



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

# **PROSPECÇÃO DE NÍQUEL SULFETADO NO *GREENSTONE BELT* DE CRIXÁS, CRIXÁS-GO**

**DANIEL BORTOWSKI CARVALHO**

Orientador: **Prof. Dr. José Carlos Frantz**

Co-orientadora: **Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Juliana Charão Marques**

Tese de Doutorado elaborada junto ao  
Programa de Pós-Graduação em Geociências  
para obtenção do Título de Doutor em  
Metalogenia

**Porto Alegre, RS  
2013**

# UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

**Reitor:** Carlos Alexandre Netto

**Vice-Reitor:** Rui Vicente Oppermann

## INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Carvalho, Daniel Bortowski

Prospecção de níquel sulfetado no greenstone belt de Crixás,  
Crixás-GO . / Daniel Bortowski Carvalho. - Porto Alegre:  
IGEO/UFRGS, 2013.  
[202 f.] il.

Tese (Doutorado).- Universidade Federal do Rio Grande do  
Sul.Graduação em Geografia.Instituto de Geociências. Porto Alegre,  
RS - BR,2013.

Orientador:José Carlos Frantz  
Coorientador:Juliana Charão Marques

1.Níquel sulfetado.2.Komattitos.3.Guia pro.4.Geoquímica .I. Título.

CDU 55

---

Catálogo na Publicação  
Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS  
Alexandre Ribas Semeler CRB 10/1900

**COMISSÃO EXAMINADORA**

**Dr. Werner Weber**

**Prof. Dr. Viter Magalhães Pinto**

**Prof. Dr. Marcus Vinícius Dorneles Remus**

***Daniel Bortowski Carvalho***

**Porto Alegre, 28 de junho de 2013**

**Resultado: Aprovado**

## **DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais, esposa e avós†.*

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de estudos disponibilizada em grande parte do desenvolvimento desta tese de doutorado, o que possibilitou a manutenção de todas as minhas atividades durante a realização deste trabalho e ao Programa de Pós-Graduação em Geociências – PPGGeo da UFRGS.

À Votorantim Metais, principalmente aos geólogos Thomas Brenner, Paulo Ravacci, Jonas Motta, Guilherme Vanzela e Gustavo Oliveira pelo apoio e por autorizarem a utilização e divulgação dos dados nesta tese de doutorado.

Aos professores Dr. José Carlos Frantz e a Dra. Juliana Charão Marques pela excelente orientação na realização das tarefas e etapas essenciais à minha tese, e pelo apoio e confiança em mim depositados durante este período. Não poderia esquecer de agradecer também as excepcionais elucidações do professor Dr. Hardy Jost. Foram vocês que tornaram possível a conclusão deste trabalho mesmo quando estávamos à milhas de distância.

Ao aluno de graduação em Geologia da UFRGS, João Rodrigo, pelo efetivo apoio em importantes etapas deste trabalho.

Aos meus ex-colegas e amigos Carlos André, Werner Weber, Rodrigo Martins, Walter Yamaoka, Paulo (“Guri”) José, João Felipe, Joymax e Ríverton Melo pela grandiosa e animada ajuda, tanto nos trabalhos de campo como nas tarefas em gabinete e posteriores momentos de descontração.

À minha querida esposa Juliana Andrade Araújo pela paciência e compreensão, mesmo quando tivemos que mudar os planos de nossas férias para que eu pudesse trabalhar na tese, e por me incentivar a ter perseverança, assim como meus pais, nos momentos em que comecei a questionar se devia seguir em frente.

Além das pessoas citadas, gostaria de agradecer também a todos os professores, banca examinadora, colegas, familiares e amigos, que de alguma maneira colaboraram e incentivaram para que fosse possível a realização deste trabalho, a vocês o meu eterno agradecimento.

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	v
SUMÁRIO .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABELAS.....	xi
RESUMO .....	xii
ABSTRACT .....	xiv

## **CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....**

**16**

1.1 Introdução .....	16
1.2 Localização e Acessos.....	17
1.3 Objetivos .....	20
1.4 Métodos de Trabalho.....	20
1.4.1 Levantamento Preliminar de Dados.....	21
1.4.2 Reconhecimento Prévio das Áreas de Estudo .....	21
1.4.3 Levantamentos Topográficos.....	21
1.4.4 Mapeamento Geológico.....	22
1.4.5 Amostragem de Solo .....	23
1.4.6 Geofísica .....	25
1.4.7 Sondagem .....	26
1.4.8 Geoquímica de Rocha .....	28
1.4.9 Petrografia.....	29
1.4.10 Datação .....	29

## **CAPÍTULO 2 - REVISÃO CONCEITUAL E EXPLORATÓRIA SOBRE DEPÓSITOS DE NÍQUEL SULFETADO EM KOMATIITOS.....**

**31**

2.1 Komatiitos.....	31
2.2 Mineralizações de Níquel Sulfetado em Komatiitos.....	32
2.2.1 Depósitos de Níquel Sulfetado dos Greenstone Belt de Barberton, África do Sul ...	35
2.2.2 Depósitos de Níquel Sulfetado dos Greenstone Belt de Kambalda, Austrália .....	38
2.2.3 O Depósito de Níquel Sulfetado do Greenstone belt Abitibi, Canadá.....	40
2.2.4 O Depósito de Ni-Fe Sulfetado do Greenstone belt Morro do Ferro em Fortaleza de Minas, MG.....	42
2.3 Prospecção de Depósitos de Níquel em Komatiitos.....	44

## **CAPÍTULO 3 – GEOLOGIA REGIONAL .....**

**47**

3.1. Província Tocantins.....	47
3.2 Terrenos Granito-Greenstone Belt .....	50
3.2.1 Greenstone belt de Crixás .....	56
3.3 Geologia Estrutural.....	63
3.4 Metamorfismo.....	65
3.5 Geocronologia .....	66

<b>CAPÍTULO 4 – MINERALIZAÇÕES NO GREENSTONE BELT DE CRIXÁS .....</b>	<b>69</b>
4.1 <i>Mineralização de Níquel</i> .....	70
4.2 <i>Mineralização Aurífera</i> .....	73
4.3 <i>Outras Ocorrências</i> .....	76
<b>CAPÍTULO 5 – GEOLOGIA DO DEPÓSITO DE NÍQUEL SULFETADO DE BOA VISTA</b>	<b>77</b>
5.1 <i>Mapa Geológico</i> .....	77
5.2 <i>Seções Geológicas</i> .....	80
5.3 <i>Caracterização dos Litotipos</i> .....	90
5.3.1 <i>Rochas Granito-gnáissicas</i> .....	91
5.3.2 <i>Komatiitos</i> .....	98
5.2.3 <i>Serpentinitos</i> .....	102
5.2.4 <i>Talco Xistos</i> .....	104
5.2.5 <i>Basaltos Komatiíticos</i> .....	106
5.2.6 <i>Anfibolitos</i> .....	108
5.2.7 <i>Xistos Carbonosos</i> .....	110
5.2.8 <i>Formações Ferríferas Bandadas (BIFs)</i> .....	111
5.3 <i>Caracterização do Minério</i> .....	112
5.4 <i>Geoquímica das Rochas Máfico-ultramáficas</i> .....	126
5.5 <i>Geocronologia das Rochas Granito-gnáissicas</i> .....	131
<b>CAPÍTULO 6 - RESULTADOS DE PROSPECÇÃO NO DEPÓSITO DE NÍQUEL SULFETADO DE BOA VISTA.....</b>	<b>139</b>
6.1 <i>Geoquímica de Solo</i> .....	139
6.2 <i>Geofísica</i> .....	143
6.2.1 <i>Magnetometria (MAG)</i> .....	143
6.2.2 <i>Eletromagnético – TDEM (Time-Domain Electromagnetics)</i> .....	146
6.2.3 <i>Eletromagnético – VTEM (Versatile Time-Domain ElectroMagnetics)</i> .....	148
6.3 <i>Integração dos Dados de Testemunhos de Sondagem</i> .....	149
<b>CAPÍTULO 7 – DISCUSSÕES .....</b>	<b>160</b>
7.1 <i>Aspectos Geológicos</i> .....	160
7.2 <i>Prospecção e Exploração Mineral</i> .....	169
<b>CAPÍTULO 8 – SUMÁRIO E CONCLUSÕES .....</b>	<b>186</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>192</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização e vias de acesso ao município de Crixás a partir de Goiânia e Brasília. .	18
Figura 1.2 – Imagem de satélite Quickbird mostrando a localização do Depósito de Níquel Sulfetado de Boa Vista. ....	19
Figura 1.3 – Balizamento realizado durante as atividades de fixação de piquetes às linhas de pesquisa levantada topograficamente.....	22
Figura 1.4 – Distribuição das amostras de solo sobre o mapa geológico da região de estudo.....	24
Figura 1.5 – Levantamento aeroeletromagnético (VTEM) da região <i>Greenstone belt</i> de Crixás. ...	26
Figura 1.6 – Sondagem rotativa diamantada realizada no Depósito de Níquel de Boa Vista. ....	27
Figura 1.7 – Mapa geológico simplificado com a localização das sondagens. ....	28
Figura 2.1 – Tonelagem dos depósitos komatiíticos de Ni-Cu.....	34
Figura 2.2 – Teor de níquel dos depósitos komatiíticos de Ni-Cu.....	35
Figura 2.3 – Mapa geológico simplificado da parte ocidental do <i>Greenstone belt</i> Barberton.....	36
Figura 2.4 – Coluna estratigráfica da Formação Komati Inferior e Superior. ....	37
Figura 2.5 – Distribuição das razões Ni/Cr superiores a 1,8 nos komatiitos basais de Kambalda..	39
Figura 2.6 – Geologia e depósitos de minério do <i>Greenstone belt</i> Abitibi.. ....	41
Figura 2.7 – Geologia e depósitos de níquel do <i>Greenstone belt</i> Morro do Ferro. ....	43
Figura 3.1 – Mapa geológico simplificado da porção centro-leste da Província Tocantins.. ....	49
Figura 3.2 – Localização e subdivisão do terreno granito- <i>greenstone belt</i> de Goiás.....	51
Figura 3.3 – Esquema de evolução estimada para os <i>greenstone belts</i> da porção norte do Bloco Arqueano-Paleoproterozóico de Goiás. ....	53
Figura 3.4 – Colunas estratigráficas dos <i>greenstone belts</i> da porção norte do Bloco Arqueano de Goiás. ....	55
Figura 3.5 – Geologia do <i>Greenstone belt</i> de Crixás com indicação da posição da área com depósitos de níquel sulfetado em komatiitos.....	57
Figura 4.1 – Mapa de localização dos principais depósitos minerais do norte de Goiás.. ....	69
Figura 4.2 – Seção esquemática de uma zona mineralizada do Depósito de Níquel Sulfetado de Boa Vista. ....	71
Figura 4.3 – Seções esquemáticas de estruturas vulcânicas e ocorrência dos tipos de mineralização de níquel primário em depósitos de tipo KHNS. ....	72
Figura 5.1 – Geomorfologia típica do <i>Greenstone belt</i> de Crixás. ....	78
Figura 5.2 - Mapa litológico da região de Boa Vista com indicação da sondagem BVD0095.. ....	80
Figura 5.3 - Localização da seções de furos de sondagem realizadas na Malha Norte em relação a geologia e projeção em planta dos corpos de minério.. ....	82

Figura 5.4 - Seção transversal evidenciando a geologia a partir dos furos de sondagem das seções VM1 e VM2.....	84
Figura 5.5 - Seção transversal evidenciando a geologia a partir dos furos de sondagem da seção VM3.....	85
Figura 5.6 - Seção transversal evidenciando a geologia a partir dos furos de sondagem das seções VM5 e VM6.....	86
Figura 5.7 - Seção transversal evidenciando a geologia a partir dos furos de sondagem da seção VM9.....	88
Figura 5.8 - Seção transversal evidenciando a geologia a partir dos furos de sondagem BVD0110 e BVD0112.....	89
Figura 5.9 - Perfil da sondagem BVD0095 com indicação da posição das amostras empregadas nos estudos petrográficos de maior detalhe.....	90
Figura 5.10 – Afloramento de rochas graníticas com granulometria grossa, cor cinza a cinza escura presentes na forma de lajeado em área da Malha Leste.....	92
Figura 5.11 – Afloramento de rochas graníticas há cerca de 5 km do ponto de amostragem de tonalito atribuído ao Complexo Anta.....	92
Figura 5.12 – Testemunhos de sondagem do final do furo BVD0095 evidenciando o contato entre as rochas granito-gnáissicas e metabasaltos serecitizados e deformados.....	94
Figura 5.13 - Porção da rocha granítica amostrada a partir do testemunho de sondagem do Furo BVD0095 para datação U-Pb em zircão.....	95
Figura 5.14 - Amostra de rocha BVD-95-29 do furo de sondagem BVD0095.....	97
Figura 5.15 - Amostra de lâmina petrográfica BVD-95-29 de granitóide coletado a partir do furo de sondagem BVD0095.....	98
Figura 5.16 - Afloramento de rochas komatiíticas.....	99
Figura 5.17 - Amostra de rocha BVD-0095-06 do furo de sondagem BVD0095.....	101
Figura 5.18 - Amostra de rocha BVD-0095-07 do furo de sondagem BVD0095.....	103
Figura 5.19 - Amostra de rocha BVD-0095-21 do furo de sondagem BVD0095.....	105
Figura 5.20 - Amostra de rocha BVD-0095-23 do furo de sondagem BVD0095.....	107
Figura 5.21 – Amostra de rocha BVD-0095-25 do furo de sondagem BVD0095.....	109
Figura 5.22 – Amostra BVD-114-ASM-01 de biotita-grafita-clorita-quartzo xisto sulfetado coletado a partir do furo de sondagem BVD0114.....	111
Figura 5.23 - Características das mineralizações de níquel presentes no furo BVD0095.....	114
Figura 5.24 - Características do minério de níquel presentes no furo BVD0078.....	118
Figura 5.25 - Características das mineralizações da área de Boa Vista.....	122
Figura 5.26 – Amostra de rocha BVD-0095-26 do furo de sondagem BVD0095.....	123
Figura 5.27 – Mineralização primária e remobilizada de níquel sulfetado em relação ao posicionamento estratigráfico.....	125
Figura 5.28 - Variação nos teores de Ni versus Cr (em ppm) dos litotipos basalto komatiítico, komatiito e anfibolito representados para rochas ultramáficas metamorfisadas.....	127
Figura 5.29 – Gossan típico encontrado na região do <i>Greenstone belt</i> de Crixás.....	128
Figura 5.30 - Diagrama ternário de Ni-Cu-Zn discriminando o campo dos gossans verdadeiros (curva à esquerda do diagrama).....	129

Figura 5.31 - Distribuição dos gossans em relação ao mapa geológico simplificado e áreas com anomalias de níquel em solo. ....	130
Figura 5.32 - Imagens de <i>backscattering</i> ilustrando as características predominantes nos grãos presentes na amostra de tonalito do Complexo Anta. ....	132
Figura 5.33 - Diagrama concórdia da amostra do tonalito do Complexo Anta.....	133
Figura 5.34 - Imagens de <i>backscattering</i> ilustrando as características predominantes nos grãos presentes na amostra do granodiorito do furo BVD0095.....	136
Figura 5.35 - Diagrama concórdia das análises apenas de núcleos herdados nos zircões da amostra de granodiorito do furo BVD0095.....	137
Figura 6.1 - Distribuição dos teores de níquel no solo em relação aos furos de sondagem e gossans caracterizados como verdadeiros. ....	140
Figura 6.2 - Distribuição dos teores de cobre no solo em relação aos furos de sondagem e gossans caracterizados como verdadeiros. ....	141
Figura 6.3 - Distribuição dos teores de zinco no solo em relação aos furos de sondagem e gossans caracterizados como verdadeiros. ....	142
Figura 6.4 - Mapa da amplitude do sinal analítico.. ....	145
Figura 6.5 - Mapa de condutividade do levantamento com TDEM. ....	146
Figura 6.6 - Localização das linhas cobertas por <i>Moving Loop</i> . ....	147
Figura 6.7 - Representação gráfica mostrando as linhas de vôo do levantamento por VTEM.....	149
Figura 6.8 - Log dos furos de sondagens realizados nas seções VM1 e VM2.....	151
Figura 6.9 - Log dos furos de sondagens realizados na seção VM3. ....	153
Figura 6.10 – Log dos furos de sondagens realizados nas seções VM5 e VM6.....	155
Figura 6.11 - Log dos furos de sondagens BVD0110 e BVD0112.....	157
Figura 6.12 – Logs dos furos de sondagem realizados na seção VM9.....	159
Figura 7.1 - Mapa esquemático do <i>Greenstone belt</i> de Crixás mostrando os pontos de amostragem.....	168
Figura 7.2 – Esquema dos estágio de formação do modelo genético KHNS Tipo I remobilizado atribuído a mineralização de níquel sulfetado do depósito de Boa Vista. ....	172
Figura 7.3 - Corpos de minério do depósito de níquel sulfetado de Boa Vista destacando o furo de sondagem BVD0095.....	181
Figura 7.4 - Corpos de minério da Mina Palmeiras em relação às seções de sondagens e galerias do subsolo. ....	182
Figura 7.5 - Corpos de minério da Zona Superior da Mina III (nível 50) em relação às galerias do subsolo e cava da mina à céu aberto.....	184

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1 – Planilha de descrição do furo de sondagem BVD0095.....	115
Tabela 5.2 – Planilha de descrição do furo de sondagem BVD0078.....	119
Tabela 5.3 – Classificação litológica baseada na estimativa visual de sulfetos em porcentual.....	126
Tabela 5.4 – Localização e resultados analíticos referentes aos gossans verdadeiros.....	130
Tabela 5.5 – Resultados analíticos da amostra de tonalito do Complexo Anta. ....	134
Tabela 5.6 – Resultados analíticos da amostra de granodiorito do furo BVD0095.....	138
Tabela 7.1 – Resumo dos elementos geológicos utilizados como guias prospectivos para a região do <i>Greenstone belt</i> de Crixás. ....	177

## RESUMO

### Prospecção de Níquel Sulfetado no *Greenstone Belt* de Crixás, Crixás-GO

O *Greenstone belt* de Crixás é uma associação de rochas vulcano-sedimentares de baixo a médio grau metamórfico confinada entre complexos granito-gnáissicos arqueanos e que é parte do Maciço de Goiás, Província Tocantins. A seqüência supracrustal se estende por cerca de 30 km na direção Norte-Sul, tem de 2 a 6 km de largura e sua geometria é de uma quilha sinformal invertida com limites em planta em forma de sucessivas cúspides. Sua estratigrafia compreende uma seção inferior de rochas vulcânicas e outra superior sedimentar. A seção vulcânica é composta, na base, por komatiitos e raras intercalações de basalto e BIF (Formação Córrego Alagadinho) e, no topo, por basaltos toleíticos (Formação Rio Vermelho). A seção sedimentar (Formação Ribeirão das Antas) consiste de filitos carbonosos com lentes de dolomito e grauvacas. O *greenstone belt* tem sido exaustivamente estudado há mais de três décadas principalmente por conter importante reserva de ouro, atualmente explorada pela Mineração Serra Grande S.A. Contudo, desde meados dos anos 1980, algumas pesquisas indicaram que o mesmo tem potencial para a ocorrência de níquel sulfetado associado a rochas máfico-ultramáficas, com a identificação de um alvo conhecido como Depósito Níquel Sulfetado de Boa Vista, recentemente pesquisado em detalhe pela Votorantim Metais. O presente estudo, originado a partir de uma interação entre o setor produtivo (Votorantim Metais e Geoexplore Consultoria e Serviços Ltda.) no qual o aluno está inserido e o meio acadêmico no desenvolvimento da tese, visou caracterizar e melhor compreender os controles, épocas e processos de mineralização e estabelecer guias prospectivos para ocorrências de níquel sulfetado no *Greenstone belt* de Crixás a partir do Depósito de Níquel de Boa Vista. O estudo envolveu todas as etapas consideradas como clássicas em atividades relacionadas à pesquisa mineral de metais base e petrografia e datação geocronológica de forma complementar. As atividades de campo resultaram em um mapa geológico com detalhamento da área estudada. Rochas máficas e ultramáficas das formações Rio Vermelho e Córrego do Sítio, respectivamente, constituem as principais unidades litológicas do *Greenstone belt* de Crixás associadas às ocorrências de níquel. As mineralizações de níquel demonstraram um comportamento bastante heterogêneo em relação às suas rochas encaixantes, podendo tanto ocorrer em litologias máficas quanto ultramáficas. Das diversas seções, cinco perfis foram selecionados para a elaboração do modelo geológico do minério e

melhor entendimento da estratigrafia e geometria dos corpos mineralizados, sendo um furo detalhado por petrografia, o que permitiu particularizar a variação litológica e a mineralização sulfetada. A presença de sulfetos nas rochas máficas e ultramáficas é identificada sob duas formas: minério com textura primária reliquiar obliterada e com textura fortemente remobilizada e com influência hidrotermal. Uma amostra de tonalito representativa do embasamento, Complexo Anta, e uma de granodiorito proveniente do furo estudado em detalhe foram selecionadas para datação geocronológica (U-Pb em zircão por LAM-MC-ICP-MS). O tonalito do embasamento forneceu uma idade de intercepto superior de  $3336 \pm 22$  Ma para núcleos herdados, uma idade de cristalização de intercepto superior de  $2924 \pm 29$  Ma e rejuvenescimento apontando o Brasiliano, idades compatíveis com o reportado para o Complexo Anta, embora um pouco mais antiga e sugestiva de um evento mais longo ou mais complexo. Por outro lado, o granodiorito forneceu núcleos herdados com idade de intercepto superior de  $2814 \pm 19$  Ma e bordas porosas de aspecto esponjoso com características hidrotermais para formação com idades fortemente sugestivas de cristalização durante o Ciclo Brasiliano. Estes granitos foram considerados muito relevantes por estarem associados a zona de bonança do minério de níquel e imprimirem forte alteração hidrotermal às encaixantes de minério. As intrusões graníticas parecem estar relacionadas com as estruturas que condicionam o minério remobilizado e definem a geometria das mineralizações de níquel de Boa Vista. A partir dos dados gerados e integrados sugere-se que a exploração mineral não se limite ao uso de modelos clássicos, mas que leve em consideração aspectos locais típicos de alojamento dos corpos de minério. Ainda, recomenda-se uma malha de sondagem regular direcionada ao *plunge*, *dip* e *strike* dos corpos de níquel e para as estruturas como dobras, falhas e descontinuidades. Similaridades de posicionamento final dos minérios de ouro da região e o de níquel parece indicar para um estágio de remobilização comum, possivelmente relacionado ao Ciclo Brasiliano. Neste contexto, investigações futuras e sistemáticas das injeções graníticas encontradas em Boa Vista podem ser essenciais para uma melhor avaliação da área do ponto de vista prospectivo.

## ABSTRACT

### **Prospection of Sulfide Nickel in the *Greenstone Belt* of Crixás, Crixás-GO**

The Crixás Greenstone belt consists of low-grade metamorphic volcanosedimentary sequence confined within Archean granite-gneiss complexes and that is part of the Goiás Massif, Tocantins Province. The supracrustal rock sequence extends for about 30 km in the North-South direction, is 2-6 km wide and has a cusped inverted sinform geometry. Its stratigraphic sequence is made up of lower volcanic and an upper sedimentary sections. The volcanic section is subdivided into lower komatiites with minor basalt and rare BIF intercalations (Córrego Alagadinho Formation) followed by upper tholeiitic basalts (Rio Vermelho Formation). The upper sedimentary section (Ribeirão das Antas Formation) consists of carbonaceous phyllites with dolomite lenses and greywackes. The greenstone belt has been extensively studied for more than three decades due to its substantial gold reserves, today explored by Mineração Serra Grande SA. However, since the mid-1980s, the research has indicated that it has the potential for the occurrence of sulfide nickel associated with mafic-ultramafic rocks, with the identification of a target known as Sulfide Nickel Deposit of Boa Vista, recently studied in detail by Votorantim Metais. This study originated from an interaction between the productive sector in which the student is inserted and the academic area for the development of the thesis, aiming to characterize and better understand the controls, ages and mineralization processes and establish prospective guides to sulfide nickel occurrences in the Crixás Greenstone belt from Nickel Deposit of Boa Vista. The study involved all stages considered classic in activities related to mineral researches of base metals and petrography and complementary geochronological dating. The field activities resulted in a geological map with study area detailed. Mafic and ultramafic rocks from Rio Vermelho and Córrego do Sítio formations, respectively, constitute the main lithologic unit of Crixás Greenstone belt associated the nickel occurrences. The nickel mineralization shows a very heterogeneous behavior in relation to the host rocks, being possible to occur in mafic and ultramafic lithologies. From many sections, five crosscuts were selected to elaboration of the geological model of ore and better understanding of the geometry of orebodies, where one drillhole was detailed by petrography, that allows particularize the lithologic variation and the sulfide mineralization. The presence of sulfides in the mafic and ultramafic rocks is identified by two ways: ore with primary texture reliquiar obliterated and texture strongly remobilized and with

hydrothermal influence. A representative sample of tonalite from basement, Complexo Anta, and a sample of granodiorite from the drillhole studied in detail were selected for geochronological dating (U-Pb in zircon by LAM-MC-ICP-MS). The tonalite from basement provided an upper intercept age of  $3336 \pm 22$  Ga for inherited cores, an crystallization age of upper intercept of  $2924 \pm 29$  Ga and rejuvenation pointing to Brasiliano, ages consistent with that reported for the Complexo Anta, although slightly oldest and suggestive of an event longer or more complex. Moreover, the granodiorite provides inherited cores with upper intercept age  $2814 \pm 19$  Ga and edges porous of spongy aspect with hydrothermal characteristics for formation with ages that strongly suggestive of crystallization during the Ciclo Brasiliano. These granites were considered very important for the association with the bonanza zone of the nickel ore and prints a strong hydrothermal alteration with the host rocks. The granitic intrusions appear to be related to the structures that constrain the remobilized ore and define the geometry of the nickel mineralization of Boa Vista. From the data generated and integrated is suggested that mineral exploration is not limited to the use of classical models, but should to consider the typical local aspects of hosting of orebodies. Is recommend still a regular drilling net directing to the plunge, dip and strike of nickel orebodies and to the structures like folds, faults and discontinuities. Similarities of final position of gold orebodies in the region and the nickel orebodies appear to indicate to a stage of common remobilization, probably related to the Ciclo Brasiliano. In this context, systematic investigations in the future of the granitic injections found in Boa Vista can be essentials to a better evaluation of the area from the prospective view point.

# CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

## 1.1 Introdução

O *Greenstone belt* de Crixás se insere na Faixa de Dobramentos Brasília, a qual é parte da Província Tocantins e é representada por extenso sistema de dobramentos neoproterozóicos compostos por sequências metassedimentares, intrusões máficos-ultramáficas, granitos sin- a tardi- e pós-orogênicos e sequências vulcano-sedimentares. Diversos trabalhos de geologia regional e local, geoquímica e petrologia têm sido realizados com vistas ao conhecimento do potencial metalogenético da região do *greenstone belt* tradicionalmente explorada para ouro. Na última década, diferentes mineralizações foram reconhecidas, entre estas um alvo conhecido como Depósito Níquel Sulfetado de Boa Vista, cujo potencial ainda não está devidamente avaliado e caracterizado.

A caracterização de ocorrências e depósitos minerais geralmente é feita a partir da descrição da forma, associação dos minerais de minério e suas texturas, da ganga, dos metais e do zoneamento, tanto dos minerais de minério como das alterações hidrotermais, reflexos dos processos de formação dos corpos de minérios. O estudo da geometria e demais características de uma ocorrência ou depósito mineral, importante na elaboração do projeto de lavra, permite estabelecer melhores controles do corpo mineralizado. Esses controles podem ser litológicos, estruturais, estratigráficos, petrográficos ou mesmo geoquímicos. Entretanto, muitas vezes esta caracterização não é suficiente para estabelecer um modelo de depósito. Isto se aplica às mineralizações de níquel sulfetado do *Greenstone belt* de Crixás, onde estudos anteriores (Ferreira Filho *et al.* 1997, Costa Jr. *et al.* 1997, Araujo & Ferreira Filho 1998, Ferreira Filho & Araujo 1998) ainda não permitiram reconhecer, com certeza, o modelo mais adequado, apesar de interpretadas como correspondente ao vulcanogênico komatiítico. No entanto, a região foi submetida a sucessivos episódios de deformação, o que suscita a possibilidade de remobilização e reposicionamento da mineralização primária. Ainda, os corpos mineralizados e suas rochas encaixantes carecem de detalhamento das suas características específicas e do reconhecimento da presença de intervalos com litotipos que sejam as potenciais fontes de enxofre assimilado pelo magma. O entendimento

destes aspectos fornecerá os necessários subsídios metodológicos da exploração mineral para Níquel nos komatiitos da região, objeto de estudo neste trabalho.

A presente tese foi originada a partir de uma interação entre o setor produtivo (Votorantim Metais e Geoexplore Consultoria e Serviços Ltda.) no qual o aluno está inserido e o meio acadêmico, e foi subdividida em quatro partes. A primeira consiste da revisão de aspectos teóricos e conceitos sobre níquel sulfetado em komatiitos; a segunda está subdividida em revisão sobre a geologia regional e local da área de estudo (Capítulo 3), com ênfase nos dados e propostas anteriores sobre a mineralização (Capítulo 4); a terceira reúne os dados obtidos nesta tese (Capítulo 5 e 6), sendo parte destes cedidos pela Votorantim Metais (especialmente Capítulo 6). Os dados cedidos pela Votorantim Metais constituem informações sobre campanhas de exploração realizada pela empresa contratada Geoexplore Consultoria e Serviços Ltda. e foram, em grande parte, adquiridos pelo próprio autor ou atividades acompanhadas por este (geoquímica de solo e geofísica) quando trabalhava naquela empresa. A última parte do trabalho (capítulo 7) discute e integra o conjunto dos dados sob o prisma prospectivo propondo as bases para as atividades de pesquisa exploratória para níquel para a região do Depósito de Níquel Sulfetado de Boa Vista no *Greenstone belt* de Crixás.

## **1.2 Localização e Acessos**

A área de estudo se localizada no Município de Crixás, noroeste do Estado de Goiás (Figura 1.1), para a qual o acesso, a partir de Goiânia, se faz pela rodovia GO-080 até a BR-153, por cerca de 90 km, e a partir de onde se alcança o entroncamento com a GO-336, após 100 km, e dali até Itapaci por 19 km. De Itapaci a Crixás são 103 km, subdivididos em dois trechos, o primeiro, de 75 km até Santa Terezinha de Goiás pela GO-154 e o segundo, por cerca de 30 km pela GO-347 até Crixás. A partir de Crixás, a área pesquisada situa-se a 12 km em direção a Nova Crixás, pela GO-336.

O depósito de Níquel Sulfetado de Boa Vista está localizado na porção noroeste do *Greenstone belt* de Crixás, onde os trabalhos de prospecção foram distribuídos em três alvos: Malha Norte, Malha Leste e Malha Oeste (Figura 1.2).

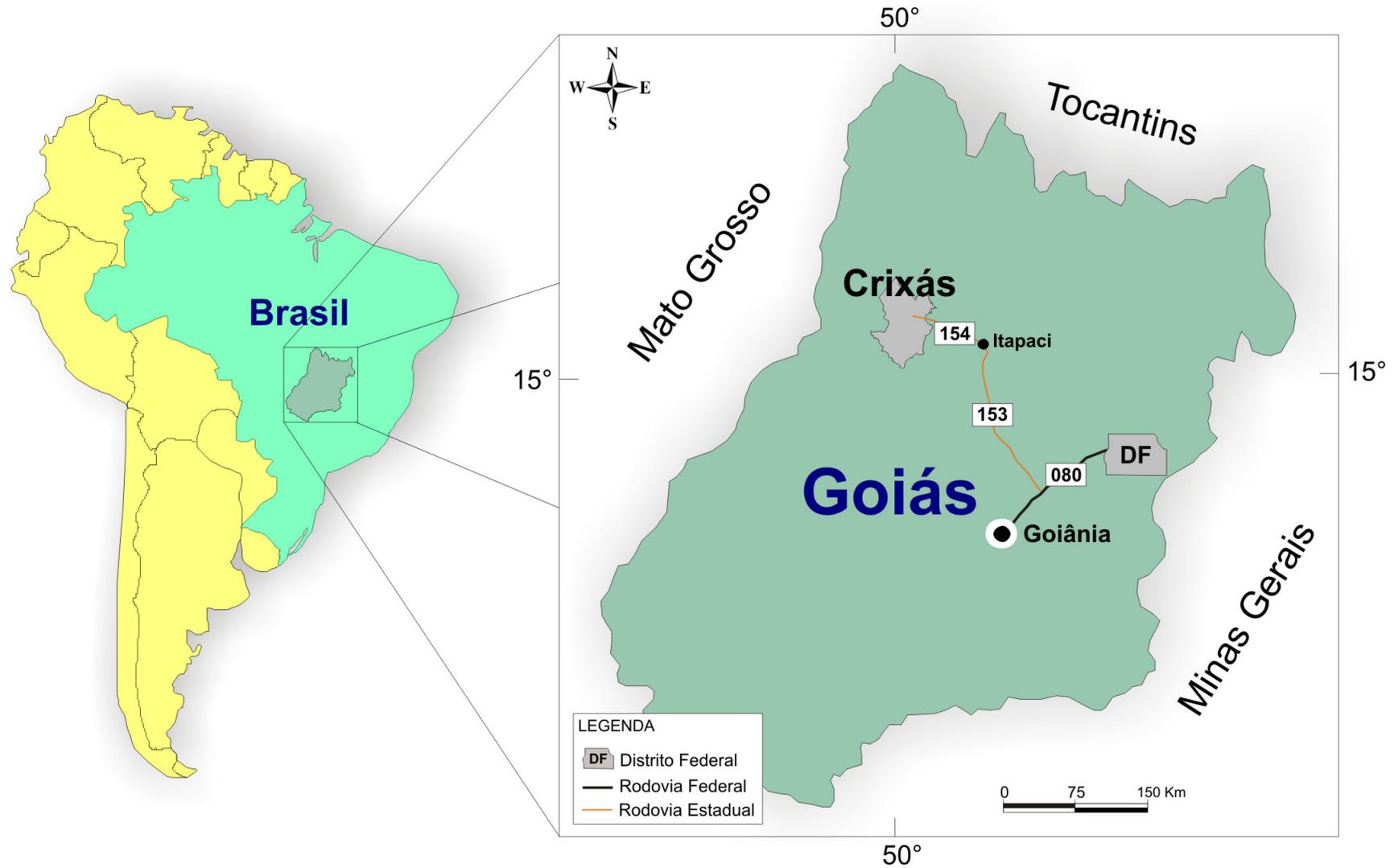


Figura 1.1 - Localização e vias de acesso ao município de Crixás a partir de Goiânia e Brasília (DF).

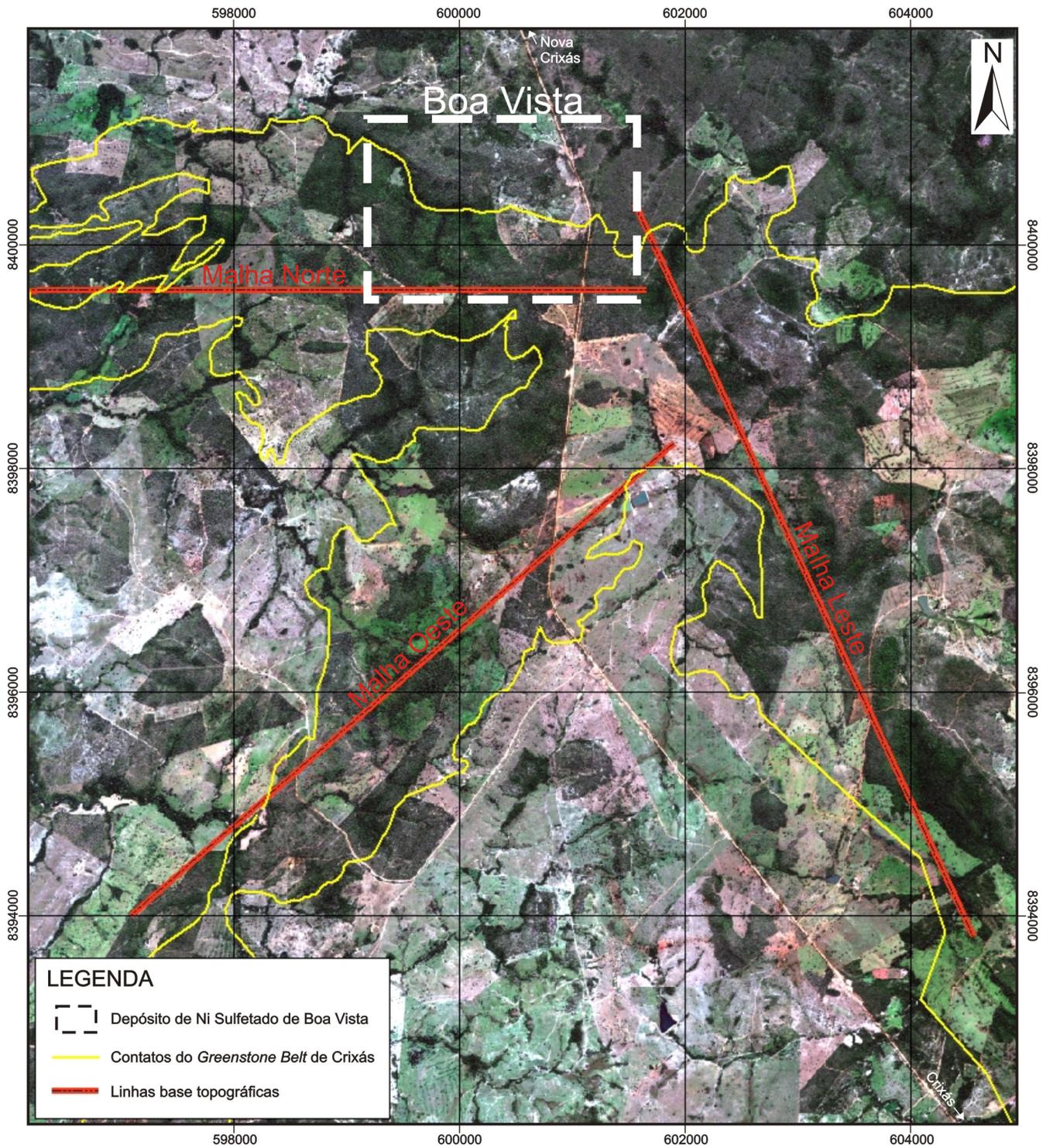


Figura 1.2 - Imagem de satélite Quickbird mostrando a localização do Depósito de Níquel Sulfetado de Boa Vista. Cedido pela Votorantim Metais.

### 1.3 **Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho foi o de caracterizar e melhor compreender os controles, épocas e processos de mineralização e estabelecer guias prospectivos para ocorrências de níquel sulfetado no *Greenstone belt* de Crixás a partir do Depósito de Níquel de Boa Vista. As metas principais compreenderam a definição dos condicionantes geológicos destes processos e a estimativa de sua época de formação.

A partir do conhecimento atual sobre a geologia regional e da área do depósito foram definidos os objetivos específicos que compreendem: o entendimento do modelo geológico local e regional a partir de dados de campo e laboratório obtidos anteriormente e os gerados durante esta investigação; a caracterização das rochas hospedeiras e do minério; a comparação das estruturas de controle do depósito Boa Vista com as que hospedam os depósitos de ouro do *greenstone belt*; e a definição dos processos envolvidos no condicionamento final da mineralização.

Considerando os dados obtidos ao longo deste trabalho, estimou-se que os granitóides presentes nos testemunhos de sondagem poderiam estar relacionados temporalmente ao evento que condiciona a mineralização atualmente. Para tentar estabelecer a época do condicionamento final da mineralização, foi definido como objetivo específico ao longo do desenvolvimento do trabalho, datar rochas graníticas na região do alvo. Mais especificamente, objetivou-se datar os granitóides presentes no *footwall* de um dos furos de sondagem de uma seção tipo realizado no depósito com a intenção de comparar a idade com a dos granitóides do Complexo Anta, a partir da bibliografia e de uma amostra representativa coletada em campo.

### 1.4 **Métodos de Trabalho**

A tese de doutorado ocorreu a partir de uma interação entre o setor produtivo e o acadêmico. Assim, parte das atividades decorreu durante período de vínculo do doutorando com a empresa Geoexplore Consultoria e Serviços Ltda. que desenvolveu um projeto de prospecção em Crixás, coordenado pelo aluno, para a empresa Votorantim Metais e cujos resultados foram cedidos por esta para serem incorporados na tese. De forma complementar, visando os objetivos propostos para a tese, foram desenvolvidos

trabalhos de detalhamento das descrições dos testemunhos, descrições petrográficas e estudos geocronológicos, os dois últimos realizados integralmente na UFRGS.

As atividades realizadas são descritas a seguir em particularidade:

#### **1.4.1 Levantamento Preliminar de Dados**

Inicialmente foi realizado um levantamento de informações sobre a área de estudo a partir de pesquisa bibliográfica. Estes levantamentos foram também realizados de forma continuada ao longo da realização do trabalho. Os resultados de revisão da bibliográfica foram apresentados anteriormente durante a qualificação desta tese, e são aqui incluídos de forma resumida nos capítulos 2 e 3. No Capítulo 2 são reunidas informações de revisão conceitual sobre rochas komatiíticas, depósito de níquel sulfetado em komatiitos e prospecção de depósitos de níquel em komatiitos. Já o Capítulo 3 é dedicado a revisão da geologia regional incluindo aspectos gerais, detalhamento estratigráfico e estrutural do *Greenstone belt* de Crixás e aspectos geocronológicos.

Adicionalmente, nesta fase inicial, foi realizada uma visita à Mineração Serra Grande (MSG), detentora de quatro minas de ouro em operação na porção central do *Greenstone belt* de Crixás, com a intenção de conhecer a geologia e estruturas de controle dos corpos mineralizados.

#### **1.4.2 Reconhecimento Prévio das Áreas de Estudo**

As primeiras campanhas de campo visaram o reconhecimento das vias de acesso e das características geomorfológicas, estruturais e litológicas da área de interesse e também foram direcionadas a adquirir informações junto aos superficiários sobre os trabalhos de pesquisa anteriormente realizados.

#### **1.4.3 Levantamentos Topográficos**

Os trabalhos de topografia consistiram no levantamento de 3 linhas-base nas áreas dos alvos das malhas Norte, Leste e Oeste, amarradas em 2 marcos geodésicos com estação total. Ao longo das linhas-base foram fixados piquetes de 100 em 100 m e

pontos de saída ortogonais para posterior balizamento na abertura das linhas transversais (Figura 1.3).



**Figura 1.3** - Balizamento realizado durante as atividades de fixação de piquetes às linhas de pesquisa levantada topograficamente.

#### 1.1.4 Mapeamento Geológico

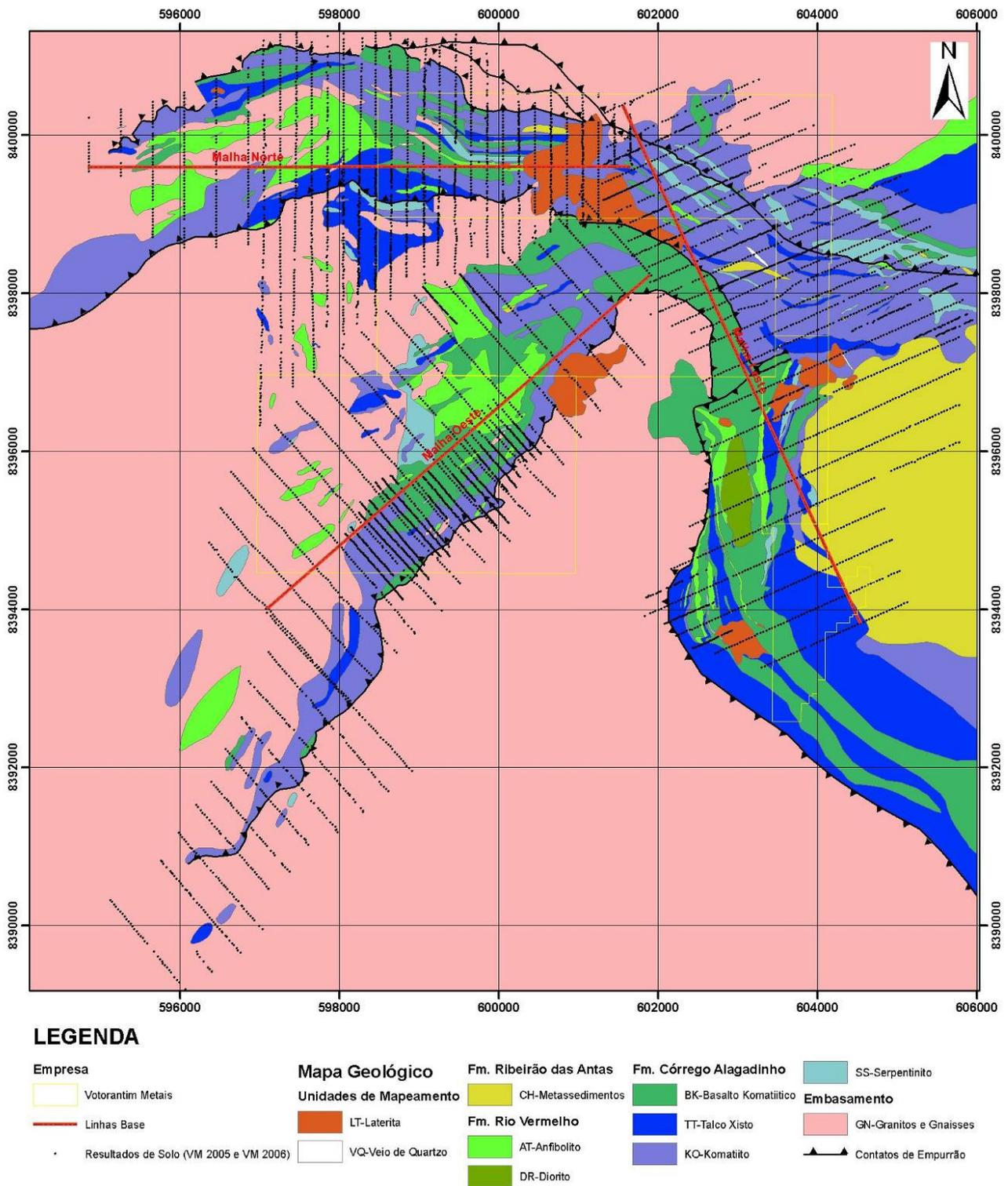
O mapeamento geológico da área foi realizado na escala 1:10.000 com a descrição de 2115 pontos, utilizando-se como suporte imagens de satélite Quickbird e Landsat TM7 e mapas topográficos gerados pelo *software* ArcVIEW. Esta foi umas das atividades mais exaustivas e durou 8 meses. A orientação em campo foi feita por meio de GPS de navegação convencional com os dados previamente referenciados às linhas levantadas pela topografia. Os trabalhos foram realizados por alvo, mas de forma controlada que permitisse compilar os resultados em um único mapa, embora imprevistos, tais como desautorização de superficiários e períodos de chuvas, não permitiram que esta sistemática fosse integralmente empregada em todos os momentos do estudo.

O mapeamento concentrou-se em obter dados sobre as rochas e estruturas das malhas Norte, Leste e Oeste, com redução de detalhes além dos limites destas. Durante esta atividade foi realizada a amostragem de litotipos mapeados e possíveis gossans.

#### **1.4.5 Amostragem de Solo**

A amostragem de solo foi inicialmente realizada em linhas com espaçamento de 400 m, com coleta de amostras de 40 em 40 m. Durante uma segunda etapa a malha foi adensada para 200 m com coleta de amostras de 20 em 20 m nas áreas de maior interesse. A Figura 1.4 ilustra a disposição das malhas de coleta de solo, bem como a extensão da Malha Oeste para sul, em função da existência de rochas ultramáficas. A ilustração também contém o adensamento da Malha Leste e da Malha Oeste visando às anomalias de níquel detectadas.

Ao todo foram coletadas 7477 amostras para análise química, realizada no Laboratório ALS Chemex pelo método multielementar ME-ICP41 por meio de digestão em água régia e leitura em ICP-AES para 34 elementos.



**Figura 1.4** - Distribuição das amostras de solo sobre o mapa geológico da região de estudo. Cedido pela Votorantim Metais.

### 1.4.6 Geofísica

Os trabalhos de geofísica foram desenvolvidos em 4 etapas. A inicial compreendeu o resgate de dados obtidos por estudos geofísicos anteriores e o novo levantamento por magnetometria terrestre (MAG) ao longo das malhas programadas nos alvos, seguida de leituras adicionais nas linhas da extensão sul da Malha Oeste e entre as malhas Oeste e Norte, e foram executados pela empresa Fugro Brasil.

Após os levantamentos magnetométricos a empresa Fugro Brasil também realizou trabalhos de eletromagnetismo no domínio do tempo (TDEM) por meio de arranjos de *Fix Loop* (1020 por 800 m). Na Malha Leste o arranjo de 1200 x 1080 m, na Norte de 1200 x 840 m e na Oeste de 1200 x 800 m. As frequências utilizadas em todos os *loops* foram de 30 Hz e os dados obtidos em 20 canais. Para o levantamento por *Moving Loop* a frequência foi de 3 Hz e o arranjo de 200 por 200 m.

Em adição ao MAG e TDEM a empresa Geotech Aerolevantamentos S.A foi contratada para realizar levantamentos aerogeofísicos por eletromagnetismo no domínio do tempo versátil (VTEM) num total de 3260 km em linhas E-W espaçadas em 250 m, perpendiculares às estruturas do *greenstone belt* e abrangendo-o como um todo, desde a área de Boa Vista até o seu extremo sul. Após esta etapa procedeu-se a um novo levantamento de detalhe por VTEM em linhas de vôo N-S com espaçamento de 100 m sobre o depósito de Boa Vista, totalizando 522,5 km (Figura 1.5).

Em complemento a empresa Fugro Brasil realizou levantamentos eletromagnetométricos BHEM em seis furos de sondagem. Os furos BVD0158 e BVD0177 foram selecionados para solucionar dúvidas sobre se as mineralizações interceptadas seriam suficientes para gerar anomalias identificadas no levantamento aerogeofísico com linhas EW. Nos furos BVD0114, BVD0130 e BVD0131 foram conduzidos BHEM para verificar uma possível continuação à NW da mineralização interceptada no furo BVD0107.

Posteriormente a empresa Reconsult Geofísica foi contratada para fazer uma reinterpretação dos dados, porém, o aluno não conseguiu obter o documento com as informações mais recentes para utilizar os dados na tese.



**Figura 1.5** – Levantamento aeroeletromagnético no domínio do tempo versátil (VTEM) da região *Greenstone belt* de Crixás.

#### 1.4.7 Sondagem

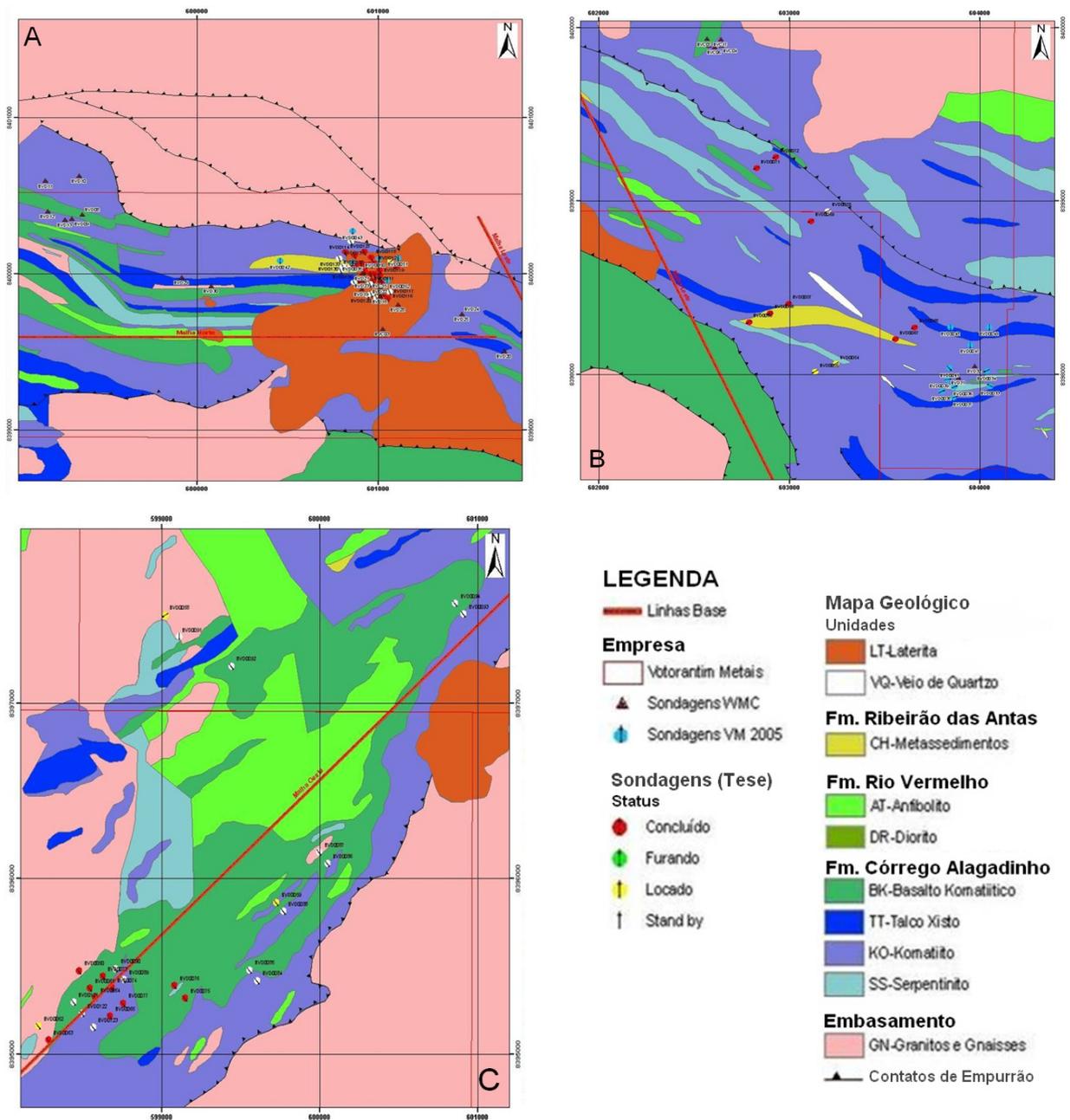
Previamente às campanhas de sondagem diamantada da Votorantim Metais, na década de 80 a empresa WMC já havia executado 32 sondagens que totalizaram 3537 m perfurados, das quais 22 localizadas na Malha Norte e 10 na Malha Leste. Os serviços de sondagem foram realizados pelas empresas Geosol e Servitec Foraco e durante esta tese resultaram em 91 furos com um total de 24.879 m (Figura 1.6 e 1.7), embora a pesquisa tenha continuado com a realização posterior de um total de mais de 130 furos de sondagem. A execução das sondagens dos 91 furos foi acompanhada pelo aluno, geólogo do projeto na época, que também realizou grande parte das descrições e interpretações dos dados obtidos como parte do projeto e da tese.

As sondagens pela Votorantim Metais nos três alvos (malhas Leste, Oeste e Norte – Figura 1.7) visaram interceptar rochas potencialmente hospedeiras de minério de Níquel e anomalias geoquímicas conhecidas desde as pesquisas da WMC nos komatiitos mapeados e coincidentes com condutores geofísicos. Normalmente os furos foram locados com inclinação perpendicular à foliação (NW) e com direção para SE.

Todos os 91 testemunhos de sondagem foram descritos, com amostragem e análise química por digestão com HF, HNO<sub>3</sub> e HClO<sub>4</sub> e lixiviação em HCl e dosagens por ICP-AES apenas dos intervalos ricos em sulfetos. Na época da pesquisa, definiu-se como teor de corte (*cut-off*) 0,40% Ni, com base no valor de mercado da tonelada do minério, e, de posse dos dados analíticos, individualizou-se os teores de Níquel iguais ou superiores ao teor de corte. De um total de 564 resultados, 90 amostras foram consideradas anômalas, distribuídas em 16 sondagens. Para esta etapa foram utilizados somente os resultados adquiridos na campanha de 2006, devido a maior densidade de dados e ao envolvimento do aluno no período.



**Figura 1.6** – Sondagem rotativa diamantada realizada no Depósito de Níquel de Boa Vista.



**Figura 1.7** - Mapa geológico simplificado com a localização das sondagens. A) Malha Norte; B) Malha Leste; e C) Malha Oeste. Cedido pela Votorantim Metais.

### 1.4.8 Geoquímica de Rocha

A geoquímica de rocha (*chip samples*) foi utilizada como suporte ao mapeamento geológico. No total foram coletadas e analisadas 32 amostras de rocha. As análises foram realizadas pelo Laboratório ALS Chemex com o emprego do método multielementar ME-ICP41, sendo que 11 amostras foram analisadas para óxidos de elementos maiores e elementos traço com vistas à melhor classificação petroquímica de

mostras de basalto komatiítico, komatiito e anfíbolito. Também foram analisadas 62 amostras de possíveis gossans.

#### 1.4.9 Petrografia

As lâminas delgadas para as análises petrográficas foram confeccionadas no Laboratório de Preparação de Amostras do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As descrições foram realizadas utilizando microscópio petrográfico convencional e se restringiram a amostras selecionadas a partir dos testemunhos de sondagem BVD0095, devido a sua boa representatividade litológica em 365,95m e aos mais elevados teores de níquel (amostra com 4,85%), e aos testemunhos de sondagem complementares BVD0078, BVD0102, BVD0103, BVD22 e BVD02 que integram uma seção que interceptou a estrutura mineralizada. Ao todo foram coletadas 29 amostras em distintas profundidades, as quais representam a variedade de rochas e níveis sulfetados e/ou com alto teor em níquel, sendo que 12 amostras foram descritas em maior detalhe.

#### 1.4.10 Datação

Para as análises de U-Pb em zircões por LAM-MC-ICP-MS (*Laser Ablation Microprobe–Multi-Collector–Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer*), as amostras foram britadas, moídas e peneiradas para a obtenção de frações entre 75 - 178  $\mu\text{m}$ . Após esta etapa, os minerais pesados desta fração foram concentrados por bateamento. O concentrado mineral foi então purificado utilizando separador eletromagnético Frantz e líquidos pesados (bromofórmio-tribromometano,  $\rho = 2.89 \text{ g/cm}^3$ ) para a obtenção de uma fração rica em cristais de zircão. Os grãos de zircão foram montados e resinados com epoxy a frio em uma *mount*. Após secagem da resina, a superfície foi lixada para exposição do interior dos grãos e então polida. Os grãos foram observados, descritos e fotografados em lupa binocular. O polimento consiste de fase importante para a obtenção de imagens de *backscattering* utilizadas para melhor identificação das características dos grãos a serem analisados e para posicionamento do ponto analítico. As imagens de *backscattering* deste estudo foram obtidas no SEM JEOL JSM 5800 do Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Para a limpeza das *mounts* após imageamento, foi utilizada acetona e um leve

polimento para extração de qualquer resíduo da cobertura de carbono, necessária para o imageamento por microscópio eletrônico de varredura.

As análises foram realizadas em um Espectrômetro de Massa Multicoletor com Plasma Acoplado Indutivamente (MC-ICP-MS) Neptune da Thermo-Finnigan com Microsonda Laser acoplada da New Wave Research, fonte sólida de Nd-YAG ( $\lambda=213$  nm). A ablação dos grãos foi realizada em *spots* de 30  $\mu\text{m}$ , com frequência de 10 Hz e intensidade de 0.19 a 1.02  $\text{J}/\text{cm}^2$ . O material pulverizado foi carregado por um fluxo de He ( $\sim 0.40$  L/min) e Ar ( $\sim 0.90$  L/min). Em todas as análises foi utilizado o padrão internacional GJ-1 para a correção da deriva do equipamento, assim como para o fracionamento entre os isótopos de U e Pb. Os dados foram adquiridos em 40 ciclos de 1 segundo. O procedimento de coleta de dados seguiu a sequência de leitura: 1 branco, 1 padrão, 4 amostras, 1 branco e 1 padrão. Em cada leitura foram determinadas as intensidades das massas  $^{202}\text{Hg}$ ,  $^{204}$  (Pb+Hg),  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  e  $^{238}\text{U}$ . As determinações isotópicas realizadas seguiram os procedimentos descritos em detalhe por Buhn *et al.* (2009).

A redução dos dados brutos, que inclui as correções para branco, deriva do equipamento e chumbo comum, foram realizadas em planilha EXCEL (Buhn *et al.* 2009). As incertezas associadas às razões apresentadas nas tabelas são de  $1\sigma$ , em porcentagem. As idades foram calculadas utilizando o ISOPLOT 3.0 (Ludwig 2003) e os diagramas (95% de confiança) confeccionados no mesmo programa.

## CAPÍTULO 3 – GEOLOGIA REGIONAL

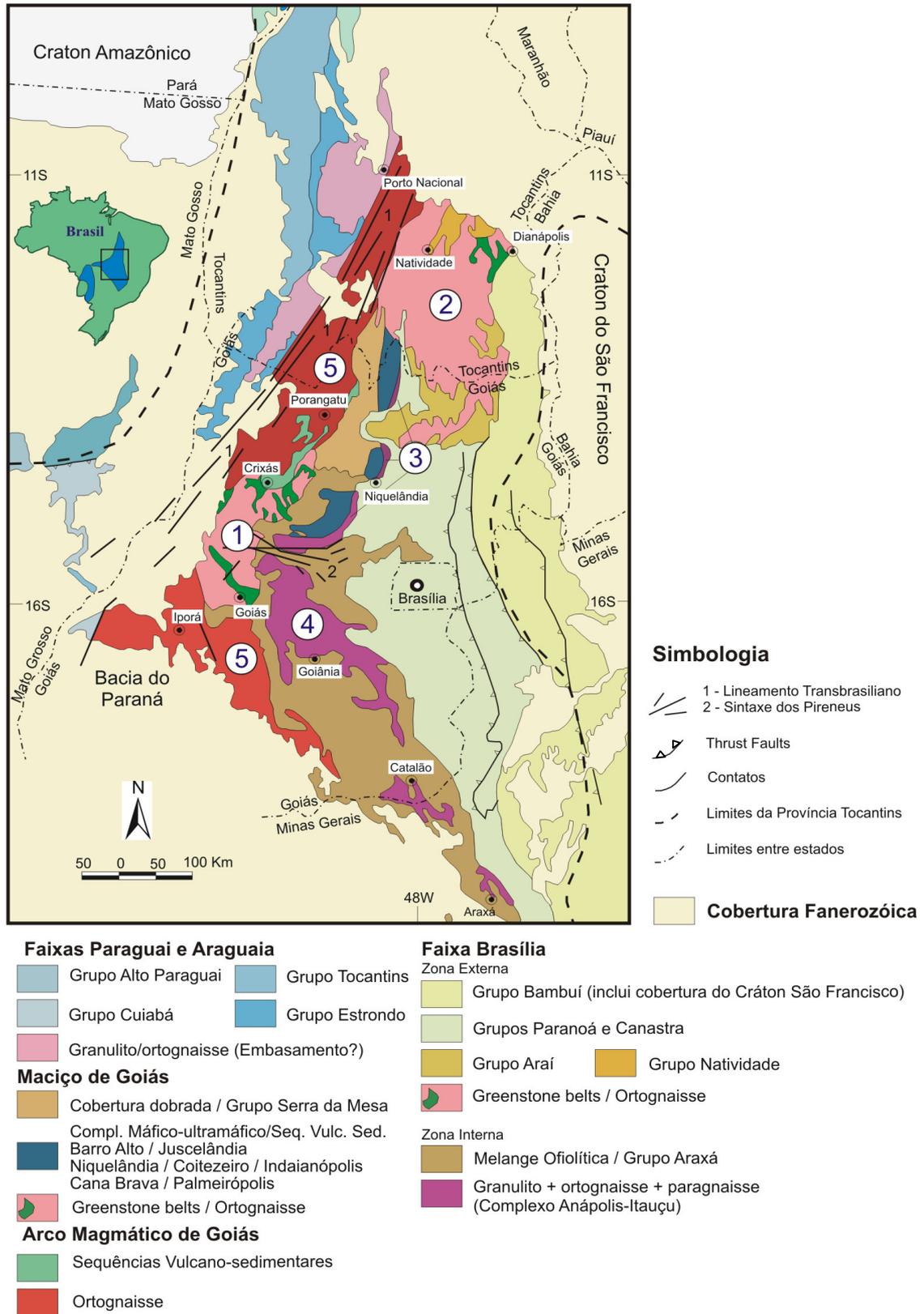
O Depósito de Níquel de Boa Vista está inserido no contexto das rochas do Maciço de Goiás, cercado a norte e a sul pelo Arco Magmático de Goiás, a leste pela Faixa Brasília e a oeste pelas Faixas Paraguai e Araguaia. O maciço constitui-se de rochas arqueano-paleoproterozóicas a neoproterozóicas, sendo associado a sequências granito-*greenstone belt*. O Depósito de Níquel de Boa Vista encontra-se hospedado no *greenstone belts* de Crixás. Este Capítulo visa revisar os aspectos mais relevantes da geologia regional e local.

### 3.1. *Província Tocantins*

A Província Estrutural Tocantins (Almeida *et al.* 1977) localiza-se na porção central do Brasil constitui um sistema de orógenos brasileiros caracterizados por cinturões de dobras e empurrões, com vergência para zonas cratônicas, das Faixas Brasília, Paraguai e Araguaia estando limitada pelas bacias sedimentares do Parnaíba, a norte, e Paraná, a sul (Figura 3.1). Estes cinturões resultaram da convergência e colisão dos crátons do São Francisco, a leste, Amazônico a noroeste e Parapanema a sudoeste. A sua porção centro-leste é composta por distintas associações de rochas metamórficas de idades que variam de arqueanas a neoproterozóicas, o que motivou a proposta de diversos modelos de compartimentação da província. Assim, Marini *et al.* (1981), a subdividiram em três unidades: 1) Maciço de Goiás, 2) Faixa Uruaçu e 3) Faixa Brasília. Posteriormente, Fuck (1994), Fuck *et al.* (1994) e Pimentel *et al.* (2004) a subdividiram, de oeste para leste no (1) Maciço de Goiás, composto por um microcontinente arqueano granito-*greenstone belt*, seqüências vulcanossedimentares mesoproterozóicas e complexos máfico-ultramáficos neoproterozóicos adjacentes e rochas metassedimentares da Seqüência Serra da Mesa, (2) no Arco Magmático de Goiás, de idade neoproterozóica, e (c) na Faixa Brasília propriamente dita, dividida nas zonas externa e interna.

Dentre estes compartimentos, a área de estudo localiza-se no Maciço de Goiás, originalmente denominado de Maciço Mediano de Goiás por Marini *et al.* (1981), o qual se situa entre rochas do Arco Magmático de Goiás, a norte e sul, a Faixa Brasília, a leste,

e as Faixas Paraguai e Araguaia, a oeste. O maciço é composto de rochas arqueano-paleoproterozóicas até neoproterozóicas, as primeiras consistindo em típica associação granito-*greenstone belt* representativa de um fragmento crustal (Brito Neves & Cordani 1991) alóctone (Pimentel *et al.* 2000) amalgamado à Faixa Brasília durante a colisão brasileira.



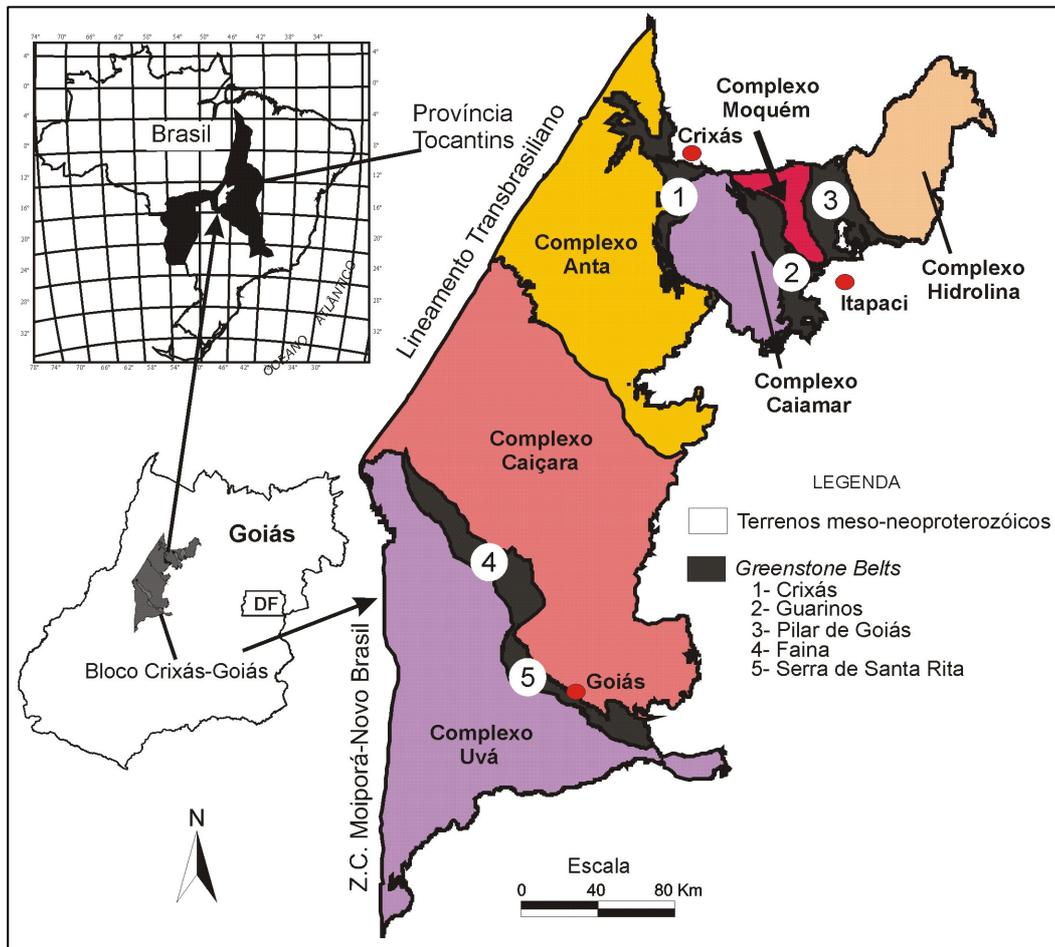
**Figura 3.1** - Mapa geológico simplificado da porção centro-leste da Província Tocantins (Modificado de Pimentel *et al.* 2004). 1) Bloco Arqueano de Crixás-Goiás; 2) Terrenos Paleoproterozóicos de Almas-Natividade; 3) Complexos máficos-ultramáficos; 4) Complexo Anápolis-Itaçu; 5) Arco Magmático de Goiás

### 3.2 Terrenos Granito-Greenstone Belt

O Terreno Arqueano Crixás-Goiás (Pimentel *et al.* 2000) ou Bloco Arqueano, situa-se no sudoeste da Província Tocantins, possui cerca de 16.000 km<sup>2</sup> e está tectonicamente envolto por rochas de origem e idade variadas (Figura 3.1). No norte limita-se com o Arco Magmático de Mara Rosa, de idade entre 850 e 560 Ma (Pimentel *et al.* 1997). No noroeste está truncado pelo Lineamento Transbrasiliano, o qual consiste da megaestrutura colisional N30°E do limite nordeste da Faixa Brasília com a Faixa Araguaia, cujas rochas mais jovens datam de 540 Ma e que, na região do bloco arqueano, estão parcialmente cobertas por sedimentos modernos da planície aluvial do Rio Araguaia. No sudoeste está em contato com uma cunha aberta para norte e composta de ortognaisses do bloco Fazenda Nova, de idade Sm-Nd 2,61 a 2,25 Ga (Mota-Araújo & Pimentel 2002), limitados a leste por um dos ramos do lineamento transcorrente sinistral Moirporá-Novo Brasil, e que separa o bloco arqueano do Arco Magmático de Arenópolis, de idade 940 e 630 Ma (Pimentel *et al.* 2000). No sul se limita com quartzitos, metaconglomerados e xistos da Seqüência Serra Dourada, sotopostos, a sul, por rochas metavulcano-sedimentares de idade Rb-Sr em rocha total de  $1977 \pm 55$  Ma, e idade Sm-Nd ( $T_{DM}$ ) de 2,2 Ga (Pimentel *et al.* 1996). No sudeste está sotoposto a rochas metassedimentares do Grupo Araxá, cuja população de zircão detrítico dominante data de 666 a 682 Ma, com idade mínima de  $638 \pm 11$  Ma dada pela de cristalização de um tonalito intrusivo (Piuzana 2002). Ao leste e nordeste ocorrem rochas metassedimentares do Grupo Serra da Mesa de idade-modelo Sm-Nd  $T_{DM}$  de 1,9 a 2,3 Ga (Pimentel *et al.* 2001).

O reconhecimento de que a região consistia de típica associação granito-*greenstone belt* arqueana deve-se a Danni & Ribeiro (1978) e os seus principais componentes compreendem cinco *greenstone belts* separados por complexos de ortognaisses (Figura 3.2). Os *greenstone belts* perfazem cerca de 20% da região e três situam-se na metade norte. Estão orientados segundo NS, possuem em média cerca de 40 km de comprimento e 6 km de largura e são designados, de oeste para leste, de Crixás, Guarinos e Pilar de Goiás. Dois situam-se na metade sul, estão justapostos por falha direcional N30°E, estão orientados segundo N60°W, em conjunto, totalizam cerca de 150 km de comprimento, com cerca de 6 km de largura média e são designados, de noroeste para sudeste, de Faina e Serra de Santa Rita. Seus contatos com os gnaisses adjacentes são tectônicos e a ocorrência de *klippen* nos gnaisses indica que são alóctones.

Os complexos granito-gnáissicos perfazem cerca de 80% da região e consistem de protólitos tonalíticos, granodioríticos, graníticos e dioríticos subordinados. Quatro destes situam-se na porção norte e são denominados, de oeste para leste, de Anta, Caiamar, Moquém e Hidrolina, e dois na porção sul que, de norte para sul compreendem os complexos Caiçara e Uvã. Os de norte estão separados pelos *greenstone belts* de Crixás, Guarinos e Pilar de Goiás (Figuras 3.2) e os de sul pelos *greenstone belts* Serra de Santa Rita e Faina. O limite entre os complexos de norte e sul é, tentativamente, traçado ao longo do Rio Tesouras, de canal linear com direção N60°W e com cerca de 100 km de comprimento. Diques máficos do Paleoproterozóico ocorrem em enxames ou isolados, bem como *stocks* graníticos do Neoproterozóico intrudem os gnaisses e, localmente, também os *greenstone belts* (Côrrea da Costa 2003, Jost 2009).



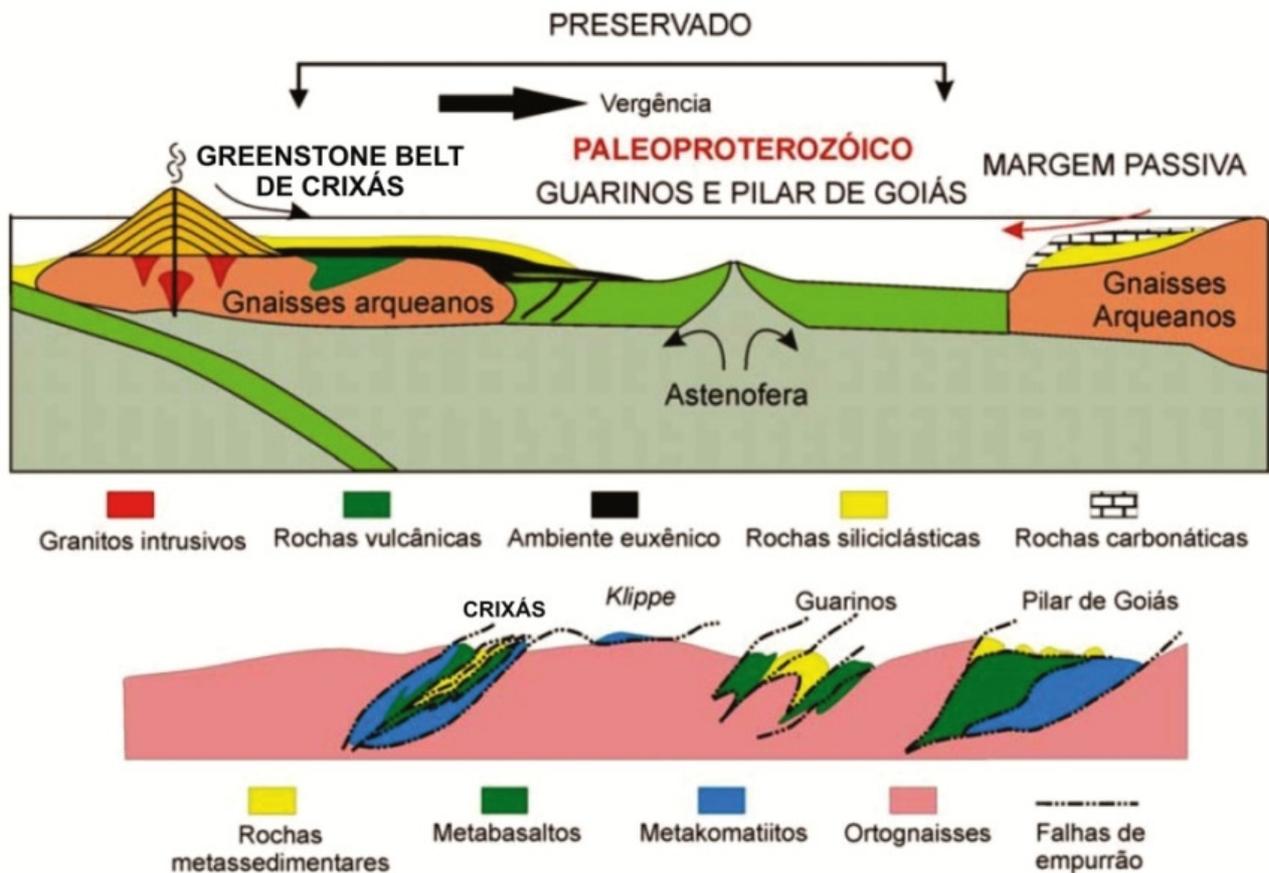
**Figura 3.2** – Localização e subdivisão do terreno granito-greenstone belt de Goiás. (Pimentel *et al.* 2000).

Berbert (1980) interpretaram as rochas granito-gnáissicas e os *greenstone belts* como posicionados na Sub-Zona Norte-Occidental do Complexo Basal Goiano, os qual foi sub-dividido por Machado (1981) em terrenos do tipo *greenstone belts*, granito-migmatítico e granulítico. Por outro lado, Ribeiro Filho (1981), Danni *et al.* (1982), Montalvão (1986) e Danni (1988), ao compilarem dados de campo das três seqüências vulcanossedimentares de Crixás, Mara Rosa, Porangatu e Santa Terezinha de Goiás as consideraram equivalentes, sendo que as três últimas foram, posteriormente, reconhecidas como pertencentes ao Arco Magmático de Goiás de idade neoproterozóica (Viana *et al.* 1995, Junges 1998, Pimentel *et al.* 1997).

Para Vargas (1992), a evolução da região ocorreu em ambiente intraoceânico, com geração de crosta oceânica representada pelos *greenstone belts*, seguido de subducção e fusão parcial responsável pela associação tonalito-thronjemitito-granodiorito, a qual ascendeu diapiricamente em meio às seqüências vulcano-sedimentares. Já Fortes (1996) propôs uma evolução ensiálica e que os *greenstone belts* se desenvolveram como *riffts* na crosta siálica pré-existente e foram submetidos a diversos episódios compressivos responsáveis pelo seu metamorfismo e deformação. Dados geocronológicos obtidos por Fortes *et al.* (2003), Tassinari *et al.* (2006), Queiroz *et al.* (2008), Jost *et al.* (2008) e Jost *et al.* (2010) em gnaisses e rochas supracrustais da porção norte da região sinalizam que a evolução da região foi mais complexa do que até então interpretada e que qualquer interpretação de regimes tectônicos que procurem vincular os complexos granito-gnáissicos e os *greenstone belts* como partes de uma mesma paleogeografia é, de momento, especulativa.

Rodrigues (2011) em sua dissertação sobre a geologia do depósito aurífero de Caiamar comenta que os dados atuais permitem concluir que *greenstone belts* não são explicados com base em um modelo tectônico universal, sendo necessário que cada caso seja analisado individualmente, uma vez que existem situações que podem ser explicadas por apenas um ambiente tectônico quanto outras que podem ser esclarecidas pela convergência de mais de um ambiente. O autor reitera ainda que o entendimento do ambiente dos *greenstone belts* de Goiás está em estágio embrionário e que faltam ser realizadas pesquisas mais detalhadas, embora dados esparsos na literatura sobre a assinatura geoquímica das rochas supracrustais da região dos *greenstones* de Crixás,

Guarinos e Pilar permitam a suposição de um modelo a partir da sucessão estratigráfica e das características geoquímicas de suas rochas (Figura 3.3).



**Figura 3.3** - Esquema de evolução estimada para os *greenstone belts* da porção norte do Bloco Arqueano-Paleoproterozóico de Goiás. Modificado de Rodrigues (2011).

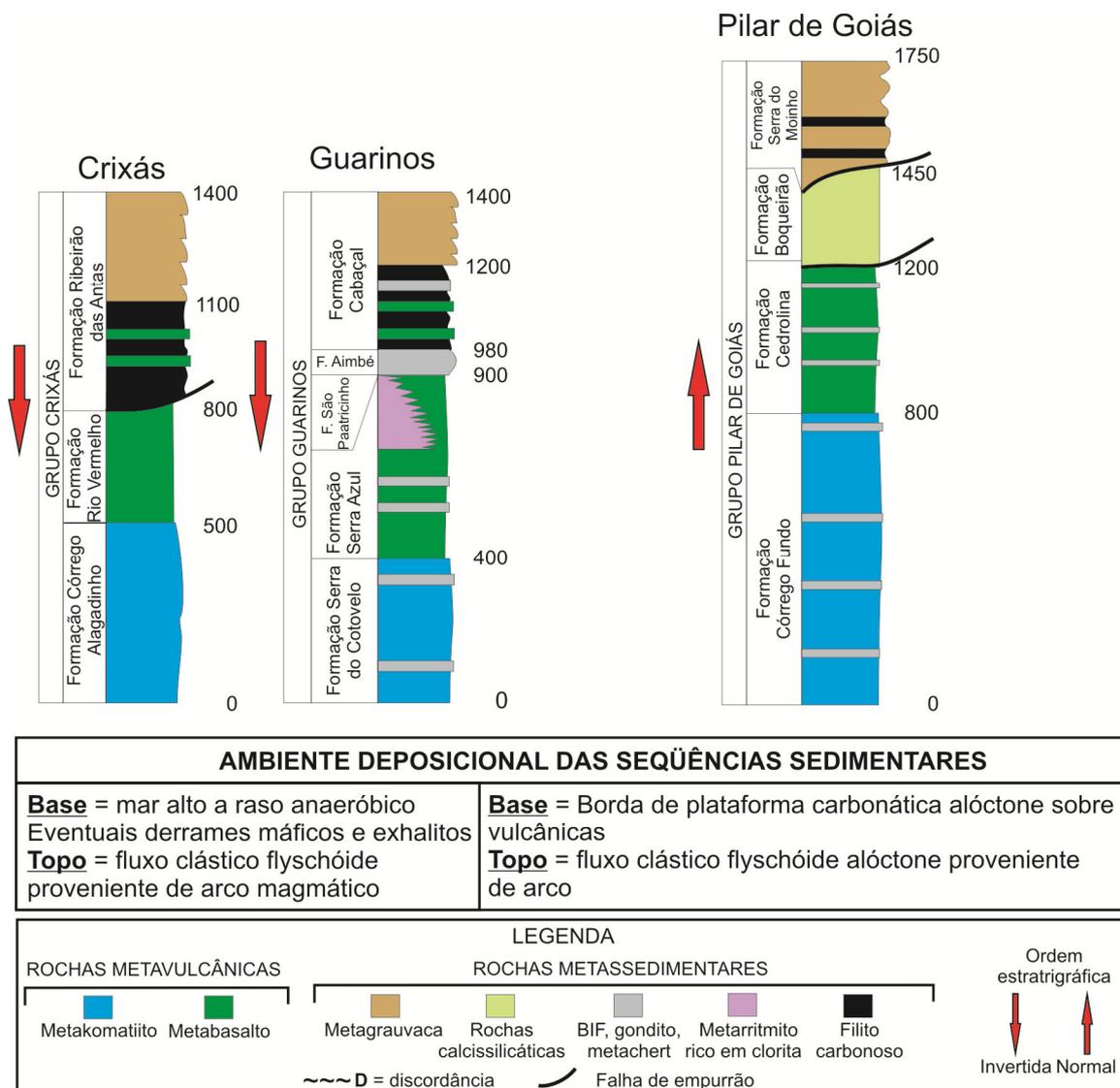
No tocante ao conteúdo litológico dos *greenstone belts* de Goiás, estes possuem seqüências em sucessão compatível com entidades mundiais similares, isto é, porções basais com rochas vulcânicas seguidas de porções superiores sedimentares (Figura 3.4). No caso presente, as seções inferiores de rochas metavulcânicas consistem de metakomatiitos basais seguidos de metabasaltos, organizados em unidades de fluxo limitadas por intervalos metassedimentares, metamorfisados na fácies xisto verde superior a anfibolito inferior. Feições vulcânicas primárias estão localmente preservadas e, nos komatiitos estas compreendem texturas *spinifex* e cumuláticas, *pillows*, brechas de fluxo e disjunções poliedrais e, em basaltos, *pillows*, varíolas, vesículas e orbículas. As rochas metassedimentares, no entanto, variam significativamente entre os *greenstone belts* (Jost & Oliveira 1991), como reflexo de distintos regimes bacinais e condições paleogeográficas e tectônicas (Jost 2010).

A primeira subdivisão estratigráfica para os três *greenstone belts* da porção norte da região foi proposta por Danni & Ribeiro (1978) quando o termo Grupo Pilar de Goiás foi criado para reunir as rochas supracrustais de Crixás, Guarinos e Pilar de Goiás e Sabóia (1979) subdividiu o grupo nas formações Córrego Alagadinho, Rio Vermelho e Ribeirão das Antas, para reunir, respectivamente, komatiitos, metabasaltos e rochas metassedimentares das três faixas. A variedade litológica do novo modelo foi posteriormente complementada por Danni *et al.* (1982, 1986), Castro & Magalhães (1984), Yamaoka & Araújo (1988) e Theodoro (1995). Por outro lado, Jost & Oliveira (1991) propõem que os três *greenstone belts* sejam considerados como entidades independentes, tendo em vista que se distinguem pela abundância relativa de rochas vulcânicas e ritmos de vulcanismo, bem como diferentes sucessões de rochas metassedimentares. Em vista disto, propõem a adoção de nova nomenclatura, segundo a qual os Grupos Crixás Guarinos e Pilar de Goiás, cada qual subdividido em unidades formais, representariam os respectivos contextos estratigráficos.

Assim, komatiitos caracterizam as formações Córrego Alagadinho (Grupo Crixás), Serra do Cotovelo (Grupo Guarinos) e Córrego Fundo (Grupo Pilar de Goiás). Estudos petrogenéticos nos *greenstones belts* de Goiás enfocaram principalmente as rochas komatiíticas e toleíticas das unidades estratigráficas mais inferiores. Tais estudos sugerem que o quimismo destas rochas, sobretudo no que se refere a elementos incompatíveis, seja característico de uma evolução a partir de fontes mantélicas do tipo *Al-depleted* para o *greenstone* de Crixás e do tipo *Al-undepleted* para os *greenstones* de Guarinos e Pilar de Goiás (Saboia *et al.* 1979, Kuyumjian & Dardenne 1982, Arndt *et al.* 1989, Kuyumjian & Jost 1993, Queiroz 1995).

Os metabasaltos compreendem as formações Rio Vermelho (Grupo Crixás), Serra Azul (Grupo Guarinos), Cedrolina (Grupo Pilar de Goiás). A seqüência sedimentar de Crixás consiste da Formação Ribeirão das Antas, composta de xistos carbonosos inferiores com algumas lentes de dolomito, seguidos de metagrauvas proximais ritmicamente acamadadas. Em Guarinos, da base para o topo, a seção contém as formações São Patricinho, Aimbé e Cabaçal. A Formação São Patricinho está lateralmente disposta a metabasaltos da Formação Serra Azul e consiste de metarritmitos ricos em clorita, com clastos de basalto locais. Ambas as unidades estão sotopostas por discordância à Formação Aimbé, composta de formação ferrífera com

uma fácies inferior de magnetita e uma superior de hematita. A Formação Cabaçal contém um membro inferior de xistos carbonosos em contato transicional com a Formação Aimbé e um superior de metagrauvacas rítmicas distais. Em Pilar de Goiás, a seção sedimentar é representada, da base para o topo, pelas formações Boqueirão e Serra do Moinho. A Formação Boqueirão tem cerca de 200 m de espessura e consiste de metachert basal com piritita e tremolita sotoposto a fino leito de formação manganesífera e rochas calcissilicáticas. A unidade está sobreposta à seção de komatiitos e basaltos por falha de empurrão. A Formação Serra do Moinho está empurrada sobre a Formação Boqueirão e consiste de metagrauvacas distais e filitos carbonosos.

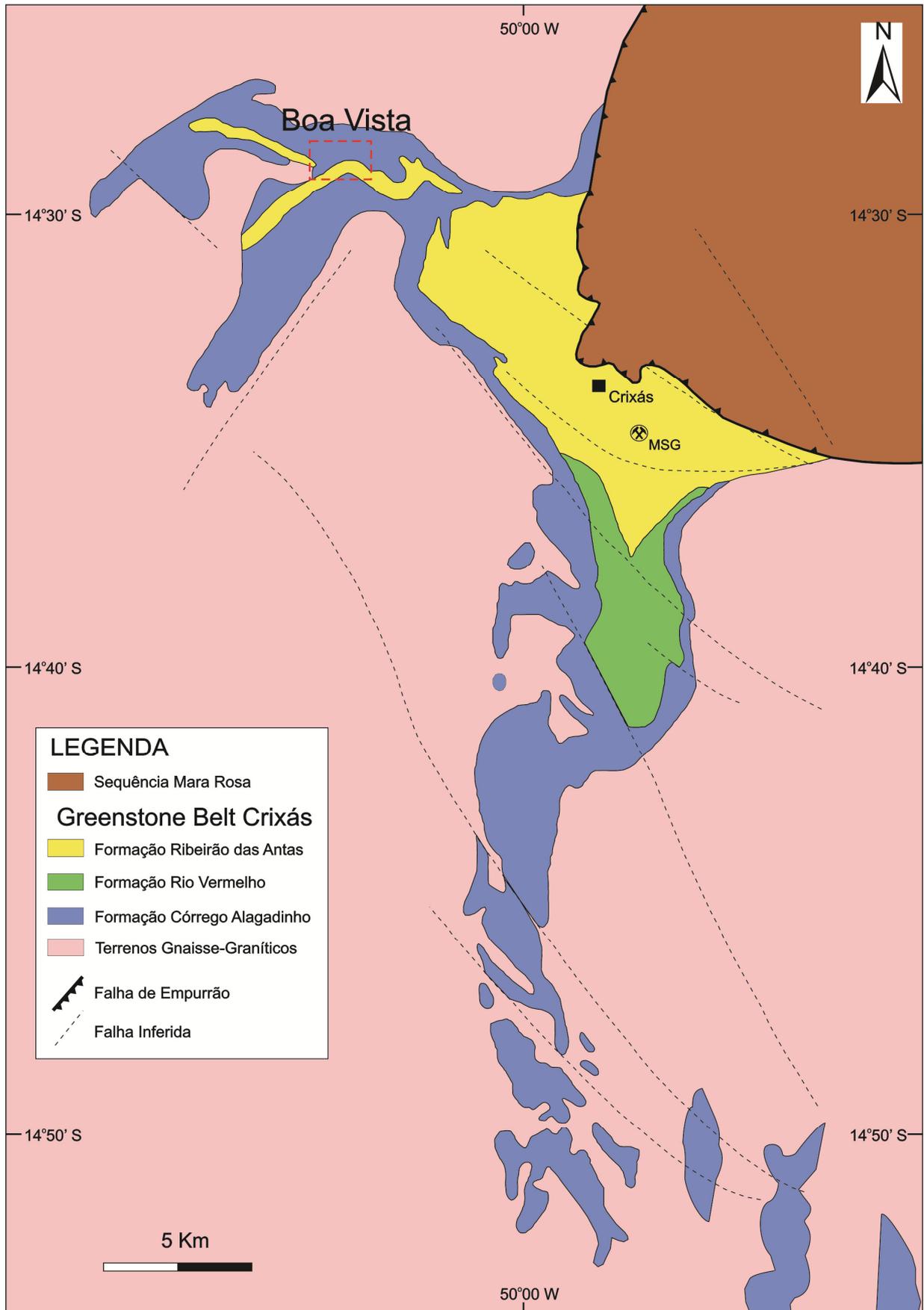


**Figura 3.4** - Colunas estratigráficas dos *greenstone belts* da porção norte do Bloco Arqueano de Goiás, com indicação das espessuras preservadas estimadas e ambientes de sedimentação das seções superiores. Modificado de Jost (2009).

### 3.2.1 *Greenstone belt* de Crixás

O *Greenstone belt* de Crixás se localiza no extremo noroeste do bloco Arqueano de Goiás, tem cerca de 30 km de comprimento segundo N-S e até 6 km de largura e se limita (Figura 3.5) a oeste com o Complexo granito-gnáissico Anta, a leste com o Complexo Caiamar e a norte-nordeste com rochas metassedimentares da Seqüência Mara Rosa (Pimentel *et al.* 1997, Lacerda Filho *et al.* 1999) pertencentes ao Arco Magmático de Goiás por meio de falha de empurrão denominada de Zona de Cisalhamento Mandinópolis (Jost *et al.* 2001). Divide-se em dois segmentos separados por falha direcional N60°W. O de sul é composto apenas de metakomatiitos e o de norte contém o espectro estratigráfico completo representado por metakomatiitos, metabasaltos e rochas metassedimentares. A porção norte está estruturada em calha sinformal, com contornos em cúspide resultante do soerguimento dos complexos adjacentes.

Importantes depósitos auríferos ocorrem em xistos carbonosos do pacote metassedimentar e compreendem lentes de sulfeto maciço, veios de quartzo e corpos disseminados. Diques máficos cortam a seção metassedimentar e os corpos mineralizados, sendo reconhecidos em testemunhos de sondagem e nas galerias das minas. Dados estruturais mostram que a mineralização ocorreu após dois eventos principais de dobramento e metamorfismo regionais e durante evento de cavalgamento epidérmico com a formação de *duplex* e antes da intrusão dos diques (Jost *et al.* 2009).



**Figura 3.5** – Geologia do *Greenstone belt* de Crixás com indicação da posição da área com depósitos de níquel sulfetado em komatiitos. Adaptado de Costa Jr. *et al.* (1997).

### 3.2.1.1 Complexos Granito-gnáissicos

Os complexos Anta e Caiamar marcam os limites ocidentais e orientais do *Greenstone belt* de Crixás e são constituídos por vários corpos de tonalito e granodiorito, com granitos subordinados, alguns polideformados e outros sem deformação. Quando deformados, os corpos foram submetidos a metamorfismo da fácies epidoto-anfibolito a anfibolito para a fácies xisto verde (Kuyumjian & Costa 1999). Sabóia (1979) interpretou estes complexos como intrusivos nas rochas supracrustais de Crixás ao passo que Kuyumjian (1981) sugeriu tratem-se de rochas do embasamento e Magalhães *et al.* (1984) os consideram como embasamento remobilizado e intrusivo na seqüência supracrustal.

O Complexo Anta é composto por gnaisses tonalíticos, granodioríticos e graníticos (Jost *et al.* 2013, Vargas 1992). O seu contato com as rochas da seqüência vulcanossedimentar de Crixás aparenta ser de natureza tectônica, mas com locais de evidências de intrusão dadas pela presença de xenólitos de rochas supracrustais e de apófises (Costa & Kuyumjian 1994).

O Complexo Caiamar situa-se a leste do *Greenstone belt* de Crixás e, segundo Fortes (1996) consistiria de gnaisses tonalíticos, dominantes nas porções centro e norte, e granodioríticos, na porção sul, e o seu contato com o *greenstone belt* seria por zona de cisalhamento de baixo ângulo. Já Jost *et al.* (1994) dividem o complexo, de norte para sul, nos Gnaisses Crixás Açú, de composição tonalítica e polideformados, no Tonalito Tocambira, o corpo principal, de formato discretamente circular e indeformado, e nos Gnaisses Águas Claras, de composição granodiorítica e também polideformado. Tendo em vista o contraste no estado de deformação, os autores, assim como Carvalho (1999) interpretam o Tonalito Tocambira como intrusivo nos demais gnaisses do complexo. Ademais, Carvalho (1999) sugere que o complexo foi, pelo menos em parte, embasamento do *greenstone belt*.

Diques e *stocks* máficos anfibolitizados são comuns em ambos os complexos. Contudo, enquanto no Complexo Anta estes estão dispostos segundo um enxame de direção aproximada N20°W que se estende por mais de 100 km no interior de um corredor com cerca de 5 km de largura, no Complexo Caiamar estas intrusões estão

disposta paralelamente ao contato das três unidades com as rochas supracrustais, em geometria anelar (Jost *et al.* 1994).

Na região de Crixás as rochas granito-gnáissicas do Complexo Caiamar foram subdivididas, de norte para sul, nos gnaisses tonalíticos Crixás Açú, no Tonalito Tocambira e nos gnaisses granodiríticos Águas Claras.

Os Gnaisses Crixás Açú afloram em área triangular da porção norte do complexo. São cinza claro, médios a grossos, de composição tonalítica e apresentam bandamento composicional polideformado discreto a proeminente, dado pela alternância de níveis mesocráticos mais ricos em biotita a leucocráticos mais ricos em plagioclásio e quartzo, por vezes com injeções fitadas de corpos pegmatóides ou trondhjemíticos. O Tonalito Tocambira é cinza, médio a grosso, localmente porfirítico, e apresenta discreta e descontínua imbricação dada pela orientação de biotita e plagioclásio, sendo paralela aos contatos e diminuindo sua intensidade em direção ao centro do corpo (Jost *et al.* 2001). Os Gnaisses Águas Claras são cinza claro a creme, médios, por vezes com fenocristais subédricos de K-feldspato e possuem textura granoblástica, subordinadamente mirmequítica (Queiroz 2000).

Já no Complexo Anta, segundo Costa & Kuyumjian (1994), ocorre o predomínio de tonalitos e granodioritos de afinidade cálcio-alcálica e de alta alumina, o que sugere origem a partir da fusão de basaltos de placa oceânica de subducção. Os corpos individuais são composicionalmente homogêneos, em geral leucocráticos, médios a grossos, por vezes porfiríticos, com textura granular ígnea, localmente mirmequítica nos granodioritos (Queiroz 2000).

Conforme Jost *et al.* (2005), os complexos Anta e Caiamar são derivados de batólitos interferentes que foram posteriormente polideformados. Queiroz (2000) comenta ainda que nas proximidades do contato as supracrustais apresentam, por vezes, apófises dos granitóides adjacentes. Nestes contatos, as rochas graníticas tendem ora a serem isotropas, ora apresentarem foliação de intensidade variada e que decresce para oeste, em direção ao centro dos corpos individuais.

Estudos petrográficos extensivos sugerem que as rochas polideformadas dos complexos granito-gnáissicos provavelmente foram submetidas à fácies anfíbolito, com retrometamorfismo na fácies xisto verde (Jost 2009).

Queiroz *et al.* (2008) obteve as idades U-Pb (SHRIMP) de  $2.82 \pm 6$  Ga e  $2.79 \pm 7$  Ga em gnaisses granodioríticos e granitos do Complexo Anta e de  $2.84 \pm 7$  Ga e  $2.84 \pm 6$  Ga em gnaisses granodioríticos e tonalíticos do Complexo Caiamar.

### 3.2.1.2 Sequência Metavulcanosedimentar de Mara Rosa

Sobreposto tectonicamente ao *greenstone belt* de Crixás ocorre a sequência vulcanossedimentar de idade pré-Araxá a noroeste, denominada Sequência Mara Rosa (Ribeiro Filho & Lacerda Filho 1985), posteriormente correlacionada a Costa (1986) à Unidade Média a Topo dos *greenstone belts* da região. Mais tarde ainda, Fuck (1994) a inseri dentro da unidade de rochas do Grupo Serra da Mesa, de idade Neoproterozóica.

Contudo, ainda hoje não há um consenso sobre os padrões estruturais, conteúdos litológicos, idades e nomenclatura estratigráfica destas rochas metassedimentares que ocorrem na região de Crixás, em especial em direção a Santa Terezinha de Goiás.

A Sequência Santa Terezinha ocorre a norte dos terrenos granito-*greenstone* de Pilar de Goiás e Guarinos. É constituída predominantemente por xistos a muscovita, quartzo, clorita e biotita, tectonicamente sobrepostos por rochas de natureza máfica e cianita-muscovita quartzitos (Carvalho 1999).

Dantas *et al.* (2001) discutem as interpretações da Sequência Santa Terezinha como, ora parte de *greenstone belts* arqueanos, ora como parte de sequências paleoproterozóicas. Esta sequência também poderia ser incluída no arco magmático neoproterozóico de Mara Rosa.

Jost & Oliveira (1991) propõe que a Zona de Cisalhamento Mandinópolis está seccionando os terrenos granito-*greenstone*, e que estes encontram-se sotopostos a duas unidades proterozóicas distintas, ou seja, uma metassedimentar que repousa tectonicamente sobre a metavulcânica que, por sua vez, é desmembrada em pelo menos três escamas de empurrão.

Barbosa (1955) descreveu que os metassedimentos presentes a norte da sequência vulcanossedimentar são constituídos principalmente por mica-xistos e quartzitos intercalados, correlacionáveis às rochas do Grupo Araxá. Outros autores propuseram o mesmo devido essencialmente a feições estruturais distintas às verificadas no

*greenstone belt* de Crixás, evidenciando, assim, um possível caráter alóctone (Magalhães *et al.* 1984, Yamaoka *et al.* 1985).

Kuyumjian (1981) sugere contato gradacional entre quartzitos ferruginosos da sequência metassedimentar e formação ferrífera do *greenstone*, o que poderia significar que tais metassedimentos pertenceriam ao ciclo evolutivo do *greenstone belt*.

Biondi (1990) classificou as rochas mais comuns desta unidade (clorita-muscovita quartzo xistos) e as associou a Sequência Santa Terezinha, interpretando que o seu ambiente de sedimentação seria tipo marinho de águas profundas de plataforma, provavelmente turbidítico, com areias e siltes argilosos predominantemente. A sequência encontra-se completamente metamorfizada em grau baixo ou xisto verde, zona de biotita e os contatos observados são sempre tectônicos.

Conforme Carvalho (1999), associada às rochas desta sequência são conhecidas importantes mineralizações de esmeralda produzidas por meio de atividade garimpeira mecanizada subterrânea próximo a cidade de Campos Verdes, além de diversos garimpos de ouro nas regiões de Santa Terezinha de Goiás e Alto Horizonte.

A análise de Sm-Nd em rochas metavulcânicas da Sequência Santa Terezinha na região de Campinorte forneceram a idade de 2.4 Ga, indicando que sua formação ocorreu anteriormente a orogênese Transamazônica, sendo possivelmente afetada durante este ciclo Oliveira & Pimentel (1999).

### 3.2.1.3 Estratigrafia do *Greenstone belt* de Crixás

A primeira subdivisão estratigráfica do *Greenstone belt* de Crixás foi proposta por Sabóia (1979) com a criação, da base para o topo, das formações Córrego Alagadinho, Rio Vermelho e Ribeirão das Antas, então pertencentes ao Grupo Pilar de Goiás de Danni & Teixeira (1981). Estas unidades foram mantidas por Jost & Oliveira (1991), mas como subdivisões do Grupo Crixás.

A Formação Córrego Alagadinho é a unidade basal, possui espessura estimada variável entre 125 e 500 m e se caracteriza por metakomatiitos, serpentinitos, clorita-talco xisto, talco-clorita xisto, talco-tremolita xisto, talco-magnetita xisto e talco-tremolita serpentina xisto, com raras intercalações de formação ferrífera, metachert, xisto carbonoso e clorita-cloritóide xisto (Yamaoka *et al.* 1985, Yamaoka & Araújo 1988). Os

komatiitos são similares às ocorrências descritas em outros *greenstone belts* do mundo (e.g. Munro Township no Canadá; Costa Jr. *et al.* 1997) e apresentam feições primárias, tais como texturas *spinifex* e cumulática, disjunções poliedrais e brechas de fluxo nas zonas menos afetadas por deformação (Saboia & Teixeira 1980, Teixeira *et al.* 1981, Kuyumijian 1981).

Segundo Queiroz (1995, 2000) a unidade é dominada por rochas vulcânicas, com intrusões subordinadas. As primeiras são de composição peridotítica e piroxenítica, hoje parcial ou completamente transformadas em talco-tremolita xistos, tremolita-serpentina xistos, talco-serpentina xistos, talco-clorita xistos, talco xistos e tremolita-clorita xistos. Já as intrusões, em geral diques, são de composição piroxenítica e dunítica, igualmente serpentinizadas. Kuyumijian & Dardenne (1982) mostram que a razão  $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$  dos komatiitos é semelhante a dos do tipo Barberton na África do Sul.

A Formação Rio Vermelho está tectonicamente sotoposta à Formação Córrego Aladaginho, tem espessura preservada aproximada entre 120 m e 300 m e é composta por sucessivos derrames de basaltos com localizadas intercalações lenticulares de formações ferríferas e manganesíferas, xistos carbonosos e raros *sills* e diques de gabro e peridotito. Estruturas primárias estão localmente preservadas e compreendem *pillow-lavas*, vesículas, amígdalas e varíolas. Os basaltos estão, em geral, transformados em anfibólio xistos da fácies xisto verde superior a anfibólito inferior e, quando próximos de mineralização aurífera, estão hidrotermalizados em carbonato-anfibólio xistos, biotita dolomitos e milonitos (Jost & Oliveira 1991, Coelho 1999). Saboia *et al.* (1979) registram que os teores médios de  $\text{MgO}$  (~15%) e  $\text{TiO}_2$  dos basaltos com *pillow* são intermediários entre komatiitos e toleitos.

A Formação Ribeirão das Antas é unidade do topo, está tectonicamente sotoposta aos basaltos da Formação Rio Vermelho e é composta por cerca de 700 m de rochas metassedimentares (Saboia *et al.* 1979, Jost & Oliveira 1991). Está representada por xistos carbonosos com lentes de dolomito, lateralmente dispostos a espessa sucessão de metagrauvacas e, segundo Coelho (1999) eventuais formações ferríferas. Para Magalhães (1991) e Magalhães e Nilson (1993) os xistos carbonosos e dolomitos são interpretados como hidrotermalitos e milonitos derivados de metabasaltos, mas Theodoro (1995) os interpreta os primeiros como derivados de sedimentos pelíticos e que os últimos admitem termos hidrotermais quanto sedimentares, tendo em vista a presença de oólitos em algumas das lentes. Saboia *et al.* (1979) relatam a ocorrência localizada de

tufos félsicos em meio ao pacote sedimentar, mas estas não foram confirmadas por estudos posteriores.

### 3.3 *Geologia Estrutural*

Os primeiros estudos sobre a geologia estrutural do *Greenstone belt* de Crixás o descreveram como uma calha sinclinal com eixo próximo de NS, mergulho suave para N e vergência para E (Danni & Ribeiro 1978, Saboia 1979, Saboia *et al.* 1979, Kuyumjian. 1981). Posteriormente, Kuyumjian & Araújo Filho (1984) descrevem que o mesmo foi submetido a seis fases de deformação e que resultaram na formação de um grande sinclínório isoclinal invertido com eixo NS de baixo caimento para N. Contudo, Thomson (1986) descreveu quatro fases de deformação a partir da análise de inclusões em granada e plagioclásio, discordando sobre a estrutura em sinclinal e defendendo que as estruturas resultaram de empurrões e formação de *nappes* atribuídas ao Arqueano.

Por outro lado, Queiroz (1995), mediante a análise de lineamentos de relevo, interpreta o *greenstone belt* como uma entidade morfoestrutural distinta dos gnaisses adjacentes e descreve a presença de três famílias de estruturas que corresponderiam a três fases de deformação,  $D_{n-1}$ ,  $D_n$  e  $D_{n+1}$ . A fase  $D_{n-1}$  teria gerado estruturas que indicam movimentação tangencial de NW para SW e correlata ao soerguimento dos complexos. A fase ( $D_n$ ) resultaria de esforços tangenciais NW responsáveis pela foliação metamórfica  $S_n$ , formação de dobras intrafoliais, lineações minerais e de estiramento e falhas de empurrão. A fase  $D_{n+1}$  resultaria de esforços aproximadamente E-W com vergência para E e dobramento que culminou com o desenvolvimento da Antiforme do Rio Vermelho de Magalhães (1991), quem, por outro lado, propôs a existência de três fases de deformação que resultaram na nucleação do que denominou de Cinturão de Cisalhamento e Empurrão Córrego Geral – Meia Pataca.

Jost *et al.* (2001) descrevem que o padrão estrutural da porção nordeste do *greenstone belt* se caracteriza pelo paralelismo da foliação metamórfica mais proeminente ( $S_n$ ) com o acamamento original ( $S_0$ ) e a atitude média  $N15^\circ E, 10^\circ NW$  acompanha o traço do contato do *greenstone belt* com o Complexo Caiamar. Já no extremo norte a atitude média de  $S_n/S_0$  ( $N70^\circ E, 20^\circ NW$ ) resultaria da influência da Zona de Cisalhamento Mandinópolis, estrutura esta caracterizada como falha de empurrão de rochas do neoproterozóicas do Arco Magmático de Goiás sobre o *greenstone belt*.

Estudos estruturais detalhados realizados por Massucato (2004) na metade norte do *Greenstone belt* de Crixás com o intuito de compreender o controle das mineralizações auríferas descrevem que o mesmo contém evidências de pelo menos três eventos de deformação, que o autor atribui ao Arqueano, Paleoproterozóico e Neoproterozóico, respectivamente. Segundo o autor, o primeiro evento desenvolveu estruturas resultantes de compressão epidérmica E-W, com vergência para E e geração de falhas de empurrão com geometria do tipo duplex. A este evento o autor relaciona a formação dos depósitos auríferos locais, acompanhados de alteração hidrotermal. O segundo evento resultou em compressão de N para S, decorrente do cavalgamento das rochas do Arco Magmático de Goiás sobre o *greenstone belt*. Esta compressão desenvolveu dobras semi-recumbentes a recumbentes, com vergência para SW, com diminuição de amplitude para SW. Este evento teria reconcentrado o ouro e definido a geometria dos corpos de minério. O terceiro e último evento estaria associado a uma compressão E-W, responsável pela geração da Antiforme do Rio Vermelho, mas sem influência sobre a mineralização aurífera e a geometria dos corpos de minério.

Queiroz (2000), assim como Massucato (2004), também considera que a região sofreu eventos deformacionais do Arqueano ao Neoproterozóico, porém, distribuída em 5 fases de deformação, ampliando o detalhamento e entendimento destes processos estruturais. A primeira fase ( $D_{n-3}$ , Arqueano) foi responsável pela geração da foliação metamórfica principal e pelas primeiras inversões estratigráficas do *Greenstone belt* de Crixás, colocando parte das supracrustais em posição normal e parte em posição inversa. A segunda fase ( $D_{n-2}$ , Arqueano) corresponde a segunda e terceira fases de granitogênese siálica gerando a estrutura de domos e quilhas e a gnaissificação de alguns corpos. A terceira fase de deformação ( $D_{n-1}$ , Paleoproterozóico) gerou o transporte de supracrustais mais jovens sobre o substrato arqueano. A quarta fase de deformação ( $D_n$ , Neoproterozóico) resultou em um transporte tangencial de NW para SE em direção ao Cráton do São Francisco, evoluindo para um regime direcional atribuído a última fase de deformação ( $D_{n+1}$ ).

Ainda que concentrados no domínio dos depósitos auríferos, os estudos estruturais na região do Depósito de Níquel de Boa Vista, situado no extremo noroeste do *greenstone belt*, foram raros, mas os dados atuais permitiram verificar que a deformação na mesma foi heterogênea, como evidenciado pela variação de sua amplitude na área.

Nas porções com baixa intensidade se reconhece a presença de acamamento ígneo (S0) determinado pelas alternâncias entre komatiitos ora maciços e ora com textura *spinifex*, em geral orientadas segundo E-W, com locais inflexões para NW. Nos locais com deformação mais pronunciada, além do S0 transposto, em geral ocorrem três foliações (S1, S2 e S3). A foliação S1 é superfície axial de dobras apertadas orientadas segundo N-S e de eixo com baixo caimento. A foliação S2 é superfície axial de dobras mais abertas de orientação geral WNW-ENE, mas pode evoluir para corredor de cisalhamento e S3, de orientação geral N-S a NE-SW, com mergulho para W em vários ângulos se relaciona com a extensa Zona de Cisalhamento Transbrasiliana, a qual secciona a porção noroeste do Bloco Arqueano. A homogeneidade litológica da área do depósito de níquel em muito dificulta desvendar a sua complexidade estrutural e a determinação de um modelo prospectivo eficiente para a região, pois é possível que os efeitos estruturais tenham remobilizado a mineralização primária, a exemplo do ocorrido com os depósitos de ouro da porção central do *greenstone belt* de Crixás.

### 3.4 Metamorfismo

Os primeiros estudos sobre paragêneses minerais das rochas de Crixás caracterizaram as condições de metamorfismo como da fácies xisto-verde (Saboia *et al.* 1979). Novos estudos por Kuyumjian (1981) mostraram que as condições foram heterogêneas e variaram entre as fácies xisto verde médio e a fácies anfibolito inferior. Fortes (1991), por sua vez, descreve que as paragêneses minerais da região da Mina III indicam fácies xisto verde a epidoto-anfibolito e Jost & Oliveira (1991) atribuíram àquelas rochas condições de baixo grau metamórfico. Jost (2009) também relata que as seções vulcânicas foram metamorfisadas na fácies xisto verde superior a anfibolito inferior.

Já na área do Depósito de Níquel de Boa Vista, dados inéditos da Votorantim Metais (Votorantim Metais 2009) mencionam que as principais assembleias minerais metamórficas compreendem:

- Rochas metassedimentares: clorita, granada e muscovita;
- Anfibolitos: hornblenda e plagioclásio;
- Basaltos komatiíticos: tremolita/actinolita, clorita e rara magnetita;

- Komatiitos: (1) talco, serpentina, tremolita, magnetita e carbonato; (2) carbonato, talco, clorita e sulfetos e (3) serpentina e magnetita.

Adicionalmente a estas associações, também ocorrem faixas monominerálicas, tais como esteatitos, clorititos, biotititos e níveis ricos em fuchcita ou roscoelita, dependendo da rocha original, se komatiito ou basalto, respectivamente. Estes litotipos representam zonas com maior aporte de fluidos ricos em CO<sub>2</sub> e/ou H<sub>2</sub>O.

### 3.5 Geocronologia

As primeiras datações radiométricas de rochas do Centro-Oeste brasileiro foram obtidas por Hasui & Almeida (1970) em anfíbolitos do Complexo Basal próximos à região de Crixás-Pilar de Goiás, as quais forneceram idades K/Ar de  $3.067 \pm 216$  Ma e  $954 \pm 48$  Ma. Novos dados foram gerados na região de Crixás-Pilar-Hidrolina por Tassinari & Montalvão (1980) em gnaisses, os quais forneceram idade Rb/Sr de  $2.929 \pm 105$  Ma, e em anfíbolitos da sequência vulcanossedimentar de Crixás, que geraram idade K/Ar de  $1.107 \pm 12$  Ma. Por outro lado, Arndt *et al.* (1989) obtiveram idades Pb/Pb de  $2.728 \pm 140$  Ma e Sm/Nd de  $2.825 \pm 98$  Ma em komatiitos da Formação Córrego Alagadinho. A datação de Rb/Sr de anfíbólio xistos, carbonato-clorita xistos e dolomititos da Formação Rio Vermelho por Fortes (1996) forneceu idades de  $647 \pm 36$  Ma,  $437 \pm 13$  Ma e  $497 \pm 48$  Ma, respectivamente.

Adicionalmente, Fortes *et al.* (1993, 1997) dataram amostras dos halos de alteração hidrotermal das lentes de sulfeto maciço dos depósitos de ouro de Crixás, os quais geraram isócronas K-Ar e Ar-Ar de concentrados de minerais e Rb-Sr em rocha total de 730 a 650 Ma, idades estas contemporâneas com o pico da deformação da Faixa Brasília e interpretadas como o intervalo durante o qual ocorreu a mineralização, com reajuste isotópico em 570 e 430 Ma.

Queiroz (2000) determinou que o magmatismo granitóide registrado na porção setentrional dos terrenos arqueanos de Goiás ocorreu em 6 episódios (G1 a G6), com idades magmática U-Pb de 2,9 a 3,3 Ga,  $\approx 2,84$  Ga,  $\approx 2,82$  Ga,  $\approx 2,79$  Ga, 2,71 Ga e  $\approx 2,14$  Ga, respectivamente. O Complexo Anta foi atribuído aos episódios G3 ( $2,82 \pm 6$  Ga) e G4 ( $2,79 \pm 7$  Ga) devido a datação de zircões de um granodiorito, representando uma granitogênese continuada e independente.

Uma revisão destes dados foi feita por Queiroz *et al.* (2008) utilizando técnicas de análise de U-Pb SHIRIMP em zircões Sm-Nd. Nesta ocasião os autores estabeleceram dois estágios de plutonismo granítico em um intervalo de 140 Ma para a região, onde os primeiros estágios incluem rochas tonalíticas e granodioríticas e, secundariamente, ortognaisses com assinatura de Nd rejuvenescida, com alojamento de 2.845 a 2.875 Ma, interpretadas como raízes de um arco primitivo. Xenocristais de zircão herdado e dados isotópicos de Nd indicam que os magmas juvenis sofreram contaminação a partir de uma crosta siálica tão antiga quanto 3,3 Ga. O segundo estágio compreende rochas granodioríticas a gnaisses graníticos e durou de 2.711 a 2.707 Ma. Com base em suas assinaturas isotópicas de Nd e em cristais de zircão herdado, seus protólitos foram interpretados como predominantemente derivados de crosta. A maioria das populações de zircão mostram evidências morfológicas de recristalização metamórfica periférica datados entre 750 e 550 Ma (Brasiliano). Um dos gnaisses datado com idade de cristalização de 2.700 Ma (2r) inclui novos grãos magmáticos interpretados como crescimento por anatexia associada a injeção de veios em gnaisses fortemente cisalhados.

Fortes *et al.* (2003) obtiveram isócrona Sm-Nd de  $500 \pm 7$  Ma em clorita-granada xisto aurífero e, a partir de amostras de amplo intervalo estratigráfico da seção metassedimentar, obtiveram idades-modelo Sm-Nd TDM de 2,49 Ga a 2,33 Ga. Estes dados permitem concluir que as rochas siliciclásticas e a mineralização que estas alojam não são arqueanas. Estes últimos dados motivaram a datação de cristais de zircão detrítico de amostras de metagrauvaca por Tassinari *et al.* (2006), os quais mostraram que os cristais mais jovens tem a idade U-Pb SHRIMP de  $2.212 \pm 36$  Ma.

Em sequência, Jost *et al.* (2008) coletou novas amostras de afloramento e testemunhos de sondagem e, por datação U-Pb LA-ICP-MS de zircão obteve o intervalo de  $2.232 \pm 39$  Ma a  $3.354 \pm 40$  Ma, assim ratificando os resultados obtidos por Fortes *et al.* (2003) de que as rochas metassedimentares não são arqueanas e foram alimentadas por área-fonte variada, sendo a mais jovem do Riacciano.

Por outro lado, com o objetivo de determinar a idade da mineralização de Crixás, Jost *et al.* (2010) investigaram a idade de diques máficos que cortam o pacote metassedimentar e também os corpos auríferos. Os cristais de zircão magmático de um dos diques geraram a idade LA-ICPMS de  $2.170 \pm 17$  Ma, o que indica que as intrusões

ocorreram em cerca de 40 Ma após a deformação e mineralização aurífera. No mesmo artigo, os autores relatam que, do Paleoproterozóico até o início do Neoproterozóico, o bloco Arqueano foi, aparentemente, parte de uma área estável. Efeitos do Neoproterozóico compreendem anatexia localizada dos gnaisses, reativação de falhas de empurrão antigas e formação de novas falhas seguidas de parcial reajuste isotópico de zonas de alteração hidrotermal das mineralizações auríferas de Crixás. Segundo os autores, as datações de Fortes (1996), Queiroz *et al.* (2008), Pimentel *et al.* (2003), Jost *et al.* (2005) e Tassinari *et al.* (2006) permitem estimar que os efeitos do Ciclo Brasileiro incidiram na região de 750 a 550 Ma.