



**CONTROLE ESTRUTURAL DOS CARBONATITOS NO RIO
GRANDE DO SUL: ANÁLISE DE PRODUTOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO E AEROGEOFÍSICOS**

Porto Alegre, Dezembro de 2012

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eliel Martins Senhorinho

**CONTROLE ESTRUTURAL DOS CARBONATITOS NO RIO
GRANDE DO SUL: ANÁLISE DE PRODUTOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO E AEROGEOFÍSICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores:

Prof. Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus

Prof. Dr. Norberto Dani

Supervisor:

João Angelo Toniolo

Porto Alegre, Dezembro de 2012

Senhorinho, Eiel Martins

Controle estrutural dos carbonatitos no Rio Grande do Sul:
Análise de produtos de sensoriamento remoto e
aerogeofísicos. / Eiel Martins Senhorinho - Porto Alegre :
IGEO/UFRGS, 2012.

162 f. il.

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia. -
Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de
Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2012.

Orientador: Marcus Vinicius Dorneles Remus

Orientador: Norberto Dani

1. Carbonatito. 2. Sensoriamento Remoto. 3 Controle
Estrutural. 4. Aerogeofísica. 5. Lineamentos. I. Título.

Catálogo na Publicação

Biblioteca Geociências - UFRGS

Renata Cristina Grün CRB 10/1113

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “**CONTROLE ESTRUTURAL DOS CARBONATITOS NO RIO GRANDE DO SUL : ANÁLISE DE PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO E AEROGEOFÍSICOS**”, elaborado por “ELIEL MARTINS SENHORINHO”, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Nelson Amoretti Lisboa

Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer

Resumo

Os carbonatitos são litologias pertencentes ao grupo de rochas alcalinas e que apresentam grande interesse científico e econômico. Mundialmente se relata a ocorrência de 527 corpos de rochas carbonatíticas, o que salienta a singularidade composicional desse tipo de litologia na geologia global, sendo conhecido apenas um vulcão ativo deste tipo de rocha. No Brasil, é válido fazer especial menção para 5 corpos atualmente sob exploração mineral, nenhum deles situados no Rio Grande do Sul. O trabalho tem como objetivo caracterizar os dois corpos, recentemente identificados, de rochas carbonatíticas no Rio Grande do Sul, denominados Joca Tavares e Três Estradas, cuja descoberta eleva para 529 a contagem de ocorrências mundiais de carbonatitos. O objetivo principal do estudo é a caracterização, espacial e estrutural de cada corpo, a identificação de suas relações com as encaixantes, estabelecimento dos controles estruturais e contextualização geológica no escudo gaúcho, finalizado com a confecção de uma base SIG do projeto. O estudo deu-se a partir da reunião e integração de diversos dados sobre a área, análise detalhada de produtos de sensoriamento remoto disponíveis (fotografias aéreas, imagens de satélite) correlacionados com dados aerogeofísicos. Os produtos assim obtidos foram associados a descrições petrográficas a partir de amostras coletadas em campo e levantamentos no terreno para verificações litológicas e medições de parâmetros estruturais. O carbonatito Três Estradas está encaixado em gnaisses do embasamento (Complexo Granulítico Santa Maria Chico) e possui foliação orientada na direção NE, frequentemente com dobras fechadas a abertas. Tais características permitem classificar o corpo Três Estradas como um carbonatito do **tipo linear**. O corpo Joca Tavares não possui foliação e está intrudido no contato entre os metamorfitos Arroio Marmeleiro e silicilásticas da Formação Cerro do Bugio sendo classificado como carbonatito do **tipo central**. Ambos os corpos situam-se próximo a intersecção de falhas NE-NW com abrangência regional. Conclui-se que os carbonatitos Joca Tavares e Três Estradas alojaram-se em sítios definidos pela intersecção de falhas NE e NW. A zona de falhas Suspiro-Linhares

(Lineamento Ibaré) de orientação NW, que demarca o limite entre dois blocos, um constituído por rochas da crosta inferior (Complexo Granulítico) e o outro por rochas supracrustais do Grupo Palmas, constitui a estrutura que exerce o controle principal da ocorrência dos carbonatitos. O resultado do estudo permitiu a organização e a geração de uma quantidade significativa de dados abordando as ocorrências de rochas carbonatíticas em território gaúcho.

Palavras-Chave: Carbonatito; Sensoriamento Remoto; Controle Estrutural; Aerogeofísica; Petrografia; Lineamentos.

Abstract

Carbonatites are alkaline rocks of economical and scientific singular importance in the geologic context due their specific particularities. Worldwide are known 527 punctual occurrences of carbonatite bodies, fact that points to the compositional singularity of this litology in the global geology. Only one of the occurrences is an active carbonatite-type volcano. Brazil holds five carbonatite bodies under mineral exploration, anyone in Rio Grande do Sul state. This work focus on the characterization of a recently discovered pair of carbonatites named as Joca Tavares Carbonatite and Tres Estradas Carbonatite, their identification on Rio Grande do Sul count up to 529 global carbonatites occurrences. The main objectives of this project are to macroscopic petrography, spatial and structural characterization of each body, its structural control and wallrock relationships and regional geological setting of the carbonatites in the Rio Grande do Sul shield. This work ends with making of a GIS system data . The study started with the collection and integration of diverse information surrounding the occurrences and involved detailed analysis of remote sensing (satellite and aerial) images plus airborne geophysical data. Thus the products generated were associated to field lithological verification, petrographic description of rock samples and in situ structural measurements. Tres Estradas Carbonatite are hosted by basement gneisses (Santa Maria Chico Granulitic Complex) and show oriented foliation to northeast direction, often folding. Hence, Tres Estradas is classified as a **linear type** carbonatite. The Joca Tavares Carbonatite is intruded along contact between Arroio Marmeleiro metamorphics and Cerro do Bugio siliciclastics and did not show foliation and is classified as a **central type** carbonatite. Both are situated near to significant NE-NW faults intersections. It is possible to conclude that the Joca Tavares and Tres Estradas were located at specific sites pointed by the NE and NW crossing faults. The northwest oriented Suspiro-Linhares Fault Zone (Ibare Lineament) consists of the main structural control of carbonatites occurrences, this lineament delimits the boundary between upper crustal rocks of the Palmas Group and the deepest exposed crust (Santa Maria Chico Granulitic Complex). This

project organized and generate a significant amount of data approaching the carbonatitic rocks on Rio Grande do Sul.

Key-words: Carbonatite; Remote sensing; Structural control; Airborne geophysics; Petrography.

Agradecimentos e Dedicatória

Agradeço à minha família, minha namorada, meus professores orientadores. A eles dedico este trabalho.

E eles viram um novo mundo tornar-se visível aos seus olhos;
e ele formava um globo no meio do vazio, e se mantinha ali,
mas não pertencia ao vazio, e enquanto contemplavam perplexos,
esse mundo começou a desenrolar sua história,
e a eles parecia que o mundo tinha vida e crescia.

J. R. R. Tolkien – O Silmarillion

Sumário

Resumo	IV
Abstract	VI
Sumário	VIII
Lista de Figuras.....	XII
Lista de Quadros.....	XVI
Lista de Tabelas.....	XVII
1. Introdução	1
1.1. Temática	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Justificativa e Problemática	4
1.4. Comprovação Litológica.....	8
1.5. Localização	9
1.5.1. Informações Referenciais	9
1.5.2. Informações Cartográficas.....	11
2. Metodologia.....	14
2.1. Resumo Metodológico do Trabalho.....	14
2.2. Etapas e Procedimentos de Investigação.....	20
2.2.1. Etapa Pré-Campo	20
2.2.2. Etapa de Campo	20
2.2.3. Etapa Pós-Campo.....	20
2.3. Relação de Técnicas Utilizadas.....	21
2.4. Extração de Informações Aerofotogeológicas	21
2.5. Aplicativos Utilizados	26
3. Estado da Arte	27
3.1. Revisão Bibliográfica sobre Carbonatitos	27
3.1.1. Conceito	27
3.1.2. Panorama Mundial de Rochas Carbonatíticas	29
3.1.3. Panorama Brasileiro de Rochas Carbonatíticas.....	31
3.2. Zonas de Cisalhamento	34
3.2.1. Conceitos	34
3.2.2. Feições Estruturais e Marcadores de Direção de Movimento.....	42
3.3. Controles Estruturais nos Carbonatitos Brasileiros	47
4. Conhecimento Geológico dos Sítios.....	51
4.1. Cenário Tectônico Continental.....	51
4.2. Domínio Tectônico	56
4.3. Fisiografia.....	59
4.4. Domínio Morfoestrutural.....	60
5. Análise Morfoestrutural	62
5.1. Teledetecção: Imagens de Satélite.....	62
5.2. Aerofotogeologia	69
5.2.2. Aerofotointerpretação da Área-Alvo Joca Tavares.....	73
5.2.3. Aerofotointerpretação da Área-Alvo Três Estradas	85
5.3. Aerogeofísica	95
5.4. Informações de Campo.....	102
5.4.1. Milonitização e Informações Estruturais	106
5.4.2. Bandamento Gnáissico e Informações Litológicas.....	124

5.5. Interpretações Finais.....	132
6. Discussão e Conclusões.....	141
Referências Bibliográficas.....	144
Anexos	162
ANEXO A - COMPILAÇÃO DA CADERNETA DE CAMPO	162
ANEXO B - MAPA GEOLÓGICO - ÁREA DO PROJETO.....	162
ANEXO C - MAPA LITOLÓGICO DE PONTOS - CARBONATITO TRÊS ESTRADAS	162
ANEXO D - MAPA ESTRUTURAL DE MEDIDAS DE FOLIAÇÕES - CARBONATITO TRÊS ESTRADAS....	162
ANEXO E - MAPA ESTRUTURAL DE MEDIDAS DE FALHAS - CARBONATITO TRÊS ESTRADAS	162
ANEXO F - TABELA DE PONTOS LITOLÓGICOS DE CAMPO - CARBONATITO TRÊS ESTRADAS	162
ANEXO G - TABELA DE MEDIDAS ESTRUTURAIS UNIFORMIZADAS	162
ANEXO H - TABELA DE MEDIDAS ESTRUTURAIS POR TIPO DE ESTRUTURA - CARBONATITO TRÊS ESTRADAS	162
ANEXO I - TABELA DE MEDIDAS ESTRUTURAIS POR TIPO DE LITOLOGIA - CARBONATITO TRÊS ESTRADAS	162

Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplos de carbonatitos associados a zonas de flexura marginal de bacias do Gondwana. O círculo demarca uma hipotética zona flexurada pela pluma Tristão da Cunha. Os complexos alcalino-carbonatíticos assinalados são: 1 – Cerro Chiriguelo; 2 – Juquiá; 3 – Jacupiranga; 4 – Anitápolis; 5 – Tchivira-Bonga; 6 – Kalkfeld; 7 – Araxá; 8 – Catalão I; 9 – Dicker Willem. Todos estes 9 complexos alcalino-carbonatíticos são classificados como Tipo Central. Obtido em Comin-Chiaramonti <i>et al.</i> (2007).....	5
Figura 2 – Exemplos de complexos alcalino-carbonatíticos associados a lineamentos na margem leste da Bacia do Paraná e a diques alcalinos em orientações paralelas. Modificado de Ruberti <i>et al.</i> (2008).....	5
Figura 3 – Mapa exemplificativo esquemático de compartimentação estrutural da Zona Carbonatítica Linear Tatarskaya. Modificado de Lapin <i>et al.</i> (1987).....	6
Figura 4 – Mapa litológico exemplificativo de um carbonatito do Tipo Central: Complexo Carbonatítico Circular Goudini. Modificado de Verwoerd (2008).	6
Figura 5 - Localização das ocorrências de rochas carbonatíticas abrangidas pelo projeto. Modificado de TONIOLO <i>et al.</i> (2010)	10
Figura 6 - Mapa Viário e de localização das áreas alvo do projeto.	11
Figura 7 - Articulação esquemática das cartas do Brasil ao milionésimo (Em escala 1:1.000.000) e indicações das zonas UTM no Brasil. As cartas onde se situam os carbonatitos estão demarcadas em cinza.	12
Figura 8 - Disposição cartográfica das cartas 1:50.000 importantes para o projeto. As localidades de Joca Tavares e Três Estradas encontram-se nas folhas demarcadas em cor cinza.	13
Figura 9 - Mapa ilustrativo de localização cartográfica dos pontos de ocorrência em latitude e longitude e respectiva distância entre as áreas alvo.	16
Figura 10 - Mapa de localização das áreas-alvo do projeto com articulação das cartas locais.	17
Figura 11 – Área de abrangência dos mapas geológicos pesquisados neste trabalho.	19
Figura 12 - Articulação parcial das fotografias aéreas que cobrem a área do projeto.	22
Figura 13 - <i>Screenshot</i> da interface do aplicativo Anaglyph Maker 3D.....	23
Figura 14 - <i>Screenshot</i> da interface básica do programa ImageJ.....	25
Figura 15 – Classificação química através do diagrama $CaO : MgO : (FeO + Fe_2O_3 + MnO)$ para os carbonatitos das classes dolomítica, calcítica e ferrífera, modificado de Wernick (2004), extraído de Le Maitre (1989).	29
Figura 16 - Lavas brancas do Ol Doinyio, obtido em en.wikipedia.org , acessada em dezembro de 2012.	30
Figura 17 - Ocorrências por continente conforme Woolley & Kjærsgaard (2008).	31
Figura 18 – Distribuição mundial dos principais carbonatitos conhecidos atualmente, modificado de Woolley & Kjærsgaard (2008).	31
Figura 19 - Regimes de cisalhamento representados em blocos 2D: I – Seção Indeformada; II - Cisalhamento Rúptil; III e IV - Cisalhamento Rúptil-Dúctil / Dúctil-Rúptil; V - Cisalhamento Dúctil. Modificado de Hasui & Costa (1991).	36
Figura 20 - Representação de Blocos 2D sob diferentes tipos de cisalhamento, à esquerda os blocos estão indeformados, e à direita estão sob deformação do tipo: I - Cisalhamento heterogêneo; II - Cisalhamento homogêneo (Fossen, 2010).	36
Figura 21 - Possíveis geometrias de deformação perfazendo seis campos de deslocamento; no centro, o bloco 2D indeformado; à esquerda, blocos sob cisalhamento heterogêneo; à direita, sob cisalhamento homogêneo. Modificado de Hasui & Costa (1991).	37

Figura 22 - Relação entre profundidade crustal e regime deformacional dentro de uma zona de cisalhamento contínua, modificado de Sibson (1977).	38
Figura 23 – Representação esquemática de estruturas formadas na crosta e encontradas em zonas de cisalhamento em relação ao nível crustal, sob regime rúptil em rochas mais resistentes (falhas, clivagem de fratura) e regime dúctil em rochas menos resistentes (flexão, xistosidade de fluxo). Criado a partir de Sibson (1977), Fossen (2010), Press et al. (2007) e Hasui & Costa (1991).	40
Figura 24 - Mapa evidenciado duas características: o posicionamento dos complexos alcalinos e carbonatíticos brasileiros em zonas de margem de bacias fanerozóicas e controlados estruturalmente por três lineamentos de escala continental. Modificado de Biondi (2005).	49
Figura 25 - Mapa tectônico do leste do Uruguai e sul do Rio Grande do Sul, modificado de Oyhamtçabal <i>et al.</i> (2012).	55
Figura 26 - Mapa exibindo os domínios tectônicos do Rio Grande do Sul. Extraído de CPRM (2007).	58
Figura 27 - Composição RGB-347 de imagem LANDSAT 5 para a Área do Projeto (Ano ou época de obtenção da imagem pelo satélite?).	63
Figura 28 – Lineamentos traçados na composição RGB 347 de imagem LANDSAT 5 para a Área do Projeto.	64
Figura 29 - Compartimentação da Área do Projeto de acordo com os lineamentos mais evidentes e sua correlação com os blocos tectônicos usuais para o Rio Grande do Sul. Os compartimentos foram numerados de 1 a 7 e agrupados de acordo com a divisão tectônica convencional para o Escudo Sul-Rio-Grandense.	67
Figura 30 - Imagem LANDSAT 5 da Área-Alvo Joca Tavares.	68
Figura 31 - Imagem LANDSAT 5 da Área-Alvo Três Estradas.	69
Figura 32 - Anomalia de vegetação na Área-Alvo Joca Tavares identificada por fotointerpretação, nesta ilustração os limites de unidades geomorfológicas estão plotados sobre a imagem Google Earth para uma melhor visualização.	73
Figura 33 - Fotolineamentos traçados na Área-Alvo Joca Tavares.	76
Figura 34 - Diagramas de Rosetas: A - Diagrama de roseta de orientações de cristas feito a partir da análise de fotolineamentos. B – Diagrama de roseta de orientações de fotolineamentos de vales feito a partir da análise de fotolineamentos. C - Diagrama de roseta de orientações de demais fotolineamentos feito a partir da análise de fotolineamentos tonais, de quebras de relevo e outras feições de relevo.	78
Figura 35 - Diagramas de comprimentos de fotolineamentos: A - Diagrama de comprimentos de fotolineamentos de vale. B - Diagrama de comprimentos de fotolineamentos de cristas. C - Diagrama de comprimentos de fotolineamentos tonais, de quebras de relevo e outras feições de relevo.	79
Figura 36 – Mapa de blocos morfoestruturais da Área-Alvo Joca Tavares.	81
Figura 37 - Mapa Geológico da Área-Alvo Joca Tavares com a área provisional de ocorrência de litologia carbonatítica assinalada em amarelo como “Porção Superficial de Ocorrência do Carbonatito Joca Tavares” baseada em dados de pontos geológicos e na anomalia de vegetação desta área-alvo. Fonte: Base geológica disponível em geobank.sa.cprm.gov.br e pontos geológicos inéditos do Projeto Agrominerais do RS – CPRM e de trabalhos de campo dos orientadores deste trabalho.	84
Figura 38 - Anomalia de vegetação na Área-Alvo Três Estradas reconhecida por fotointerpretação, nesta ilustração os limites de unidades geomorfológicas estão plotados sobre a imagem Google Earth para uma melhor visualização.	85
Figura 39 - Fotografia de campo exibindo o limite entre unidades geomorfológicas dado pela quebra de relevo entre dois diferentes patamares: ao fundo demarcado com a letra A está a Unidade Geomorfológica 1, de coxilhas e relevo pronunciado com rios em vales cujas litologias encontradas são o carbonatito e o gnaiss e onde nota-se a anomalia de	

vegetação densamente desenvolvida cobrindo algumas encostas; enquanto à frente, no primeiro plano da fotografia, demarcado com a letra B está a Unidade Geomorfológica 2, um descampado de relevo plano com córregos e muitas áreas úmidas cuja litologia predominante é o arenito, tendo no centro desta foto alguns matacões e lajeados de arenito conglomerático matriz-suportado correlacionável à Formação Arroio América conforme dados geológicos prévios da região.	87
Figura 40 - Fotolineamentos da Área-Alvo Três Estradas.....	90
Figura 41 - Diagramas de Rosetas: A - Diagrama de roseta de orientações de cristas feito a partir de medidas tomadas em campo. B - Diagrama de roseta de orientações de cristas feito a partir da análise de fotolineamentos. C - Diagrama de roseta de orientações da análise de fotolineamentos tonais, de quebras de relevo e outras feições de relevo. D – Diagrama de roseta de orientações de fotolineamentos de vales feito a partir da análise de fotolineamentos.	91
Figura 42 - Diagramas de comprimentos de fotolineamentos: A - Diagrama de comprimentos de fotolineamentos de vale. B - Diagrama de comprimentos de fotolineamentos de cristas. C - Diagrama de comprimentos de outros fotolineamentos: quebras de relevo, fotolineamentos tonais e outras feições de relevo.....	92
Figura 43 – Mapa de blocos morfoestruturais da Área-Alvo Três Estradas.....	95
Figura 44 - Situação dos carbonatitos na compartimentação geofísica do Escudo Sul-Rio-Grandense conforme interpretada por Fernandes <i>et al.</i> (1995). Os lineamentos traçados em imagens de satélite LANDSAT 5 estão contidos dentro da hachura da Área do Projeto. ..	96
Figura 45 - Situação dos carbonatitos na compartimentação geofísica do Escudo Sul-Rio-Grandense conforme interpretada por Hartmann <i>et al.</i> (2007).....	97
Figura 46 - Mapa aeromagnetométrico da Área do Projeto exibindo os domínios de polaridade magnética integrado ao traçado de falhas regionais e lineamentos magnéticos.	98
Figura 47 - Mapa colorimétrico de magnetismo total integrado a um mapa geológico simplificado de associações de unidades geológicas da Área do Projeto.	100
Figura 48 - Mapa aerogeofísico de magnetismo total para a Área-Alvo Joca Tavares.....	101
Figura 49 - Mapa aerogeofísico de magnetismo total para a Área-Alvo Três Estradas.....	102
Figura 50 – Vista em planta da área ressaltando aspectos geográficos e posicionamento do Perfil da Ferrovia.....	104
Figura 51 - Corte lateral apresentando a topografia ao longo do Perfil da Ferrovia.	105
Figura 52 - Diagramas de rosetas sobrepostos da área alvo Três Estradas: em amarelo o diagrama de roseta do strike dos planos de falha medidos; em verde o diagrama de roseta do strike dos planos de fratura de juntas medidos; em vermelho as direções coincidentes de fraturas de juntas e falhas.....	106
Figura 53 - Carbonatito falhado, onde nota-se o deslocamento de até 3 cm entre duas faces separadas por uma falha. Nota-se também a grande quantidade de juntas nesta amostra, o que é comum nos carbonatitos da área dada sua resistência menor comparada às rochas gnáissicas em que se hospeda.	107
Figura 54 - Modelo local proposto da relação entre recristalização, milonitização e decorrente destruição da fábrica original da rocha gnáissica. Ilustração baseada em Ruberti <i>et al.</i> (2000) e Press.....	109
Figura 55 - Augen-gnaiss com bandas de composição máfica e félsica e com pórfiros de feldspato originais. (Não-Milonitizado e Não-Cloritizado).....	111
Figura 56 - Protomilonito Gnáissico (não-cloritizado) onde a composição das bandas ainda é a original, sendo elas máficas e félsicas, predominando as félsicas nesta fotografia. A milonitização não está em um estágio avançado, estando discordante com o bandamento neste trecho da rocha. O bandamento está comprimido pelas pressões relacionadas à protomilonitização que atuou. Ocorrem veios de espessura milimétrica e de composição carbonática discordantes com o bandamento e como demarcadores do plano de protomilonitização desta amostra.	112

Figura 57 - Clorita Milonito Gnáissico, cuja composição mineralógica já é significativamente clorítica devido à recristalização metamórfica e onde as feições originais do bandamento já não são visíveis devido à milonitização da amostra, sendo que a foliação observada é a milonítica.....	112
Figura 58 - Clorita Ultramilonito, a partir do gnaiss original esta amostra se encontra totalmente milonitizada e totalmente cloritizada, sem traços da textura e mineralogia originais da rocha, tendo ainda como seus constituintes uma considerável quantidade de biotita e possivelmente mais algum filossilicato presente. Na sua assembleia mineralógica ocorre ainda epidoto e carbonato, restritos a pequenas “folhas”, lentes estiradas ou fraturas preenchidas, concordantes com a foliação milonítica.	113
Figura 59 - Textura de um espelho de falha não-cloritizado ou minimamente cloritizado porém muito bem estriado.	114
Figura 60 - Estereogramas das falhas: A - Plotagem de todas medidas de falhas, incluindo as com planos estriados. B - Plotagem das medidas de falhas somente com planos estriados.....	115
Figura 61 - Modelo estrutural local de deformação provocada pela zona de cisalhamento Suspiro-Linhares. O modelo é consistente com o esquema mostrado no extremo NW da Figura, pois as orientações originais dos planos (falhas, bandamentos/ foliações) era NE.	117
Figura 62 - Diagramas de rosetas das direções das falhas (<i>strikes</i>): A - Plotagem de todas medidas de falhas, incluindo as com planos estriados. B - Plotagem das medidas de falhas somente com planos estriados.	119
Figura 63 - Fotografias de campo e plotagens estereográficas de falhas estriadas na rocha gnáissica em cruzamentos ortogonais a oblíquos com menor recristalização metamórfica, do tipo cloritização.	120
Figura 64 - Diagrama estereográfico de densidades confeccionado a partir das medidas dos pólos de planos de falhas plotadas: A - Densidade a partir da plotagem de todas medidas de falhas, incluindo as com planos estriados. B - Densidade a partir da plotagem das medidas de falhas somente com planos estriados.	121
Figura 65 - Fotografia evidenciando dobra em afloramento de carbonatito.....	122
Figura 66 - Legenda da Figura 67.	122
Figura 67 - Mapa exibindo as falhas medidas em planta, cruzadas com fotolineamentos traçados na Área-Alvo Três Estradas.	123
Figura 68 - Estereograma das medidas de bandamento obtidas na Área-Alvo Três Estradas.....	125
Figura 69 - Diagrama de roseta das medidas de bandamento obtidas na Área-Alvo Três Estradas.	125
Figura 70 - Gnaiss com bandas de composição máfica e magnetítica predominantes e bandas félsicas subordinadas, além da presença de veios de carbonatos concordantes com o bandamento.	126
Figura 71 - Seixos de bandas magnetíticas em leito fluvial. Nota: Impossível utilizar a bússula para tomar medidas quando próximo a estas rochas.	127
Figura 72 - Carbonatito foliado portador de bandas de composição magnetíticas e máficas.	128
Figura 73 - Gnaisses portadores de carbonatos em: A - espelho de falha, B - estrutura circular a elipsoidal, C - estrutura cilíndrica, D - veio individual em fratura, E - rede de vênulas, F - veio bem desenvolvido.....	131
Figura 74 - Mapa integrado de informações estruturais e geológicas da Área-Alvo Três Estradas.	137
Figura 75 - Mapa apresentando os principais falhamentos f da Área do Projeto e suas relações com o controle estrutural dos carbonatitos.	138
Figura 76 - Bloco-Diagrama esquemático da Área-Alvo Três Estradas.	140

Lista de Quadros

Quadro 2 - Classificação de rochas geradas em falhas segundo Ruberti *et al.* (2000).109

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Quadro comparativo de Ruppel (2012) das estimativas de temperatura de equilíbrio das cloritas da zona de falha de Ibaré segundo diferentes geotermômetros.110

1. Introdução

1.1. Temática

O atual projeto tem como linha temática a investigação do sítio onde se encontra inserido as ocorrências de rochas carbonatíticas no Rio Grande do Sul, acrescentando novos dados através de um estudo detalhado a partir de produtos de sensoriamento remoto e observações de campo, integrado com fontes de dados compiladas e disponibilizadas no projeto (informações litológicas, geofísicas e geoquímicas) associado numa base espacial comum através de ferramentas proporcionadas por um sistema de informações geográfica (SIG). O objetivo é delimitar as ocorrências, caracterizar e entender os controles estruturais atuantes.

As rochas carbonatíticas no Rio Grande do Sul foram prospectadas pela equipe de geólogos do Projeto Agrominerais do RS, coordenado pelo geólogo João Angelo Toniolo, um projeto regional dentro do projeto nacional denominado Projeto Fosfato Brasil, coordenado por Maisa Bastos Abram, ambos envolvendo pesquisas direcionadas para a descoberta de reservas fosfáticas sedimentares e magmatogênicas no âmbito do Serviço Geológico do Brasil - CPRM (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais). A equipe do Projeto Agrominerais responsável pela descoberta das rochas carbonatíticas em solo gaúcho é composta pelos geólogos Giovani Nunes Parisi, Carlos Antônio Grazia e João Angelo Toniolo e pelo geofísico Luís Gustavo Pinto. Foram identificadas duas ocorrências, uma na localidade de Joca Tavares e outra na localidade denominada de Três Estradas. Esses dois corpos distintos de rochas carbonatíticas, até então inéditos dentro do

cenário geológico gaúcho, foram denominados de acordo com as respectivas localidades onde estão situados.

Os dois corpos carbonatíticos foram descobertos durante pesquisas e trabalhos de campo que se desenvolveram no decorrer dos anos de 2009 e 2010 pela equipe anteriormente mencionada. A prospecção se estendeu nos anos de 2011 e 2012 devido ao interesse despertado pela descoberta destes corpos. A importância deste tipo de rocha pode ser atestada por diversos fatos. Um deles é a imediata requisição junto ao DNPM de uma das áreas prospectadas para pesquisas do grupo Águia Metais, que a partir de então contou com o trabalho de mapeamento da geóloga Cimara Monteiro, cujas informações e auxílio nos trabalhos de campo foram importantes para o desenvolvimento do projeto. Outro fato refere-se ao doutorado em curso neste ano, 2012, por João Ângelo Toniolo, focado nos carbonatitos gaúchos.

A primeira ocorrência de rocha carbonatítica do RS foi apresentada à comunidade científica brasileira com a publicação do trabalho de Parisi *et al.* (2010). No mesmo ano, a segunda ocorrência de rocha carbonatítica foi apresentada para a comunidade científica através da publicação de Toniolo *et al.* (2010) e abordada em Grazia *et al.* (2011).

O tema carbonatito no Rio Grande do Sul ainda se reveste de ineditismo visto que os estudos se encontram em fase inicial. Para complementar os estudos elaborou-se este projeto que explora a contextualização destas rochas dentro do nível de conhecimento da geologia do escudo Sul Rio-Grandense e não tem a pretensão de ser completo, mas, de auxiliar na compreensão do assunto.

1.2. Objetivos

O estudo foi elaborado com ênfase para o uso de técnicas de sensoriamento remoto, observações de campo e possíveis relacionamentos com levantamentos de dados geofísicos. Devido ao pouco conhecimento do significado regional dos carbonatitos, os trabalhos se iniciaram com o levantamento de informações estruturais, e dos padrões de descontinuidades no terreno, com objetivo de caracterização espacial e

estrutural dos corpos em superfície, além de auxiliar a situá-los no contexto regional. A ausência de estudos anteriores limitou a pesquisa de material prévio diretamente ligado aos carbonatitos e determinou algumas dificuldades iniciais, pois os dois corpos não possuem caracterização petrográfica, espacial, estrutural e não estão definidos tipologicamente como carbonatitos circulares ou lineares.

O trabalho teve início com as atividades de individualização dos carbonatitos, procurando encontrar informações sobre o seu relacionamento de concordância ou discordância com as rochas encaixantes. O objetivo geral é a contextualização geológica relacionada aos controles estruturais dos corpos nas áreas em que se situam.

Distintas metas descritivo-interpretativas foram delineadas inicialmente e durante o desenvolvimento do trabalho, envolvendo as informações geradas e a organização de um sistema de informações geográficas. Com a finalização do trabalho, as metas particulares de caracterização de cada corpo puderam ser agrupadas em duas distintas categorias de estudo: a) estrutural; b) espacial.

A **caracterização estrutural** (a) situa-se no centro dos esforços de pesquisa bibliográfica, de campo e laboratorial, sendo que este aspecto se tornou o objetivo geral do presente trabalho de conclusão de curso. O tema principal da caracterização estrutural consistiu na caracterização dos controles estruturais, sendo que o resultado deste tema de estudo culminou com a contextualização geológica relacionada aos controles estruturais das ocorrências nos sítios em que se situam. Ainda dentro do tema de estudo da geologia estrutural teve-se preocupação com a descrição e interpretação de suas relações com litologias encaixantes, o reconhecimento da situação geofísica e tectônica dos sítios e a identificação das características geomorfológicas dos sítios de ocorrência.

Com relação à **caracterização espacial** (b), seus objetivos específicos foram a mensuração superficial dos corpos e a designação da geometria superficial da ocorrência, que associadas aos dados de caracterização estrutural resultassem na proposição de sua tipologia morfológica conforme as classificações encontradas na bibliografia.

Todas as informações geradas foram adaptadas para a organização de um sistema de informações geográficas.

1.3. Justificativa e Problemática

Este trabalho foi elaborado e desenvolvido a partir da premissa de que através de estudos baseados em atividades de campo (mapeamento geológico) e de laboratório, sensoriamento remoto e pesquisa bibliográfica é possível dimensionar a distribuição das ocorrências em superfície, inferir sobre a estruturação do substrato e sua relação com os carbonatitos. A mineralogia e os aspectos geoquímicos permitem caracterizar as rochas e avaliar as relações entre as diferentes ocorrências.

O trabalho está baseado em um conjunto de premissas científicas que juntamente ao que é estabelecido na bibliografia permite observar que:

I. Corpos carbonatíticos podem ser classificados por sua disposição espacial no terreno e características estruturais em dois grupos. Os corpos de geometria circular ou oval são classificados como sendo do **Tipo Central**. Os corpos de geometria longitudinal, alongada, encaixados em falhas ou subconcordantes a essas falhas são classificados como sendo do **Tipo Linear** (Kravchenko *et al.* 1988).

II. Os complexos alcalino-carbonatíticos brasileiros ocorrem associados a zonas de flexura e fraturas nas bordas das bacias do Paraná, Parnaíba e Amazonas, (Figura 1 e 2) onde ao menos três principais lineamentos estruturais controlando-os são observados, sendo eles: Lineamento Alto Parnaíba, Lineamento Lancinha-Cubatão e Lineamento Transbrasiliiano (Biondi, 2005; Gomes & Comin-Chiaramonti, 2005).

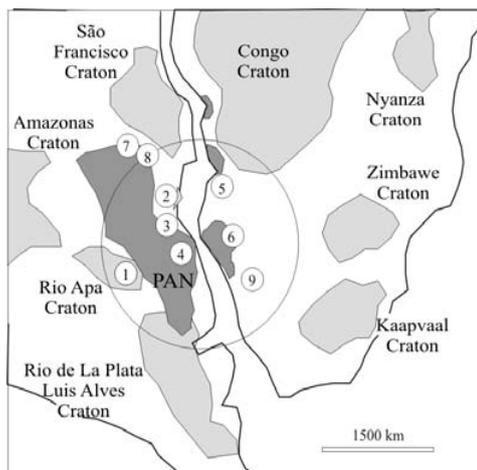


Figura 1 – Exemplos de carbonatitos associados a zonas de flexura marginal de bacias do Gondwana. O círculo demarca uma hipotética zona flexurada pela pluma Tristão da Cunha. Os complexos alcalino-carbonatíticos assinalados são: 1 – Cerro Chiriguelo; 2 – Juquiá; 3 – Jacupiranga; 4 – Anitápolis; 5 – Tchivira-Bonga; 6 – Kalkfeld; 7 – Araxá; 8 – Catalão I; 9 – Dicker Willem. Todos estes 9 complexos alcalino-carbonatíticos são classificados como Tipo Central. Obtido em Comin-Chiaramonti *et al.* (2007)

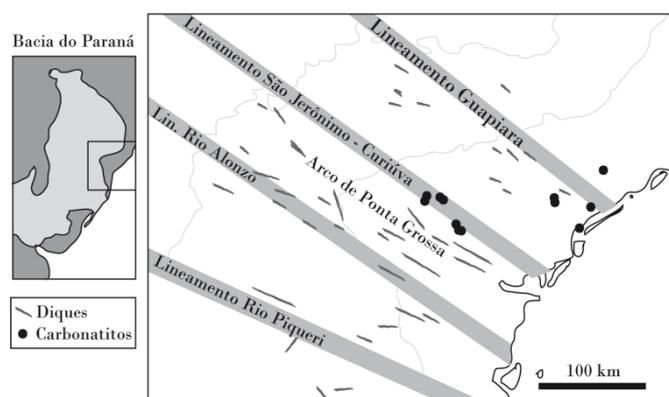


Figura 2 – Exemplos de complexos alcalino-carbonatíticos associados a lineamentos na margem leste da Bacia do Paraná e a diques alcalinos em orientações paralelas. Modificado de Ruberti *et al.* (2008).

III. Corpos carbonatíticos de natureza sintectônica se destacam pela morfologia linear (Figura 3) dos seus corpos, localizam-se ao longo de zonas de falhas profundas e, em geral, estendem-se por dezenas de quilômetros, chegando por vezes a se prolongar por mais de 100 km (Levin *et al.*, 1978).

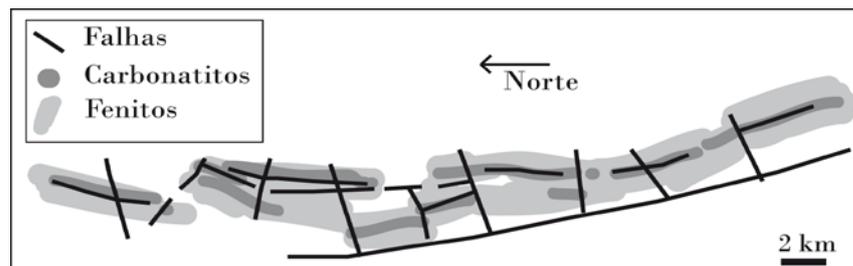


Figura 3 – Mapa exemplificativo esquemático de compartimentação estrutural da Zona Carbonatítica Linear Tatarskaya. Modificado de Lapin *et al.* (1987).

IV. Complexos alcalino-carbonatíticos do Tipo Central (Figura 4) intrudem predominantemente ortoplateformas, e estão via de regra desconectados no tempo e no espaço com os complexos carbonatíticos-feníticos do tipo linear de cinturões orogênicos desenvolvidos a partir do Pré-Cambriano (Lapin *et al.* 1999).

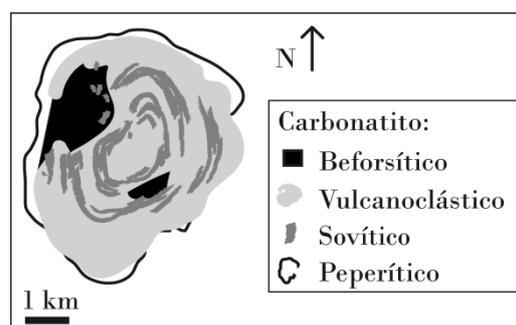


Figura 4 – Mapa litológico exemplificativo de um carbonatito do Tipo Central: Complexo Carbonatítico Circular Goudini. Modificado de Verwoerd (2008).

V. Corpos carbonatíticos extrusivos podem ser classificados de acordo com as rochas associadas aos complexos e ocorrem em dois grupos. Num primeiro grupo, os carbonatitos estão associados a grandes volumes de rochas silicáticas, compondo edifícios de extrusão vulcânica bem desenvolvidos na forma de estratovulcões cônicos, também chamados de vulcões compostos. Num segundo grupo, estão associados a volumes pequenos de rochas silicáticas, e formam diatremas, crateras e cones de cinzas (Wooley & Church, 2005).

VI. As rochas carbonatíticas são raras. Magmas carbonatíticos são raros mesmo em relação aos demais magmas de composição alcalina.

Unidades puramente carbonatíticas são pouco comuns em comparação aos complexos de associações alcalino–carbonatíticas. Extrusões carbonatíticas são ainda mais raras em relação às intrusões carbonatíticas. E os carbonatitos metamorfizados e deformados são mais raros que seus correlatos (Bell,1989 e Barker, 1996).

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se neste conjunto de premissas e foi norteado a partir da formulação das hipóteses a seguir descritas:

I. Supõe-se que os carbonatitos Joca Tavares e Três Estradas devam estar estruturalmente relacionados a falhas de importância regional e alojados em sítios específicos que podem ser diagnosticados;

II. No caso de se tratarem de carbonatitos do Tipo Linear, podem estar condicionados por lineamentos possíveis de serem fotointerpretados e identificados em trabalhos de campo;

III. Os carbonatitos devem estar associados a estruturas locais e estruturas tectônicas regionais, como os lineamentos Ibaré (NW), Cerro dos Cabritos (NE), Cerro Alegre (NE) e Passo dos Enforcados (NE), que exercem controles estruturais sobre esses corpos;

IV. Com as características estruturais preliminares, obtidas durante a fase de trabalho de campo durante a prospecção dos dois corpos, tem-se que o corpo Três Estradas com foliação orientada na direção NE possui frequentemente dobras fechadas a abertas enquanto o corpo Joca Tavares não possui foliação, assim, propôs-se a idéia de que o corpo Três Estradas pode se enquadrar na classificação de carbonatitos do Tipo Linear, enquanto o Joca Tavares pode ser classificado como sendo do Tipo Central;

V. Os carbonatitos não devem ser contemporâneos;

VI. Ambos carbonatitos devem tratar-se de unidades plutônicas.

Mais asserções sobre a natureza plutônica, vulcânica ou hipabissal das ocorrências, ou mesmo meta-plutônica, meta-vulcânica ou meta-hipabissal, foram feitas ao longo do estudo.

1.4. Comprovação Litológica

Conforme as publicações de Toniolo *et al.* (2010) e Parisi *et al.* (2010) ambas as ocorrências são portadores de apatita e teores elevados de Terras Raras, Ba, Ca, Ga, Hf, Nb, Sr, Ta, Th, Tl, U e W. Esses dois corpos, Joca Tavares e Três Estradas, apresentam estruturas isotrópica e orientada respectivamente. Com a recente publicação da descoberta destes dois corpos, os mesmos entram para a contagem mundial de ocorrências deste tipo de rocha, que no momento da pesquisa bibliográfica encontrava-se em 527 corpos segundo Woolley & Kjærsgaard (2008) perfazendo um total de 529 corpos conhecidos de rochas carbonatíticas no planeta.

Petrograficamente o corpo Joca Tavares constitui-se de rocha de matriz isotrópica composta de 90% de carbonato, 8% de opacos e 2% de apatita com fenocristais de carbonato medindo até 1 mm. Pela interpretação aorogeofísica atual (dados ainda não publicados) o diâmetro da anomalia é de aproximadamente 1,3 km e os afloramentos já observados se estendem por uma área de 300 m aproximadamente.

Foi realizada prospecção hidrogeoquímica na área de ocorrência focando o fosfato presente no Carbonatito Três Estradas, baseada nos analitos PO_4 , F e SO_4 em amostras de água superficial submetidas a metodologia da cromatografia de íons, cujos resultados foram publicados em Grazia *et al.* (2011). A prospecção hidrogeoquímica revelou que o sulfato mostrou ser eficiente na detecção de sulfetos e as terras raras promissoras para fosfato, sendo viável utilizar essa ferramenta em outras áreas de interesse, embora o próprio analito fosfato não responda satisfatoriamente na prospecção regional para fosfato.

1.5. Localização

1.5.1. Informações Referenciais

Os dois corpos carbonatíticos situam-se em localidades homônimas, pouco conhecidas regionalmente. A localidade de Joca Tavares situa-se entre Bagé e Lavras do Sul e a localidade de Três Estradas situa-se entre Ibaré, Lavras do Sul e Dom Pedrito, e recebe este nome por ser o entroncamento entre estradas que ligam estes três municípios. As localidades encontram-se em meio a paisagem pampeana gaúcha da região da Campanha. O município no qual se situa a localidade de Três Estradas é Lavras do Sul, e o município no qual se situa a localidade de Joca Tavares é Bagé, ambos estão situados dentro da Mesorregião Administrativa da Campanha Meridional e do Sudoeste Rio-Grandense.

A Figura 5 situa os carbonatitos no mapa do Rio Grande do Sul. A cidade de referência utilizada neste trabalho foi Lavras do Sul, por tratar-se do maior centro urbano local, por estar situada aproximadamente entre os dois pontos de ocorrência e por ter sido a base operacional dos trabalhos de campo. A base operacional para os trabalhos de campo da equipe do Projeto Agrominerais do RS desenvolvidos pela CPRM costumeiramente foi a cidade de Caçapava do Sul.

A partir de Porto Alegre o acesso até as áreas-alvo dá-se pela BR-290 e BR-392 até Caçapava do Sul, de onde se toma o caminho até Lavras do Sul através da RS-357, seguindo por estradas vicinais do interior do município. Entre as principais estradas da região estão a RS-011, de orientação nordeste-sudoeste e que passa pela sede do município de Lavras do Sul, e a BR-153 aproximadamente norte-sul que liga a cidade de Bagé ao centro do estado.



Figura 5 - Localização das ocorrências de rochas carbonatíticas abrangidas pelo projeto. Modificado de TONIOLO *et al.* (2010)

A BR-153 constitui a única via completamente asfaltada da área. Além desta, a RS-011 é parcialmente pavimentada, no trecho nordeste da área, somente até a sede de Lavras do Sul. A Área-Alvo Joca Tavares é de difícil acesso, dado somente por estradas vicinais intermediárias entre a BR-153 e a RS-011, cujo acesso em melhores condições de tráfego é pelo sul e cruza os rincões do Passo do Tigre. A RS-156 também tem importância regional como via de circulação, ligando a Área-Alvo Três Estradas ao município de Dom Pedrito e, acompanhando um trecho da ferrovia rumo ao porto de Rio Grande, passa por Três Estradas e pelas proximidades de Ibaré. A malha viária da Área do Projeto pode ser vista na Figura 6.

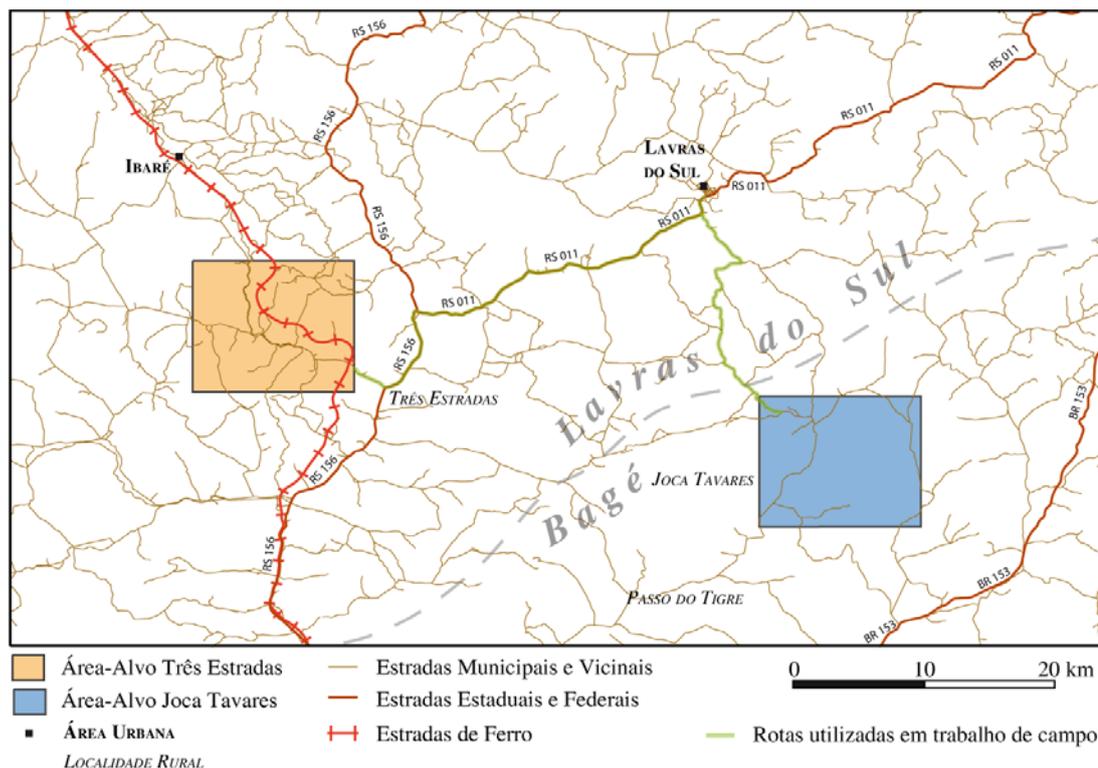


Figura 6 - Mapa Viário e de localização das áreas alvo do projeto.

1.5.2. Informações Cartográficas

Neste trabalho foram utilizadas diferentes projeções e elipsóides de referência para reprodução da superfície tridimensional terrestre em uma plataforma bidimensional. Isso ocorreu devido ao material cartográfico reunido estar em diversos formatos, projeções e etc. Seguindo critérios como atualização e uniformização, este trabalho baseou-se no elipsóide que atualmente se aproxima com mais exatidão do geóide neste setor do globo terrestre, trata-se do *datum* SIRGAS 2000, com conversões e adaptações necessárias realizadas nos diversos aplicativos disponíveis para tal finalidade.

As coordenadas centrais das ocorrências seguindo o *South American Datum* de 1969 são 767.812 m *W* e 6.577.414 m *N* na zona UTM 21S para o Carbonatito Três Estradas e 234.046 m *W* e 6.566.707 m *N* na zona UTM 22S para o Carbonatito Joca Tavares. Observa-se nos trabalhos de campo que alguns pontos apresentaram coordenadas em zonas UTM distintas que devido a mudança de fuso que ocorre na área do projeto dificultaram a

utilização desse sistema de projeção cartográfica, visto que o mesmo não permitiria a unificação dos dados de ambas localidades, ou traria dificuldades técnicas aos aplicativos utilizados. Optando pelo mais prático, o sistema de coordenadas projetadas (*projected coordinate system* no ArcGIS®) como é o UTM foi substituído pelo sistema de coordenadas geográficas convencional de latitude e longitude (*geographic coordinate system* no ArcGIS®).

O carbonatito Joca Tavares está cartograficamente situado na folha em escala 1:50.000 denominada Passo do Tigre (Folha SH.22-Y-C-I-1) que é uma das articulações da carta de Porto Alegre (índice SH.22) na escala 1:1.000.000. O Carbonatito Três Estradas está situado na carta em escala 1:50.000 denominada Coxilha do Tabuleiro (Folha SH.21-Z-B-VI-4), que é uma das articulações da Folha de Uruguaiiana (índice SH.21) na escala 1:1.000.000 (Figura 7 e 8).

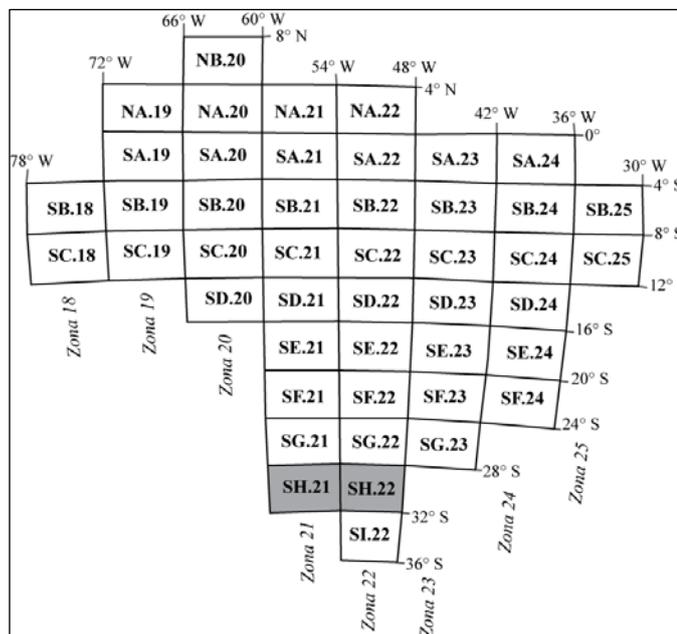


Figura 7 - Articulação esquemática das cartas do Brasil ao milionésimo (Em escala 1:1.000.000) e indicações das zonas UTM no Brasil. As cartas onde se situam os carbonatitos estão demarcadas em cinza.

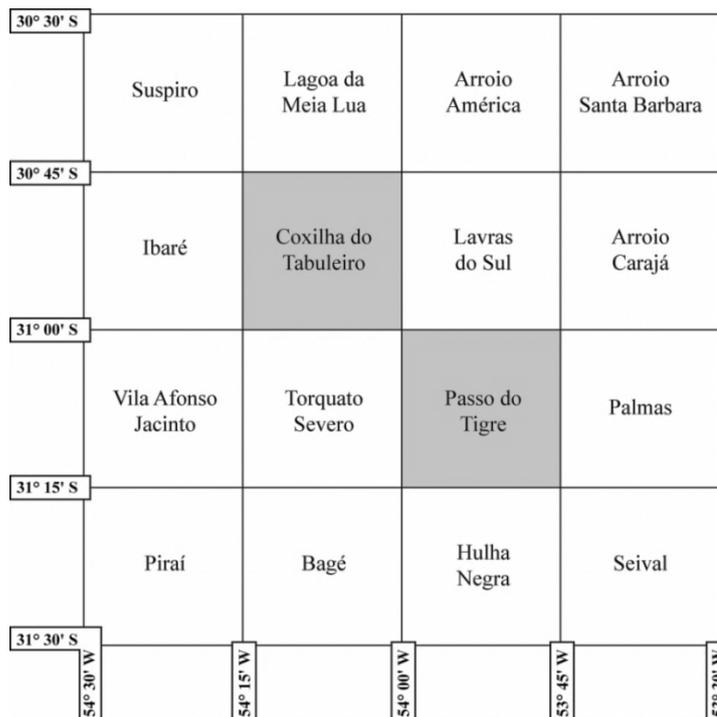


Figura 8 - Disposição cartográfica das cartas 1:50.000 importantes para o projeto. As localidades de Joca Tavares e Três Estradas encontram-se nas folhas demarcadas em cor cinza.

2. Metodologia

2.1. Resumo Metodológico do Trabalho

A execução deste trabalho envolveu pesquisa bibliográfica de trabalhos anteriores, consulta aos mapas geológicos da área e utilização de produtos de levantamentos aerogeofísicos. Durante a realização do projeto foram consultados materiais diversos que envolveram o estudo das rochas carbonatíticas e de suas áreas de ocorrência, como trabalhos de conclusão de curso, teses de doutoramento, resumos, levantamentos geológicos de mapeamento, material didático de aulas, artigos, material encontrado na internet e livros específicos ou que apresentavam algum interesse para o desenvolvimento do assunto. Foi necessária a geração de um sistema de informações geográficas a partir de softwares como ArcGIS[®], Google Earth[™], TrackMaker[®] e Global Mapper[®]. As atividades de sensoriamento remoto consistiram na análise detalhada e criação de composições tridimensionais de produtos de fotografias aéreas nas escalas 1:25.000, 1:60.000, e 1:110.000, que estavam disponíveis na mapoteca da Superintendência Regional de Porto Alegre (SUREG-POA) da CPRM e na biblioteca setorial do Instituto de Geociências da UFRGS. Também foram utilizadas imagens de radar e imagens de satélite, principalmente Landsat. Associaram-se às imagens de satélite e às fotografias aéreas os levantamentos aerogeofísicos disponíveis para a elaboração do trabalho, que constituem basicamente nas imagens das áreas de ocorrência referentes aos levantamentos aerogeofísicos de 1972 e de 2010. O primeiro tendo sido utilizado para a geração de alvos indicadores de anomalias cuja

assinatura geofísica magnética e de K, Th e U refletisse a de rochas alcalinas. O levantamento de 1972 remete ao trabalho de mapeamento aerogeofísico intitulado Projeto Aerogeofísico Camaquã, efetuado pela Texas Instruments e financiado por diferentes órgãos como DNPM, CNEM e CPRM, com parâmetros definidos de 1 km de espaçamento entre as linhas de vôo, altura de 150 m de sobrevôo e direção das linhas de vôo de NW para SE. O levantamento aerogeofísico de 2010 trata-se de nova encomenda do DNPM/CNEM/CPRM para atender as necessidades de prospecção atuais em território nacional. A interpretação geofísica dos dados numéricos obtidos com os levantamentos foi feita pelo geofísico Luís Gustavo Pinto, da Universidade de São Paulo. A utilização destes produtos permitiu a identificação de feições superficiais, lineamentos e a separação de áreas de homogeneidade textural, estas integradas com informações bibliográficas.

As tarefas de obtenção de dados a partir das atividades de campo serviram para os estudos laboratoriais posteriores e envolveram a caracterização das litologias ocorrentes nas áreas de interesse e medidas estruturais de foliações, fraturas e falhas. Os produtos assim obtidos puderam ser tratados e interpretados e associados com a geologia regional. Elaborou-se para o trabalho de campo uma delimitação geográfica das áreas de ocorrência em duas janelas de poucos quilômetros quadrados centradas nos dois pontos de ocorrência, utilizando como coordenadas centrais do polígono as publicadas nos trabalhos que apresentaram oficialmente os dois carbonatitos em eventos nacionais, mencionados na introdução deste projeto (fig. 06). As coordenadas centrais das duas ocorrências obtidas dos trabalhos publicados (projetadas na Figura 9) são:

- *CARBONATITO TRÊS ESTRADAS*

Coordenadas na Projeção Universal Transversa de Mercator – *Datum* SAD69: 767.812 m *easting* x 6.577.414 m *northing* na zona UTM 21S.

Coordenadas Geográficas – *Datum* SIRGAS 2000: Latitude x Longitude

- *CARBONATITO JOCA TAVARES*

Coordenadas na Projeção Universal Transversa de Mercator – *Datum* SAD69: 234046 Easting x 6566707 Northing na zona UTM 22S.

Coordenadas Geográficas: Latitude x Longitude

Os pontos de ocorrência distam aproximadamente 41 km em linha reta um do outro, como pode ser visto na Figura 9. A partir disso foi estabelecida uma janela de estudos que englobasse os dois pontos de ocorrência e cobrisse uma boa margem ao redor dos mesmos para a contextualização geológica. Originalmente a janela no Escudo Sul-Rio-Grandense foi designada basicamente para permitir a representação em mapa de ambos carbonatitos e a circunvizinhança geológica na qual estão inseridos, tratando-se de um retângulo com 72 km de comprimento de leste a oeste e 48.5 km de altura de norte a sul. Essa foi definida como sendo a Área do Projeto, tendo ao todo 3492 km² e abrangendo uma grande variedade de paisagens geomorfológicas e unidades geológicas.

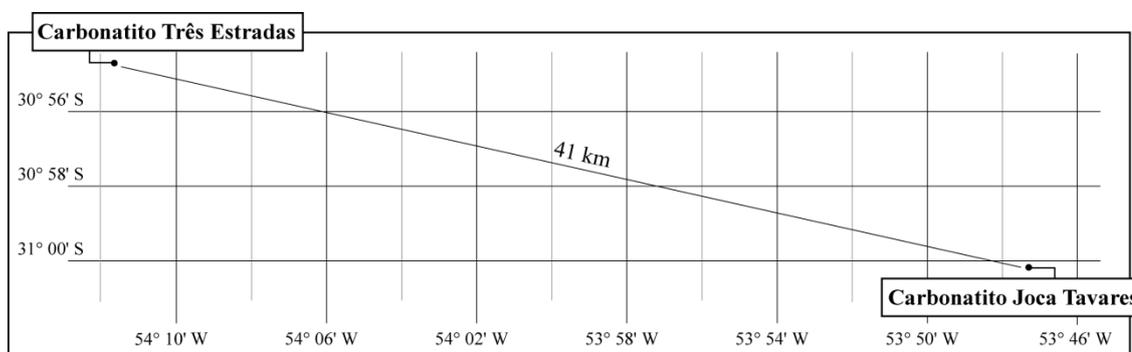


Figura 9 - Mapa ilustrativo de localização cartográfica dos pontos de ocorrência em latitude e longitude e respectiva distância entre as áreas alvo.

Dada a grande dimensão da Área do Projeto, foram definidas duas janelas menores levando em consideração outros critérios que não o de visualização do contexto geológico. A dimensão estipulada dessas janelas menores levou em consideração distâncias a serem percorridas em trabalhos de campo e foram definidas após a visualização das fotografias aéreas das áreas de ocorrência, de imagens de satélites e de imagens do Google™ Earth. Estas janelas menores foram definidas como sendo as

Áreas-Alvos conforme consta na Figura 10, inseridas dentro da Área do Projeto.

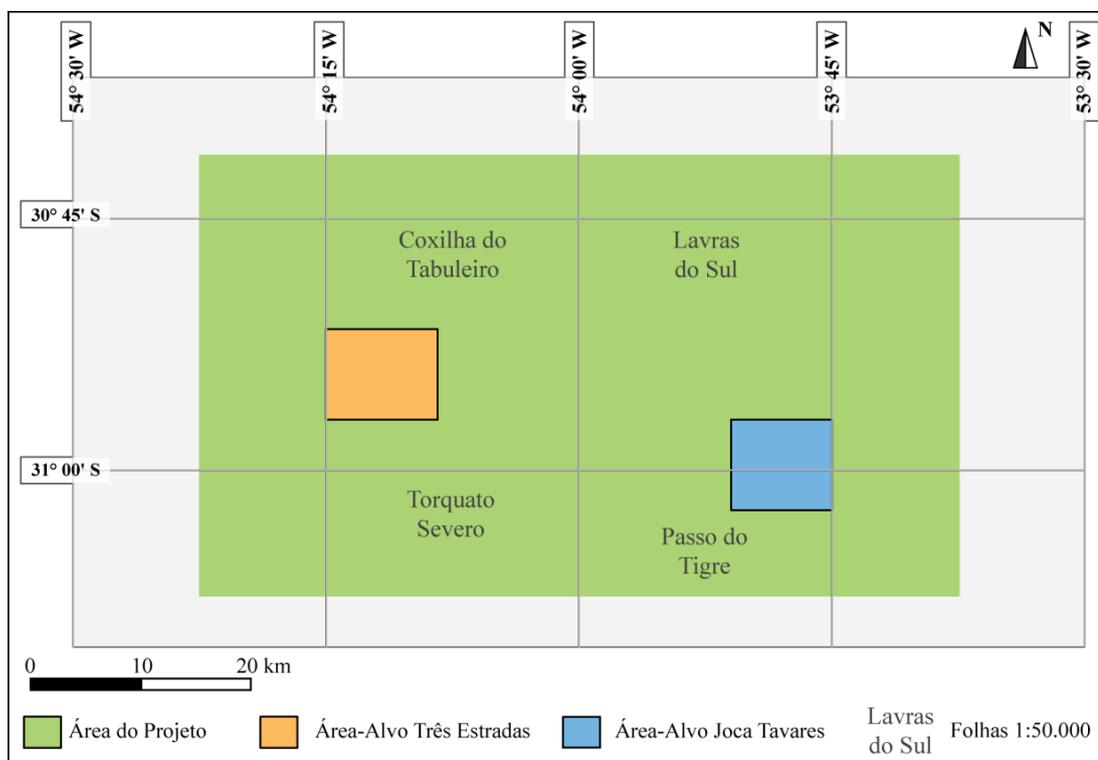


Figura 10 - Mapa de localização das áreas-alvo do projeto com articulação das cartas locais.

A área-alvo planejada referente ao carbonatito Joca Tavares para ser estudada por sensoriamento remoto e trabalho de campo, tem geometria retangular centrada no ponto de ocorrência do carbonatito e abrange as encaixantes ao redor num raio aproximado de 5 km, com dimensão norte-sul de 10 km e leste-oeste com aproximadamente 9,5 km de extensão. Ela se divide na articulação das folhas 1:50.000 em aproximadamente 45% de área sobre a folha Passo do Tigre e 55% de área sobre a folha Lavras do Sul, estando a ocorrência pontual do carbonatito quase no extremo nordeste da folha Passo do Tigre e praticamente nos limites das folhas.

A área-alvo referente ao carbonatito Três Estradas forma um quadrilátero com dimensão norte-sul de 10 km e leste-oeste com aproximadamente 10,5 km centrado na ocorrência pontual do carbonatito. A totalidade desta área-alvo, que perfaz 105 km², está sobre a folha Coxilha do Tabuleiro. Os vértices de ambas áreas-alvo foram definidos a partir de

latitude e longitude, embora para navegação em campo tenham sido utilizadas as coordenadas UTM. Estas coordenadas são assim dadas de acordo com o sistema métrico, o que facilita o trabalho de campo e mesmo os trabalhos com SIG, fornecendo informações em metros ou quilômetros.

As áreas-alvo foram o foco de planejamento estratégico e logístico para o campo a fim de concentrar o reconhecimento geral de cada área e o levantamento de informações litológicas e estruturais. Os procedimentos durante o campo incluíram a coleta de amostras preliminares para estudos em laboratório, mapeamento estrutural dos locais pré-determinados para fins de validação ou correção das interpretações feitas a partir dos produtos de sensoriamento remoto. Agregou-se informações sobre as rochas encaixantes além das relações com outras litologias visando a uma melhor compreensão estrutural ou mesmo estratigráfica da área de entorno.

Como finalização do trabalho foi executada uma combinação digital das informações geradas a partir de aerofotogeologia, aerogeofísica, imagens de satélites, trabalho de campo com as demais informações, incluindo as obtidas através da reunião de dados já disponíveis em trabalhos publicados anteriormente envolvendo as áreas-alvo, e o desenvolvimento de um GIS – *Geographic Information System* – em português SIG (Sistema de Informações Geográficas) – contendo o material publicado é o produto final deste trabalho. Esse material segue em anexo numa mídia gravável para reprodução e leitura, e disponível para ser utilizado.

A pesquisa reuniu uma coleção de mapas, como pode ser visto na Figura 11, com diversos aspectos geológicos de interesse deste trabalho, principalmente relacionado aos lineamentos e disposição das unidades geológicas na Área do Projeto.

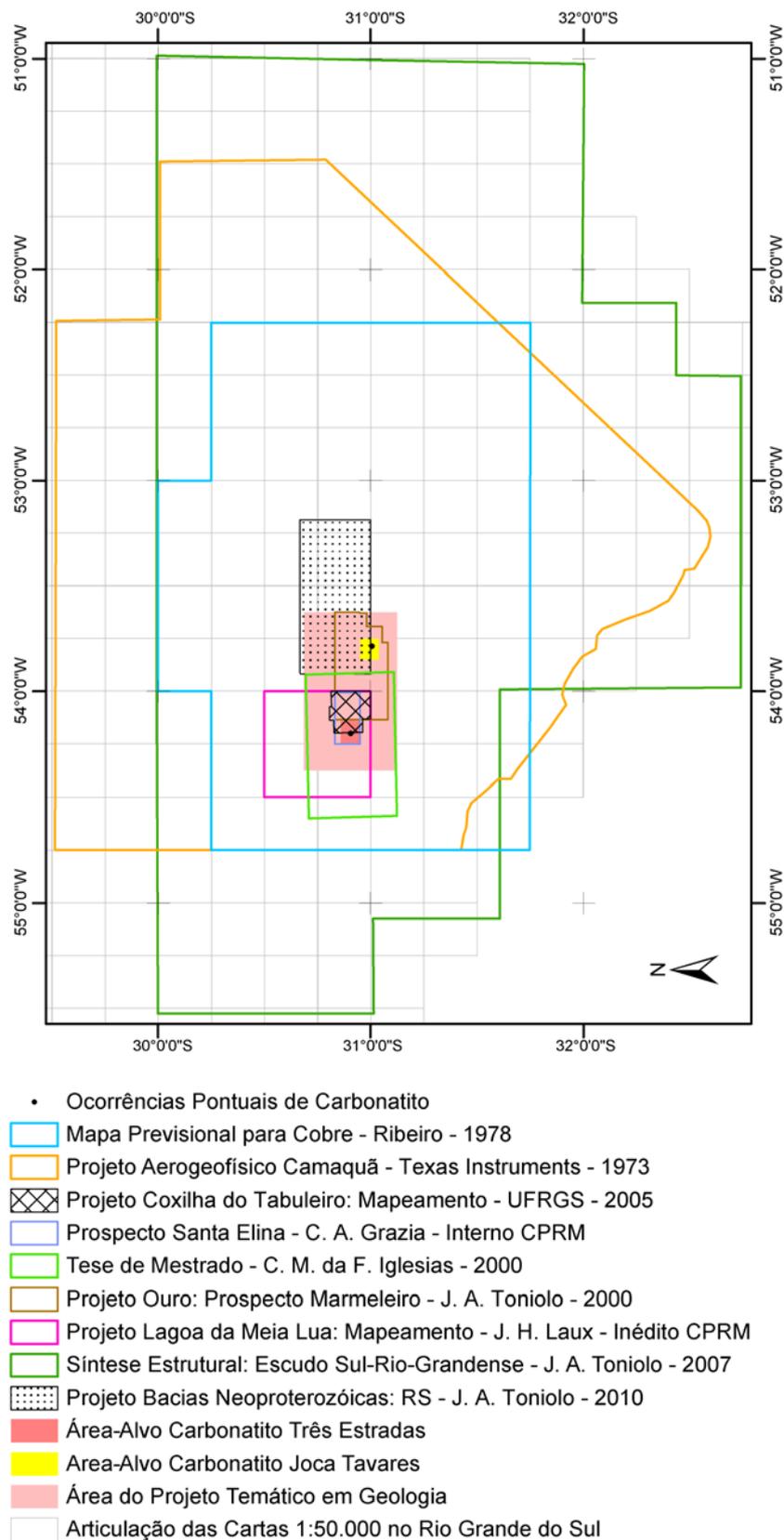


Figura 11 – Área de abrangência dos mapas geológicos pesquisados neste trabalho.

2.2. Etapas e Procedimentos de Investigação

Resumidamente os passos adotados, inicialmente tarefas em um número reduzido, puderam ser listados ao final em 15 itens, que podem ser agrupados em três etapas, sendo elas as de Pré-Campo, Campo e Pós-Campo, relacionadas ao tipo de atividade e ordem em que devem ser efetuadas. A seguir seguem discriminados por etapa cada um destes itens.

2.2.1. Etapa Pré-Campo

- I. Reunião e integração de informações.
- II. Relações entre geofísica e geologia.
- III. Avaliação estrutural através da aerogeofísica, imagens de satélite e aerofotogeologia.
- IV. Fotointerpretação geológica.
- V. Teorização dos possíveis controles estruturais envolvidos com os corpos carbonatíticos.
- VI. Delimitação da área aflorante dos carbonatitos.
- VII. Geração de mapas de apoio ao trabalho de campo.

2.2.2. Etapa de Campo

- VIII. Reconhecimento litológico das áreas.
- IX. Levantamento de dados estruturais.
- X. Reconhecimento dos contatos entre os carbonatitos e encaixantes.
- XI. Coleta de amostras dos corpos carbonatíticos e rochas associadas.

2.2.3. Etapa Pós-Campo

- XII. Classificação tipológica morfoestrutural dos carbonatitos.

XIII. Contextualização geológica regional.

XIV. Proposição de controles estruturais.

XV. Geração de SIG do projeto.

2.3. Relação de Técnicas Utilizadas

A seguinte relação resume as técnicas utilizadas nesse projeto de forma sucinta, exibindo os materiais utilizados e os produtos obtidos com a aplicação de cada técnica. Para as técnicas laboratoriais também está indicado o local onde são efetuadas na UFRGS.

- *I - AEROFOTOGEOLOGIA*

Material: Fotografias aéreas 1:25.000, 1:60.000 e 1:110.000.

Produtos: Fotointerpretação do terreno, traçados de fotolineamentos estruturais, compartimentação em blocos morfoestruturais e compartimentação em unidades geomorfológicas.

- *II - AEROGEOFÍSICA*

Material: Levantamento realizado em 1973.

Produtos: Lineamentos Estruturais Supracrustais e Interpretação Geofísica de Heterogeneidades do Terreno.

- *III – IMAGENS ORBITAIS*

Material: Imageamentos LANDSAT5, LANDSAT7 e CBERS.

Produtos: Lineamentos Estruturais.

Extra: Composições de imagens Google™ Earth.

2.4. Extração de Informações Aerofotogeológicas

Para a aquisição de informações a partir de fotografias aéreas as atividades envolveram inicialmente a pesquisa em mapas índices. A Figura 11 exibe o índice cartográfico de fotografias aéreas utilizadas neste trabalho. Foram utilizadas fotografias aéreas pancromáticas em preto e branco,

impressas em dimensões 24 cm x 24 cm, algumas oriundas da fototeca da CPRM-SUREG-PA e outras disponíveis na Biblioteca do Instituto de Geociências da UFRGS. As fotografias aéreas em escala 1:60.000 utilizadas foram as de número 16962, 16963 e 16964 para a Área-Alvo Três Estradas e 14336, 14337, 14338 e 14339 para a Área-Alvo Joca Tavares. As fotografias aéreas em escala 1:110.000 utilizadas foram as de números 336, 337 e 338 para a Área-Alvo Três Estradas e 340, 341 e 342 para a Área-Alvo Joca Tavares.

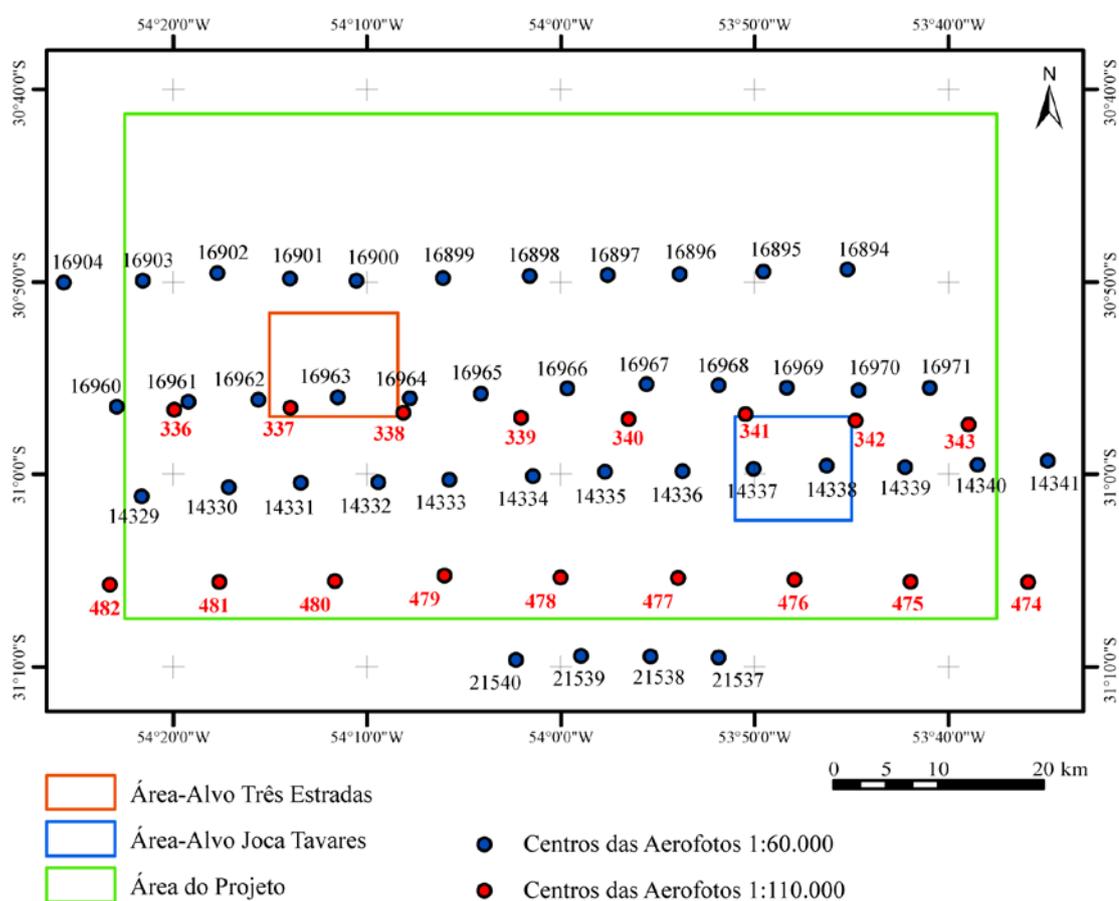


Figura 12 - Articulação parcial das fotografias aéreas que cobrem a área do projeto.

As fotografias aéreas foram digitalizadas em formato .tif, submetidas a um melhoramento estético da imagem, como o ajuste de contraste, e utilizadas para a confecção de anaglifos digitais com a versão 1.08 do software Anaglyph Maker 3D[®] desenvolvido por Takashi Sekitani durante os anos de 2001 a 2004 e disponibilizado para *download*.

O anaglifo se constitui numa superposição de imagens construída a partir do princípio físico da absorção de cores complementares, cujo produto fornece um efeito tridimensional quando visto com filtros especiais. O software Anaglyph Maker 3D®, cuja interface operacional pode ser vista na Figura 12, opera um estereopar de fotos, em que o operador ajusta a imagem a ser visualizada com a lente de cor ciano à direita e a imagem a ser visualizada pelo olho da esquerda com a lente de cor vermelha. Com a utilização de um óculos 3D com lentes ciano e vermelha é possível reproduzir o terreno (em três dimensões) via anaglifo (uma combinação de duas imagens em um plano de duas dimensões).

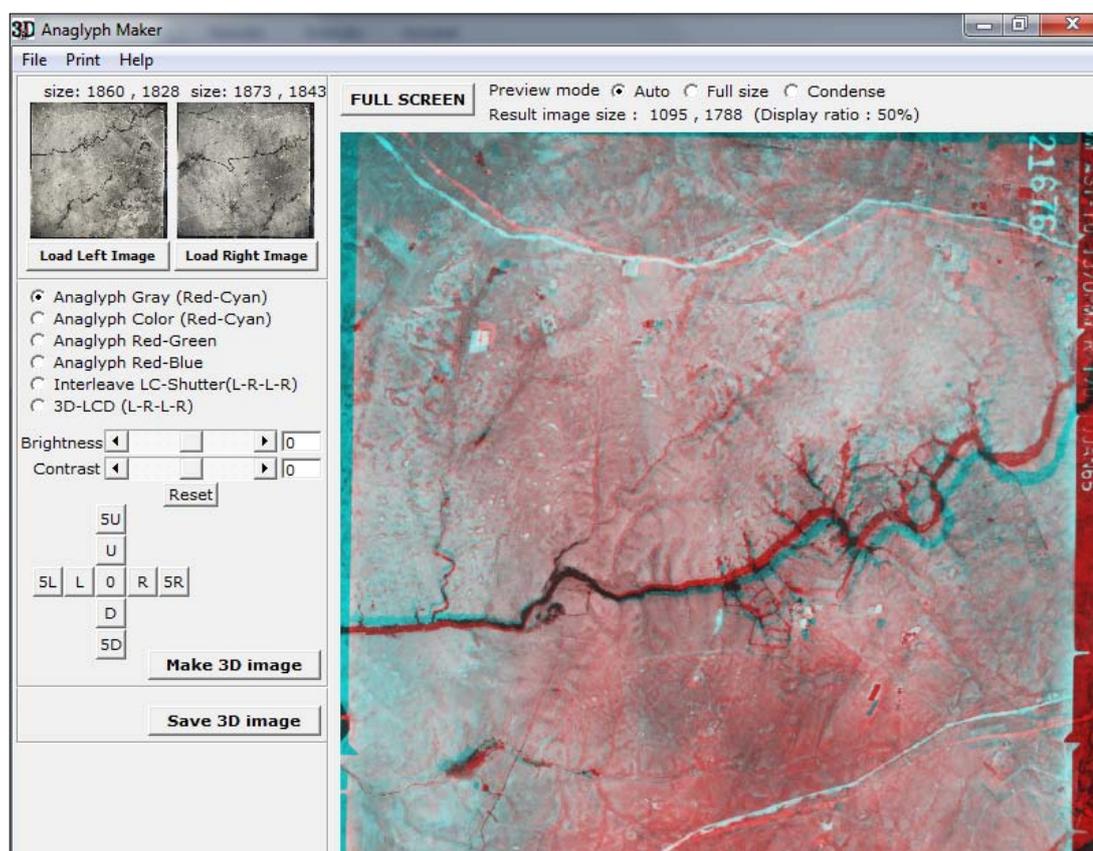


Figura 13 - Screenshot da interface do aplicativo Anaglyph Maker 3D.

Foram gerados 9 anaglifos, referentes aos estereopares 16962-16963, 16963-16964, 14336-14337, 14337-14338, 14338-14338, 336-337, 337-338, 340-341 e 341-342. Estes anaglifos foram ajustados sob o sistema de coordenadas SIRGAS-2000 e utilizados para a edição de fotointerpretação

no ArcGIS®. Os estereopares foram primeiramente fotointerpretados em transparências com o uso de estereoscópios com o objetivo de se ter uma visão geral aerofotogeológica das áreas-alvo, estas transparências foram digitalizadas em formato .tif com pontos de referência assinalados nas mesmas e georreferenciadas, sendo então posicionadas no ArcGIS® sobre os anaglifos e vetorizadas no formato *shapefile*. Estes arquivos foram reeditados com o adensamento de novos fotolineamentos traçados a partir dos anaglifos e separados em dois grupos principais, o primeiro de fotolineamentos de **vale** e o segundo de fotolineamentos de **crista**, e um terceiro grupo incluindo **quebras de relevo**, fotolineamentos tonais e outras feições de relevo e texturais da fotografia aérea. Em suma, a sistemática de trabalho em meio digital envolveu as seguintes etapas:

- Fotointerpretação a partir dos anaglifos e compartimentação das áreas-alvo em **unidades geomorfológicas**;
- Identificação dos fotolineamentos (criação de traços);
- Processamento para obtenção dos dados de orientação e dimensão dos fotolineamentos;
- Confecção de diagramas de caráter quantitativo (diagrama de roseta) e de caráter qualitativo (diagrama de comprimentos dos fotolineamentos);
- Reconhecimento do comportamento estrutural dos fotolineamentos e compartimentação das áreas-alvo em **blocos morfoestruturais**;
- Cruzamento das informações entre unidades geomorfológicas e blocos morfoestruturais.

A extração de informações a partir dos lineamentos resultou na construção de planilhas com dados de duas naturezas: azimute e comprimento. Essa extração de informações foi realizada utilizando-se o software ImageJ®, que trata-se de uma ferramenta de processamento e leitura de imagens disponível no endereço eletrônico <http://developer.imagej.net/> consultado pela última vez em 3 de dezembro

de 2012. A Figura 13 exibe a interface básica de processamento de dados de imagens do ImageJ®. Esse software trabalha com imagens para as quais são definidos parâmetros como escala entre pixel e metros para leitura dos comprimentos dos fotolineamentos e posição do norte como eixo vertical da imagem para leitura azimutal. A leitura desses dados gera uma planilha passível de ser processada para a construção, em outras ferramentas digitais, de diagramas de roseta e diagramas de comprimentos de fotolineamentos.

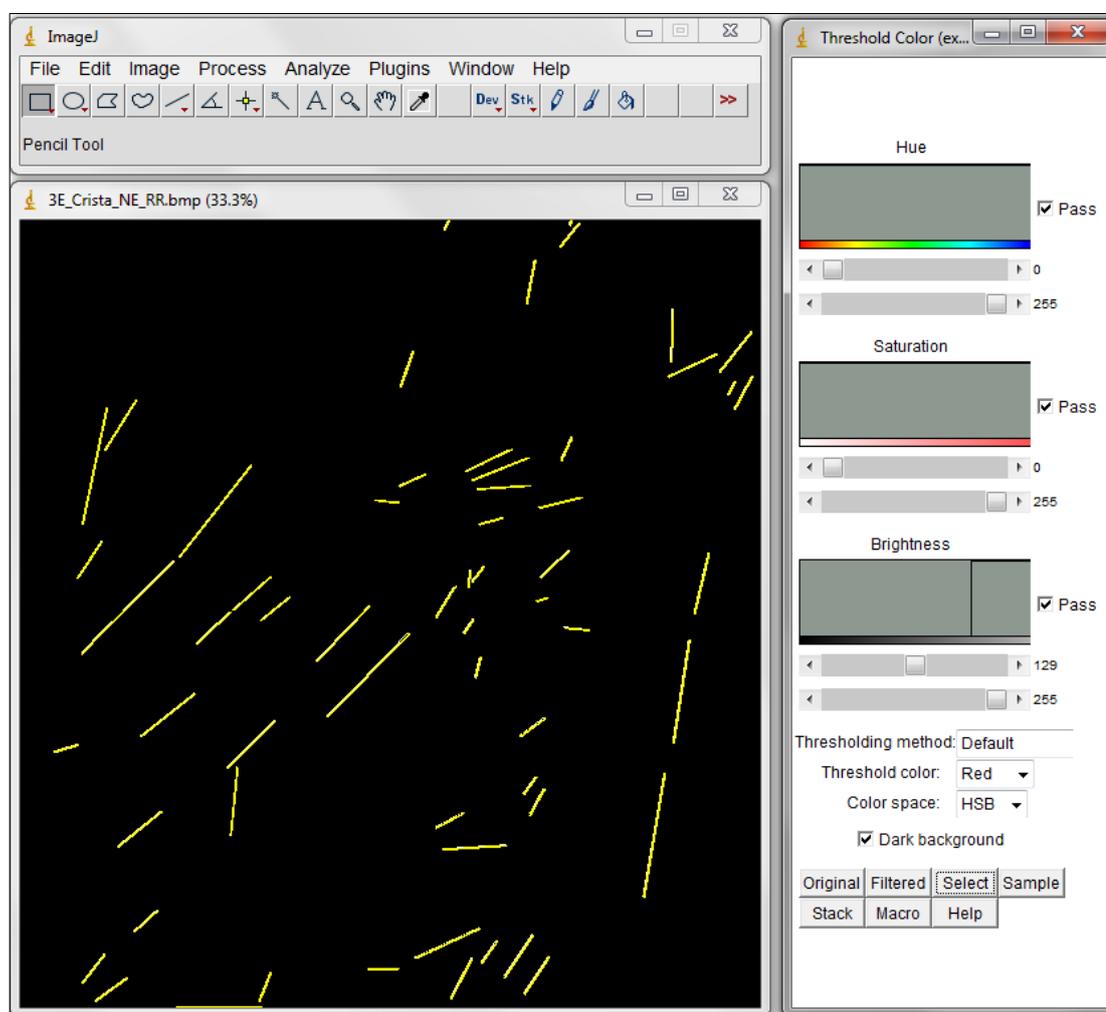


Figura 14 - Screenshot da interface básica do programa ImageJ.

A fotointerpretação levou em consideração alguns trabalhos prévios da geologia da área como Naumann *et al.* (1984) para o conhecimento das litologias ocorrentes nas áreas a serem visualizadas em fotografias aéreas e anaglifos.

Com a fotointerpretação das áreas-alvo foram reconhecidas duas anomalias de vegetação situadas nos pontos de ocorrência dos carbonatitos e que se estendem pelas cercanias dos pontos dentro das áreas-alvo com extensões que podem variar de acordo com os critérios interpretativos para as fotografias aéreas. As matas galerias não devem estar diretamente relacionadas a essas anomalias de vegetação, consistindo as mesmas de vegetação natural decorrente da umidade e fertilidade próxima das drenagens. No entanto sobre as coxilhas da região não é esperada a ocorrência de matas como as encontradas nos locais de ocorrência das rochas carbonatíticas. São estas anomalias de vegetação com bom desenvolvimento arbóreo, arbustivo e herbáceo que auxiliam na delimitação da área aflorante dos carbonatitos e estão designadas no Capítulo 5.

2.5. Aplicativos Utilizados

Os principais programas utilizados nesse trabalho incluindo os *softwares* da plataforma Microsoft™ Office 2010/2007/2003 estão listados a seguir:

- Adobe® Illustrator
- Adobe® PhotoShop
- AnaMaker®
- CorelDraw®
- E4S Coordinate Calculator
- Engesat® Global Mapper
- ESRI ArcGIS®
- Google™ Earth
- GPS TrackMaker
- Microsoft™ Excel 2010
- Microsoft™ Word 2010

3. Estado da Arte

Conforme a finalidade deste trabalho, uma breve síntese bibliográfica abordando itens importantes para o entendimento da temática do projeto, composta primeiramente de introdução à natureza das rochas carbonatíticas e de uma síntese das ocorrências das rochas carbonatíticas em patamares mundial e nacional. Segue uma revisão sobre zonas de cisalhamento e finaliza-se este estado da arte com uma breve abordagem dos conhecimentos sobre controles estruturais relacionados aos carbonatitos e rochas alcalinas.

3.1. Revisão Bibliográfica sobre Carbonatitos

3.1.1. Conceito

Os carbonatitos são rochas alcalinas ígneas extrusivas, intrusivas ou hipoabissais volumetricamente insignificantes na crosta terrestre, apresentam mais de 50% de carbonato modal e originadas de um tipo de magma relativamente raro e composicionalmente singular na geologia global, apresentando características geoquímicas e metalogenéticas que despertam o interesse econômico com a descoberta de cada novo corpo de rocha carbonatítica. Em Wernick (2004) é dito que carbonatitos são rochas ígneas intrusivas contendo mais de 50% em volume de minerais carbonáticos e de acordo com a composição do carbonato dominante são divididos em quatro categorias principais.

As rochas da classe dos **carbonatitos calcíticos** são essencialmente compostas por calcita como indica seu nome. Seus principais representantes são os sövitos, de granulação média a grossa, e os alkivitos, de granulação fina a média. Os essencialmente compostos por dolomita compõem a classe dos **carbonatitos dolomíticos**, e comumente há gradação mineralógica entre esta classe e a anterior, dada a relação entre magnésio e cálcio. Os representantes típicos desta classe são os beforsitos. Os integrantes da classe dos **carbonatitos ferríferos** contêm principalmente carbonatos ricos em ferro, como a ankerita e a siderita, e são denominados ferrocronatitos. Para finalizar, há a classe dos **carbonatitos alcalinos** constituídos essencialmente por um carbonato rico em sódio e potássio, como encontrado nas lavas do vulcão Ol Doinyio Lengai na Tanzânia.

Segundo Chakhmouradian (2009) os carbonatitos podem ser classificados em dois grupos levando em consideração ambientes geológicos e associações litológicas que lhes conferem assinaturas de elementos traços distinguíveis:

- I. Carbonatitos posicionados em riftes e estruturas extensionais de escala menor desenvolvidos em crátons arqueanos estáveis ou cinturões orogênicos. Tipicamente associados a rochas subsaturadas em sílica e ricas em sódio.
- II. Carbonatitos posicionados em ambiente colisional configurados por orogêneses. Tipicamente associados a rochas tanto saturadas em sílica como subsaturadas em sílica, além de rochas ricas em potássio.

Relativo à nomenclatura das rochas carbonatítica, além dos termos utilizados das quatro classes de carbonatitos, a presença de diferentes carbonatos num carbonatito deve ser expressa, como é usual, por prefixos, tal qual como no exemplo de um calcita-dolomita carbonatito, assim como outros minerais característicos, como, por exemplo, apatita-pirocloro-calcita carbonatito e magnetita-dolomita carbonatito. Em rochas relacionadas contendo menos de 10% de carbonato essa feição pode ser expressa como

adjetivo, como exemplo um ijolito à calcita e um peridotito à dolomita. Em rochas com carbonatos variando de 10% a no máximo 50% esta proporção se manifesta em prefixo, como por exemplo em um calcita ijolito e um dolomita peridotito. Em Barbosa (2009) as rochas ígneas com menos de 10% de carbonato são chamadas de rochas portadoras de carbonato, e quando a quantidade de carbonatos está dentro da faixa de 10% a 50% o carbonato predominante adjetiva a rocha, como no exemplo de um ijolito calcítico.

Podem ser plotadas as classes de carbonatitos dolomíticos, calcíticos e ferríferos no diagrama de Le Maitre (Figura 14), cujos vértices são CaO, MgO e FeO+Fe₂O₃+MnO. Para rochas carbonatíticas a caracterização química é imprescindível, mas a análise geoquímica não foi abrangida neste trabalho de conclusão de curso, apenas se atendo à caracterização em petrografia, que deve ser em estudos futuros associada com uma caracterização química.

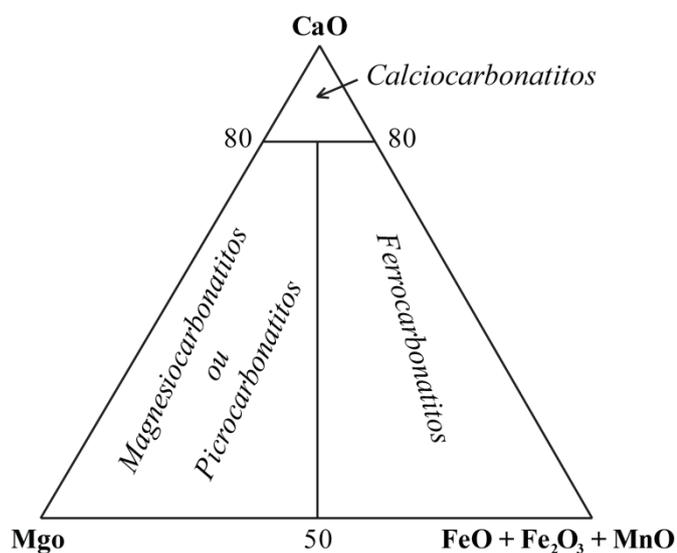


Figura 15 – Classificação química através do diagrama CaO : MgO : (FeO + Fe₂O₃ + MnO) para os carbonatitos das classes dolomítica, calcítica e ferrífera, modificado de Wernick (2004), extraído de Le Maitre (1989).

3.1.2. Panorama Mundial de Rochas Carbonatíticas

Dos carbonatitos se obtém uma série de produtos economicamente interessantes, como fósforo a partir de apatita, ferro a partir de magnetita,

nióbio a partir de pirocloro, zircônio a partir de badeleíta e diversos elementos terras raras a partir de monazita e bastnasite, entre outros minerais menos triviais. A importância econômica de reservas nesse tipo de litologia para os países em que se encontram é indiscutível.

No mundo todo se tem noticiada e devidamente registrada a ocorrência de cerca de 527 corpos de rochas carbonatíticas. O único vulcão ativo de lavas com composição carbonatítica no mundo é o Ol Doinyio Lengai (Figura 16), na Tanzânia.



Figura 16 - Lavas brancas do Ol Doinyio, obtido em en.wikipedia.org, acessada em dezembro de 2012.

Como exemplos mundiais, é válido citar o carbonatito de Palabora, situado na África do Sul, onde se explora fósforo a partir do carbonatito além de cobre e vermiculita. As ocorrências mundiais de carbonatitos estão significativamente concentradas nos continentes da África e Ásia.

Os carbonatitos ocorrem preferencialmente em ambientes geotectônicos como riftes intracontinentais, extensões continentais de falhas transformantes, *hot spots*, magmatismo ante-arco e ilhas oceânicas. São datados corpos do Proterozóico ao Recente, frequentemente associados a rochas alcalinas como ijolitos, melteigitos, sienitos, piroxenitos nefelínicos, urtitos e rochas plutônicas ultra-alcalinas. Carbonatitos e rochas alcalinas

formam complexos plutônico-hipoabissais subjacentes a vulcões produtores de lavas alcalinas nefelínicas e piroclastos nefelínicos. Muitos dos carbonatitos mundialmente estudados apresentam fortíssima fenitização, sendo os fenitos o fruto de metassomatismo alcalino generalizado das rochas encaixantes dos complexos carbonatíticos. A Figura 17 apresenta a distribuição dos carbonatitos por continente para o ano de 2008 e a Figura 18 apresenta a distribuição geográfica destes carbonatitos.

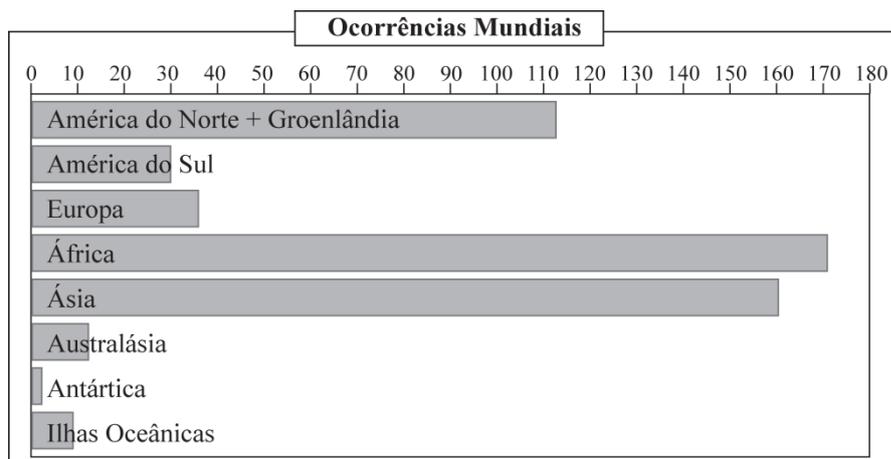


Figura 17 - Ocorrências por continente conforme Woolley & Kjærsgaard (2008).



Figura 18 – Distribuição mundial dos principais carbonatitos conhecidos atualmente, modificado de Woolley & Kjærsgaard (2008).

3.1.3. Panorama Brasileiro de Rochas Carbonatíticas

A gênese dos depósitos em maciços carbonatíticos brasileiros é resumida por Toledo *et al.* (2000) como sendo resultado de processos lateríticos e a geração de suas jazidas é estritamente controlada pelo fator litológico. Os elevados teores de Nb e P encontram-se em carbonatos, constituintes principais dos carbonatitos, que são facilmente alteráveis. A principal fase portadora do Nb é o pirocloro, cuja enriquecimento de Nb dá-se por concentração residual, o que faz de Araxá e Catalão as duas maiores jazidas de nióbio do Brasil, ainda a primeira sendo a maior do mundo. De forma similar a concentração residual da apatita é responsável pelo enriquecimento de fósforo nessas jazidas. Em alguns maciços como em Jacupiranga, São Paulo, a rocha parental possui um elevado teor natural de apatita tornando-a explorável como minério. Porém no manto de alteração é geralmente onde se concentra a apatita, constituindo o minério principal.

Não há no país concentrações econômicas de elementos terras raras em depósitos supergênicos fora de áreas de ocorrência de carbonatitos. Os principais minerais de minério que contem elementos terras raras são monazita, rhabdophanita, parisita, florencita, gorceixita e apatita. Nos complexos alcalino-carbonatíticos, os minerais de minério que contém nióbio tratam-se do bário-pirocloro, o principal mineral explorado, seguido da pervoskita e do anatásio. Os principais minerais de minério dos quais se obtém titânio são anatásio, ilmenita, perovskita, leucoxênio, rutilo e titanita.

Diversos estudos tratam as rochas carbonatíticas no Brasil como uma subdivisão associada com as rochas alcalinas (Ulbrich & Gomes, 1981; CBMM, 1984). Atualmente poucos dos corpos carbonatíticos presentes e documentados no Brasil estão em fase de exploração. Gomes & Comin-Chiaramonti (2005) apontam somente os corpos carbonatíticos de Araxá, Catalão I, Catalão II, Jacupiranga e Tapira, perfazendo cinco explorações em atividade. Estes cinco carbonatitos são explorados principalmente por lavras a céu aberto para extração de fosfato e nióbio. Dos cinco carbonatitos explorados excetuando Jacupiranga, as minerações exploram o manto de alteração sobre o corpo carbonatítico principal. Somente a mineração em Jacupiranga explora a rocha sã. Muitos outros exemplos nacionais podem ser mencionados, aqui apenas alguns serão usados como exemplos. Vale

salientar que todo o fosfato produzido no Brasil atualmente origina-se de carbonatitos.

O complexo alcalino-carbonatítico de Jacupiranga é uma intrusão oval de 6,6 km de extensão norte-sul e 4,8 km de extensão leste-oeste. Com exceção da área central, as áreas norte e sul do complexo intrusivo apresentam significativo volume de carbonatitos cálcicos e magnesianos que encontra-se intrudindo os jacupiranguitos e associados a dunitos. As zonas marginais e algumas porções interiores apresentam fenitos, geralmente associados aos líquidos magmáticos carbonatíticos em interação com as rochas intrudidas. As zonas de reações metassomáticas entre jacupiranguitos e carbonatitos apresentam rochas com bandas ricas em sílica e bandas carbonatíticas. Magnetita carbonatitos e flogopita carbonatitos ocorrem em algumas porções do complexo. A extração principal em Jacupiranga é o fosfato, acrescentado de um resíduo de óxido de magnésio aproveitado para a produção de cimento.

O complexo alcalino-carbonatítico de Mato Preto possuidor de um depósito significativo de fluorita e elementos terras raras faz parte de um grupo de intrusões alcalinas que incluem os complexos de Tunas, Banhadão, Itapirapuã e Barra do Itapirapuã, tectonicamente associados ao Lineamento Lancinha-Cubatão. Fazem parte do complexo cálcio-carbonatitos e ferro-carbonatitos. O Lineamento Lancinha-Cubatão corta o complexo através de uma significativa zona de cisalhamento.

O complexo alcalino-carbonatítico de Itapirapuã situado na divisa entre os estados de São Paulo e Paraná é uma intrusão com dimensões de 5 km norte-sul e 1,5 km leste-oeste. Trata-se basicamente de um *stockworks* de carbonatito intrudindo principalmente sienitos e um granito, tendo depósitos com quantidade significativas de elementos terras raras, fosfato e magnetita. O minério primário de elementos terras raras explorado no complexo é composto principalmente por bastnaesita-synchisita. Aflorantes principalmente no setor sul do complexo, as rochas carbonatíticas são ferro-carbonatitos e magnésio-carbonatitos, além de volumosos veios de carbonatito hidrotermalizados cortando lamprófiros.

O complexo alcalino-carbonatítico de Araxá, de geometria circular, possui cerca de 5 km de diâmetro e intrude o Grupo Araxá. Consiste de uma zona centralizada de beforsito, carbonatito dolomítico, cercado por uma zona externa onde coexistem beforsitos e glimeritos, por sua vez cercado por uma zona ulterior onde predominam os glimeritos. Uma zona com certo volume de sövito, carbonatito cálcico, ocorre na porção noroeste do complexo. O complexo é cercado por uma zona de contato com fenitos com aproximadamente 2 km de largura. O intemperismo resultou na criação de um resíduo laterítico friável, com mais de 100 m de espessura contendo minérios supergênicos e residuais de nióbio, fósforo e elementos terras raras.

A lixiviação dos constituintes carbonáticos de carbonatitos resulta na formação de solos com altas concentrações residuais de nióbio, fósforo e elementos terras raras, denominados depósitos supergênicos e depósitos residuais. Muitos carbonatitos brasileiros, em particular as ocorrências de Catalão e Araxá, apresentam concentrações residuais de nióbio, fosfato, elementos terras raras e vermiculita. Os minérios primários de fosfato destes complexos alcalino-carbonatíticos são carbonatitos ricos em fluorapatita. O principal minério primário, denominado depósito de fosfato do tipo Anitápolis, contém altas concentrações de fósforo em rochas ultramáficas, sienitos, urtitos e carbonatitos. O minério secundário possui quantidades pouco significativas de fósforo, disseminado em diferentes litologias. Reservas com mais de dez milhões de toneladas são comuns. O depósito de Barreira, em Araxá representa o mais rico depósito de nióbio do mundo, e Catalão I possui uma significativa reserva de elementos terras raras.

3.2. Zonas de Cisalhamento

Este subcapítulo revisional foi baseado principalmente em Hasui & Costa (1990); Fossen (2010), Passchier & Trouw (2005), Coe (2010), Ramsay & Huber (1983) e Ramsay & Huber (1987).

3.2.1. Conceitos

Deformação é quando um corpo rochoso ou maciço rochoso sofre uma mudança de posição em relação a um sistema de coordenadas, seus pontos materiais deslocam-se uns em relação aos outros. As mudanças mais pronunciadas ocorrem através da distorção, que é a mudança de forma, dilatação ou dilatação com distorção. O deslocamento de um determinado ponto é definido pelo vetor que une o ponto no estado indeformado com o estado deformado, não importando a trajetória executada. A partir destas trajetórias se definem o cisalhamento puro e o cisalhamento simples, a seguir abordados nesta revisão conceitual. Para tal é necessário basear-se na premissa de que a deformação possa ser quantificada. As mudanças tanto no comprimento de linhas como no valor angular entre essas linhas devem ser medidas.

Uma zona de cisalhamento é um conceito da Geologia que descreve uma área onde as rochas apresentam um elevado grau de deformação não coaxial, evidenciada pela presença de foliações e lineações minerais bem marcadas. Segundo Ramsay & Huber (1987), as zonas de cisalhamento são definidas como zonas planares a curvilíneas que concentram elevada deformação ao longo de um grande transecto, com uma largura relativamente mais curta. As zonas de cisalhamento são claramente zonas de fraqueza, e apresentam adelgaçamento por deformação localizada. Para Passchier & Trouw (2005) a deformação nas rochas, de um modo geral, não ocorre de forma homogênea e a concentração da deformação em zonas planas que acomodam movimentos rígidos leva ao desenvolvimento de fábricas e associações minerais muito características, que refletem as condições de pressão e temperatura, o tipo de fluxo, a direção de movimento e a história de deformação daquela zona. Há diversas formas de se classificar zonas de cisalhamento, aqui serão exibidas as formas mais comuns de abordagem das mesmas.

Zonas de cisalhamento podem ser classificadas em rúpteis quando é identificado um comportamento frágil, dúcteis quando com comportamento plástico e rúpteis-dúcteis ou dúcteis-rúpteis quando com comportamentos intermediários entre as duas primeiras. (Figura 19)

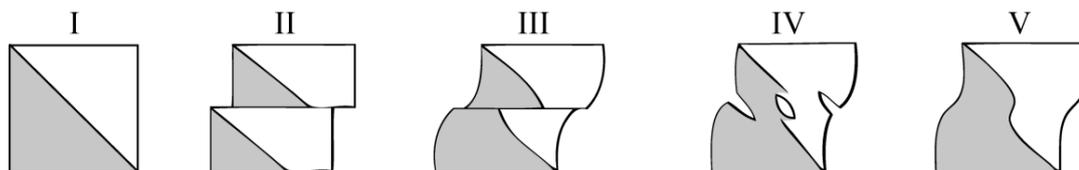


Figura 19 - Regimes de cisalhamento representados em blocos 2D: I – Seção Indeformada; II - Cisalhamento Rúptil; III e IV - Cisalhamento Rúptil-Dúctil / Dúctil-Rúptil; V - Cisalhamento Dúctil. Modificado de Hasui & Costa (1991).

Zonas dúcteis e dúcteis-rúpteis normalmente são as equivalentes em maiores profundidades ou níveis estruturais inferiores das zonas rúpteis situadas em profundidades menores ou níveis estruturais superiores. Nas zonas de cisalhamento dúcteis o estado de deformação varia de forma contínua. Nas zonas de cisalhamento frágil a deformação é descontínua. E comportamentos entre estes dois extremos são encontrados nas zonas intermédias de deformação, as zonas de cisalhamento frágil-dúctil.

O cisalhamento ainda pode ser classificado como homogêneo ou heterogêneo (Figura 20) de acordo com Fossen (2010), sendo que o homogêneo possui uma distribuição de quantidade de deformação igual em todas as partes infinitesimais do corpo, e no heterogêneo a deformação não é similar em todos os pontos do corpo.

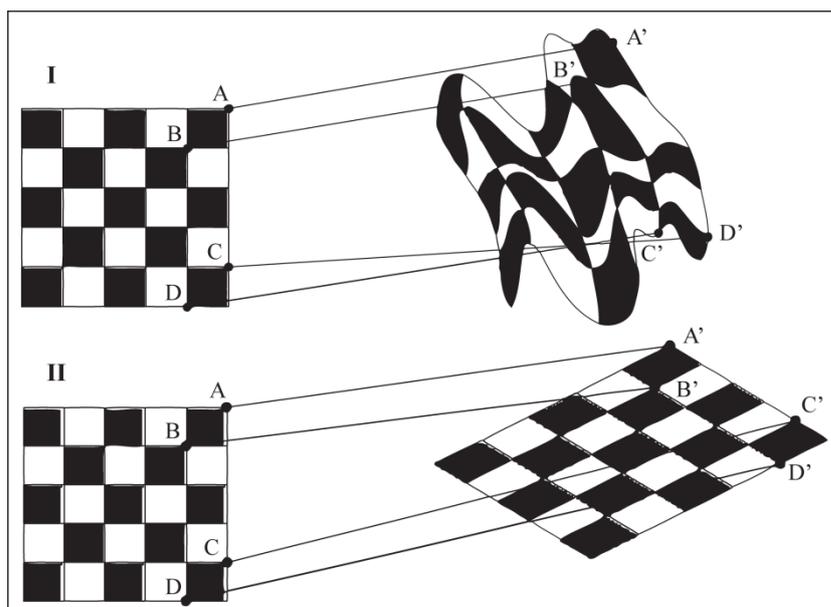


Figura 20 - Representação de Blocos 2D sob diferentes tipos de cisalhamento, à esquerda os blocos estão indeformados, e à direita estão sob deformação do tipo: I - Cisalhamento heterogêneo; II - Cisalhamento homogêneo (Fossen, 2010).

Uma zona de cisalhamento deve possuir limites laterais paralelos entre si. Estas zonas encontram-se normalmente limitadas por blocos pouco ou sem deformação. A deformação resulta em geral da movimentação relativa das paredes limites. Utilizam-se nomenclaturas em função da escala e geometria, tais como *cinturão de cisalhamento*, *zona de cisalhamento* e *banda de cisalhamento*, de escala regional para escala microscópica. A geometria de uma zona de cisalhamento é diagnosticada pelo perfil de deslocamento ao longo de qualquer seção transversal à zona, os quais devem ser aproximadamente idênticos. É possível a ocorrência de seis campos de deslocamento (Figura 21), que desenham as possíveis geometrias de zonas de cisalhamento.

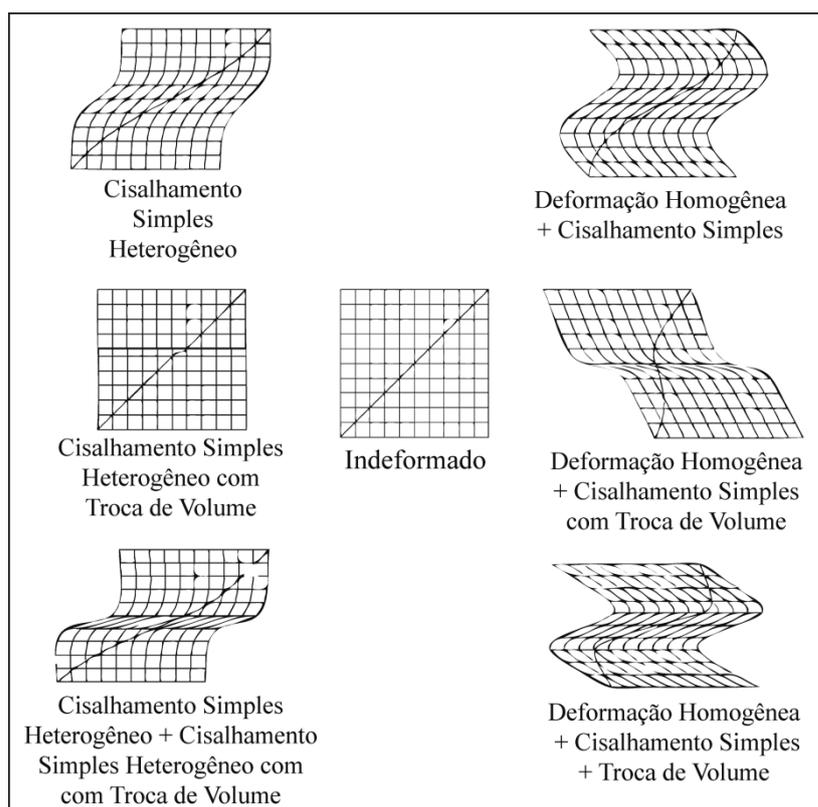


Figura 21 - Possíveis geometrias de deformação perfazendo seis campos de deslocamento; no centro, o bloco 2D indeformado; à esquerda, blocos sob cisalhamento heterogêneo; à direita, sob cisalhamento homogêneo. Modificado de Hasui & Costa (1991).

As zonas de cisalhamento do tipo rúptil têm como principais características sua representatividade através de uma falha ou zona de

falha, longas e estreitas faixas onde se concentra a deformação. Uma representação esquemática da relação entre profundidade crustal e regime deformacional pode ser vista na Figura 22. Nessas estreitas faixas há intenso quebramento e cominuição nas rochas, desde trituração visível em amostras de mão até moagem dos constituintes minerais em escala microscópica. Esse tipo de zonas ocorre no nível estrutural superior e intermediário, que atinge até cerca de 15 km de profundidade crustal, e o comportamento de cada zona é particular, dependendo do volume do material deformado e dos mecanismos de deformação, sabendo-se que os mecanismos de cisalhamento rúptil são principalmente controlados pela concentração de esforços em torno das imperfeições internas, seja em nível cristalino, seja em nível de blocos e maciços rochosos.

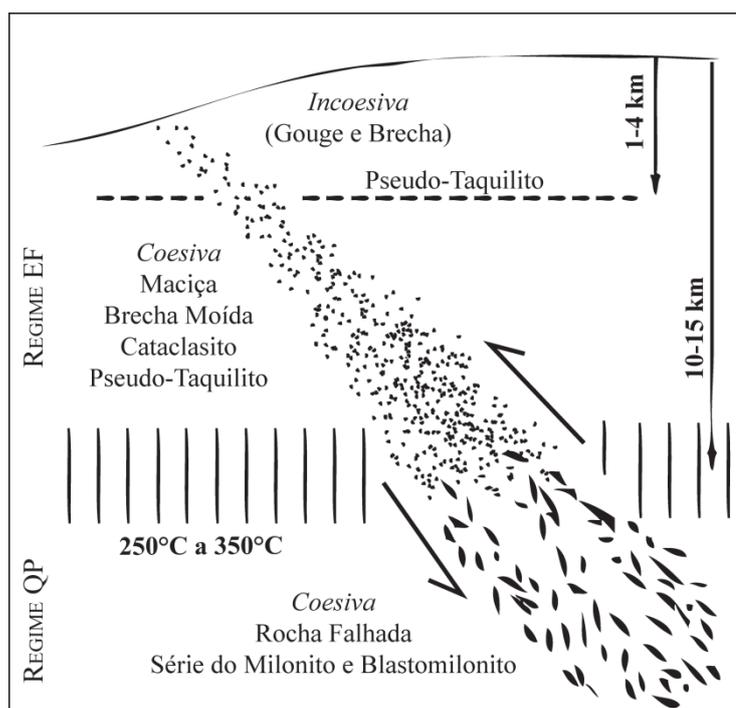


Figura 22 - Relação entre profundidade crustal e regime deformacional dentro de uma zona de cisalhamento contínua, modificado de Sibson (1977).

As rochas produzidas nas zonas de cisalhamento do tipo rúptil são cataclásticas ou tectonitos rúpteis, nomes dados por diferentes autores. As rochas formadas no processo cataclástico recebem nomenclaturas tais como brecha, pseudotaquilito, microbrecha, protocataclasito, cataclasito,

ultracataclasito, de acordo com a classificação de Sibson (1977). Essas rochas envolvem processos de deformação como microfraturamento coalescente, faturamento generalizado, rotação dos minerais e esmagamento dos minerais. A deformação não-coaxial em regime rúptil, como neste tipo de zona de cisalhamento, mostra casos gerais com características tão comuns que são atribuíveis do universal para o particular, sendo estas características as descontinuidades desenvolvidas conforme o Modelo de Riedel.

O Modelo de Riedel para o regime rúptil envolve:

- Fratura de partição T: fratura de extensão ou distensão.
- Fratura de cisalhamento de Riedel (sintética ou R).
- Fratura de cisalhamento conjugada de Riedel (antitética ou R').
- Fratura de cisalhamento P (sintética secundária).
- Fratura de cisalhamento X (antitética secundária).
- Fratura de cisalhamento Y ou D, que se forma paralelamente ao binário em casos extremos.

Na Figura 23 podem ser vistas diferentes feições produzidas em rochas de acordo com a profundidade crustal e a resistência das rochas deformadas.

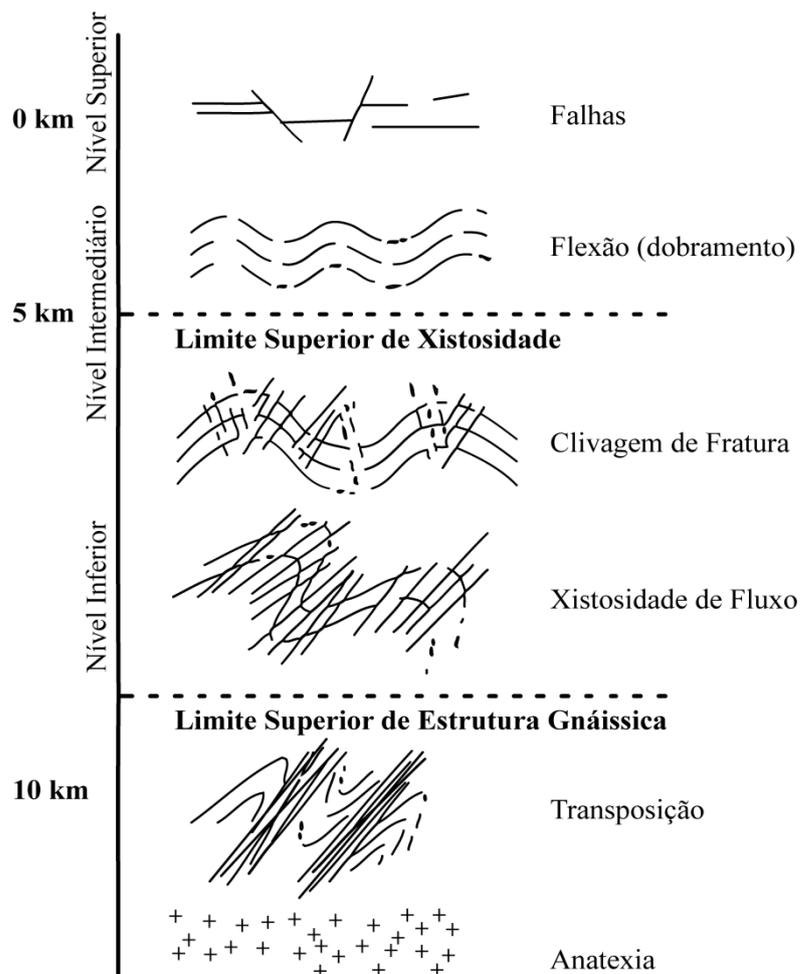


Figura 23 – Representação esquemática de estruturas formadas na crosta e encontradas em zonas de cisalhamento em relação ao nível crustal, sob regime rúptil em rochas mais resistentes (falhas, clivagem de fratura) e regime dúctil em rochas menos resistentes (flexão, xistosidade de fluxo). Criado a partir de Sibson (1977), Fossen (2010), Press et al. (2007) e Hasui & Costa (1991).

As zonas de cisalhamento do tipo dúctil apresentam enumeráveis características que requerem muito mais atenção do que a direcionada no presente texto e fogem ao escopo desta parte revisional do trabalho, sendo que foi optado pela apresentação de suas generalidades mais marcantes. A feição fundamental das zonas de cisalhamento dúctil é a recristalização acentuada, com desenvolvimento de estruturas e texturas indicadoras de fluxo plástico. O limite superior do ambiente onde se desenvolvem estas feições apresenta temperaturas da ordem de 300°C e situa-se a cerca de 15 km de profundidade, tratado como nível estrutural inferior. As rochas geradas são aquelas que caem no campo dos milonitos conforme a

classificação Sibson (1977). Podem ocorrer processos cataclásticos envolvidos, os quais já foram brevemente abordados nesta revisão, porém o mecanismo de deformação mais característico é o denominado superplástico ou fluxo laminar não-coaxial. Com o aumento da deformação os grãos grossos das rochas convertem-se em protomilonitos, milonitos ou ultramilonitos. É neste tipo de zona de cisalhamento que os mobilizados podem formar concentrações minerais importantes. As principais armadilhas são as faixas de alta deformação, zonas de sombra de pressão, zonas de fraturas diversas e aberturas criadas por distensão.

As zonas de cisalhamento dúctil articulam-se de forma a isolar lentes mais ou menos extensas formando o padrão amendoado. Esse padrão pode ser resultado de evolução de geometria anastomosada de zonas de cisalhamento, ocorrência de zonas de cisalhamento conjugadas ou zonas de cisalhamento de tipos diversos entrecruzadas tridimensionalmente. As zonas de cisalhamento dúctil podem apresentar uma geometria aproximadamente lítrica quando em investigações de subsuperfície.

Uma generalidade importante em zonas de cisalhamento dúctil são as feições planares extremamente bem desenvolvidas. Há orientação preferencial estatística de minerais e desenvolvimento no plano de achatamento, dando origem à xistosidade e/ou clivagem. Constitui-se na feição planar fundamental de uma zona de cisalhamento. Os mecanismos de formação das foliações ou feições planares envolvem rotação passiva de minerais planares com a matriz sofrendo deformação plástica, orientação de minerais neo-formados, mecanismos de dissolução e recristalização por pressão e também fluxo plástico, gerado por defeitos intra-cristalinos. A recristalização acentuando feições planares é abundante nesse tipo de zona de cisalhamento. As deformações plásticas, em escala cristalina, são as responsáveis pela orientação planar das rochas metamórficas em altas temperaturas e altas taxas de deformação. Em altas temperaturas as deformações em zonas de cisalhamento dúctil provocam recuperação mineralógica pela recristalização dinâmica. O cisalhamento dúctil apresenta gradiente de máximo deslocamento na zona central, decrescendo em

direção às margens, resultando em que as feições planares apresentam geometria sigmoidal.

Em zonas de cisalhamento dúctil as feições lineares são basicamente representadas pelas lineações de estiramento. Estas podem ser representadas por minerais pré-cinemáticos a sin-cinemáticos, estando estes orientados ou alinhados. Também pode ocorrer representação de feições lineares por objetos geológicos alongados, tais como seixos, pillow-lavas, fósseis e sombras de pressão.

As dobras geradas pelo cisalhamento dúctil, chamadas dobras de cisalhamento, *shear-folds*, são muito comuns. É frequente o desenvolvimento de dobras com eixos curvos e redobrados caracterizando dobras em bainha. As dobras variam continuamente em estilo a partir de abertas e proximamente concêntricas a isoclinais similares e podem ser geradas a partir de um *buckling* interno, instabilidade da foliação. Dobras podem deformar foliações geradas anteriormente ou concomitantemente na zona de cisalhamento dúctil. As estruturas pré-existentes deformadas também são largamente encontradas nestas zonas de cisalhamento, com as feições lineares pré-existentes aproximando-se da direção de cisalhamento durante o transcorrer da deformação. Um dobramento pré-existente, por exemplo, tem suas variações de orientação amplificadas até tornar-se uma dobra em bainha. Em zonas de cisalhamento dúctil é possível que feições estruturais sejam geradas e, posteriormente, com o incremento da deformação, essas feições sejam também deformadas. Assim a própria zona deforma seu produto de deformação.

3.2.2. Feições Estruturais e Marcadores de Direção de Movimento

Algumas das estruturas mais comuns que capacitam ao geólogo o reconhecimento do sentido de movimento tectônico em zonas de cisalhamento são aqui citadas.

As estruturas do tipo **augen** aparentemente são as mais estudadas. Trata-se de porfiroclastos com estruturas augen derivadas de minerais relictos rígidos, indicam redução do tamanho dos grãos por processos

brandos de deformação. Podem apresentar diâmetros entre 0,1 e 10 cm e desenvolvem-se em planos de foliação. Em geral estão assimetricamente distribuídos, apresentando uma forma retorcida com caudas cuja composição é idêntica ao do grão em direção ao cisalhamento, isso graças a recristalização dinâmica. Em relação à simetria interna, tomando-se como referência um plano mediatriz ao grão, o augen pode ser ortorrômbico, quando não determina o sentido de cisalhamento ou do movimento cisalhante, ou monoclinico, ideal para a determinação do sentido. Neste caso há possibilidade de diagnosticar o sentido de movimento, já que a cauda levanta-se para o lado do sentido do movimento, e torna-se como referência o plano traçado pelo centro do grão. Passchier & Simpson (1986) subdividem os porfiroclastos que possuem cauda em dois grupos: os primeiros donos de uma cauda cuneiforme, quando as taxas de recristalização dinâmica são maiores que a taxa de deformação, e neste caso a cauda apresenta um lado côncavo e outro plano; os segundos com cauda fina, quando a taxa de recristalização dinâmica é menor que a taxa de deformação e caracteristicamente a cauda tende a formar uma convexidade

As feições do tipo **sombras de pressão**, tal como as estruturas do tipo augen, podem fornecer indícios do sentido de movimento, porém se analisadas superficialmente, podem fornecer interpretação conflitante das geometrias. Determinam o contraste de ductilidade entre o grão e sua matriz e geralmente bordejam megacristais. As sombras de pressão podem ser caracterizadas como franjas de quartzo e/ou barbas, como ocorrem ao redor de cristais de pirita e granada. Os eixos das novas fibras de quartzo seguem a direção de estiramento. As principais feições diagnósticas são a ocorrência de microdobras na foliação em bordas de granadas rotacionadas, a tendência ao espaçamento mais fechado dos planos de foliação pré-existentes e por fim a junção do local da mais recente deposição de material na sombra de pressão e o cristal, a forma é côncava em direção aos planos de foliação enquanto o lado oposto é reto e suavemente curvo.

Minerais rígidos em matriz dúctil geralmente fraturam-se, fornecendo uma feição indicadora de sentido de movimento relativo através do **deslocamento de grãos fraturados**. A fratura é variável com relação ao

plano de fluxo. Com a continuidade da deformação há rotação no mesmo sentido do cisalhamento através de dois grupos de fraturas: o primeiro grupo com fraturas de baixo ângulo, estando o sentido da falha o mesmo do sentido de cisalhamento; o segundo grupo com fraturas do alto ângulo, normalmente são antitéticas ao sentido de cisalhamento, com a rotação, porém, podem diminuir seu ângulo e tornar-se sintéticas. Para a determinação do sentido de movimento, recomenda-se usar grãos fraturados com alto ângulo do plano de fratura (50° a 130°) ou muito baixo ângulo ($<20^\circ$ e $>160^\circ$) em relação ao plano de fluxo.

Zonas de cisalhamento dúctil muito pequenas denominadas **bandas de cisalhamento** são também indicadores de sentido de movimento. Nestas podem ocorrer dois conjuntos de anisotropias planares definidas como superfícies C e S. As primeiras, superfícies C, são paralelas à zona principal de cisalhamento; as seguintes, superfícies S, são perpendiculares ao eixo menor do elipsóide de deformação. Formam ângulo máximo de 45° com as superfícies C, porém com a deformação progressiva tendem a paralelizar-se a ela. O aspecto sigmoidal da superfície, foliação S, indica o sentido de movimento.

Grãos micáceos maiores são frequentemente orientados com seus planos 001 em ângulo baixo em relação à foliação milonítica, que se volta para a direção de encurtamento incremental, fornecendo assim **marcas de micas**. Se for possível ver o fenômeno de flash, onde todas as micas mostram uma máxima reflexividade, é possível orientar a zona de cisalhamento, pois o ponto de vista do observador forma uma linha que é paralela ao vetor de movimento da zona de cisalhamento.

Micro-dobras ou meso-dobras geradas por perturbações locais no fluxo tem sua vergência coincidente com o sentido de cisalhamento em **bandamentos miloníticos dobrados**. É necessário o conhecimento prévio da orientação do acamamento em relação ao plano de fluxo.

Como último marcador do sentido de movimento a ser mencionado está a comum **orientação preferencial de minerais**, partindo do pressuposto de que a recristalização dinâmica apresenta dois mecanismos, sendo um deles a rotação progressiva de sub-grãos durante a deformação

plástica do cristal, e o outro é pela migração dos limites do grão entre cristais de diferentes estados de deformação interna. A combinação dos dois mecanismos, além da deformação induzida nos retículos durante o evento deformacional, produz novos grãos alongados cujos eixos X são paralelos à direção de estiramento. São portanto estes grãos neoformados úteis indicadores do sentido de movimento.

Dentre as feições estruturais geradas no cisalhamento, devem ser mencionadas as feições microscópicas de bandas de cisalhamento, que são:

- Orientação de grãos planar e linearmente;
- Extinção ondulante que progride para *kinks*, lamelas de deformação e separação de sub-grãos;
- Porfiroclastos e agregados de grãos lenticulares, envoltos por faixas e esteiras de sub-grãos;
- Micro-bandamento de fluxo milonítico;
- Micro-falhas e micro-dobras;
- Grãos rotacionados;
- Porfiroblastos com inclusões;
- Grãos fortemente achatados;
- Preenchimento de zonas de sombra de pressão;
- Dissolução por pressão
- Feições de recuperação, recristalização e neoformação de grãos
- Grãos sigmoidais como micas pisciformes;
- Tramas de grãos;

As feições que têm maior importância são as indicativas de rotação que caracterizam o processo não-coaxial. Estas feições são referidas como indicadores de rotação, indicadores cinemáticos ou critérios de rotação. Dentre as mais comuns, algumas das quais já explicadas na presente revisão, constam:

- Dobras de arrasto;
- Deformação e rotação de minerais;
- Assimetria de dobras;

- Bandas de cisalhamento;
- Estruturas de cisalhamento S-C;
- Porfiroblastos rompidos;
- Assimetria na zona de sombra ao redor do porfiroblasto;
- Assimetria de esteiras de sub-grãos;
- Micas Pisciformes;
- Porfiroblastos rotacionados;

Feições usualmente tidas como mesoscópicas, ou seja, identificáveis em zonas de cisalhamento variando em escalas de amostra de mão a aforamento, são diversas feições microscópicas que encontram correspondência em escala macroscópica, tais como:

- Dobras de arrasto;
- Bandas de cisalhamento;
- Estrutura S-C;
- Dobras assimétricas;
- Foliação milonítica, que é a disposição planar de grãos no interior de faixas em que incidiu fluxo plástico por cisalhamento não-coaxial;
 - Acamamento tectônico, que implica em aloctonia ou a disposição paralela de faixas com terminações acunhadas e lentes alongadas de rochas;
 - Bandamento composicional, disposição paralela de faixas de composições e/ou texturas diferentes;
 - Lineação de estiramento, representada por barras de quartzo feldspatos e outros minerais;
 - Lineação mineral, caracterizando a orientação linear de minerais.

Numa escala regional, as feições megascópicas mais observadas que refletem cinturões de cisalhamento, em mapas ou em mega-escala de campo, devem ser as seguintes:

- Dobras de arrasto;
- Foliação milonítica;

- Bandamento composicional;
- Zonas mais ou menos deformadas, devido a deformação heterogênea;
- Estruturas S-C.

3.3. Controles Estruturais nos Carbonatitos Brasileiros

Os complexos alcalino-carbonatíticos do Brasil ocorrem associados a zonas de flexura e fraturas nas bordas das bacias do Paraná, Parnaíba e Amazonas, onde ao menos três principais lineamentos exercem controles estruturais nestes complexos segundo Biondi (2005). São eles:

I. **Lineamento do Alto Parnaíba** orientado preferencialmente para o azimute 125° , se estende da costa do Rio de Janeiro ao leste do estado de Rondônia, corresponde ao Lineamento 125° consagrado em publicações em língua inglesa (*125° Lineament*). Os complexos alcalinos mais importantes economicamente associados a esse lineamento concentram-se no Triângulo Mineiro, juntamente com a maior província lamproítica-kimberlítica conhecida no país. Alguns complexos carbonatíticos relacionados a este lineamento são Catalão, Araxá e Tapira.

II. **Lineamento Lancinha-Cubatão** perfazendo o contorno litorâneo da Região Sudeste do país, iniciado no Rio de Janeiro e se estendendo para sudoeste até o estado do Paraná, em contato com o Lineamento de Blumenau, concentrando complexos alcalinos entre o Arco de Ponta Grossa e a Sinclinal de Torres. Este lineamento se estenderia na África contando com complexos alcalinos associados, de

Angola ao Zaire. As intrusões alcalinas encontradas no Lineamento Lancinha-Cubatão podem ser controladas por estruturas menores, como os lineamentos paralelos de Guapira, São Jerônimo-Curiúva, Rio do Alonzo e Rio Piquiri, todos de direção noroeste-sudeste, por sua vez relacionados ao arco jurássico de Ponta Grossa.

III. **Lineamento Transbrasiliano** de azimute geralmente próximo de 45° e se estendendo do nordeste do Paraguai até a cidade de Fortaleza, no estado do Ceará. Essa feição estrutural cruza o Lineamento 125° no estado de Goiás, exibindo ocorrências alcalinas somente na zona de intersecção com este lineamento e nos arredores de Fortaleza.

Estes lineamentos e o posicionamento dos complexos alcalinos, alcalino-carbonatíticos e carbonatíticos do Brasil pode ser visualizado na Figura 24. Complexos alcalino-carbonatíticos situados na Bacia Amazônica praticamente não possuem controles estruturais significativos, assim como um grupo de intrusões alcalinas no sudoeste do estado da Bahia sem lineamento estrutural associado. As idades das ocorrências brasileiras de corpos alcalinos são principalmente mesozóicas com algumas idades cenozóicas subordinadas, enquanto os complexos alcalinos amazônicos são de idades mesoproterozóicas a paleoproterozóicas e os complexos alcalinos baianos são de idades cambrianas a proterozóicas.

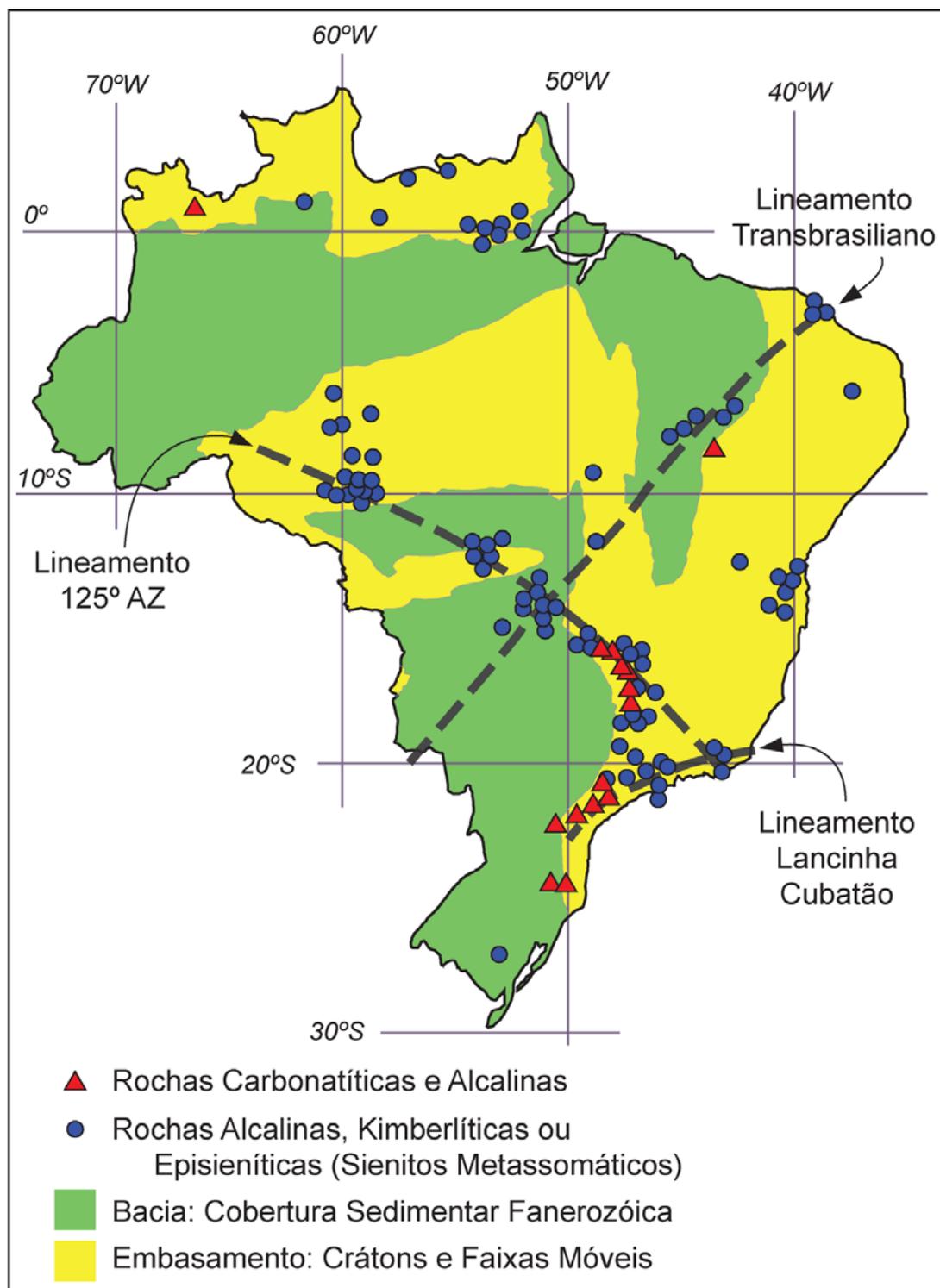


Figura 24 - Mapa evidenciado duas características: o posicionamento dos complexos alcalinos e carbonatíticos brasileiros em zonas de margem de bacias fanerozóicas e controlados estruturalmente por três lineamentos de escala continental. Modificado de Biondi (2005).

Os depósitos minerais mais significativos relacionados aos complexos alcalino-carbonatíticos estão possivelmente relacionados ao Lineamento

125° ou a feições estruturais que por sua vez são tidas como relacionadas ao Lineamento 125°. São significativos os depósitos para produção de fertilizantes de relevância nacional, a saber os depósitos de fosfato em Tapira, Catalão, Araxá e Anitápolis, sendo este último em Santa Catarina e relacionado aos lineamentos subordinados em continuidade ao Lineamento Lancinha-Cubatão. Se destacam internacionalmente os depósitos de titânio de Tapira e Salitre, ambos em Minas Gerais, o depósito de nióbio do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Araxá, o depósito de elementos terras-raras de Catalão I, no estado de Goiás, e o depósito de urânio de Itataia, no estado do Ceará.

Os complexos alcalino-carbonatíticos de Araxá, Tapira, Salitre e Serra Negra estão associados com rochas kimberlíticas e relacionados ao Lineamento 125°.

4. Conhecimento Geológico dos Sítios

Considerando a pesquisa bibliográfica de informações prévias e estudos extra-curriculares imprescindíveis para o presente estudo, a presente síntese geológica, tectônica e estrutural foi elaborada a partir das obras *O Desvendar de um Continente: A Moderna Geologia da América do Sul e o Legado da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* editado por Mantesso-Neto, Bartorelli, Carbeiro & Brito Neves (2004), e *Geologia do Rio Grande do Sul*, editado por Holz & De Ros (2000). Este texto também extraiu informações dos trabalhos de Almeida (1978), Ribeiro & Fantinel (1978) e outros trabalhos pontualmente citados.

4.1. Cenário Tectônico Continental

Os dois corpos carbonatíticos estão situados em escala tectônica mundial dentro da Placa Sul-Americana, e em escala continental situam-se na Plataforma Sul-Americana, dentro da área morfotectônica denominada como Província Mantiqueira, conforme Almeida (1981). Situa-se esta província na Plataforma Sul-Americana, tendo se desenvolvido durante a Orogenia Brasiliano-Panafricana a qual resultou na amalgamação do Paleocontinente Gondwana Ocidental, sendo essa orogenia de idade Neoproterozóica.

A Plataforma Sul-Americana, originalmente denominada de Plataforma Brasileira (Almeida, 1966; Almeida, 1967), é por definição uma porção estável da Placa Tectônica da América do Sul. De acordo com Almeida *et al.*

(2000) não diretamente afetada pela zona orogênica fanerozóica do Ciclo Andino e pela zona orogênica fanerozóica do Ciclo Caribenho.

A plataforma é contornada pelos cinturões de dobramentos destas zonas orogênicas e se estende até a margem atlântica, onde se atenua para um encontro monótono com a porção oceânica da Placa Tectônica Sul-Americana.

Para finalidades práticas assimila-se a subdivisão tectono-estratigráfica da Província Mantiqueira adotada por Heilbron *et al.* (2004) a seguir listada:

- I. Rochas do embasamento mais antigas que 1.7 Ga.
- II. Sucessões intracrâtonicas Paleoproterozóicas a Mesoproterozóicas.
- III. Sucessões de margem passiva Neoproterozóicas.
- IV. Arcos magmáticos associados a configurações de margem continental intraoceânica e ativa (790 Ma a 585 Ma).
- V. Granitóides sin-colisionais relacionados a diferentes episódios colisionais.
- VI. Sucessões sedimentares orogênicas tardias e magmatismo bimodal relacionado.

A área deste projeto engloba rochas desde a subdivisão I de rochas do embasamento, representadas por um complexo granulítico, até a subdivisão VI de sucessões sedimentares orogênicas e magmatismo bimodal, representados pelas unidades sedimentares a serem descritas ainda neste capítulo e no capítulo seguinte.

A Província Mantiqueira distribuída desde o sul do Estado da Bahia até o Estado do Rio Grande do Sul engloba os orógenos Araçuai, Ribeira, Brasília Meridional, Dom Feliciano e São Gabriel.

O segmento meridional da Província Mantiqueira inclui o Orógeno Dom Feliciano e o Orógeno São Gabriel, e é marginal a três crátons, a saber: Cráton Rio de La Plata, situado no oeste do escudo no Rio Grande do Sul – Rapela *et al.* (2007) – e no norte do Uruguai; Cráton Paranapeanema ou Cráton do Paraná, encoberto pela Bacia do Paraná; e o último, Cráton Luís Alves, – Basei *et al.* (1992), Hartmann (2000) – que separa o Orógeno Dom

Feliciano do Orógeno Ribeira. A pequena extensão exposta tida como sendo do Cráton Rio de La Plata, geograficamente relacionável ao Carbonatito Três Estradas, é constituída basicamente por ortognaisses bimodais, caracterizados como uma típica sequência TTG. Os gnaisses granodioríticos possuem idade de metamorfismo de *ca.* 2035 Ma e idades de cristalização do protólito de *ca.* 2366 Ma segundo Hartmann et al. (2008), que também aponta idades de cristalização do protólito do granulito de *ca.* 2489 Ma e de metamorfismo do granulito de *ca.* 2006 Ma.

O Carbonatito Três Estradas encontra-se numa zona limítrofe entre blocos distintos dentro da Província Mantiqueira, com o terreno cratônico supracitado a sudoeste e um terreno orogênico a nordeste, praticamente no contato estrutural de significância regional conhecido como Lineamento de Ibaré, visível em imagens de satélite, fotografias aéreas e levantamentos aerogeofísicos. A Falha Suspiros-Linhares, com evidências fortes em campo e com aspectos geomorfológicos que permitem sua identificação, perfaz o traçado do Lineamento de Ibaré (Luzardo & Fernandes, 1990). Assim sendo, ambos termos, Falha Suspiros-Linhares (ou Suspiro-Linhares) e Lineamento de Ibaré, aqui foram adotados como sinônimos para fins práticos, mesmo se cogitando a adoção dos termos do seguinte modo: referindo-se a Lineamento de Ibaré quando reconhecido por sensoriamento remoto e Falha Suspiros-Linhares quando reconhecida por evidências em campo; se trataria de uma estrutura indicativa da outra e vice-versa.

Dos orógenos citados, o orógeno em questão relacionável à área-alvo Três Estradas trata-se do Orógeno São Gabriel, a norte da ocorrência. Apesar da pequena extensão exposta, esse orógeno guarda o registro mais completo do estágio de formação da crosta juvenil brasileira em toda a Província Mantiqueira, caracterizando-se como orógeno acrescionário ou orógeno relacionado à subducção segundo Şengör (1990). Os limites tectônicos ou de exposição deste orógeno são os seguintes:

- O limite oriental, de caráter tectônico, é dado pela Zona de Cisalhamento Caçapava, com direção média nordeste-sudoeste.
- O limite meridional, também de caráter tectônico, é dado pela Zona de Cisalhamento Ibaré de orientação de movimentação

sinistral e de natureza transpressiva, com direção atual noroeste-sudeste.

- Os limites setentrional e ocidental, de caráter estratigráfico, com contatos de sobreposição, são dados pela cobertura fanerozóica, atualmente sob erosão, da Bacia Intracratônica do Paraná.

Os limites dados pelos lineamentos são zonas de cisalhamento profundas, possivelmente de natureza intercontinental, que separam blocos crustais distintos. De acordo com Luzardo & FERNANDES (1990) a Zona de Cisalhamento Ibaré separa o Orógeno São Gabriel do terreno arqueano de alto grau do Cráton Rio de La Plata, localmente representado pelo Complexo Granulítico Santa Maria Chico proposto formalmente por Nardi & Hartmann (1979). O Carbonatito Três Estradas está na borda sul do Lineamento de Ibaré, no Terreno Nico Pérez, como pode ser visto na Figura 25, interno ou no entorno do complexo granulítico, que segundo Jost & Hartmann (1984) é o mais extenso segmento arqueano preservado no interior da Província Mantiqueira e ainda segundo Hartmann (1998) é o mais profundo segmento crustal exposto na superfície do Brasil. De acordo com Oyhamtçabal *et al.* (2012) o Terreno Nico Pérez é uma unidade cratônica paleoproterozóica formada por uma porção uruguaia em sua extensão sul tratando-se do Complexo Granulítico Valentines–Rivera do Bloco Valentines, por uma porção gaúcha em sua extensão norte tratando-se do Complexo Granulítico Santa Maria Chico do Bloco Taquarembó, e por uma porção intermediária também uruguaia tratando-se dos ortognaisses granulíticos do Complexo Isla Cristalina de Rivera. Ainda conforme Oyhamtçabal *et al.* (2011) o Terreno Nico Pérez é individualizado do Cráton Rio de La Plata. Dessa forma, em superfície o referido cráton fica resignado nesta região ao Terreno Pedra Alta.

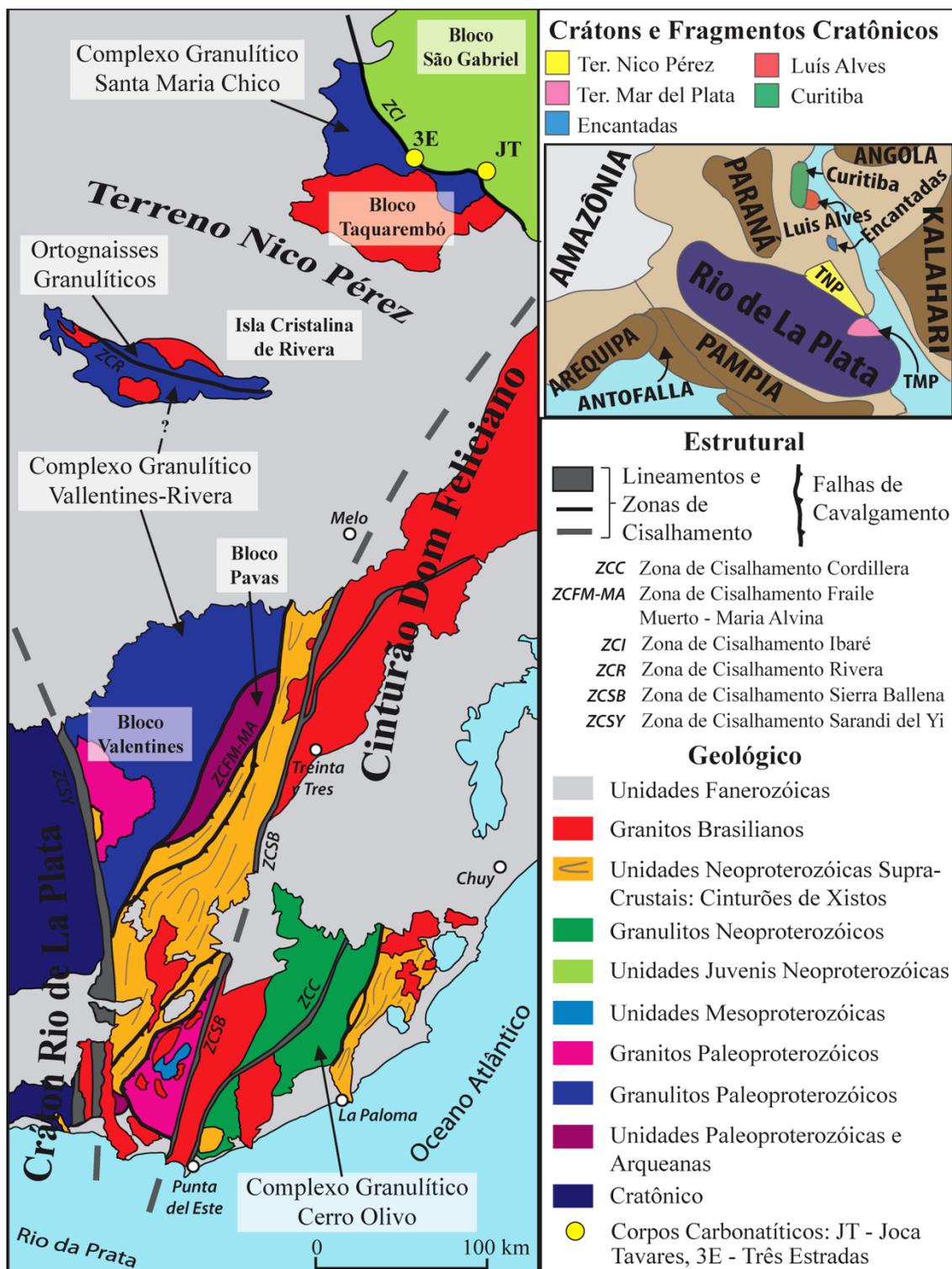


Figura 25 - Mapa tectônico do leste do Uruguai e sul do Rio Grande do Sul, modificado de Oyhamtçabal *et al.* (2012).

A Zona de Cisalhamento Caçapava constitui o divisor entre blocos tectônicos de diferentes constituições, estando a oeste o Orógeno São Gabriel e a leste o Complexo Encantadas caracterizado como embasamento

paleoproterozóico retrabalhado, juntamente com o Complexo Porongos caracterizado como cinturão de dobramentos e empurrões.

Ocorre sobre o Orógeno São Gabriel, na área oeste do Escudo Sul-Rio-Grandense parciais recobrimientos da Bacia do Camaquã do Orógeno Dom Feliciano, que é constituído pelas sequências passivas neoproterozóicas dos complexos Porongos (gaúcho), Brusque (catarinense) e Lavalleja (uruguaio) e pelos segmentos de arcos magmáticos neoproterozóicos de Pelotas (gaúcho), Florianópolis (catarinense) e Aygua (uruguaio), além de embasamento paleoproterozóico a arqueano. O Carbonatito Joca Tavares encontra-se no contato entre uma porção preservada da Bacia do Camaquã (Grupo Cerro do Bugio) e os metamorfitos Arroio Marmeleiro localizada sobre o Orógeno São Gabriel.

4.2. Domínio Tectônico

Diferentes nomenclaturas para as divisões de domínios tectônicos na região meridional do Rio Grande do Sul foram encontradas na bibliografia pesquisada, com variações em diferentes trabalhos, porém praticamente mantendo em comum uma compartimentação geotectônica do escudo gaúcho. Tradicionalmente são quatro os domínios tectônicos no escudo, afora as exposições de cobertura da Bacia do Camaquã, passíveis de serem individualizados por suas diferenças estruturais, petrotectônicas e isotópicas. São utilizados em diferentes trabalhos nomes de domínios como Encruzilhada, Encruzilhada do Sul, Encantadas e Porongos, referentes aos complexos homônimos ou Domínio Dom Feliciano, referente ao cinturão, entre outros como o Domínio Tijucas, enquanto Borba *et al.* (2007) menciona quatro domínios usuais: Taquarembó, São Gabriel, Santana da Boa Vista e Pelotas. Estas nomenclaturas foram apenas lidas de forma revisional e discuti-las não é o enfoque deste capítulo, para tanto adotou-se o conjunto de quatro domínios conforme encontra-se no mapa da CPRM editado por Wildner *et al.* (2007), que a saber são os domínios São Gabriel, Taquarembó, Pelotas e Encruzilhada do Sul.

Os domínios tectônicos no escudo gaúcho formam um mosaico de associações litológicas de unidades de rochas metamórficas, ígneas e sedimentares inseridos no segmento sul da Província Mantiqueira e são limitados por evidentes lineamentos de direção NE-SW e NW-SE. Estes lineamentos segmentam o escudo cristalino gaúcho em três ou quatro domínios, sendo consensual a compartimentação nos quatro seguintes domínios:

- O **Domínio Tectônico Pelotas** corresponde a um terreno granítico-gnáissico deformado durante o Evento Dom Feliciano. O principal pico tectono-metamórfico aponta para uma idade entre 625 Ma e 610 Ma, correspondente ao Complexo Granítico-Gnáissico Pinheiro Machado.

- O **Domínio Tectônico Encruzilhada** se compartimenta em um corredor entre o Domínio São Gabriel à oeste e o Domínio Pelotas à leste. Trata-se de rochas supracrustais metamorfizadas da fácies xisto-verde à fácies anfibolito compondo o Complexo Metamórfico Porongos, rochas supracrustais pelito-carbonáticas e ortognaisses metamorfizadas nas fácies anfibolito superior a granulito perfazendo o Complexo Metamórfico Várzea do Capivarita, e finalmente exposições de rochas gnáissicas do proterozóico inferior.

- O **Domínio Tectônico São Gabriel** é composto por gnaisses tonalíticos a granodioríticos, rochas vulcanossedimentares metamorfizadas que abrangem da fácies xisto-verde à fácies anfibolito, unidades ultramáficas a máficas, granitos deformados com foliação característica devido ao Evento São Gabriel ocorrido entre 700 Ma e 750 Ma.

- O **Domínio Tectônico Taquarembó**, situado na porção ocidental do Escudo Sul-Riograndense, é formado por remanescentes de crosta pretérita e representado pelo Complexo Granulítico Santa Maria Chico, este constituído por gnaisses quartzo-feldspáticos, gnaisses máficos, ultramáficos e rochas supracrustais, metamorfizados na fácies granulito e anfibolito. Este

domínio é intrudido por granitos brasileiros e recoberto parcialmente por rochas vulcanossedimentares da cobertura molássica ou Bacia do Camaquã.

O Carbonatito Três Estradas se situa na porção central do Domínio Taquarembó enquanto o Carbonatito Joca Tavares está situado na seção adjacente a leste do primeiro, no Domínio São Gabriel, que engloba complexos metamórficos vulcanossedimentares, máfico-ultramáficos e gnássicos do criogeniano. Localizadamente o Carbonatito Joca Tavares está posicionado entre a Formação Arroio Marmeleiro e o Grupo Cerro do Bugio do Eodiacariano, que consiste em rochas sedimentares e é pertencente à Bacia do Camaquã (vulcano-sedimentar do ediacariano-cambriano). A Formação Arroio Marmeleiro tem idade criogeniana e é constituída de metassedimentos.

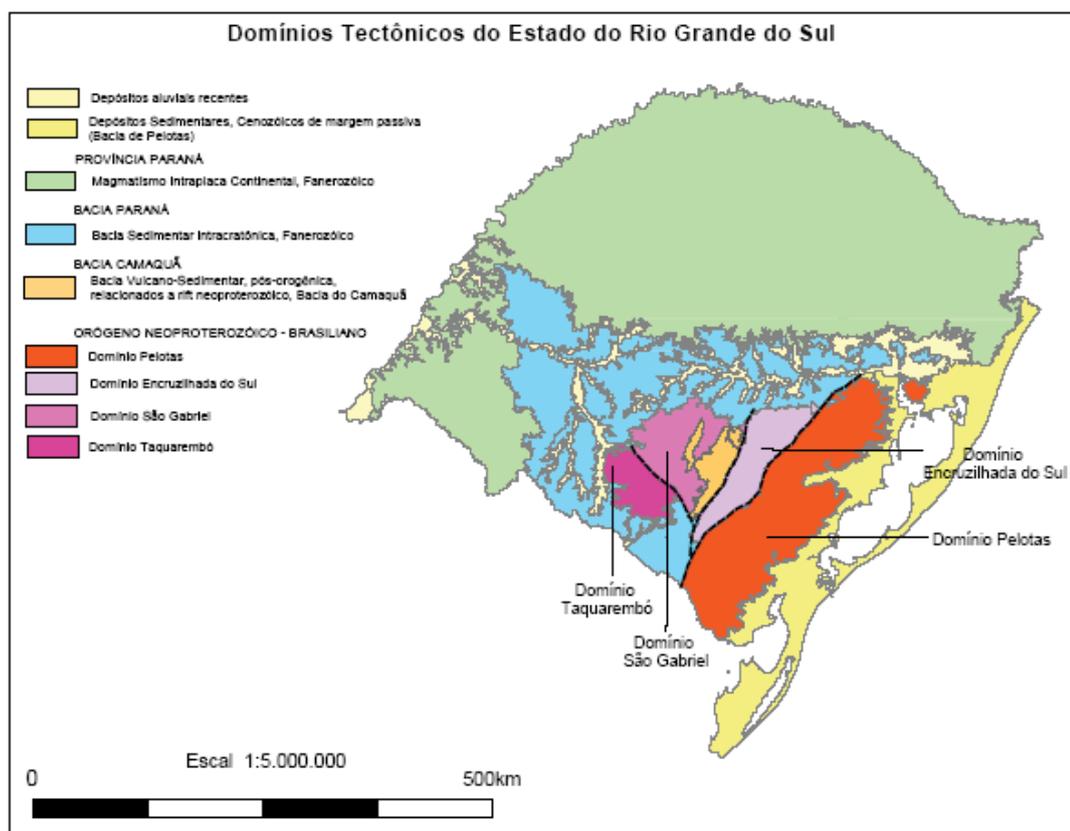


Figura 26 - Mapa exibindo os domínios tectônicos do Rio Grande do Sul.. Extraído de CPRM (2007).

4.3. Fisiografia

O conhecimento fisiográfico aqui contido basea-se nos trabalhos de Fortes (1956) e Fortes (1959). O Rio Grande do Sul é formalmente organizado em áreas com padrão e homogeneidade de relevo, solo e vegetação formando subdivisões territoriais denominadas **unidades fisiográficas**. São elas: Litoral, Depressão Central, Missões, Campanha, Serra do Sudeste, Encosta do Sudeste, Alto Uruguai, Campos de Cima da Serra, Planalto Médio, Encosta Inferior do Nordeste e Encosta Superior do Nordeste. Dadas suas características de relevo e posicionamento geográfico a Área do Projeto encontra-se na subdivisão fisiográfica da Serra do Sudeste e marginal à Campanha.

A unidade fisiográfica da Serra do Sudeste refere-se geologicamente ao Escudo Sul-Rio-Grandense, formando um triângulo entre Porto Alegre, Jaguarão e São Gabriel. A região é geologicamente muito antiga, com um mosaico de inúmeras formações geológicas predominando as formações graníticas e magmáticas e metamórficas. O relevo apresenta-se em formas arredondadas, sendo mais acidentado para o norte e suave na direção leste. A altitude varia entre 20 a 200 metros nas bordas, até 400 a 600 metros nos cerros. Há campos limpos nas coxilhas e altos das serras, e campos sujos nas partes planas e úmidas, estando em conexão com vassourais. As formações florestais também variam. Ocorrem desde matas de galerias até matas latifoliadas subtropicais extensas. Ocorrem também capões e matas pequenas ao longo dos arroios e encostas das coxilhas, e pequenos pinhais nativos na região de Caçapava do Sul, Encruzilhada do Sul e Piratini. Foi neste contexto fisiográfico que encontram-se os carbonatitos do projeto.

Enquanto a Serra do Sudeste apresenta um relevo complexo, a unidade fisiográfica da Campanha caracteriza-se geologicamente por derrames basálticos, afloramentos areníticos e grandes aluviões nas planícies fluviais. As principais cidades que compõem esta região são Bagé, Dom Pedrito, Rosário do Sul, São Gabriel, Alegrete, Quaraí e Uruguaiana. O relevo é suave e geralmente entre 60 a 120 metros, ultrapassando 300 metros em coxilhas suaves. A topografia é relativamente monótona sendo

raramente interrompida por tabuleiros. Os limites desta unidade fisiográfica constituem-se nos vales dos rios Uruguai e Ibicuí e nas coxilhas Pau Fincado e Santa Catarina. O clima da região já demonstra certas tendências para a continentalidade, sendo perto do Rio Uruguai a parte mais quente do Estado e com precipitações em torno de 1.400 mm, além do problema bem documentado da seca na região de Bagé. Na vegetação predomina a formação de campo, às vezes formando vassourais. Ao longo dos cursos de água há mata-galeria pobre, de aspecto arbustivo, e matas latifoliadas ao longo dos grandes rios e nos pés dos tabuleiros ainda com esporádicos capões no meio dos campos.

4.4. Domínio Morfoestrutural

Do projeto Radambrasil (1986) responsável pelo levantamento dos recursos naturais do Brasil nas décadas de 70 e 80, foram obtidas diversas informações, que se encontram no Volume XXXIII, intitulado *Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguiana e SI.22 Lagoa Mirim*, do levantamento referente aos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina por uma área de ca. 271.070 km². A classificação desse projeto baseia-se na definição de domínios morfoestruturais aproximadamente correspondentes a províncias geológicas.

Cabe ao **domínio morfoestrutural** uma ampla área na qual se encontra diferenciações geomorfológicas internas, nas quais os arranjos de relevo estão especialmente ligados aos fatores climáticos atuantes ou pretéritos. O domínio morfoestrutural se divide hierarquicamente em **regiões geomorfológicas**, caracterizadas por uma compartimentação muitas vezes correlacionável interdisciplinarmente com aspectos ecológicos e pedológicos. As regiões geomorfológicas por sua vez podem diferir internamente em aspectos sutis compartimentando-se em áreas menores chamadas **unidades geomorfológicas**.

A área do projeto está situada no Domínio Morfoestrutural do Embasamento em Estilos Complexos, na Região Geomorfológica do Planalto Sul-Rio-Grandense, correspondente ao domínio geológico Escudo

Sul-Rio-Grandense, em áreas dos Planaltos Residuais Canguçu–Caçapava do Sul e do Planalto Rebaixado Marginal.

O Planalto Rebaixado Marginal ocupa a maior parte da área. É uma superfície dissecada posicionada altimetricamente entre 100 e 200 m, onde ocorrem vastas áreas com superfícies quase planas, com pequenas variações altimétricas. Está caracterizado por um relevo de coxilhas baixas com vales amplos, que isolam relevos elevados dos Planaltos Residuais Canguçu – Caçapava do Sul. O contato do Planalto Rebaixado Marginal com os relevos dos Planaltos Residuais Canguçu – Caçapava do Sul faz-se, em muitos trechos, por meio de escarpas e de ressaltos topográficos. De um modo geral, os rios que drenam o Planalto Rebaixado Marginal encontram-se encaixados, adaptados a linhas de fraturas, a contatos litológicos, ou a zonas de cisalhamento, o que originam vales ou sulcos estruturais bem marcados. Os solos da região são predominantemente podzólicos vermelho-amarelos distróficos e litólicos, geralmente rasos.

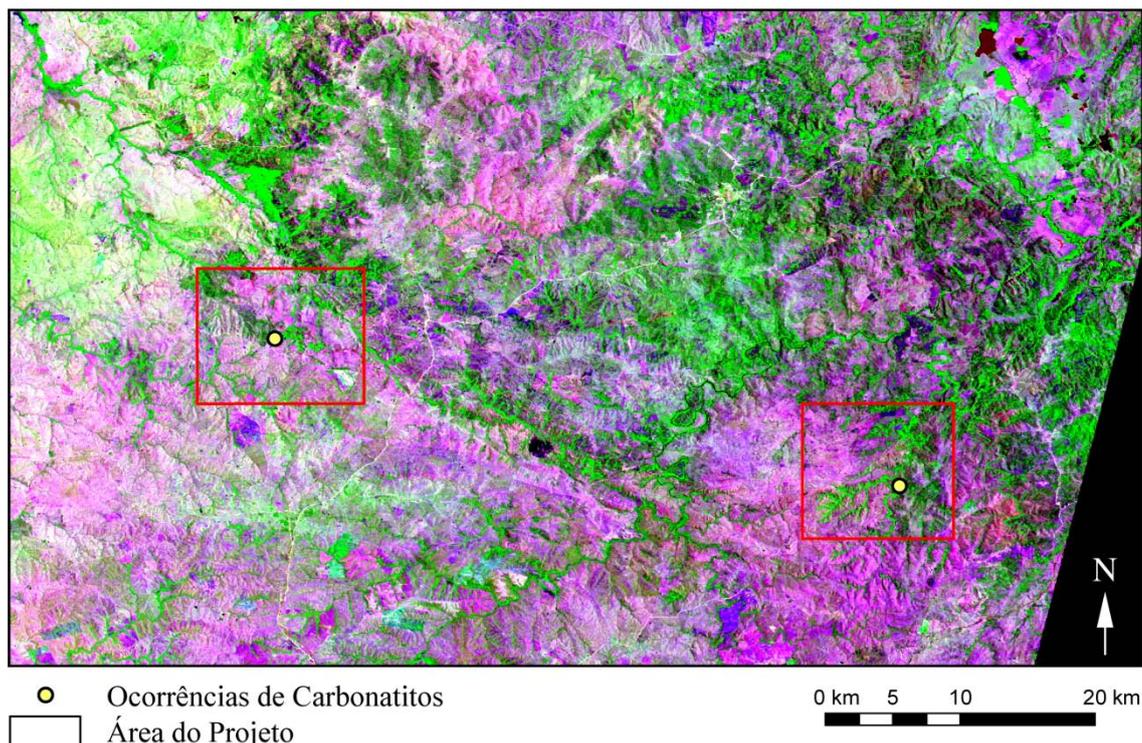
O Platô do Taquarembó e o Granito Jaguari, inserido na Área do Projeto, formam altos topográficos. A área rural denominada Coxilha do Tabuleiro trata-se morfologicamente de coxilhas e vales escavados no Granito Jaguari. Os vales do Rio Jaguari, Arroio Ingazeiro, Arroio Marmeleiro e Sanga da Cachoeira alinham-se formando uma feição geomorfológica de baixa altitude com a geometria de uma faixa alongada e com a gênese relacionada ao abatimento do terreno, posicionando-o em cotas inferiores a terrenos circunvizinhos de idades mais antigas. Estas drenagens mencionadas estão confinadas neste terreno de baixa altitude. A feição de um bloco praticamente retangular ou lenticular quando visto em planta, com largura aproximadamente constante e comprimento muito maior que a largura, é uma manifestação da zona de cisalhamento denominada Falha Suspiro-Linhares ou Lineamento de Ibaré na paisagem.

5. Análise Morfoestrutural

5.1. Teledeteccção: Imagens de Satélite

A partir das imagens obtidas através do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) foram geradas composições que permitiram o reconhecimento de feições estruturais. Para uma visualização geral da Área do Projeto, contextualizando as principais feições e aspectos regionais em uma mesma figura, foram utilizadas imagens LANDSAT 5 como a que consta na Figura 27. Dentre as imagens disponíveis, foi selecionada do acervo disponibilizado pelo INPE a imagem de código TM-19860122-223-082. Diferentes composições de bandas foram testadas, sendo escolhida a composição RGB-347 visto que esta salientou de forma mais evidente os lineamentos, meta principal deste procedimento.

A imagem obtida foi georreferenciada por aproximadamente 100 pontos sobre a malha viária e hidrográfica no *datum* padrão SIRGAS 2000 e desta extraída somente a janela referente à Área do Projeto. A partir de características texturais e das composições coloridas geradas fez-se algumas observações geológicas para este trabalho. As tonalidades de verde escuro observadas na parte superior da figura, a partir da parte central, situam-se preferencialmente no Bloco São Gabriel. Já a grande superfície em tons claros de lilás e verde situa-se preferencialmente no Bloco Taquarembó.



Imageamento LANDSAT 5 - Arquivo: Código TM-19860122-223-082

Composição RGB:

■ Red: Banda 3 ■ Green: Banda 4 ■ Blue: Banda 7

Figura 27 - Composição RGB-347 de imagem LANDSAT 5 para a Área do Projeto (Ano ou época de obtenção da imagem pelo satélite?).

Utilizando a imagem de satélite, foi feita uma interpretação voltada para o reconhecimento de lineamentos, tendo como principal critério feições tonais, diferenças colorimétricas e descontinuidades texturais no terreno. O resultado final pode ser visto na figura a seguir, onde constam os lineamentos mais evidentes traçados na imagem de satélite relacionados a falhas conhecidas. As falhas consultadas na bibliografia com nomenclatura formal, principalmente extraídas do trabalho de Carraro (2004), que estipula controles estruturais da mineralização no Escudo Sul-Rio-Grandense via produtos de sensoriamento remoto, e da síntese de Ribeiro (1978), que reúne o arcabouço de falhas conhecidas da época de sua elaboração, estão relacionadas aos lineamentos interpretados, numerados de 1 a 11 sobre a imagem de satélite na Figura 28.

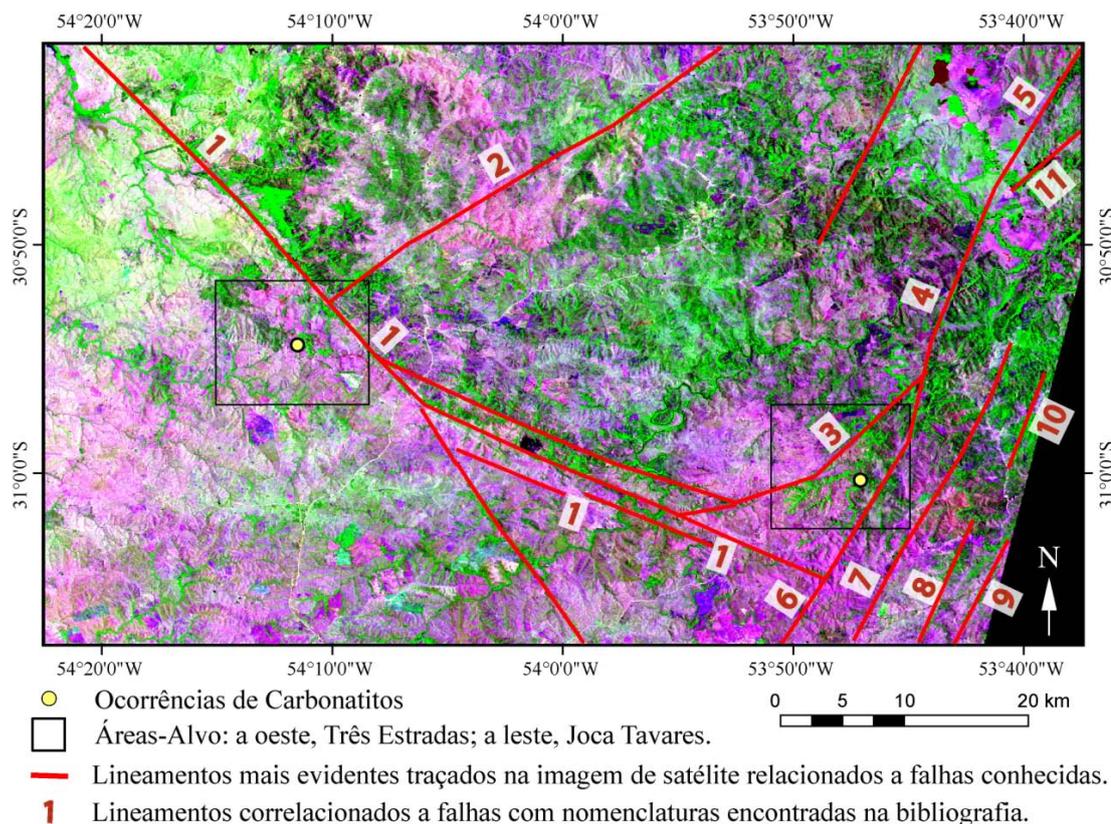


Figura 28 – Lineamentos traçados na composição RGB 347 de imagem LANDSAT 5 para a Área do Projeto.

Nota-se nesta composição que a estrutura de escala regional melhor demarcada é o Lineamento de Ibaré. Este lineamento foi traçado e numerado na imagem de satélite como **Lineamento 1**, corta a imagem a partir do extremo do quadrante noroeste (canto superior esquerdo) e se desmembra em falhas menos pronunciadas na porção central e sul da imagem. O Lineamento de Ibaré destaca-se como sendo uma feição estrutural de direção N50°W e com extensão de cerca de 60 km, denominado formalmente de Falha Suspiro-Linhares (Ribeiro *et al.*, 1966), como consta em Luzardo & Fernandes (1990). Trata-se de uma zona de cisalhamento dúctil transcorrente com provável movimentação levógira e milonitização, exemplificada pelos filitos de Ibaré. No entanto, não há uma definição geográfica clara da terminação do Lineamento de Ibaré para o sul. Este lineamento pode ser enquadrado no sistema de falhas proposto por Picada (1971) constituído por falhas de direções N65W a N75W (Azimutes 295° a 285°) e denominado Sistema de Falhas Noroeste. O Lineamento de

Ibaré possui segundo Leinz *et al.* (1941) em suas imediações rochas metamorfasadas em fácies xisto verde, zona da clorita, incluindo rochas que teriam feito parte de uma cobertura sedimentar brasileira, deformada e metamorfasada numa zona de cisalhamento de transcorrência sob regime dúctil. Esta cobertura sedimentar está correlacionada ao Grupo Maricá mapeado pela UFRGS (1987) na área cortada pelo Lineamento de Ibaré. Ainda segundo Luzardo & Fernandes (1990) são afetadas por esta zona de cisalhamento desde rochas transamazônicas do Complexo Granulítico Santa Maria Chico até unidades sedimentares pertencentes à Bacia do Paraná, abordadas no trabalho de Frasca & Lisboa (1993).

O **Lineamento 2** trata-se da Falha Cerro dos Cabritos. Esta falha é responsável por longos deslocamentos transcorrentes sinistrais, evidenciado no Granito Jaguarí em diversos mapas como em Iglesias (2000), DNPM (1989), entre outros. A Falha Cerro dos Cabritos não afetou as sequências de sedimentação da Bacia do Paraná em sua terminação sudoeste (unidades estratigráficas Grupo Itararé e Grupo Guatá).

O **Lineamento 3** é um segmento da Falha do Graciano. Esta falha é representada na Área-Alvo Joca Tavares como sendo uma importante quebra de relevo responsável pela separação de litologias muito distintas. A noroeste as litologias predominantes são diversas unidades sedimentares das formações Hilário, Passo da Promessa, São Rafael e Arroio América, ainda sem detalhe de mapeamento, enquanto a sudeste estão unidades metassedimentares que fazem parte da Formação Arroio Marmeleiro, a unidade mais antiga a aflorar na Área-Alvo Joca Tavares.

O **Lineamento 4** tem sua nomenclatura controversa, se enquadrando em ao menos três possibilidades. A primeira é de que se trate de um prolongamento sul da Falha do Segredo parcialmente encoberto por sedimentos do Quaternário. A segunda é de que seja uma falha que se bifurca nos lineamentos 3 e 6 ou uma junção de ambas de acordo com o critério que seja adotado. A terceira é de que este lineamento seria a continuidade do Lineamento 6 sem distinção entre ambos, adotando-se o critério de que o Lineamento 3 está em um ângulo muito pouco satisfatório para ser interpretado como continuidade deste Lineamento 4. O **Lineamento**

5 deve estar relacionado com a Falha do Segredo, embora seu traçado nesta imagem de satélite o faça cortar ou se prolongar sobre faixas de outras duas falhas, a saber Falha Andradas e Falha Santa Bárbara.

O **Lineamento 6** coincide parcialmente em seu segmento norte com a Falha Cerro Alegre, formando uma cunha no ponto onde esta intersecciona a Falha do Graciano e se unem no que deve ser o prolongamento sul da Falha do Segredo designado pelo Lineamento 4.

O **Lineamento 7** é parcialmente coincidente com a Falha Passo dos Enforcados e pode fazer parte de um grupo de falhas em comum que inclui os lineamentos 6 a 9, tal qual um sistema de falhas. Estes lineamentos estão todos paralelos no traçado da imagem de satélite, ainda possivelmente incluindo o Lineamento 10 por estar concordante e por constituir praticamente um prolongamento do Lineamento 8. Assim, desta forma, os lineamentos paralelos entre si, a partir do lineamento 6, de oeste para leste são: Lineamento 7; **Lineamento 8**, sendo que este é coincidente com a Falha Lixiguana; e o **Lineamento 9** que é coincidente com a Falha Catarina.

O **Lineamento 10** não possui nomenclatura formal, embora de acordo com mapas da bibliografia certas falhas estejam presentes no local, possuindo a mesma orientação deste lineamento traçado. Assim é possível que este seja uma extensão da Falha Lopes, situada ao nordeste do Lineamento 10, ou ainda uma extensão da Falha Lixiguana, situada ao sudoeste e traçada como sendo o Lineamento 8.

O **Lineamento 11** cobre parte da linha da Falha Rincão dos Mouras, embora conforme mapas da bibliografia a continuidade desta falha seja controversa para o sudoeste, se bifurcando ou entrecruzando com outras falhas locais sem nomenclatura, justamente onde o Lineamento 11 está traçado.

Após a identificação destes lineamentos mais evidentes correspondente a falhamentos conhecidos foi proposta uma compartimentação preliminar da Área do Projeto que pode ser vista na Figura 29. As áreas em tons verdes (1 a 4), no centro e norte do mapa, são compartimentos pertencentes ao Bloco São Gabriel enquanto as áreas em tons azuis (5 e 6), no sul e oeste do mapa, são compartimentos pertencentes

ao Bloco Taquarembó. A superfície a oeste (7) foi separada como um compartimento da Bacia do Camaquã.

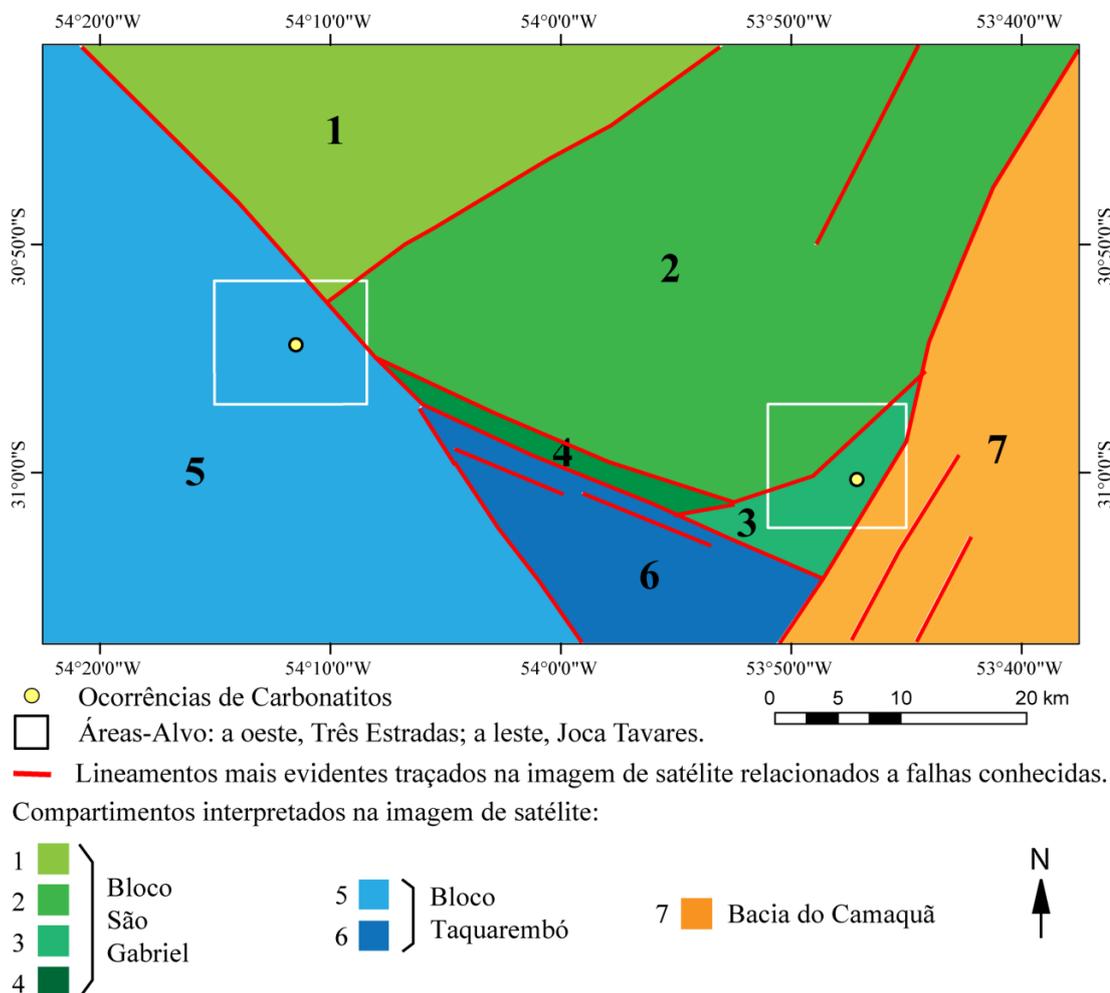


Figura 29 - Compartimentação da Área do Projeto de acordo com os lineamentos mais evidentes e sua correlação com os blocos tectônicos usuais para o Rio Grande do Sul. Os compartimentos foram numerados de 1 a 7 e agrupados de acordo com a divisão tectônica convencional para o Escudo Sul-Rio-Grandense.

Foram recortadas as duas áreas-alvo a partir da composição de imagens de satélite em RGB 347 da Área do Projeto, sendo a Figura 30 referente à Área-Alvo Joca Tavares e a Figura 31 referente à Área-Alvo Três Estradas. A resolução dos dados visuais pode ser notada nas imagens e o prosseguimento do trabalho interpretativo em escala de áreas-alvo deu-se a partir das fotografias aéreas. Dentre as observações feitas acerca dos aspectos visuais através das imagens de satélite em ambas áreas-alvo é a

constatação de que as ocorrências de carbonatito localizam-se preferencialmente em áreas limítrofes entre a vegetação caracterizada pelo verde claro e a vegetação caracterizada pelo verde escuro.

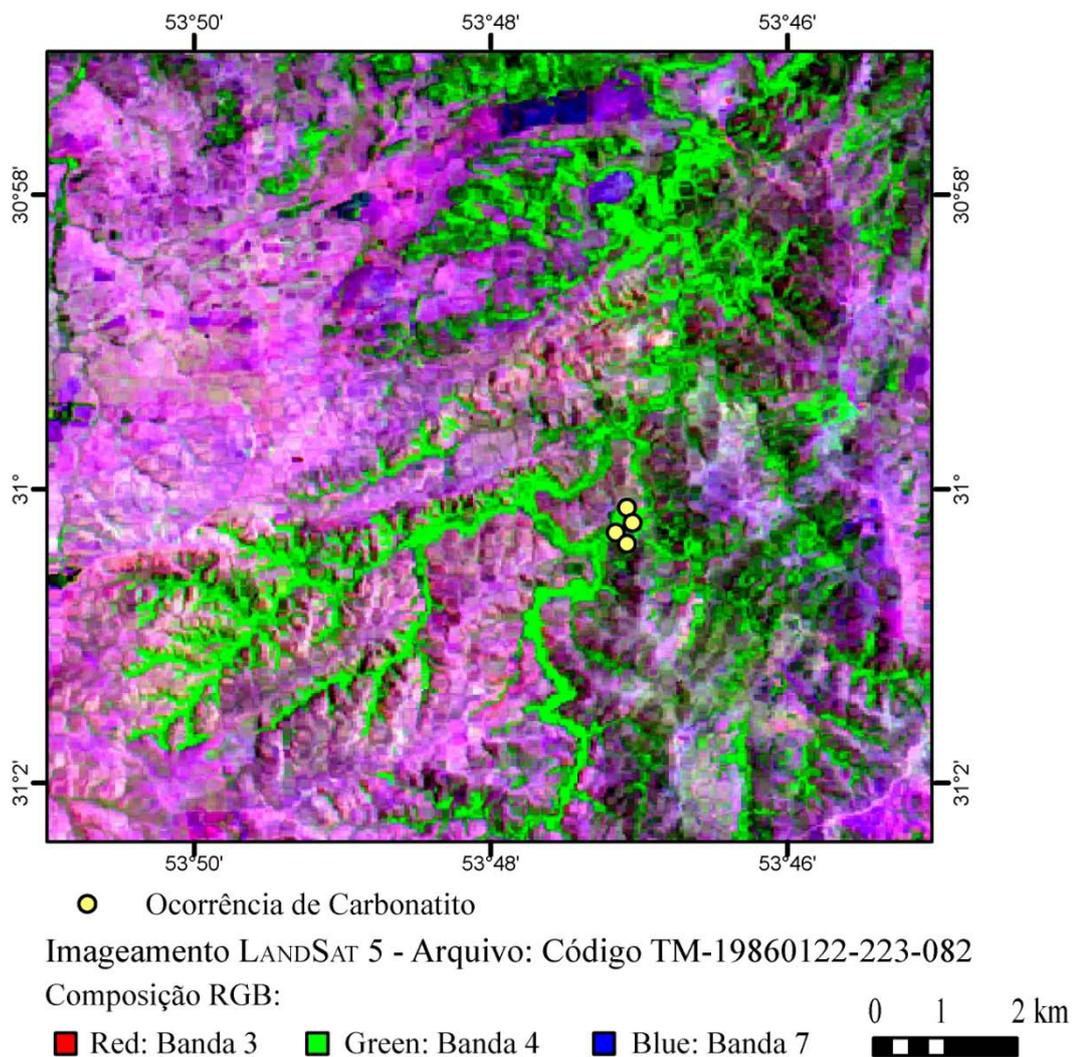


Figura 30 - Imagem LANDSAT 5 da Área-Alvo Joca Tavares.

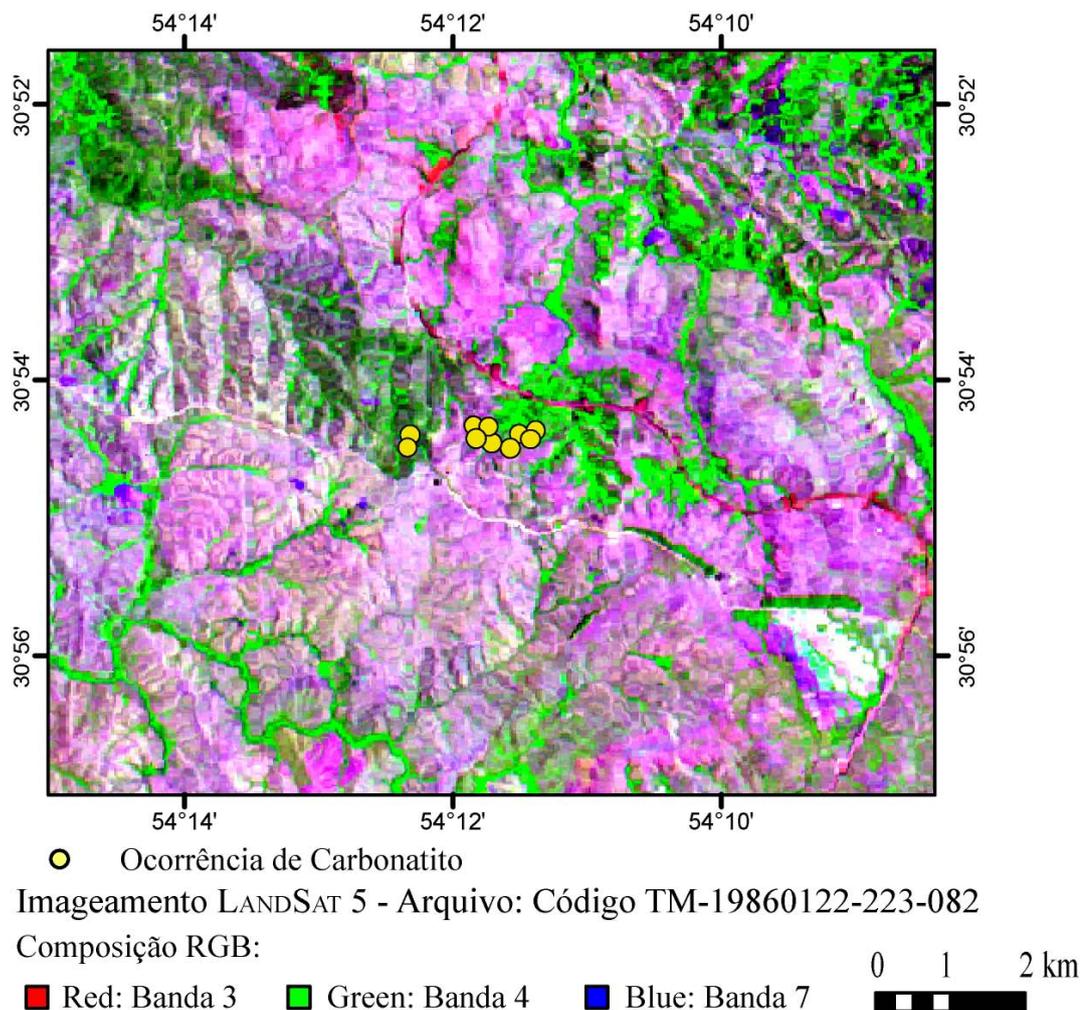


Figura 31 - Imagem LANDSAT 5 da Área-Alvo Três Estradas.

5.2. Aerofotogeologia

Para esta etapa, foi importante a revisão e adoção de certa terminologia e de certos conceitos. A sistemática da fotointerpretação e análise morfoestrutural seguida neste trabalho é a apresentada por Soares *et al.* (1981, 1982), onde foram estabelecidos conceitos para alguns termos fotogeológicos que mesmo usuais não dispensam sua devida menção, e que juntamente com o trabalho de O'Leary *et al.* (1976) contem os conceitos adotados neste trabalho e apresentados no texto abaixo.

A **análise morfoestrutural** parte dos estudos desenvolvidos para a interpretação geológica de fotografias aéreas e imagens de satélite, inicialmente estabelecido por Guy (1966), foi adaptada para as condições brasileiras por Rivereau (1972) e Soares & Fiori (1976). A análise está

baseada no princípio de que o relevo e a drenagem tendem a desenvolver padrões específicos, em função de fatores litológicos e estruturais. O desenvolvimento desses padrões específicos de relevo e drenagem pressupõe reflexo de estruturas geológicas profundas e tais reflexos são passíveis de identificação através de produtos de sensoriamento remoto. Assim, a sistemática parte da interpretação dos elementos de drenagem e relevo e suas relações espaciais, onde as morfoestruturas surgem como formas anômalas dentro da tendência regional, representando deformações nos maciços rochosos.

O termo **morfoestrutura** é aplicado à definição de uma estrutura presumida, identificada a partir da análise e interpretação de informações de drenagem e relevo. As morfoestruturas são formadas por altos estruturais e baixos estruturais, sendo os primeiros conhecidos como domos e os segundos como depressões.

As **formas de assimetria** fornecem indicações de mergulho convergentes ou divergentes do acamamento, definindo altos e baixos estruturais interpretados como morfoestruturas. As formas de assimetria são identificadas a partir dos elementos de drenagem e de relevo. Os canais de drenagem tendem a se estabelecer de acordo com a disposição das atitudes das camadas que formam o substrato, sendo que os canais mais alongados, subparalelos e de baixa angularidade, que correm concordantes com o sentido das camadas denominados de consequentes, enquanto os canais mais curtos e com ângulos abertos correm em sentido perpendicular ao acamamento (obsequentes).

As **formas anelares** representam o reflexo na superfície de camadas flexuradas, geralmente se estabelecem sobre estruturas dômicas ou depressões estruturais, concordantes com o acamamento ou com o fraturamento anelar.

As **formas radiais** podem ser o reflexo do controle estrutural e indicam o sentido geral do mergulho das camadas, mas podem ser de expressão puramente topográfica (divergência de elementos de drenagem a partir de um ponto mais alto). Assim, recomenda-se que essas formas sempre sejam

analisadas em conjunto com as formas de assimetria, para a precisa constatação dos altos e baixos estruturais.

Os **lineamentos**, termo utilizado originalmente por Hobbs (1912), são ainda conceitualmente definidos por Etchebehere *et al.* (2007) como sendo "feições lineares topográficas ou tonais observáveis nas imagens fotográficas, que podem representar descontinuidades estruturais". Segundo Veneziani (1987) é necessária a distinção entre lineamentos estruturais e falhamentos na interpretação de produtos de sensoriamento remoto, devido a dois principais fatores. O primeiro fator estabelece que os lineamentos não se restringem a apenas um tipo de movimento tectônico ao longo de toda sua extensão ou durante o decorrer dos diferentes ciclos ou fases tectônicas que afetaram uma determinada área. O segundo fator é o pressuposto de que uma zona de falha pode dar origem a vários lineamentos paralelos a subparalelos, ou vice-versa, ou seja, várias fraturas associadas a uma zona de falha podem dar origem a apenas um lineamento distinguível nos produtos de sensoriamento remoto. Neste trabalho optou-se pela utilização do verbete **fotolineamentos** quando aplicado a lineamentos remotamente identificados em superfícies bidimensionais (imagens em geral sem profundidade/perspectiva) ou tridimensionais (composições tais quais anaglifos que requerem dispositivos próprios para a visualização de profundidade/perspectiva) resultante em produtos de apenas duas dimensões plotadas em planos bidimensionais. O termo fotolineamento é largamente utilizado na literatura geológica em diversos trabalhos. No presente trabalho se utiliza esse termo de forma ampla a exemplo de Martínez (2007) que justifica a utilização sumária de "fotolineamentos" como a terminologia específica para descrever a coleção de feições de caráter linear, retilíneas ou levemente curvas que estejam associadas a formas de relevo e drenagem, sem distingui-las em relação a tamanho ou orientação desde que observáveis em imagens de satélite. O presente trabalho também aplica o termo fotolineamentos aos obtidos em fotografias aéreas, não somente aos de imagens de satélite. A utilização da análise estrutural preliminar através de fotolineamentos tem sido largamente utilizada em trabalhos geológicos, aplicada à prospecção mineral em áreas fraturadas

(Riccomini & Crósta, 1988), prospecção petrolífera (TAYLOR, 1988), prospecção hidrogeológica (Siqueira *et al.* 2002) além de estudos de sítios sem caráter prospectivo como realizado por Moreto & Carneiro (2006). Aqui também se utiliza o termo comprimento ao invés de tamanho para se referir à dimensão mensurável pela qual se estende um lineamento nas imagens. Os fotolineamentos foram feitos com a preocupação de se evitar interferências de extensões ou continuidades no terreno, limitando-se, o mais fielmente possível, ao aspecto factual observado nas imagens de sensores remotos conforme recomendado por diversos autores como Liu (1984), Walsh *et al.* (1998) e Taylor (1988). Outras fontes bibliográficas como O'Leary *et al.* (1976) ainda utilizam o termo **lineamento estrutural** para definir uma feição linear mapeável, simples ou composta, contínua ou descontínua, da superfície terrestre, portanto natural, a qual seus segmentos estão alinhadas em um arranjo retilíneo ou suavemente curvo e que difere distintamente dos padrões e feições que lhes são adjacentes e, presumivelmente, reflete um fenômeno de subsuperfície. Os lineamentos estruturais são interpretados como descontinuidades da crosta que podem representar discordâncias estratigráficas e ou estruturais e geralmente representam os falhamentos de determinada área.

Por sua vez o **falhamento** se refere ao evento do rompimento de uma formação rochosa com deslizamento paralelo a fratura (Press *et al.* 2006). Esse falhamento é ocasionado por forças tectônicas, sendo que a **falha** pode ser aqui considerada como sinônimo ou como a descrição de sua feição resultante.

O **domínio morfoestrutural** e a **unidade geomorfológica** já foram conceituados no capítulo 4 no subcapítulo de fisiografia. Um termo adotado para denominar os compartimentos que foram distinguidos dentro das áreas-alvo formado por padrões de fotolineamentos é o **bloco morfoestrutural**. Esta terminologia é provisória e somente é adotado para diferenciar o produto da compartimentação feita a partir da análise estrutural em relação ao produto da compartimentação feita a partir da análise textural, sendo que esta metodologia de diferenciação e comparação dos dois produtos não é

convencional, o primeiro produto não possui nomenclatura própria e o segundo produto chama-se unidade geomorfológica.

5.2.2. Aerofotointerpretação da Área-Alvo Joca Tavares

Pela fotointerpretação da Área-Alvo Joca Tavares através dos anaglifos foram diferenciadas 4 unidades geomorfológicas visíveis na Figura 32.

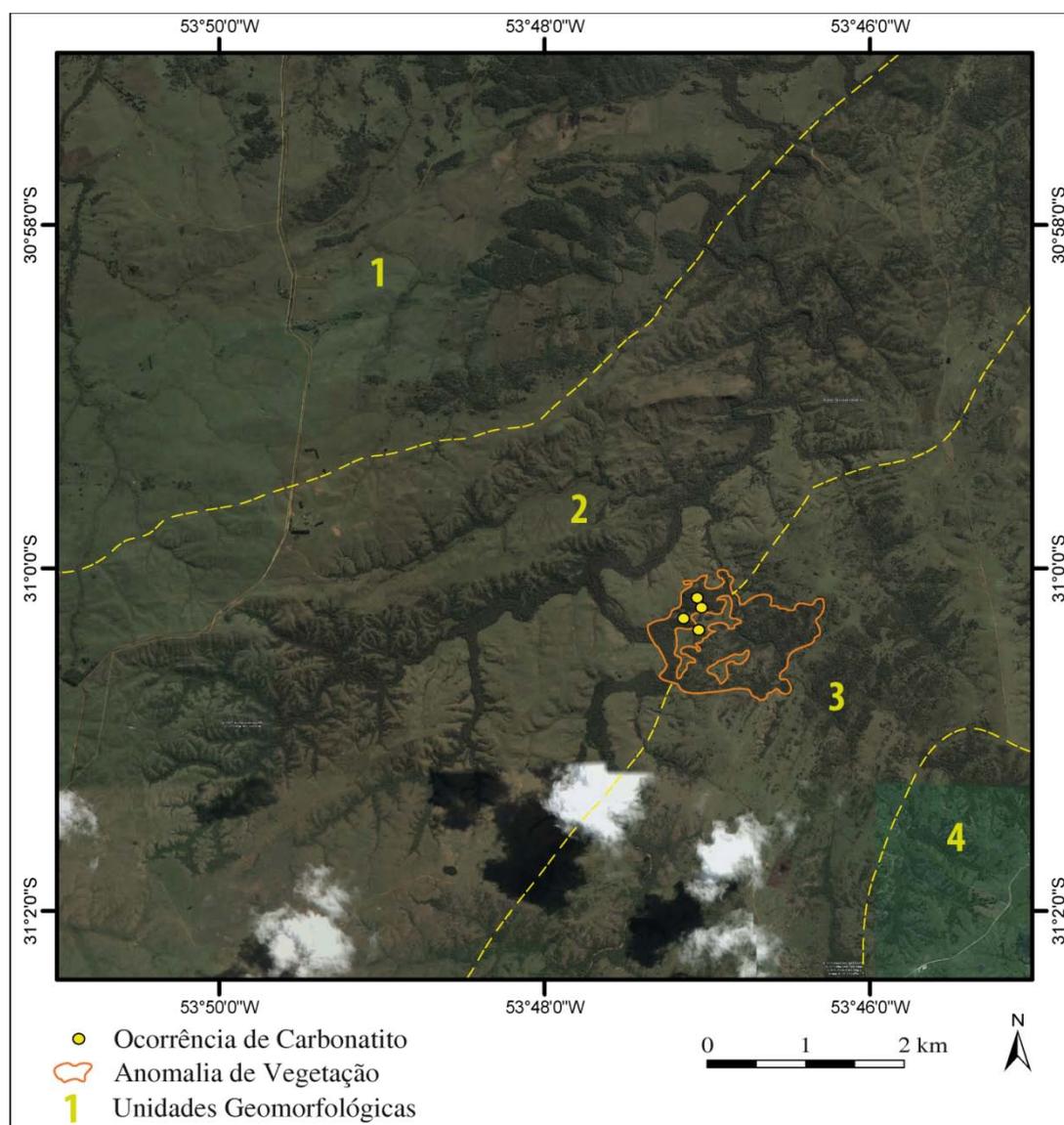


Figura 32 - Anomalia de vegetação na Área-Alvo Joca Tavares identificada por fotointerpretação, nesta ilustração os limites de unidades geomorfológicas estão plotados sobre a imagem Google Earth para uma melhor visualização.

Estas 4 unidades geomorfológicas estão dispostas como faixas sub-paralelas entre si e com orientação nordeste, o que de certa forma pode ser reflexo de sistemas de falhas dominante para esta direção. Os limites entre as unidades geomorfológicas 1 e 2 é muito bem demarcado por uma forte quebra de relevo identificada por um lineamento tonal na porção oeste deste limite e por drenagens e mata na porção nordeste deste limite, que separa dois patamares topográficos distintos.

A **unidade geomorfológica 1** tem o relevo mais suave e situa-se em cotas baixas, vegetação pouco desenvolvida, inclusive com pouca mata galeria mesmo onde correm as drenagens, ficando estas a descoberto. Apresenta baixa densidade de drenagem e uma superfície praticamente plana, porém em certas áreas isoladas de dimensões reduzidas a no máximo 4 km² o relevo eleva-se, a vegetação é muito mais desenvolvida e ocorre mata galeria protegendo as drenagens nessas porções. Essas pequenas áreas de relevo mais pronunciado e vegetação bem desenvolvida correspondem a vulcânicas e conglomerados da Formação Hilário do Grupo Bom Jardim que afloram na região. As demais áreas planas da unidade geomorfológica 1 reúnem unidades vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã incluindo siliclásticas do Grupo Maricá como a Formação Arroio América, a Formação São Rafael e a Formação Passo da Promessa.

A **unidade geomorfológica 2** situa-se em cotas mais altas que a unidade anterior, tendo cotas baixas somente nas áreas cortadas pelos rios, além de possuir relevo acidentado. Isso já pode ser notado na alta concentração de fotolineamentos traçados nessa unidade enquanto poucos foram traçados na unidade geomorfológica 1, o que deve-se a maior quantidade de vales e cristas visíveis ou ressaltados neste relevo. A unidade geomorfológica 2 apresenta a maior densidade de drenagem dentre as demais unidades geomorfológicas desta área-alvo, a maior quantidade de fotolineamentos traçados e a maior área em superfície. Seu contato noroeste é facilmente identificado enquanto o contato sudeste com a unidade geomorfológica 3 é mais irregular. Esta unidade geomorfológica designa em superfície a unidade geológica metassedimentar da Formação Arroio

Marmeleiro, que constitui-se de metapelitos, metarenitos e quartzitos, metamorfizados no fácies xisto verde.

A **unidade geomorfológica 3** situa-se em altitude maior que a unidade geomorfológica 2 e apresenta uma estruturação visível de fotolineamentos paralelos entre si que refletem rochas sedimentares acamadadas de forma aproximadamente regular e a atuação de falhas regionais. O mergulho relativo do acamamento sedimentar é para sudeste conforme interpretado através do anaglifo. Esta unidade geomorfológica está relacionada as unidades geológicas sedimentares Formação Santa Fé e Formação Pedra Pintada, do Grupo Cerro do Bugio e do Grupo Guaritas respectivamente. A Formação Santa Fé é uma unidade sedimentar de ambiente aluvial e deltaico, possui conglomerados fluviais ricos em clastos vulcânicos e plutônicos de composição ácida na sua base estratigráfica e grada verticalmente para arenito e ritmito. A Formação Pedra Pintada é uma unidade sedimentar de arenitos, secundariamente conglomerados e pelitos, de ambiente desértico com predominância de dunas eólicas.

A **unidade geomorfológica 4** posicionada no extremo do quadrante sudeste da área-alvo é uma exposição granítica, cuja provável ocorrência deve-se ao fato da cobertura sedimentar sotoposta a ele ter sido removida, tendo se posicionado ao lado das unidades da Bacia do Camaquã devido à ação das falhas locais. Esta unidade geomorfológica relaciona-se à porção granitóide exposta da unidade geológica Cambaí.

Os seguintes conjuntos de fotografias aéreas foram fotointerpretados de acordo com os anaglifos:

- Fotointerpretação 1:110.000 do par de fotos 02341-02342.
- Fotointerpretação 1:60.000 do par de fotos 14337-14338.
- Reinterpretação 1:110.000 do par de fotos 02341-02342.

A união dos 2 primeiros conjuntos de fotolineamentos acima resultou em uma composição de 481 linhas. A quebra de vértices, com a finalidade de separação de lineamentos curvilíneos em segmentos de reta distintos para computação dos dados, resultou na geração de 637 linhas. A intersecção com a janela da área-alvo removeu as linhas externas à Área-Alvo Joca Tavares e reduziu o número para 355 linhas contidas dentro da

poligonal e segmentos de linhas cortadas nas bordas desta janela. Das 355 linhas contidas, foram excluídas as sobrepostas umas às outras nas diferentes escalas de fotointerpretações e retraçadas linhas próximas, preservando sempre as linhas de maior extensão relacionadas a escala 1:110.000. Esse peneiramento das duplicatas de lineamentos dos diferentes conjuntos de fotointerpretações acima mencionados reduziu um pequeno número de linhas, e a isso foi adicionado mais um conjunto de lineamentos, a reinterpretção em escala 1:110.000 do par de fotos 02341-02342, realizado a partir dos dois conjuntos prévios. O produto final pode ser visto na Figura 33.

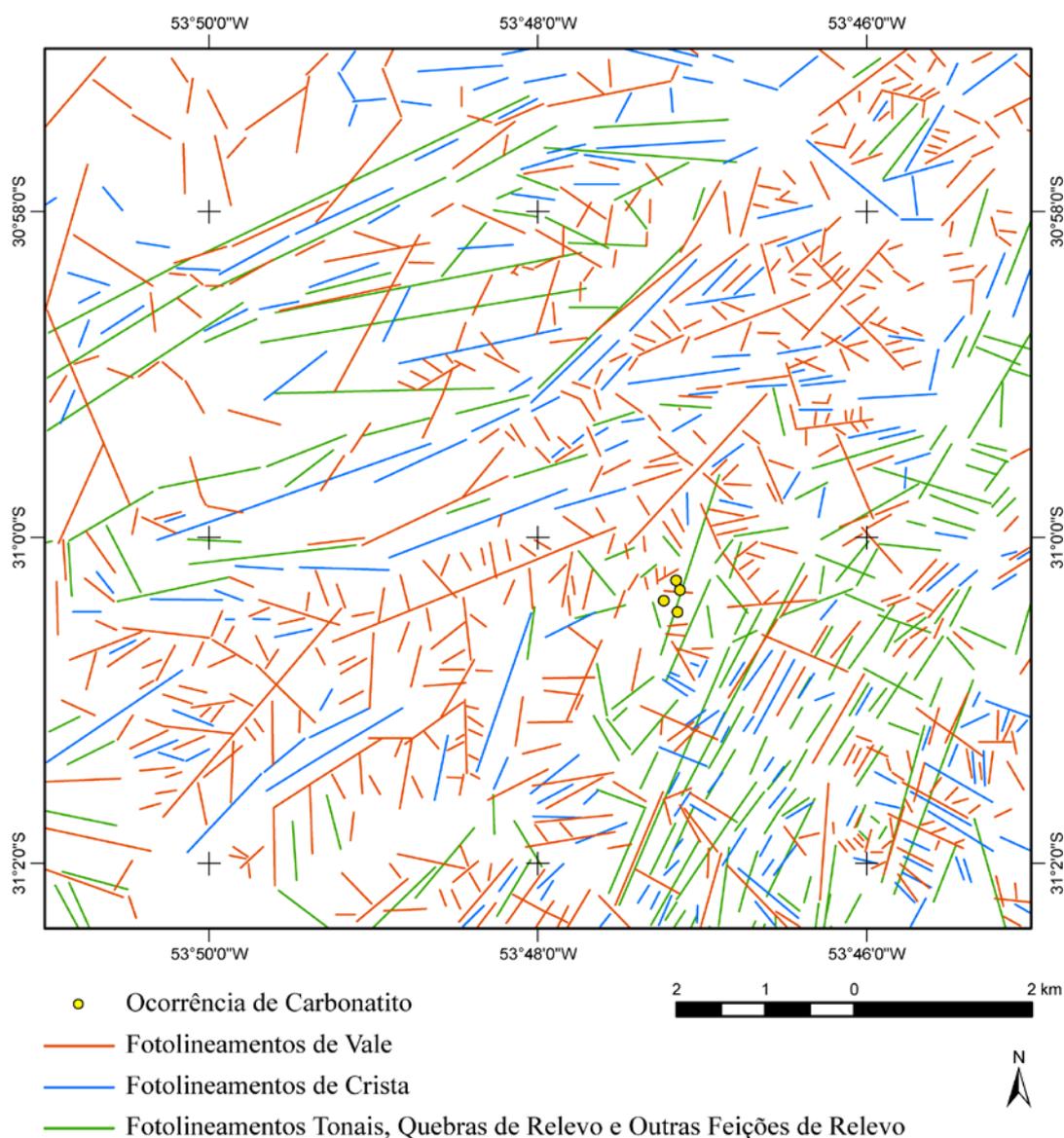


Figura 33 - Fotolineamentos traçados na Área-Alvo Joca Tavares.

Esse produto final visível na Figura 33 é resultado de uma composição de 932 linhas, das quais 629 tratam-se de fotolineamentos de vale, 188 tratam-se de lineamentos tonais, feições de relevo e quebras de relevo, e as 115 finais tratam-se de fotolineamentos de crista.

Dois tipos de gráficos foram gerados a partir do processamento de informações dos fotolineamentos, um tipo qualitativo e outro quantitativo. O quantitativo refere-se ao diagrama de roseta no qual os azimutes e a quantidade de medidas são as informações processadas, sendo definidas classes de azimutes e ressaltadas as classes com maior quantidade de fotolineamentos. Neste trabalho foram definidas classes de 5°, ou seja, setores do círculo de plotagem com 5°. Os gráficos qualitativos referem-se a gráficos polares de mensuração dos comprimentos dos fotolineamentos. Nos três diagramas de rosetas de orientações da Figura 34 é possível notar o comportamento preferencial dos fotolineamentos para o quadrante nordeste. O menos evidente trata-se do **diagrama de roseta A**, de fotolineamentos de vale, pois afora os fotolineamentos concentrados no azimute 060°, este diagrama de roseta exibe uma guirlanda de menor concentração e muito irregular presente em praticamente todo o círculo do diagrama, apenas evidentemente interrompida na faixa de azimutes leste-oeste do diagrama.

O **diagrama de roseta B**, referente aos fotolineamentos de crista, possui um caráter bimodal na distribuição das orientações de fotolineamentos, ambos os picos para nordeste-sudoeste. O primeiro pico situa-se no azimute 030° e indica os fotolineamentos de crista que predominam nas porções leste e sul da área-alvo. O segundo pico situa-se no azimute 060°, sendo relacionado aos fotolineamentos das porções norte, central e oeste desta área-alvo.

O **diagrama de roseta C** reúne as análises dos fotolineamentos interpretados como sendo quebras de relevo, quebras lineares na vegetação, manchas de vegetação não associadas a relevo, sendo estes primeiros fotolineamentos pouco claros, de pouca definição e descontínuos, juntamente com os fotolineamentos tonais, estes mais bem definidos. Este diagrama de roseta revelou ter os fotolineamentos de orientação menos

dispersa dos três e revela uma assinatura intensa para o azimute 030°, que caracterizou perfeitamente um bloco morfoestrutural do leste da área-alvo.

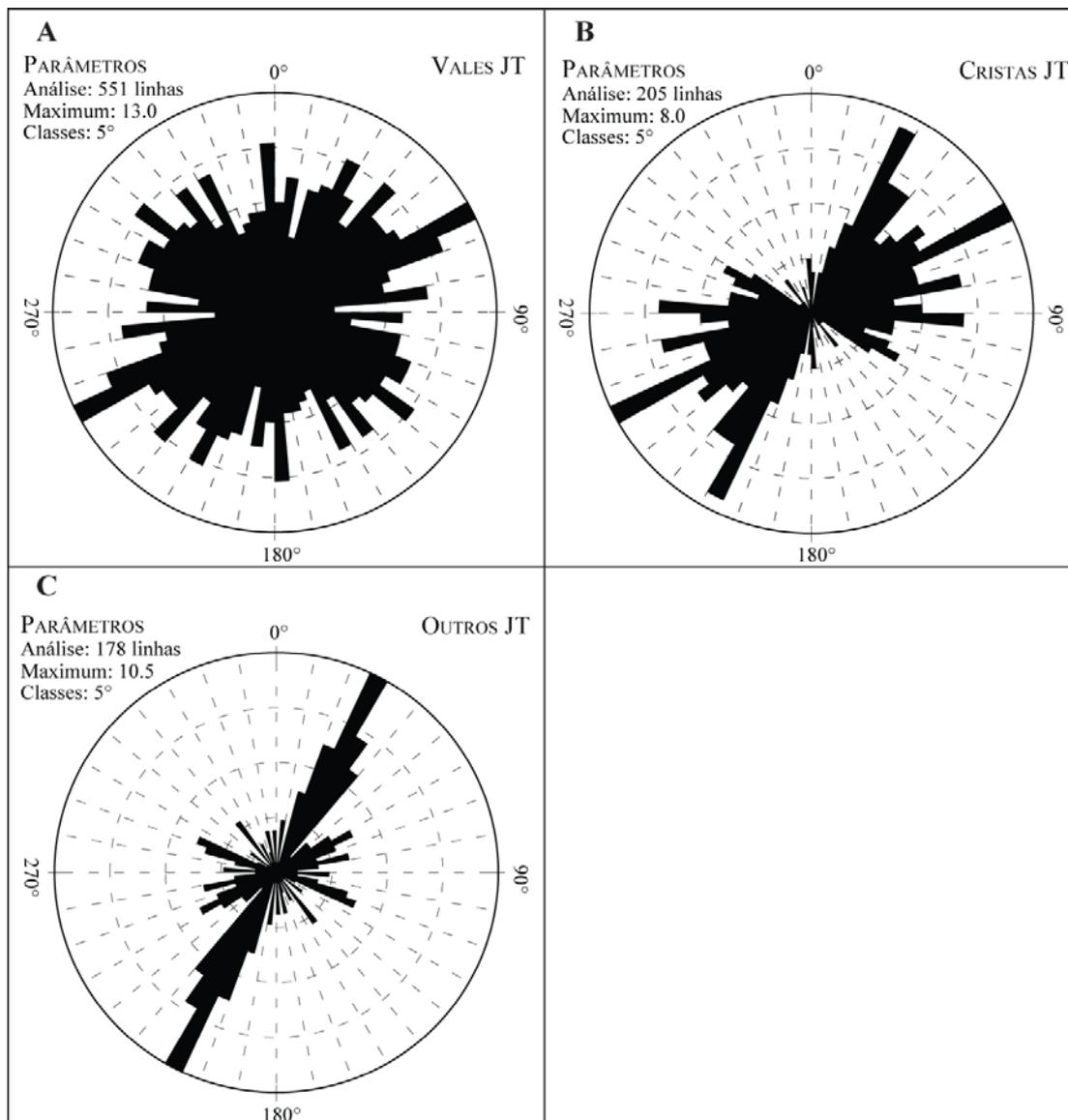


Figura 34 - Diagramas de Rosetas: A - Diagrama de roseta de orientações de cristas feito a partir da análise de fotolinhamentos. B – Diagrama de roseta de orientações de fotolinhamentos de vales feito a partir da análise de fotolinhamentos. C - Diagrama de roseta de orientações de demais fotolinhamentos feito a partir da análise de fotolinhamentos tonais, de quebras de relevo e outras feições de relevo.

A construção de diagramas de comprimentos dos fotolinhamentos, como pode ser vista na Figura 35, ressalta a grande concentração de fotolinhamentos no quadrante nordeste. Isso reflete a orientação das principais falhas locais.

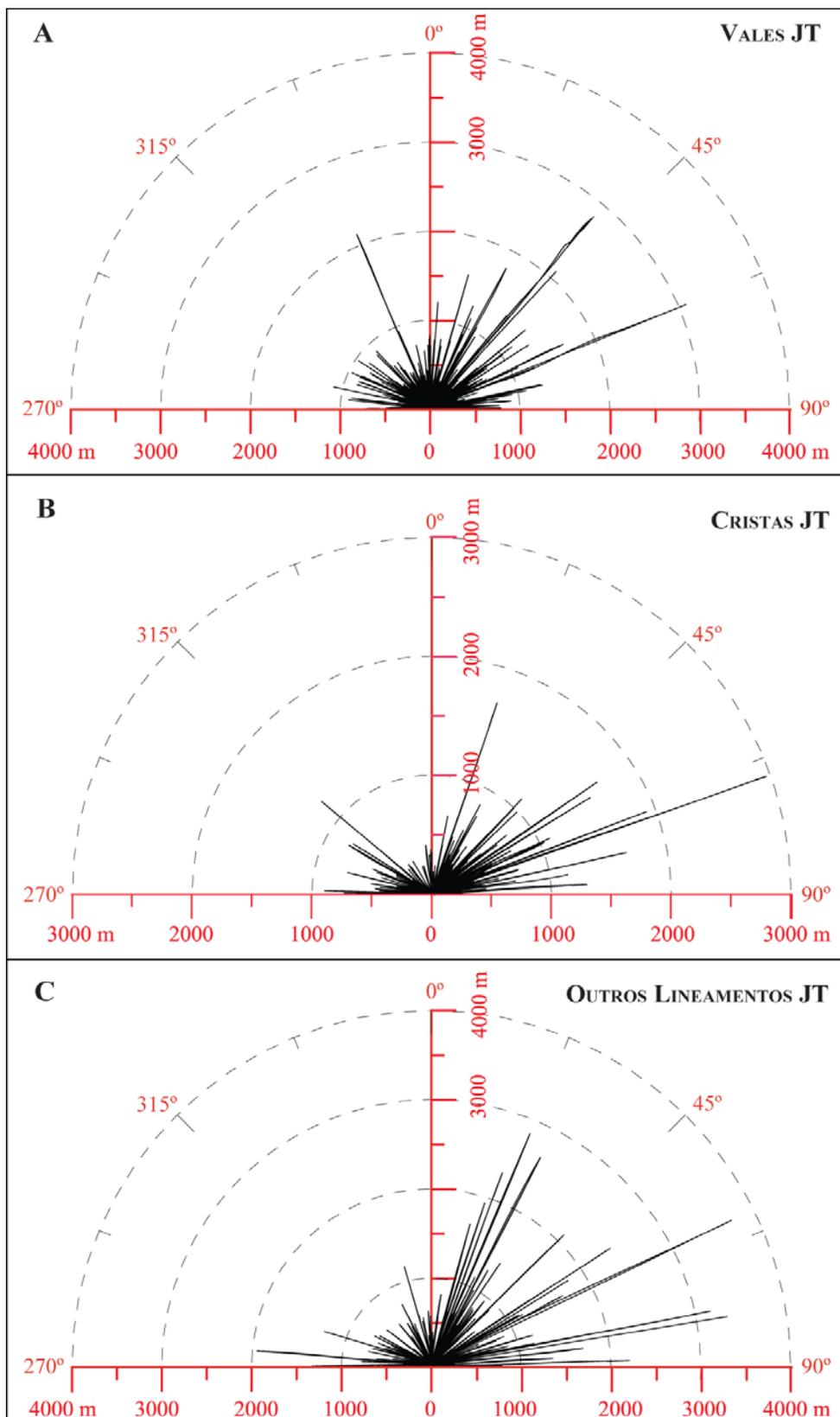


Figura 35 - Diagramas de comprimentos de fotolineamentos: A - Diagrama de comprimentos de fotolineamentos de vale. B - Diagrama de comprimentos de fotolineamentos de cristas. C - Diagrama de comprimentos de fotolineamentos tonais, de quebras de relevo e outras feições de relevo.

A partir do mapa produzido, notou-se o agrupamento de fotolineamentos com o mesmo comportamento em certas sub-áreas da área-alvo, realizando-se assim a subdivisão sistemática da área-alvo em setores. Os critérios para a definição destes setores foram visuais e envolveram a densidade de fotolineamentos, orientações preferenciais e comprimentos dos mesmos e o cruzamento com uma fotointerpretação prévia das fotografias aéreas locais baseada em aspectos colorimétricos e texturais. Foram definidos oito setores da área-alvo com base nestas características, sem limites claramente definidos e interpretáveis como sendo o produto ou reflexo das características subsuperficiais do terreno, tanto litológicas quando estruturais. Uma compartimentação da área-alvo em unidades baseada no caráter litológico foi feita com a interpretação aerofotogeológica da área, porém neste caso o interesse foi o caráter estrutural e a compartimentação almejou identificar unidades estruturais, aqui denominadas de blocos morfoestruturais e visível na Figura 36. Estes compartimentos poderiam revelar unidades litológicas distintas.

Os setores possuem uma articulação dos fotolineamentos com comportamentos distintos, e os mais extensos são separados por setores em formato de estreitas faixas aproximadamente contínuas relacionáveis a contatos dos tipos estratigráficos, litológicos ou estruturais tais como zonas de falhamento e cisalhamento.

O **Bloco Morfoestrutural 1**, situado no extremo noroeste da área-alvo, está isolado dos demais pelo Bloco 2 e apresenta um comportamento pouco caracterizador, com fotolineamentos escassos, traçados como sendo de vales e de cristas, não intercalados e sem orientação preferencial.

O **Bloco Morfoestrutural 2**, situado também no noroeste da área-alvo, corresponde a uma faixa entre os blocos 1 e 3 com fotolineamentos paralelos entre si. Sua delimitação foi fortemente caracterizada pelos longos lineamentos tonais limítrofes. Influenciou os diagramas de comprimentos de fotolineamentos com medidas expressivas e orientadas na zona dos 060° aos 070° de azimute.

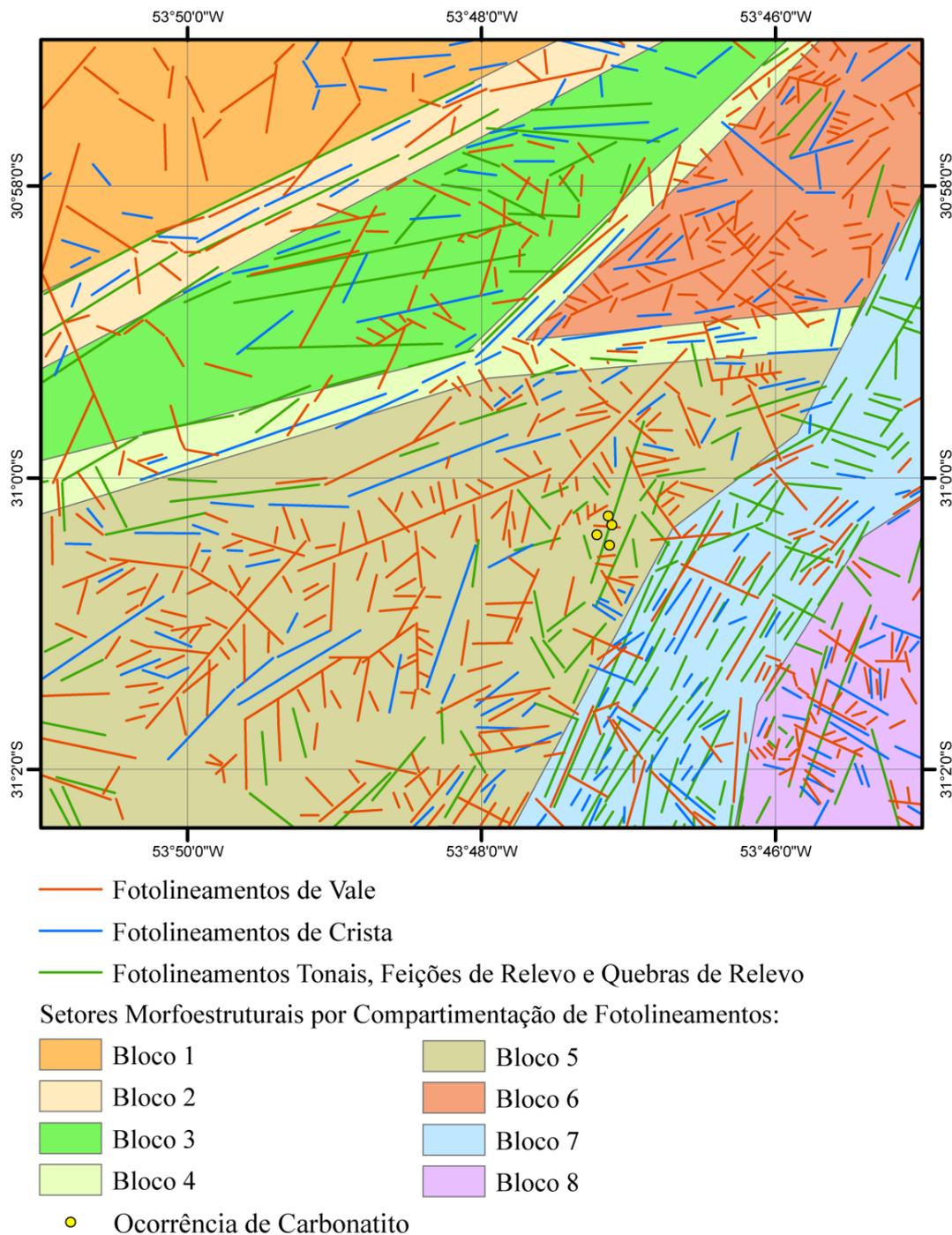


Figura 36 – Mapa de blocos morfoestruturais da Área-Alvo Joca Tavares.

O **Bloco Morfoestrutural 3**, situado do centro ao norte da área-alvo, está comprimido entre os blocos 2 e 4 apresenta fotolaneamentos concentrados na sua zona central. A orientação predominante para os fotolaneamentos traçados neste bloco é praticamente leste-oeste, entretanto alguns estão orientados entre o norte e o azimuth 030°. Os mais extensos fotolaneamentos deste bloco tratam-se de fotolaneamentos interpretados em

uma feição de vegetação associada ao relevo elevado na zona central deste bloco, e estão orientados leste-oeste perturbados com poucos graus para nordeste.

O **Bloco Morfoestrutural 4**, interpretado aproximadamente como uma forquilha, está em contato com os blocos 3, 5, 6 e 7. Possui fotolineamentos paralelos entre si e foi delimitado assim principalmente pelos extensos lineamentos tonais limítrofes muito bem demarcados, enquanto a zona que corta drenagens na porção leste foi mais confusa para a interpretação.

O **Bloco Morfoestrutural 5**, situado ao sudoeste da área-alvo, é o bloco de maior área e caracteriza-se pela densidade de fotolineamentos de vale entrecortados por fotolineamentos de crista, estes em quantidade menor porém também significativa. Seu aspecto em planta e as orientações dos fotolineamentos assemelham a geometria do bloco a uma cunha.

O **Bloco Morfoestrutural 6**, situado no nordeste da área-alvo, assim como o Bloco 5, também possui uma geometria que assemelha o bloco a uma cunha. O comportamento dos fotolineamentos neste bloco permite dizer que ele trata-se de uma continuidade do Bloco Morfoestrutural 5, apenas estando separado do mesmo pelos fotolineamentos muito evidentes do Bloco Morfoestrutural 4, que trata-se de uma fita de fotolineamentos.

O **Bloco Morfoestrutural 7**, situado no leste da área-alvo, trata-se de uma faixa de espessura aproximadamente uniforme que corte a área na direção nordeste-sudoeste. É o bloco mais bem caracterizado morfoestruturalmente, por apresentar fotolineamentos de diversos tipos muito bem orientados para a zona próxima do azimute 030° , o que está muito bem assinalado nos três diagramas de rosetas feitos para esta área-alvo, nos fotolineamentos de todos tipos, além de apresentar fotolineamentos de significativa continuidade como pode também ser visto nos diagramas de comprimentos.

O **Bloco Morfoestrutural 8**, situado no extremo sudeste da área-alvo, está separado dos demais blocos pelo Bloco 7 e apresenta uma malha de fotolineamentos aparentemente ortogonal, com vales intercalados com cristas na direção noroeste-sudeste além de fotolineamentos nordeste-sudoeste paralelos à faixa adjacente no Bloco 7.

As informações da compartimentação da área através de blocos morfoestruturais da Figura 36 traçados a partir de fotolineamentos coincidem com a compartimentação da área em unidades geomorfológicas da Figura 30 através de fotointerpretação, no entanto a compartimentação a partir do comportamento dos fotolineamentos traçados foi mais refinada que a fotointerpretação a partir dos anaglifos. Não foram separadas unidades geomorfológicas com correspondência aos blocos morfoestruturais associados às possíveis zonas de falhas porque as mesmas não foram fotointerpretadas.

O objetivo de mensuração superficial das ocorrências carbonatíticas através de sensoriamento remoto não se mostrou viável devido à cobertura vegetal da localidade. No entanto, uma área de ocorrência provisional foi proposta como pode ser visto na Figura 37, gerada baseada nas coordenadas e informações litológicas de pontos geológicos inéditos do Projeto Agrominerais do RS – CPRM e de trabalhos de campo dos orientadores deste trabalho combinadas com a anomalia de vegetação que circunda estas rochas carbonatíticas.

A classificação morfológica proposta para este carbonatito é a do **Tipo Central**, pela disponibilidade de dados prévios que afirmam a ausência de foliação neste carbonatito, pela interpretação do imageamento aerogeofísico em formato circular do Carbonatito Joca Tavares e pela falta de evidências estruturais e de sensoriamento remoto que indiquem uma zona de cisalhamento atuante sobre o corpo carbonatítico.

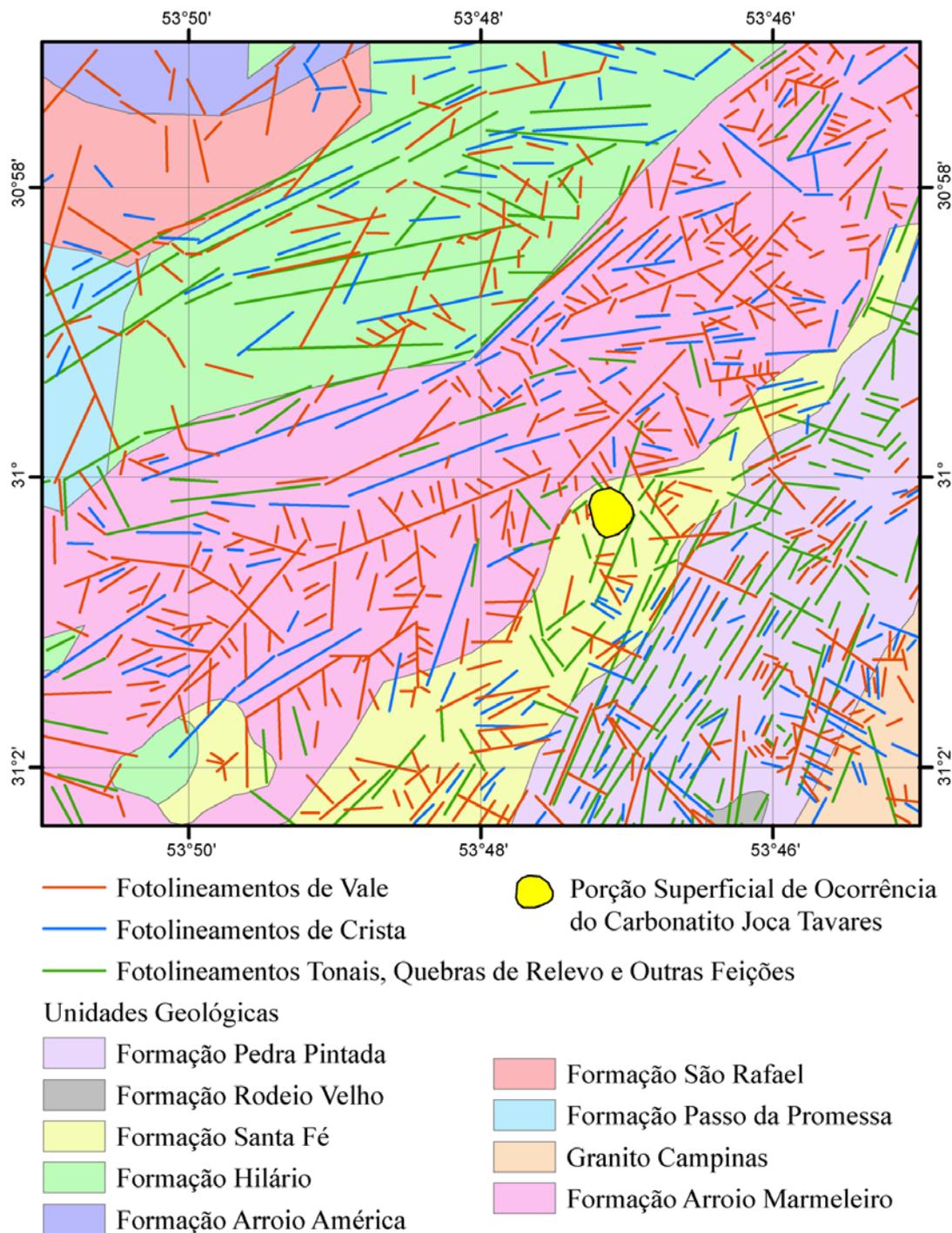


Figura 37 - Mapa Geológico da Área-Alvo Joca Tavares com a área previewal de ocorrência de litologia carbonatítica assinalada em amarelo como “Porção Superficial de Ocorrência do Carbonatito Joca Tavares” baseada em dados de pontos geológicos e na anomalia de vegetação desta área-alvo. Fonte: Base geológica disponível em geobank.sa.cprm.gov.br e pontos geológicos inéditos do Projeto Agrominerais do RS – CPRM e de trabalhos de campo dos orientadores deste trabalho.

5.2.3. Aerofotointerpretação da Área-Alvo Três Estradas

Pela fotointerpretação da Área-Alvo Três Estradas que consta na Figura 38 foram diferenciadas 4 unidades geomorfológicas de acordo com características texturais e tridimensionais do terreno, sendo o critério mais relevante para a separação destas 4 unidades geomorfológicas a compartimentação da área-alvo em patamares de relevo. As 4 unidades geomorfológicas correspondem a 4 patamares de altitudes distintas distinguíveis no anaglifo.

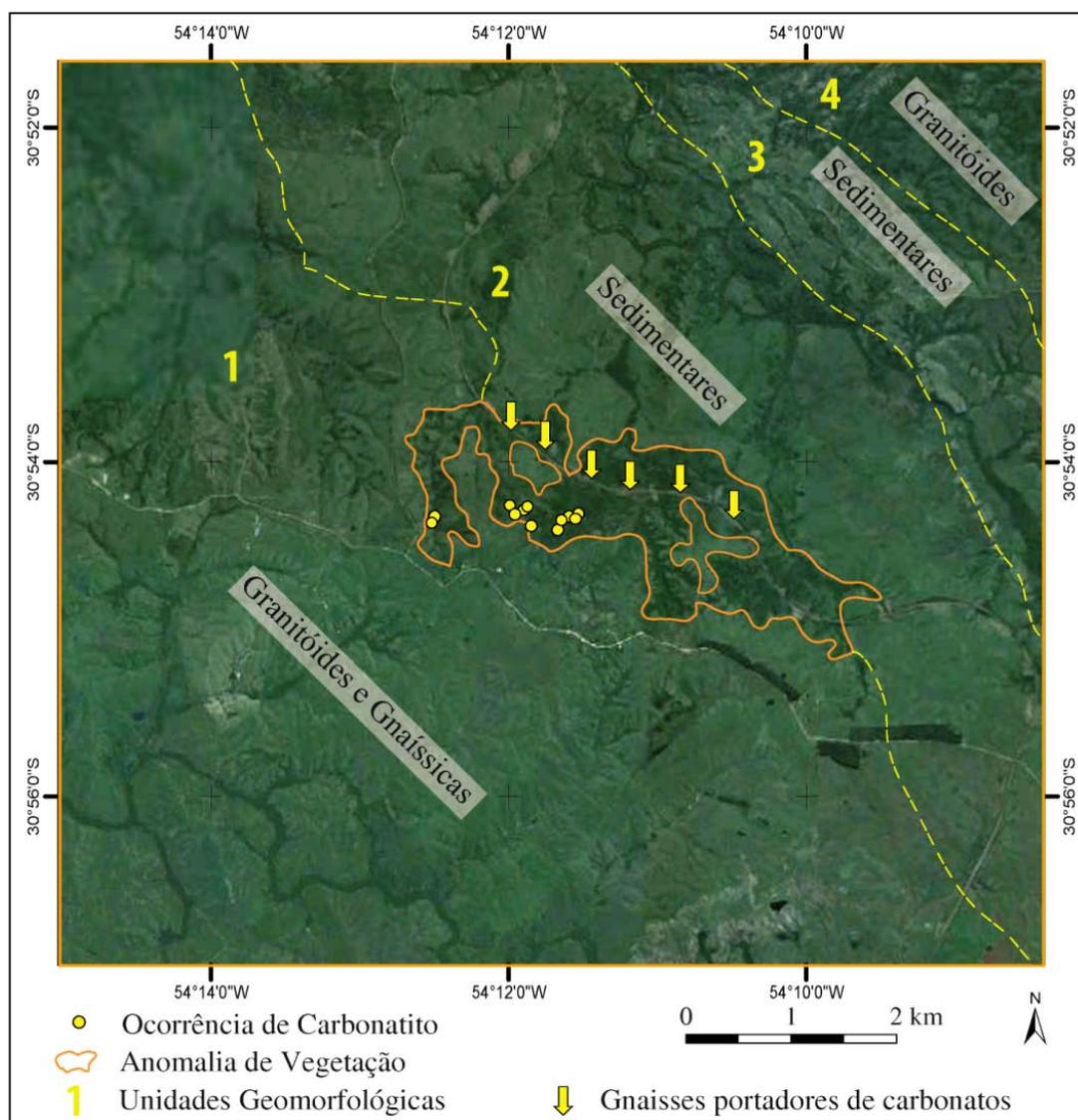


Figura 38 - Anomalia de vegetação na Área-Alvo Três Estradas reconhecida por fotointerpretação, nesta ilustração os limites de unidades geomorfológicas estão plotados sobre a imagem Google Earth para uma melhor visualização.

Segmentos dos contatos entre essas unidades geomorfológicas são marcadamente visíveis em campo e estão de acordo com a premissa mencionada por Sales (2002) de que processos superficiais da dinâmica da Terra explicam contrastes geomorfológicos resultantes da esculturação de contatos litológicos, de fato o que se observou remotamente e fisicamente na área estudada.

Conforme numeradas na Figura 38, a **Unidade Geomorfológica 1** corresponde a rochas gnáissicas e granitóides e compõe o patamar mais alto da área-alvo, com relevo mais pronunciado, encostas com gradientes consideráveis e a área mais promissora para se encontrar afloramentos. A interpretação da unidade geomorfológica 1 corresponde ao terreno granulítico estudado à oeste desta área-alvo, com intrusões de granitos brasileiros denominados por Hartmann & Nardi (1982) como Granito Santo Afonso e Granito Saibro. Ocorrem nesta região do Escudo Sul-Rio-Grandense coberturas da Formação Santa Tecla preservadas de acordo com Rodrigues *et. al* (2009), posicionam-se geralmente em cotas altas, na faixa dos 300 m a 400 m destacando-se por apresentar relevo mesiforme e representam a mais antiga superfície de erosão cimeira do Estado, a Superfície de Caçapava, estando presentes em algumas coxilhas da área-alvo na forma de arenitos silicificados possuindo localizadamente carbonatos brancos intergranulares e vesiculares visíveis à olho nu.

A **Unidade Geomorfológica 2** é visível no anaglifo como um patamar inferior ao da unidade geomorfológica 1 e apresenta relevo menos pronunciado, terreno mais plano e unidades sedimentares com mergulhos suaves para diversas direções. Segmentos do contato entre as duas primeiras unidades geomorfológicas são dado por quebras de relevo claramente visíveis em trabalho de campo, como pode ser constatado na Figura 39. Na área da Unidade Geomorfológica 2 são encontrados predominantemente afloramentos de arenitos e arenitos conglomeráticos com a natureza dos clastos muito variável e raramente rochas pelíticas, estas pouco preservadas e geralmente representadas apenas por fragmentos ou presentes em meio ao arenito.



Figura 39 - Fotografia de campo exibindo o limite entre unidades geomorfológicas dado pela quebra de relevo entre dois diferentes patamares: ao fundo demarcado com a letra A está a Unidade Geomorfológica 1, de coxilhas e relevo pronunciado com rios em vales cujas litologias encontradas são o carbonatito e o gnaisse e onde nota-se a anomalia de vegetação densamente desenvolvida cobrindo algumas encostas; enquanto à frente, no primeiro plano da fotografia, demarcado com a letra B está a Unidade Geomorfológica 2, um descampado de relevo plano com córregos e muitas áreas úmidas cuja litologia predominante é o arenito, tendo no centro desta foto alguns matacões e lajeados de arenito conglomerático matriz-suportado correlacionável à Formação Arroio América conforme dados geológicos prévios da região.

A **Unidade Geomorfológica 3** é mais abatida que a unidade geomorfológica 2, trata-se do patamar de menor cota interpretado nesta área-alvo e é nesta unidade que o Lineamento de Ibaré pode ser mais apropriadamente traçado. Ambas unidades 2 e 3 são relacionadas a formações sedimentares da bacia do Camaquã, o que se enquadra no estudo de Borba (2006) sobre a evolução desta bacia relacionada com grandes falhas e movimentos verticais, e minoritariamente da Bacia do Paraná. A Unidade Geomorfológica 2 deve coincidir com a Formação Arroio América de arenitos com lentes conglomeráticas típicos de ambiente de planície fluvial de canais entrelaçados, tendo também porções da Formação São Rafael, que trata-se de arenitos e ritmitos depositados em ambiente plataformal raso dominada por ondas, ambas formações pertencem ao Grupo Maricá. A Unidade Geomorfológica 3 deve coincidir predominantemente com a Formação Taciba, do Grupo Itararé, que trata-se de diamictitos, siltitos, arenitos, folhelhos, ritmitos e conglomerados, estes depósitos pertencentes a ambiente glácio-marinho. A unidade

geomorfológica 3 pode ter também porções da Formação São Rafael do Grupo Maricá preservadas.

A **Unidade Geomorfológica 4** trata-se de um patamar posicionado acima da unidade geomorfológica 3 e deve ter cotas médias relativamente similares a unidade geomorfológica 1 ou no máximo à 2. Esta unidade geomorfológica também possui pequenos trechos cobertos pela Formação Santa Tecla mas a principal unidade geológica responsável por formar este patamar elevado é o Granito Jaguari. A unidade geomorfológica 4 relaciona-se ao Bloco São Gabriel enquanto a unidade geomorfológica 1 relaciona-se ao Bloco Taquarembó, ambas tratam-se dos patamares geomorfológicos de maior altitude na área-alvo enquanto os terrenos abatidos das unidades geomorfológicas 2 e 3 devem estar relacionados à sutura crustal que une os dois blocos representada em superfície pelo Lineamento de Ibaré. As unidades geomorfológicas definidas na presente fotointerpretação coincidem com os blocos morfoestruturais definidos pelo comportamento dos fotolineamentos. Esse padrão de escalonamento de blocos com movimentação vertical é relacionado a atividade de falhas proposto desde Ribeiro (1970) que apontou subseqüentes reativações eficientes para gerar inclinação e arqueamento de pacotes sedimentares em diversos momentos geológicos da Bacia do Camaquã. A Unidade Geomorfológica 2 demarca preferencialmente sobre áreas de rochas sedimentares do Grupo Maricá da Bacia do Camaquã tendo ainda sido mapeadas neste trabalho ocorrências pontuais de rochas andesíticas, porém pouco expressivas em área. Já a Unidade Geomorfológica 3 demarca preferencialmente áreas de rochas sedimentares do Grupo Itararé da Bacia do Paraná e rochas inconsolidadas relatadas principalmente a atividade fluvial holocênica.

Os seguintes conjuntos de fotografias aéreas foram fotointerpretados de acordo com os anaglifos:

- Fotointerpretação 1:110.000 do par de fotos 02337-02338.
- Fotointerpretação 1:60.000 do par de fotos 16962-16963.
- Fotointerpretação 1:60.000 do par de fotos 16963-16964.
- Reinterpretação 1:110.000 do par de fotos 02337-02338.

A união dos 4 conjuntos de fotolineamentos acima resultou em uma composição de 1799 linhas. A quebra de vértices, com a finalidade de separação de lineamentos curvilíneos em segmentos de reta distintos para computação dos dados, resultou na geração de 1906 linhas. A intersecção com a janela da área-alvo removeu as linhas externas à Área-Alvo Três Estradas e reduziu o número para 1493 linhas contidas dentro da poligonal e segmentos de linhas cortadas nas bordas desta janela. Destas 1493 linhas, foram excluídas linhas de superposição das diferentes fotointerpretações, preservando sempre as linhas de maior dimensão, relacionadas a fotointerpretação e reinterpretação na escala 1:110.000. Esse peneiramento das duplicatas de lineamentos dos diferentes conjuntos de fotointerpretações acima mencionados resultou em 1330 linhas, das quais 1163 tratam-se de fotolineamentos de vale, 123 tratam-se de fotolineamentos de crista e as 44 restantes tratam-se de fotolineamentos tonais, quebras de relevo e outras feições de relevo. O produto final da extração de fotolineamentos pode ser visto na Figura 40.

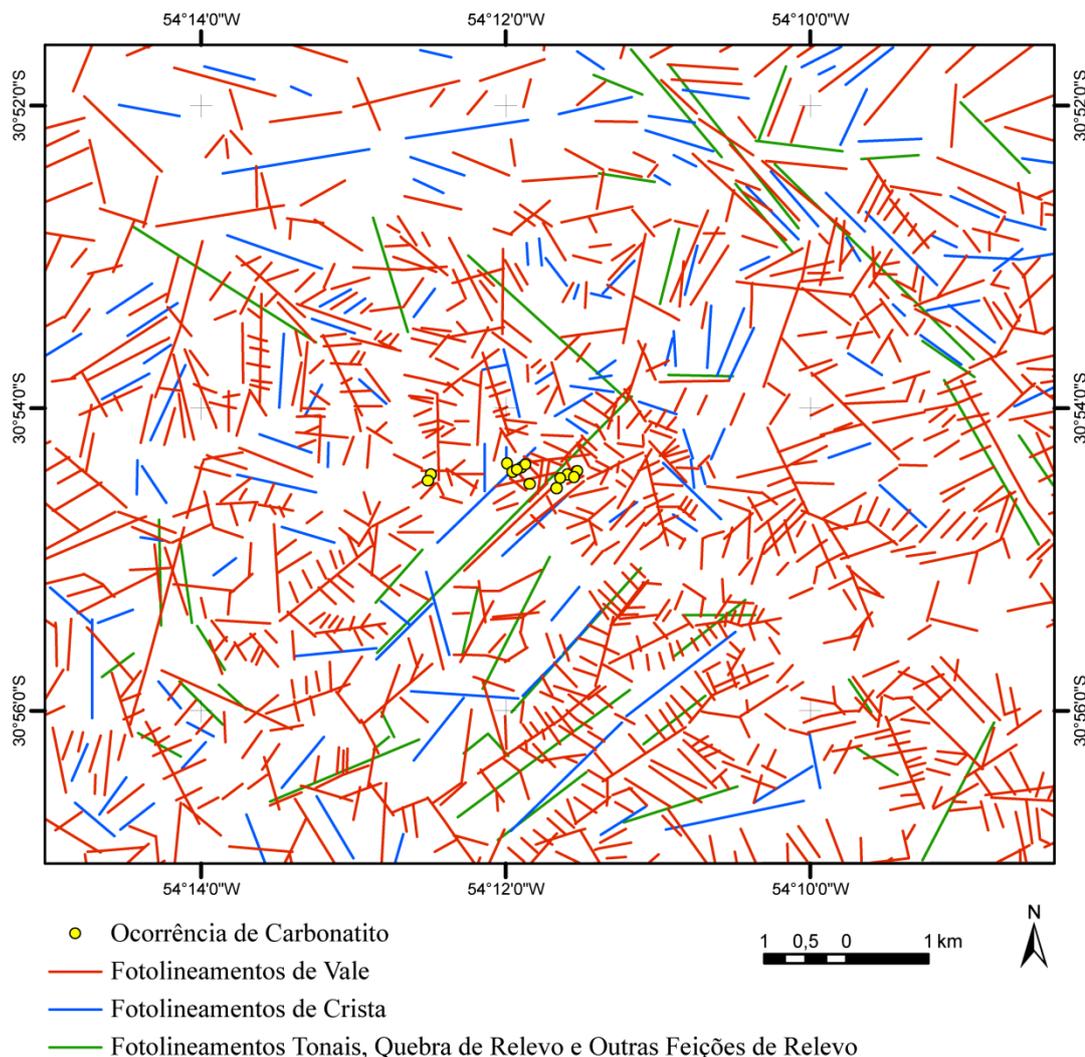


Figura 40 - Fotolineamentos da Área-Alvo Três Estradas.

Assim como para a Área-Alvo Joca Tavares, também foram produzidos diagramas dos tipos quantitativo e qualitativo. Além das análises de fotolineamentos, também soma-se aos diagramas de rosetas da Área-Alvo Três Estradas um diagrama confeccionado a partir das medidas de orientações de cristas tomadas em trabalho de campo, que trata-se do **diagrama de roseta A** peculiar (Figura 41). Este revelou uma assinatura divergente do **diagrama de roseta B** (Figura 41) que foi gerado a partir das orientações de cristas analisadas nos fotolineamentos. Isto deve-se a escala em que foram tomados os azimutes das cristas em campo, muito inferior à escala em que foram traçados os fotolineamentos de cristas através das fotografias aéreas.

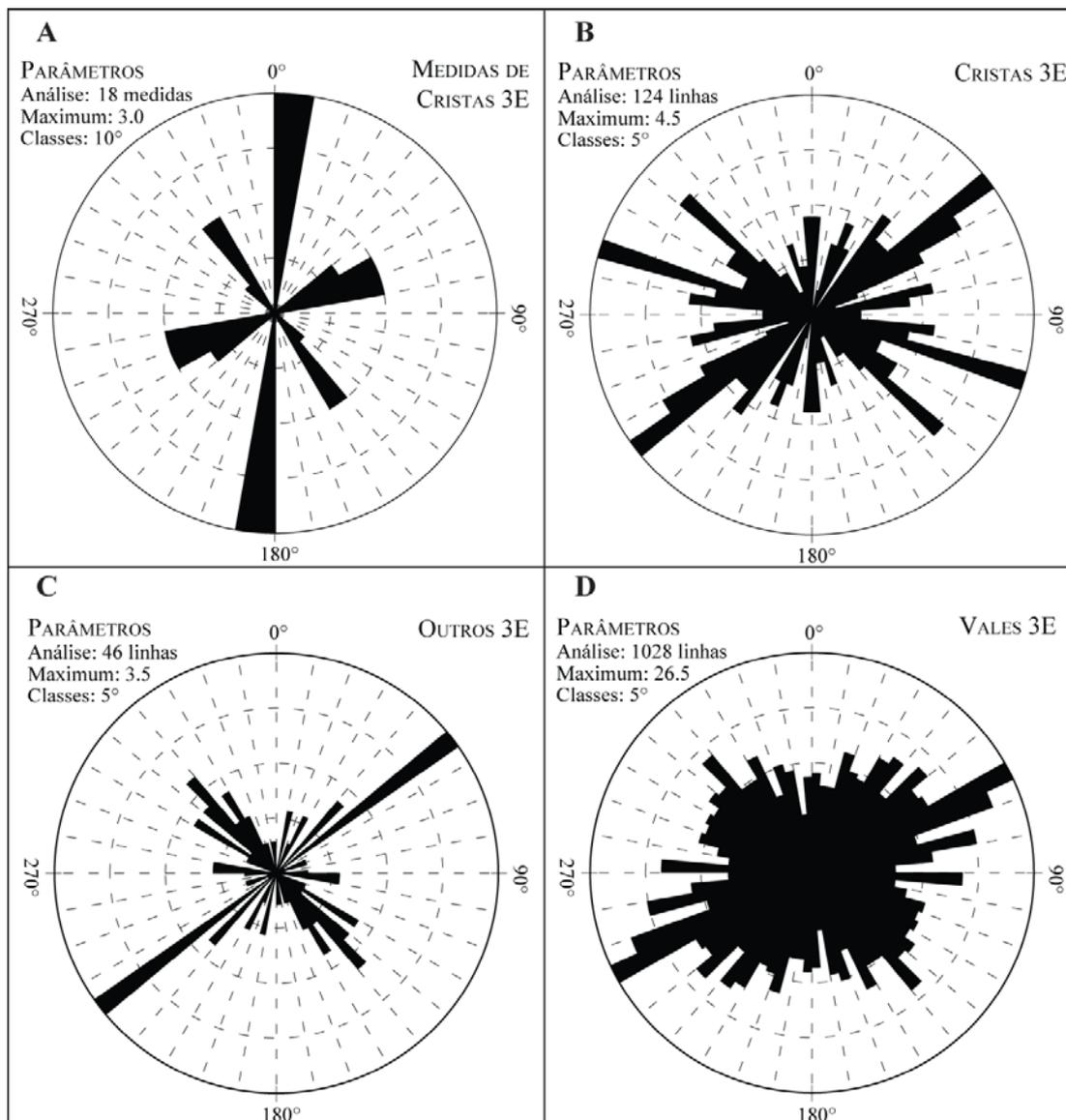


Figura 41 - Diagramas de Rosetas: A - Diagrama de roseta de orientações de cristas feito a partir de medidas tomadas em campo. B - Diagrama de roseta de orientações de cristas feito a partir da análise de fotolneamentos. C - Diagrama de roseta de orientações da análise de fotolneamentos tonais, de quebras de relevo e outras feições de relevo. D - Diagrama de roseta de orientações de fotolneamentos de vales feito a partir da análise de fotolneamentos.

Nos três diagramas de comprimentos dos fotolneamentos (Figura 42) nota-se fotolneamentos de maiores extensões concentrados nos azimutes 045° e 315°, traçando-se assim praticamente um ângulo reto entre ambos.

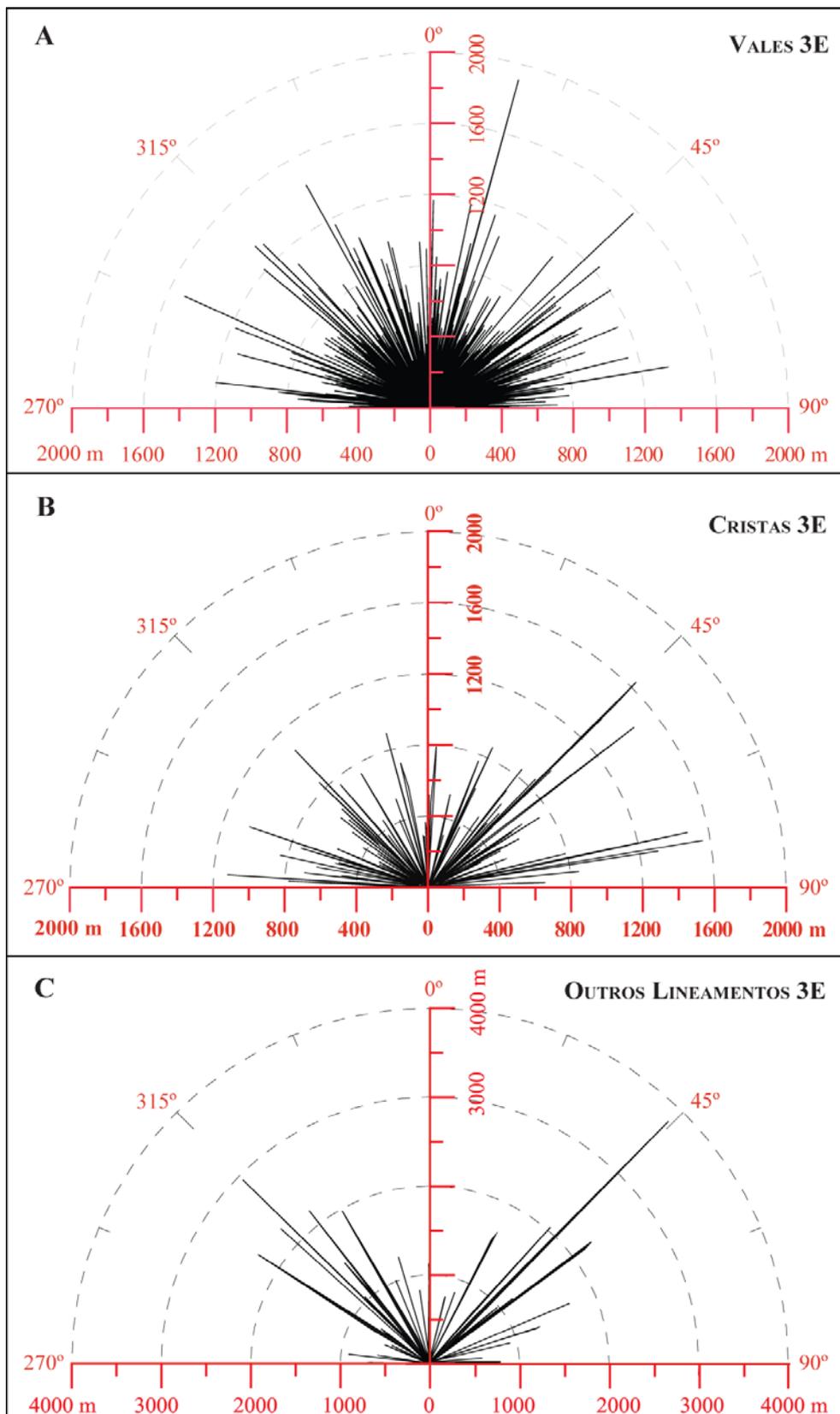


Figura 42 - Diagramas de comprimentos de fotolineamentos: A - Diagrama de comprimentos de fotolineamentos de vale. B - Diagrama de comprimentos de fotolineamentos de cristas. C - Diagrama de comprimentos de outros fotolineamentos: quebras de relevo, fotolineamentos tonais e outras feições de relevo.

Assim como na Área-Alvo Joca Tavares, foi feita uma interpretação do comportamento dos fotolineamentos seguindo os mesmos critérios utilizados para tal na outra área-alvo e culminando com a compartimentação desta em unidades denominadas blocos morfoestruturais (Figura 43). Os quatro blocos morfoestruturais da Área-Alvo Três Estradas estão aqui apresentados, onde nota-se a clara disposição dos mesmos lateralmente de nordeste para sudoeste. Estes blocos foram assim interpretados levando em consideração a densidade, natureza e orientação de fotolineamentos. Esta disposição dos blocos morfoestruturais evidenciou a atuação do Lineamento de Ibaré no local.

O **Bloco Morfoestrutural 1**, situado no extremo nordeste da área-alvo possui fotolineamentos preferenciais nas orientações leste-oeste e nordeste-sudoeste, sendo este último devido à influência da Falha Cerro dos Cabritos da região e que corta o granitóide aflorante no local. Predominam os fotolineamentos de vales.

O **Bloco Morfoestrutural 2**, com a geometria de uma faixa estreita e situado imediatamente abaixo do Bloco Morfoestrutural 1 possui de forma prática seus fotolineamentos na mesma orientação noroeste da Falha Suspiro-Linhares. Nem todos estão nesta orientação, somente alguns fotolineamentos de vales desobedecem a regra, mas todos os demais, tanto nos de cristas e nos outros (tonais, quebras de relevo e outras feições) seguem este padrão.

O **Bloco Morfoestrutural 3**, situado lateralizado ao Bloco Morfoestrutural 2 está dentro da faixa na qual operou a Falha Suspiro-Linhares. Seus fotolineamentos predominantemente estão orientados em direções do quadrante nordeste, ou seja, apontam para o bloco ao lado, sendo em sua maioria fotolineamentos de vales como indicadores da rede de drenagem que escoam do patamar mais alto desta área-alvo para o patamar mais baixo, que nesta compartimentação tratam-se respectivamente do Bloco Morfoestrutural 4 e do Bloco Morfoestrutural 2.

O **Bloco Morfoestrutural 4** cobre a maior parte da área-alvo e ocupa o quadrante sudoeste se estendendo para leste e parcialmente para norte,

mantendo o bloco adjacente como uma faixa que o contorna. Seus fotolineamentos mais extensos estão nas orientações nordeste-sudoeste e noroeste-sudeste, aproximadamente centrados em torno dos azimutes 045° e 315° , o que é especialmente evidente nos fotolineamentos tonais e em feições de relevo vistas como continuidades de cristas segmentadas e texturas alongadas sobre o relevo, interpretáveis como uma grande crista, que estão agrupadas como Outros Fotolineamentos nos diagramas e demarcadas em cor verde nos mapas de fotolineamentos. Predominam os fotolineamentos de vales neste bloco morfoestrutural, embora em sua maioria com extensões muito reduzidas.

Para a Área-Alvo Três Estradas, a compartimentação da área através de blocos morfoestruturais traçados a partir de fotolineamentos corresponde quase perfeitamente com a compartimentação da área em unidades geomorfológicas através de aerofotointerpretação, tanto em número, sendo 4 blocos morfoestruturais que correspondem a 4 unidades geomorfológicas respectivas, quanto em relação à sua disposição na superfície, em faixas de orientação noroeste, e à sua disposição topográfica em diferentes altitudes para cada unidade geomorfológica.

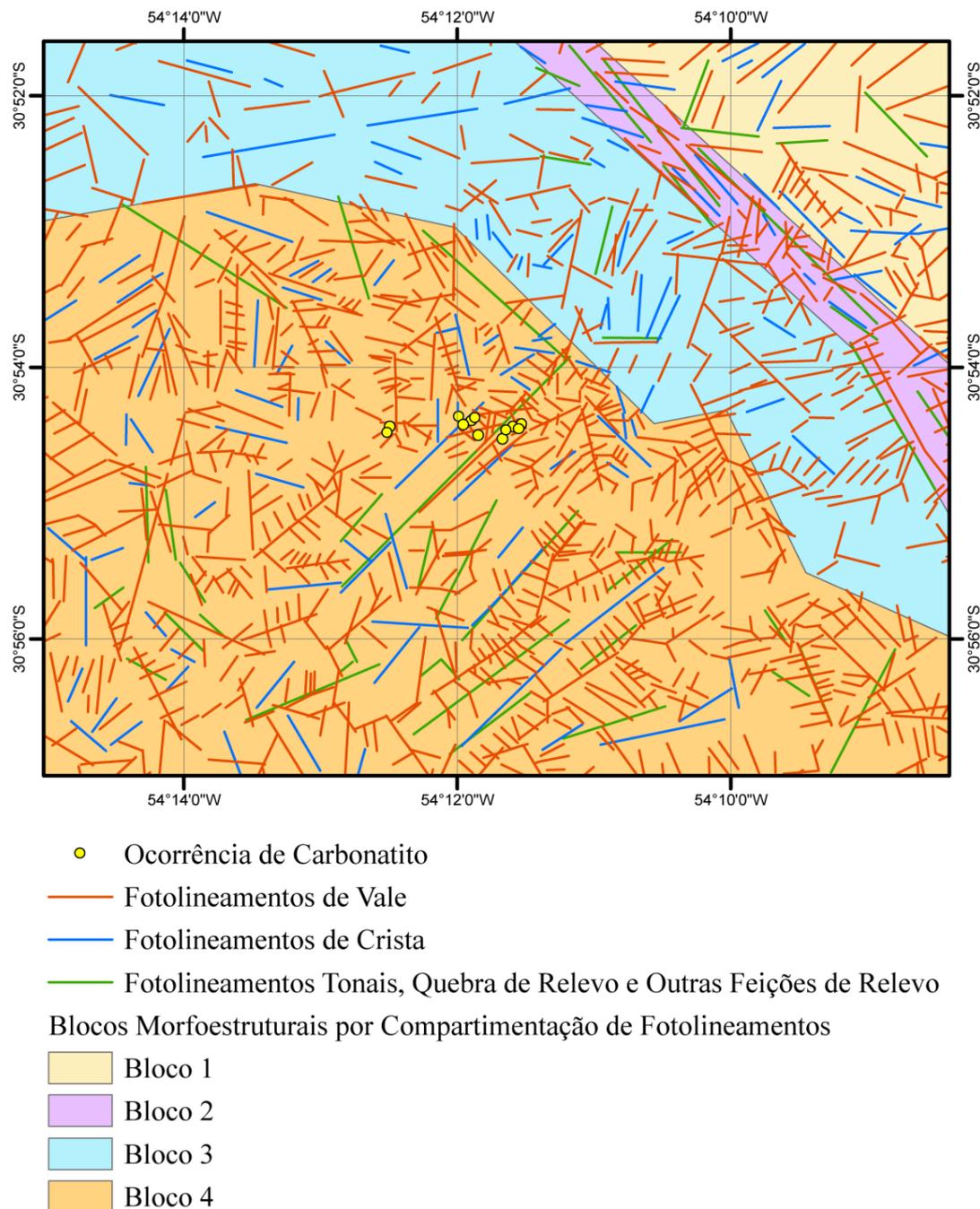


Figura 43 – Mapa de blocos morfoestruturais da Área-Alvo Três Estradas.

5.3. Aerogeofísica

O presente estudo em geofísica envolveu a pesquisa de material bibliográfico que exhibisse o contexto geológico frente à geofísica para o escudo sul-rio-grandense, seguido da geração de informações pertinentes à Área do Projeto a partir do levantamento aerogeofísico da Texas Instruments (1973) e sua interpretação baseada no conhecimento geológico de interesse

para este estudo e correlação com o mesmo. Conforme diferentes interpretações de compartimentação geofísica para o escudo cristalino sul-rio-grandense, a Área do Projeto encontra-se em situações distintas. Conforme a interpretação geofísica de Fernandes *et al.* (1995), visível na Figura 44, separa-se em quatro domínios geofísicos subparalelos a continuidade de exposições cristalinas que se estendem do centro do Rio Grande do Sul ao extremo sul do Uruguai. Nesta compartimentação geofísica a Área do Projeto se situa em meio ao domínio denominado Bloco IIb.

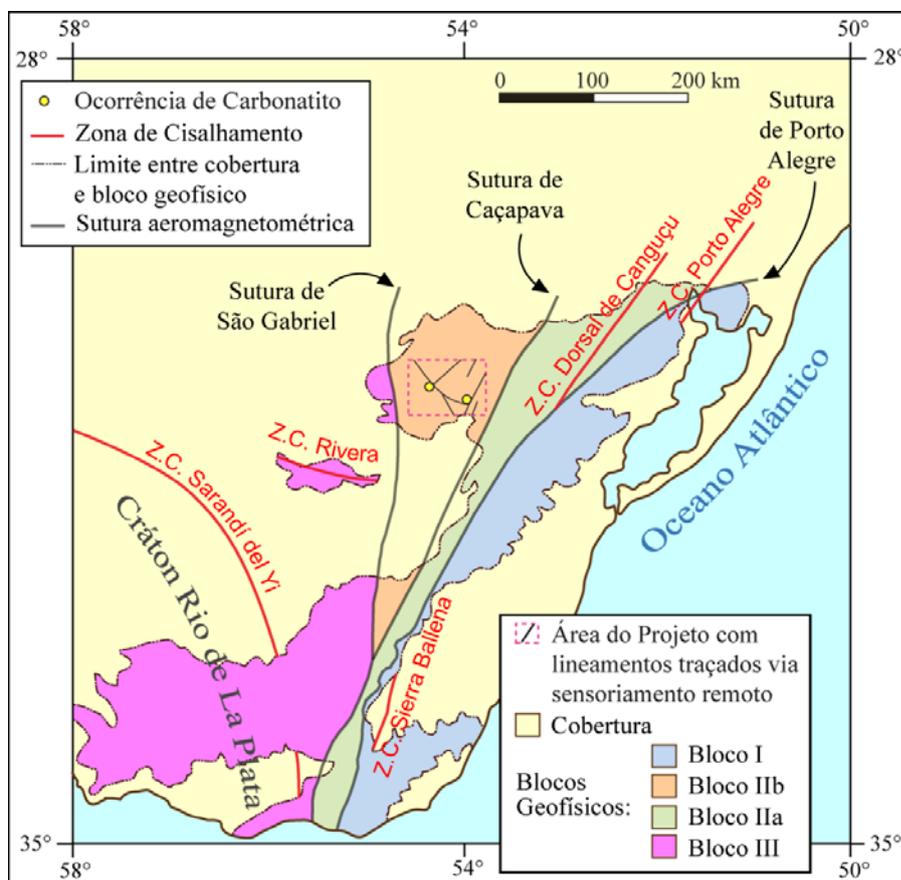


Figura 44 - Situação dos carbonatitos na compartimentação geofísica do Escudo Sul-Rio-Grandense conforme interpretada por Fernandes *et al.* (1995). Os lineamentos traçados em imagens de satélite LANDSAT 5 estão contidos dentro da hachura da Área do Projeto.

Na interpretação geofísica de Hartmann *et al.* (2007) baseada na interpretação prévia de Costa (1997) ambos carbonatitos situam-se dentro do Domínio Oeste, o qual compreende os blocos São Gabriel e

Taquarembó. Nessa compartimentação geofísica do escudo, como pode ser vista na Figura 45, o Carbonatito Joca Tavares situa-se próximo ao limite geofísico do Domínio Oeste com o Domínio Central dado parcialmente pela Anomalia Magnética Caçapava do Sul. Nesta compartimentação o Domínio Central por sua vez trata-se do Terreno Tijucas, de complexos de idades paleoproterozóicas em meio a rochas neoproterozóicas a eo-paleozóicas. Desta forma o Carbonatito Joca Tavares pode estar relacionado à sutura crustal que põe em contato os dois domínios geofísicos distintos.

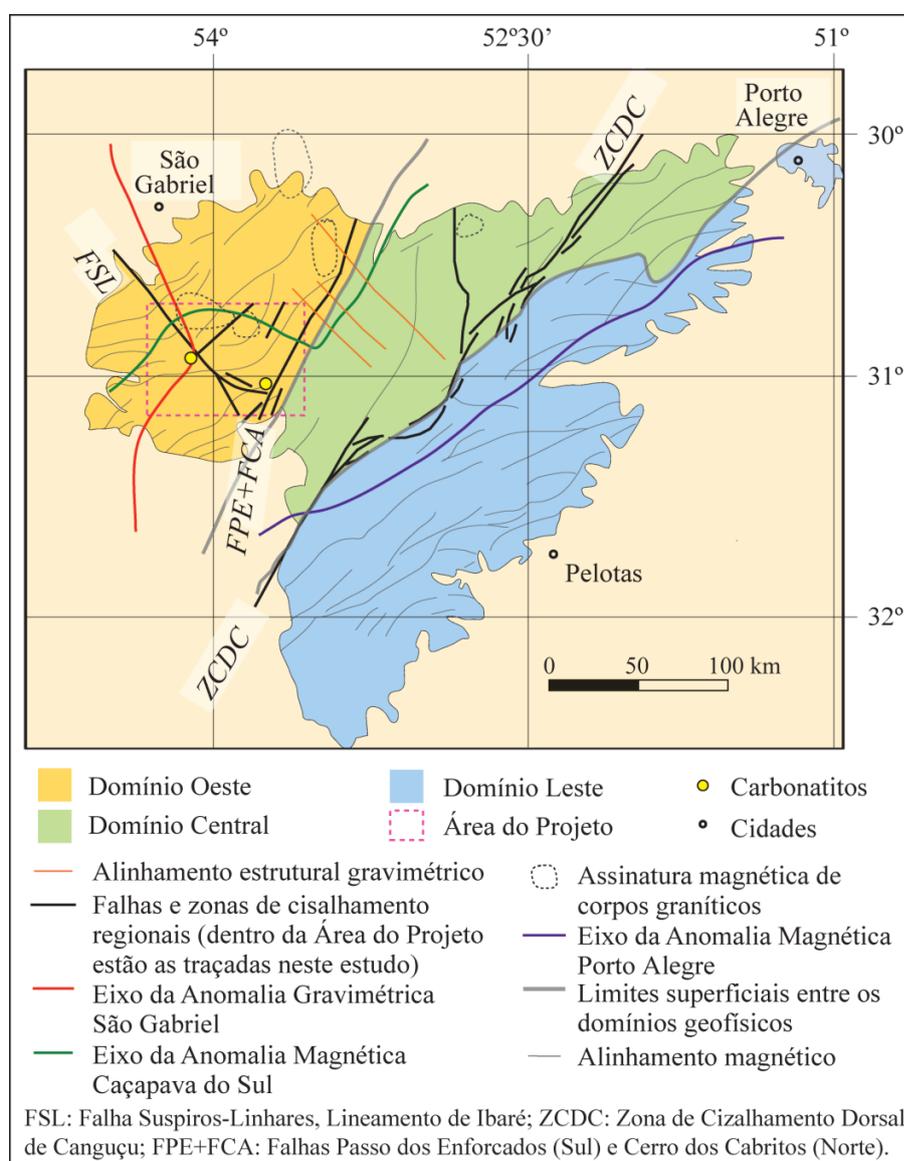


Figura 45 - Situação dos carbonatitos na compartimentação geofísica do Escudo Sul-Rio-Grandense conforme interpretada por Hartmann *et al.* (2007).

Foi elaborado um cruzamento de informações em SIG dos lineamentos de falha obtidos de diferentes fontes cartográficas com os lineamentos magnéticos sobre o mapa de domínios de polaridade magnética da Área do Projeto feito a partir do levantamento aeromagnetométrico. Esse cruzamento de informações pode ser visto no mapa da Figura 46. Alguns apontamentos podem ser relatados correlacionando geologia e geofísica. O principal deles é que os granitóides brasileiros da região formadores de diversos complexos intrusivos possuem polaridade magnética negativa, o que se traduz por magnetismo negativo devido a poucos constituintes metálicos magnéticos. As rochas metamórficas de alto grau do Complexo Granulítico Santa Maria Chico compõem o mais vasto domínio magnético positivo da região, dentro do qual está inserido o Carbonatito Três Estradas.

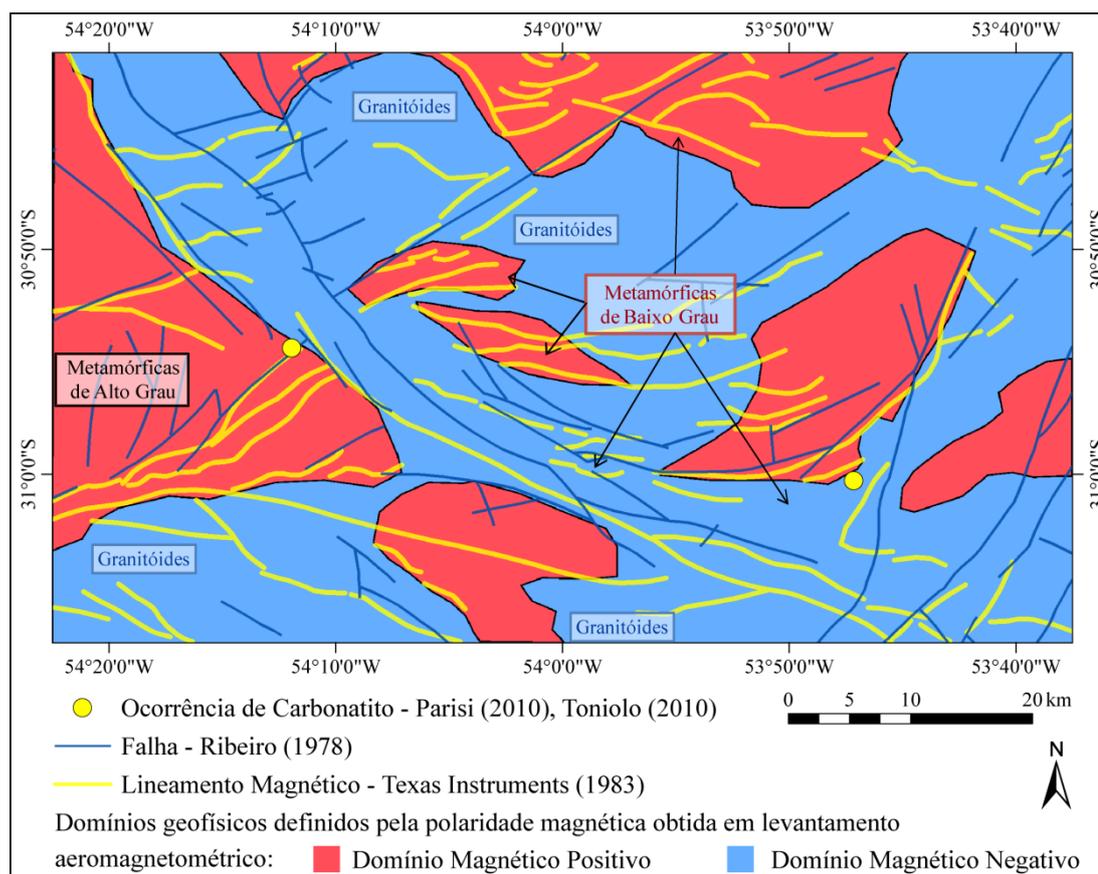


Figura 46 - Mapa aeromagnetométrico da Área do Projeto exibindo os domínios de polaridade magnética integrado ao traçado de falhas regionais e lineamentos magnéticos.

Também é possível notar contatos bem definidos entre diferentes unidades geológicas de polaridades opostas, como o contato entre os Blocos Taquarembó e São Gabriel, do qual o Carbonatito Três Estradas está muito próximo, contato este dado pelo Lineamento de Ibaré e assinalado também por lineamentos magnéticos em amarelo no mapa. As sequências sedimentares das bacias do Camaquã e Paraná estão acompanhando falhas encaixadas dentro da zona de cisalhamento dada por abatimento na Falha Suspiro-Linhares, exibindo polaridade negativa assim como os granitóides vizinhos a estas, impossibilitando diferenciá-los por polaridade. As sequências metamórficas de baixo a médio grau não exibem padrão único, mostrando áreas de ambos domínios magnéticos.

O Carbonatito Joca Tavares ocorre no domínio magnético negativo intrudido em sedimentos da Bacia do Camaquã que recobrem a formação metassedimentar Arroio Marmeleiro (baixo grau). O domínio positivo que se encontra muito próximo a noroeste deste carbonatito pode estar relacionado a uma porção dos metassedimentos do Arroio Marmeleiro que apresente assinatura positiva do complexo metassedimentar ou à sequências vulcânicas da Bacia do Camaquã que ocorrem na área. Não foi encontrada uma relação clara superficialmente visível para explicar o limite entre os domínios magnéticos positivo e negativo no qual ocorre este carbonatito.

Como pode ser apontado neste mapa, ambos carbonatitos ocorrem intimamente relacionados a limites entre os domínios positivo e negativo. Ambos carbonatitos encontram-se situados em zonas atualmente limítrofes à sequências sedimentares preservadas da Bacia do Camaquã, não esquecendo que os demais complexos carbonatíticos brasileiros ocorrem associados à zonas de flexura nas bordas de bacias fanerozóicas. Mesmo assim não é proposta uma sugestão análoga para os carbonatitos abordados neste trabalho.

A partir do cruzamento dos dados do mapa de magnetismo total com os limites de associações geológicas foi possível aferir à geologia conhecida certo padrão de comportamento magnético. Conforme o mapa da Figura 47 muitos dos contatos geológicos acompanham zonas lineares demarcadas em azul ou cores contrastantes com as cores vizinhas.

O Lineamento de Ibaré, a estrutura marcadamente mais visível por sensoriamento remoto, não foi demarcada de forma evidente pelo levantamento aerogeofísico, como pode ser notado na Figura 47, embora a assinatura magnética baixa evidencie o Lineamento de Ibaré em seu segmento sudeste, no contato entre as unidades 2 (Complexos Metamórficos Neoproterozóicos) e 3 (Complexos Intrusivos e Granitóides), segmento este interpretado de forma complexa quando por sensoriamento remoto.

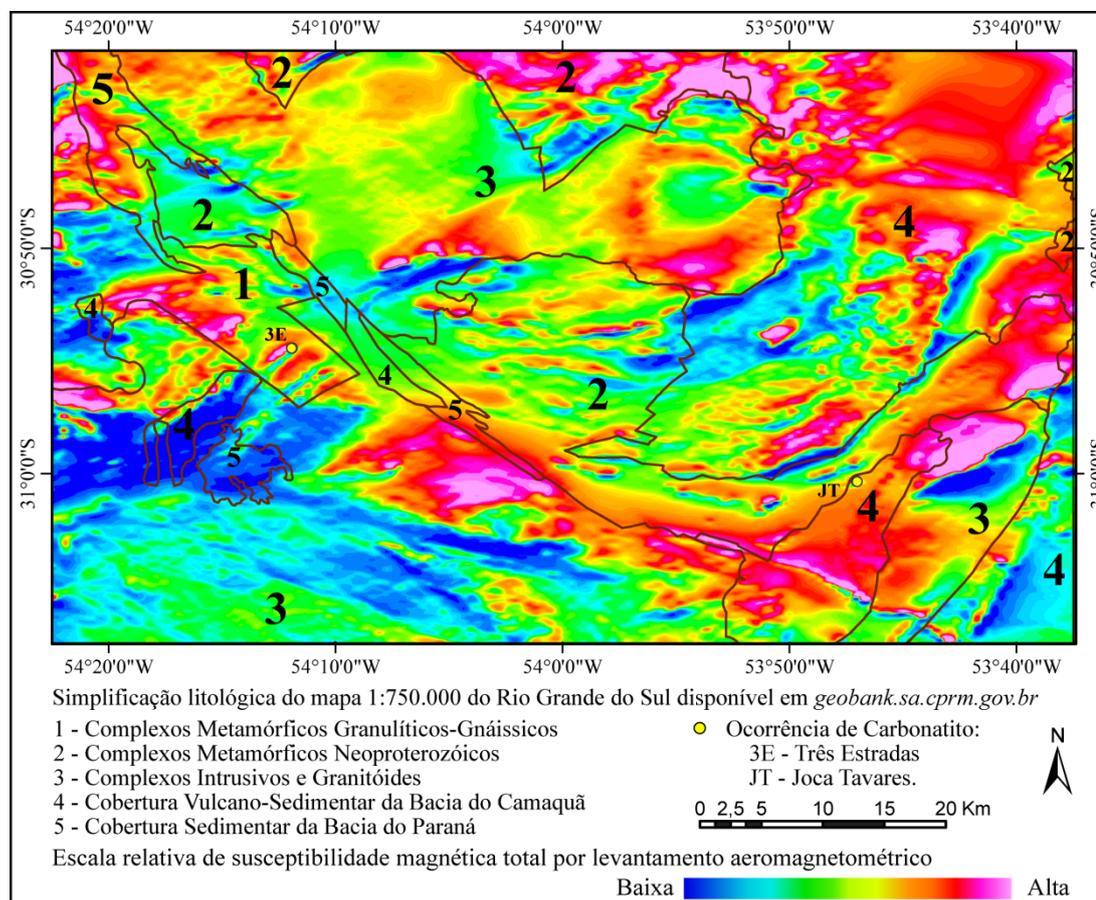


Figura 47 - Mapa colorimétrico de magnetismo total integrado a um mapa geológico simplificado de associações de unidades geológicas da Área do Projeto.

Na Figura 48 referente à Área-Alvo Joca Tavares é possível notar a anomalia em formato de pico magnético que demarca a ocorrência carbonatítica do local, e também são localizados neste trabalho outros picos magnéticos ao redor. Os picos magnéticos do quadrante sudeste da Área-

Alvo Joca Tavares formam uma faixa que acompanha as falhas Passo dos Enforcados e Cerro Alegre.

As depressões em azul nas Figuras 48 e 49 coincidentemente assinalam as falhas locais, sendo seus indicadores em subsuperfície.

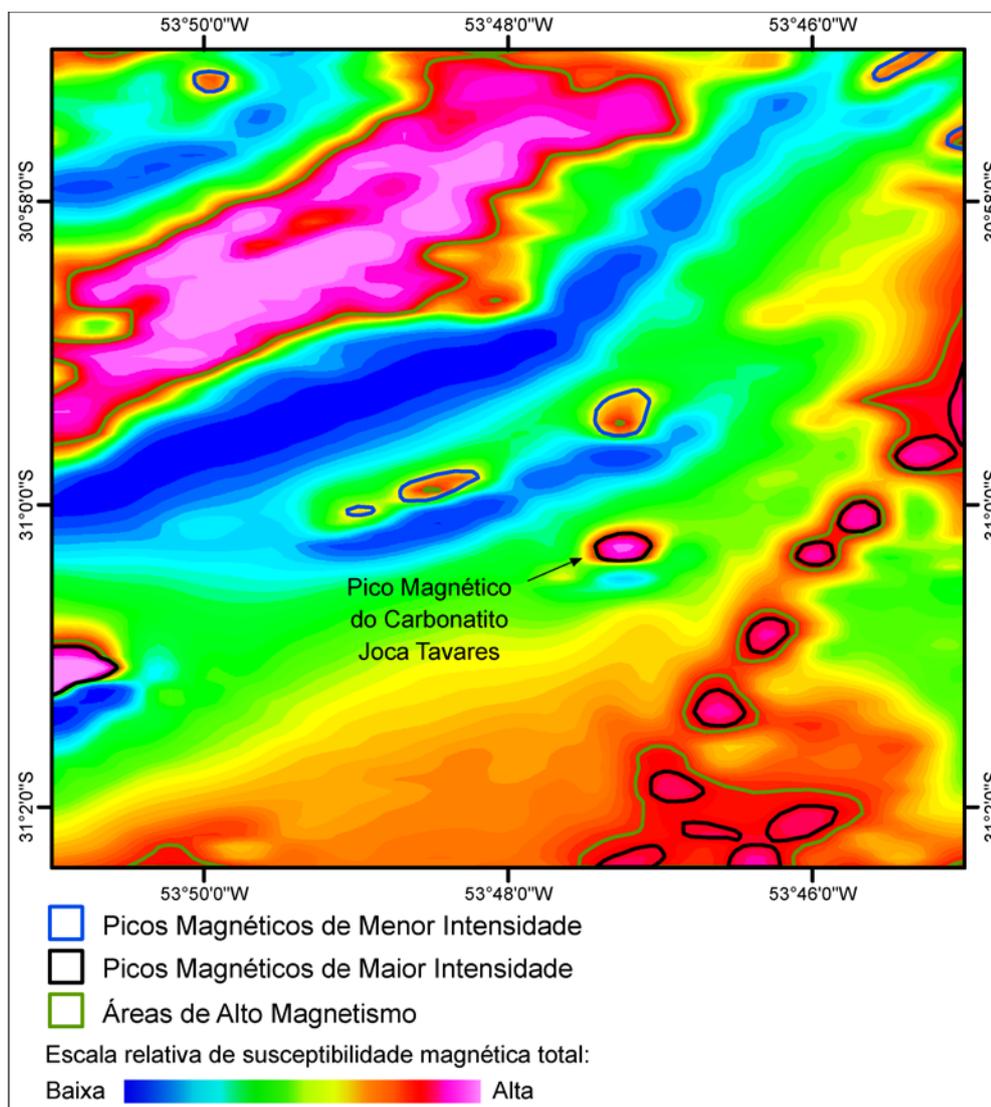


Figura 48 - Mapa aerogeofísico de magnetismo total para a Área-Alvo Joca Tavares.

Na Figura 49 é possível observar o lineamento nordeste assinalado em azul como uma faixa de baixo magnetismo passando pela concentração de pontos superficiais de ocorrência de carbonatito checados em campo. A área em vermelho reflete o alto magnetismo do Complexo Granulítico Santa Maria Chico, que contém carbonatos principalmente onde se encontram as setas indicativas. Granitóides no quadrante sudoeste estão no domínio azul da

imagem e em campo foram identificadas apenas cristas de quartzo ocorrendo próximas a esta área. O Lineamento de Ibaré não está claramente definido, sendo apresentado como uma faixa de transição no quadrante nordeste, representando o contato entre o domínio em vermelho (gnaisses) e o domínio em azul nordeste (granitóides), permeado de unidades sedimentares, neste imagem ocorrendo nas áreas magnéticas verdes e azuis, ou seja, de magnetismo total intermediário.

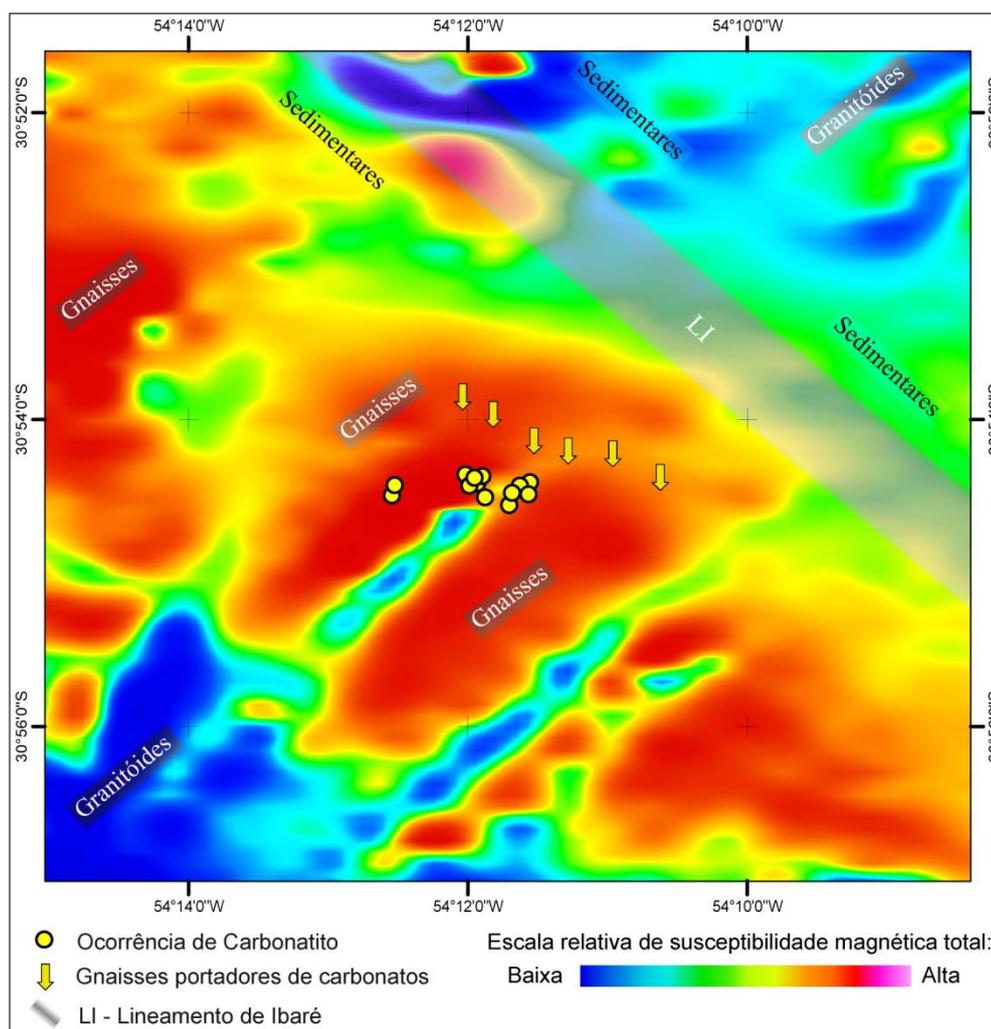


Figura 49 - Mapa aerogeofísico de magnetismo total para a Área-Alvo Três Estradas.

5.4. Informações de Campo

Devido ao tempo disponível para a realização de atividades de campo para o projeto temático, o trabalho de campo foi realizado somente na Área-

Alvo Três Estradas. As atividades de campo iniciaram-se com um reconhecimento inicial das litologias que ocorrem dentro da área-alvo fazendo uso de um veículo da UFRGS destinado para este trabalho, e prosseguiram com caminhamentos visando a identificação de litologias na forma de mapeamento e a identificação especialmente de falhas, além de estruturas planares e lineares, para a construção do arcabouço estrutural local.

O trabalho de campo envolveu uma etapa de caminhada ao longo da linha férrea local que liga Cacequi a Rio Grande, a qual exibia as rochas locais como em nenhum outro local da Área-Alvo Três Estradas, graças a exposição contínua de grandes maciços rochosos em seus taludes laterais abertos por detonação durante a sua implantação. A esse caminhamento foi atribuído o nome de Perfil da Ferrovia, cuja posição geográfica é visível na Figura 50 e cujo corte lateral pode ser visto na Figura 51.

Todos estereogramas aqui apresentados estão plotados em projeção de ângulos iguais no hemisfério inferior. Na confecção dos estereogramas de densidade gerados no Stereo32 foi utilizado o método da soma de cossenos para o cálculo de densidade cuja concentração é indicada na escala de cada estereograma. Em cada diagrama de roseta é indicada a quantidade de medidas que constam no próprio. Com relação à nomenclatura das rochas foram levadas em consideração as sugestões de Ruberti *et al.* (2000) segundo o qual os critérios de nomenclatura adotados podem variar em vista do contexto dentro do qual se deseja referir uma determinada rocha ou conjunto de rochas.

O início das atividades de campo deu-se com a etapa de reconhecimento geológico regional, visando a contextualização do sítio de ocorrência de rochas carbonatíticas na Área-Alvo Três Estradas. Nesta etapa se avaliou a interpretação aerofotogeológica correlacionando-a com dados concretos de campo, como identificação litológica, compartimentação da área-alvo em unidades geomorfológicas.

O domínio de rochas sedimentares na área-alvo cobre o quadrante nordeste, porém pequenas ocorrências preservadas fora deste domínio podem ser identificadas através de aerofotointerpretação. As litologias

identificadas em campo se ajustam com os dados bibliográficos que indicam a ocorrência do Grupo Maricá nesta porção sedimentar aerofotointerpretada. Rochas graníticas foram identificadas na porção sudeste da área-alvo, embora tenham sido interpretadas injeções graníticas em determinadas porções do gnaiss.

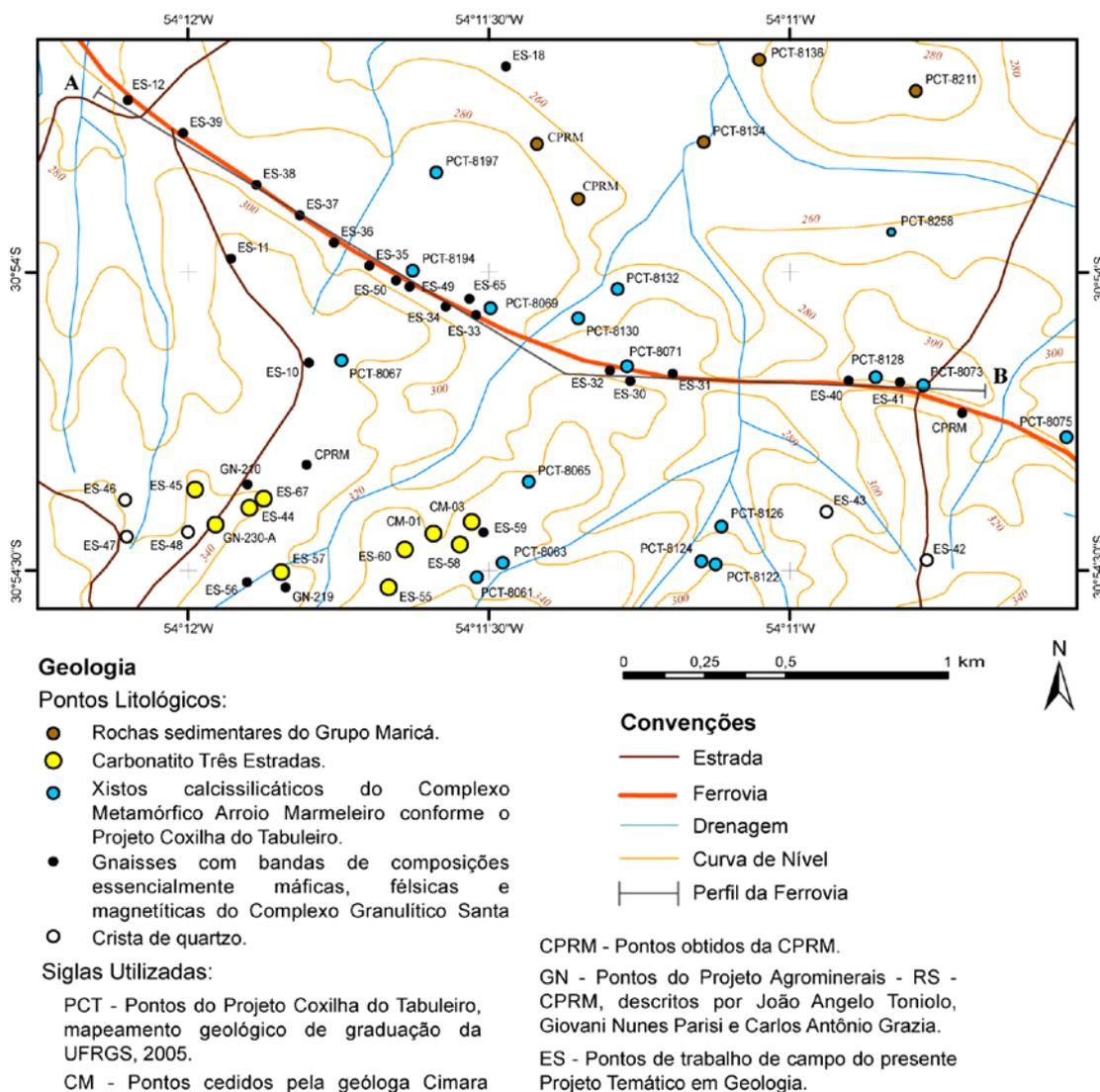


Figura 50 – Vista em planta da área ressaltando aspectos geográficos e posicionamento do Perfil da Ferrovia.

O domínio de rochas gnáissicas se estende da porção central para oeste, com ocorrências no quadrante noroeste e sudoeste da área-alvo. No Morro do Cemitério, dentro da área de domínio dos gnaisses, ocorre localizadamente sobre todo seu cume e até determinada cota em sua

encosta uma capa de arenitos finos com poros preenchidos por carbonatos, além de pequenas camadas pouco expressivas de lutitos. Esta capa foi interpretada como se tratando da Formação Santa Tecla.

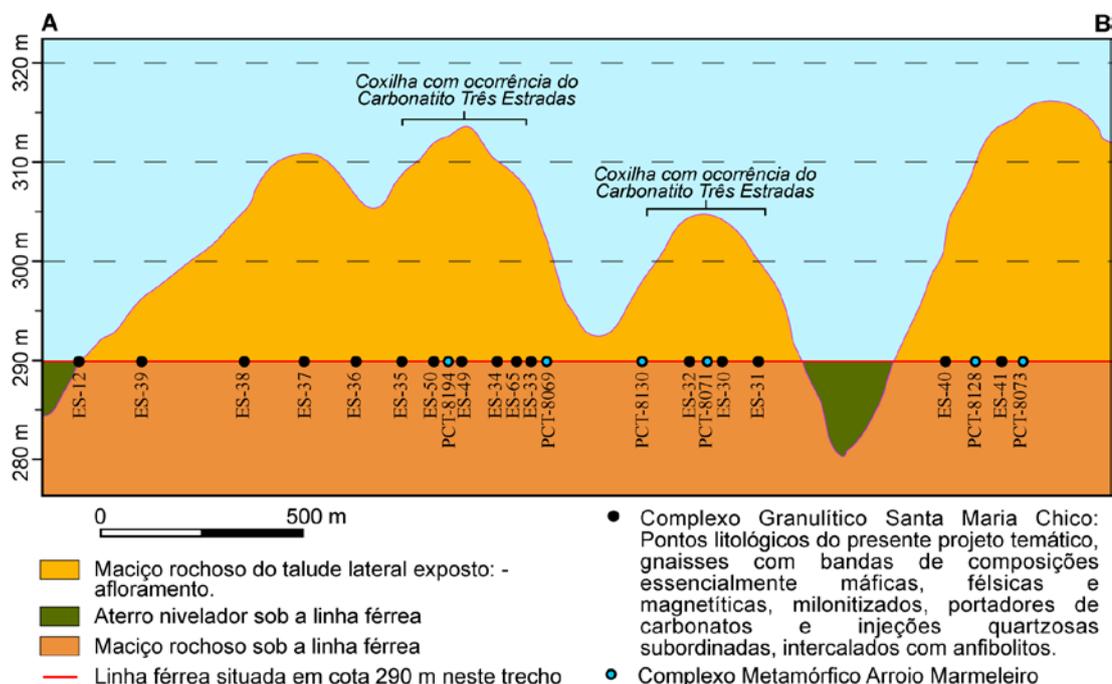


Figura 51 - Corte lateral apresentando a topografia ao longo do Perfil da Ferrovia.

Dentro da anomalia de vegetação anteriormente designada através de aerofotointerpretação foram identificadas em campo **rochas gnáissicas** portadores de uma significativa quantidade de carbonatos. As rochas gnáissicas descritas apresentam como principais estruturas o bandamento gnáissico cortado por fraturas e falhas. Há ainda dobras, feição muito menos comum nestas rochas do que as estruturas rúpteis e a foliação, mais ainda assim tendo importante significado geológico.

Pontualmente foram identificadas rochas vulcânicas com fenocristais recebendo a nomenclatura em campo de **andesitos** e ocorrendo como lajeados e matacões de dimensões reduzidas. Além destas também foram identificados afloramentos em meio às rochas gnáissicas com **anfíbolitos** que serão abordados de forma mais minuciosa adiante.

5.4.1. Milonitização e Informações Estruturais

Com relação às estruturas rúpteis, o **fraturamento** do tipo juntas, que refere-se a fraturas sem deslocamento relativo nas interfaces segundo Hodgson (1961) ou ainda podendo se tratar de juntas de alívio de Press *et al.* (2006), é notado em praticamente todos os afloramentos desta litologia gnáissica na área-alvo. As fraturas não possuem uma sistemática de ocorrência, são predominantemente caóticas, mesmo assim foram tomadas medidas visando correlacioná-las a partir de diferentes pontos descritos. Muitas das fraturas estão parcialmente preenchidas por carbonatos, o que fornece a estas o aspecto visual de uma “lente de carbonato” descontínua na linha de fraturamento, outras estão completamente preenchidas por carbonatos com espessuras variáveis, majoritariamente menores que 1 centímetro, e persistindo por toda a continuidade da fratura ou até o desaparecimento da mesma na rocha. Há fraturas preenchidas por epidoto e mesmo clorita, mas estas provavelmente estão associadas ao processo de recristalização ocasionado pelas falhas como descrito a seguir.

O diagrama de roseta das medidas de fratura (juntas), exibido na Figura 52, possui uma evidente assinatura norte predominando com assinaturas satélites desta, menores e dispersas. A menor concentração de orientações de fraturas está na direção leste-oeste enquanto a maior é norte-sul.

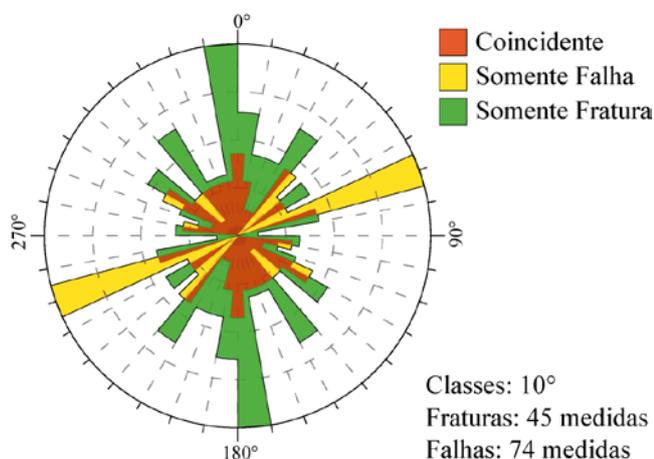


Figura 52 - Diagramas de rosetas sobrepostos da área alvo Três Estradas: em amarelo o diagrama de roseta do strike dos planos de falha medidos; em verde o diagrama de roseta do strike dos planos de fratura de juntas medidos; em vermelho as direções coincidentes de fraturas de juntas e falhas.

Com a intersecção do diagrama de rosetas de fraturas com o de falhas (Figura 52) é possível concluir que as fraturas podem não estar diretamente relacionadas ao sistema de falhas que operou nas mesmas rochas ou é possível supor que as fraturas em direções mais repetidas sejam conjugações rúpteis menos evidentes obliquas a ortogonais das falhas de orientação nordeste. É necessário atentar para o fato de que as rochas vistas no Perfil da Ferrovia apresentando fraturamento podem tê-lo devido às explosões da obra de abertura do próprio corte da ferrovia, perturbando a interpretação do sistema de falhas da Área-Alvo Três Estradas. O diagrama de roseta das medidas de falha exibe uma fortíssima assinatura para a classe centrada no azimute 070° - 250° . As demais medidas estão dispersas no diagrama de roseta apresentando duas lacunas principais: uma de orientação leste-oeste e outra lacuna do azimute 015° ao azimute 035° .

O **falhamento** nestas rochas é visto em praticamente toda a continuidade do Perfil da Ferrovia e em rochas dos arredores quando em afloramentos bem preservados. Os planos de falha de menor escala e com rejeitos mínimos são largamente encontradas no carbonatito (Figura 53) enquanto nas rochas encaixantes notam-se planos de falha desenvolvidos em maiores escala com rejeitos maiores.



Figura 53 - Carbonatito falhado, onde nota-se o deslocamento de até 3 cm entre duas faces separadas por uma falha. Nota-se também a grande quantidade de juntas nesta amostra, o que

é comum nos carbonatitos da área dada sua resistência menor comparada às rochas gnáissicas em que se hospeda.

A atuação das falhas é melhor notada quando esta corta transversalmente o perfil da ferrovia e não quando está paralela ao mesmo, sendo assim mascarada pelo perfil de corte. As feições interpretadas como fraturas de rocha que coincidem com o padrão direcional preferencial de falha de um afloramento são tidas como associadas à falha. A maioria dos espelhos de falha em escala de afloramento com no mínimo 1 metro de exposição contínua, possuem fortes evidências da atuação de rejeitos direcionais ou oblíquos.

Os planos de falha possuem estrutura planar marcante que pode ser originada por processos de **milonitização** geradores de uma fábrica distintiva: foliação finamente espaçada de caráter metamórfico, gerada sob regime dúctil em zonas de cisalhamento. A foliação milonítica é claramente visível em intervalos de zonas de falha onde ocorrem cominuição e recristalização e menos evidente em alguns espelhos de falha onde se observam planos portadores de estrias. A mensuração relativa de rejeitos na interface deformada não pode ser realizada por falta de marcadores bem definidos.

Foi assim adotada a denominação **milonito** para esta litologia, embora de acordo com a bibliografia o termo milonito (Quadro 2) ora seja referido como um termo genético relacionado a um processo gerador metamórfico como na concepção de Ruberti *et al.* (2000) ora como um termo puramente descritivo relacionado a características texturais, este último significado apresentado em Fettes & Desmons (2007), não definindo um mecanismo gerador em comum para milonitos. É comum nestes planos de falha a ocorrência de lentes monominerálicas alongadas, algumas com poucos milímetros de espessura, presentes nos planos da rocha milonitizada por extensões em escala de afloramento. Os minerais mais comuns constituintes destas lentes monominerálicas são carbonatos, mas identificam-se quartzo e mais raramente feldspato alcalino.

Estrutura	Nome	Componentes Matriz %	Fragmentos/ Porfiroclastos	Condições (deformação e temperatura)	Profundidade Aproximada
Não orientada	Brechas de falha	> 30%	> 5 mm	Rúptil < 250°	1-4 km
	Cataclasitos	50-90 %	< 0,2 mm		4-10 km
Orientada	Milonitos			> 0,2 mm	Dúctil > 250°

Quadro 1 - Classificação de rochas geradas em falhas segundo Ruberti *et al.* (2000).

É evidente a recristalização mineralógica intensa ocorrida nos planos de falha, se estendendo do interior dos planos para a rocha menos falhada circundante. Na interface centralizada de certas zonas de cisalhamento ocorre o processo de ultramilonitização, onde não há preservação de quaisquer feições originais da rocha devido à deformação total da mesma. Já na rocha circundante, deformada em menor intensidade onde também há menos recristalização, as feições originais do gnaiss são identificáveis de forma excelente.

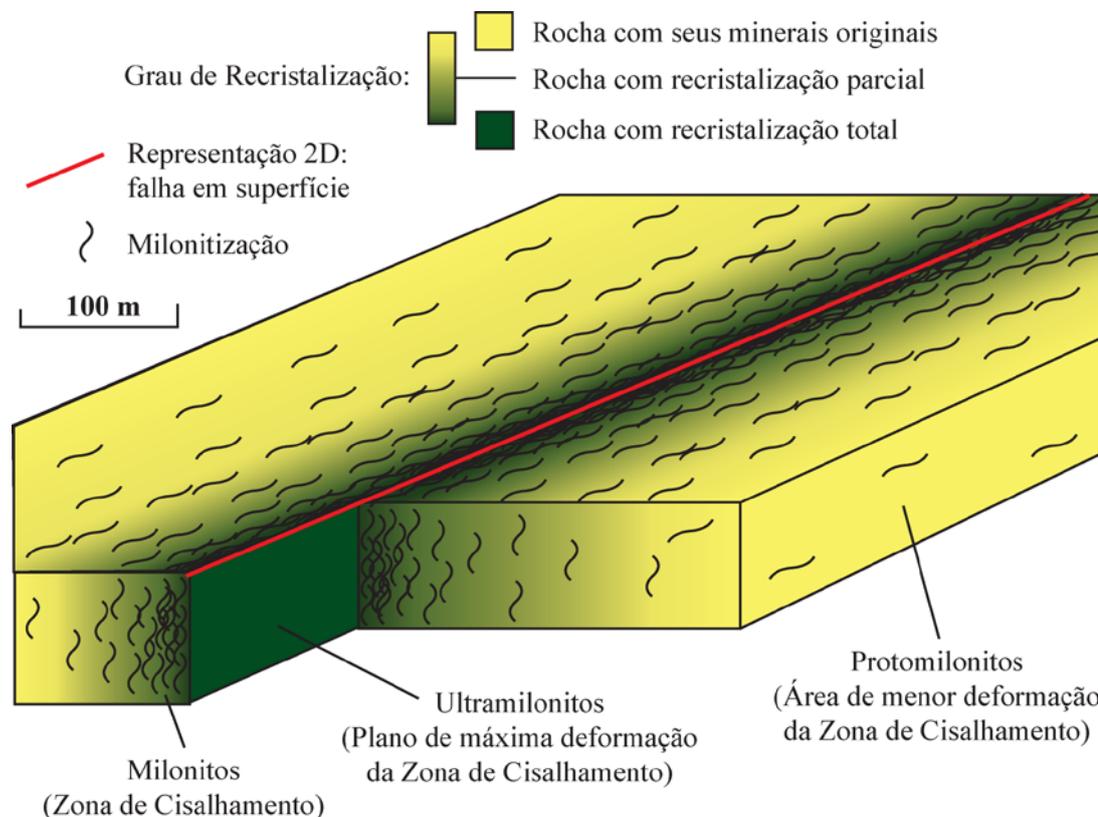


Figura 54 - Modelo local proposto da relação entre recristalização, milonitização e decorrente destruição da fábrica original da rocha gnáissica. Ilustração baseada em Ruberti *et al.* (2000) e Press

et al. (2006).

A fabrica original se mantém também no processo de milonitização em estágio inicial, chamado de protomilonitização.

A recristalização observada é do tipo **cloritização**, intensa nos espelhos de falha vistos paralelos ao perfil da ferrovia e visível em cortes transversais das falhas oblíquas ao perfil e em outros afloramentos de gnaisses da área. A relação entre cloritização e milonitização pode ser observada esquematicamente na Figura 54. Nos cortes transversais são visíveis desde falhas com cloritização restrita a poucos milímetros de espessura no espelho de falha até zonas de falhas com até 30 centímetros de espessura, geralmente de linearidade regular, onde a cloritização ocorre de forma uniforme em algumas zonas de falha e variável em outras. Em ambas ocasiões a cloritização por vezes parte de dentro da zona de falha e se projeta visivelmente na rocha não falhada. Os minerais gerados no processo de cloritização tratam-se de cloritas geradas em regime de baixa temperatura (Tabela 01). O estudo das cloritas foi desenvolvido utilizando técnicas de difratometria de raios-X e espectrometria do infravermelho por RUPPEL (2012).

Tabela 1 – Quadro comparativo de Ruppel (2012) das estimativas de temperatura de equilíbrio das cloritas da zona de falha de Ibaré segundo diferentes geotermômetros.

Autor	method	Chlorite Ibare Fault (geotermometria)
Cathelineau Nieva (I 985)	$T(^{\circ}\text{C}) = 213,3\text{AlIV} + 17.5$	274°C
Cathelineau (1988)	$T(^{\circ}\text{C}) = -61.92 + 321,98\text{AlIV}$	326°C
Jowett (1991)	$T(^{\circ}\text{C}) = 319\text{AlIVc} - 69$ $\text{AlIVc} = \text{AlIV} + 0.1[\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})] = 1,21$	318°C

A rocha original (Figura 55), quando afetada em menor grau pela cloritização recebeu a classificação de **clorita biotita gnaisse**, é caracterizada pelo predomínio volumétrico de bandas máficas com grande quantidade de biotita, mineral tido como mais susceptível à cloritização dada sua constituição e retículo cristalino.

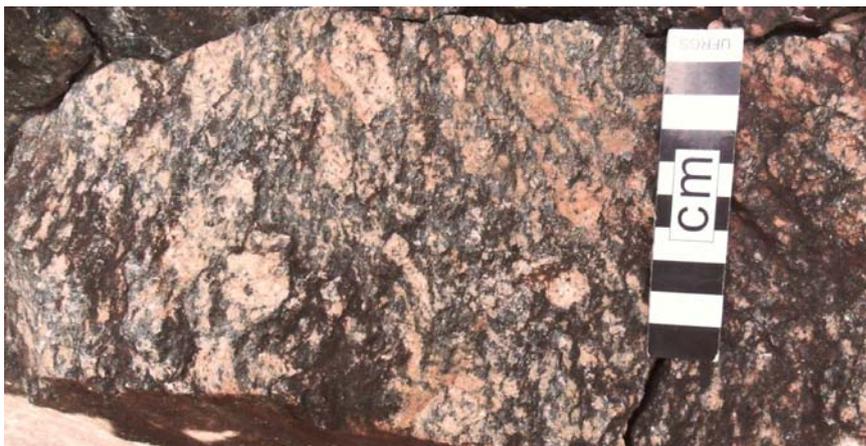


Figura 55 - Augen-gnaiss com bandas de composição máfica e félsica e com pórfiros de feldspato originais. (Não-Milonitizado e Não-Cloritizado)

Em ordem de recristalização as rochas receberam as seguintes denominações: **protomilonito gnáissico** (Figura 56), **clorita milonito gnáissico** (Figura 57) e **clorita ultramilonito** (Figura 58). Esta última rocha mencionada, o clorita ultramilonito, por vezes descrito em campo também como um biotita clorita ultramilonito, satisfaz certos requisitos texturais e mineralógicos que constam em Fettes & Desmons (2007) que permitem enquadrá-lo ainda em uma categoria descritiva mais específica de rochas ao denominá-lo como **filonito**. Um filonito deve ser um milonito necessariamente rico em filossilicatos que proporcionem a rocha um forte brilho sedoso, como é observado neste clorita ultramilonito.



Figura 56 - Protomilonito Gnáissico (não-cloritizado) onde a composição das bandas ainda é a original, sendo elas máficas e félsicas, predominando as félsicas nesta fotografia. A milonitização não está em um estágio avançado, estando discordante com o bandamento neste trecho da rocha. O bandamento está comprimido pelas pressões relacionadas à protomilonitização que atuou. Ocorrem veios de espessura milimétrica e de composição carbonática discordantes com o bandamento e como demarcadores do plano de protomilonitização desta amostra.

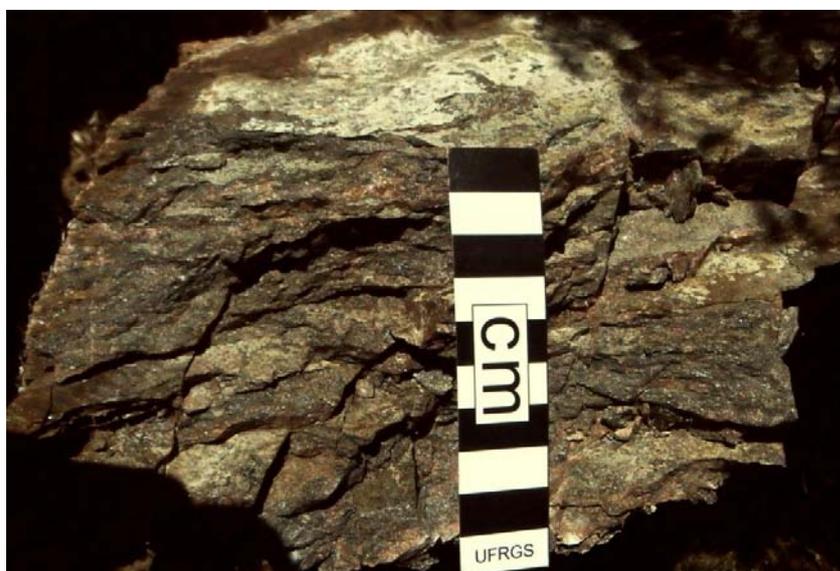


Figura 57 - Clorita Milonito Gnáissico, cuja composição mineralógica já é significativamente clorítica devido à recristalização metamórfica e onde as feições originais do bandamento já não são visíveis devido à milonitização da amostra, sendo que a foliação observada é a milonítica.



Figura 58 - Clorita Ultramilonito, a partir do gnaiss original esta amostra se encontra totalmente milonitizada e totalmente cloritizada, sem traços da textura e mineralogia originais da rocha, tendo ainda como seus constituintes uma considerável quantidade de biotita e possivelmente mais algum filossilicato presente. Na sua assembleia mineralógica ocorre ainda epidoto e carbonato, restritos a pequenas “folhas”, lentes estiradas ou fraturas preenchidas, concordantes com a foliação milonítica.

Tanto nos cortes transversais no perfil da ferrovia quanto em paralelo ao perfil da ferrovia e em outros afloramentos da área é possível notar a verticalidade de praticamente todas as falhas e as medidas plotadas em estereogramas corroboram esse comportamento preferencial.

Foram gerados dois estereogramas a partir das medidas de falhas tomadas em campo. Através da comparação entre ambos e da análise individual de cada um destes podem ser elaboradas conclusões sobre o arcabouço estrutural da área. As lineações contidas nestas estruturas tratam-se de estrias (Figura 59), ocorrem nos espelhos de falhas preferencialmente no próprio gnaiss, ora em planos onde houve cloritização ora em planos no próprio gnaiss sem cloritização ou com a mesma em um nível inicial de cloritização estando assim pouco visível.

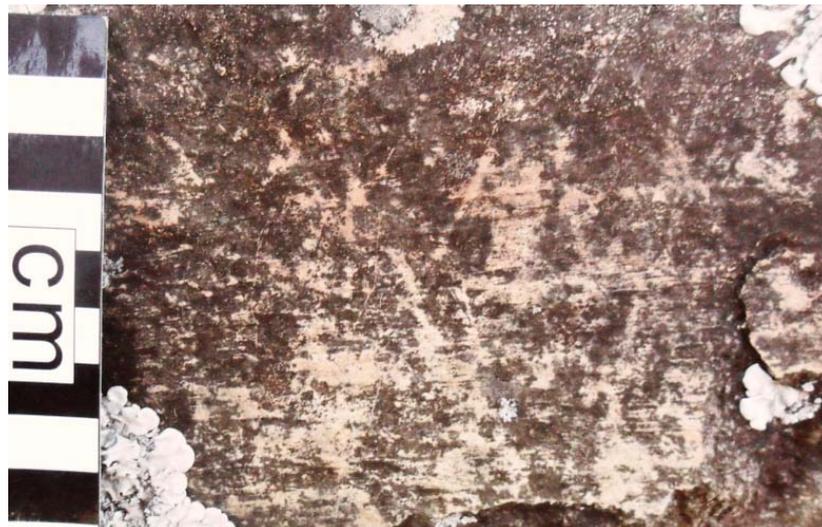


Figura 59 - Textura de um espelho de falha não-cloritizado ou minimamente cloritizado porém muito bem estriado.

As falhas podem de forma prática ser divididas de acordo com o grau de cloritização, com um extremo intensamente cloritizado e incluindo proto-milonitos na rocha gnáissica lateral à zona de falha em escala de afloramento e com outro extremo de uma falha em um único plano sem evidências de cloritização. Ainda assim, esse extremo é o mais raro nas falhas da área, pois por menos visível que seja a cloritização, as evidências são de que cloritas ocorrem na forma de uma lamínula nestes espelhos de falha onde as cloritas são pouco visíveis, apontando para uma cloritização incipiente. Por vezes as estrias ocorrem cortando os carbonatos contidos nestes planos de falha cloritizados ou não-cloritizados.

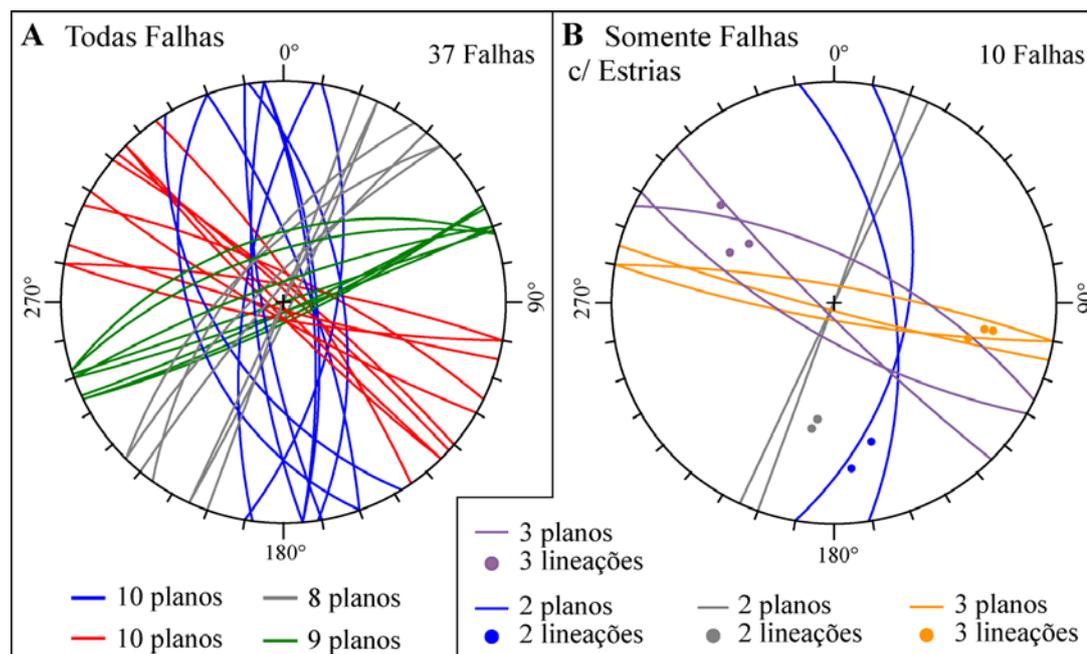


Figura 60 - Estereogramas das falhas: A - Plotagem de todas medidas de falhas, incluindo as com planos estriados. B - Plotagem das medidas de falhas somente com planos estriados.

A Figura 60 exibe os estereogramas gerados com as medidas de falhas. No **estereograma A** estão plotados os grandes círculos dos planos de falha medidos no gnaisse que circunda o carbonatito, tanto dos que possuem lineações contidas quanto dos que não possuem. As lineações foram omitidas do estereograma A para não o poluírem e constam apenas no estereograma B. As falhas foram agrupadas para fins interpretativos em quatro conjuntos de falhas comportamentalmente similares entre si. As **falhas em cinza** são verticais e muito próximas a verticais e estão orientadas na direção nordeste, exatamente entre os azimutes 020° e 045° , com seus mergulhos apontando em média para noroeste. As **falhas em azul** apresentam planos distribuídos em uma faixa norte-sul com uma variação bem maior de mergulhos, indo de oeste e chegando a leste com poucos mergulhos verticais. Na direção noroeste as **falhas em vermelho** são todas praticamente verticais em uma guirlanda ampla do azimuth 280° ao 335° . O último agrupamento de grandes círculos ressalta as **falhas em verde** cujos mergulhos mais acentuados apontam em média para norte-noroeste e os demais são verticais, com subverticais no quadrante sudeste. Este último

agrupamento é o mais bem concentrado direcionalmente, todas medidas estão entre os azimutes 064° e 072°.

Baseado no arcabouço prévio de falhas locais conhecidas e já mapeadas é possível interpretar que a assinatura das falhas em vermelho reflete um sistema pertencente à borda sudoeste da zona de falha Suspiro-Linhares que tem orientação média para o azimute 310°, i.e. direção N50W, segundo LUZARDO & FERNANDES (1990). Localmente a orientação medida da zona de falha Suspiro Linhares conforme interpretada pelos fotolineamentos do mapa de blocos morfoestruturais está no azimute 320°, i.e. na direção N40W. Ambas orientações coincidem perfeitamente com a zona abrangida por este sistema de falhas. É possível que seja um sistema de falhas paralelo situado no bloco sudoeste, podendo mesmo ser um sistema satélite à própria falha principal Suspiro-Linhares. Como a falha Suspiro-Linhares é tida como de movimentação sinistral, durante a sua movimentação, o sistema de falhas em vermelho, paralelo ou co-genético pode ter sido parcialmente rotacionado no sentido anti-horário realinhando-o e reorientando-o praticamente para leste-oeste, este modelo está representado na Figura 61. Assim, deste sistema de falhas em vermelho contido no estereograma A podem ser vistas no estereograma B apenas as falhas detentoras de estrias, que localmente são as de orientação menos próximas da orientação da Falha Suspiro-Linhares, e que seriam a parte do sistema rotacionada no sentido anti-horário. Na figura abaixo é representado um modelo em planta aplicável para o estudo deste caso, onde uma zona de cisalhamento sinistral tal qual a Falha Suspiro-Linhares corta feições estruturais dotadas de orientação e contidas nos blocos cisalhados. Esse tipo de situação envolve dobras de arraste em ambos os lados da superfície cisalhante. Pode ser notada a relação entre a direção de alinhamento original de estruturas prévias e sua rotação com a proximidade da zona de cisalhamento, estando assim quanto mais próximas à interface de cisalhamento mais sujeitas à sua deformação.

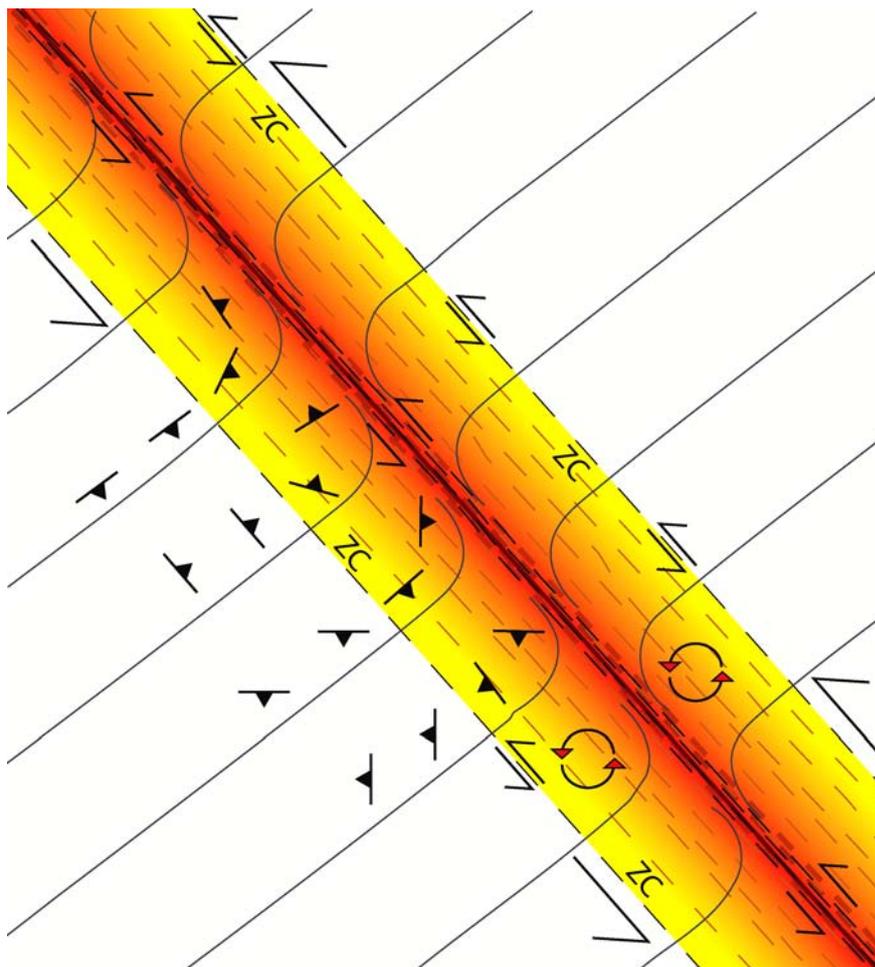


Figura 61 - Modelo estrutural local de deformação provocada pela zona de cisalhamento Suspiro-Linhares. O modelo é consistente com o esquema mostrado no extremo NW da Figura, pois as orientações originais dos planos (falhas, bandamentos/ foliações) era NE.

No **estereograma B** da Figura 60 estão plotados somente os grandes círculos dos planos de falha que contém lineações. As lineações estão representadas pelos pequenos pontos grossos e coloridos no estereograma. Os planos de falha cujas lineações medidas em campo não caem próximos aos mesmos, foram filtrados, assim selecionou-se após a filtragem apenas 10 pares de estrias-falhas, pois são estes os planos de falha cujas medidas de lineações em campo estão plotadas de forma coincidente ou próxima aos seus grandes círculos, ou seja, medidas cujas estrias devem estar contidas no plano e portanto mais confiáveis. Os planos apresentam alguma oscilação e mais de uma medida foi tomada para o mesmo plano entrando no estereograma a medida mediana representativa destes. Neste estereograma B o sistema de falhas em vermelho do estereograma A

anterior é desmembrado em dois subconjuntos: as falhas que possuem estrias mergulhando para o quadrante noroeste, assinaladas em púrpura; e as falhas que possuem estrias mergulhando para o quadrante sudeste, assinaladas em laranja. Devidamente interpretadas, por estarem simetricamente em sentidos opostos no diagrama e contidas em planos médios que distam poucos graus um do outro (muito próximos) e ainda concentradas em duas áreas limitadas do estereograma, devem tratar-se de estrias pertencentes a um sistema em comum, porém em momentos distintos. Seria esse sistema em comum relacionado à zona de falha Suspiro-Linhares, e essas estrias representam deslocamentos não contemporâneos de diferentes movimentações dos mesmos blocos crustais, num dado momento com uma inclinação conhecida para noroeste e noutro dado momento com uma inclinação conhecida para sudeste. Tal possibilidade pode ser interpretada através de basculamento, por exemplo, de um dos dois blocos envolvido no movimento ou do conjunto devido a uma tectônica de maior escala. O sentido de movimento não é conclusivo baseado nestes dados, pois a estria pode ser gerada pelo cisalhamento atuando num mesmo plano em qualquer dos dois sentidos possíveis, podendo até ser contrária ao movimento regular em algum dos momentos de deformação, ou ainda localmente contrária ao movimento padrão da zona de cisalhamento em algum ponto específico dentro dela.

Uma terceira concentração de estrias ocorre na porção sul do estereograma, em algumas das falhas dos agrupamentos em cinza e azul destacados do estereograma A. Algumas ocorrem em planos de falha verticalizados e outras em planos de falha com mergulhos de $\sim 60^\circ$ para leste, respectivamente em cinza e em azul. A ausência de estrias nesses planos de falha no quadrante nordeste pode ser resultado de não terem sido encontrados afloramentos em que tal situação ocorresse ou refletem uma atividade de falha sem mudanças significativas na inclinação das movimentações entre os blocos envolvidos, mesmo que com possíveis reativações.

Nos diagramas quantitativos de rosetas da Figura 62 estão plotadas as direções em planta ou *strikes* das falhas medidas.

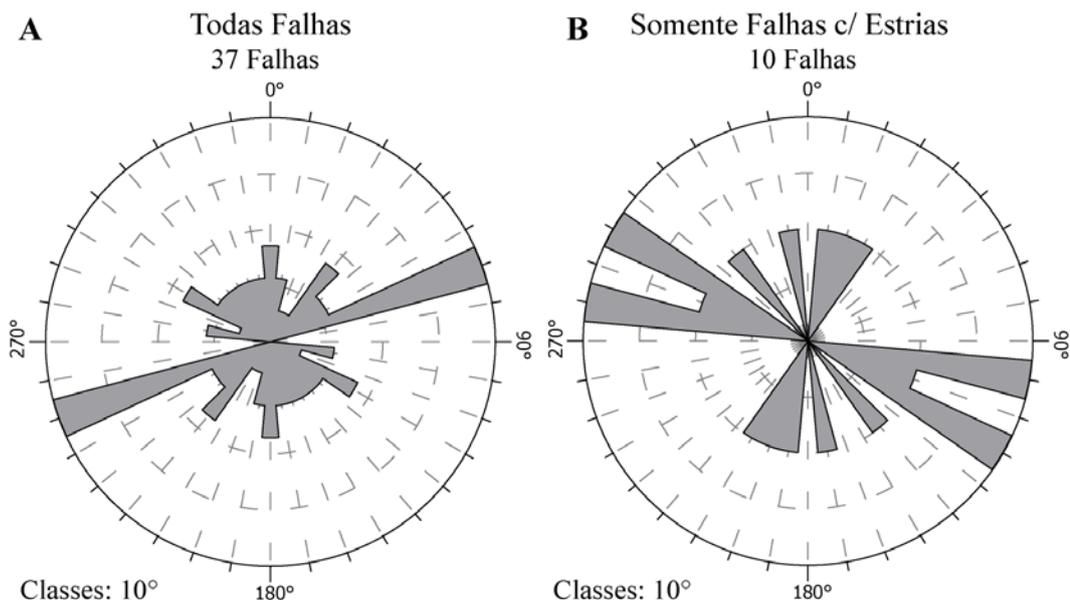


Figura 62 - Diagramas de rosetas das direções das falhas (*strikes*): A - Plotagem de todas medidas de falhas, incluindo as com planos estriados. B - Plotagem das medidas de falhas somente com planos estriados.

O **diagrama de roseta A** da Figura 62 tem um caráter de concentração unimodal, onde o pico é o mesmo que o agrupamento de falhas em verde visto no estereograma A. As demais direções de falhas se distribuem irregularmente pelo restante do diagrama com nenhuma ocorrência numérica expressiva, estando principalmente espalhadas no par de quadrantes noroeste-sudeste. O **diagrama de roseta B** da Figura 62 tem um caráter de concentração bimodal, coincidindo com o agrupamento de falhas em vermelho visto no estereograma A, e numa observação ainda mais detalhada quando comparado com o estereograma B seus picos coincidem com os subconjuntos de falhas em laranja e púrpura. As demais medidas estão dispersas pelo diagrama de roseta sem padrão. Seguindo o mesmo modelo já exposto, a deformação ocorrida na borda sudoeste da zona de falha Suspiro-Linhares pode ter sofrido rotação, o que altera a orientação fazendo-a sair de um panorama regional.

Em diversos afloramentos são encontrados planos de falha ortogonais ou levemente oblíquos (Figura 63), sendo a visualização tridimensional dessa situação em campo facilitada pelos planos de falha da área que geralmente são de verticais a subverticais.

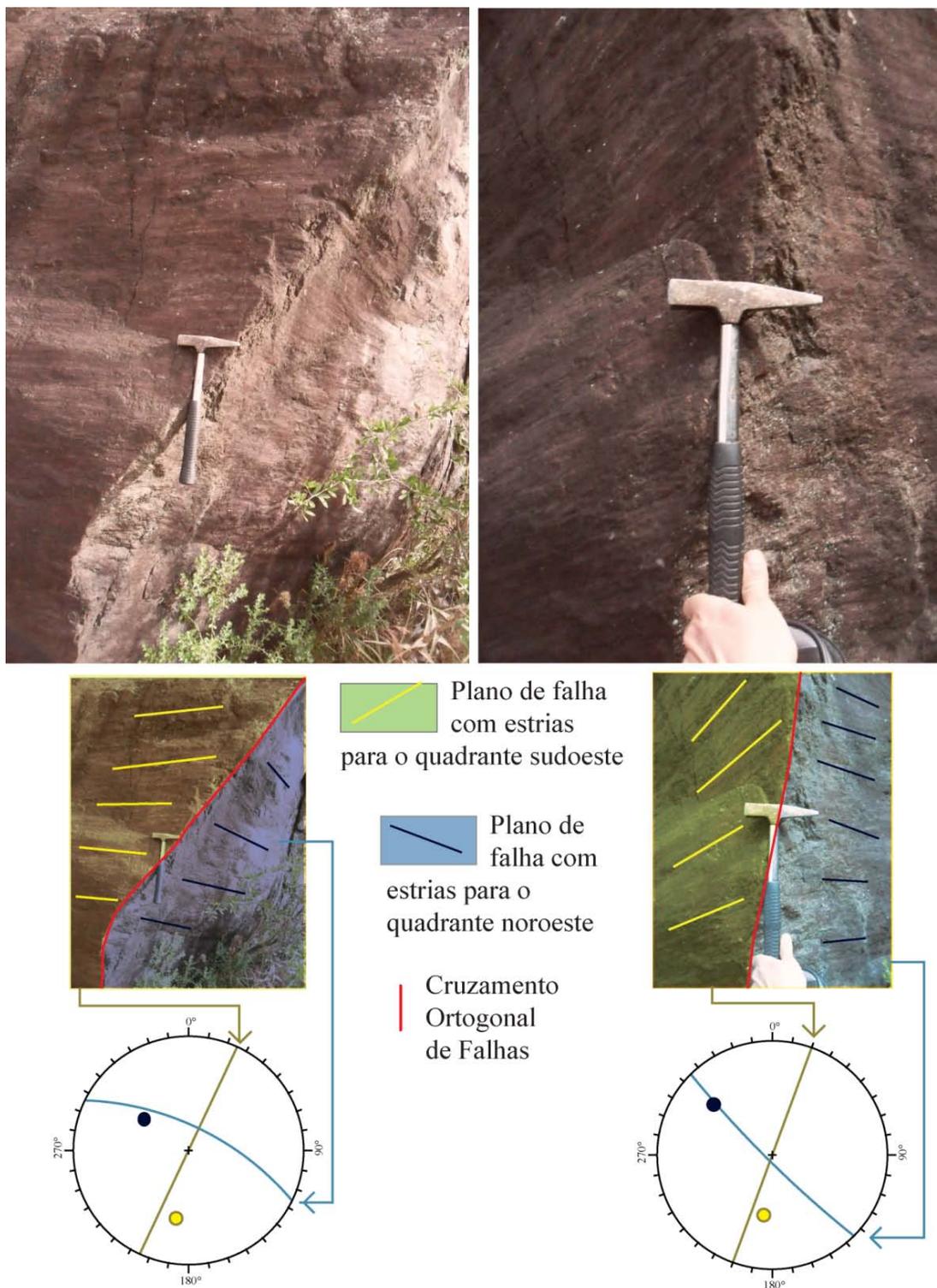


Figura 63 - Fotografias de campo e plotagens estereográficas de falhas estriadas na rocha gnáissica em cruzamentos ortogonais a oblíquos com menor recristalização metamórfica, do tipo cloritização.

No diagrama de roseta B e no estereograma B essa situação é bem visível pelos sistemas de falhas que se entrecruzam quase em ângulos

retos, e o mesmo é muito mais marcado no mapa de fotolineamentos traçados para a Área-Alvo Três Estradas.

A angularidade ortogonal entre os dois principais sistemas de falhas fica mais evidenciada quando observado o diagrama estereográfico quantitativo de densidades (Figura 64) gerado no programa Stereo32. O **diagrama de densidade A** tem caráter unimodal e exibe um pico de densidade de alto ângulo (vertical) nordeste-sudoeste, correlacionável com a Falha Cerro dos Cabritos, a estrutura mais próxima, mais extensa e mais pronunciada na região. O **diagrama de densidade B** exibe duas assinaturas em um caráter bimodal, dois picos, ambos em ângulos médios a altos (60°-90°) praticamente ortogonais. Um pico também correlacionável com a Falha Cerro dos Cabritos, e o outro pico correlacionável a Falha Suspiro-Linhares, de direção noroeste-sudeste.

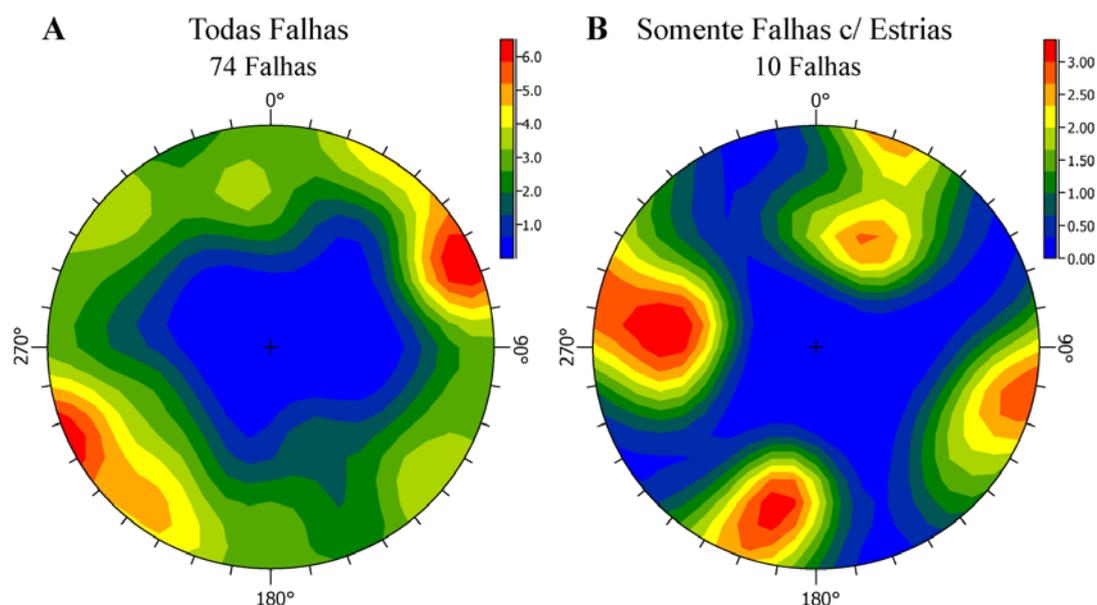


Figura 64 - Diagrama estereográfico de densidades confeccionado a partir das medidas dos pólos de planos de falhas plotadas: A - Densidade a partir da plotagem de todas medidas de falhas, incluindo as com planos estriados. B - Densidade a partir da plotagem das medidas de falhas somente com planos estriados.

Com relação a feições geradas sob regime dúctil é necessário mencionar o **dobramento** visto em diferentes escalas nas rochas carbonatíticas (Figura 65) e suas gnáissicas hospedeiras. Geralmente são

pequenas dobras de poucos centímetros, presentes pontualmente em determinados afloramentos.



Figura 65 - Fotografia evidenciando dobra em afloramento de carbonatito.

As medidas de falhas ocorrentes na área são apresentadas em planta na Figura 66-67 onde estão cruzadas com informações como as litologias nos pontos em que ocorrem e os fotolineamentos traçados para a Área-Alvo Três Estradas.

Estrutural: Falhas

-  ⁸⁶ Medida de falhamento em gnaiss máfico-félsico
-  ⁸⁶ Medida de falhamento em gnaiss máfico-félsico com ocorrência de clorita ultramilonito
-  ⁸⁶ Medida de falhamento em arenito do Grupo Maricá
-  ⁸⁶ Medida de falhamento em rocha carbonatítica
-  Carbonatito Três Estradas

Aerofotointerpretação

-  Fotolineamentos de Vale
-  Fotolineamentos de Crista
-  Outros Fotolineamentos: Tonais, Quebra de Relevô e Feições Texturais
-  Hidrografia

Malha Viária

-  Estrada
-  Estrada de Ferro

Rótulos e Projetos Referentes

- ES Pontos descritos por Marcus Vinicius Dorneles Remus, Norberto Dani e Eiel Mertins Senhorinho durante o Trabalho de Campo do presente Projeto Temático em Geologia.
- CM Pontos cedidos pela geóloga Cimara Monteiro.
- GN Pontos descritos por João Angelo Toniolo, Giovani Nunes Parisi e Carlos Antonio Grazia pelo Projeto Agrominerais do Rio Grande do Sul realizado pela CPRM.

Figura 66 - Legenda da Figura 67.

O que se nota é que as medidas de falhas tomadas em campo geralmente têm como reflexo algum fotolineamento traçado próximo ou mesmo sobre o ponto em que foram tomadas tais medidas. Alguns destes fotolineamentos podem ser vistos orientados aproximadamente de acordo com a orientação da medida de falha, sendo, portanto, uma indicação geomorfológica da estrutura geológica. Não é possível relacionar estritamente as falhas medidas a algum tipo específico de fotolineamento traçado. Também nota-se na vista em planta a orientação preferencial nordeste-sudoeste de grande parte das falhas medidas.

5.4.2. Bandamento Gnáissico e Informações Litológicas

Com relação às estruturas metamórficas observadas nestas rochas, o **bandamento gnáissico** é o mais marcante à primeira vista, seu espaçamento varia de bandas milimétricas a bandas com até 10 centímetros chegando a haver porções da rocha onde as bandas são de uma mesma composição e não é possível mensurar se as mesmas tratam-se de um única banda com metros de extensão, ou ainda dezenas, mesmo centenas de bandas milimetricamente espaçadas formando esta porção contínua de mesma composição. No caso, isto é necessariamente notado como bandas máficas conforme descritas a seguir. As medidas de bandamento gnáissico tomadas em campo estão exibidas no formato de estereograma (Figura 68) e diagrama de roseta (Figura 69), e o que se observa de ambos é a orientação leste-oeste preferencial do bandamento, com uma tendência de mergulho sub-vertical, e uma orientação preferencial secundária para o azimute 060° . Esta orientação sub-preferencial é a mais coincidente com a Falha Cerro dos Cabritos ressaltando que os bandamentos podem estar rotacionados e dobrados em diferentes áreas e em diversas escalas decorrente da influência da Falha Suspiros-Linhares conforme o modelo da Figura 60.

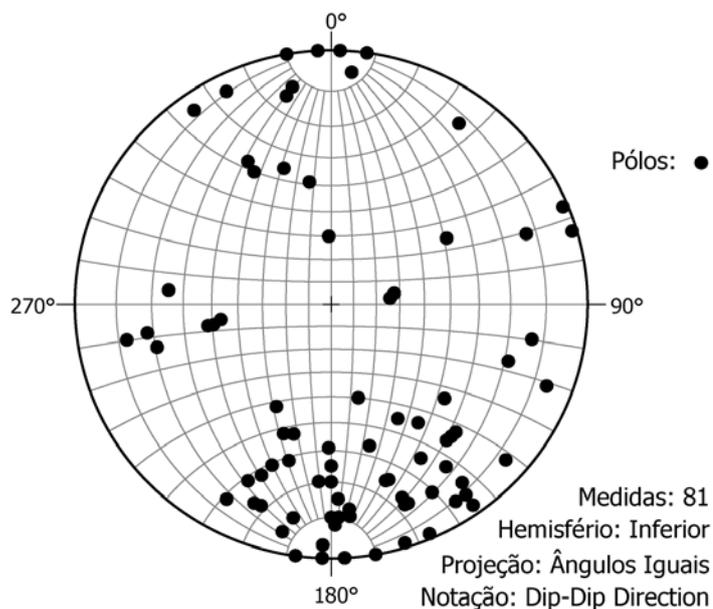


Figura 68 - Estereograma das medidas de bandamento obtidas na Área-Alvo Três Estradas.

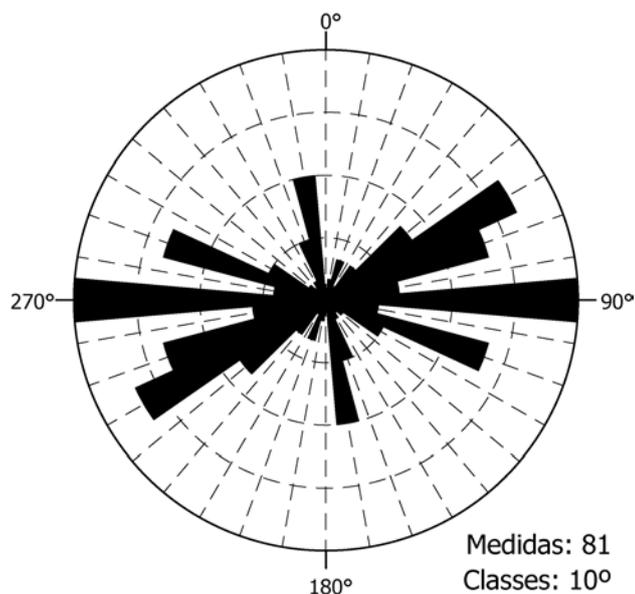


Figura 69 - Diagrama de roseta das medidas de bandamento obtidas na Área-Alvo Três Estradas.

A composição das bandas identificadas é variada, a possibilidade de interpretar diferentes bandas mesmo à olho nu é notável nas rochas desta área. As principais bandas vistas foram as do bandamento típico de alternância máfico-félsico, cujas **bandas máficas** foram descritas como sendo bandas essencialmente constituídas de biotita, anfibólio e clorita com quantidades pouco significantes de magnetita e/ou hematita, incluindo porções com anfibólio em formato pé-de-galinha (textura decussada), e

cujas **bandas félsicas** foram descritas como constituídas predominantemente por feldspato alcalino e quartzo com porcentagens menores de biotita, plagioclásio e magnetita e/ou hematita. Também são notáveis **bandas feldspáticas alcalinas** compostas exclusivamente por feldspatos alcalinos de coloração alaranjada ou rosa típica com alguns centímetros de espessura, geralmente em um conjunto de intercalações de bandas félsicas. Em toda área de estudo de campo onde aflorou esta litologia gnáissica o bandamento era dominado por bandas máficas em relação as bandas félsicas. Foi utilizada a nomenclatura **bandas magnetíticas** para faixas de poucos milímetros de espessura concordantes com as bandas máficas predominantes e compostas unicamente de magnetita (Figuras 70 e 71). Estas bandas magnetíticas quando encontradas associadas ao carbonatito eventualmente apresentam de 5 a 10 cm de espessura, com limites bem definidos no contato com a porção de composição carbonatítica em faces frescas.



Figura 70 - Gnaiss com bandas de composição máfica e magnetítica predominantes e bandas félsicas subordinadas, além da presença de veios de carbonatos concordantes com o bandamento.

Em afloramentos alterados há uma forte alteração de coloração avermelhada nas bandas magnéticas porém estas se mantêm rígidas e bem preservadas em relação a porção limítrofe de rocha carbonatítica com coloração amarelada ou esbranquiçada e ainda contrastando em grau de alteração pois a rocha carbonatítica mais friável esfalela-se muito facilmente e forma sulcos.



Figura 71 - Seixos de bandas magnéticas em leito fluvial. Nota: Impossível utilizar a bússula para tomar medidas quando próximo a estas rochas.

Como pode ser notada na Figura 72, a presença de bandas magnéticas dentro da rocha carbonatítica abre a possibilidade de interpretação do carbonatito como uma “banda carbonatítica” desta rocha, sendo ela parte de um gnaissado dotado de bandas magnéticas e carbonatíticas compartilhadas entre si por diferentes porções em suas áreas de ocorrência. Dada sua altíssima susceptibilidade magnética, a composição magnética destas bandas permite relacionar a susceptibilidade magnética positiva da área em que ela ocorre e que engloba também a ocorrência carbonatítica.



Figura 72 - Carbonatito foliado portador de bandas de composição magnetíticas e máficas.

Para o que aparentemente são intrusões de composição granítica foi utilizada a terminologia **bandas de composição granítica** para porções de mineralogia essencial quartzo-feldspática com biotita associada em menor quantidade, ainda textura plutônica é vista nesses corpos de geometria aparentemente tabular e concordantes com o bandamento. Essa terminologia não está adequada, apenas é utilizada provisoriamente pois essa litologia pode ser interpretada como espessos veios graníticos ou diques graníticos relacionados aos complexos intrusivos que ocorrem na região mas não especificamente neste local, assim sendo também poderíamos utilizar o termo meta-granito embora ainda não esteja claro se são de fato líquidos intrudidos relacionados as intrusões dos granitos da região.

Também ocorrem raras **bandas aplíticas**, de textura afanítica, apenas localizadamente em certos afloramentos, que devem tratar-se de aplitos metamorfizados. Esta rochas carecem de dados petrográficos de lâminas do contato entre esta litologia e as bandas vizinhas. As informações obtidas à lupa indicam que as injeções sofreram metamorfismo, pois estão plenamente concordantes com o bandamento.

Ocorrem ainda corpos alongados de rocha máfica de textura afanítica variando até granular fina-média com composição mineral essencial de anfibólio e plagioclásio que apresentam em média 50 cm de espessura e tabularidade praticamente regular com orientação sub-vertical a vertical, ora concordantes ora discordantes com o bandamento gnáissico local. Essa rocha metamórfica máfica foi reconhecida como um **anfibolito**. Seus contatos com a rocha gnáissica são complexos, havendo leve cloritização das bandas máficas especialmente em suas bordas. Alguns corpos observados possuem geometria tabular e pouca ou nenhuma interação com bandas félsicas e graníticas. Estes metamafitos (**bandas anfibolíticas**) podem ser contemporâneos ou posteriores aos gnaisses (concordantes ao bandamento, distinguíveis por terem textura e tonalidade diferentes das bandas máficas e félsicas). Nada impede que ambos ocorram: corpos de anfibolitos posteriores ao evento gerador de bandamento e bandas anfibolíticas contemporâneas ao evento gerador de bandamento.

É possível uma interpretação do carbonatito como se tratando de uma **banda carbonatítica** da rocha gnáissica, uma vez que um corpo carbonatítico tenha participado da deformação geradora do bandamento ainda que apenas parcialmente no fim deste evento e no momento de sua intrusão. Como banda carbonatítica, sua foliação trata-se de uma foliação metamórfica com participação de dobras, estas presentes em certas porções do carbonatito e encontradas dobrando a foliação.

Os **carbonatos** encontrados nos carbonatitos tem sua coloração variando de rosa a branco e geralmente aparentam estar corroídos dado o intemperismo atuante nos afloramentos. Os carbonatos encontrados nas rochas locais variam de carbonatos brancos a carbonatos rosas, com alguns grãos de cor lilás a roxo ocorrendo de forma esparsa dentro dos volumes de carbonato mais significativos. A ocorrência destes carbonatos se dá de diversas formas que podem ser visualizadas nas fotografias da Figura 73 e que estão aqui explicadas. Os carbonatos apresentam-se preferencialmente na forma de **veios**, cuja maioria possui até 1 cm de espessura, mas variam de vênulas praticamente invisíveis à olho nu, identificáveis em campo apenas através de lupa de mão, a veios de até 10 cm. Ocorrem ainda

associados a veios de quartzo, de espessuras mais proeminentes, em porcentagem relativamente menor dentro dos mesmos mas ainda assim presente na forma de veios dentro do veio ou em determinados pontos ocorrendo num veio em comum intercalações de veios ou grãos de quartzo com veios ou grãos de carbonato. Nota-se em dado momento um veio de quartzo cortando um veio de carbonato e em outro o oposto. Os carbonatos também estão presentes na forma de pequenas estruturas geométricas circulares a ovais ou mesmo elípticas encurvadas, de reduzidas dimensões visíveis na rocha, preferencialmente nas bandas de composição máfica, com até 3 cm de diâmetro no máximo. Estas **estruturas circulares** diminutas eram vistas como formas ovais e geralmente tratavam-se espacialmente de elipsóides de carbonato ocorrendo isolados pontualmente na rocha, tal qual amígdalas preenchidas por carbonato, com os cristais carbonáticos incrustados nas bordas da estrutura e encontrando-se no ponto central. Por vezes estas formas arredondadas eram a exposição de pequenas **estruturas cilíndricas** feitas inteiramente de carbonato que penetravam na rocha por continuidades variáveis na escala dos centímetros. São comuns auréolas de algum tipo de oxidação no entorno dessas pequenas formas, cujos tons tendem ao laranja, comumente vermelho e ocre.

Associados às estruturas ocorrem em algumas porções veios de carbonatos perfeitamente concordantes com a foliação da rocha e mais marcadamente ocorrem **carbonatos em espelhos de falha** com geometria laminar, excelente continuidade lateral, persistindo de forma espaçada e irregular mas por alguns metros visíveis do espelho de falha, em alguns pontos em toda sua continuidade. Esse carbonato acompanhando as falhas por vezes apresenta alguma estrutura linear na sua superfície, provavelmente estriamento, a qual foi medida quando no afloramento *in situ*.

Estas diferentes formas de ocorrência dos carbonatos está apresentada na Figura 73.



Figura 73 - Gnaisses portadores de carbonatos em: A - espelho de falha, B - estrutura circular a elipsoidal, C - estrutura cilíndrica, D - veio individual em fratura, E - rede de vênulas, F - veio bem desenvolvido.

5.5. Interpretações Finais

A mensuração superficial do carbonatito ficou impossibilitada pela descontinuidade dos afloramentos grande da cobertura vegetal do sítio, estando o corpo situado dentro da Anomalia de Vegetação aerofotogeológica. O corpo carbonatítico pode ser interpretado de diversas formas com relação ao seu posicionamento na sua hospedeira. A primeira interpretação válida a constar neste trabalho é de que os pontos de carbonatito sejam considerados como lentes dentro da rocha gnáissica hospedeira, explicando assim o espalhamento dos afloramentos em uma área com ocorrências de rochas gnáissicas entre os pontos onde ocorre carbonatito ou praticamente entre estes pontos. A segunda interpretação é de que o corpo esteja disposto dentro de uma faixa limitada. Esta faixa por sua vez deve coincidir com a zona de cisalhamento na qual o corpo se posiciona ou deve coincidir com extremos paralelos ao bandamento gnáissico da rocha hospedeira onde definitivamente deixe de ocorrer rocha carbonatítica. Portanto no interior desta faixa a litologia não seria de um maciço sendo exclusivamente carbonatítico, mas, como uma concentração de fragmentos de rocha carbonatítica envoltos pelo gnaisse. Não há como propor uma geometria de ocorrência do carbonatito dentro do gnaisse nesta área sem dados de campo mais volumosos. O carbonatito não foi mensurado em campo. A sugestão é que um mapeamento de detalhe no sítio seja necessário para sanar as dúvidas que se construíram sobre a relação do carbonatito com sua encaixante a partir deste trabalho.

Graças a todo o volume de dados obtidos com o trabalho de campo na Área-Alvo Três Estradas, propõe-se que o Carbonatito Três Estradas seja enquadrado na classificação morfológica aplicada aos complexos carbonatíticos como sendo do Tipo Linear. Ainda que o corpo seja interpretado como lentes, o arcabouço de sua estruturação é linear, dado sua lenticularidade e caso a mesma seja comprovada no futuro. Mesmo que o carbonatito seja tratado como uma banda carbonatítica da rocha gnáissica, a sua estruturação também permanece linear para a classificação morfológica.

Diferentes interpretações possibilitaram imaginar diversos modelos genéticos estruturais levando em consideração a foliação da rocha carbonatítica, os dois modelos mais promissores estão sintetizados no capítulo de Discussão e Conclusões deste trabalho e foram nomeados como Modelo sin-deformacional ao evento gerador de bandamento e Modelo pós-deformacional ao evento gerador de bandamento. As falhas associadas a zona de cisalhamento evidentemente tiveram um envolvimento sin-deformacional de fluidos carbonáticos, explicando assim a presença de carbonatos tanto nos gnaisses como nos espelhos de falha, deixando aberta a possibilidade de que estes fluidos carbonáticos tenham relação com os fluidos carbonáticos magmatogênicos. As evidências de tal relação podem estar potencialmente armazenadas na assinatura geoquímica dos carbonatos de falhas caso sejam análogas aos carbonatos do corpo carbonatítico principal

As interpretações delineam dois modelos diferentes sugeridos como explicação para as relações entre o Carbonatito Três Estradas e o gnaisse que o hospeda a partir de sua foliação, são estes dois modelos a seguir expostos:

I. Modelo sin-deformacional ao evento gerador de bandamento: O carbonatito participou do metamorfismo contemporâneo as suas rochas encaixantes pois já se encontrava posicionado em seu sítio intrusivo sofrendo pelo menos parcialmente o mesmo tipo de deformação ao qual suas rochas encaixantes foram submetidas. Desta forma a foliação é resultante de deformação e metamorfismo com modificação intensa das texturas e características originais. Tal atuação impede o reconhecimento da fábrica inicial da rocha carbonatítica (corpo intrusivo ou extrusivo). A mesma, com a deformação atuante comporta-se como parte do bandamento gnáissico. A intensidade da deformação foi suficiente para

modificar suas características texturais ainda que não sua mineralogia essencial, visto que a rocha é reconhecidamente um carbonatito frente aos dados petrográficos e frente aos dados geoquímicos de TONIOLO *et al.* (2010). Desta forma é coerente o uso da terminologia “bandas carbonatíticas” para descrever esta litologia.

II. Modelo pós-deformacional ao evento gerador de bandamento: O metamorfismo que produziu o bandamento gnáissico não atuou sobre o carbonatito, sendo este uma intrusão posterior. Isso permite pensar na foliação do carbonatito ainda originada por dois mecanismos em proporções relativas de ambos ou um caso de apenas um extremo: a) foliação magmática; e b) metamorfismo dinâmico. A atuação comprovada de falhas na área de estudo pode ser parcialmente responsável pela formação de foliação no carbonatito que foi intrudido em uma morfologia linear devido ao magma carbonatítico haver penetrado em zonas de alívio de tensões geradas em determinadas falhas de caráter transcorrente. Com a intrusão deste corpo ao longo dessas estruturas lineares, sua morfologia manteve-se linear e o fluxo magmático interno participou na geração de estruturas planares no carbonatito. Assim a foliação magmática e a foliação originada pela atuação da zona de cisalhamento são co-genéticas e o caso específico trata-se de deformação predominante ainda enquanto a intrusão carbonatíticas encontrava-se fluida, ocorrendo dobras ainda no magma em processo de intrusão ou até não completamente

solidificado e cisalhamento responsável pela foliação tanto no magma fluido quanto no magma solidificado.

A região na qual está o sítio do Carbonatito Três Estradas integra o Complexo Granulítico Santa Maria Chico, portanto pertencem a este complexo os gnaisses nos quais se hospeda a ocorrência de carbonatito. Conforme definido em Hartmann (1988) o Complexo Granulítico Santa Maria Chico contém gnaisses polideformados de vários tipos, predominando gnaisses básicos e ácidos além de gnaisses calcossilicatados e piroxenitos, dentre outras litologias. Os gnaisses ácidos tem composição trondjemítica a tonalítica, enquanto os gnaisses básicos coincidem com o encontrado no sítio do carbonatito. O complexo contém volumetricamente mais litologias básicas cuja foliação varia de norte a noroeste enquanto os gnaisses são marcados por uma foliação do tipo bandamento gnáissico predominantemente subvertical especialmente para nordeste. O complexo apresenta natureza deformacional polifásica, sendo que os seus gnaisses apresentam-se inteiramente recristalizados, sem preservação da textura ou mineralogia pré-metamórficas. A ocorrência de paragênese diagnóstica de fácies granulito é comum, embora este trabalho não tenha tido este enfoque de estudo mineralógico dos gnaisses.

Além destes aspectos é válido salientar que os contatos do complexo granulítico com os granitos são nítidos conforme a bibliografia, mantendo as rochas graníticas características preexistentes sem metassomatismo significativo enquanto metamorfismo gerador de *hornfels* é sugerido como modificador da fábrica original das litologias do complexo granulítico. Quatro eventos metamórficos são definidos para este complexo, formalmente relatados de M_1 a M_4 e a seguir resumidamente explicados.

O Evento M_1 está registrado na forma de porfiroclastos e consagrado como sendo pré-tectônico. O Evento M_2 é um metamorfismo de alto grau, seus minerais constituem agregados granoblásticos, a textura granoblástica é indicativa de que esse metamorfismo granulítico teve continuidade após o término da deformação. O Evento M_3 trata-se do registro de metamorfismo cornubianítico com intensidade e grau variáveis na área. Finalizando a série

de eventos metamórficos-deformacionais, cataclase de baixo grau afetou o complexo caracterizando o Evento M₄, cujos aspectos estruturais foram estudados por Basei (1985).

A partir de uma interpretação baseada neste Evento M₄, as cloritas encontradas nas falhas como produto da cloritização e marcantes principalmente em filonitos nesta área-alvo são referidas por Nardi & Hartmann (1979), Hartmann (1987, 1991, 1998), Hartmann *et al.* (1999), como sendo produtos do último evento deformacional a atuar sobre as rochas do Complexo Santa Maria Chico. Conforme a denominação formal, trata-se do Evento M₄ do Complexo Granulítico Santa Maria Chico relatado ao Evento M₅ do Complexo Granulítico Santa Catarina. Ambos eventos nos seus respectivos complexos granulíticos caracterizam-se na bibliografia pelas ocorrências paragenéticas dos minerais clorita, epidoto e microclínio, todos em fraturas. Com relação à mineralogia nas falhas, além dos já mencionados carbonato, quartzo e clorita, foi encontrado em espelhos de falha tanto epidoto como feldspato, que deve de acordo com essa interpretação baseada no Evento M₄ tratar-se de microclínio. Nesta área-alvo portanto, a biotita presente nos filonitos deve tratar-se de um resquício do gnaiss original milonitizado, embora a biotita faça parte dos minerais parentais mais susceptíveis à cloritização.

Ainda assim, o que temos neste sítio não necessariamente precisa ser interpretado com base no Evento M₄, mas pode ser interpretado baseado na zona de cisalhamento da Falha Suspiro-Linhares ou em outra zona de cisalhamento de atuação mais local que tenha gerado a paragênese já descrita encontrada durante o trabalho de campo em falhas e milonitos. Ou seja, um evento diferente de M₄, de abrangência apenas local, o qual não se ousa posicionar cronologicamente em relação ao M₄ dada a carência de informações para essa empreitada. Ainda assim, uma interpretação integradora é possível, onde o mesmo conjunto de rochas neste sítio possa ter sido deformado tanto pelo evento M₄ deformador do complexo quanto pelo evento não formalizado local cujos produtos visíveis foram estudados neste trabalho. Não é rara a cloritização de rochas máficas quando submetidas a metamorfismo em zonas de cisalhamento, assunto que pode

ser compreendido de forma mais aprofundada com Vernon *et al.* (2012), enquanto em outros casos específicos rochas félsicas submetidas a ação de zonas de cisalhamento, casos estudados por Blumefeld & Bouchez (1988), não apresentam sinais de cloritização, como pode ser constatado em Berthé *et al.* (1979).

Na Figura 74 é exibido um mapa integrado que sumariza alguns dados de campo e de sensoriamento para a Área-Alvo Três Estradas com informações estruturais julgadas relevantes.

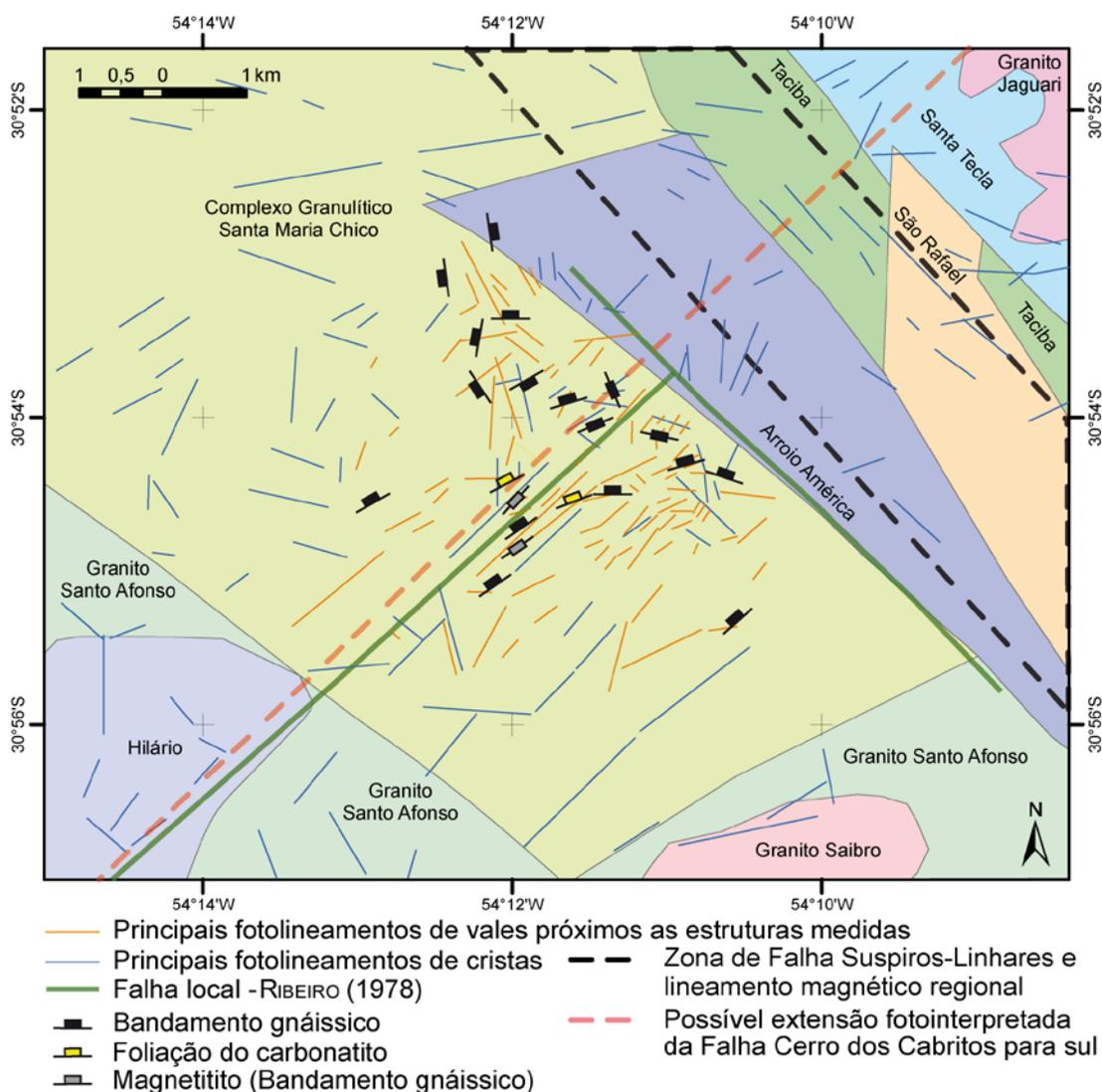


Figura 74 - Mapa integrado de informações estruturais e geológicas da Área-Alvo Três Estradas.

A proposição final é de que a Falha Cerro dos Cabritos possa ser interpretada como se estendendo para sudoeste, partindo do Bloco São

Gabriel onde atualmente está confinada, cruzando o Lineamento de Ibaré e penetrando no Bloco Taquarembó, tendo praticamente a mesma orientação que a foliação medida no Carbonatito Três Estradas, como pode ser notado nos mergulhos do mesmo plotados neste mapa, e também praticamente a mesma orientação medida nas rochas gnáissicas do entorno. Uma falha local ainda não denominada e ressaltada no mapa de Ribeiro (1978) está de acordo com essa proposição. É possível afirmar que a foliação das rochas no local é responsável por controlar a orientação de uma série de fotolineamentos de cristas e vales, o que pode ainda ser interpretado como a erosão atuante sendo reflexo da estrutura das rochas do local e drenagens encaixadas nessa foliação.

A Figura 75 é um mapa da Área do Projeto no qual estão resumidas as falhas regionais mais significativas incluindo as que exercem controles estruturais sobre os carbonatitos, exibidas sobre a geologia regional simplificada.

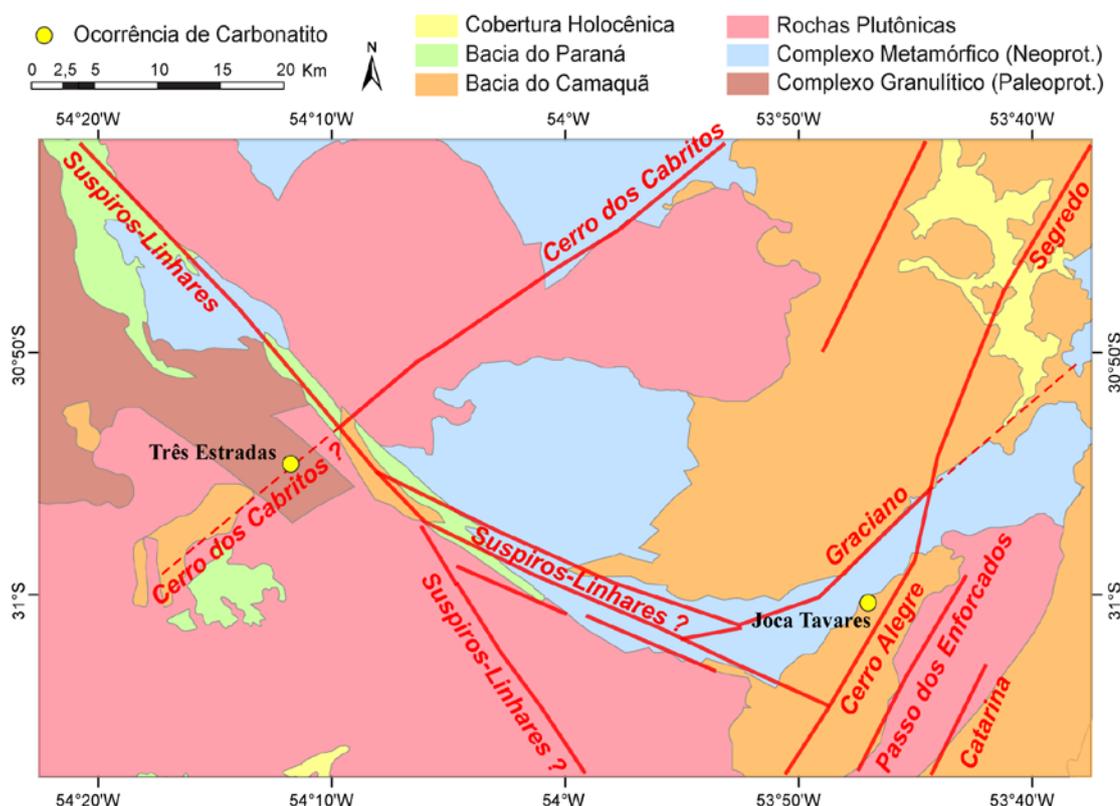


Figura 75 - Mapa apresentando os principais falhamentos f da Área do Projeto e suas relações com o controle estrutural dos carbonatitos.

Considera-se que as falhas com potencial para controlarem estruturalmente os carbonatitos são: Falha Suspiro-Linhares, Falha Cerro dos Cabritos, Falha Cerro Alegre, Falha Graciano.

A Figura 76 é uma elaboração esquemática exemplificativa, sem escala, de um bloco-diagrama para a Área-Alvo Três Estradas baseado na interpretação de produtos de sensoriamento remoto e nas unidades geológicas encontradas em trabalho de campo.

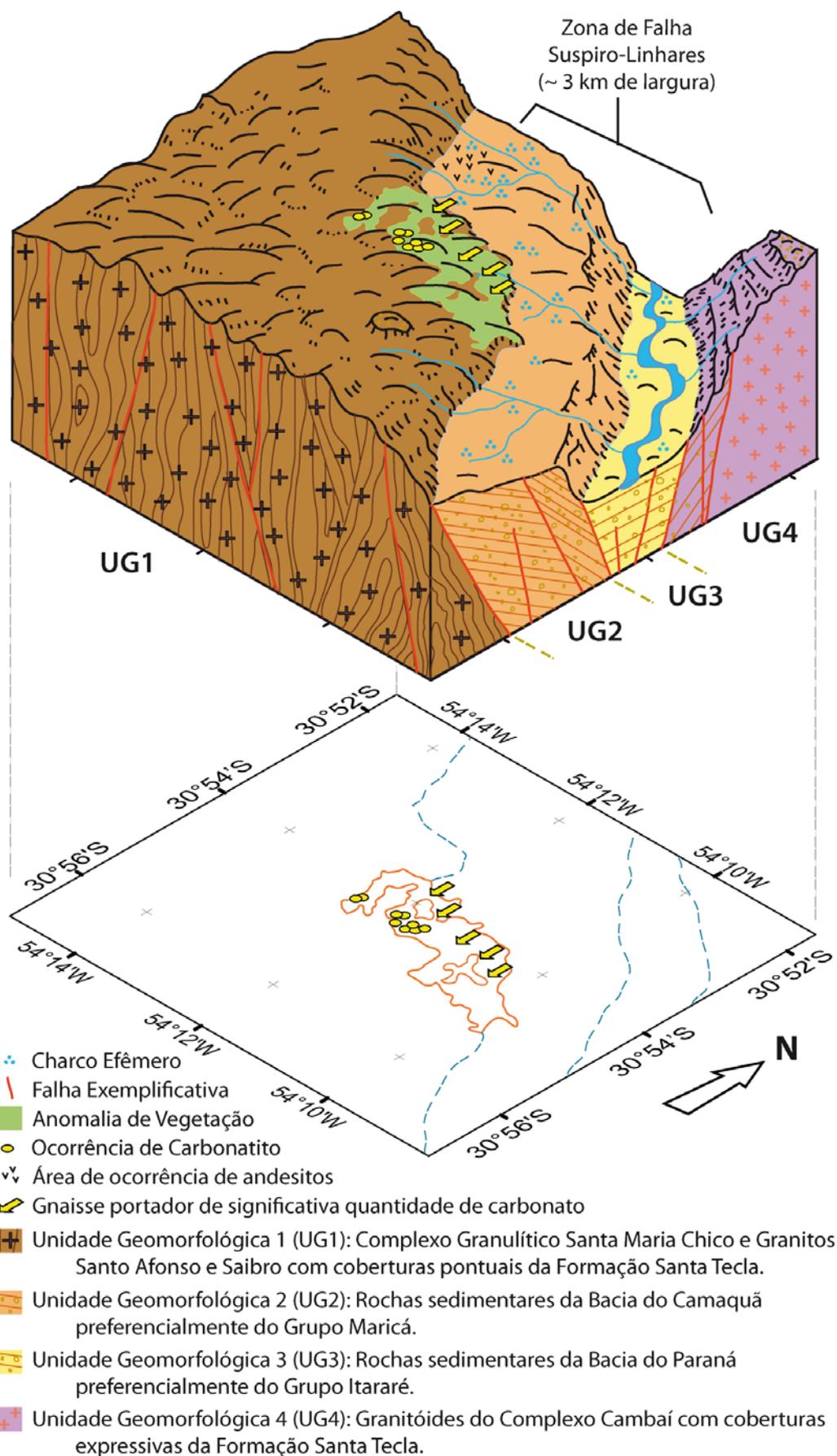


Figura 76 - Bloco-Diagrama esquemático da Área-Alvo Três Estradas.

6. Discussão e Conclusões

Conclui-se que o Carbonatito Joca Tavares e o Carbonatito Três Estradas encontram-se em áreas de encontros de falhas próximos a suturas conhecidas e seus sítios são menos dependentes das rochas encaixantes e com forte relacionamento com as características estruturais.

Propõe-se que ambos corpos carbonatíticos estejam compartimentados e controlados por estruturas locais a regionais conhecidas, cujas nomenclaturas formais são Falha Suspiro-Linhares, Falha Cerro dos Cabritos, Falha Cerro Alegre, Falha Graciano.

A identificação dos carbonatitos via sensoriamento remoto é marcado por anomalias de vegetação. Nos trabalhos de campo, o avanço nos estudos apresentou problemas devido a descontinuidade dos afloramentos que impedem a avaliação adequada da área superficial pela qual o Carbonatito Três Estradas se estende.

A classificação morfológica proposta para o Carbonatito Joca Tavares é a do tipo central, pela disponibilidade de dados de campo e levantamentos prévios que demonstram a ausência de foliação neste carbonatito, pela interpretação do imageamento aerogeofísico em formato circular do Carbonatito Joca Tavares, pela interpretação de sua anomalia de vegetação em uma área restrita tendo similaridade com um formato circular, e pela falta de evidências estruturais e de sensoriamento remoto que indiquem uma zona de cisalhamento atuante sobre o corpo carbonatítico.

A classificação morfológica proposta para o Carbonatito Três Estradas é a do tipo linear, reforçado pela presença da foliação, pela disposição dos pontos de ocorrência, pelos dados de campo apresentados, pelo volume de

dados estruturais do sítio em que se encontra, pela estruturação linear do sítio conforme o imageamento aerogeofísico, e finalmente pela interpretação de sua anomalia de vegetação de formato irregular no sítio e sem similaridade com uma geometria circular.

Para o Carbonatito Três Estradas sugere-se dois modelos, frente aos dados atuais disponíveis, para explicar a relação entre a rocha carbonatítica e a sua rocha hospedeira a partir de sua foliação.

O primeiro modelo é sin-deformacional ao evento gerador de bandamento, no qual o carbonatito participou do metamorfismo contemporâneo as suas rochas encaixantes. De acordo com este modelo é coerente o uso da terminologia “bandas carbonatíticas” para descrever esta litologia.

O segundo modelo é pós-deformacional ao evento gerador de bandamento. Neste segundo modelo, o metamorfismo que produziu o bandamento gnáissico não atuou sobre o carbonatito, sendo este uma intrusão posterior. Assim a foliação do carbonatito é originada por foliação magmática e metamorfismo dinâmico. Nesta interpretação, a foliação do carbonatito foi originada pela atuação de uma zona de cisalhamento. Neste segundo modelo teorizado, o cisalhamento que influenciou o carbonatito Três Estradas deve-se à Falha Cerro dos Cabritos. Neste trabalho propõe-se o prolongamento desta falha para sudoeste passando nos pontos de ocorrência do Carbonatito Três Estradas coincidente com lineamentos locais encontrados na bibliografia e aqui corroborado por dados interpretativos de sensoriamento remoto e por dados concretos obtidos em trabalho de campo.

Não são feitas asserções acerca do caráter intrusivo ou extrusivo do Carbonatito Joca Tavares, mas conclui-se que o Carbonatito Três Estradas foi submetido a evento deformacional, o que leva à suposição de que deva tratar-se provavelmente de um corpo intrusivo, e somente um estudo mais detalhado poderá definir este aspecto. Ainda assim, o primeiro modelo proposto, o Modelo sin-deformacional ao evento gerador de bandamento, não impede que o mesmo seja uma rocha extrusiva ou hipabissal modificada em algum dos eventos metamórficos que afetaram todo sítio no qual se encontra.

Como problemática final constata-se a necessidade futura de interpretar as relações entre o carbonatito e suas encaixantes frente a dados geológicos mais volumosos frutos de trabalhos de campo mais prolongados e fazendo uso de técnicas analíticas para a obtenção de maiores informações.

Referências Bibliográficas

Allum, A. E. 1966. *Photogeology and regional mapping*. J. Pergamon, Oxford, 1st ed., 107 p.

Almeida, F. F. M. de, 1966. *Origem e evolução da Plataforma Brasileira*. In: SEMANA DE ESTUDOS GEOLÓGICOS, 2., 1966, Porto Alegre, *Anais...*, Porto Alegre, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Vol. I, p. 46-89.

Almeida, F. F. M. de, 1967. Origem e evolução da Plataforma Brasileira. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, *Boletim do Departamento Nacional de Produção Mineral*, 241, Julho de 1967, 36 p.

Almeida, F. F. M. de, 1978. *Mapa tectônico da América do Sul*. Departamento Nacional de Produção Mineral, CGMN e UNESCO. (Coord. reg.), escala 1:5.000.000

Almeida, F. F. M. de; Hasui, Y.; Neves, B.B. de B. & Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, Elsevier, Amsterdam, 17: 1-29.

Almeida, F. F. M. de; Neves, B.B. de B. & Carneiro, C.D.R., 2000. The origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Science Reviews*, Elsevier, Amsterdam, Vol. 50(1,2):77-111.

Barbosa, E. S. R. 2009. *Mineralogia e petrologia do complexo carbonatítico-foscorítico de Salitre, MG*. Brasília, 430 p. Tese de Doutorado, nº. 97, Universidade de Brasília, Dezembro de 2009.

Barker, D. S. 1996 Carbonatite Volcanism, Chapter 3. In: Mitchel, R. H. (Ed.) *Undersaturated alkaline rocks: mineralogy, petrogenesis and economic potential*. Winnipeg – Manitoba, Short Course, Vol. 24, p. 45-61.

Basei, M. A. S.; Siga Jr., O.; Machiavelli, A. & Mancini, F. 1992. Evolução tectônica dos terrenos entre os cinturões Ribeira e Dom Feliciano (PR-SC). *Revista Brasileira de Geociências*, Brasília, Junho de 1992, Vol. 22(2):216-221.

Basei, M. A. S.; Siga Jr., O.; Marquelin, H.; Harara O. M.; Neto, J. M. R. & Porta, P. F. 2000. The Dom Feliciano Belt and Rio de la Plata Craton: tectonic evolution and correlation with similar provinces of southwestern Africa. In: Cordani *et al.* 2000. *Tectonic evolution of South America*. International Geological Congress, 31, IUGS, Rio de Janeiro, August 2000, p. 311-334.

Bell, K. 1989. *Carbonatite: Genesis and Evolution*. London, Unwin Hyman, 1st Edition, 300 p.

Bell, K.; Kjærsgaard, B. A. & Simonetti, A. 1999. Carbonatites – Into the twenty-first century. *Journal of Petrology*, Oxford, Oxford University Press 1998, 39(11-12):1839-1845.

Berthé, D.; Choukroune, P. & Jegouzo, P. 1979. Orthogneiss, mylonite and non coaxial deformation of granites, the example of the South Armorican Shear Zone. *Journal of Structural Geology*, London, Pergamon Press Ltd., 1(1):31-42.

Biasi, J.H.F.; Lima, L.M.F.S. & Romano Neto, R. 1981. *Faixa de mapeamento VIII: Projeto Torquato Severo-Passo do Tigre*. Porto Alegre, 268 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Biondi, J. C. 2005. Brazilian mineral deposits associated with alkaline and alkaline-carbonatite complexes. In: *Mesozoic To Cenozoic Alkaline Magmatism In The Brazilian Platform*, São Paulo. EDUSP/FAPESP.

Blumenfeld, P. & Bouchez, J. L. 1988. Shear criteria in granite and migmatite deformed in the magmatic and solid states. *Journal of Structural Geology*, London, Pergamon Press Ltd., 10(4):361-372.

Borba, A. W. 2006. *Evolução geológica da Bacia do Camaquã (Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-Rio-Grandense, RS, Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica*. Tese de Doutorado, 109 p. Programa de

Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Borba, A. W.; Maraschin, A. J. & Mizusaki, A. M. P. 2007. Evolução Tectono-Estratigráfica e Paleoclimática da Formação Maricá (Escudo Sul-Rio-Grandense, Brasil): um exercício de Geologia Histórica e Análise Integrada de uma Bacia Sedimentar Neoproterozóica. *Pesquisas em Geociências* (Publicação Online), Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 34(2):57-74.

Büttner, S. H. 1999. The geometric evolution of structures in granites during continuous deformation from magmatic to solid-state conditions. *American Mineralogist*, Chantilly, U.S.A., 84:1781-1792.

Carraro, C. C. 1974. *Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Mapa 8, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, escala 1:1.000.000.

Carraro, C. C. 2004. *Integração de imagens de sensoriamento remoto e de geofísica no estudo do controle estrutural da mineralização do Escudo Sul-Rio-Grandense*. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 132 p.

Carraro, C. C. 2007. *Contribuição do sensoriamento remoto na construção do saber geológico do Estado do Rio Grande do Sul*. In: Frantz, J. C. & Iannuzzi, R. 2007. *50 Anos de Geologia: Instituto de Geociências. Contribuições*. Porto Alegre, Editora Comunicação e Identidade, p. 369-383.

Carraro, C. C. & Mexias, A. S. 2005. *Imagens de sensoriamento remoto no mapeamento de lineamentos do centro do Escudo Sul-Rio-Grandense*. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, Abril de 2005, Goiânia. *Anais...* Goiânia, INPE, p. 1757-1764.

Castor, S. B. 2008. The Mountain Pass Rare-Earth Carbonatite and associated ultrapotassic rocks, California. *The Canadian Mineralogist*, 46:779-806.

Chakhmouradian, A. 2009. *The geochemistry of carbonatites revisited: two major types of continental carbonatites and their trace-element signatures*. European Geosciences Union General Assembly, 2009, Vienna.

Geophysical Research Abstracts, Vienna, EGU, Vol. 11, 2 p., Online Publication. Disponível em:

<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-10806.pdf>.

Acesso em: 12 de Novembro de 2012.

Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração 1984. *Complexos carbonatíticos do Brasil: geologia*. São Paulo, CBMM, Departamento de Geologia, 44 p.

Coe, A. L. 2010. *Geological Field Techniques*, Longon, Blackwell Publishing Ltd., United Kingdom, 1st edition, 324 p.

Comin-Chiaramonti, P.; Gomes, C. C. G.; Marques, L. S.; Censi, P.; Ruberth, E. & Antonini, P. 2005. Carbonatites from southeastern Brazil: geochemistry, O-C, Sr-Nd-Pb isotopes and relationships with the magmatism from the Paraná-Angola-Namibia Province. *In: Mesozoic To Cenozoic Alkaline Magmatism In The Brazilian Platform*. São Paulo, EDUSP/FAPESP.

Comin-Chiaramonti, P.; Gomes, C. de B.; Cundari, A.; Castorina, F. & Censi, P. 2007. A review of carbonatitic magmatism in the Parana-Angola-Namibia (PAN) system. *Periodico di Mineralogia*, Special Issue of December 2007, 76(3):25-78.

Cordani *et al.* 2000. *Tectonic evolution of South America*. International Geological Congress, 31, August 2000, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, IUGS, p. 311-334.

Corrêa, A. C. B. & Fonsêca, D. N. 2010. Lineamentos de drenagem e de relevo como subsídio para a caracterização morfoestrutural e reativações neotectônicas da área da Bacia do Rio Preto, Serra do Espinhaço Meridional – MG. *Revista de Geografia*, Recife, DCG/Napa, Universidade Federal de Pernambuco, v. especial, VIII SINAGEO, 1:72-86.

CPRM 1974. *Carta geológica do Brasil ao milionésimo: Folha Porto Alegre - SH.22 e Folha Lagoa Mirim - SI.22*. Brasília, CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ministério de Minas e Energia. 1ª Ed, 99 p., escala 1:1.000.000.

CPRM 2007. *Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul*. Brasília, CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Secretaria de Geologia,

Mineração e Transformação Mineral. Ministério de Minas e Energia. escala 1:750.000.

DNPM 1989. *Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul*. Brasília. Departamento Nacional de Produção Mineral. Ministério de Minas e Energia. escala 1:1.000.000.

Doroshkevich, A. G.; Ripp, G. R.; Viladkar, S. G. & Vladykin, N. V. 2008. The Arshan REE Carbonatites, Southwestern Transbaikalia, Russia: mineralogy, paragenesis and evolution. *The Canadian Mineralogist*, 46:807-823.

Duke, I. G. 2009. Black Hills–Alberta carbonatite–kimberlite linear trend: Slab edge at depth? *Tectonophysics*, Elsevier, Amsterdam, 464:186–194.

Etchebehere, M. L. C.; Saad, A. R. & Fulfaro, V. J. 2007. Análise de bacia aplicada à prospecção de água subterrânea no planalto acidental paulista, SP. *Geociências*, São Paulo, UNESP, 26(3):229-247.

Fernandes, L. A. D., Menegat, R.; Costa, A. F. U.; Koester, E.; Porcher, C. C.; Tommasi, A.; Kraemer, G.; Ramgrab, G. E. & Camozzato, E. 1995. Evolução tectônica do Cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-Rio-Grandense: Parte II – uma contribuição a partir das assinaturas geofísicas. *Revista Brasileira de Geociências*, Brasília, Dezembro de 1995, 25(4):375-384.

Fernandes, L. A. D., Menegat, R.; Costa, A. F. U.; Koester, E.; Porcher, C. C.; Tommasi, A.; Kraemer, G.; Ramgrab, G. E. & Camozzato, E. 1995. Evolução tectônica do Cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-Rio-Grandense: Parte I – uma contribuição a partir do registro geológico. *Revista Brasileira de Geociências*, Brasília, Dezembro de 1995, 25(4):351-374.

Fernandes, L.A.D.; Tommasi, A. & Porcher, C.C. 1992. Deformation patterns in the Southern Brazilian branch of the Dom Feliciano belt: a reappraisal. *Journal of South American Earth Sciences*, 5:76-84.

Fonsêca, D. N. & Corrêa, A. C. B. 2011. *Uso de MDE na extração de lineamentos para detecção de reativações neotectônicas na Bacia do Rio Preto, Serra do Espinhaço Meridional, MG*. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba. *Anais...* Curitiba, INPE, p. 3483-3490.

Fortes, A. B. 1956. *Aspectos Fisiográficos, Demográficos e Econômicos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Globo, Serviço Social da Indústria, 1ª ed. 76 p.

Fortes, A. B. 1959. *Geografia física do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Globo, 1ª ed., 393 p.

Fossen, H. 2010. *Structural Geology*. New York, Cambridge University Press, 1st publish., 463 p. Disponível em: <http://www.cambridge.org/resources/emods/Chapter%2015/15%20Shear%20zones.html> Acessado em 14 de Março de 2012.

Fossen, H. 2012. *Geologia Estrutural*. São Paulo, Editora Oficina de Textos, Tradução de F. R. D. de Andrade, 584 p.

Frantz, J. C. & Iannuzzi, R. 2007. *50 Anos de Geologia: Instituto de Geociências. Contribuições*. Porto Alegre, Editora Comunicação e Identidade, 399 p.

Frasca, A. A. & Lisboa, N. A. 1993. *Contribuição do sensoriamento remoto na compartimentação morfotectônica e morfoestrutural da Bacia do Paraná, Grupo São Bento, RS e suas relações com as estruturas do embasamento*. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7, 1993, Curitiba. *Anais...* Curitiba, INPE, 3:211-220.

Frost, B. R.; Barnes, C. G.; Collins, W. J.; Arculus, R. J.; Ellis, D. J. & Frost, C. D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, Oxford, Oxford University Press 2001, 42(11)2033-2048.

Gomes, C. B. & Comin-Chiaramonti, P. 2005. An introduction to the alkaline and alkaline-carbonatitic magmatism in and around the Paraná Basin. In: *Mesozoic To Cenozoic Alkaline Magmatism In The Brazilian Platform*, São Paulo, EDUSP/FAPESP.

Gomes, C. B.; Ruberti, E.; Comin-Chiaramonti, P. & Azzone, R. G. 2011. Alkaline magmatism in the Ponta Grossa Arch, SE Brazil: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, Elsevier, Amsterdam, May 2011, 32:152-168.

Goni, J. C. et al. 1962. *Estratigrafia e geologia econômica do Pré-Cambriano e Eo-Paleozóico uruguaio e sul-riograndense*. Porto Alegre, Avuls. Esc. Geol., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 105 p.

Guy, M. 1966. *Quelques principes e quelques expériences sur la methodologie de la photo-interpretation*. In: Symposium International de Photo-Interpretation, 2, Paris. *Anais...* Paris, v.1, p.21-41.

Grasso 2010. *Petrologia do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Serra Negra, MG*. Brasília, 157 p. Tese de Mestrado, Nº. 271, Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

Grazia, C. A.; Toniolo, J. A.; Parisi, G.; Muller, E. I. & Dressler, V. L. 2011. *Prospecção hidrogeoquímica no carbonatito Três Estradas, RS*. In: Congresso Brasileiro de Geoquímica, 13, Outubro de 2011, Gramado. *Anais...* Gramado, SBGq, p. 1769-1772.

Hallinan, S. E.; Mantovani, M. S. M.; Shukowsky, W. & Braggion Jr., I. 1993. Estrutura do Escudo Sul-Brasileiro: uma revisão através de dados gravimétricos e magnetométricos. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, Setembro de 1993, 23(3):201-214.

Hartmann, L. A. & Nardi, L.V.S. 1982. Os Granitos Santo Afonso, Saibro e Vauthier da região do Arroio Santa Maria Chico, Dom Pedrito, RS - Geologia, petrografia e química de elementos maiores. *Acta Geológica Leopoldensia*, São Leopoldo, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Julho de 1982, 16:153-178.

Hartmann, L. A. 1987. *Isocrona Sm-Nd Em Minerais de Duas Amostras do Complexo Granulítico Santa Maria Chico, RS*. In: Congresso Brasileiro de Geoquímica, 1, 1987, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre, SBGq, p. 105- 111.

Hartmann, L. A. 1988. Geoquímica de terras raras e geotermobarometria de granulitos de Dom Pedrito e Luís Alves, no extremo sul do Brasil. *Geochimica Brasiliensis*, São Paulo, 2(1):1-14.

Hartmann, L. A. 1991. Condições de metamorfismo no Complexo Granulítico Santa Maria Chico, RS. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, SBG, Setembro de 1991, 21(2):107-113.

Hartmann, L. A. 1998. Deepest exposed crust of Brazil – Geochemistry of Paleoproterozoic depleted Santa Maria Chico granulites. *Gondwana Research*, Japan, International Association for Gondwana Research, 17th December 1997, 1(3/4):331-341.

Hartmann, L. A. Leite, J. A. D., McNaughton, N. J. & Santos, J. O. S. 1999. Deepest exposed crust of Brazil – SHRIMP establishes three events. *Geology*, New York, October 1999, 27(10):947-950.

Hartmann, L. A.; Chemale Jr, F. & Philipp, R. P. 2007. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. *In: Frantz, J. C. & Iannuzzi, R. 2007. 50 Anos de Geologia: Instituto de Geociências. Contribuições*, Porto Alegre, Editora Comunicação e Identidade, p. 99-123.

Hartmann, L. A.; Leite, J. A. D.; Da Silva, L. C.; Remus, M. V. D.; McNaughton, N. J.; Groves, D. I.; Fletcher, I. R.; Santos, J. O. S. & Vasconcellos, M. A. Z. 2000. Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil. *Australian Journal of Earth Sciences*, Sidney, 47:829–844.

Hartmann, L. A.; Liu, D.; Wang, Y.; Massonne, H.-J. & Santos, J. O. S. 2008. Protolith age of Santa Maria Chico granulites dated on zircons from an associated amphibolite-facies granodiorite in southernmost Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Brasília, Novembro de 2008, Academia Brasileira de Ciências, 80(3):543-551.

Hartmann, L. A.; Philipp, R. P.; Santos, J. O. S. & McNaughton, N. J. 2011. Time frame of 753–680 Ma juvenile accretion during the São Gabriel orogeny, southern Brazilian Shield. *Gondwana Research*, Japan, International Association for Gondwana Research, June 2011, 19:84–99.

Hasui, Y. & Costa, J. B. S. 1990. *Zonas e Cinturões de Cisalhamento*. Belém, Editora Universitária, Universidade Federal do Pará, 144 p.

Heilbron M., Pedrosa-Soares A. C., Campos Neto M., Silva L. C., Trouw R. A. J. & Janasi V. C. 2004. A Província Mantiqueira, Cap. 13. *In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R. & Brito Neves, B. B. (edit.) O Desvendar de um Continente: A Moderna Geologia da América do Sul e o Legado da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Editora Beca, 1ª ed., p. 203-234.

Hobbs, W. H. 1912. *Earth features and their meaning: an introduction to geology for the student and the general reader*. New York, MacMillan, 1st edition, 506 p.

Hodgson, R. A. 1961. Classification of structures on joint surfaces. *American Journal of Science*, New York, September 1961, 259:493-502.

Iglesias, C. M. da F.; 2000. *Análise integrada de dados geológicos e estruturais para a prospecção de ouro na região de Torquato Severo (RS)*. Porto Alegre, 118 p. Tese de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

IUGS 2012. *International chronostratigraphic chart*. International Commission on Stratigraphy, International Union of Geological Sciences. Disponível em: www.stratigraphy.org Acessado em 8 de Agosto de 2012.

Jost, H. & Hartmann, L. A. 1984. Província Mantiqueira: Setor Meridional. In: *O Pré-Cambriano no Brasil*, São Paulo, Edgard Blücher, p. 345-368.

Jost, H. & Villwock, J. A. 1974. Contribuição à estratigrafia do Pré-Cambriano do Rio Grande do Sul. *Notas Est. Esc. Geol. UFRGS*, Porto Alegre, Departamento Nacional da Produção Mineral, Publicação Especial, p. 13-26.

Knijnik, D. *et al.* 2012. Caracterização geoquímica e estrutural do Granodiorito Cruzeiro do Sul: magmatismo shoshonítico pós-colisional neoproterozoico em zona de transcorrência, região de Quitéria, RS. *Geologia*, São Paulo, Universidade de São Paulo, Sér. cient., Abril de 2012, 22(1):57-76.

Kravchenko, S. M.; Bagdasarov, Yu. A. & Lapin, A. V. 1988. New data on the geology and minerageny of carbonatite associations. *International Geologic Review*, London, published by Taylor & Francis, 30(11):1208-1216.

Lapin, A. V. & Ploshko, V. V. 1988. Rock association and morphological types of carbonatite and their geotectonic environments. *Izvestiya AN SSSR Seriya Geologicheskaya*, Moskow, V. H. Winston & Sons Inc., 1:66-73.

Lapin, A. V.; Woldemariwanüch & Ploshko, V. V. 1999. Carbonatitos lineares de cinturões móveis: uma síntese. *Revista Brasileira de Geociências*, Dezembro de 1999, 29(4):483-490.

Le bas, M. J. 2008. Fenites associated with carbonatites. *The Canadian Mineralogist*, 46:915-932.

Le Maitre, R.W.; Bateman, P.; Dudek, A., Keller, J.; Lameyre, J.; Le Bas, M.J.; Sabine, P.A.; Schmid, R.; Sorensen, H.; Streckeisen, A.; Woolley, A.R. & Zanettin, B. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Oxford, United Kingdom, Blackwell Scientific Publications, IUGS, 1st ed., 135 p.

Leinz, V.; Barbosa, A. F. & Teixeira, E. A. 1941. Mapa Geológico Caçapava-Lavras. *Boletim da Secretaria de Agricultura, Indústria e Comércio do Estado do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, 90:1-39.

Levin V. Ya.; Ronenson, B. M. & Levina, I. A. 1978. The carbonatites of the alkaline province of Ilmen-Vishnevyy Mountains in the Urals. *Doklady Akademi Nauk*, Moscow, SSSR, 240(4):930-933.

Lisboa, N. A.; Dani, N.; Souza, S. F. de; Monguilhott, M.; Ferreira, A. H.; Vist, H. L. & Aquino, R. S. 2006. *Curso de Extensão 2006: Interpretação estereoscópica de fotografias aéreas no meio digital: análise do meio físico e antrópico*. Departamento de Geodésia. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 29 p.

Liu, C. C. 1984. *Análise estrutural de lineamentos em imagens de Sensoriamento Remoto: aplicação do Estado do Rio de Janeiro*. São Paulo, Tese de Doutorado, 175 p. Pós-Graduação em Geologia. Universidade de São Paulo.

Luzardo, R. & Fernandes, L. A. D. 1990. Análise estrutural do Lineamento de Ibaré, Parte I – filitos de Ibaré: greenstone belt ou cobertura cratônica deformada? *Acta Geológica Leopoldensia*, São Leopoldo, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 13:25-36.

Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carbeiro C. D. R. & Brito Neves, B. B. 2004. *O Desvendar de um Continente: A Moderna Geologia da América do Sul e o Legado da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Editora Beca, 1^a ed., 673 p.

Martínez, M. I. 2007. *Estratigrafia e Tectônica do Grupo Bambuí no Norte do Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte, Tese de Mestrado, nº. 85, 14 de Abril de 2007, 147 p. Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais.

McDonough, W. F. & Sun, S. S. 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology*, Amsterdam, Elsevier, 102:223-253.

Mineração Santa Elina Indústria E Comércio S.A. 2008. *Projeto Palma-RS: Bloco Três Estradas, Relatório Final de Pesquisa*. São Paulo, Publicação Interna, Vol. 1, MSE-MTS.

Moreto, C. P. N. & Carneiro, C. D. R. 2006. *Fotolineamentos e estruturas rúpteis da depressão periférica em Campinas, SP*. In: Congresso Interno de Iniciação Científica, 14, Campinas. *Anais...* Campinas, CNPq, Instituto de Geociências, Universidade de Campinas. Pôster.

Nardi, L.V.S. & Hartmann, L.A. 1979. O complexo granulítico Santa Maria Chico do Escudo Sul-Rio-Grandense. *Acta. Geologica Leopoldensia*, São Leopoldo, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 6:45-75.

Nasir, S. & Klemd, R. 1998. New carbonatite occurrences along the Hatta transform fault zone (northern Oman Mountains, United Arab Emirates). *Journal of African Earth Sciences*, Amsterdam, Elsevier, 27(1):3-10.

Naumann, M. P.; Hartmann, L. A.; Koppe, J. C. & Chemale Jr, F. 1984. *Sequências supracrustais, gnaisses graníticos, granulitos e granitos intrusivos da região de Ibaré-Palma, RS - geologia, aspectos stratigráficos e considerações geotectônicas*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33, 1984, Rio de Janeiro, *Anais...* Rio de Janeiro, SBG, p. 2417-2425.

O'Leary, D.W.; Friedman, J.D. & Pohn, H.A. 1976. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geological Society of American Bulletin*, 87:1463-1469.

Oliveira, A. S.; Pulz, G. M.; Bongioiolo, E. M. & Calarge, L. M. 2003. Isótopos de Carbono em Filitos Carbonosos da Seqüência Metavulcano-Sedimentar Marmeleiro, Sul de Ibaré, Rio Grande do Sul. *Revista Pesquisas em Geociências*, Porto Alegre, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 30(1):41-52.

Oyhantçabal P.; Siegesmund, S. & Wemmer, K. 2011. The Río de la Plata Cráton: a review of units, boundaries, ages and isotopic signature. *International Journal of Earth Sciences*, Berlin, Springer-Verlag, 100:201–220.

Oyhantçabal P.; Siegesmund, S.; Wemmer, K.; Frei R. & Layer, P. 2007. Post-collisional transition from calc-alkaline to alkaline magmatism during transcurrent deformation in the southernmost Dom Feliciano Belt (Braziliano–Pan-African, Uruguay). *Lithos*, Amsterdam, Elsevier, 98:141–159.

Oyhantçabal P.; Wagner-Eimer, M.; Wemmer, K.; Schulz, B.; Frei R. & Siegesmund, S. 2012. Paleo- and Neoproterozoic magmatic and tectonometamorphic evolution of the Isla Cristalina de Rivera (Nico Pérez Terrane, Uruguay). *International Journal of Earth Sciences*, Berlin, Springer-Verlag, 21st February 2012, special on-line published, .pdf distribution, 18 p.

Parisi, G. N.; Toniolo, J. A.; Grazia, C. A. & Pinto, L. G. R. 2010. *Prospecção de fosfato no Rio Grande do Sul*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Belém do Pará. *Anais...* Belém do Pará, SBG, p. 236.

Passchier, C. W. & Simpson, C. 1986. Porphyroclast systems as kinematic indicators. *Journal of Structural Geology*, London, U. K., Pergamon Press, 8:831-844.

Passchier, C.W. & Trouw, R. A. J. 2005. *Microtectonics*, Berlin, Springer-Verlag, 2nd edition, 366 p.

Paterson, S.R.; Vernon, R. H. & Tobisch, O. T. 1989. A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids. *Journal of Structural Geology*, London, U. K., Pergamon Press Ltd., 11(3):349-363.

Picada, R. S. (1971) *Ensaio sobre a tectônica do Escudo Sul-Riograndense. Caracterização dos sistemas de falhas*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 25, *Anais...* São Paulo, SBG, p. 167-191.

Press, F.; Siever R.; Grotzinger, J. & Jordan, T. H. 2006. *Para Entender a Terra*. Porto Alegre, Bookman, Tradução: Rualdo Menegat. 4^a Edição, 1^a Reimpressão, 656 p.

Pupim, F. do N.; Mattos, J. T. de & Jiménez-Rueda, J. R. 2010. Análise morfoestrutural do município de Rio Claro – SP: possíveis implicações ambientais. *Revista de Geografia*, Recife, DCG/Napa, Universidade Federal de Pernambuco, v. especial, VIII SINAGEO, 1:210-223.

RADAMBRASIL 1986. *Folha SH22-Porto Alegre e Parte das Folhas SH21-Uruguaiana e SI21-Lagoa Mirim*. Rio de Janeiro, IBGE. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ministério de Minas e Energia. Projeto RADAM, vol. 33. escala 1:1.000.000.

RADAMBRASIL 1988. *Mapa de Geomorfologia do Estado do Rio Grande do Sul*. Rio de Janeiro, IBGE. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ministério de Minas e Energia. Projeto RADAM. escala 1:750.000.

Ramsay, J.G. & Huber, M. I. 1983. *The Techniques of Modern Structural Geology: Strain Analysis*. London, Elsevier Science Academic Press, 7th printing, 2001, vol. 1, 311 p.

Ramsay, J.G. & Huber, M. I. 1987. *The Techniques of Modern Structural Geology: Folds and Fractures*. London, Elsevier Science Academic Press, 6th reprinting, 2002, vol. 2, 391 p.

Ramsay, J.G. 1967. *Folding and fracturing of rocks*. New York, McGraw-Hill Book Company, 1st ed., 568 p.

Rapela, C. W.; Pankhurst, R. J.; Casquet, C.; Fanning, C. M.; Baldo, E. G.; Casado, J. M. G.; Francisco, M. del C. G. & Dahlquist, J. A. 2007. The Río de La Plata Craton and the assembly of SW Gondwana. *Earth-Science Reviews*, Amsterdam, Elsevier, 83(1):49-82.

Renner, L. C. & Pulz, G. M. 2005. Parâmetros técnicos para o aproveitamento ornamental dos granitoides Jaguari e Santa Rita, região de Ibaré, Oeste do Escudo Sul-Rio-Grandense. *Revista Pesquisas em Geociências*, Porto Alegre, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 32(2):89-99.

Ribeiro, M. & Fantinel, L.M. 1978. Associações petrotectônicas do escudo sul-riograndense. I. Tabulação e distribuição das associações petrotectônicas do Escudo do Rio Grande do Sul. *Iheringia, Série Geologia*, Porto Alegre, 5:19-54.

Ribeiro, M. & Lichtenberg, E. 1978. *Síntese da geologia do escudo do Rio Grande do Sul*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife. *Anais...* Recife, SBG, vol. 6, p. 2451-2463.

Ribeiro, M. 1966. Geologia da quadrícula de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. *Boletim da Divisão de Fomento da Produção Mineral*, Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Produção Mineral, Ministério de Minas e Energia, vol. 127, 232 p.

Ribeiro, M. 1970. Sobre um padrão orogênico evidenciado no escudo sulriograndese – Nota Prévia. *Iheringia, Série Geologia*, Porto Alegre, 16 de Outubro de 1970, 3:101-107.

Ribeiro, M. J. 1978. *Mapa provisional do cobre no Escudo Sul-Rio-Grandense*. Departamento Nacional de Produção Mineral, 1º Distrito, Divisão de Geologia e Mineralogia. Ministério de Minas e Energia. escala 1:500.000.

Riccomini, C. & Crósta, A. P. 1988. Análise preliminar de lineamentos em imagens em sensores remotos aplicada á prospecção mineral na área dos granitóides Mandira, SP. *Boletim do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo*, São Paulo, Universidade de São Paulo, Série Científica, 19:23-37.

Rivereau, J. C. 1972. *Curso de fotointerpretação: notas de aulas*. Brasília, Série Didática, Departamento de Geociências, Universidade Nacional de Brasília, vol. 4, 128 p.

Rodrigues, F. B.; Murádas, K.; Formoso, M. L. L.; Lisboa, N. A. & Dani, N. 2009. *Formação Santa Tecla, sudoeste do Rio Grande do Sul - novos dados e concepções*. In: Salão de Iniciação Científica, 21, 2009, Porto Alegre. *Livro de resumos...* Porto Alegre, CNPq, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 836.

Rowland, S. M.; Duebendorfer, E. M. & Schiefelbein, I. M. 2007. *Structural analysis and synthesis: a laboratory course in structural geology*. Oxford, Blackwell Publishing, 3rd edition, 322 p.

Ruberti, A. N.; Keller, Jörg; Spratt, J.; Perova, Elena N. & Kearsley, A. 2008. Hydrothermal REE fluorocarbonate mineralization at Barra do Itapirapuã, a multiple stockwork carbonatite, southern Brazil. *The Canadian Mineralogist*, 46:901-914.

Ruberti, E.; Szabó, G. A. J. & Machado, R. 2000. Rochas Metamórficas, Cap. 18. In: Teixeira, W.; Toledo, M. C. M. de; Fairchild, T. R. & Taioli, F. 2000. *Decifrando a Terra*. São Paulo, Oficina de Textos, 568 p.

Ruppel, L. M. V. 2010. *Evolução tectônica do Complexo Arroio da Porteira, Bagé – RS*. Porto Alegre, Dezembro de 2010, 84 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ruppel, K. M. V. (2012) *Caracterização das cloritas associadas a zona de falha de Ibaré*. Salão de Iniciação Científica, 24, UFRGS, Porto Alegre, Apresentação Nº. 206166.

Saldanha, D. L.; Cunha, M. do C. L. & Danni, J. C. M. 2008. Identificação de rochas ultramáficas por imagens orbitais TM – Landsat 5 no Escudo Sul-Rio-Grandense, RS. *Revista Pesquisas em Geociências*, Porto Alegre, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 35(1):21-26.

Sales, V. C. 2002. Geomorfologia estrutural - Terra, corpos planetários sólidos. *Mercator - Revista de Geografia da UFC*, Fortaleza, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Ceará, 1(2)127-132.

Samoilov, V. S. 1991. The main geochemical features of carbonatites. *Journal of Geochemical Exploration*, Amsterdam, Elsevier, 40:251-262.

Şengör, A. M. C. 1990. Plate tectonics and orogenic research after 25 years: A Tethyan perspective. *Earth-Science Review*, Amsterdam, Elsevier, 27:1-201.

Sharma, B. K. & Bholá, A. M. 2004. Microstructures of co-axially folded vein segments and crenulation cleavage: Evidence for dissolution phenomena in the Chamba Thrust Sheet, western Himalayas. *Episodes*, India, Department of Geology, University of Delhi, June 2004, 27(2):119-124.

Sibson, R. H. 1977. Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society*, 133(3):191–213.

Singer, D.A., 1986. Descriptive model of carbonatite deposits, In: Cox, D. P. & Singer, D. A., (editors) *Mineral deposit models*. United States Geological Survey Bulletin, 1693:51.

Siqueira, J. B.; Cavalcante, I. N. & Reis, A. V. G. 2002. Aplicação do sensoriamento remoto para locação de poços tubulares. *Revista de Geologia*, Fortaleza, Universidade Federal do Ceará, 15:141-150.

Soares, P. C. & Fiori, A. P. 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícia Geomorfológica*, Dezembro de 1976, 16(32):71–104.

Soares, P. C.; Luz, M. E. R.; Redaelli, R. & Guerra, S. M. S. 1982. *Análise morfoestrutural em fotos aéreas: aplicação na prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná*. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2, 1982, Brasília. *Anais...* Brasília, CNPq, Vol. 1, p.157-168.

Soares, P. C.; Mattos, J. T.; Balieiro, M. G.; Barcellos, P. F.; Meneses, P. R.; Guerra, S. M. S. & Csordas, S. M. 1981. *Análise morfoestrutural regional com imagens de radar e Landsat na Bacia do Paraná*. In: Simpósio Regional de Geologia, 3, 1981, Curitiba. *Anais...* Curitiba, SBG, Vol. 1, p. 201-216.

Stoppa, F. & Woolley, A. R. 1997. The Italian carbonatites: field occurrence, petrology and regional significance. *Mineralogy and Petrology*, Berlin, Springer-Verlag, 59:43-67.

Taylor, G. R. 1988. Image analysis techniques for the interpretation of air photo lineaments, petroleum exploration, Eromanga Basin, Australia. *Geocarto Int.*, 3:53-60.

Tessari, R.I. & Picada, R.S. 1966. Geologia da quadrícula de Encruzilhada do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. Boletim da Divisão de Fomento da Produção Mineral Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Produção Mineral, Ministério de Minas e Energia, Vol. 124, 147 p.

Texas Instruments 1973. *Projeto Aerogeofísico Camaquã: estado do Rio Grande do Sul*. Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Produção Mineral, CNEN e Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil. Ministério de Minas e Energia. Vol. 4.

Toledo, M. C. M.; Oliveira, S. M. B. de; & Melfi, A. J. 2000. Intemperismo e Formação do Solo, Cap. 8. In: Teixeira, W.; Toledo, M. C. M. de; Fairchild, T. R.; Taioli, F. 2000. *Decifrando a Terra*. São Paulo, Oficina de Textos, p. 139-166.

Toniolo, J. A.; Parisi, G. N.; Grazia, C. A. & Reischl, J. L. 2010. *Prospecção de fosfato na Área de Três Estradas, Lavras do Sul, RS*. In:

Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, 4, Ouro Preto. *Anais...* Ouro Preto, ADIMB.

Tuttle, O. F. & Gittins, J. 1966. *Carbonatites*. New York, John Willey & Sons, 1st edition, 591 p.

UFRGS 1987. *Mapeamento Geológico: Projeto Ibaré Norte*. Trabalho de Conclusão de Curso, Porto Alegre. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ulbrich, H. H. G. J. & Gomes, C. B. 1981. Alkaline rocks from continental Brazil. *Earth-Science Reviews*, Amsterdam, Elsevier, 17:135-54.

UNISINOS 1982. *Mapeamento Geológico da Região de Ibaré-RS*. Trabalho de Conclusão de Curso, São Leopoldo. Graduação em Geologia. Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

Veneziani, P. 1897. *Análise de movimentos de tectônica rúptil e rúptil-dúctil através da interpretação de produtos de sensores remotos na região do Espinhaço Meridional (MG): uma correlação com processos evolutivos*. São Paulo, 186 p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Vernon, R. H.; Collins, W. J. & Cook, N. D. J. 2012. Metamorphism and deformation of mafic and felsic rocks in a magma transfer zone, Stewart Island, New Island. *Journal of Metamorphic Geology*, Blackwell Publishing Ltd, 30:473–488.

Verwoerd, W. J. 2008. The Goudini Carbonatite Complex, South Africa: a re-appraisal. *The Canadian Mineralogist*, 46:825-830.

Vitek, J. D.; Giardino, J. R. & Fitzgerald, J. W. 1996. Mapping Geomorphology: A journey from paper maps, through computer mapping to GIS and virtual reality. *Geomorphology*, 16:233-249.

Walsh, S. J.; Butler, D. R. & Malanson, G. P. 1998. An overview of scale, pattern, process relationships in geomorphology: a remote sensing and GIS perspective. *Geomorphology*, 21:183-205.

Wernick, E. 2004. *Rochas magmáticas: conceitos fundamentais e classificação modal, química, termodinâmica e tectônica*. São Paulo, Editora UNESP, Série Didática, reimpressão, 1^a ed. 2003, 660 p.

Wildner, W.; Ramgrab, G. E.; Lopes, R. da C. & Iglesias, C. M. da F. 2007. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Sul*. Porto

Alegre, Programa Geologia do Brasil - Mapas Geológicos Estaduais, DVD. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil. Ministério de Minas e Energia. escala 1:750.000.

Woolley, A. R. 1987. *Alkaline Rocks and Carbonatites of the World. Part 1: North and South America*. London, Natural History British Museum, 1st edition, 213 p.

Wooley, A. R. & Church A. A. 2005. Extrusive Carbonatites: a brief review. *Lithos*, Amsterdam, Elsevier, November-December 2005, 85:1-14.

Woolley, A. R. & Kjærsgaard, B. A. 2008. Paragenetic types of carbonatite as indicated by thye relative abundances of associated silicate rocks: evidence from a global database. *The Canadian Mineralogist*, 46:741-752.

Woolley, A. R.; Kjærsgaard B. A. 2008. *Carbonatite occurrences of the world: map and database*. Ottawa, CD-ROM, Geological Survey of Canada. escala 1:10.000.000.

Zaitsev, A. N.; Keller, Jörg; Spratt, john.; Perova, Elena N. & Kearsley, A. 2008. Nyerereite-Pirssonite-Calcite-Shortite relationships in altered natrocarbonatites, Oldoinyo Lengai, Tanzania. *The Canadian Mineralogist*, 46:843-860.

Zaitzev A. N. & Keller J. 2006. Mineralogical and chemical transformation of Oldoinyo Lengai natrocarbonatites, Tanzania. *Lithos*, Amsterdam, Elsevier, 91:191-207.

Anexos

Os anexos de resultados e dados pertinentes a este Trabalho de Conclusão de Curso na forma de Projeto Temático em Geologia se encontram em arquivos homônimos aos aqui listados, no formato PDF. São eles:

ANEXO A - COMPILAÇÃO DA CADERNETA DE CAMPO

ANEXO B - MAPA GEOLÓGICO - ÁREA DO PROJETO

ANEXO C - MAPA LITOLÓGICO DE PONTOS - CARBONATITO TRÊS ESTRADAS

ANEXO D - MAPA ESTRUTURAL DE MEDIDAS DE FOLIAÇÕES - CARBONATITO TRÊS ESTRADAS

ANEXO E - MAPA ESTRUTURAL DE MEDIDAS DE FALHAS - CARBONATITO TRÊS ESTRADAS

ANEXO F - TABELA DE PONTOS LITOLÓGICOS DE CAMPO - CARBONATITO TRÊS ESTRADAS

ANEXO G - TABELA DE MEDIDAS ESTRUTURAIS UNIFORMIZADAS - CARBONATITO TRÊS ESTRADAS

ANEXO H - TABELA DE MEDIDAS ESTRUTURAIS POR TIPO DE ESTRUTURA - CARBONATITO TRÊS ESTRADAS

ANEXO I - TABELA DE MEDIDAS ESTRUTURAIS POR TIPO DE LITOLOGIA - CARBONATITO TRÊS ESTRADAS