



Universidade Federal
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



ESCOLA DE MINAS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOFÍSICA DO CINTURÃO SUL DO
COBRE, PROVÍNCIA CARAJÁS (CRÁTON AMAZÔNICO):
IMPLICAÇÕES METALOGENÉTICAS PARA OS DEPÓSITOS IOCG
PANTERA E PEDRA BRANCA

Ivan Batista Lisboa

MONOGRAFIA nº 482

Ouro Preto, agosto de 2023

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOFÍSICA DO CINTURÃO SUL DO
COBRE, PROVÍNCIA CARAJÁS (CRÁTON AMAZÔNICO):
IMPLICAÇÕES METALOGENÉTICAS PARA OS DEPÓSITOS IOCG
PANTERA E PEDRA BRANCA**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marliére de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Junior

Vice-Diretor

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Dr. Geraldo Magela Santos Sampaio

MONOGRAFIA

Nº 482

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOFÍSICA DO CINTURÃO SUL DO COBRE, PROVÍNCIA CARAJÁS (CRÁTON AMAZÔNICO): IMPLICAÇÕES METALOGENÉTICAS PARA OS DEPÓSITOS IOCG PANTERA E PEDRA BRANCA

Ivan Batista Lisboa

Orientador

Prof. Dr. Gustavo Henrique Coelho de Melo

Co-Orientador

MSc. Brener Otávio Luiz Ribeiro

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2023/1.

OURO PRETO

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L769c Lisboa, Ivan Batista.

Caracterização geológica-geofísica do cinturão sul do cobre, Província Carajás (Cráton Amazônico) [manuscrito]: implicações metalogenéticas para os depósitos IOCG Pantera e Pedra Branca. / Ivan Batista Lisboa. - 2023.

65 f.: il.: color., mapa. + Quadros.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique Coelho de Melo.

Coorientador: Me. Brener Ribeiro.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geofísica. 2. Metalogenia. 3. Prospecção mineral. I. Melo, Gustavo Henrique Coelho de. II. Ribeiro, Brener. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 550.84:553.078

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ivan Batista Lisboa

Caracterização geológica-geofísica do Cinturão Sul do Cobre, Província Carajás (Cráton Amazônico): implicações metalogenéticas para os depósitos IOCG Pantera e Pedra Branca

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo

Aprovada em 18 de agosto de 2023

Membros da banca

Doutor - Gustavo Henrique Coelho de Melo - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutora - Maria Silvia Carvalho Barbosa - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Marco Antonio delinardo Silva - Universidade Federal de Uberlândia

Gustavo Henrique Coelho de Melo, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/09/2023



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Henrique Coelho de Melo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/09/2023, às 10:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0585154** e o código CRC **43272FA7**.

Agradecimentos

Mais um ciclo, talvez dos mais importantes até o momento, chegando à sua conclusão. Quantas experiencias vividas em Ouro Preto, em tão curto espaço de tempo. Só me resta agradecer a todos que de alguma forma, contribuíram para essa vitória.

Meus pais, Carla e Humberto, fontes de inspiração e pilares da minha vida, nunca mediram esforços para realização dos meus sonhos, amo vocês.

À minha irmã Karen, pelos conselhos, cumplicidade e carinho.

À Letícia, minha melhor amiga e namorada, pelo companheirismo em todos os momentos.

Às minhas raízes, famílias Batista e Lisboa.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Gustavo Henrique Coelho de Melo e MSc. Brener Otávio Luiz Ribeiro pela disponibilidade, paciência e ensinamentos, mas acima de tudo pela excelente orientação.

Aos Garzedins, minha família mineira, obrigado por tanto! Vocês foram essenciais nessa jornada.

Aos grandes amigos de Vitória, tempo e distância são insignificantes!

A UFOP, ao Departamento de Geologia e à Escola de Minas, pelo ensino de ponta.

À UFOP SEG SC, pelos diversos projetos desenvolvidos, conhecimentos adquiridos e aprimoramento acadêmico.

Ao IGAM, Geothra e WSP pelos ensinamentos, confiança e crescimento profissional.

A todos amigos e amigas que me acolheram em Ouro Preto.

Por fim, à Gloriosa República Arca De Noé, obrigado pelos ensinamentos e experiências sem precedentes.

Vocês tornaram essa vitória possível.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ix
SUMÁRIO	xi
INDÍCE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE QUADROS.....	xv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 LOCALIZAÇÃO	2
1.3 OBJETIVOS	5
1.4 JUSTIFICATIVA.....	5
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS	7
1.5.1 Revisão bibliográfica	7
1.5.2 Levantamento de banco de dados	7
1.5.3 Processamento e interpretação dos dados	8
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	12
2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO DA PROVÍNCIA CARAJÁS.....	12
2.2 GEOLOGIA E METALOGÊNESE DO CINTURÃO SUL DO COBRE	15
2.3 GEOLOGIA DO DEPÓSITO PANTERA	19
2.4 GEOLOGIA DO DEPÓSITO PEDRA BRANCA	22
3 AEROGEOFÍSICA NA CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-METALOGENÉTICA	26
3.1 MAGNETOMETRIA	26
3.2 GAMAESPECTROMETRIA	28
4 RESULTADOS	34
4.1 INTRODUÇÃO	34
4.2 MAGNETOMETRIA	34
4.2.1 Amplitude do Sinal Analítico (ASA).....	34
4.2.2 <i>Tilt Derivative</i> (TDR) ou Inclinação do Sinal Analítico (ISA)	36
4.2.3 Gradiente Vertical (Dz).....	39
4.3 GAMAESPECTROMETRIA	42
4.3.1 Mapa dos canais básicos de K, eTh, eU e Contagem Total (CT)	42
4.3.2 Mapa da Razão K/Th	44
4.3.3 Mapa da Composição Ternária RGB e dos Domínios Gamaesprométricos	46

4.4	MAPA DE CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOFÍSICA.....	48
5	DISCUSSÕES	50
5.1	PADRÃO ESTRUTURAL DA ÁREA DE ESTUDO	50
5.2	DIVERSIDADE LITOLÓGICA DA REGIÃO	52
5.3	IMPLICAÇÕES PROSPECTIVAS PARA DEPÓSITOS IOCG	53
6	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa de localização dos prospectos Pantera e Pedra Branca (GOOGLE EARTH, 2023)	3
Figura 1.2 - Mapa das Províncias e Domínios Tectônicos na porção leste do Cráton Amazônico (modificado de Santos 2003, Vasquez e Rosa-Costa 2008, e Costa et al. 2016).	4
Figura 1.3 - A) Mapa de Localização da área de levantamento aerogeofísico com relação a América do Sul; B) Mapa amplificado com enfoque na área do Projeto Aerogeofísico (modificado do relatório final do levantamento e processamento dos dados da CPRM, 2014).	8
Figura 1.4 - Fluxogramas dos produtos gerados a partir do tratamento de dados no software Oasis Montaj; A) Produtos gerados a partir de magnetometria; B) Produtos gerados a parir de gamaespectrometria (elaboração do autor).	10
Figura 2.1 - Mapa geológico do Domínio Carajás com a localização dos principais depósitos IOCG com a delimitação dos Cinturões Norte e Sul do Cobre. BD = Domínio Bacajá, CD = Domínio Carajás, RMD = Domínio Rio Maria.A inserção ilustra a localização em A) Brasil, B) Província de Carajás e C) área do mapa. CD = Domínio Carajás, BD = Domínio Bacajá, RMD = Domínio Rio Maria.....	13
Figura 2.2 - Mapa geológico do Cinturão Sul do Cobre: Pedra Branca e Pantera (modificado de Costa et al. 2016).	16
Figura 2.3 - A) Mapa geológico do depósito Sossego com destaque para os corpos de minério Pista, Sequeirinho, Baiano, Curral e Sossego; B) Seção transversal (N-S) do corpo de minério Sequeirinho; C) Seção transversal (SSE-NNW) do corpo de minério Sossego (modificado de Monteiro et al. 2008, Moreto et al. 2015b).	18
Figura 2.4 - Mapa geológico de Ourilândia do Norte com destaque para o depósito IOCG Pantera (Silva et al. 2018, Lopes 2018).	20
Figura 2.5 - Perfil geológico esquemático do Depósito IOCG Pantera elaborado a partir dos furos de sondagem pkc-pant-dh001 e pkc pant-dh007 (Vale, Lopes et al. 2018).	22
Figura 2.6 - Perfil geológico esquemático do Depósito IOCG Pedra Branca elaborado a partir do furo de sondagem OPBD21177 com destaque para as zonas de alteração hidrotermal e a disposição dos principais litotipos (Mello Corrêa 2022).	24
Figura 3.1 - Média e máxima susceptibilidade magnética das rochas (Reynolds 1997).	27
Figura 3.2 - Exibição do espectro de radiação gama a uma altitude de 100 metros com destaque para a localização das janelas de K, Th, U e a contagem Total (Minty 1997, Ribeiro 2020).	30
Figura 3.3 - Correlação da concentração de radioelementos com aumento de silício em rochas ígneas (Dickson & Scott 1997).	31
Figura 4.1 - Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA) do campo magnético residual com destaque para o polígono amarelo delimitando a área de estudo.	35
Figura 4.2 - Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA) do campo magnético residual da área de estudo A) Mapa da ASA; B) Mapa da ASA com Up500; C) Mapa da ASA, separada em 3 domínios; D) Estatística de direção dos lineamentos a partir do diagrama de roseta.....	36

Figura 4.3 - Mapa de tilt derivative (TDR) do campo magnético residual com destaque para polígono amarelo delimitando a área de estudo.....	37
Figura 4.4 - A)Mapa de tilt derivative (TDR); B) de TDR com os lineamentos magnéticos traçados; C) das famílias de lineamentos magnéticos traçados e separados em 3 gerações e; D) a estatística de direção dos lineamentos a partir do diagrama de roseta da área de estudo.....	38
Figura 4.5 - Mapa de tilt derivative (TDR) da área de estudo com o filtro de continuação para acima de 500 metros A) Mapa da TDR; B) Mapa de TDR com os lineamentos magnéticos traçados; C) Mapa com famílias de lineamentos magnéticos traçados, separados em 3 gerações; D) Estatística de direção dos lineamentos a partir do diagrama de roseta.	39
Figura 4.6 - Mapa do gradiente vertical (Dz) do campo magnético residual com destaque para o polígono amarelo delimitando a área de estudo.....	40
Figura 4.7 - Mapa do gradiente vertical (Dz^2) da área de estudo A) Mapa de Dz^2 ; B) Mapa de Dz^2 com os lineamentos magnéticos traçados; C) Mapa com famílias de lineamentos magnéticos traçados, separados em 3 gerações; D) Mapa com os dois domínios identificados; E) Estatística de direção dos lineamentos a partir do diagrama de roseta.	41
Figura 4.8 - A) Mapa gamaespectrométrico do canal contagem total (CT) regional, com destaque para polígono em amarelo representando a área de estudo; B) Canal de CT da área de estudo; C) Canal de CT, com lineamentos traçados; D) Estatística de direção dos lineamentos a partir do diagrama de roseta.	42
Figura 4.9 - A) Canal do K; B) Canal do eTh; C) Canal do eU.....	43
Figura 4.10 - Modelo Digital de Terreno (INPE) associado ao mapa do canal de K e cursos de água na região (Costa et al. 2016).	44
Figura 4.11 - Mapa gamaespectrométrico da razão K/Th; A) Regional, com destaque para o polígono em amarelo; B) Área de estudo.....	45
Figura 4.12 - A) Mapa regional da composição dos canais gamaespectrométricos em RGB com destaque para polígono em amarelo representando a área de estudo; B) Composição RGB da área de estudo; C) Domínios gamaespectrométricos definidos a partir da composição RGB; D) Diagrama ternário RGB.	47
Figura 4.13 - A) Mapa dos domínios gamaespectrométricos associados aos lineamentos traçados a partir da interpretação dos dados de magnetometria e geologia; B) Diagrama de Roseta apresentando a direção preferencial dos lineamentos.	48
Figura 5.1 - Mapa de prospectividade a partir da interpretação estrutural associada aos domínios gamaespectrométricos.....	55

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 - Parâmetros do aerolevantamento geofísico do Projeto Aerogeofísico Rio Maria ...	9
Quadro 3.1 - Filtros de Fourier com as respectivas finalidades geofísicas.	27
Quadro 3.2 - Principais minerais radioativos e principais ocorrências	29

Resumo

A Província Carajás (Cráton Amazônico) é reconhecida por hospedar grandes depósitos de ferro em formações ferríferas bandadas (BIFs) e de cobre do tipo óxido de Fe-Cu-Au (ou iron oxide-copper-gold - IOCG) de classe mundial, constituindo assim algumas das principais reservas minerais do país. Esses depósitos possuem evolução temporal complexa, formados durante múltiplos eventos hidrotermais-mineralizantes. A porção sul do Domínio Carajás, próximo ao limite com o Domínio Rio Maria, representa um importante terreno para depósitos de cobre do tipo IOCG. Os principais depósitos IOCG são representados pela Mina do Sossego e depósitos satélites como Bacuri, Bacaba, Visconde e Alvo 118, que ocorrem ao longo da Zona de Cisalhamento Canaã dos Carajás de direção WNW-ESE. Nesta região ocorrem também os depósitos Pantera e Pedra Branca, que constituem importantes depósitos de cobre da empresa OZ Minerals. Toda essa região, no entanto, ainda precisa ser melhor compreendida quanto ao seu arcabouço lito-estrutural e suas implicações para a metalogênese e prospecção de cobre. Neste cenário, a geofísica de prospecção desempenha um papel fundamental na investigação dos depósitos IOCG, pois é capaz trazer informações quanto as litologias aflorantes e quanto a arquitetura das estruturas geológicas em superfície e subsuperfície. Através dos resultados obtidos por essas análises, foram estabelecidas gerações de lineamentos que corroboram para o entendimento da circulação dos fluidos hidrotermais mineralizantes, responsáveis pelas zonas de alto teor em cobre em Carajás. Adicionalmente, foram caracterizados domínios a partir das assinaturas radiométricas de K, Th, e U, que evidenciaram os halos de alteração hidrotermal ao longo das estruturas subsidiadas pela ZC Canaã dos Carajás e resultaram em um mapa de prospectividade que sugere as regiões com potencial econômico, possibilitando vasta aplicação tanto para indústria, quanto academia.

Palavras-chave: depósitos IOCG, Magnetometria, Gamaespectrometria, Prospecção mineral, Província Carajás.

Abstract

The Carajás Province (Amazonian Craton) is renowned for hosting large deposits of iron in banded iron formations (BIFs) and world-class iron oxide-copper-gold (IOCG) deposits, thus constituting some of the country's main mineral reserves. These deposits have a complex temporal evolution, formed during multiple hydrothermal-mineralizing events. The southern portion of the Carajás Domain, near the boundary with the Rio Maria Domain, represents an important terrain for IOCG-type copper deposits. The main IOCG deposits are represented by the Sossego Mine and satellite deposits such as Bacuri, Bacaba, Visconde, and Alvo 118, occurring along the WNW-ESE *trending* Canaã dos Carajás Shear Zone. In this region, the Pantera and Pedra Branca deposits also occur, constituting important copper deposits owned by OZ Minerals. However, the entire region still needs a better understanding of its litho-structural framework and its implications for copper metallogenesis and prospecting. In this context, geophysical prospecting plays a fundamental role in the investigation of IOCG deposits, as it can provide information about outcropping lithologies and the architecture of geological structures on both the surface and subsurface levels. Through the results obtained from these analyses, generations of lineaments have been established that contribute to the understanding of the circulation of mineralizing hydrothermal fluids, responsible for the high-grade copper zones in Carajás. Furthermore, domains have been characterized based on the radiometric signatures of K, Th, and U. These signatures have highlighted hydrothermal alteration halos along the structures supported by the Canaã dos Carajás Shear Zone, culminating in a prospectivity map suggesting regions with economic potential. This allows for wide-ranging applications in both the industry and academia.

Keywords: geophysics, Magnetometry, Gamma spectrometry, Mineral exploration, Carajás.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

As técnicas de prospecção geofísica e suas aplicações na exploração de novos depósitos evoluíram consideravelmente nos últimos anos. O surgimento de novos métodos para aquisição de dados, a disponibilidade de tecnologias mais avançadas e o desenvolvimento da modelagem numérica bidimensional e tridimensional aumentaram significativamente as resoluções de modelos geológicos complexos (Airo 2015). A geofísica é parte integrante da maioria dos programas de exploração mineral, tanto em *greenfields*, quanto em *brownfields*, sendo aplicada cada vez mais na mineração (Dentith & Mudge 2014). Os métodos aplicáveis à pesquisa mineral são diversos, dentre eles estão os métodos gravimétricos, magnéticos, elétricos, eletromagnéticos, sísmicos, entre outros (Dentith & Mudge 2014).

Nesse contexto, o reconhecimento de áreas que passaram por processos hidrotermais e o reconhecimento de estruturas em subsuperfície que possam ter operado como condutos para os fluidos mineralizantes são de grande relevância para a prospecção mineral a depender do tipo de depósito e do estilo de mineralização (Santos 2020).

A Província Carajás (PC), localizada na porção sudeste do Cráton Amazônico, é uma das regiões com maior potencial metalogenético do mundo e pode ser dividida em Domínio Carajás (DC), a norte, e Domínio Rio Maria (DRM), a sul (Vasquez *et al.* 2008, Melo *et al.* 2019). O Domínio Carajás hospeda diversos depósitos de classe mundial de ferro, depósitos de cobre-ouro, cobre-zinco, EGP, ETR, manganês, níquel, entre outros (Xavier *et al.* 2012, Moreto *et al.* 2014). No entanto, apesar de sua grande importância econômica, ainda é preciso desenvolver mais estudos na região visando compreender melhor a gênese e principais controles dos depósitos e de vetores prospectivos que possam ajudar a identificar essas mineralizações.

Nesta região ocorrem também os depósitos Pantera e Pedra Branca, que constituem importantes depósitos cupríferos da empresa OZ Minerals. Localizados ao longo da Zona de Cisalhamento Canaã dos Carajás (Pinheiro *et al.* 2013), esses depósitos compartilham características cogenéticas, como halos de alteração hidrotermal de alta temperatura (Na-Ca) e controle estrutural associado ao desenvolvimento de estruturas dúcteis, sugerindo idade de

formação neoarqueana (Mello Corrêa 2022). Essa análise permite o entendimento da evolução desses sistemas mineralizantes, possibilitando futura aplicação em contextos semelhantes, na identificação de novos prospectos.

Os dados aeromagnéticos foram utilizados para delimitação de limites de corpos, diques, contatos e outras estruturas geológicas em subsuperfície, que podem ter funcionado como condutos para os fluidos mineralizantes. Além disso, através dos dados gerados foram obtidas mais informações acerca da influência da Zona de Cisalhamento Canaã dos Carajás no contexto estrutural da região.

Por outro lado, os dados de gamaespectrometria, permitiram investigar halos de alteração hidrotermal, formular suposições sobre os padrões das formações geológicas, refinar os contatos litológicos, além de definir regiões com distintos graus de radiação dos elementos Urânio, Tório e Potássio, gerando assim, cartografias de unidades radiométricas. De forma qualitativa, essas cartografias evidenciam a dispersão dos três radioelementos nos materiais expostos. A correlação entre o arcabouço estrutural e as zonas de alteração hidrotermal, se mostraram fundamentais para a compreensão de controles regionais e a seleção de alvos para a prospecção de depósitos IOCG.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo está localizada na porção sul-oriental do Cráton Amazônico, na região sudeste do estado do Pará, região norte do país e distando em torno de 770 km da capital Belém. O depósito Pantera localiza-se na região de Ourilândia do Norte, situada na região conhecida como Sudeste Paraense. Também no Sudeste Paraense, o depósito Pedra Branca está localizado nos arredores da cidade de Canaã dos Carajás, aproximadamente a 23 km de distância de Parauapebas. A Figura 1.1 destaca o polígono amarelo da área de estudo, onde os depósitos encontram-se inseridos e evidenciados pela legenda da imagem.

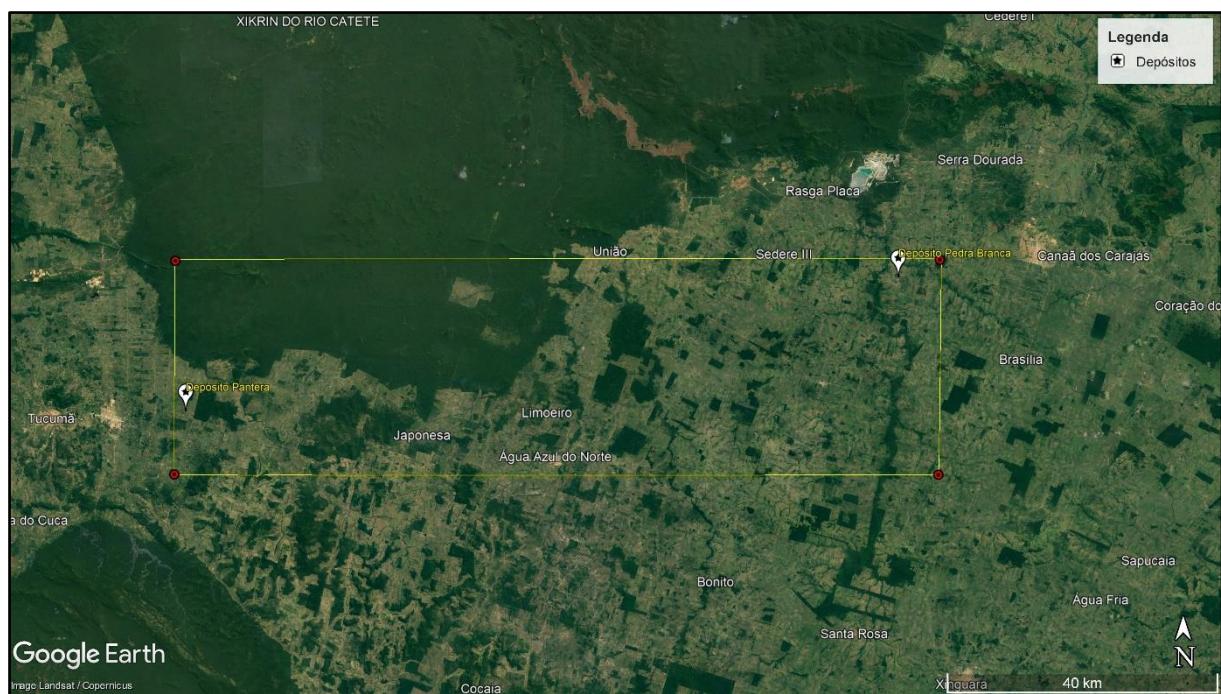


Figura 1.1 - Mapa de localização dos prospectos Pantera e Pedra Branca (GOOGLE EARTH, 2023)

Ambos os depósitos IOCG encontram-se condicionados ao longo de estruturas subsidiárias à Zona de Cisalhamento Canaã dos Carajás, entretanto, vale enfatizar que o Depósito Pantera está no contato entre o Domínio Carajás e Domínio Rio Maria, enquanto o Depósito Pedra Branca à nordeste dessa área, não faz contato com o domínio a sul (Figura 1.2).

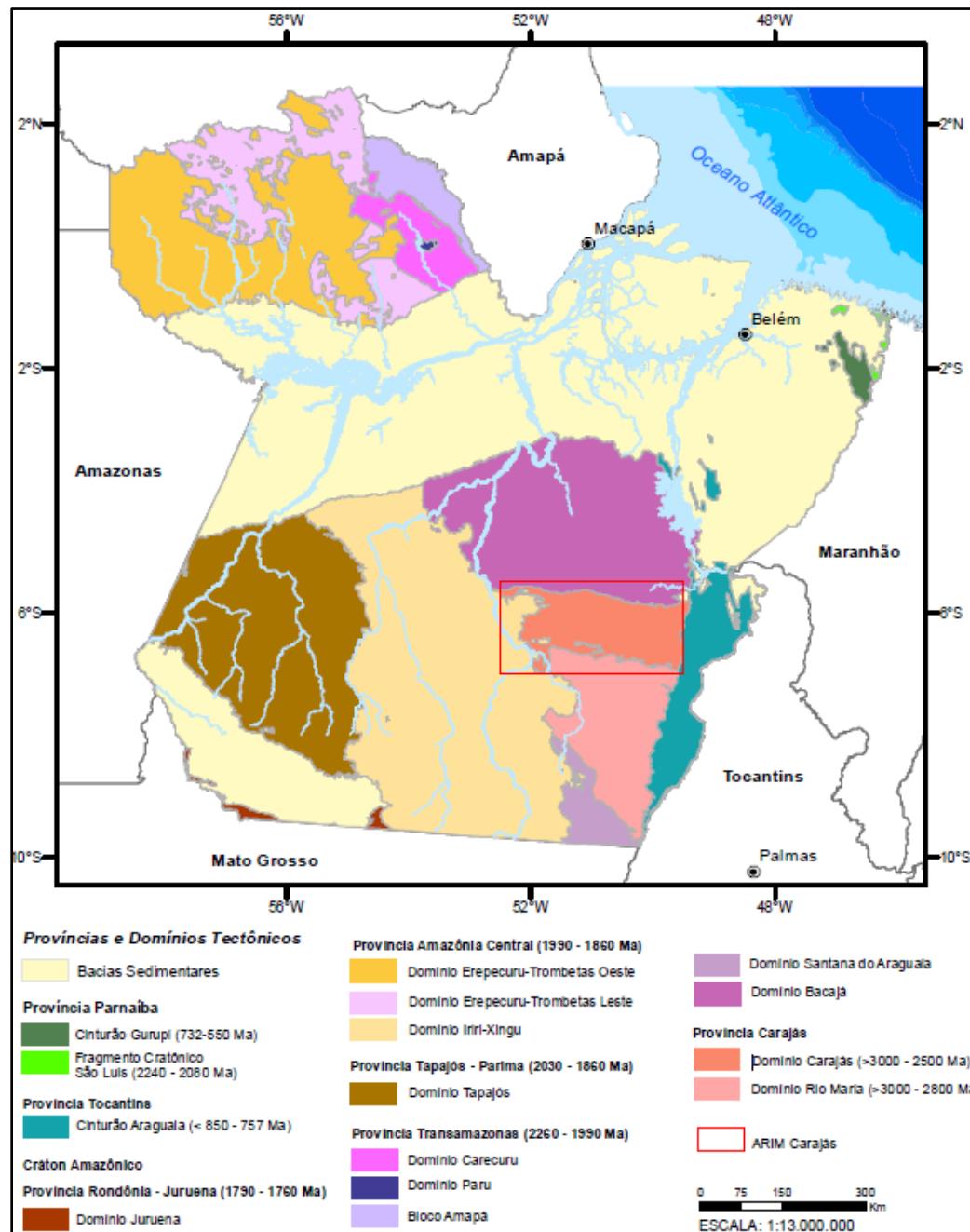


Figura 1.2 - Mapa das Províncias e Domínios Tectônicos na porção leste do Cráton Amazônico (modificado de Santos 2003, Vasquez e Rosa-Costa 2008, e Costa et al. 2016).

A região dos prospectos Pantera e Pedra Branca é também conhecida como Cinturão Sul do Cobre (Moreto *et al.* 2015a, b) da Província Carajás (Figura 1.2), onde a mineralização é principalmente controlada por falhas e zonas de cisalhamento, que serviram como condutos para a circulação dos fluidos mineralizantes, durante múltiplos episódios hidrotermais. Além destes, diversos outros depósitos estão situados próximos da Zona de Cisalhamento Canaã dos

Carajás (Pinheiro *et al.* 2013), tais como Alvo 118, Sossego, Cristalino, Bacaba, Castanha, Jatoba, Bacuri, entre outros (Moreto *et al.* 2015).

1.3 OBJETIVOS

O principal objetivo deste projeto, é por meio de dados de magnetometria e gamaespectrometria, realizar uma caracterização geológica-geofísica da região dos prospectos Pedra Branca e Pantera no Cinturão Sul do Cobre, visando aplicabilidade na seleção de novos alvos para exploração de depósitos do tipo IOCG. Para isso são propostas as seguintes metas:

- a) Utilização de técnicas de realce em dados aeromagnéticos, como *Tilt Derivative* (TDR), Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e Gradiente vertical (derivada Dz), para delimitar lineamentos geológicos-geofísicos;
- b) Delimitar os litotipos presentes na área de estudo, a partir de dados de aerogamaespectrometria;
- c) Identificar possíveis zonas de alteração hidrotermal a partir de dados de aerogamaespectrometria;
- d) Compreender a relação espacial entre os lineamentos geofísico-geológicos com as zonas de alteração hidrotermal e depósitos IOCG conhecidos.

1.4 JUSTIFICATIVA

A Província Carajás é um segmento crustal arqueano (Cordani *et al.* 1984, Teixeira *et al.* 1989), globalmente reconhecido pela concentração de depósitos IOCG de classe mundial de idade arqueana (Hitzman 2000, Groves *et al.* 2010, Xavier *et al.* 2012). Estudos recentes vêm corroborando para o entendimento que ligado ao sistema IOCG podem surgir uma variedade de depósitos polimetálicos, tais como Ni, Co, U, REE, Pd, Ag, Zn, V, Th, além da conexão com ouro (Au) e cobre (Cu) (Corriveau *et al.* 2016).

Os depósitos de cobre do tipo IOCG (óxido de ferro-cobre-ouro) da PC representam as principais fontes de cobre do Brasil (Juliani *et al.* 2016). Além de serem importantes para a indústria mineral brasileira, eles também possuem uma importância científica significativa. A compreensão da gênese desses sistemas minerais bem como dos seus principais controles, leva ao refinamento de modelos genéticos e aplicação em modelos prospectivos. Neste cenário,

métodos geofísicos tornam-se fundamentais uma vez que esses depósitos (IOCG) estão relacionados geralmente à presença de minerais sulfetados, além de grandes quantidades magnetita e/ou hematita, os quais geram respostas geofísicas notáveis e variadas (Tavares Melo *et al.* 2020). Devido à prevalência frequente de minerais ferromagnéticos, os dados magnéticos têm desempenhado um papel crucial na exploração desses depósitos, particularmente no reconhecimento de estruturas regionais que podem controlar esses depósitos.

A escassez de exposições rochosas, a presença de uma camada espessa de solo e a densa floresta Amazônica na PC, fazem da geofísica aérea uma ferramenta indispensável na prospecção mineral (Filho *et al.* 2007). A interpretação dos dados de aerogeofísicos, além de fornecer informações consistentes para o estabelecimento da evolução geodinâmica dos diferentes compartimentos geotectônicos, também contribuem para a compreensão das relações estruturais e litológicas de depósitos minerais, justificando a realização do presente estudo nos prospectos Pedra Branca e Pantera. Segundo Ribeiro *et al.* (2014), a gamaespectrometria é uma ferramenta muito útil para caracterização de diferentes unidades litológicas indivisíveis, localização de alvos exploratórios minerais, ocorrência de hidrotermalismo e delimitação de estruturas geotectônicas com precisão, contribuindo para o entendimento de uma área de interesse.

A alteração hidrotermal afeta as propriedades físicas das rochas presentes nos depósitos IOCG, podendo gerar características distintas na assinatura geofísica dos sistemas minerais (Leão-Santos *et al.* 2015). Através dos dados de aerogamaespectrometria, podemos gerar mapas RGB de composição ternária de K, Th e U, essenciais para definir domínios e comparar com o mapa litológico. Além disso, o K anômalo permite destacar possíveis zonas de alteração hidrotermal. Com forte controle estrutural, desencadeado pela Zona de Cisalhamento Canaã dos Carajás, os dados de aeromagnetometria podem ser excelentes indicadores na delimitação de corpos, contatos e outras estruturas geológicas em subsuperfícies que possam estar funcionando para os condutos de fluidos mineralizantes.

Segundo Tavares Melo *et al.* (2020), compreender a mineralogia, as anomalias geofísicas correspondentes e as assinaturas geofísicas associadas aos depósitos conhecidos, fundamentais é fundamental para estabelecer estratégias de exploração eficazes em novas áreas ou em áreas já exploradas. Diferentes autores têm relatado as assinaturas geofísicas dos depósitos IOCG desde que foram definidos por Hitzman *et al.* (1992). Smith (2002) foi um dos

primeiros a resumir as características geofísicas de depósitos IOCG, descrevendo as propriedades físicas mais relevantes para que ocorram as mineralizações desse tipo.

A utilização dos dados gerados como subsídio para a identificar vetores prospectivos, é fundamental no entendimento do potencial exploratório do Cinturão Sul do Cobre. Toda essa região, no entanto, ainda precisa de estudos mais aprofundados e refinados quanto aos vetores prospectivos de depósitos IOCG. Dessa forma, esse estudo visa contribuir no conhecimento relacionado a prospecção mineral da área de estudo. A partir da integração de dados geológicos e geofísicos, obtidos por meio de levantamentos aéreos de alta resolução, será gerado um mapa geológico-geofísico na Região Sul do Cobre, abordando os depósitos IOCG Pantera e Pedra Branca e buscando melhor compreender a correlação entre as estruturas e as zonas de alteração hidrotermal.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas as metodologias abaixo. Os itens a seguir encontram-se na ordem de desenvolvimento do trabalho.

1.5.1 Revisão bibliográfica

A fase de pesquisa bibliográfica está presente em todas as etapas deste trabalho, sendo necessária para descrever o contexto da área de estudo e embasar as discussões decorrentes. A escolha das referências teve como enfoque trabalhos realizados na Região Sul do Cobre, na Zona de Cisalhamento Canaã dos Carajás, nos depósitos IOCG associados, além dos trabalhos de geofísica de prospecção.

1.5.2 Levantamento de banco de dados

Para a produção deste trabalho, foi utilizado o banco de dados de aeromagnetometria e aerogamaespectrometria, do Projeto Aerogeofísico Rio Maria, disponibilizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). O projeto abrange uma área de 57.603 km² na porção sudeste do estado do Pará. Os trabalhos nessa área foram realizados através do recobrimento de 118.201 km de perfis de alta resolução de levantamentos magnéticos e gamaespectrométricos (Figura 1.3).

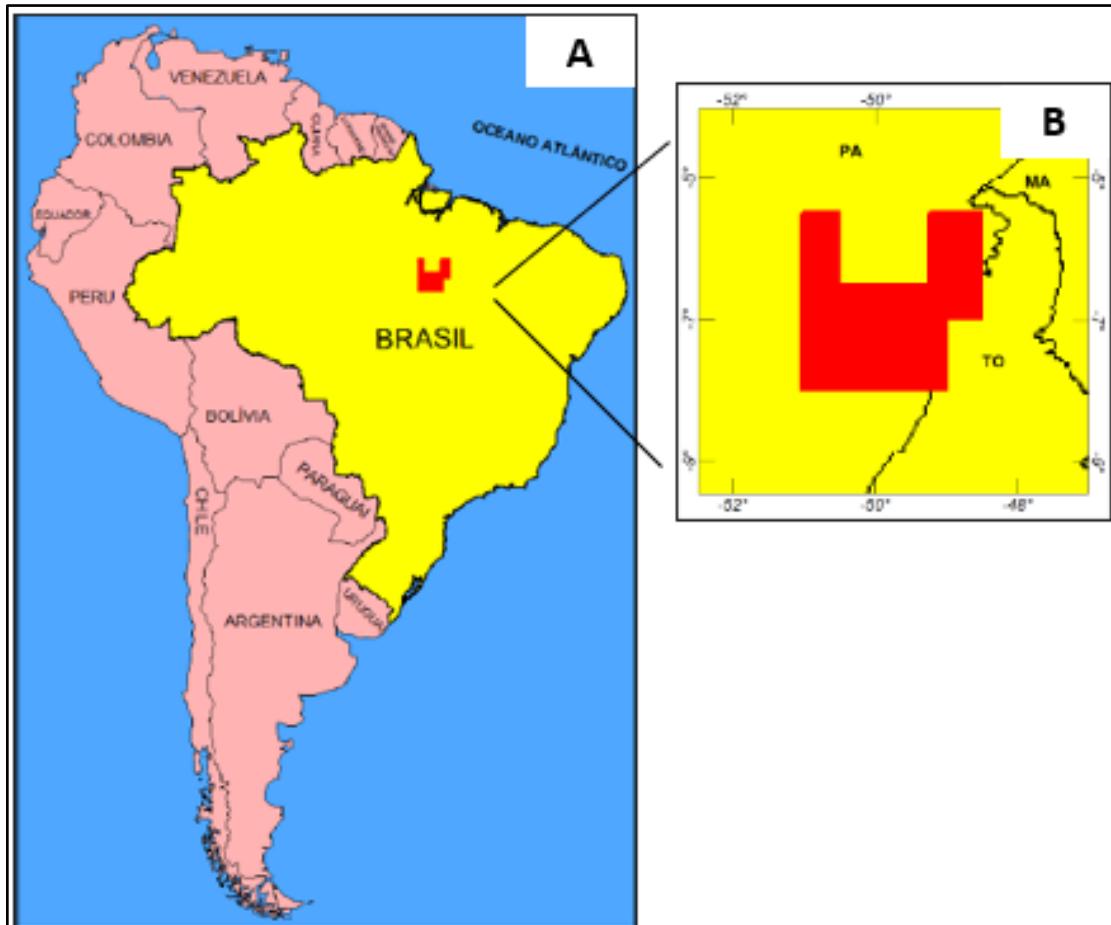


Figura 1.3 - A) Mapa de Localização da área de levantamento aerogeofísico com relação a América do Sul; **B)** Mapa ampliado com enfoque na área do Projeto Aerogeofísico (modificado do relatório final do levantamento e processamento dos dados da CPRM, 2014).

1.5.3 Processamento e interpretação dos dados

O Projeto Aerogeofísico Rio Maria disponibilizou os dados de magnetometria e gamaespectrometria. Todos os dados foram processados a partir *software* Oasis Montaj, do sistema GEOSOFT, entretanto, foi necessário reajustar alguns dados nesta etapa de processamento, conforme as especificidades de cada método utilizado. O Quadro 1.1 lista os parâmetros do levantamento aéreo que foram pertinentes na aplicação de filtros e processamento de *grids*.

Quadro 1.1 - Parâmetros do aerolevantamento geofísico do Projeto Aerogeofísico Rio Maria (CPRM 2014).

PROJETO AEROGEOFÍSICO RIO MARIA	
Parâmetros do levantamento	
Duração do projeto	janeiro de 2014 a novembro de 2014
Altura do voo	100m
Velocidade aproximada	270km/h
Espaçamento das linhas de voo	500m
Direção das linhas de voo	N - S
Espaçamento das linhas de controle	10.000m
Direção das linhas de controle	E - W
Projeção das coordenadas UTM	Córrego Alegre zona 23 S

Com base nos parâmetros mencionados, os dados de magnetometria e gamaespectrometria passaram por um processo de filtragem e os resultados obtidos estão ilustrados nos fluxogramas apresentados (Figura 1.4).

Conforme os fluxogramas, para mapear lineamentos geofísico-estruturais, foram utilizados produtos derivados do Campo Magnético Residual (CMR) obtidos a partir de dados de magnetometria. Esses produtos incluem a Amplitude de Sinal Analítico (ASA), Gradiente Vertical de segunda ordem (Dz^2), Derivada de Inclinação (TDR) e Continuação para Cima de 500 (Up500). O resultado foi a criação de um mapa que reúne os lineamentos geofísicos não mapeados, em associação com os lineamentos identificados pelo mapa geológico de referência.

Utilizando os dados de gamaespectrometria, foram criados mapas que destacam zonas de alteração hidrotermal com base nas concentrações de K, Th e U. Esses dados foram processados para obtenção dos mapas de razão K/Th e da imagem ternária.

Os dados de magnetometria foram filtrados através do Cosseno Direcional aplicado na direção das linhas de voo, em grau 2, diretamente no grid do Campo Magnético Residual (CMR), visando a remoção de ruídos provocados pela direção das linhas de voo.

Posteriormente foi utilizado o *software* QGIS para delimitação do polígono da área investigada, georreferenciamento dos mapas e delimitação das estruturas geológicas a partir dos lineamentos evidenciados pelos mapas de magnetometria. Nos mapas gerados a partir dos dados tratados de gamaespectrometria, foram gerados polígonos para delimitação dos domínios gamaespectrométricos.

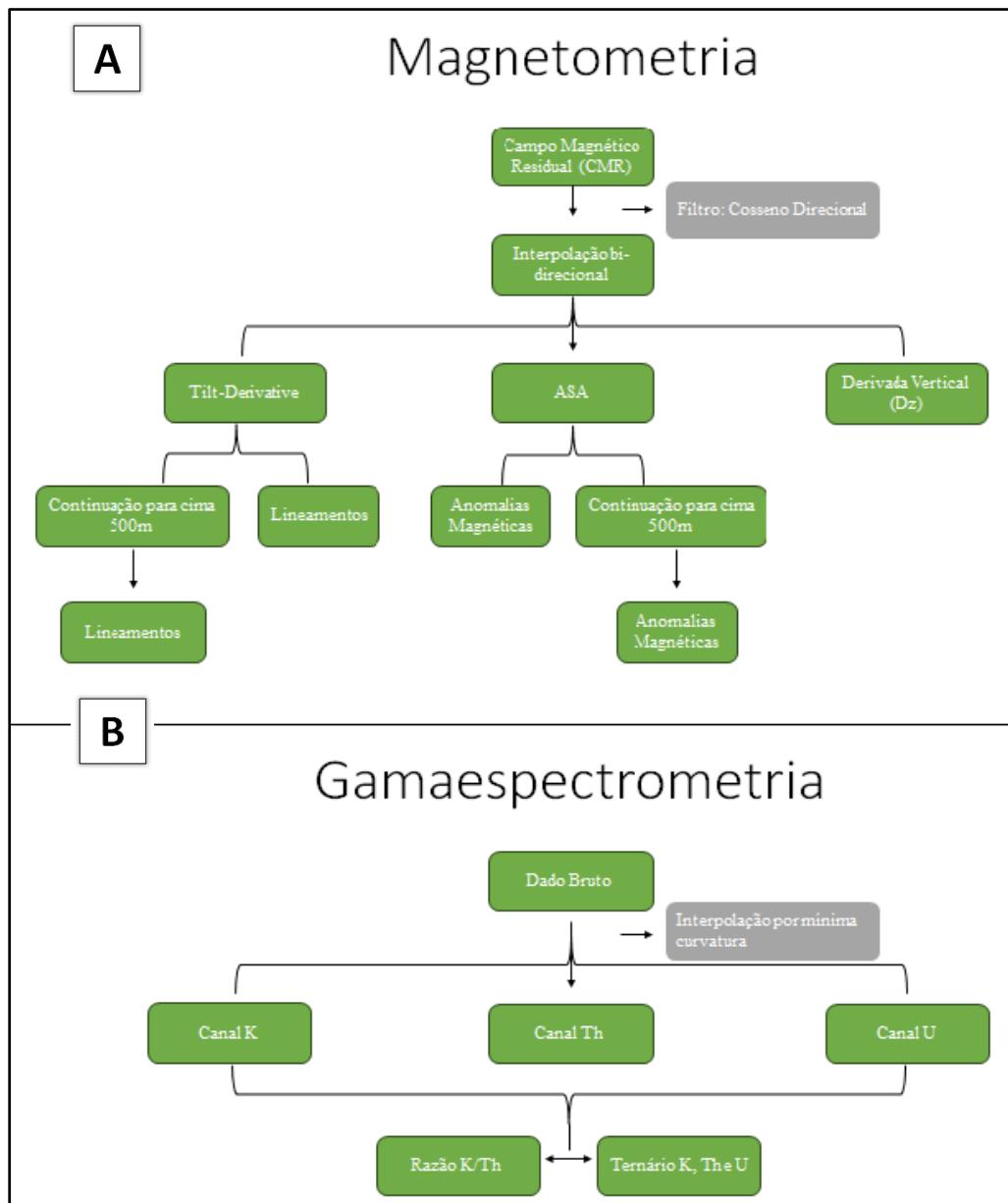


Figura 1.4 - Fluxogramas dos produtos gerados a partir do tratamento de dados no software Oasis Montaj; A) Produtos gerados a partir de magnetometria; B) Produtos gerados a partir de gamaespectrometria (elaboração do autor).

1.5.4 Integração geofísica-geológica

Após a etapa de processamento e interpretações das anomalias geofísicas de acordo com as estruturas e litologias identificadas na região, foi gerado um mapa de integração geológica-geofísica a partir dos dados obtidos durante a pesquisa e dos dados disponíveis na literatura, visando esclarecer melhor a correlação entre os lineamentos identificados e as possíveis zonas de alteração hidrotermal. O mapa também foi desenvolvido através do *software QGIS*.

CAPÍTULO 2

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO DA PROVÍNCIA CARAJÁS

A Província Carajás (PC) é um bloco tectônico que hospeda diversos tipos de depósitos minerais e que se situa na margem sudeste do Cráton da Amazônia no Brasil. A unidade foi formada entre o arqueano e o mesoproterozoico (Teixeira *et al.* 1989, Tassinari 1996, Tassinari & Macambira 1999, 2004), correspondendo assim ao núcleo crustal mais antigo inserido no Cráton Amazônico, estabilizado tectonicamente por volta de 1,0 Ga (Brito Neves & Cordani 1991).

Existem duas regiões tectônicas/geocronológicas distintas na porção leste do Cráton, a Província Carajás ao sul e a Província Transamazonas ao norte (Santos 2003). A primeira corresponde principalmente a um núcleo cratônico de idade arqueana, hospedando os domínios Carajás e Rio Maria, enquanto a segunda é uma junção de terrenos paleoproterozoicos, com os domínios Amapá e Bacajá (Santos 2003).

Dessa forma, a PC faz contato a norte com o Domínio Bacajá (Cordani *et al.* 1984, Macambira *et al.* 2007a e b, Monteiro *et al.* 2008, Ricci 2003), primariamente constituído por rochas do Eon Arqueano e Era Paleoproterozóica, ligadas a extensas áreas de crosta mais jovem do paleoproterozoico, proveniente de colisões ocorridas no período Riaciano (Macambira *et al.* 2004, 2009, Faraco *et al.* 2004, 2005, Vasquez *et al.* 2008b). Na borda oeste, a Província é progressivamente encoberta/intrudida por vulcanismo/plutonismo anorogênico do Orosiriano, correlato ao evento Uatumã (Barbosa *et al.* 1966, Silva *et al.* 1974, Tavares 2015). As sequências plutônicas e vulcânicas de idade Paleoproterozoica (1990 - 1860 Ma) (Costa *et al.* 2016), correspondem ao Domínio Iriri-Xingu.

A sul, a PC faz contato com o Domínio Santana do Araguaia, representado por porções juvenis paleoproterozoicas e segmentos arqueanos retrabalhados durante o paleoproterozoico (Vasquez *et al.* 2008), bem como a leste é limitado pela faixa neoproterozoica Araguaia, relacionada à Orogenese Brasiliiana, de orientação N-S.

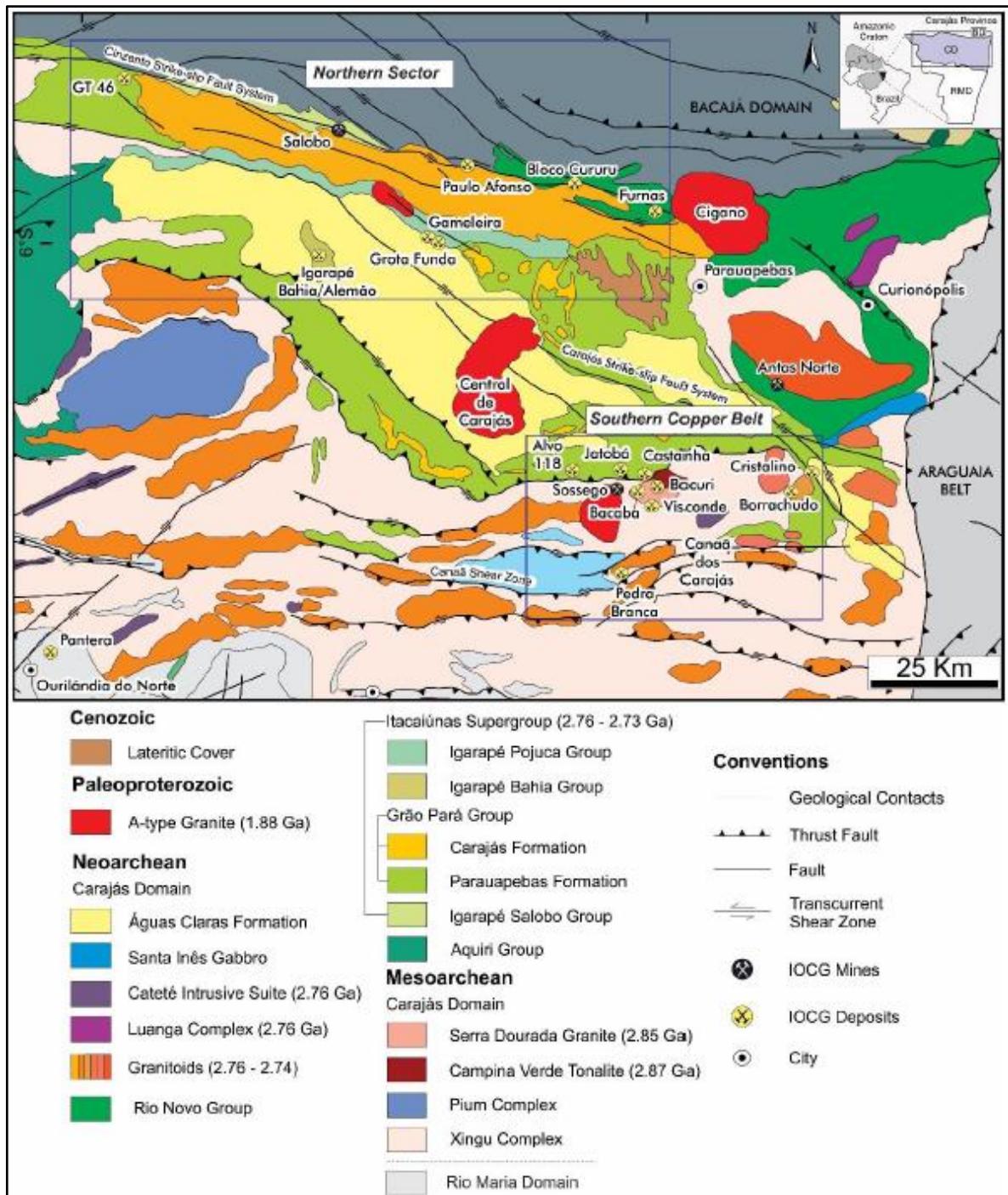


Figura 2.1 - Mapa geológico do Domínio Carajás com a localização dos principais depósitos IOCG com a delimitação dos Cinturões Norte e Sul do Cobre. BD = Domínio Bacajá, CD = Domínio Carajás, RMD = Domínio Rio Maria. A inserção ilustra a localização em A) Brasil, B) Província de Carajás e C) área do mapa. CD = Domínio Carajás, BD = Domínio Bacajá, RMD = Domínio Rio Maria

Segundo Santos (2003), dois blocos tectônicos arqueanos compõem a PC, o Domínio Rio Maria a sul e o Domínio Carajás a norte (Figura 2.1). Os domínios Rio Maria e Carajás apresentam associações litológicas e metalogenéticas muito distintas, evidenciando uma evolução tectônica bastante diferenciada em cada um desses blocos (Monteiro *et al.* 2014). O Domínio Carajás consiste em um embasamento representado por migmatitos e gnaisses de composição TTG (Tonalito, Tonalito-Trondhjemito-Granodiorito), de idades mesoarqueanas, do Complexo Xingu ($3066 \pm 6,6$ Ma) (Delinardo da Silva 2014), em associação com ortogranulitos máficos a félsicos Chicrim-Cateté, ou Complexo Pium, datados em 3002 ± 14 Ma (Pidgeon *et al.* 2000, Melo *et al.* 2019). O embasamento comprehende também rochas graníticas indeformadas, de composição cálcio-alcalina, com idades de cristalização por volta de 3,0 a 2,86 bilhões de anos (granito Serra Dourada e tonalito Bacaba), encontrados principalmente na Região Sul do Cinturão do Cobre (Feio *et al.* 2013, Moreto *et al.* 2015a, Melo *et al.* 2019).

As sequências *greenstone belt* da PC são subdivididas em dois grupos distintos, os grupos Rio Novo, a nordeste, e Sequeirinho, a sudeste. O Grupo Rio Novo é constituído predominantemente por ultramáficas, formações ferríferas bandadas, biotita-xistos e xistos verdes (Tavares 2015). Já no grupo Sequeirinho, ocorrem rochas metavulcânicas máficas e ultramáficas, formações ferríferas bandadas, metachert, biotita-xistos, quartzo-xistos e paragnaisses finos (Tavares 2015).

Proposto por DOCEGEO (1988), o Supergrupo Itacaiúnas é a sequência supracrustal mais extensiva do Domínio Carajás, com idade de deposição neoarqueana entre 2760 a 2730 Ma. As sequencias metavulcanossedimentares do Supergrupo estão subdivididas em quatro grupos: ocupando a base da estratigrafia, o Grupo Igarapé Salobo (2761 ± 3 Ma; Machado *et al.* 1991) é composto por paragnaisses, anfibolitos, metagrauvacas e formações ferríferas que hospedam as mineralizações de cobre-ouro no Depósito Salobo (DOCEGEO 1998). Estudos propostos por Lindenamyer (2003) e Melo *et al.* (2016) reinterpretaram os anfibolitos, meta-arcósios e formações ferríferas, como produtos de intensa alteração hidrotermal, gerando rochas ricas em grunerita, almandina, turmalina, magnetita, magnetita e biotita.

Seguindo a estratigrafia em direção ao topo do Supergrupo Itacaiúnas, o Grupo Grão Pará é subdividido em Formação Parauapebas (Araújo-Filho *et al.* 2020 e referências contidas nele) na base, composta por rochas vulcânicas intermediárias a félsicas, brechas, arenitos e conglomerados (DOCEGEO 1988) e Formação Carajás em sequência (idade de deposição entre

2750 e 2750 Ma, *Trendall et al.* 1998), contendo estratos de formação ferrífera bandada (BIF) com aproximadamente 250-300 m de espessura (Cabral *et al.* 2013). O terceiro grupo, Igarapé Bahia (2748 ± 31 Ma, *Tallarico et al.* 2005) é composto por rochas sedimentares, metapiroclásticas, metavulcânicas e formações ferríferas (DOCEGEO 1988).

A unidade mais jovem do Supergrupo Itacaiúnas, o Grupo Igarapé Pojuca (2732 ± 3 Ma, Machado *et al.* 1991) é composta por rochas metavulcânicas básicas a intermediárias, xistos, anfibolitos e formações ferríferas bandadas, variando entre fácies xisto verde a anfibolito (DOCEGEO 1988).

O Supergrupo Itacaiúnas é recoberto por uma expressiva cobertura sedimentar da Formação Águas Claras, que por sua vez é constituída por pelitos, arenitos e rochas carbonáticas subordinadas de um ambiente marinho raso na base, seguidos por uma sequência de arenitos fluviais e conglomerados (Tavares *et al.* 2018, Nogueira *et al.* 1995). Estudos recentes, identificam essas sequências com idade de deposição paleoproterozoica (Araujo Filho *et al.* 2020).

O Domínio Rio Maria (DRM), por sua vez, é compreendido como uma amálgama de terrenos tipo granitoide-greenstone belt juvenis, formados ao final do mesoarqueano, com idade de formação entre 2,98 e 2,86 Ga (Dall’Agnol *et al.* 2006, Oliveira *et al.* 2009, 2010, Almeida *et al.* 2011, Santos e Oliveira 2016, Silva *et al.* 2018). São caracterizados por associações tectônicas de *greenstone belts*, granitoides tipo TTG, granitoides cárlico-alcalinos, de alto potássio e complexos máficos-ultramáficos. Segundo Althoff *et al.* (2000) e Almeida *et al.* (2011), a formação da crosta do DRM e seu processo evolutivo deram-se durante processos acrecionários/collisionais, resultando em um encurtamento N-S.

2.2 GEOLOGIA E METALOGÊNESE DO CINTURÃO SUL DO COBRE

Segundo Silva (2018), a PC exibe notável diversidade metalogenética com múltiplos estilos de mineralização de metais básicos e preciosos, incluindo depósitos de alto teor de ferro, ouro orogênico, tungstênio, níquel-EGP (Elementos do Grupo da Platina), ouro-EGP, cobre-ouro polimetálico e depósitos lateríticos de ouro, níquel e bauxita (Dardenne & Schobbenhaus 2001, Villas e Santos 2001, Ferreira Filho *et al.* 2007, Moreto *et al.* 2014).

O Domínio Carajás possui a maior concentração de depósitos do tipo IOCG de alta tonelagem do mundo (Moreto *et al.* 2014). Esses depósitos estão geralmente localizados ao

longo ou próximos a importantes descontinuidades regionais de direção E-W, como a Zona de Cisalhamento (ZC) Cinzento a norte e a Zona de Cisalhamento Canaã dos Carajás a sul, que truncam rochas do embasamento e sequências supracrustais (Santos 2020).

Há dois *clusters* principais de depósitos IOCG:

- O Cinturão Norte do Cobre, que abriga os depósitos ao longo da ZC Cinzento, como Salobo (1,112 Bt com 0,69% de cobre e 0,43g de ouro por tonelada; Vale 2012), Igarapé Bahia-Alemão (219 Mt com 1,4% de cobre e 0,86g de ouro por tonelada; Tallarico *et al.* 2005), Paulo Alfonso, Furnas, Polo e Alvo GT46. Os depósitos de Salobo e Igarapé Bahia-Alemão têm sido considerados como associados a um extenso sistema magmático-hidrotermal, datado aproximadamente em 2,57 Ga (Réquia *et al.* 2003, Tallarico *et al.* 2005);
- E o Cinturão Sul do Cobre (Moreto *et al.* 2015), onde agrupam-se depósitos ao longo da ZC Canaã dos Carajás e de falhas subsidiárias, como os depósitos de classe mundial Sossego (240 Mt com 1,1% de cobre e 0,28/g de ouro por tonelada; Melo *et al.* 2019), Cristalino (500 Mt com 1% de cobre e 0,3 g de ouro por tonelada; Melo *et al.* 2019) e Alvo 118 (70 Mt, com 1% de cobre e 0,3g de ouro por tonelada; Melo *et al.* 2019). Ocorrem também outros depósitos menores, como Bacaba, Bacuri, Castanha, Jatobá, Visconde, Pantera e Pedra Branca (Figura 2.2).

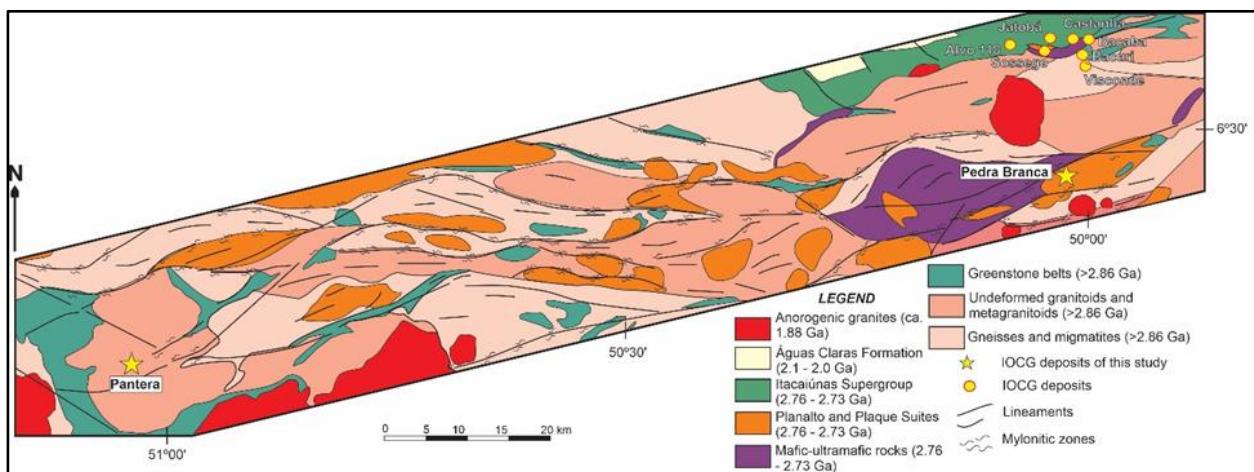


Figura 2.2 - Mapa geológico do Cinturão Sul do Cobre: Pedra Branca e Pantera (modificado de Costa *et al.* 2016).

A evolução paragenética de alguns desses depósitos, no Cinturão Sul do Cobre, apresentam semelhanças e possivelmente processos metalogenéticos em comum, ocorridos em níveis crustais diferentes (Augusto *et al.* 2008, Siepierski 2008, Xstrata 2008, Craveiro *et al.* 2020, Melo *et al.* 2014, Pestilho *et al.* 2020, Hunger *et al.* 2021). As zonas de alteração hidrotermal são representadas por alterações sódicas (albita-escapolita), acompanhadas por intensa alteração potássica, evoluindo para uma alteração clorítica e sericítica, reconhecidas nos depósitos Sossego (Monteiro *et al.* 2008), Cristalino (Huhn *et al.* 1999b), Castanha (Pestilho *et al.* 2020), Visconde (Craveiro *et al.* 2012) e Bacaba (Augusto *et al.* 2008). Importante salientar que dados geocronológicos disponibilizados por Moreto *et al.* (2015), propõe que os depósitos localizados no Cinturão Sul do Cobre, foram influenciados por episódicos sistemas hidrotermais de IOCG, ocorridos durante períodos pontuais entre o Neoarqueano e o Paleoproterozóico, sugerindo distintos contextos de formação dos depósitos.

Pestilho *et al.* (2020) sugerem que o grande controle estrutural, apresentado pelos depósitos, indica uma relação espacial intrínseca com as zonas de cisalhamento que cortam a região. A ZC Canaã dos Carajás e suas subsidiárias, parecem estar espacialmente relacionadas com zonas de alteração hidrotermal observadas na região, de modo que quanto maior a deformação, mais intensa é a alteração hidrotermal.

Os depósitos de Bacaba, Bacuri e potencialmente os depósitos de Castanha, Cristalino e Visconde registram a evolução hidrotermal do Neoarqueano e compartilham uma história metalogenética comum com os corpos de minério Sequeirinho-Baiano-Pista (2,72-2,68 Ga) do depósito de Sossego (Moreto *et al.* 2014). É possível traçar um padrão de zonamento hidrotermal semelhante ao observado em outros sistemas IOCG ao redor do mundo, que são formados em níveis crustais mais profundos a intermediários (Hitzman 2000, Williams *et al.* 2005).

O depósito de classe mundial Sossego (240 Mt com 1,1% de cobre e 0,28g de ouro por tonelada), é o mais conhecido do Cinturão Sul do Cobre e hospeda dois principais corpos de minério: Sequeirinho-Baiano-Pista e Sossego-Currall (Monteiro *et al.* 2008, Moreto *et al.* 2015a). A mineralização de ouro e cobre nesses corpos, ocorre de forma semelhante, principalmente em rochas gnáissicas, graníticas, em granitos granofíricos, gabronoritos e rochas metavulcânicas (Monteiro *et al.* 2008, Moreto *et al.* 2015a). Entretanto, Monteiro *et al.* (2008) sugerem a distinção dos dois corpos de minério devido às diferentes zonas de alteração hidrotermal e estilos de mineralização (Figura 2.3). O corpo Sequeirinho-Baiano-Pista consiste

em zonas de magnetita-(apatita) e albita-actinolita associadas a estruturas de comportamento dúctil e dúctil-rúptil (Monteiro *et al.* 2008). Essas associações são sobrepostas por uma alteração potássica restrita e formação distal de clorita. Brechas, zonas de *stockwork* e disseminações de sulfetos ao longo da foliação milonítica são os principais estilos de mineralização de cobre e ouro. O Sossego-Currall exibe uma alteração (Ca)-Na pouco desenvolvida, mas uma alteração potássica disseminada associada a estruturas rúpteis. Os corpos de minério de cobre e ouro são representados por brechas tubulares e veios com abundante calcita e quartzo. Calcopirita e magnetita são os principais minerais de minério encontrados em ambos os corpos de minério (Monteiro *et al.* 2008).

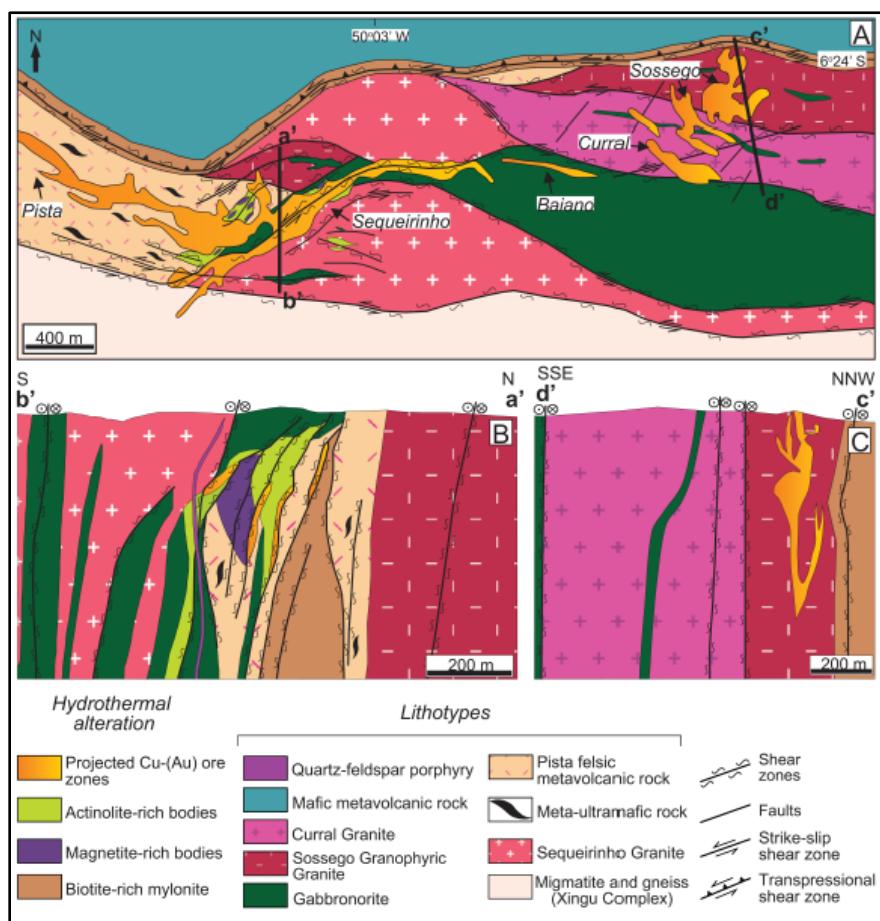


Figura 2.3 - A) Mapa geológico do depósito Sossego com destaque para os corpos de minério Pista, Sequeirinho, Baiano, Curral e Sossego; B) Seção transversal (N-S) do corpo de minério Sequeirinho; C) Seção transversal (SSE-NNW) do corpo de minério Sossego (modificado de Monteiro *et al.* 2008, Moreto *et al.* 2015b).

Os depósitos Pantera e Pedra Branca representam também importantes depósitos IOCG no Cinturão Sul do Cobre. Embora menos estudados, esses depósitos possuem atributos geológicos semelhantes aos depósitos IOCG da região.

A partir da integração geológica-geofísica, Dutra *et al.* (2021) sugerem que os depósitos do Cinturão Sul do Cobre são marcados por valores anômalos de potássio e urânio, apresentando valores magnéticos elevados no mapa ASA e se dispõem próximo a lineamentos magnéticos rasos e profundos. O resultado obtido é consistente com os trabalhos realizados nos depósitos IOCG, que sugerem a migração de fluidos hidrotermais mineralizantes ao longo de descontinuidades crustais, associadas a extensos halos de alteração. Essa área abrange quase toda a extensão entre o depósito Castanha, a mina Sossego e várias áreas menores à leste do meridiano de 50°W que englobam o depósito Bacuri, além de garimpos e ocorrências de cobre e ouro.

2.3 GEOLOGIA DO DEPÓSITO PANTERA

O Depósito Pantera está localizado na área de contato entre o Domínio Carajás e o Domínio Rio Maria, ao longo de estruturas relacionadas à zona de cisalhamento regional Canaã dos Carajás. É considerada a primeira ocorrência de depósitos do tipo IOCG (óxido de ferro-cobre-ouro) no Domínio Rio Maria, embora esteja localizada na fronteira entre os dois domínios geológicos (Figura 2.4).

O Depósito demonstra potencial econômico com resultados de sondagem indicando uma espessura de 28 metros contendo 2,58% de cobre a partir de 81 metros de profundidade, incluindo uma seção de 10,05 metros com 3,75% de cobre. A mineralização predominante é composta por calcopirita, ocorrendo em zonas tabulares de minério hospedadas por uma zona de cisalhamento de alto ângulo (ADIMB 2018).

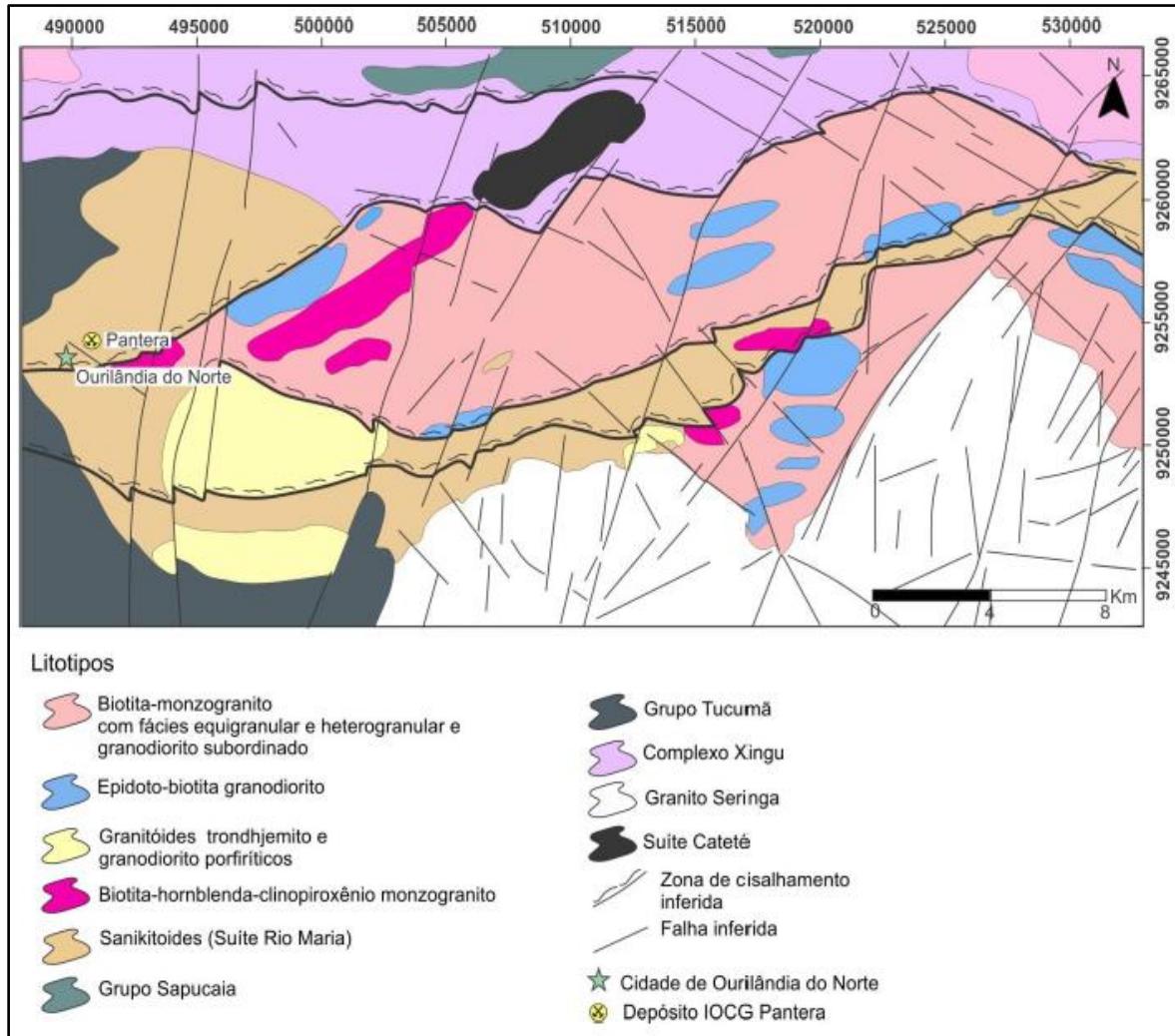


Figura 2.4 - Mapa geológico de Ourilândia do Norte com destaque para o depósito IOCG Pantera (Silva et al. 2018, Lopes 2018).

O depósito é hospedado por granodioritos da Suíte Sanikitoides Rio Maria, com idade de aproximadamente 2909 ± 15 Ma.

Os granodioritos da Suíte Sanikitoides Rio Maria, exibem uma variedade de texturas, entre equigranulares, inequigranulares e porfiríticas (Silva et al. 2018). Corpos intrusivos como quartzo diorito porfirítico, quartzo-feldspato pórfiro e diabásio são observados intrudindo o granodiorito e exibem zonas de alteração hidrotermal bem desenvolvidas (Lopes 2018).

As zonas de alteração hidrotermal mais intensas estão intimamente relacionadas às áreas de maior deformação presentes no granodiorito, que é a principal rocha hospedeira da mineralização do tipo IOCG (Lopes 2018). A deformação dúctil, incluindo a formação de bandas de cisalhamento, parece estar associada à intensificação dos processos de alteração

hidrotermal. Os halos de alteração hidrotermal apresentam um padrão de distribuição vertical a subvertical, controlado pelo desenvolvimento das zonas de cisalhamento de alto ângulo.

A partir dos estudos de Lopes (2018), é possível observar conforme aproxima-se das zonas mais mineralizadas, uma sequência de halos de alteração que incluem alteração sódico-cálcica com actinolita e albita, seguida de alteração cálcica com um aumento considerável na abundância de actinolita, e gradando para zonas de alteração férrico-cálcica com magnetita e actinolita. Nessa fase, o sistema hidrotermal apresenta uma alteração potássica caracterizada pela presença de biotita, hastingsita e feldspato potássico subordinados, juntamente com silicificação. A mineralização cuprífera ocorre em torno de 300 °C, acompanhada por zonas de alteração clorítica.

As mineralizações no Depósito Pantera variam em estilo e incluem veios, vênulas, brechas hidrotermais e disseminações ao longo da foliação milonítica. A associação mineral comum nas zonas mineralizadas é composta principalmente por magnetita, pirita e calcopirita, sendo a calcopirita o principal mineral de minério, juntamente com zonas de alteração potássica contendo biotita (Lopes 2018). A mineralização de Cu-Au (Figura 2.5) ocorre principalmente em zonas de intensa alteração potássica e silicificação, e manifesta-se em três estilos principais: (i) brechas hidrotermais, que abrigam a maior parte da mineralização; (ii) disseminações ao longo da foliação milonítica, sugerindo controle estrutural; e (iii) vênulas e veios, que são os estilos menos expressivos (Lopes 2018). A Figura 2.5 demonstra a distribuição das diferentes zonas de alteração hidrotermal e a disposição dos principais litotipos

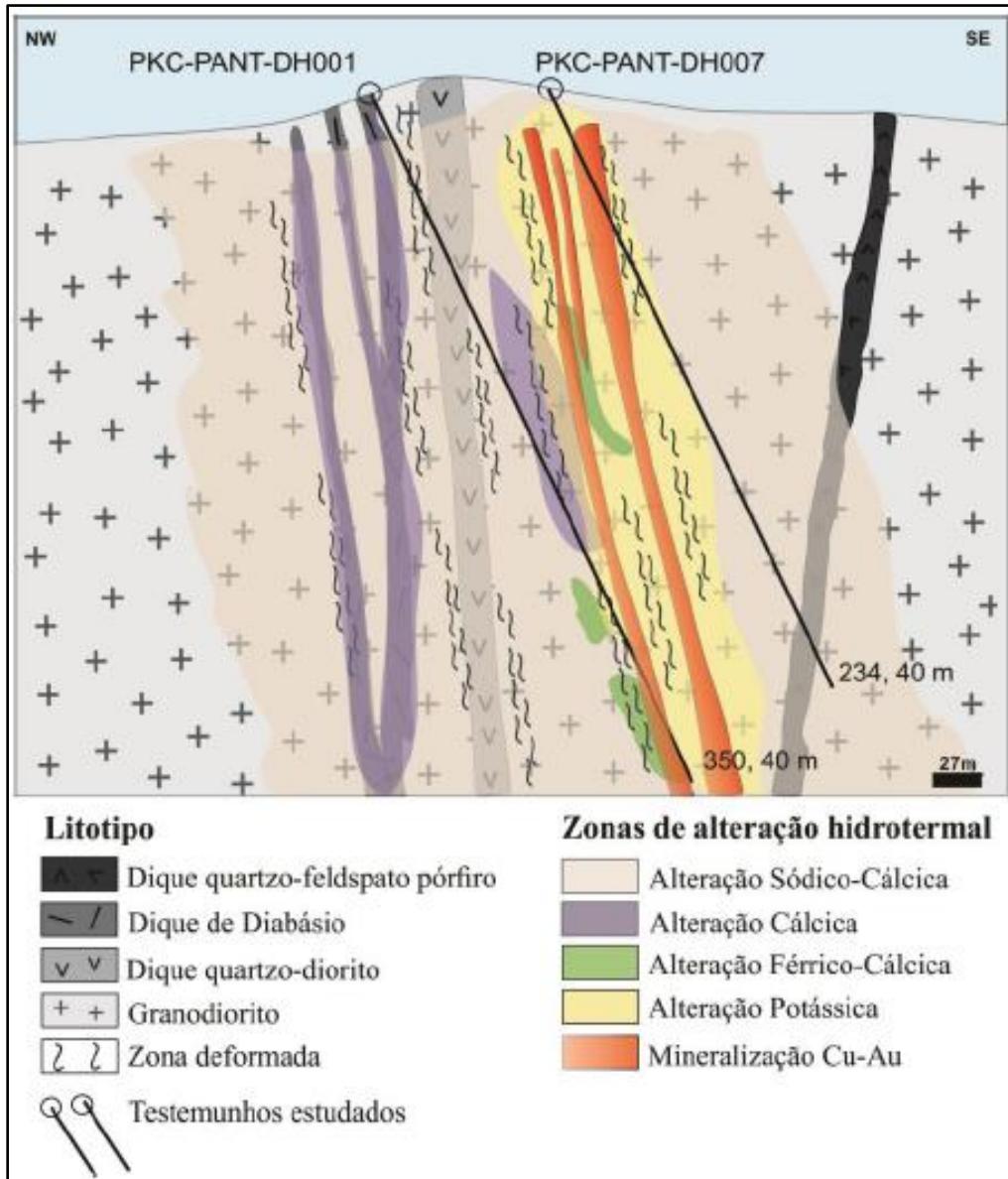


Figura 2.5 - Perfil geológico esquemático do Depósito IOCG Pantera elaborado a partir dos furos de sondagem pkc-pant-dh001 e pkc pant-dh007 (Vale, Lopes et al. 2018).

2.4 GEOLOGIA DO DEPÓSITO PEDRA BRANCA

O depósito Pedra Branca, ou Suíte Pedra Branca (Gomes & Dall’agnol 2007, Feio *et al.* 2013), localizado no Cinturão Sul do Cobre, está próximo ao contato entre os complexos Pium e Xingu e as suítes Plaquê e Planalto. Assim como o depósito Pantera, encontra-se longo de estruturas subsidiadas pela ZC Canaã dos Carajás.

O depósito está associado aos granitos da Suíte Planalto (2730 ± 5 Ma, Feio *et al.* 2013) de forma intrusiva (Gomes & Dall’Agnol 2007), porém as relações de contato entre essas

unidades, não estão claramente expostas no campo. As rochas da suíte Pedra Branca são fortemente deformadas e geralmente apresentam bandamento magmático, com alternância de faixas tonalíticas e trondhjemíticas com espessura de decímetros a metros, além de foliação subvertical de direção leste-oeste relacionada a uma deformação dúctil (Feio *et al.* 2013).

Segundo Silva *et al.* (2020), a Suíte Pedra Branca se assemelha às suítes do tipo TTGs (tonalítica-trondhjemítica), com baixos teores de Sr, K e baixas razões de K/Na. No entanto, difere dos típicos TTGs arqueanos em termos mineralógicos e geoquímicos, apresentando anfibólio e clinopiroxênio, além de ser rica em elementos incompatíveis como Zr, Ti, Y e Nb, e pobre em elementos como Rb, Sr e Ba. (Gomes & Dall'Agnol 2007, Feio *et al.* 2013).

Os halos de alteração hidrotermal ocorrem ao longo da zona de cisalhamento Canaã dos Carajás, com intensidade aumentada no contato entre as rochas graníticas da Suíte Planalto e as rochas do Complexo Xingu (Mizuno 2009). O sistema hidrotermal responsável pela mineralização evoluiu a partir de uma alteração sódica inicial, causada pela circulação de fluidos hidrotermais quentes, na Zona de Cisalhamento (Mizuno 2009). Esse sistema pode ser caracterizado pela albitização observada por Mizuno (2009). É importante salientar que a alteração hidrotermal ocorre em diferentes estágios de T e P, estando intimamente relacionados com o tipo de sistema mineralizante.

Com a progressiva diminuição da temperatura do sistema hidrotermal, outros estágios de alteração foram observados, incluindo diferentes assembleias minerais. Nesse contexto, foi identificada alteração potássica, ocorrendo de forma mais restrita, cortando a alteração sódica e resultando na formação de feldspato potássico em áreas proximais à zona mineralizada (Mizuno 2009). Há predominância na zona de alteração sódica em relação a de alteração potássica (Figura 2.6), sendo característica de depósitos de IOCG formados em níveis crustais profundos (Mizuno 2009).

A mineralização ocorre de forma disseminada na foliação, nos veios e brechas, sendo associada a clastos de actinolita-apatita-magnetita em matriz de sulfetos. Essas características indicam que a precipitação do minério ocorreu principalmente devido à redução de temperatura do sistema. É possível identificar também uma alteração sericítica provavelmente posterior à mineralização, afetando principalmente os feldspatos (Mizuno 2009).

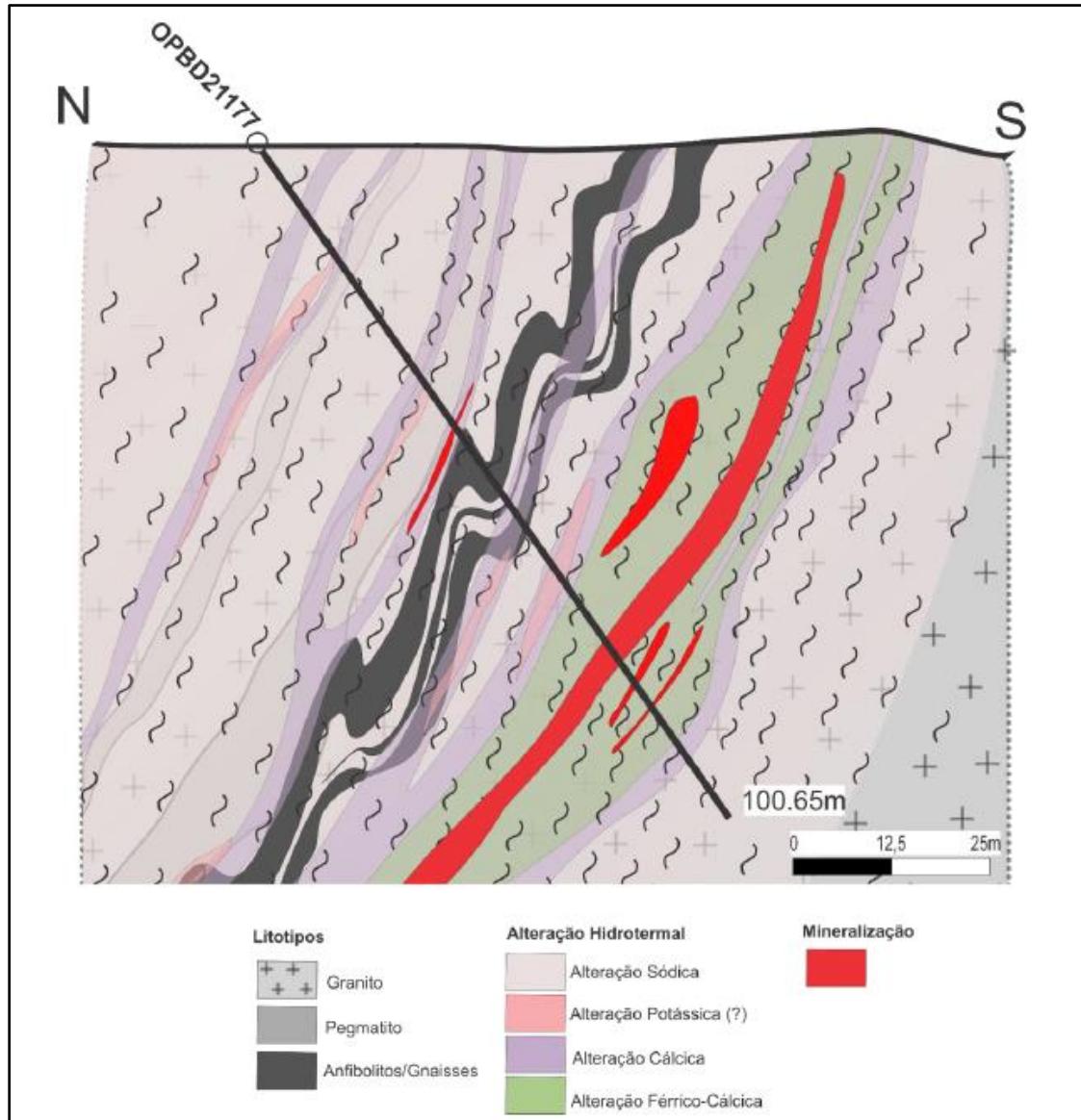


Figura 2.6 - Perfil geológico esquemático do Depósito IOCG Pedra Branca elaborado a partir do furo de sondagem OPBD21177 com destaque para as zonas de alteração hidrotermal e a disposição dos principais litotipos (Mello Corrêa 2022).

CAPÍTULO 3

AEROGEOFÍSICA NA CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-METALOGENÉTICA

3.1 MAGNETOMETRIA

Levantamentos magnéticos são utilizados para identificar rochas ricas em minerais ferromagnéticos e criar mapas de anomalias magnéticas, que ajudam a delinear contatos e estruturas geológicas (Barbuena *et al.* 2013). Esses mapas mostram variações de amplitude que refletem diferentes fontes magnéticas, em diferentes níveis da crosta, com geometria e contrastes de suscetibilidade magnética distintos. São alvos durante a prospecção geofísica, minerais como a magnetita, a ilmenita e pirrotita, por exemplo, devido aos contrastes de suscetibilidade magnética com as rochas hospedeiras imediatas (Telford *et al.* 1990). Segundo Barbuena *et al.* (2013), a interpretação dos dados magnéticos é desafiadora devido à influência da magnetização induzida e remanente. Para lidar com essas dificuldades, são empregados métodos de aprimoramento que utilizam derivadas direcionais do campo magnético, facilitando a interpretação dos dados.

Devido à natureza dipolar do campo magnético da Terra, sua direção e inclinação variam ao longo da superfície, o que afeta o padrão das anomalias magnéticas em diferentes regiões do planeta (Blakely 1995). Portanto, é necessário realizar correções para eliminar fatores que possam ocultar características de interesse.

O campo magnético é derivado de funções potenciais e pode revelar a presença de diferentes materiais subterrâneos através do contraste de suas propriedades físicas (Blum 1999). A magnetização é a propriedade física que determina os efeitos magnéticos e sua intensidade. Por sua vez, depende da susceptibilidade magnética (capacidade de um material magnetizar se quando submetido a um campo magnético) e da magnetização remanescente.

Nesse contexto, os materiais podem ter comportamentos magnéticos diferentes, como verdadeiramente ferromagnéticos, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo (Faria Lima, 2005, Barbuena *et al.* 2013). Em resumo, cada tipo de rocha possui uma constante de susceptibilidade que está relacionada ao seu teor de elementos especificamente ferromagnéticos (Kearey *et al.* 2009) (Figura 3.1).

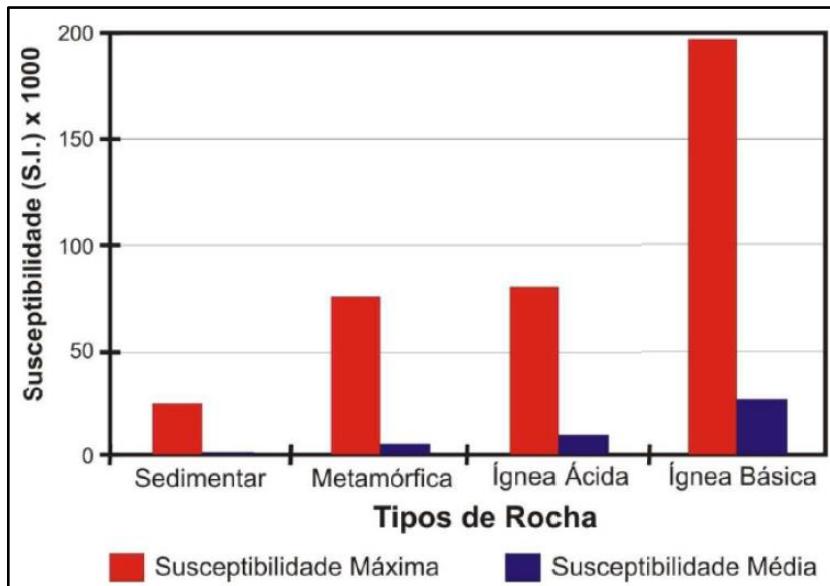


Figura 5 - Média e máxima susceptibilidade magnética das rochas (Reynolds 1997).

Entre as técnicas de realce comumente aplicadas a dados de campo potencial estão a amplitude do sinal analítico (ASA), o Gradiente Horizontal Total (GHT), a inclinação do sinal analítico (ISA), a derivada total horizontal de derivada total (TDR-THDR), a derivada vertical, continuação para cima, derivadas em x, y e z, dentre outros (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 - Filtros de Fourier com as respectivas finalidades geofísicas (modificado de Kearey et al. 2009).

Filtros de Fourier		Finalidade Geofísica
Frequência	Passa Banda	Retirar as anomalias relacionadas a um determinado intervalo de frequência.
	Passa Alta	Retirar baixas frequências e evidenciar informações de fontes mais rasas.
	Passa Baixa	Retirar baixas frequências e evidenciar informações de fontes mais rasas.
Continuação	Continuação para baixo	Fornece informações acerca de anomalias mais rasas (filtro altamente estável – geralmente não utilizado).
	Continuação para cima	Filtrar altas frequências retirando as anomalias mais rasas e evidenciando as anomalias mais profundas.
Derivada	Gradiente residual	Remove anomalias regionais e evidencia as anomalias locais.
	Gradiente horizontal em X	Evidencia as estruturas N-S.
	Gradiente horizontal em Y	Evidencia as estruturas em E-W.
	Gradiente vertical	Evidencia as fontes rasas.
Amplitude do Sinal Analítico		Projeta, em superfície, as anomalias em profundidade.

No tratamento de dados aeromagnetométricos, é importante aplicar filtros de passagem de banda para eliminar comprimentos de onda indesejados. O Cosseno Direcional é um exemplo de filtro utilizado para melhorar a qualidade para interpretação dos dados aeromagnéticos, a partir da remoção de ruídos de alta frequência que seguem uma direção preferencial, sendo aplicado na direção das linhas de voo durante um levantamento aéreo. Conforme Cordell *et al.* (1992), o grau do filtro é ajustado para suavizar o levantamento.

Amplitude do Sinal Analítico (ASA) centraliza as anomalias magnéticas sobre os corpos e é utilizada para destacar e definir as bordas e contornos de corpos magnéticos (Nabighian 1972). É uma técnica que permite a identificação de contrastes magnéticos entre diferentes regiões geológicas e ajuda na caracterização da geometria dos corpos magnéticos de interesse.

A derivada Dz do campo magnético residual têm a função de realçar as altas frequências em função das baixas frequências ao longo da direção z, destacando características pontuais alinhadas nessas direções (Cordell & Grauch 1985, Castro 2015).

O *Tilt Derivative* (TDR) ou Inclinação do Sinal Analítico (ISA) (Miller & Singh 1994), equaliza as amplitudes, posiciona os máximos sobre os centros das fontes, independente da profundidade. Dessa forma, Thurston & Smith (1997) propõem a utilização da técnica para estimar o mergulho do gradiente da anomalia magnética e o contraste da susceptibilidade magnética, viabilizando o realce dos lineamentos magnéticos associados a descontinuidades, mudanças abruptas na litologia e diques.

3.2 GAMAESPECTROMETRIA

A radiação gama é emitida pelos átomos radioativos durante seu processo de decaimento (Quadro 3.2). Essa radiação consiste em ondas eletromagnéticas de alta energia. As partículas alfa e beta também são emitidas durante o decaimento radioativo, mas a radiação gama possui energia mais alta e maior poder de penetração. A detecção e análise da radiação gama são utilizadas para identificar elementos radioativos, mapear sua distribuição e estudar processos geológicos e estruturais (Telford *et al.* 1990).

A radiação gama próxima à superfície é principalmente originada pela desintegração dos isótopos de potássio (^{40}K), tório (^{232}Th) e urânio (^{238}U), que são encontrados na maioria das rochas. Por outro lado, a radioatividade total corresponde à quantificação de todos os raios gama

detectados pelo espectrômetro gama em uma faixa de energia mais elevada, denominada canal de contagem total (Grasty *et al.* 1985).

Quadro 2.2 - Principais minerais radioativos e principais ocorrências (modificado de Telford *et al.* 1990).

Mineral Radioativo	Mineral	Ocorrência
Potássio (K)	Feldspato ortoclásio e microclínio	Principais constituintes em rochas ígneas ácidas e pegmatitos.
	Muscovita	
	Alunita	Alteração em rochas vulcânicas.
Tório (Th)	Silvita, carnalita	Depósitos salinos em sedimentos.
	Monazita	Granitos, pegmatitos, gnaisses.
	Torianita	
Urânio (U)	Torita, uranotorita	Granitos, pegmatitos pláceres.
	Uraninita	Granitos, pegmatitos, veios de Ag, Pb, Cu, etc..
	Carnotita	Arenitos.
	Gumita	Associação à uraninita.

Geralmente, os espectrômetros gama possuem quatro canais distintos para medição (Figura 3.2): um canal para contagem total; um canal para o pico de ^{208}Tl , que mede o tório; um canal para o pico de ^{214}Bi , que mede o urânio; e um canal para o pico de ^{40}K , que mede o potássio (Barbuena *et al.* 2013). Com base nas respostas obtidas, é possível determinar a composição de potássio (K), tório (Th) e urânio (U) na superfície, o que permite distinguir diferentes tipos de litologias (Minty 1997). Dessa forma, através de métodos de calibração apropriados, essas contagens podem ser expressas em unidades de concentração, como K (%), eTh (ppm) e eU (ppm) (Rudnick & Gao 2004).

Os elementos ocorrem na crosta em diferentes proporções. O potássio, por exemplo, apresenta uma concentração média de aproximadamente 2,32%, ou 0,61% de K_2O (Rudnick & Gao 2004). O potássio possui maior abundância em rochas félasicas, como granitos, do que em rochas maficas e ultramáficas (Dickson & Scott 1997). Os principais minerais que contêm potássio são os K-feldspatos (ortoclásio e microclínio) e as micas (biotita e moscovita). Entretanto, durante processos de alteração hidrotermal ou intemperismo, as rochas também podem liberar potássio, formando argilominerais como a ilita ou a montmorilonita (Ulbrich *et al.* 2009). Estudos realizados por Hoover & Pierce (1990), Dickson & Scott (1997) e Fornazzari

Neto & Ferreira (2003) mostram que o potássio, devido à sua alta mobilidade, está frequentemente associado a processos de alteração hidrotermal. Isso ocorre principalmente quando o fluido hidrotermal é proveniente de fontes magmáticas ricas nesse elemento.

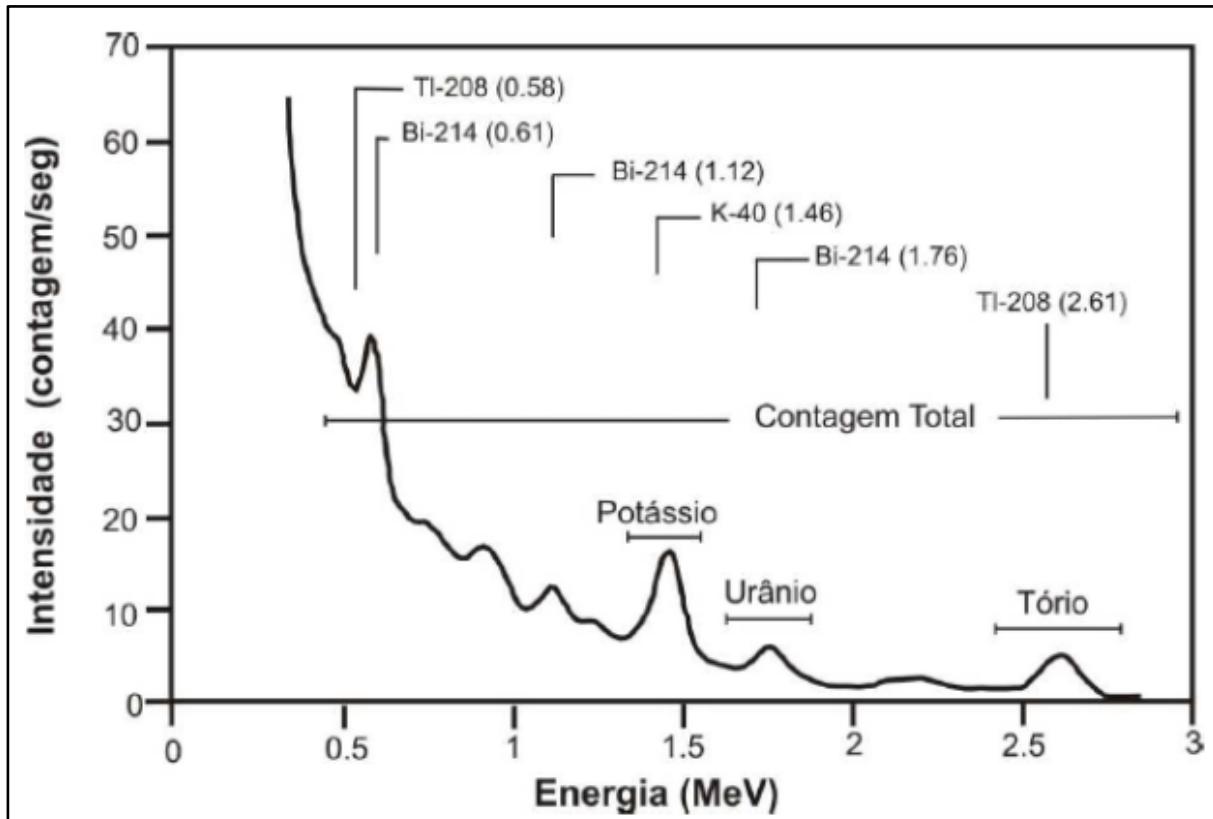


Figura 3.2 - Exibição do espectro de radiação gama a uma altitude de 100 metros com destaque para a localização das janelas de K, Th, U e a contagem Total (Minty 1997, Ribeiro 2020).

O Th possui a menor mobilidade dentre os radionuclídeos, estando geralmente associado a minerais resistentes e menos suscetíveis à dissolução. Comparado ao potássio, possui concentração inferior na crosta, com uma média de 10,5 ppm (Rudnick & Gao 2004) e ocorre em maior quantidade nas rochas graníticas (Figura 3.3), podendo estar associado a minerais como alanita, monazita e zircão. Esses minerais são estáveis durante o intemperismo e têm a tendência de se acumular em depósitos coluvionares, ricos em metais pesados (Dickson & Scott 1997, Ulbrich *et al.* 2009).

Em ainda menor concentração, a proporção do U na crosta é de 2,7 ppm (Rudnick & Gao 2004). Em termos de mobilidade, o urânio é menos móvel em comparação ao potássio, mas ainda pode ser transportado por processos hidrológicos em algumas condições geológicas

específicas. O elemento tende a ser adsorvido por minerais como óxidos de ferro e argilas, o que pode limitar sua mobilidade em certas situações, especialmente em condições de baixa temperatura e oxidação (Dickson & Scott-1997). Telford *et al.* (1990) identificaram o urânio primário ocorrendo em minerais de óxido e silicatos, enquanto o urânio proveniente do intemperismo, se concentra em óxidos de ferro autigênicos e argilominerais. Dessa forma, os principais minerais e locais de ocorrência do urânio, incluem granitos, pegmatitos, carbonatitos, sienitos e alguns folhelhos. (Rudnick & Gao 2004, Ulbrich *et al.* 2009). O aumento do sinal gamaespectrométrico de tório e urânio em áreas de topografia mais suave e ao longo de drenagens pode indicar o transporte coluvial de minerais mais resistentes e de minerais neoformados contendo esses elementos (Ulbrich *et al.* 2009, Barbuena *et al.* 2013).

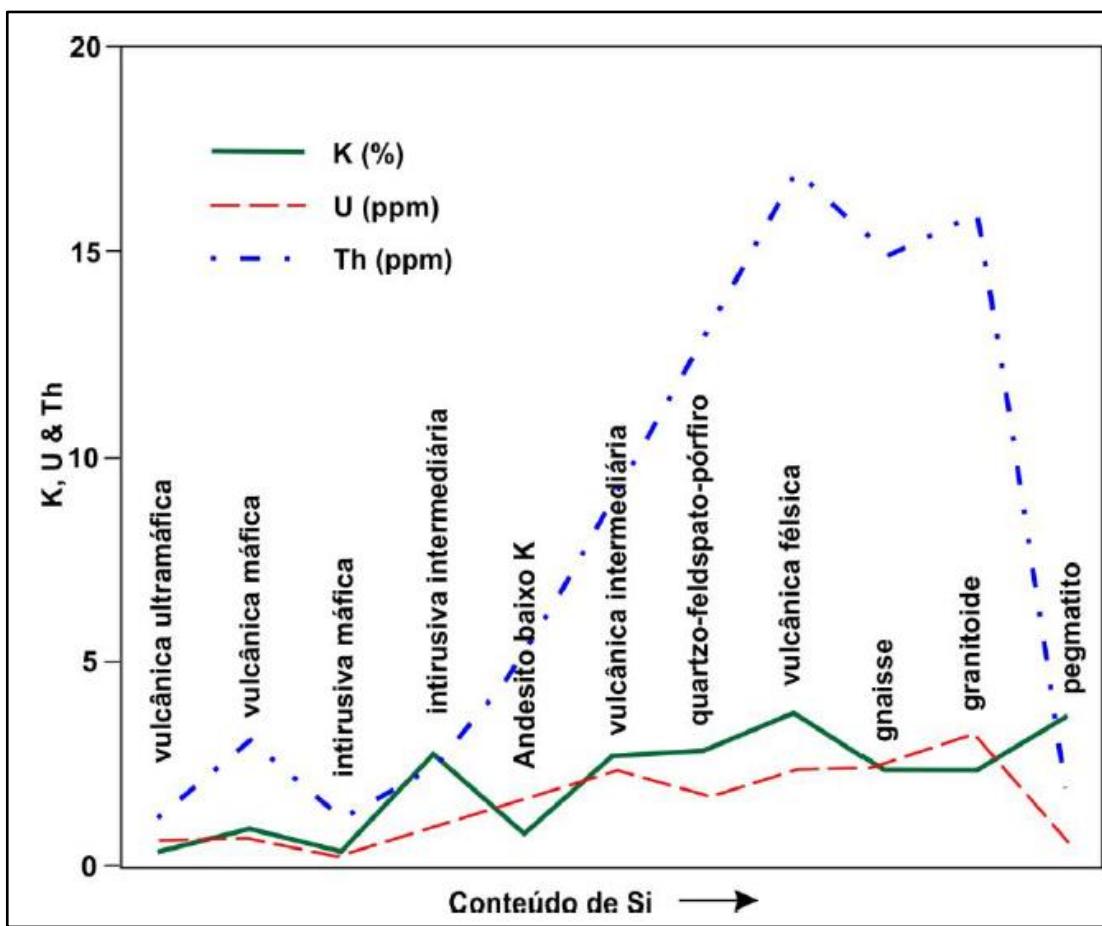


Figura 6 - Correlação da concentração de radioelementos com aumento de silício em rochas ígneas (Dickson & Scott 1997).

Os radioelementos podem estar presentes em concentrações anômalas, indicando alteração por intemperismo, alteração por fluidos hidrotermais, ou até a presença de um depósito mineral. Fatores como diferenciação magmática, contaminação por materiais crustais e interação com outros magmas, também podem contribuir para o enriquecimento relativo dos radioelementos (Gunn 1998). Com objetivo de identificar rochas que passaram por esses processos, são feitas análises dos canais individuais de potássio (K), tório (Th) e urânio (U), bem como da composição ternária da concentração desses elementos. Além disso, podem ser utilizadas razões como K/Th por exemplo, para destacar a relação "antagônica" entre esses dois elementos (Ostrovsky 1975, Pires 1995), com objetivo associar o enriquecimento de K em detrimento do Th, a fatores geológicos como processos de alteração hidrotermal, comumente vinculados a formação de depósitos minerais.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão mostrados mapas temáticos gerados a partir do processamento dos dados geofísicos, destacando os lineamentos e anomalias magnetométricas e radiométricas. Além disso, será apresentada a integração dos resultados obtidos da caracterização geológica-geofísica.

A região de estudo está localizada ao longo da Zona de Cisalhamento Canaã dos Carajás, onde ocorrem diversos depósitos de cobre-ouro do tipo IOCG que apresentam grande controle estrutural (Pestilho *et al.* 2020). Este cenário se mostra favorável para a utilização da magnetometria na caracterização de estruturas e controles regionais. Adicionalmente, a região é reconhecida por sua complexa variedade litológica, apresentando rochas metavulcânicas, anfibolitos, BIFs e diques félsicos a máficos, tornando a gamaespectrometria uma importante ferramenta para distinção dos diversos domínios. Essa complexidade é relatada também em escala de depósito (Monteiro *et al.* 2008).

Desta forma, serão exibidos neste trabalho o processamento de dados geofísicos e mapas de magnetometria e gamaespectrometria.

4.2 MAGNETOMETRIA

4.2.1 Amplitude do Sinal Analítico (ASA)

Através do mapa de ASA, foi possível verificar as diferentes intensidades magnéticas, separá-las em domínios e identificar o padrão das estruturas.

Visando compreender melhor as anomalias magnéticas registradas, foram gerados dois mapas (Figuras 4.2A e B) ampliados na área de estudo, cujas dimensões estão delimitadas pelo polígono no mapa regional de ASA (Figura 4.1). Também foi gerado um terceiro mapa (4.2C), de cunho interpretativo, a partir de três domínios identificados, (i) Domínio 1, correspondente aos valores de maior amplitude registrados; (ii) Domínio 2, que representam os valores de

amplitude intermediária; e (iii) Domínio 3, compreendendo os valores de amplitude mais baixos.

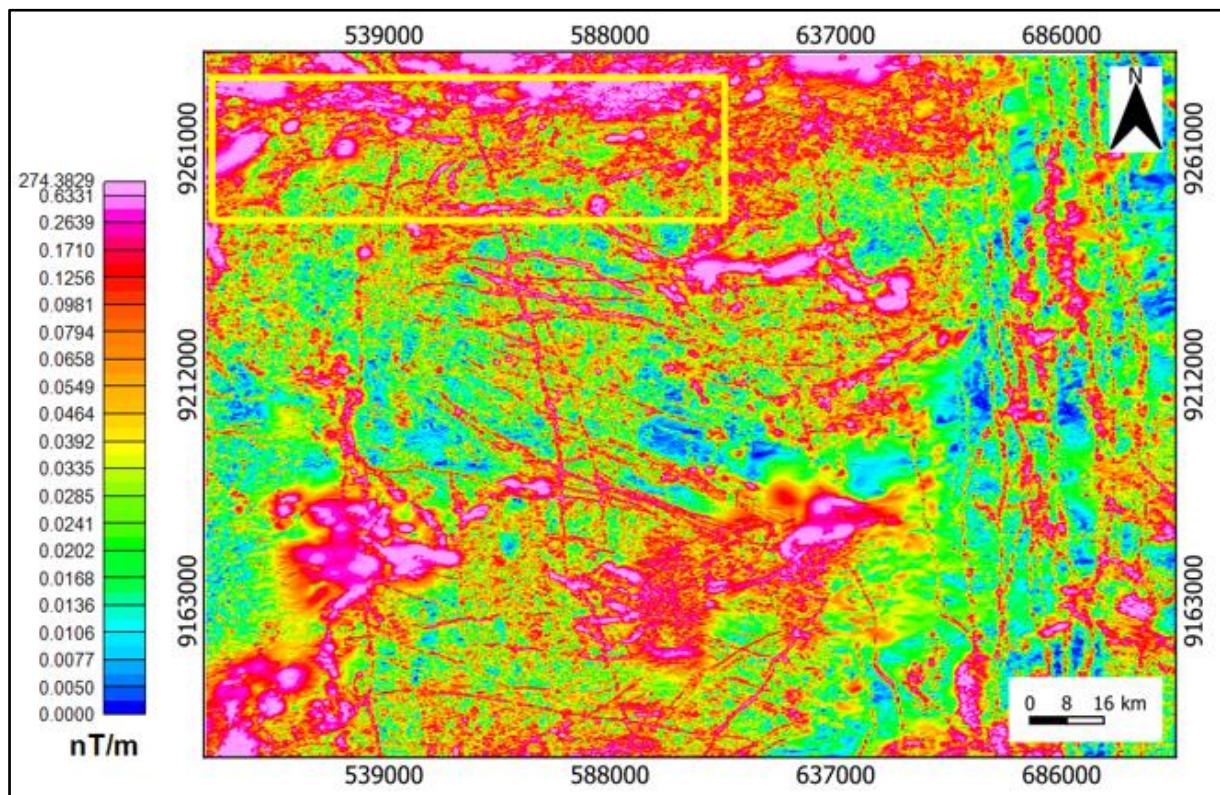


Figura 4.1 - Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA) do campo magnético residual com destaque para o polígono amarelo delimitando a área de estudo.

A partir dos mapas da Figura 4.2, é possível identificar que as zonas de maior intensidade magnética estão principalmente localizadas na região norte da área de estudo, correspondente a Zona de Cisalhamento Canaã dos Carajás de direção WNW-ESE. Essa região apresenta feições retilíneas a levemente sinuosas, na direção preferencial ENE-WSW (Figura 4.2D).

As regiões central e inferior, são marcadas por anomalias de intensidade intermediária a baixa. Entretanto, é possível observar lineamentos que apresentam anomalias de alta amplitude alinhados na direção N-S, que ocorrem praticamente centralizados na região meridional do polígono. Os lineamentos magnéticos identificados nessa direção, são também os que apresentam maior comprimento quando comparadas às demais, chegando a medir aproximadamente 25 km.

A partir da observação dos mapas, é importante mencionar que os depósitos IOCG Pantera e Pedra Branca estão localizados em regiões que apresentam alta intensidade magnética.

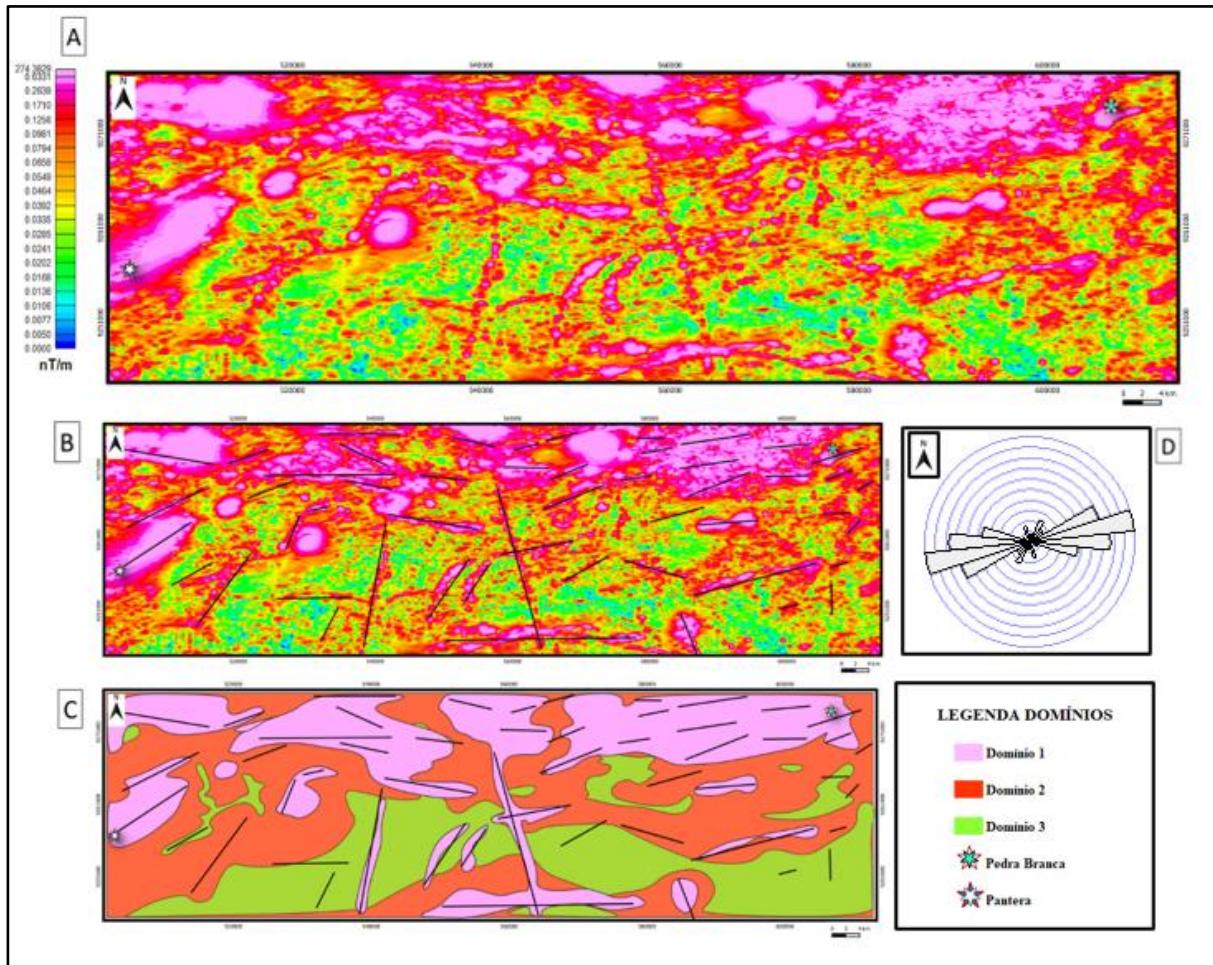


Figura 7 - Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA) do campo magnético residual da área de estudo A) Mapa da ASA; B) Mapa da ASA com Up500; C) Mapa da ASA, separada em 3 domínios; D) Estatística de direção dos lineamentos a partir do diagrama de roseta.

4.2.2 *Tilt Derivative (TDR) ou Inclinação do Sinal Analítico (ISA)*

A partir do método de TDR, foi possível identificar os principais lineamentos magnéticos e suas diversas gerações. Sua textura permite a identificação de estruturas lineares e características menos evidentes na ASA, possibilitando a classificação das estruturas em diferentes direções. O primeiro mapa (Figura 4.3) representa a escala regional.

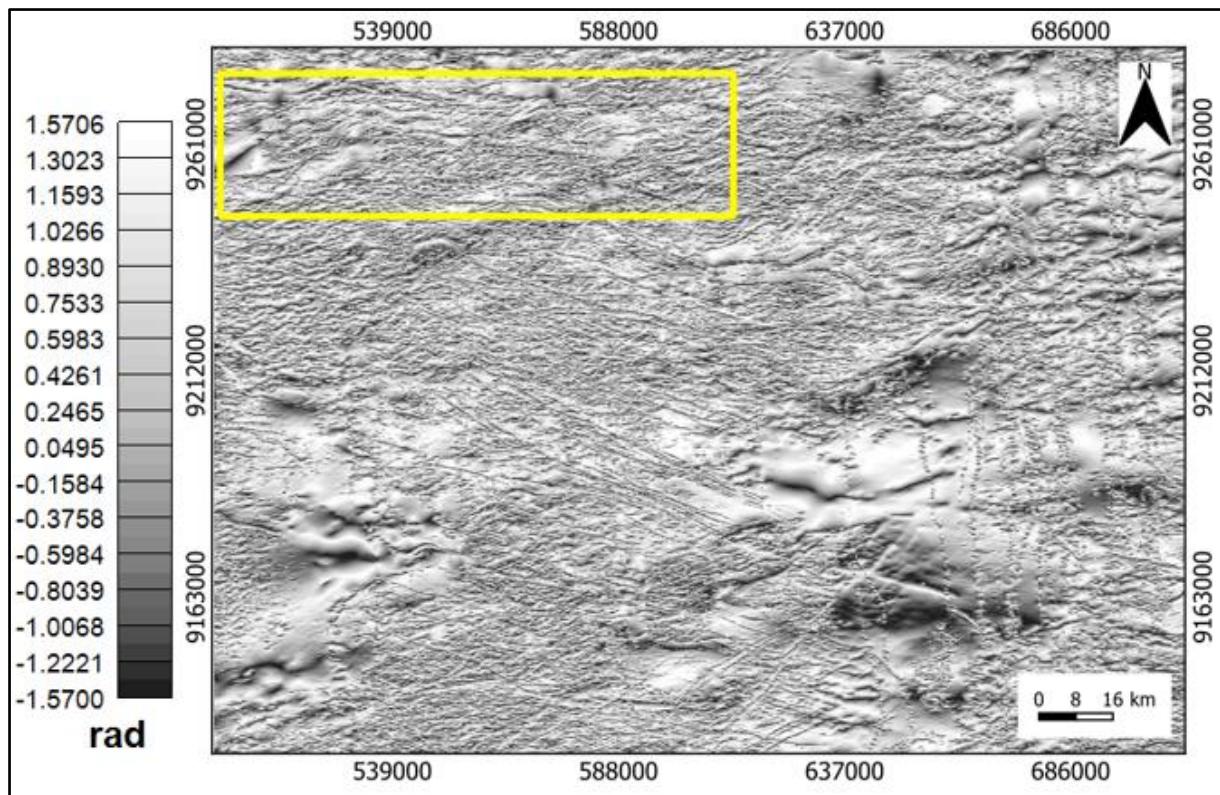


Figura 4.38 - Mapa de tilt derivative (TDR) do campo magnético residual com destaque para polígono amarelo delimitando a área de estudo.

Com base nos mapas gerados na Figura 4.4, foi possível analisar e agrupar os lineamentos de acordo com sua direção preferencial. A Figura 4.4 mostra os mapas a) da TDR; b) de TDR com os lineamentos magnéticos traçados; c) das famílias de lineamentos magnéticos traçados e separados em 3 gerações e; D) a estatística de direção dos lineamentos a partir do diagrama de roseta. A Família 1 de lineamentos magnéticos, apresenta direções aproximadas de ESE-WNW/ENE-WSW, compondo a direção principal das estruturas na área de estudo, de acordo com o diagrama de roseta. Esses lineamentos são intersectados pelos lineamentos NE-SW, que formam a Família 2. A Família 3 representa os lineamentos que ocorrem nas direções N-S/SE-NW, de forma menos sistemática. Em geral, os lineamentos identificados variaram de levemente curvilíneos a retilíneos, gerando um padrão levemente sinuoso no espectro geral.

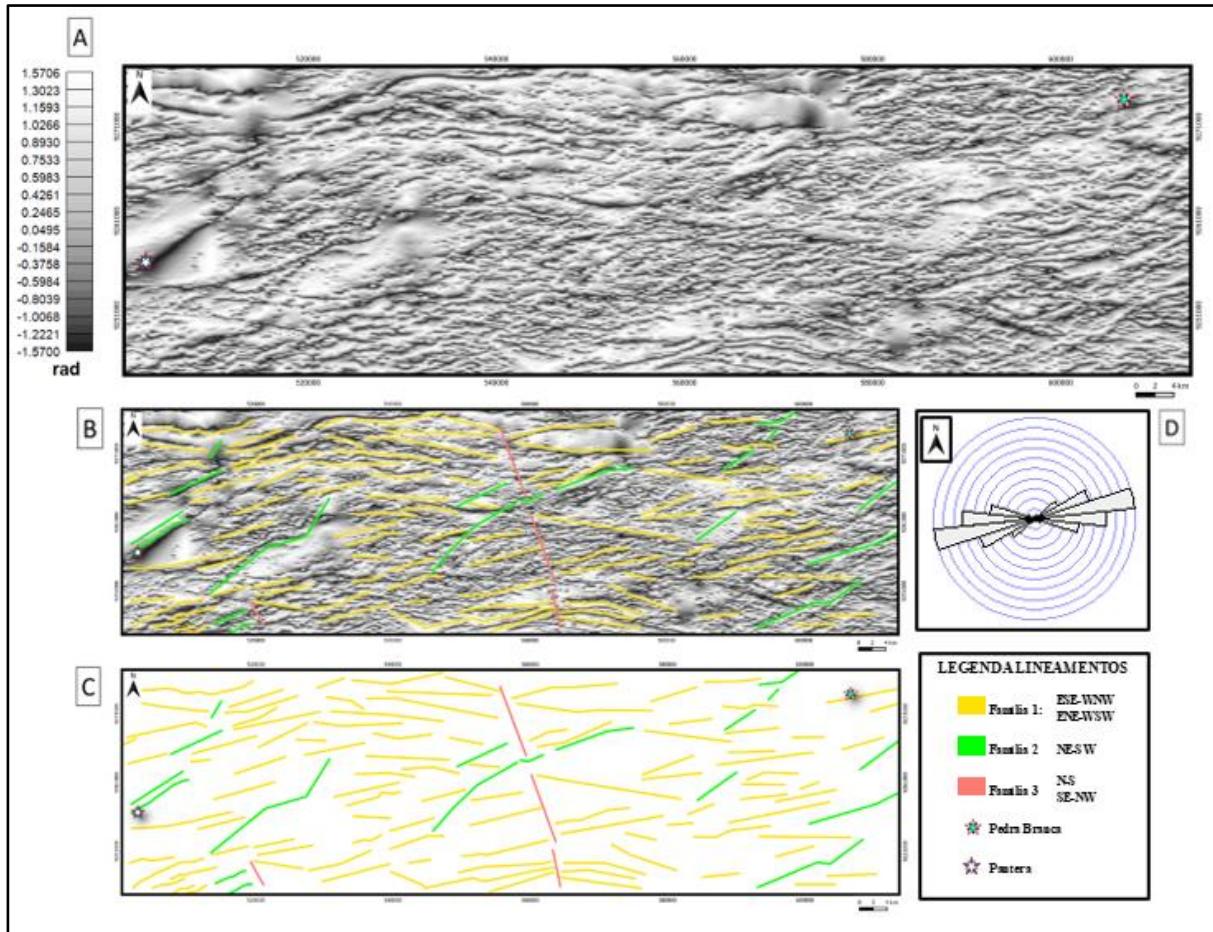


Figura 4.4 - A)Mapa de tilt derivative (TDR); B) de TDR com os lineamentos magnéticos traçados; C) das famílias de lineamentos magnéticos traçados e separados em 3 gerações e; D) a estatística de direção dos lineamentos a partir do diagrama de roseta da área de estudo.

Os mapas da Figura 4.5 correspondem a operação TDR aplicada ao campo magnético residual, com aplicação do filtro de continuação para cima de 500 metros. Dessa forma, foi possível observar um aumento na representatividade da Família 3 de lineamentos, a partir do diagrama de rosetas (Figura 4.5D). Apesar desse aumento na densidade de feições N-S/SE-NW, a frequência das estruturas ESE-WNW/ENE-WSW permanece estatisticamente predominante, enquanto os lineamentos NE-SW, praticamente não sofreram alteração em sua representatividade.

Analizando a localização dos depósitos em questão, vale notar que nas duas figuras (Figuras 4.4 e 4.5) o depósito Pantera, permanece na região onde a Família 2 de lineamentos é predominante. Já o depósito Pedra Branca apresenta-se na região onde predominam lineamentos ESE-WNW/ENE-WSW.

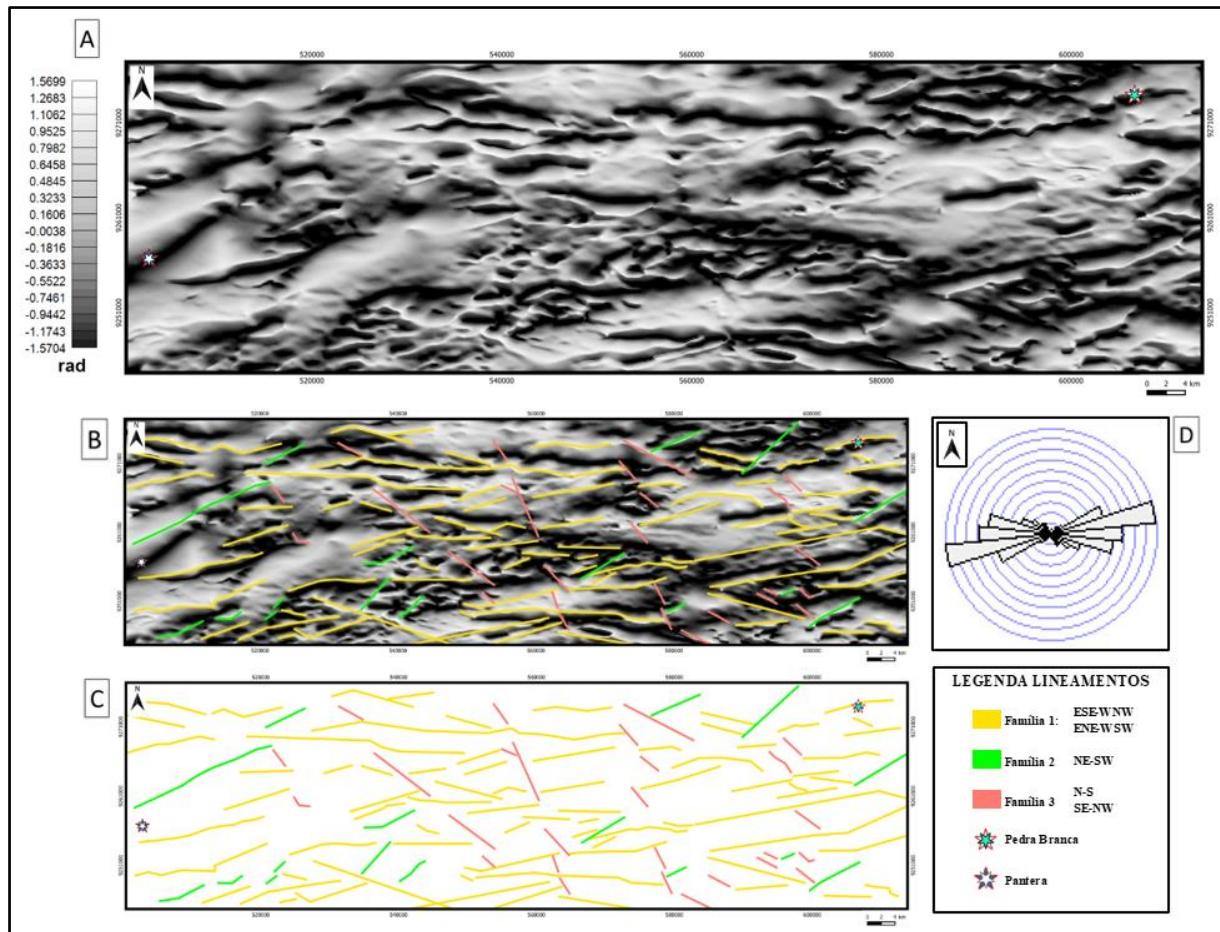


Figura 4.5 - Mapa de tilt derivative (TDR) da área de estudo com o filtro de continuação para acima de 500 metros A) Mapa da TDR; B) Mapa de TDR com os lineamentos magnéticos traçados; C) Mapa com famílias de lineamentos magnéticos traçados, separados em 3 gerações; D) Estatística de direção dos lineamentos a partir do diagrama de roseta.

4.2.3 Gradiente Vertical (Dz)

O mapa de Gradiente Vertical permitiu a classificação dos lineamentos magnéticos, destacando as mudanças abruptas, ou gradientes acentuados nas variações de intensidade magnética ao longo do vetor z. A Figura 4.6 representa a escala regional com a área de estudo marcada pelo polígono amarelo. Também foram traçados 155 lineamentos na área de estudo, resultando em estruturas com direção preferencial E-W, como observado no diagrama de roseta em anexo na Figura 4.7.

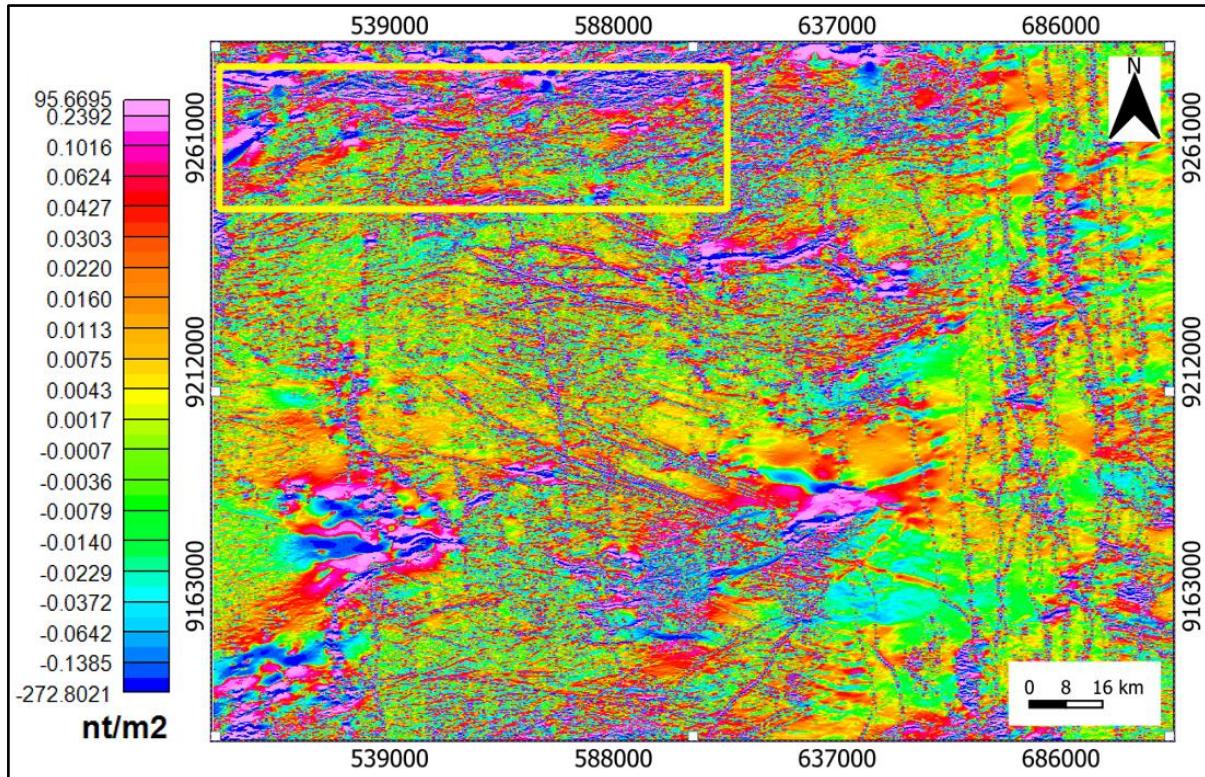


Figura 4.6 - Mapa do gradiente vertical (Dz) do campo magnético residual com destaque para o polígono amarelo delimitando a área de estudo.

Neste produto, dois domínios foram delimitados: domínio norte e domínio sul. O domínio norte, correlato à Zona de Cisalhamento Canaã dos Carajás, apresenta as mudanças mais acentuadas na taxa de variação vertical da intensidade do campo magnético residual, com feições levemente sinuosas e seguindo um *trend* E-W (Figura 4.7E).

No domínio sul, o padrão sinuoso das estruturas também é predominante, entretanto, menos evidente devido a menores variações de intensidade do campo magnético. Dessa forma, o mapa apresenta o predomínio de estruturas ESE-WNW/ENE-WSW, seguido pelos lineamentos indicados pela Família 2.

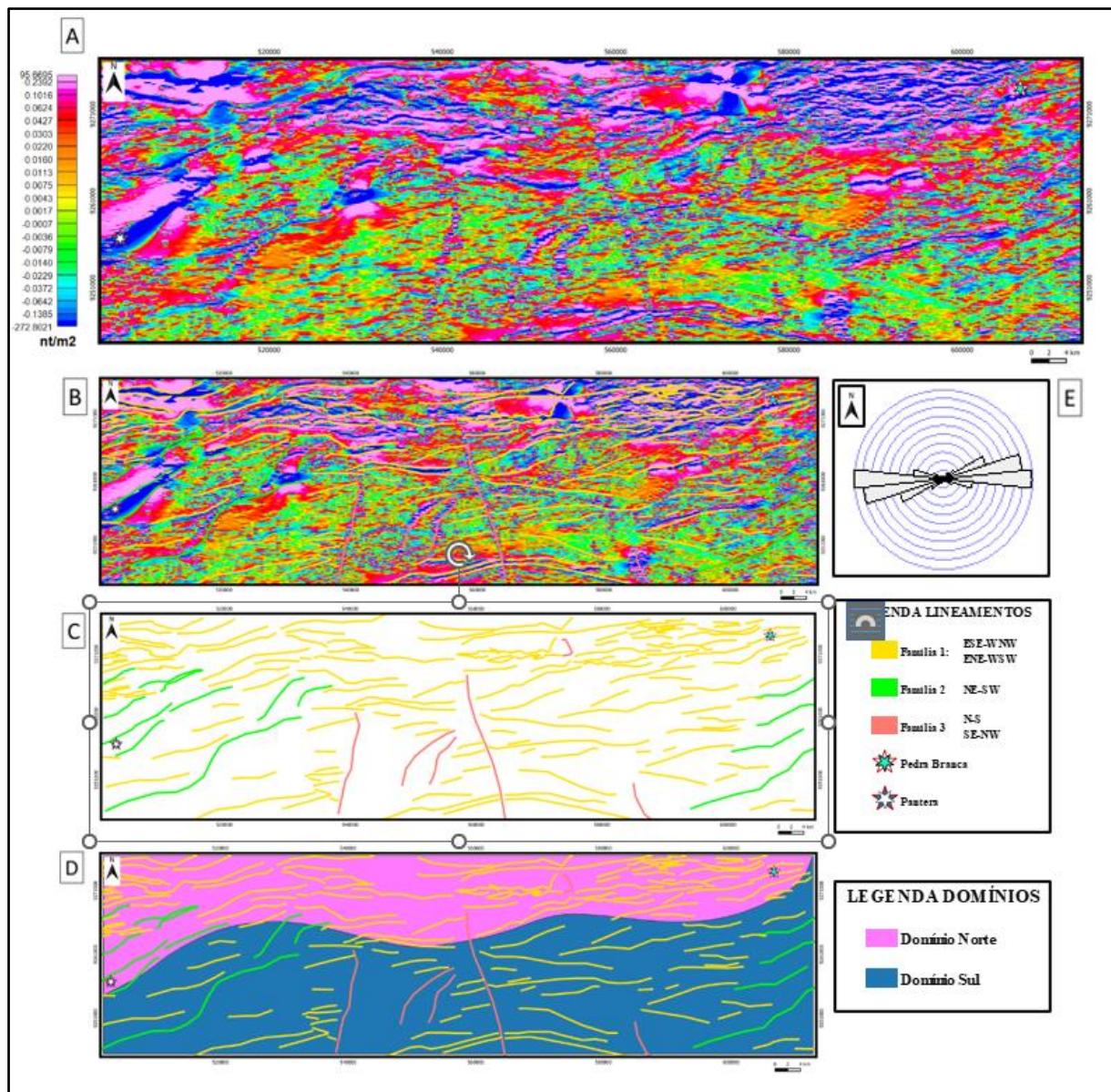


Figura 9 - Mapa do gradiente vertical (Dz^2) da área de estudo A) Mapa de Dz^2 ; B) Mapa de Dz^2 com os lineamentos magnéticos traçados; C) Mapa com famílias de lineamentos magnéticos traçados, separados em 3 gerações; D) Mapa com os dois domínios identificados; E) Estatística de direção dos lineamentos a partir do diagrama de roseta.

A partir do diagrama de roseta, as feições que apresentam direções preferenciais N-S/SE-NW, são estatisticamente, as menos representativas, apesar de possuírem grandes extensões. Com relação aos depósitos, é possível observar que os dois se encontram em zonas de mudanças acentuadas na taxa de variação vertical da intensidade do campo magnético.

4.3 GAMAESPECTROMETRIA

4.3.1 Mapa dos canais básicos de K, eTh, eU e Contagem Total (CT)

O mapa de CT (Figura 4.8) representa o somatório da concentração dos três radionuclídeos na área de estudo. Por outro lado, o mapa dos canais básicos, representa a concentração dos respectivos elementos na área de estudo e como sua distribuição se apresenta (Figura 4.9).

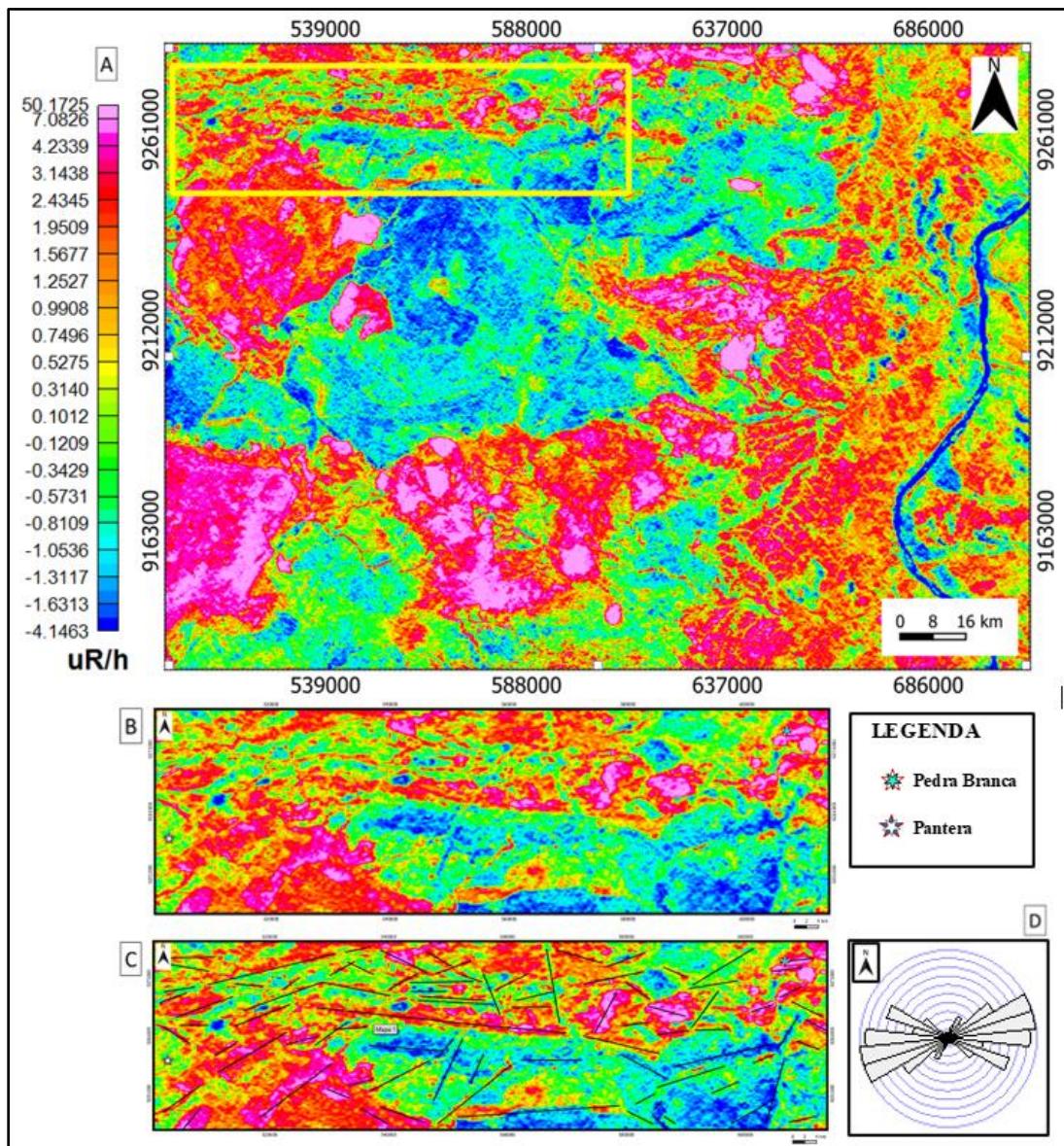


Figura 108 - A) Mapa gamaespectrométrico do canal contagem total (CT) regional, com destaque para polígono em amarelo representando a área de estudo; B) Canal de CT da área de estudo; C) Canal de CT, com lineamentos traçados; D) Estatística de direção dos lineamentos a partir do diagrama de roseta.

Considerando primeiramente os mapas de contagem total (Figura 4.8) para análise da distribuição dos elementos, fica evidente uma alta concentração dos três elementos na região norte. Ainda nessa região, as anomalias possuem direção preferencial seguindo um padrão ENE-WSW/NE-SW (Figura 4.8.D). Também é possível observar zonas com valores intermediários se alternando com as de alta concentração dos três radioelementos.

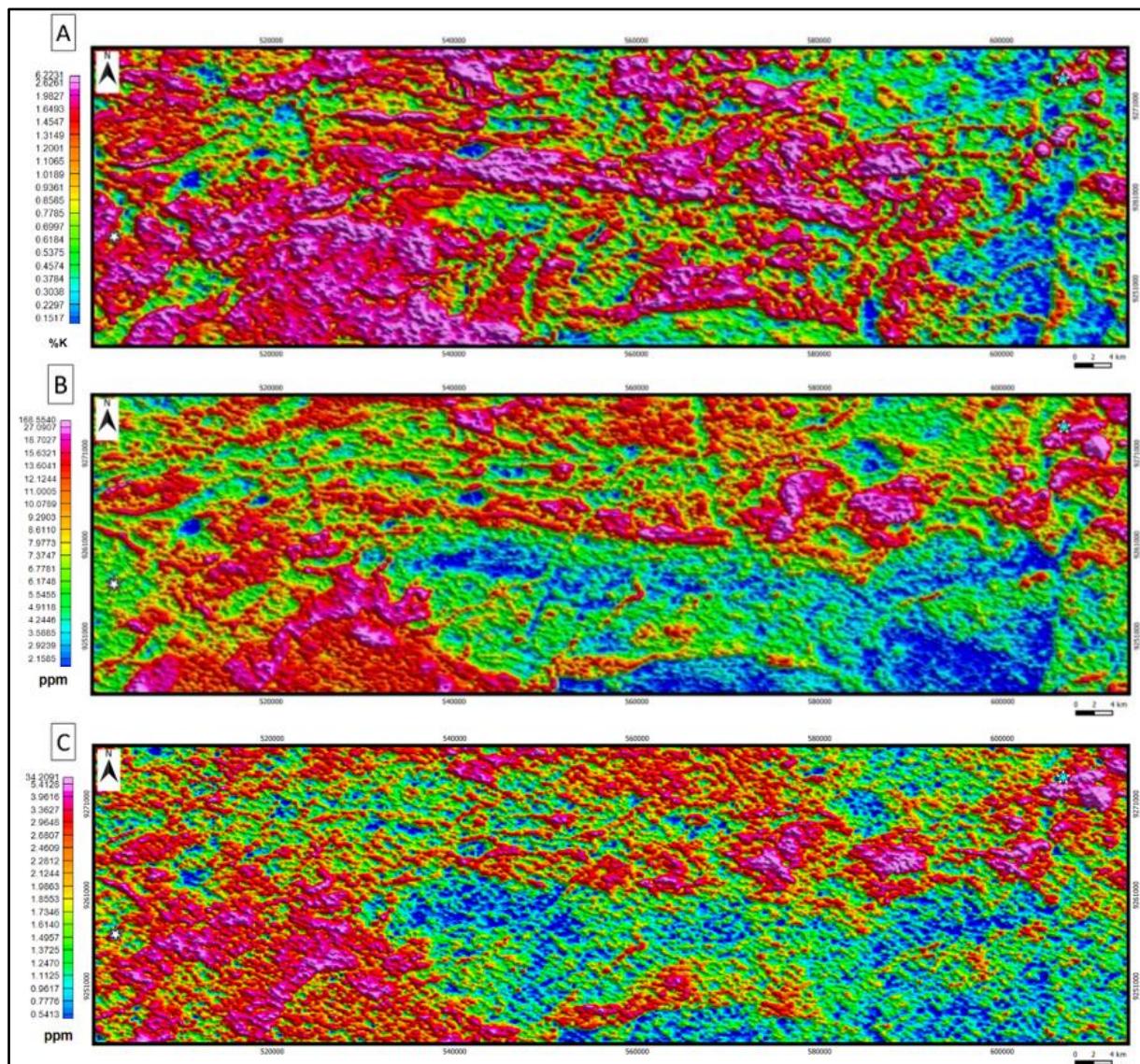


Figura 11 - A) Canal do K; **B)** Canal do eTh; **C)** Canal do eU.

O mapa do canal do potássio (Figura 4.9A) demonstra a alta mobilidade do elemento, evidenciada a partir de sua ampla distribuição na área de estudo. Em contrapartida, a distribuição dos elementos menos móveis, como o tório (Figura 4.9B) e o urâno (Figura 4.9C),

são semelhantes entre si e mais restritas que a do potássio. A região sudoeste do mapa também apresenta valores elevados para K, Th e U, enquanto a porção sudeste já é marcada por concentrações intermediárias a baixas dos radionuclídeos, representada pelas cores mais frias.

A partir dos mapas de contagem total (Figura 4.8), o depósito Pedra Branca está posicionado sob uma região representada por cores quentes, indicando alta concentração nos três radionuclídeos. O depósito Pantera, está localizado em região de valores intermediários para concentração nos três elementos.

4.3.2 Mapa da Razão K/Th

O mapa da Razão K/Th foi utilizado para evidenciar zonas com acúmulo anômalo de K utilizando como base a concentração de Th, realçando possíveis halos de alteração hidrotermal potássica

É possível perceber em várias porções da Figura 4.10, valores elevados de potássio diretamente ligados aos cursos d'água e aos vales do relevo. Entretanto, também são identificados valores anômalos para K não associados aos padrões dendríticos, sugerindo diferentes processos para a concentração desse elemento, que serão abordados posteriormente na discussão.

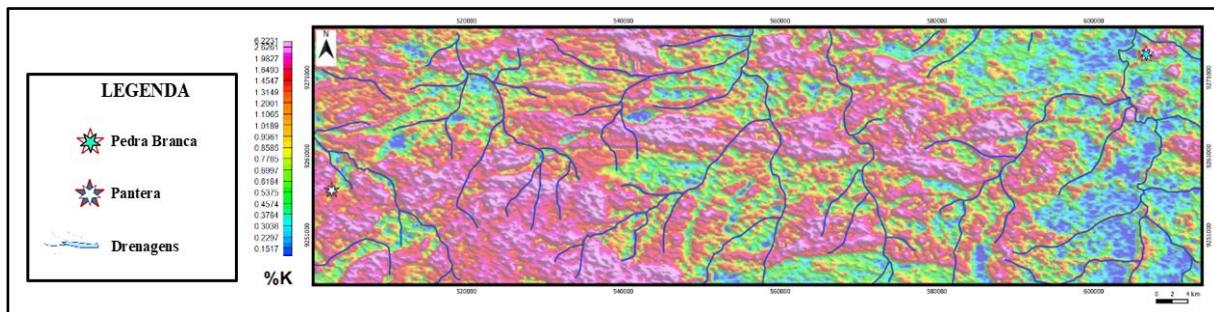


Figura 4.10 - Modelo Digital de Terreno (INPE) associado ao mapa do canal de K e cursos de água na região (Costa et al. 2016).

Os valores anômalos para razão K/Th, observados na Figura 4.11, mostram-se persistentes por quase toda a extensão da área de estudo. É possível observar certa alternância entre valores altos e intermediários, na porção ocidental do mapa. Além disso, a extremo leste

do polígono, estão representados os menores valores da razão K/Th, indicados pelo aparecimento das cores mais frias, seguindo um *trend* de direção N-S.

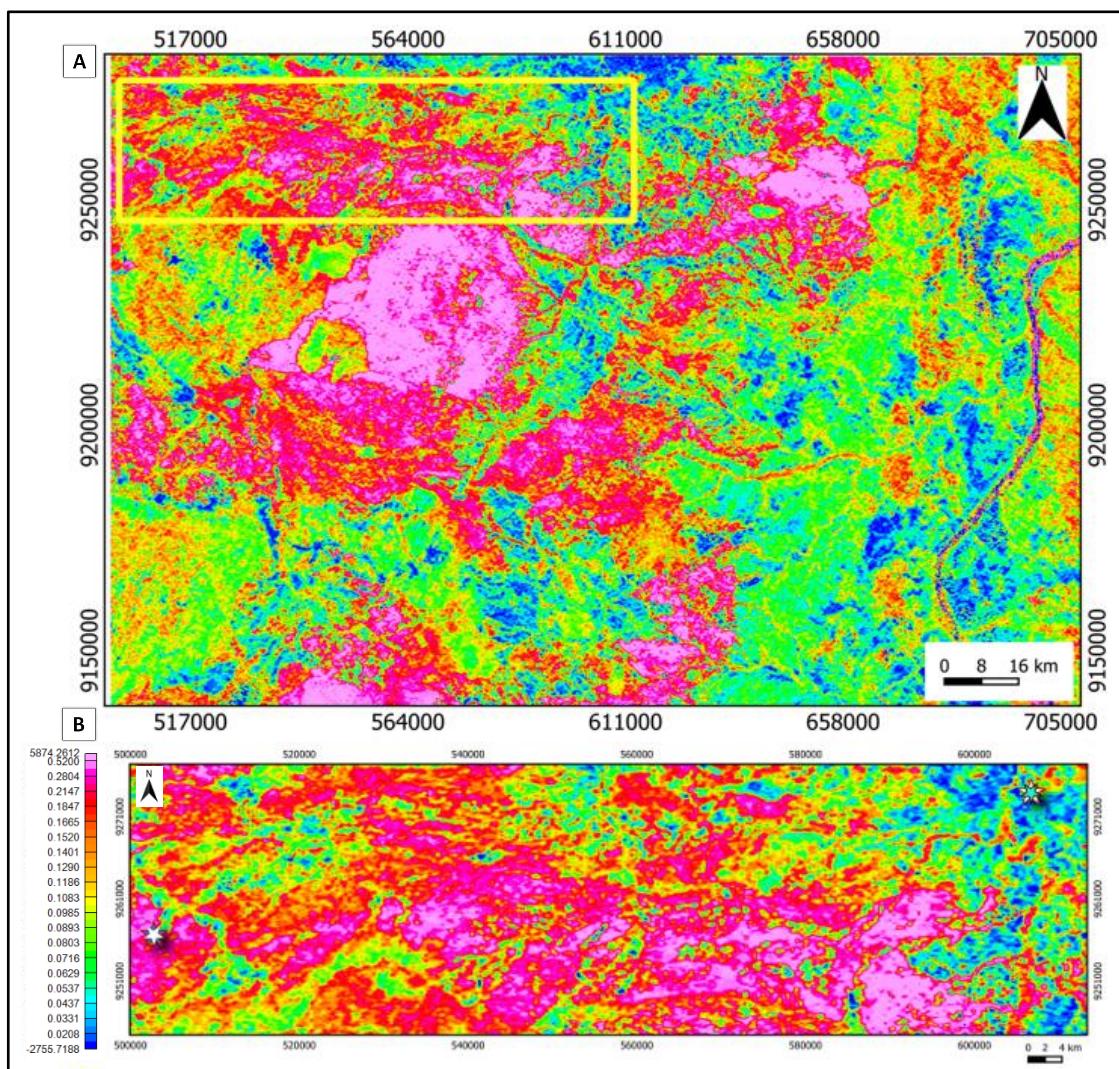


Figura 12 - Mapa gamaespectrométrico da razão K/Th; A) Regional, com destaque para o polígono em amarelo; B) Área de estudo.

No mapa de razão K/Th, os depósitos Pantera e Pedra Branca parecem se localizar em zonas bem distintas em termos de composição. Enquanto o depósito Pantera localiza-se em uma zona representada por cores quentes, indicando alto teor de potássio quando comparado às concentrações de Th, o depósito Pedra Branca encontra-se em uma região de baixa razão K/Th.

4.3.3 Mapa da Composição Ternária RGB e dos Domínios Gamaespetrométricos

O mapa da composição ternária RGB (Figura 4.12) foi gerado com o objetivo de evidenciar a distribuição dos três radionuclídeos na região de interesse. Dessa forma, foi possível traçar domínios gamaespectrométricos através da interpretação qualitativa das proporções de K, Th e U na superfície.

Os limites dos domínios gamaespectrométricos podem não corresponder aos limites das unidades litoestratigráficas, uma vez que diferentes unidades podem apresentar assinaturas de radioatividade semelhantes, assim como a mesma unidade pode apresentar variações compostacionais e faciológicas.

A partir das assinaturas gamaespectrométricas, foram identificados oito domínios que apresentam diferentes proporções de potássio, tório e urâno. Também foram identificados os possíveis halos de alteração hidrotermal.

O primeiro ponto que se destaca, é a presença de uma estrutura de cores claras, cortando a área de estudo na direção E-W. Representado pelo domínio 4, essa cor indica um maior enriquecimento nos três radionuclídeos, quando comparado às concentrações adjacentes. É possível identificar este domínio por quase todas as regiões do mapa, entretanto, ocorre principalmente na região central, norte e oeste, do mapa.

Outro detalhe importante, são os pontos na cor laranja que se encontram alinhados e se destacam em um domínio que apresenta a mesma proporção dos 3 elementos. Orientada na direção média WNW-ESE e associada ao domínio 4, essa assinatura é distinta dos demais granitoides da região.

O domínio 1 corresponde a fácies radiométrica de cor rosa, composta por alto K e médio Th e U. Esse domínio está presente na porção noroeste e central da área, geralmente em contato com o domínio 4. O domínio 2 é representado pela fácies vermelha e possui predominância do potássio com baixa concentração dos outros radionuclídeos. Esse domínio ocorre na porção central do mapa e se estende para região leste. O domínio 3 é composto por valores altos para potássio e urâno, mas baixo para tório, sendo representado pela fácies roxa. Vale notar que as estruturas desse domínio se encontram em uma direção aproximadamente NE-SW/N-S, restritas a porção norte do mapa.

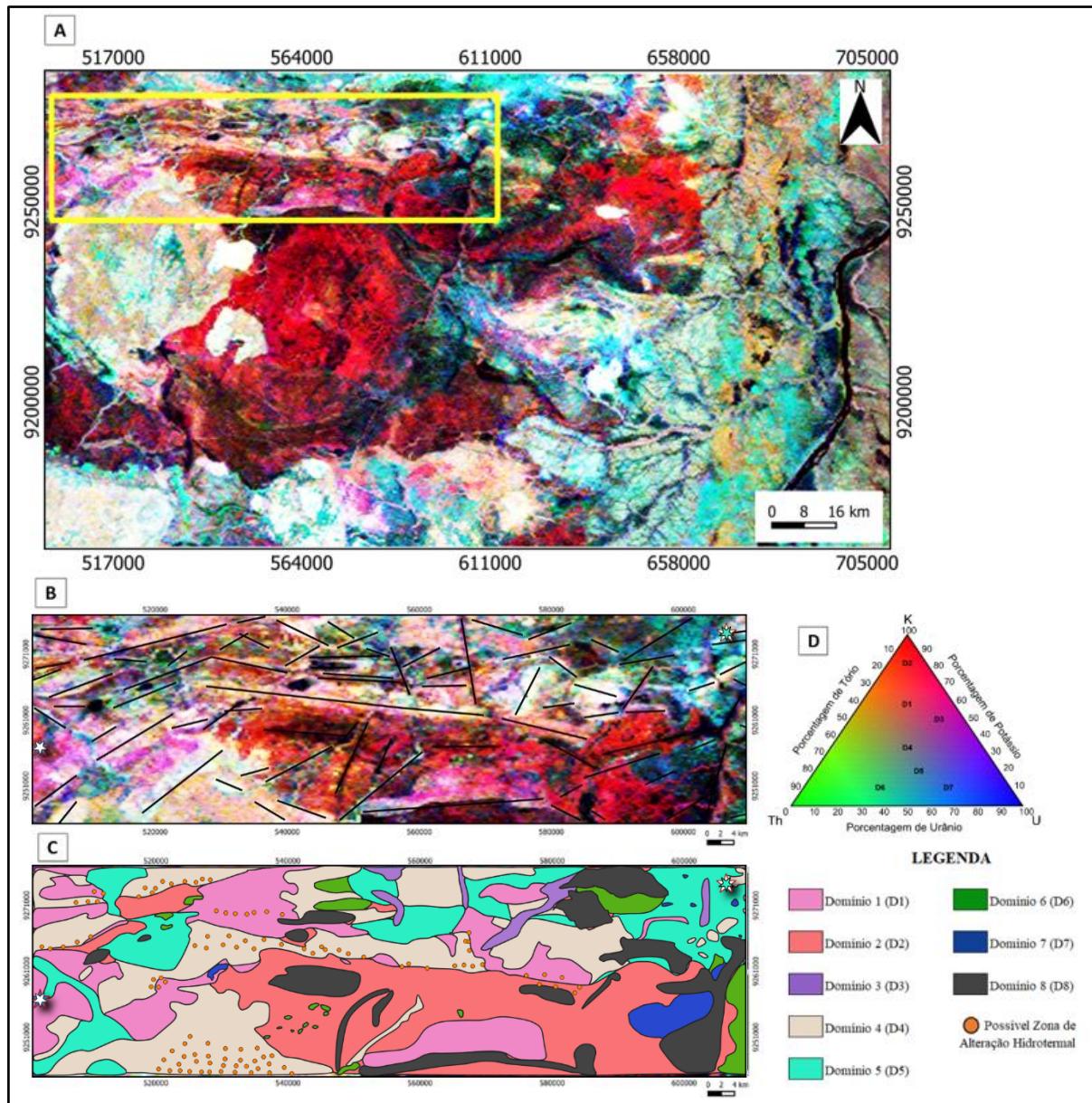


Figura 13 - A) Mapa regional da composição dos canais gamaespectrométricos em RGB com destaque para polígono em amarelo representando a área de estudo; B) Composição RGB da área de estudo; C) Domínios gamaespectrométricos definidos a partir da composição RGB; D) Diagrama ternário RGB.

O Domínio 5, representado pela cor azul claro, corresponde a áreas de baixo valor para potássio e valores médios para urâno e tório. Traçando um paralelo com os mapas de Th (Figura 4.9B) e U (Figura 4.9C), é possível observar que os dois elementos estão correlacionados, apresentando os valores de concentração mais altos, geralmente nos mesmos locais. O domínio possui maior representatividade na porção setentrional e ocidental do mapa.

Os domínios 6 e 7, por sua vez, estão distribuídos de forma bem pontual pelo mapa e representam as altas concentrações dos elementos tório e uranio respectivamente. O domínio 6, possui uma alta concentração de Th, média de U e baixa de K. O domínio 7, é composto por alto uranio, médio tório e novamente baixo potássio. O último domínio (8), caracterizado pela cor escura do mapa, representa um empobrecimento nos três radionuclídeos, quando comparado às concentrações adjacentes. Esse domínio está mais presente nas porções sul e leste do mapa.

4.4 MAPA DE CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOFÍSICA

O último produto deste trabalho, é um compilado dos domínios gamaespectrométricos, separados a partir da distribuição dos radionuclídeos, em associação com os lineamentos traçados a partir dos dados de magnetometria e da geologia local. Dessa forma, é possível perceber como algumas estruturas estão diretamente relacionadas aos domínios. As regiões de menor concentração nos três radioelementos (domínio 8), parecem estar associados a lineamentos extensos. No entanto, também é possível observar na porção central, estruturas extensas seguindo um *trend* aproximadamente E-W, que possuem assinatura distinta (domínio 4). Os lineamentos menos extensos por sua vez, ocorrem de forma bem persistente por todo o mapa, alternando entre as direções ENE-WSW e ESE/WNW.

Segundo o Diagrama de Roseta, a direção preferencial dos lineamentos traçados está entre ENE-WSW e E-W (Figura 4.13). Entretanto, também existem extensas estruturas N-S e NW-SE, que cortam esses lineamentos principais. Adicionalmente, é possível notar o mesmo padrão sinuoso nas estruturas traçadas, evidenciado nos outros produtos.

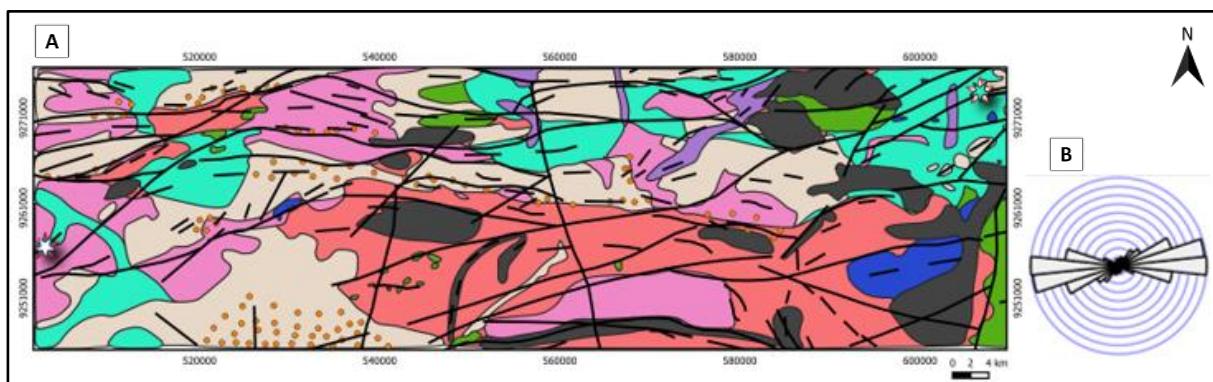


Figura 14 - A) Mapa dos domínios gamaespectrométricos associados aos lineamentos traçados a partir da interpretação dos dados de magnetometria e geologia; B) Diagrama de Roseta apresentando a direção preferencial dos lineamentos.

CAPÍTULO 5

DISCUSSÕES

5.1 PADRÃO ESTRUTURAL DA ÁREA DE ESTUDO

Diferentes autores discutem a complexa configuração estrutural da Província Carajás, atribuindo-a ao desenvolvimento das zonas de cisalhamento Canaã dos Carajás na porção sul e Cinzento ao norte (Silva *et al.* 2014). Conforme os resultados das análises geológicas-geofísicas obtidos neste trabalhos, as distintas direções dos lineamentos identificados podem sugerir que a formação das estruturas foi condicionada a diferentes eventos tectônicos.

Os mapas de magnetometria permitiram a individualização de famílias de estruturas e domínio estruturais. A partir da análise dos mapas, os lineamentos com direção média E-W (Família 1) foram identificados como direção predominante. Segundo Tavares (2015), a possível gênese desses lineamentos pode remeter ao mesoarqueano, no intervalo 2,87 e 2,83 Ga (Machado *et al.* 1991, Feio *et al.* 2013), a partir de processos colisionais e acrecionários entre o Domínio Rio Maria, com a margem ativa do paleocontinente ao qual o Domínio Carajás (DC) fazia parte, resultando em um considerável espessamento crustal. Segundo os autores, esses processos foram descritos como associados a um metamorfismo de alto grau e forte migmatização. Essa interpretação é reforçada por estudos recentes, que apontam que a colagem do Domínio Carajás com o Domínio Rio Maria ocorreu durante o Mesoarqueano e nucleou boa parte das estruturas da parte sul do Domínio Carajás (Delinardo da Silva *et al.* 2021).

No entanto, Pinheiro e Holdsworth (2000) sugerem que após esse evento colisional, houve reativações de estruturas pré-existentes do embasamento dúctil, durante o neoarqueano. Segundo os autores, uma fase inicial de transtruturação dextral teria causado o soerguimento de sequências crustais, seguido inversão e deformação, através de uma fase de transpressão sinistral. A progressiva alternância entre essas fases, teria gerado a zona de cisalhamento Canaã dos Carajás durante o neoarqueano. É provável que as estruturas da Família 1 sejam correlatas ao mesmo evento responsável pela formação da ZC Canaã dos Carajás e pelo principal controle estrutural da região.

Segundo Pinheiro (1997), os lineamentos NE-SW poderiam ter sido gerados entre o final do paleoproterozoico e início do mesoproterozoico, decorrente de um evento extensional. O plutonismo relacionado a esse episódio de extensão foi denominado por alguns autores como "pós-Transamazônico", "anorogênico", "tipo A", "intracratônico" e "intraplaca" (Isller *et al.* 1985, Dall'Agnol *et al.* 1986, Neves 1986). Adicionalmente, Moreto *et al.* (2015) descrevem um conjunto significativo de falhas sinistrais NE-SW, formadas em condições dúcteis-frágeis, como responsáveis pela forma sigmoidal em "S" da Bacia de Carajás.

Nesse contexto, esses movimentos extensionais que ocorreram durante o paleoproterozoico, poderiam ser correlacionados ao desenvolvimento de um conjunto de falhas e fraturas com direções NE-SW (Família 2), que afetam as rochas do embasamento às sequências supracrustais. Por outro lado, a Família 2 de lineamentos magnéticos, também pode ser resultante das estruturas subsidiadas pela Família 1.

Outro padrão observado, foram os lineamentos nas direções N-S (Família 3). São identificados na literatura diques de variadas composições (ex: Pimentel *et al.* 2003, Lopes 2018), todavia, o mapa de ASA (Figura 4.2) evidencia lineamentos de alta intensidade magnética que cortam a área de estudo na direção média N-S, sugerindo composição máfica. Diques maficos de idade neoproterozoica, são descritos por Paixão *et al.* (2008) como provenientes de um magmatismo correlato a abertura da bacia Araguaia, a partir da reativação da margem oriental do DC. Em adição, Tavares (2015) sugere uma segunda geração de diques maficos, na mesma direção, como reflexo da abertura do oceano Atlântico no mesozoico. Dessa forma, os lineamentos magnéticos identificados pela Família 3, podem estar associados a zonas de fraqueza, que permitiram a formação desses diques maficos durante eventos de caráter distensivo.

O mapa do Gradiente Vertical (Figura 4.7) também apresentou resultados relevantes, identificando que os prospectos Pedra Branca e Pantera estão localizados em zonas de mudanças abruptas na variação da intensidade magnética, sugerindo graus distintos de deformação entre os domínios norte e sul do mapa, onde o controle estrutural subsidiado pela ZC Canaã dos Carajás, parece apresentar maior influência. Associado ao mapa de ASA (Figura 4.2), essa variação também poderia sugerir fontes magnéticas próximas à superfície, uma vez que os depósitos estão localizados em zonas de alta intensidade magnética.

Através da análise do mapa de Dz, foi possível traçar domínios que tomaram como base o padrão das variações no vetor z, onde o domínio norte foi representado pelas mais expressivas

variações de intensidade magnética, enquanto o domínio sul não apresentou variações significantes. A transição do Domínio Carajás e Domínio Rio Maria tem sido motivo de intenso debate na última década (e.g. Dallagnol *et al.* 2013). Isso gera implicações diretas na evolução tectônica da área e no exato limite entre os dois blocos. Tendo em vista a complexa relação entre os domínios Carajás e Rio Maria e quais são os fatores que limitam cada um deles, é necessário fomentar os estudos na região visando responder, por exemplo, se o limite desses domínios magnéticos poderia também representar o limite tectônico entre os domínios.

Os mapas de magnetometria permitiram também, abrir discussões a respeito de qual geração das famílias de lineamentos magnéticos exerce maior controle estrutural, sobre os depósitos Pantera e Pedra Branca. A partir dos mapas de *tilt derivative* (Figuras 4.3, 4.4 e 4.5), o depósito Pedra Branca, está em uma região com predominância dos lineamentos da Família 1, enquanto o Pantera ocorre em região com lineamentos na direção preferencial da Família 2.

5.2 DIVERSIDADE LITOLÓGICA DA REGIÃO

A Zona de Cisalhamento Canaã compreende um domínio extremamente complexo do ponto de vista litológico. Ela contém rochas que vão desde o Mesoarqueano até o Paleoproterozoico, além diques mais jovens de idades ainda controversas (Costa *et al.* 2016). Essa complexidade é claramente vista nos dados de gamaespectrometria.

Os dados de gamaespectrometria e a análise geológica-geofísica permitiram a individualização de domínios radiométricos, que apresentaram maior ou menor relevância na interpretação dos dados de gamaespectrometria. O domínio 8, por exemplo, indicou as porções de baixa concentração dos radionucléos. Essas regiões foram compatíveis principalmente com as unidades máficas e com as rochas metavulcano-sedimentares do tipo greenstone belt (Costa *et al.* 2016). Com exceção do Diopsídio Norito Pium, localizado na porção nordeste da área de estudo e classificado por Ricci *et al.* (2006) como magmatismo máfico-ultramáfico de idade neoarqueana, é possível observar que a frequência das sequências metavulcano-sedimentares, aumentam à medida que nos aproximamos do contato com o Domínio Rio Maria (a sul), indicando uma possível zona de transição entre os domínios.

A partir da análise da imagem ternária em associação com o mapa geológico, alguns dos terrenos mais antigos de idade mesoarqueana, que compreendem o complexo basal como o Complexo Xingu e o Leucogranodiorito Canadá, são representados por cores bem

avermelhadas, demonstrando concentração anômala para K e baixos valores para Th e U (são representados pelo domínio 2). Entretanto, nas porções mais deformadas, esses terrenos mais antigos parecem apresentar cores menos avermelhadas, mas ainda com predominância de K (domínio 1). Há ainda terrenos mesoarqueanos associados às estruturas da ZC Canaã dos Carajás, como o Metagranodiorito Água Limpa, que possuem enriquecimento anômalo nos três radionuclídeos (domínio 4) com alto teor de K, sugerindo possível alteração hidrotermal potássica. No entanto, a diferenciação entre os granitoides mesoarqueanos através das imagens de gamaespectrometria é uma tarefa difícil.

Rochas neoarqueanas de composição félsica, como a Suite Intrusiva Planalto e o Metagranito Plaquê, também apresentaram enriquecimento anômalo para os três elementos, tornando difícil a diferenciação desses corpos neoarqueanos para os granitoides mesoarqueanos.

Os granitoides paleoproterozoicos, como o Granito Seringa, por sua vez, apresentam valores anômalos para os três elementos e se destacam como corpos brancos na imagem ternária.

5.3 IMPLICAÇÕES PROSPECTIVAS PARA DEPÓSITOS IOCG

A análise do produto da Razão K/Th indicou divergência entre as assinaturas radiométricas dos dois depósitos, onde o Pantera apresenta valores altos para K, enquanto o Pedra Branca apresenta baixos valores. Segundo o Lopes (2018), o depósito Pantera é hospedado predominantemente por um corpo intrusivo de composição granodiorítica, cuja mineralização está essencialmente associada ao estágio de alteração potássica. No caso do depósito Pedra Branca, é um granito possivelmente correlato a Suite Planalto (Mello Correa 2022) além de gnaisse e anfibolitos, que apresenta intensa alteração hidrotermal sódica. No contexto regional, o depósito faz contato com o Diopsídio Norito Pium, unidade máfica-ultramáfica (Costa *et al.* 2016).

Através da associação dos lineamentos com os domínios gamaespectrométricos, foi possível identificar algumas relações. De acordo com Dentith & Mudge (2014), zonas hidrotermalizadas costumam possuir concentrações substancialmente mais elevadas dos três radionuclídeos (K, Th e U), do que qualquer tipo de rocha hospedeira. Em adição, também sugerem que a intensa alteração hidrotermal geralmente está associada ao enriquecimento de

potássio pela remobilização do elemento, através de fluidos hidrotermais. Entretanto, o elemento potássio, tende a ser mais móvel e suscetível a processos de intemperismo, enquanto o tório e o uranio não costumam ser tão afetados.

Altos valores para K associados a feições dendríticas (Figura 4.11) podem indicar canais de drenagens, baixos topográficos, ou depósitos aluvionares por exemplo, onde o aporte sedimentar é maior. É necessário certa cautela na interpretação desses dados, uma vez que os valores anômalos para K também podem sugerir rochas graníticas ricas em potássio. Os domínios 1 e 2 foram utilizados para evidenciar esses dois cenários.

Segundo autores (Docegeo 1988, Machado *et al.* 1991, Ricci *et al.* 2006, Vasquez *et al.* 2008, Feio *et al.* 2013, Dall’Agnol *et al.* 2005, Delinardo da Silva 2014), o Domínio Carajás é caracterizado por uma expressiva granitogênese, sin-tectônica ao desenvolvimento das zonas de cisalhamento, durante o neoarqueano (aproximadamente 2,74 Ga). Corpos graníticos podem estar associados ao enriquecimento dos três radionuclídeos em mesma proporção, expressa pela fácie branca na imagem ternária (Figura 25.B). No entanto, a fácie branca (domínio 4) apresentou lineamentos alaranjados em algumas porções, distinguindo essa litologia das demais e abrindo espaço para discussão. Essas feições indicam enriquecimento anômalo no elemento potássio, não associadas às feições dendríticas descritas, sugerindo halos de alteração hidrotermal. Além disso, essas assinaturas também acompanham a zona de cisalhamento, estrutura que pode ter permitido a circulação dos fluidos hidrotermais.

Moreto *et al.* (2015) sugerem a partir de Pinheiro *et al.* (2013) que os depósitos IOCG do Cinturão Sul do Cobre, estão localizados ao longo das estruturas subsidiadas pela ZC Canaã dos Carajás. Dessa forma, comprehende-se que este seja um dos principais controles mineralizantes da região, que podem ter servido como condutos para os fluidos hidrotermais. Fluidos hidrotermais compostos principalmente por H₂O, CO₂ e NaCl, deram origem à maioria dos depósitos de minério da Terra (Kesler 2005). A interação desses fluidos superaquecidos com as rochas encaixantes, pode resultar na dissolução de uma ampla gama de elementos e minerais, podendo manifestar-se em forma de veios, disseminada, gerar estruturas alongadas ou lenticulares e preencher espaços na matriz de rochas brechadas (Hitzman 2000). Dessa forma, a associação das estruturas e das zonas de alteração hidrotermal tornam-se importantes fatores prospectivos, sendo imprescindível compreender a correlação entre esses fatores, a fim de otimizar uma campanha de prospecção.

Nesse contexto, foi gerado um Mapa de Prospectividade da área de estudo (Figura 5.1), sugerindo os possíveis alvos de prospecção levando em consideração:

- As possíveis estruturas canalizadoras de fluidos hidrotermais correlatas à ZC regional;
- Assinaturas anômalas nos três radionuclídeos; e
- Lineamentos alaranjados originados a partir de alteração potássica.

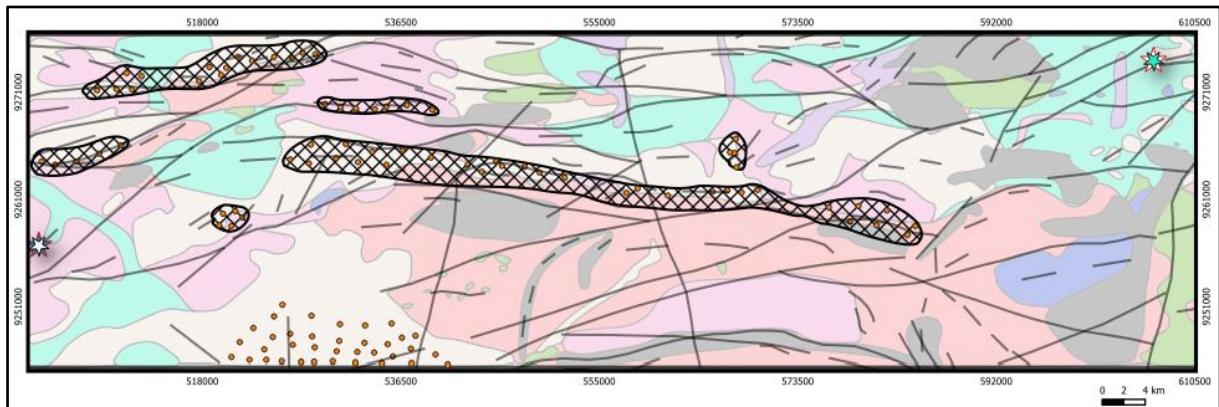


Figura 5.1 - Mapa de prospectividade a partir da interpretação estrutural associada aos domínios gamaespectrométricos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A partir da integração dos dados geológicos e geofísicos nesse estudo, foi possível abrir espaço para discussões acerca do controle estrutural dos depósitos Pantera e Pedra Branca e sua correlação com os domínios traçados, em função das assinaturas radiométricas.

A partir do levantamento geofísico desse estudo, foi possível traçar três famílias de lineamentos magnéticos que não haviam sido mapeadas anteriormente no Cinturão Sul do Cobre. Esses lineamentos foram gerados a partir de diferentes eventos deformacionais, hora formados a partir da amalgamação de terrenos arqueanos, hora formado por eventos magmatismos recentes. No entanto, a região possui forte controle estrutural subsidiado pelas estruturas da zona de cisalhamento regional Canaã dos Carajás, que parece estar correlacionada a todos os lineamentos de forma direta ou indireta.

Os domínios traçados a partir das variações magnéticas no mapa de gradiente vertical (DZ), se mostraram muito relevantes para a abertura de novos questionamentos no que concerne a região limítrofe entre o DC e o DRM. Os dois domínios traçados apresentaram características muito distintas, sugerindo relação direta com o limite tectônico entre os domínios Carajás e Rio Maria.

Os depósitos Pantera e Pedra Branca estão situados sob regiões de forte anomalia magnética, evidenciada pelo mapa de ASA, sugerindo afinidade metálica. Em adição, os dados analisados a partir do mapa da razão K/Th, demonstraram que o Pantera possui altos valores para K, sugerindo rocha hospedeira com forte alteração potássica. Além disso, foi possível observar a proximidade do depósito com redes de drenagem, o que pode ter influenciado no acúmulo do elemento. Por outro lado, o depósito Pedra Branca possui baixa razão K/Th, indicando baixa alteração potássica.

Foram caracterizados 8 domínios radiométricos através dos padrões na assinatura radioativa dos elementos K, Th e U. Apesar de refletirem bem a complexidade litológica da região, a individualização de corpos de distintas idades se mostrou uma tarefa complicada. Adicionalmente, muitas dessas assinaturas associadas aos lineamentos evidenciaram os halos de alteração hidrotermal que parecem seguir ao longo das estruturas da ZC Canaã de Carajás e sugerir as zonas de maior favorabilidade para hospedar depósitos IOCG.

O Mapa de Prospectividade gerado neste trabalho consolidou os dados obtidos a partir dos resultados e discussões e propôs as regiões com maior potencial econômico. Dessa forma, a análise integrada dos métodos magnetometria e gamaespectrometria, constituiu uma sistemática eficiente nos estudos metalogenéticos e prospectivos, no entanto, abre diversos questionamentos e frentes para

Lisboa, I. B. 2023, Caracterização geológica-geofísica do Cinturão Sul do Cobre, Província Carajás ...
novas investigações, tanto na compreensão da arquitetura tectono-estrutural dos domínios Carajás e Rio
Maria, quanto aos vetores prospectivos para depósitos de IOCG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Airo, Meri-Liisa (Ed.). Geophysical signatures of mineral deposit types in Finland. Geological survey of Finland, Special Paper 58, 9–70, 2015.
- Almeida J.A.C., Dall’Agnol R., Oliveira M.A., Macambira, M.J.B., Pimentel, M.M., Rämö, O.T., Guimaraes, F.V., Leite, A.A.S., 2011. Zircon geochronology and geochemistry of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of Carajás Province, Brazil. Precambrian Research, 120:235-257.
- Althoff, F.J., Barbey, P., e Boullier, A.M., 2000, 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral Province, Brazil). Precambrian Research, v. 104, p. 187-206.
- Araújo-Filho, R.C., Nogueira, A.C.R., Araújo, R.N. New stratigraphic proposal of a Paleoproterozoic siliciclastic succession: Implications for the evolution of the Carajás Basin, Amazonian craton, Brazil. Journal of South American Earth Sciences. Volume 102. 2020.
- Augusto R.A., Monteiro L.V.S., Xavier R., Souza Filho C.R. 2008. Zonas de alteração hidrotermal e paragênese do minério de cobre do Alvo Bacaba, Província Mineral de Carajás (PA). Rev. Bras. Geoci., 38:263 -277.
- Barbosa, O., Ramos, J.R. de A., Gomes, F. de A. & Helmbold, R. 1966. Geologia estratigráfica, estrutural e econômica da área do Projeto Araguaia. Monografia, DNPM/DGM. Rio de Janeiro 94 p.
- Barbuena, Danilo *et al.* Airborne geophysical data analysis applied to geological interpretation in the Alta Floresta Gold Province, MT. Brazilian Journal of Geophysics, v. 31, n. 1, p. 169-186, 2013.
- Barbuena, Danilo. Processamento e modelagem de dados geofísicos e imagens ASTER aplicados à interpretação geológica e prospecção mineral na Província Aurífera de Alta Floresta, MT. Dissertação de Mestrado apresentada ao instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas - SP, 2012.
- Blum M.L.B. 1999. Processamento e interpretacao de dados de geofisica aerea no Brasil Central e sua aplicacao a geologia regional e a prospeccao mineral. Tese de Doutorado n.30 - Instituto de Geociencias, Universidade de Brasilia, Brasilia, 229p.
- Brito Neves, BB, Cordani, UG, 1991. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. Precambrian Research, 53: 23-40.
- Cabral, A.R., Creaser, RA, Nagler, T, Lehmann, B, Voegelin, AR, Belyatsky, B, Pasava, J, Seabra Gomes Jr, AA, Galbiatti, H, Bottcher, ME, Escher, P, 2013. Trace-element and multi-isotope geochemistry of Late-Archean black shales in the Carajás iron-ore district, Brazil, Chemical Geology (2013), doi: 10.1016/j.chemgeo.2013.08.041
- Castro, L. G. D. 2015. Arcabouço geofísico estrutural da porção meridional do Cinturão Ribeira e regiões adjacentes. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Cuitiba PR. 153p.
- Cordani, U.G.; Tassinari, C.C.G.; Kawashita, K. 1984. A Serra dos Carajás como região limítrofe entre províncias tectônicas. Ciências da Terra, 9: 6-11
- CORDELL L. & GRAUNCH V.J.S. 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. In: Hinze WJ (ed.) The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomalies Maps. Society of Exploration Geophysicists, p.:181 197.
- Correa, Allana Mello. Evolução Paragenética e Caracterização dos Footprints dos Depósitos Pantera e Pedra Branca, Província Carajás, Cráton Amazônico. Projeto de Mestrado apresentado ao Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto – MG, 2022.
- Corriveau L., Montreuil, J.F., Potter, E.G. 2016. Alteration facies linkages among iron oxide copper-gold, iron oxide-apatite, and affiliated deposits in the Great Bear magmatic zone, Northwest Territories. Canada. Econ. Geol. 111:2045–2072.
- Costa, U.A.P; Paula, R.R; Silva, D.P.B; Barbosa, J.P.O; Silva, C.M.G; Tavares, F.M; Oliveira, J.K.M.; Justo, A.P. Programa Geologia do Brasil-PGB. Mapa de integração geológico-geofísica da ARIM Carajás. 1 mapa colorido, 90,0 x 210,0 cm. Estado do Pará. Belém: CPRM, 2016. Escala 1:250.000.

- Craveiro, G.S., Villas, R.N.N., Xavier, R.P., 2019, Mineral chemistry and geothermometry of alteration zones in the IOCG Cristalino deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: Journal of South American Earth Sciences, v. 92, p. 481-505.
- Dall'Agnol R, Teixeira N. P, Rämö O.T., Moura C.A.V., Macambira MJB, Oliveira D. C. 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic, rapakivi, A-type granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. *Lithos* 80:01–129.
- Dall'Agnol R., Oliveira D.C., Guimarães F.V., Gabriel E.O., Feio G.R.L., Lamarão C.N., Althoff F.J., Santos P.A., Teixeira M.F.B., Silva A.C., Rodrigues D.S., Santos M.J. P., Silva C.R.P., Santos R. D., Santos P. J. L. 2013. Geologia do subdomínio de transição do Domínio Carajás - implicações para a evolução arqueana da Província Carajás - Pará. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 13, Belém, p. 1082–1085.
- Dall'Agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M. 2006. Archean and paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian craton. In: Symposium on magmatism, crustal evolution and metallogenesis of the Amazoniam Craton, Belém, Excursion Guide, p.: 99-150
- Dardenne M.A., Schobbenhaus C.S. (Eds.) 2001. Metalogênese do Brasil. Editora Universidade de Brasília/CNPq, Brasília 392 pp.
- Delinardo da Silva, M.A. 2014. Metatexitos e diatexitos do Complexo Xingú na região de Canaã dos Carajás: Implicações para a evolução mesoarqueana do Domínio Carajás: Unpublished M.Sc. thesis, Campinas, Brazil, Universidade de Campinas, 102 p.
- Dentith, M., Mudge, S. 2014. Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist. Cambridge University Press, 2014.
- Dickson B.L. & Scott K.M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. In: Airborne Magnetic and Radiometric Surveys, AGSO. *Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2):187–200.
- DOCEGEO, 1988, Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás- Litoestratigrafia e principais depósitos minerais: Congresso Brasileiro de Geologia, 35th, Brazil, November 6–13, 1988, Proceedings, p. 11–54.
- Faraco, M.T.L., Marinho, P.A.C., Vale, A.G., Costa, E.J.S., Maia, R.G.N., Ferreira, A.L., Valente, C.R., Lacerda Filho, J.V., Moreton, L.C., Camargo, M.A., Vasconcelos, A.M., Oliveira, M., Oliveira, I.W.B., Abreu Filho, W.A., Gomes, I.P., 2004. Folha SB.22-Araguaia. In: Schobbenhaus, C., Gonçalves, J.H., Santos, J.O.S., Abram, M.B., Leão Neto, R., Matos, G.M.M., Vidotti, R.M., Ramos, M.A.B., Jesus, J.D.A. (Eds.), Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. CD ROM.
- Faria R.N. & Lima L.F.C.P. 2005. Introdução ao magnetismo dos materiais. São Paulo: Ed. Livraria da Física. 197p.
- Feio, G.R.L., Dall'Agnol, R., Dantas, E.L., Macambira, M.J.B., Santos, J.O.S., Althoff F.J., and Soares, J.E.B., 2013, Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: Implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil: *Precambrian Research*, v. 227, p. 157–185.
- Fornazzari Neto L. & Ferreira F.J.F. 2003. Gamaespectrometria integrada a dados exploratórios multifonte em ambiente SIG aplicada à prospecção de ouro na Folha Botuverá, SC. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(2): 197-208.
- Garcia, Victor Botelho Perez. A raiz do Sistema IOCG de Carajás: alterações hidrotermais e mineralização niquelífera neoarqueana no depósito GT-34. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília – DF, 2018
- Gomes A. C. B., Dall'agnol R. 2007. Nova associação tonalítica-trondhjemítica neoarqueana na região de Canaã dos Carajás: TTGS com altos conteúdos de Ti, Zr e Y. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(1): 182-193. DOI: 10.25249/0375-7536.2007371182193
- Grasty R. L., Glynn J. E., Grant J. A. 1985. The analysis of multichannel airborne gamma-ray spectra. *Geophysics*, 50: 2611-2620.

Lisboa, I. B. 2023, Caracterização geológica-geofísica do Cinturão Sul do Cobre, Província Carajás ...

Groves DI, Bierlein FP, Meinert LD, Hitzman MW (2010) Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Econ Geol* 105:641–654

Gunn S. 1998. Support Vector Machines for Classification and Regression. Technical Report MP-TR-98-05, Image Speech and Intelligent Systems Group, University of Southampton, Southampton, 52p.

Hitzman M.W. 2000. Iron oxide-Cu-Au deposits: what, where, when, and why. In: Porter T.M. (ed.) Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: a global perspective. *Austral. Miner. Fund*, Adelaide, 9–25.

Hitzman M.W., Oreskes N., Einaudi M. 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron-oxide (Cu, U, Au, REE) deposits. *Precambrian Research*, 58:241–287.

Holdsworth, R., and Pinheiro, R., 2000, The anatomy of shallow-crustal transpressional structures: Insights from the Archean Carajás fault zone, Amazon, Brazil: *Journal of Structural Geology*, 22:1105–1123.

Hoover D.B. & Pierce H.A. 1990. Annotated Bibliography of Gamma-Ray Methods Applied to Gold Exploration. USGS Open-File Report, p.90-203.

Hunger, R. B., Melo, G. H. C., Xavier, R. P., Moreto, C. P. N., Talavera, C., Su, Zhi-Kun., Zhao, Xin-Fu. 2021. The Santa Lúcia Cu-Au deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: a Neoarchean (2.68 Ga) member of the granite-related copper-gold systems of Carajás. *Mineralium Deposita*. 1521-1542.

Juliani C., Monteiro L.V.S., Fernandes C.M.D. 2016. Potencial mineral: Cobre. In: Melfi A.J., Misi A., Campos D.A., Cordani U.G. (eds.) *Potencial Mineral do Brasil*, Capítulo 1. Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios. 1ed. Rio de Janeiro, Academia Brasileira de Ciências, p. 134-154.

Kearey P., Brooks M., Hill I. 2009. *Geofísica de exploração*. Tradução: Coelho M.C.M. Oficina de Textos, São Paulo, 438 p.

Leão-Santos, M. et al. Hydrothermal Alteration Zones' Magnetic Susceptibility Footprints and 3D Model of Iron Oxide-Copper-Gold (IOCG) Mineralization, Carajás Mineral Province, Brazil. *Minerals* 2022, 12, 1581.

Leão-Santos, Marcelo; LI, Yaoguo; MORAES, Roberto. Application of 3D magnetic amplitude inversion to iron oxide-copper-gold deposits at low magnetic latitudes: A case study from Carajás Mineral Province, Brazil. *Geophysics*, v. 80, n. 2, p. B13-B22, 2015.

Lindenmayer Z.G. 2003. Depósito de Cu–Au do Salobo, Serra dos Carajás: Uma revisão. In: Ronchi L.H., Althoff F.J. (eds.). *Caracterização e modelamento de depósitos minerais*. São Leopoldo, EditoraUnisinos, p. 69 -98.

Lopes, A.M. 2018, Caracterização geológica e metalogenética do depósito IOCG Pantera, domínio Rio Maria, Carajás-PA: Unpublished Masters Dissertation, University of Campinas, 93 p.

Macambira E.M.B., Vasquez M.L., Ricci, P.S.F. 2007a. Caracterização do domínio tectônico Santana do Araguaia – sudeste do Pará. In: SBG, Simp. Geol. Amaz., 10, Resumos Expandidos, CD-ROM.

Macambira M.J.B., Pinheiro R.V.L., Armstrong R.A. 2007b. A fronteira Arqueano-Paleoproterozoico no SE do Cráton Amazônico; abrupta no tempo, suave na tectônica? In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 10, Anais, p. 105-108.

Macambira, MJB, Vasquez, ML, Silva, DCC, Galarza, MA, Barros, CEM, Camelo, JF, 2009. Crustal growth of the central-eastern Paleoproterozoic domain, SW Amazonian craton: Juvenile accretion vs. reworking. *Journal of South American Earth Sciences* 27:235–246.

Magalhães, Lucíola Alves; DE SOUZA FILHO, Carlos Roberto; SILVA, Adalene Moreira. Caracterização geológica-geofísica da porção central do Amapá com base em processamento e interpretação de dados aerogeofísicos. *Brazilian Journal of Geology*, v. 37, n. 3, p. 464-477, 2007.

Melo GHC, Monteiro LVS, Xavier RP, Moreto CPN, Santiago ESB, Dufrane A, Aires B, Santos AFF (2016) Temporal evolution of the giant Salobo IOCG deposit, Carajás Province (Brazil): constraints from paragenesis of hydrothermal alteration and U-Pb geochronology. *Miner Deposita* 52:709-732.

Melo, Aline Tavares; LI, Yaoguo; HITZMAN, Murray. Is there hidden potential in Carajás? Insights through the geophysical signature of Cristalino deposit. *Ore Geology Reviews*, v. 126, p. 103735, 2020.

- Melo, G.H.C., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Moreto, C.P.N., and Santiago, E., 2019b, Tracing Fluid Sources for the Salobo and Igarapé Bahia Deposits: Implications for the Genesis of the Iron Oxide Copper-Gold Deposits in the Carajás Province, Brazil: Economic Geology, 114: 697–718.
- Melo, Gustavo Henrique Coelho *et al.* Paragenesis and evolution of the hydrothermal Bacuri iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Province (PA). Brazilian Journal of Geology, v. 44, n. 1, p. 73-90, 2014.
- Miller, Hugh G.; SINGH, Vijay. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. Journal of applied Geophysics, v. 32, n. 2-3, p. 213-217, 1994.
- Mizuno, T. A. 2009. Alteração hidrotermal e paragênese de minério do depósito de óxido de Fe-Cu-Au (IOCG) Pedra Branca, Província Mineral de Carajás. (Graduação em Ciências da Terra) - Universidade Estadual de Campinas.
- Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Hitzman M.W., Carvalho E.R., Johnson C.A., Souza Filho C.R., Torresi I. 2008. Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide copper gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints. Mineralium Deposita, 43: 129-159.
- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Souza Filho, C.R., Moreto, C.P.N., 2014. Metalogenia da Província Carajás. In: —Metalogenia das Províncias Tectônicas Brasileirasl. Serviço geológico do Brasil- CPRM. 1 ed, 50p.
- Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Creaser R.A., Dufrane S. A., Melo G.H.C., Delinardo da Silva M.A., Tassinari C.C.G., Sato K. 2015b. Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide–copper–gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás Province, Brazil. Mineralium Deposita. Online first: DOI 10.1007/s00126-014-0549-9
- Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Creaser R.A., Dufrane, S.A., Tassinari, C.C.G., Sato, K. Kemp, A.I.S., Amaral, W.S., 2015a. Neoarchean and Paleoproterozoic Iron Oxide-Copper-Gold Events at the Sossego Deposit, Carajás Province, Brazil: Re-Os and U-Pb Geochronological Evidence. Economic Geology, 110:809-835.
- Moreto, CPN, Monteiro, LVS, Xavier, RP, Creaser, RA, Dufrane, A, Melo, GHC, Delinardo Silva, MA, Tassinari, CCG, Sato, K, 2014. Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide copper gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás Province, Brazil. Mineralium Deposita, X, p. 1.
- Nabighian M.N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. Geophysics, 37(3): 507-517.
- Nogueira A.C.R., Truckenbrodt, W., Pinheiro, R.V.L. 1995. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescricao e redefinição litoestratigráfica. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, 7:177-277.
- Nogueira, Pedro Vencovsky *et al.* Study of iron deposit using seismic refraction and resistivity in Carajás Mineral Province, Brazil. Journal of Applied Geophysics, v. 133, p. 116-122, 2016.
- Oliveira M.A., Dall’Agnol R., Althoff F.J., Leite A.A.S., 2009. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. Journal of South America Earth Science, 27:146-160.
- Oliveira, D.C., Santos, P.J.L., Gabriel, E.O., Rodrigues, D.S., Faresin, A.C., Silva, M.L.T., Sousa, S.D., Santos, R.V., Silva, A.C., Souza, M.C., Santos, R.D., and Macambira, M.J.B., 2010, Aspectos geológicos e geocronológicos das rochas magmáticas e metamórficas da região entre os municípios de Água Azul do Norte e Canaã dos Carajás – Província Mineral de Carajás, In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 45, CDrom (in Portuguese).
- Ostrovsky, E.A. 1975. Antagonism of radioactive elements in wallrock alteration fields and its use in aerogamma spectrometric prospecting. International Geology Review, 17: 461-468.
- Paixão M.A.P., Nilson A.A., Dantas E.L. 2008. The Neoproterozoic Quatipuru ophiolite and the Araguaia fold belt, central-northern Brazil, compared with correlatives in NW Africa. Geological Society, London, Special Publications, 294:297-318.
- Pestilho, A. L. S. *et al.* Stable isotopes and fluid inclusion constraints on the fluid evolution in the Bacaba and Castanha iron oxide-copper-gold deposits, Carajás Mineral province, Brazil. Ore Geology Reviews, v. 126, p. 103738, nov. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169136819303865>>.

Lisboa, I. B. 2023, Caracterização geológica-geofísica do Cinturão Sul do Cobre, Província Carajás ...

Pidgeon R.T., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 2000. Th–U–Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. *Chem. Geol.*, 166:159–171

Pires, Augusto César Bittencourt. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Brazilian Journal of Geology*, v. 25, n. 1, p. 61–68, 1995.

Ribeiro, Brener Otávio L. Modelagem prospectiva dos depósitos auríferos do Greenstone Belt Pitangui (MG): integrando dados Geológicos, Geofísicos e Geoquímicos. Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Diamantina – MG, 2018.

Ribeiro, Brener Otávio L. PALES, Izabella Gontijo. Mapeamento geológico em escala 1:10.000 da região de Penha de França, Itamarandiba-MG. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Diamantina -MG, 2020.

Ribeiro, Brener. Processamento de dados aerogamaespectrométricos e aeromagnetométricos aplicados ao mapeamento geológico na região do Alto Vale do Jequitinhonha, Minas Gerais. Projeto de Pesquisa de Iniciação Científica do Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Diamantina, 2020.

Ribeiro, Vanessa B. Tectonic insights of the southwest Amazon Craton from geophysical, geochemical and mineralogical data of Figueira Branca mafic-ultramafic suite, Brazil *Tectonophysics* 708 (2017) 96–107.

Ricci, PSF, Costa, EJS, Oliveira, JR, 2003. The reanalysed Carajás Block is interposed between the Bacajá (the crustal reworking —lost link now being predicted) and Rio Maria Archean terranes – Guaporé Craton. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 8., 2003, Manaus. Anais... Manaus: SBG, 2003. CD-ROM.

Rudnick RL & Gao S. 2004. Composition of the continental crust. In: Holland H.D. & Turekian K.K. (Eds.): *Treatise on geochemistry*. Oxford: Elsevier Pergamon, 3: 1-64.

Santos M.S; Oliveira D. C., 2016. Rio Maria granodiorite and associated rocks of Ourilândia do Norte e Carajás province: Petrography, geochemistry and implications for sanukitoid petrogenesis. *Journal of South American Earth Sciences*.

Santos, J.O.S., 2003, Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central, in Bizzi, L.A., ed, *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília, CPRM, 169-226.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). Informe de Geofísica aplicada nº 2. Levantamento aerogravimétrico Carajás: contribuição à geotectônica e metalogenia da porção Leste do Cráton Amazônico. Recife, 2020.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras Belo Horizonte, 2014.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). Projeto Aerogeofísico Rio Maria. Relatório Final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Volume I, 2015.

Siepierski L. 2008. Geologia e petrologia do Prospecto GT-34: evidência de metassomatismo de alta temperatura e baixa fO₂, Província Mineral Carajás, Brasil. Dissertação de Mestrado, UnB.

Sillitoe, Richard H. Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 787-812, 2003.

Silva, André Froede. Análise Geofísica do Potencial Pegmatítico na Região de Ataléia (MG), Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto – MG, 2017

Silva, Arthur Santos da *et al.* Modelamento Geoquímico da suíte Pedra Branca: uma associação tonalítica-trondhjemítica com alto Zr, Ti EY, Província Carajás. 16º Simpósio de Geologia da Amazônia. Manaus - AM, 2019.

Silva, Arthur Santos da. Petrogênese da Suíte Pedra Branca: uma associação tonalito-trondhjemítica com alto Zr, Ti E Y, Província Carajás. Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado à Faculdade de Geologia da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa). Marabá-PA, 2018.

Silva, GG, Lima, JJC, Andrade, ARF, Issler, RS, Guimarães, G, 1974. Geologia da Folha SC.22 – Tocantins. DNPM, Rio de Janeiro, 143p.

- Tallarico F.H.B., Figueiredo, B.R., Groves, D.I., Kositcin, N., McNaughton, N.J., Fletcher I.R., and Rego J.L. 2005. Geology and SHRIMP U-Pb geochronology of the Igarapé Bahia deposit, Carajás copper-gold belt, Brazil: An Archean (2.57 Ga) example of iron-oxide Cu-Au-(U-REE) mineralization. *Economic Geology*, 100:7-28.
- Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, 22:174-182.
- Tassinari, C. C. G. *et al.* A Serra dos Carajás como região limítrofe entre províncias tectônicas. *Ciências da Terra*, N. 9, 1984
- Tassinari, C.C.G., Macambira, M.J.B., 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito Neves, B.B. (Eds.), *Geologia do Continente Sul-American: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, pp. 471–485.
- Tavares, F.M., Trouw, R.A.J., Da Silvia, C.M.G, Justo, A.P., Oliveira, J.K.M., 2018, The multistage tectonic evolution of the northeastern Carajás Province, Amazonian Craton, Brazil: Revealing complex structural patterns: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 88, p. 238-252.
- Teixeira W, Tassinari CCG, Cordani UG, Kawashita K (1989) A review of the geochronology of the Amazonian Craton: tectonic implications. *Precamrian Res* 42: 213–227
- Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. 1990. *Applied geophysics*. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 770 p.
- Trendall, A.F., Basei, M.A.S., De Laeter, J.R., and Nelson, D.R., 1998. SHRIMP zircon U-Pb constraints on the age of the Carajás Formation, Grão Para Group, Amazon craton. *Journal of South American Earth Sciences*, 11:265–277.
- Ulbrich H.H.G., Ulbrich M.N.C, Ferreira F.J.F., Alves L.S., Guimarães G.B., Fruchting A. 2009. Levantamentos Gamaespectrométricos em Granitos Diferenciados I: Revisão da Metodologia e do Comportamento Geoquímico dos Elementos K, Th e U. *Revista do Instituto de Geociências - USP*, 9(1): 33-53.
- Vasquez, Marcelo Lacerda; ROSA-COSTA, Lúcia Travassos da. (Orgs.) Texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará escala 1:1.000.000. Sistema de Informações Geográficas (SIG). Belém - PA, 2008.
- Villas, R.N., e Santos, M.D., 2001, Gold deposits of the Carajás Mineral Province: deposit types and metallogenesis. *Mineralium Deposita*, 36:300–331
- Williams P.J., Barton M.B., Johnson D.A., Fontboté L., Haller A., Mark G., Oliver N.H., Marschik R., 2005, Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible models of origin: *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume, p. 371-405.
- Xavier R.P., Monteiro L.V.S., Moreto C., Pestilho A.L.S, Melo G.H.C., Delinardo da Silva M.A., Aires B., Ribeiro C., Silva F.H.F. 2012. The Iron Oxide Copper-Gold Systems of the Carajás Mineral Province, Brazil. In: Hedenquist J.W., Harris M., Camus F. (eds.). *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: a tribute to Richard Sillitoe*. Special Publication of the Society of Economic Geologists, 16: 433 - 453.
- Xavier, Roberto P. *et al.* Geology and metallogeny of Neoarchean and Paleoproterozoic copper systems of the Carajás Domain, Amazonian Craton, Brazil. In: *Mineral Resources to Discover-14th SGA Biennial Meeting*. 2017.