. 1997. Quantitative Fault Seal Prediction. *AAPG Bulletin*, 81(6):897–917, june 1997.
- ZALÁN P.V. 2003. Informação oral no 42º Congresso Brasileiro de Geologia – Araxá – MG

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)