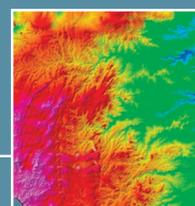
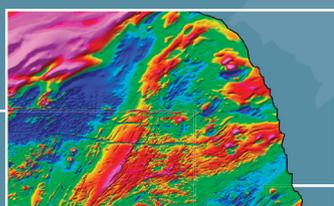


PROGRAMA GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS
E INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA REGIONAL

ATLAS AEROGEOFÍSICO

Estado de Minas Gerais



SERVIÇO GEOLÓGICO
DO BRASIL - CPRM

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministro de Estado

Bento Albuquerque

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Pedro Paulo Dias Mesquita

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor Presidente

Esteves Pedro Colnago

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

Márcio José Remédio

Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial

Alice Silva de Castilho

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Paulo Afonso Romano

Diretor de Administração e Finanças

Cassiano de Souza Alves

COORDENAÇÃO TÉCNICA

Chefe do Departamento de Geologia

Lúcia Travassos da Rosa Costa

Chefe da Divisão de Geologia Básica

Vladimir Cruz de Medeiros

Chefe da Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica

Luiz Gustavo Rodrigues Pinto

Chefe do Departamento de Recursos Minerais

Marcelo Esteves Almeida

Chefe do Departamento de Informações Institucionais

Edgar Shinzato

Chefe da Divisão de Geoprocessamento

Hiran Silva Dias

Chefe da Divisão de Cartografia

Fábio Silva da Costa

Chefe da Divisão de Documentação Técnica

Roberta Pereira da Silva de Paula

Chefe do Departamento de Relações Institucionais e Divulgação

Patrícia Düringer Jacques

Chefe da Divisão de Marketing e Divulgação

Washington José Ferreira Santos

Chefe do Departamento de Apoio Técnico

Maria José Cabral Cezar

Chefe da Divisão de Editoração Geral

Valter Alvarenga Barradas

SUPERINTENDÊNCIA DE BELO HORIZONTE

Superintendente

Marlon Marques Coutinho

Gerente de Geologia e Recursos Minerais

Marcelo de Souza Marinho

Responsável Técnico do Produto

Diego Guilherme da Costa Gomes

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM
DIRETORIA DE GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS
I PROGRAMA GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL I

**LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS
E INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA REGIONAL**

ATLAS AEROGEOFÍSICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS

ORGANIZADOR

Diego Guilherme da Costa Gomes



BELO HORIZONTE
2021

REALIZAÇÃO

Superintendência de Belo Horizonte

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA – DEGEO

Lúcia Travassos da Rosa Costa

DIVISÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOFÍSICA

Luiz Gustavo Rodrigues Pinto

**GERENTE DE RECURSOS MINERAIS DA
SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE BELO HORIZONTE**

Marcelo de Souza Marinho

**COORDENADOR DO PROJETO ATLAS AEROGEOFÍSICO
DOS ESTADOS**

Luiz Gustavo Rodrigues Pinto

ELABORAÇÃO DOS TEXTOS E MAPAS

Diego Guilherme da Costa Gomes

Marcelo de Souza Marinho

Paulo Henrique Amorim Dias

Francisco Teixeira Vilela

Vidyã Vieira de Almeida

COLABORADOR

Gregório Faversani – Engenheiro Geólogo (UFOP)

REVISÃO

Alexandre Lisboa Lago

APOIO TÉCNICO**PROJETO GRÁFICO/EDITORAÇÃO****Capa (DIEDIG)**

Agmar Alves Lopes

Miolo (DIEDIG)

Agmar Alves Lopes

Diagramação (ERJ)

Agmar Alves Lopes

NORMALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

Priscila Ururahy

Serviço Geológico do Brasil – CPRM

www.cprm.gov.br

seus@cprm.gov.br

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

A881 Atlas aerogeofísico do estado de Minas Gerais / Organizador
Diego Guilherme da Costa Gomes. – Belo Horizonte : CPRM,
2021.
1 recurso eletrônico : PDF

Levantamentos geológicos e integração geológica regional.
ISBN 978-65-5664-175-1

1. Geofísica – Atlas – Minas Gerais. I. Gomes, Diego
Guilherme da Costa (org.). II. Título.

CDD 550.98151

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Teresa Rosenhayme CRB 5662

Direitos desta edição: Serviço Geológico do Brasil – CPRM
Permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte.

APRESENTAÇÃO

O conhecimento geológico do território brasileiro constitui um instrumento indispensável para o planejamento e a execução das políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável dos recursos minerais, e simultaneamente é fonte de dados imprescindível para o conhecimento e gestão do meio físico.

É com esta premissa que o **Serviço Geológico do Brasil – CPRM** tem a grata satisfação de disponibilizar a comunidade técnico-científica, aos empresários do setor mineral e à sociedade em geral os resultados alcançados pelo **Projeto Atlas Aerogeofísicos dos Estados**, vinculado ao **Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral**.

A grande importância dos levantamentos aerogeofísicos está na sua capacidade para desvendar a terceira dimensão dos dados geológicos. Dessa forma, feições geológicas como corpos, estruturas e depósitos minerais podem ser inferidas em profundidade por meio de interpretações e modelagens. Portanto, em um país continental como o Brasil, a execução de levantamentos aerogeofísicos com capacidade para abranger grandes áreas e regiões de difícil acesso é uma estratégia rápida e eficiente de investigar o seu subsolo.

Ao longo das duas últimas décadas importantes investimentos foram feitos pelo governo federal, através do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, na aquisição de dados aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria), tendo sido recoberta uma área de cerca de 3.726.364 km², que corresponde a 43,76% do território brasileiro e aproximadamente 92% do embasamento cristalino do Brasil. Este grande esforço foi realizado com a expectativa de contribuir para o aprimoramento do conhecimento geológico do país e a descoberta de jazidas minerais.

Para incrementar a divulgação do conhecimento e a disponibilização dos dados, o **Projeto Atlas Aerogeofísicos dos Estados** integra dados aerogeofísicos de acordo com os limites das unidades federativas do Brasil. Esta compartimentação objetiva facilitar a gestão e emprego dos dados de acordo com as preferências e prioridades de cada gestor estadual, e segundo as características geológicas e potencialidades minerais locais.

A preparação do **Atlas Aerogeofísico do Estado de Minas Gerais** necessitou de vinte e seis diferentes projetos aerogeofísicos, os mais recentes, que foram unidos em uma única malha conforme os limites do estado. Esta tarefa implicou na necessidade do reprocessamento e nivelamento dos dados brutos e aplicação de filtros para enfatizar assinaturas geofísicas anômalas ou filtrar ruídos que prejudicariam os produtos. Através dos dados magnéticos e seus derivados é possível identificar as anomalias/fontes magnéticas e lineamentos. A correlação desses domínios e estruturas com a geologia é de suma importância para o estudo de vários depósitos minerais. Este produto contempla informações conceituais gerais sobre os métodos geofísicos magnetométrico e gamaespectrométrico, um conjunto de imagens geofísicas elaboradas para Minas Gerais em diversos temas, técnicas de processamento de dados geofísicos e algumas correlações regionais entre assinaturas geofísicas e as principais feições geológicas do estado.

Com mais este lançamento, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM dá continuidade à política governamental de atualizar o conhecimento geológico do país, através dos levantamentos geológicos básicos, geoquímicos e geofísicos, e da avaliação integrada das informações, fundamental para o desenvolvimento regional e importante subsídio à formulação de políticas públicas e de apoio à tomada de decisão de investimentos. Este produto está disponível para download no bando de dados corporativo do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, o GeoSGB (<http://geosgb.cprm.gov.br>) e no Repositório Institucional de Geociências – RIGEO (<http://rigeo.cprm.gov.br>).

Esteves Pedro Colnago

Diretor-Presidente

Márcio José Remédio

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	6
PRIMEIROS LEVANTAMENTOS AEROGEOFÍSICOS.....	6
LEVANTAMENTOS AEROGEOFÍSICO DE ALTA DENSIDADE DE DADOS	8
INVESTIMENTOS EM LEVANTAMENTOS AEROGEOFÍSICOS A PARTIR DE 2004	8
CESSÃO GRATUITA DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS AO PÚBLICO EM GERAL	8
CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DE MINAS GERAIS	15
CONTEXTO FISIAGRÁFICO E GEOGRÁFICO	15
MATERIAIS E MÉTODOS	20
DADOS AEROGEOFÍSICOS	20
OS PRIMEIROS TRABALHOS DE JUNÇÃO DOS AEROLEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS.....	27
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO MAGNETOMÉTRICO	28
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO RADIOMÉTRICO	29
PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS.....	30
Plataforma de Processamento	31
Interpolação	31
Junção dos Diferentes Projetos.....	32
Aplicação de Transformações e Filtros nos Dados Aeromagnetométricos	32
MAPAS AEROMAGNETOMÉTRICOS	36
ANOMALIAS MAGNETOMÉTRICAS	37
1ª DERIVADA VERTICAL DA ANOMALIA MAGNETOMÉTRICA – DZ1	39
GRADIENTE TOTAL DA ANOMALIA MAGNETOMÉTRICA	41
MAPAS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS.....	43
POTÁSSIO	45
EQUIVALENTE TÓRIO.....	47
EQUIVALENTE URÂNIO	49
MAPA DE COMPOSIÇÃO TERNÁRIA.....	51
RAZÕES eU/K , eTH/K e eU/eTH	54
PARÂMETRO F	58
ÍNDICE LATERÍTICO	60
ÍNDICE MÁFICO.....	62
MAPA GRAVIMÉTRICO TERRESTRE.....	65
ANOMALIA BOUGUER.....	66

PRINCIPAIS CORRELAÇÕES GEOLÓGICAS COM OS DADOS DOS LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS NO ESTADO DE MINAS GERAIS.....	68
ANOMALIA MAGNÉTICA DE PIRAPORA	68
LINEAMENTOS MAGNÉTICOS NW – AZIMUTE 125°.....	68
ANOMALIAS GEOFÍSICAS CIRCULARES – INTRUSÕES ALCALINAS.....	73
ANOMALIAS GEOFÍSICAS DO TRIÂNGULO MINEIRO E OESTE DE MINAS GERAIS.....	73
ANOMALIAS MAGNÉTICAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	73
ALTO DE JANUÁRIA	73
ANOMALIAS GEOFÍSICAS DAS FAIXAS MARGINAIS DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO	74
ASSINATURAS AEROGEOFÍSICAS DAS PRINCIPAIS PROVÍNCIAS/DISTRITOS MINERAIS NO ESTADO DE MINAS GERAIS	75
PROVÍNCIA METALOGENÉTICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	75
Ferro	76
Assinatura Geofísica das FFB – Grupo Itabira	77
Ouro	77
Assinatura Geofísica do Supergrupo Rio das Velhas	77
PROVÍNCIA MINERAL RELACIONADA ÀS INTRUSÕES ALCALINAS MESOZOICAS – NIÓBIO, FÓSFORO E URÂNIO.....	83
Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP).....	83
Lineamento Magmático de Cabo Frio – Intrusão Poços de Caldas.....	84
DISTRITO FERRÍFERO DE NOVA AURORA.....	88
REFERÊNCIAS	91

INTRODUÇÃO

Os primeiros levantamentos aerogeofísicos executados no Brasil, desde a década de 1950, foram patrocinados por instituições federais brasileiras, tais como o Conselho Nacional do Petróleo (CNP), o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), a Empresas Nucleares Brasileiras S.A. (NUCLEBRAS) e a Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS). A atuação da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) se iniciou em 1971, quando assumiu o papel de órgão executor de projetos aerogeofísicos sistemáticos (magnetometria e gamaespectrometria), em princípio realizados por meio de convênios com o DNPM, que procurava atender a política do Ministério de Minas e Energia para realizar o recobrimento aerogeofísico dos terrenos pré-cambrianos do escudo brasileiro.

PRIMEIROS LEVANTAMENTOS AEROGEOFÍSICOS

No Brasil, o primeiro levantamento aerogeofísico data de julho/1952 a janeiro/1953, área de Botucatu/SP, na região da Bacia do Paraná, contratado pelo CNP, tendo sido executados

perfis magnéticos com o total de 17.358 km, sobre uma área da bacia aproximadamente de 15.157 km² (CPRM, 1995). A PETROBRAS e o CNP, a partir de 1957, retomaram os levantamentos aerogeofísicos sistemáticos em terrenos sedimentares, utilizando o método magnetométrico, com foco nas estruturas das bacias. Por outro lado, o DNPM, a CPRM, a CNEN e a NUCLEBRAS utilizavam os métodos magnetométrico e gamaespectrométrico, principalmente em escudos cristalinos pré-cambrianos, com foco na prospecção mineral e mapeamento geológico (CPRM, 1995).

Entre 1971 e 2001 foram executados 48 projetos aerogeofísicos em diversas regiões do país, predominantemente, com os métodos de magnetometria e gamaespectrometria. A maioria destes projetos aerogeofísicos tiveram características de levantamentos regionais, ou seja, com espaçamento das linhas de voo variando entre 1.000 e 2.000 m e altura de voo de 150 m. Nesse período foi recoberta uma área de cerca de 2.413.323 km² (Figura 1).

Os primeiros aerolevantamentos em Minas Gerais datam do período entre 1953 a 1955, cobrindo as áreas de Poços de Caldas, para prospecção em Urânio, São João del-Rei, com foco em estanho (Figura 2) e Araxá, para o pirocloro.

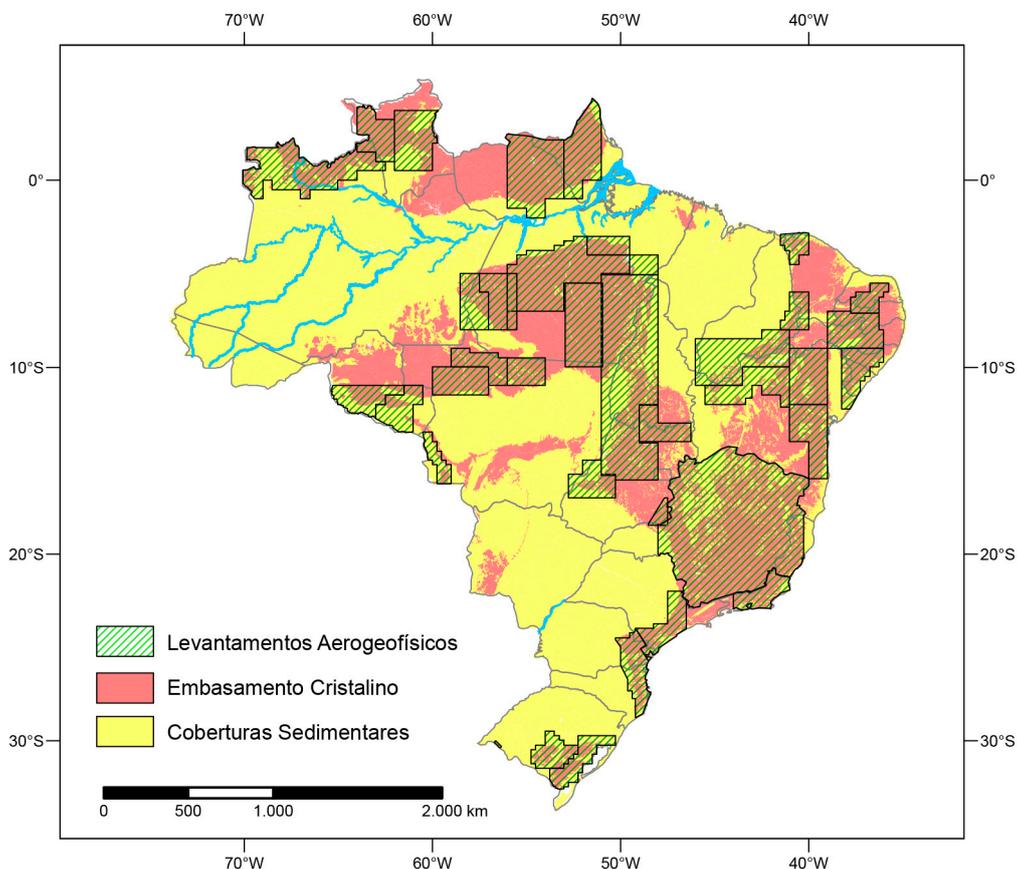


Figura 1: Levantamentos aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) adquiridos entre 1971 e 2001.

O estado de Minas Gerais, devido a sua posição no setor mineral brasileiro, sempre atraiu investimentos e, conseqüentemente, foi alvo de diversos projetos aerogeofísicos (Figuras 3 e 4). Dentre os aerolevantamentos de 1953 a 1992 (Tabela 1) realizados no estado, destaca-se por ser considerado o estopim para o início dos grandes projetos aerogeofísicos em território brasileiro, o Convênio Geofísica Brasil-Alemanha (CGBA). O convênio envolvia a participação do DNPM, CPRM e do Serviço Geológico Federal da Alemanha (*Bundesanstalt für Bodenforschung – BfB*), que contratou a empresa Prakla GmbH de Hannover/Alemanha para a execução. Inicialmente, foram 560.000 km² (CGBA, 1971) cobertos por aerocintilometria e aeromagnetometria, compreendendo quase que a totalidade dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo (Figura 3). Ao término dos trabalhos em 1975 seguiu-se a criação do Centro de Geofísica Aplicada (CGA), vinculado ao DNPM e fixado em Belo Horizonte/MG, formado por especialistas alemães e com os técnicos brasileiros capacitados durante o convênio, com o objetivo claro de estabelecer um centro geofísico de excelência para investigações terrestres, valendo-se assim da experiência adquirida nas atividades de processamento e interpretação de dados geofísicos. Todos os equipamentos utilizados durante o convênio foram doados ao Ministério de Minas e Energia (MME), sem custos ao governo brasileiro (Figura 5).

O CGA realizou diversos trabalhos de prospecção mineral nas décadas seguintes, fornecendo informações geofísicas terrestres e aéreas para investidores, mineradores e pesquisadores brasileiros. O urânio de Lagoa Real/BA, o cobre no Vale do Curaçá, na Bahia e em Pernambuco, a cromita e o carvão no Rio Grande do Sul e a fluorita de Santa Catarina são exemplos de recursos minerais que foram descobertos em projetos que tiveram como base os dados geofísicos levantados pelo CGA (CAIAFA, 2018). O Centro de Geofísica Aplicada encerrou suas atividades em 1983 e o corpo de especialistas foi integrado ao quadro de funcionários da CPRM.

LEVANTAMENTOS AEROGEOFÍSICO DE ALTA DENSIDADE DE DADOS

A partir de 2004, iniciou-se uma nova fase dos aerolevantamentos geofísicos, com a maioria dos projetos realizados com espaçamento de 500 m entre as linhas de voo, altura de voo de 100 m e direção das linhas de voo N-S e aplicavam os métodos de magnetometria e gamaespectrometria.

Foram realizados também dois aerolevantamentos eletromagnéticos de detalhe nas regiões de Nova Redenção/BA e Rio das Velhas/MG, além de um grande aerolevantamento gravimétrico regional na região de Carajás/PA.

Nesse período foi recoberta uma área de cerca de 3.726.364 km² (Figura 6), que corresponde a 43,76% do território brasileiro e aproximadamente 92% do embasamento cristalino do Brasil. De 2004 a 2014, os investimentos para a aquisição de dados aerogeofísicos atingiram um valor cerca de US\$ 188 milhões.

INVESTIMENTOS EM LEVANTAMENTOS AEROGEOFÍSICOS A PARTIR DE 2004

Os investimentos em levantamentos aerogeofísicos foram crescentes a partir de 2004, e atingiram o seu ápice entre os anos de 2008 e 2013. A Tabela 2 e o Gráfico 1 apresentam a evolução dos investimentos em aerogeofísica entre os anos de 2004 e 2014.

CESSÃO GRATUITA DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS AO PÚBLICO EM GERAL

Até 2017 a base de dados dos projetos aerogeofísicos adquiridos pela CPRM eram vendidos para empresas privadas e/ou cedidos às universidades e instituições de pesquisa seis meses após a realização dos projetos.

Quando vendidos para empresas privadas, os valores cobrados não eram compatíveis com os custos da aquisição ou com os valores reais dos dados praticados no mercado. Por exemplo, o custo do quilômetro voado oscilava entre R\$ 40,00 e R\$ 50,00, e os dados eram vendidos de maneira decrescente por R\$ 2,00, R\$ 1,00 e R\$ 0,50 por quilômetro, do primeiro ao terceiro ano após a disponibilização dos dados, respectivamente. Os recursos arrecadados com a venda dos dados aerogeofísicos retornavam ao Tesouro Nacional, de modo que nenhum recurso dessa venda permanecia na CPRM.

Embora os valores cobrados pela CPRM fossem muito abaixo dos custos de aquisição, estes eram considerados elevados por empresas de pequeno porte e “juniors”.

Desta forma, a partir de maio de 2017 optou-se pela cessão ampla e gratuita dos dados a todos os usuários, como forma de estimular investimentos do setor mineral. Os dados aerogeofísicos em formato XYZ e imagens aerogeofísicas georreferenciadas são acessados através do banco de dados corporativo da empresa, o GeoSGB (geosgb.cprm.gov.br/geofisica). O volume de dados baixados por tipo de acesso está apresentado no Gráfico 2.

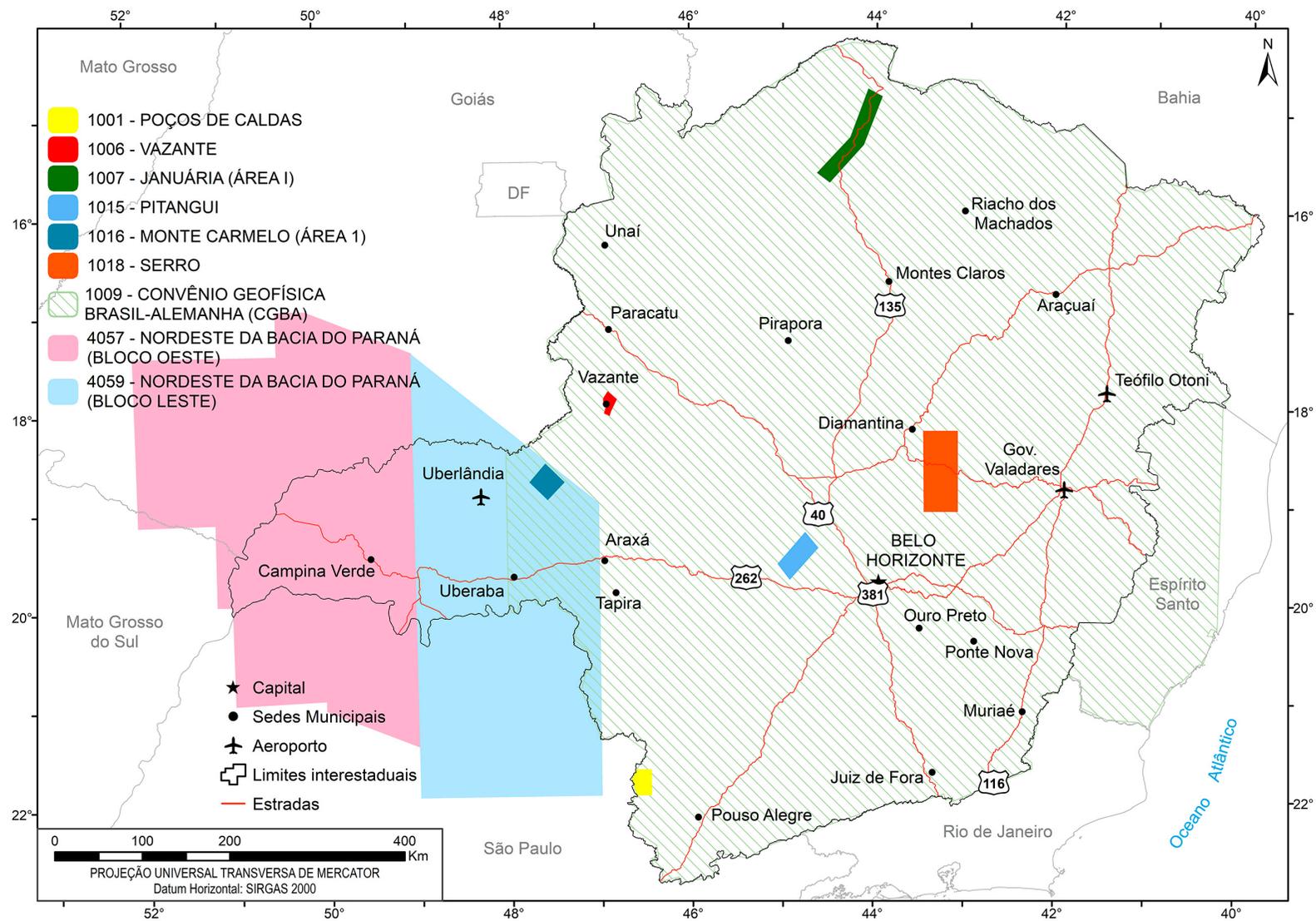


Figura 3: Localização dos projetos aerogeofísicos no estado de Minas Gerais das séries 1000 e 4000, realizados entre 1953 e 1992.

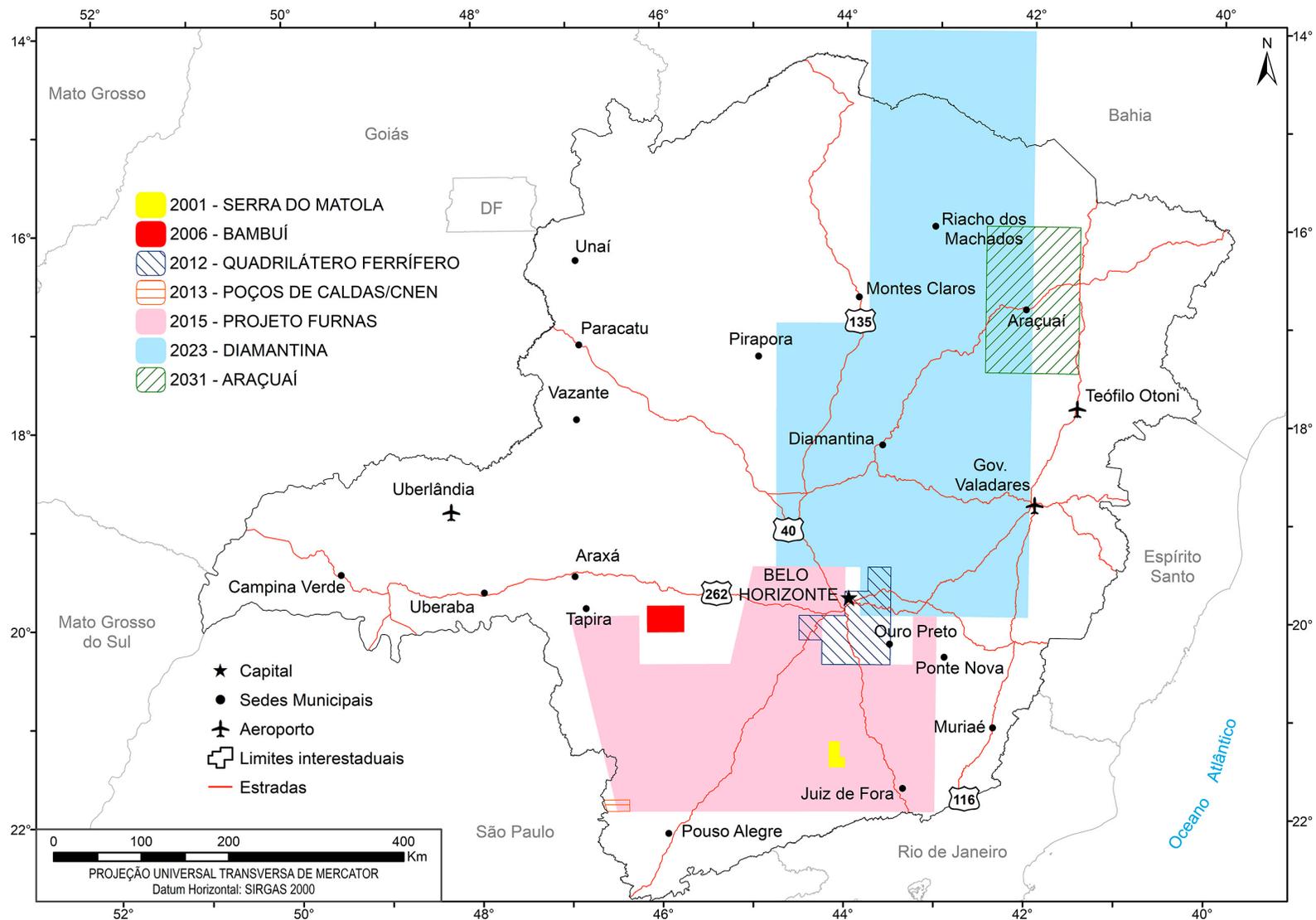


Figura 4: Localização dos projetos aerogeofísicos no estado de Minas Gerais da série 2000, realizados entre 1959 e 1982.

Tabela 1: Principais características técnicas dos projetos aerogeofísicos no estado de Minas Gerais, realizados entre 1953 e 1992 (CPRM, 1995).

NÚMERO DO PROJETO	PROJETOS AEROGEOFÍSICOS	EMPRESA CONTRATANTE	EMPRESA CONTRATADA/ EXECUTORA	LOCALIZAÇÃO	PERÍODO DO PROJETO	PERÍODO DE AQUISIÇÃO	MÉTODO	ÁREA TOTAL (km ²)	ALTURA MÉDIA DO VOO (m)	EXTENSÃO TOTAL DAS LINHAS DE VOO (km)	TAXA MÉDIA DE AMOSTRAGEM	DIREÇÃO		ESPAÇAMENTO (m)	
												LP	LC	LP	LC
1001	POÇOS DE CALDAS	DNPM	Levantamentos Aerofotogramétricos S. A. - LASA	MG - SP	1953	04 a 05/53	Cintilometria - Magnetometria	1.330	150	5.300	15s (AM)	N-S	E-W	250	-
1006	VAZANTE	DNPM	Levantamentos Aerofotogramétricos S. A. - LASA	MG	1956	01 a 05/04/56	Cintilometria - Magnetometria	330	150	1.052	15s (AM)	NW-SE	-	300	-
1007	JANUÁRIA (ÁREA I)	DNPM	Levantamentos Aerofotogramétricos S. A. - LASA	MG	1958	-	Cintilometria - Magnetometria	1.845	150	7.000	-	NE-SW	-	300	-
1009	CONVÊNIO GEOFÍSICA BRASIL-ALEMANHA (CGBA)	DNPM	CPRM/PRAKLA-SEISMOS GMBH (Alemanha)	MG - ES	1971/1972	03/71 a 09/72	Cintilometria - Magnetometria	570.000	350	360.000	60 m (AM)	E-W	N-S	2.000	-
1015	PITANGUI	DNPM	CPRM	MG	1973	08 a 11/73	Magnético - Eletromagnético - Radiométrico	524	80	1.932	80 m	N43E	-	300	-
1016	MONTE CARMELO (ÁREA 1)	DNPM	CPRM	MG	1974	03/74	Magnético - Eletromagnético - Radiométrico	881	80	3.060	-	N40E	-	300	-
1018	SERRO (ÁREA - DETALHE)	DNPM	CPRM/PRAKLA-SEISMOS GMBH (Alemanha)	MG	1974	-	Magnetometria - Gamaespectrometria	3.700	150	8.050	70 m (AM)	E-W	N-S	500	6.000
2001	SERRA DO MATOLA	CNEN	PROSPEC S.A. - Prospecções e Aerolevantamentos	MG	1959	-	Cintilometria - Magnetometria	432	150	2.900	-	N-S	E-W	150	15.000

continua

Tabela 1: Principais características técnicas dos projetos aerogeofísicos no estado de Minas Gerais, realizados entre 1953 e 1992 (CPRM, 1995). (Continuação)

NÚMERO DO PROJETO	PROJETOS AEROGEOFÍSICOS	EMPRESA CONTRATANTE	EMPRESA CONTRATADA/EXECUTORA	LOCALIZAÇÃO	PERÍODO DO PROJETO	PERÍODO DE AQUISIÇÃO	MÉTODO	ÁREA TOTAL (km ²)	ALTURA MÉDIA DO VOO (m)	EXTENSÃO TOTAL DAS LINHAS DE VOO (km)	TAXA MÉDIA DE AMOSTRAGEM	DIREÇÃO		ESPAÇAMENTO (m)	
												LP	LC	LP	LC
2006	BAMBUÍ	CNEN	Levantamentos Aerofotogramétricos S. A. - LASA	MG	1969	13 a 19/03/69	Gamaespectrometria	1.303	125	2.719	20s (AM) e 2s (Gama)	N-S	E-W	500	-
2012	QUADRILÁTERO FERRÍFERO	CNEN	CPRM	MG	1972/1973	09 a 11/72 e de 08 a 12/73	Gamaespectrometria - Magnetometria	6.100	150	11.200	1s (AM) e 1s (Gama)	N-S	E-W	500	-
2013	POÇOS DE CALDAS - CNEN	CNEN	LASA - Engenharia e Prospecções S.A.	MG	1973	-	Magnetometria - Gamaespectrometria	468	135	409	2s (AM)	E-W	N-S	1.000	-
2015	PROJETO FURNAS	CNEN	CPRM	MG	1974/1975	09 a 12/74 e de 02 a 03/75	Gamaespectrometria	76.000	150	24.400	2s (AM) e 2s (Gama)	N-S	E-W	4.000	20.000
2023	DIAMANTINA	NUCLEBRÁS	GEOFOTO S.A. - Fotogrametria, Cartografia, Aerogeofísica	MG - BA	1976	04 a 12/76	Gamaespectrometria	145.000	150	78.000	2s (AM) e 2s (Gama)	E-W	N-S	2.000	20.000
2031	ARAÇUAÍ	NUCLEBRÁS	PROSPEC - Geologia, Prospecções e Aerofotogrametria	MG	1982	07 a 08/82	Gamaespectrometria - Magnetometria	18.000	150	17.872	55m (AM) e 1s (Gama)	E-W	N-S	1.000	20.000
4057	NORDESTE DA BACIA DO PARANÁ - OESTE	PETROBRAS	Consórcio ENCAL/LASA/PROSPEC	GO - MG - SP	1991	11/91 a 04/92	Magnetometria	117.770	-	46.461	100m (AM)	N-S	E-W	3.000	15.000
4059	NORDESTE DA BACIA DO PARANÁ - LESTE	PETROBRAS	Consórcio ENCAL/LASA/PROSPEC	MG - SP	1992	01 a 03/92	Magnetometria	87.000	-	32.521	100m (AM)	N-S	E-W	3.000	15.000

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

NUCLEBRÁS - Empresas Nucleares Brasileiras S.A.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

PETROBRAS - Petróleo Brasileiro S.A.

LP - Linhas de Produção

LC - Linhas de Controle



Figura 5: Helicóptero S-58T equipado com os sensores magnetômetro, gamaespectrômetro e HEM (LUZ, 1975), utilizado durante o convênio CGBA e doado ao MME.

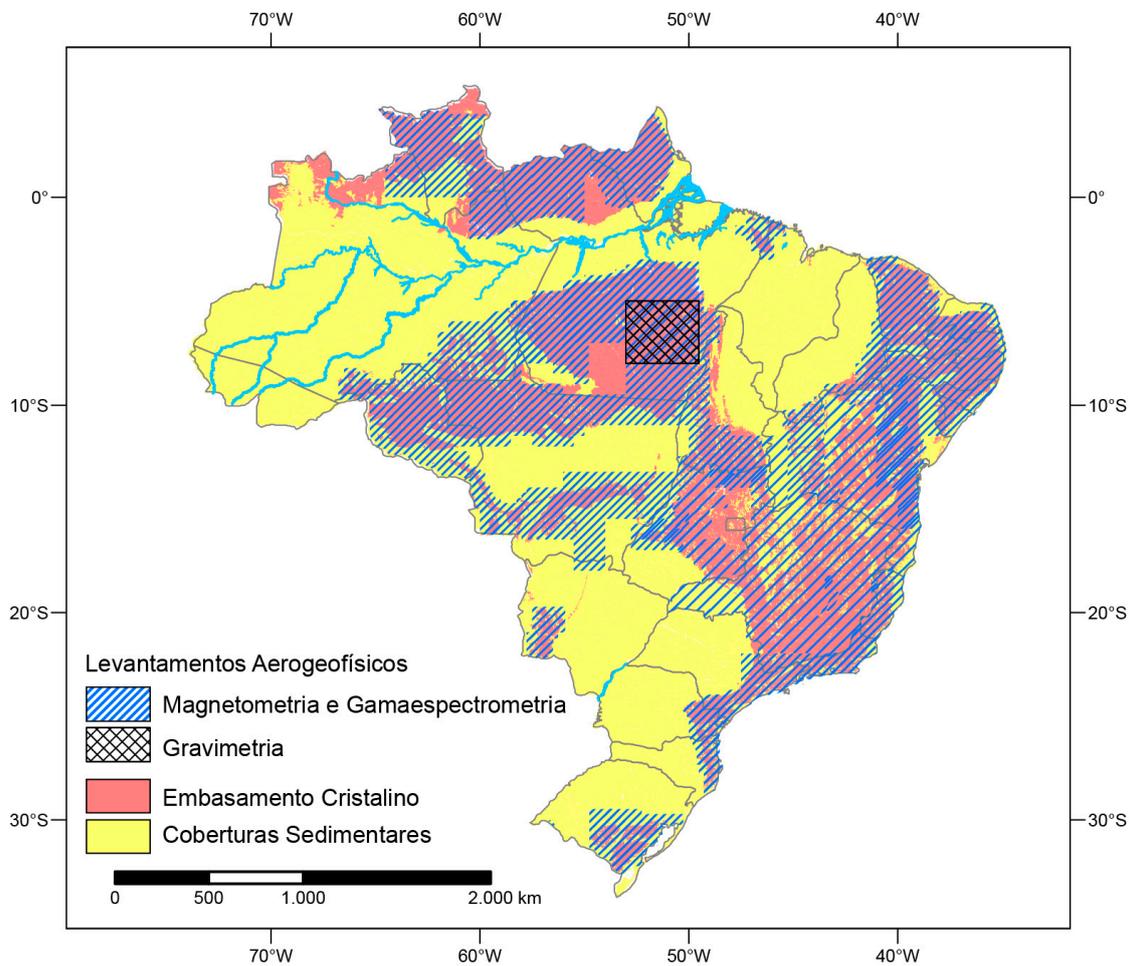


Figura 6: Levantamentos aerogeofísicos adquiridos entre 2004 e 2014.

Tabela 2: Valores investidos em aerolevantamentos geofísicos pela CPRM entre os anos de 2004 e 2014. Valores em reais e dólares (referente à cotação média do ano do aerolevantamento).

Ano	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Total
Investimento R\$ (em milhões)	10,226	38,931	22,260	15,343	51,405	40,649	57,359	39,007	21,418	62,985	15,052	374,635
Investimento U\$ (em milhões)	3,494	15,989	10,219	7,876	28,015	20,350	32,584	23,287	10,958	29,191	5,971	187,934

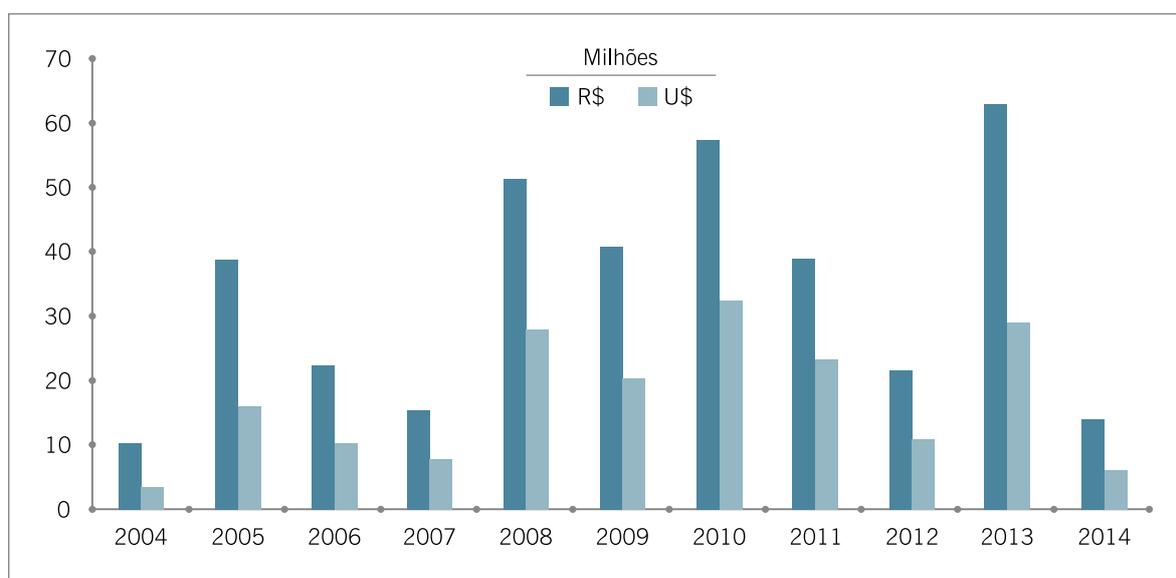


Gráfico 1: Valores investidos em aquisição de dados aerogeofísicos entre 2004 e 2014.

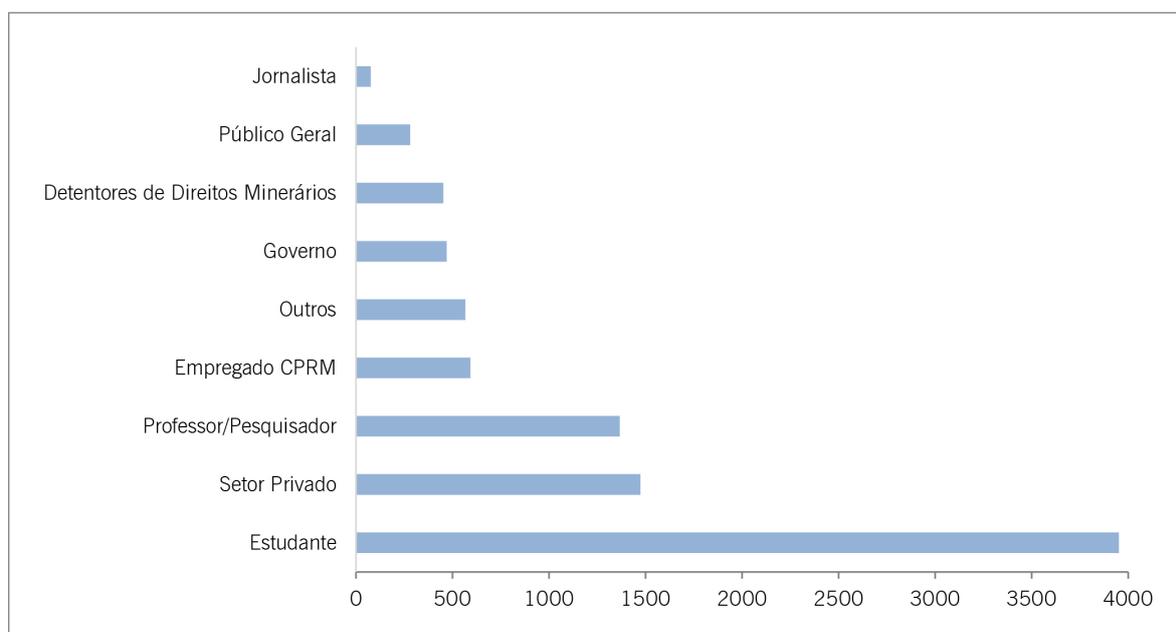


Gráfico 2: Volume de dados (em Gb) de projetos aerogeofísicos acessados de forma gratuita entre maio 2017 a dezembro 2020.

CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DE MINAS GERAIS

CONTEXTO FISIAGRÁFICO E GEOGRÁFICO

O estado de Minas Gerais está localizado na região sudeste do Brasil, entre os paralelos 14°13'58" e 22°54'00" de latitude sul e os meridianos 39°51'32" e 51°02'35" a oeste de Greenwich. Com uma área de 586.521,121 km², que representa 7% do território nacional, é o quarto estado em extensão, possui 853 municípios e uma população total estimada em 21.168.791 pessoas (Fonte: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg>, acesso em 10 fevereiro de 2020). A enorme extensão, a sua posição geográfica, a geomorfologia e a geologia do estado são fatores que contribuem para que este apresente uma diversidade de condições climáticas.

Caracterizado pelo relevo inteiramente planáltico e altitude média de 700 m, com destaque para o Planalto Atlântico, que compreende mais da metade do território, e os platôs do Planalto Central situado no noroeste, o estado mineiro, popularmente conhecido por "mar de morros", possui várias serras com altitudes superiores a 1.500 m, por exemplo, a do Caparaó (2.891 m), da Mantiqueira (2.798 m), do Espinhaço (2.072 m) e da Canastra (1.496 m). Já os pontos mais baixos estão localizados nos vales entalhados dos rios São Francisco, Jequitinhonha, Paraíba do Sul, Doce, Paranaíba e Grande (Figura 7). A Serra do Espinhaço é considerada a única cordilheira do Brasil com mais de 1.000 km extensão e largura variando de 50 a 100 km. O maior desnível do Brasil se localiza na Serra do Caparaó, que tem sua menor cota em 997 m, e com o pico da Bandeira representando o seu ponto mais alto.

Os mapas de precipitação média anual (Figura 8) e temperatura média anual (Figura 9), base para o zoneamento, reforçam o elevado gradiente climático, evidenciando que as regiões do centro para nordeste do estado apresentam temperaturas médias mais elevadas, com baixa precipitação

pluviométrica, enquanto que as regiões do centro para sudoeste apresentam temperaturas mais amenas e maior precipitação pluviométrica média. As áreas de maiores altitudes apresentam temperaturas médias anuais que variam entre 17°C e 20°C, enquanto as áreas de menores altitudes do estado têm temperaturas médias anuais entre 20°C e 23°C. Para realizar o zoneamento climático a partir da caracterização de classes é empregada a classificação de Köppen-Geiger, para tal, é necessário considerar diversas variáveis ambientais preponderantes num longo intervalo de tempo, como a precipitação pluviométrica, a temperatura e o modelo digital de terreno. O mapa do zoneamento climático do estado de Minas Gerais é derivado do trabalho de Alvares et al. (2013), que identificou as seguintes classes climáticas e suas estimativas dos percentuais de ocorrência: Aw (34.9%), clima tropical de savana (cerrado) com estação seca no inverno; As (12.3%), clima tropical de savana (cerrado) com estação seca no verão; Cfa (0.5%), clima temperado quente sem estação seca e verão quente; Cfb (0.7%), clima temperado quente sem estação seca e verão moderadamente quente; Cwa (25.5%), clima temperado quente com inverno seco e verão quente e Cwb (26.0%), clima temperado quente com inverno seco e verão moderadamente quente. As classes Am, clima tropical de monção, e Cwc, clima temperado quente com inverno seco com verão fresco e inverno frio, também aparecem, mas apresentam área de ocorrência menor do que 0.01%. Diversos autores como Martins et al. (2018), Reis & Tiba (2016) e Reboita et al. (2015) ainda descrevem para o norte do estado uma pequena faixa que seria classificada como zona Bsh, clima de estepe quente. Observando a distribuição espacial dessas classes climatológicas no mapa do zoneamento climático fica clara a heterogeneidade climática do território mineiro (Figura 10).

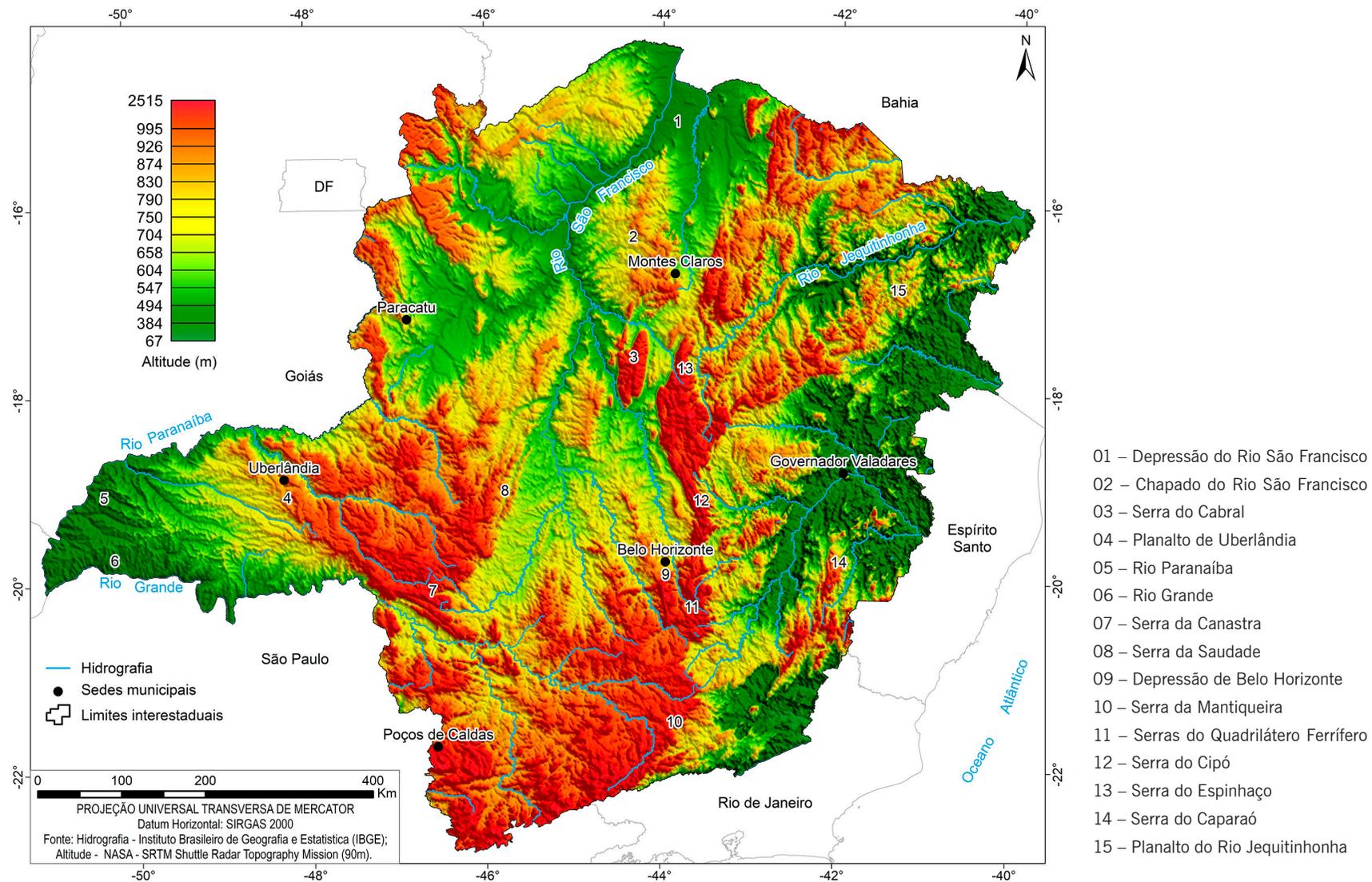


Figura 7: Modelo digital de terreno com as principais feições geomorfológicas do estado de Minas Gerais.

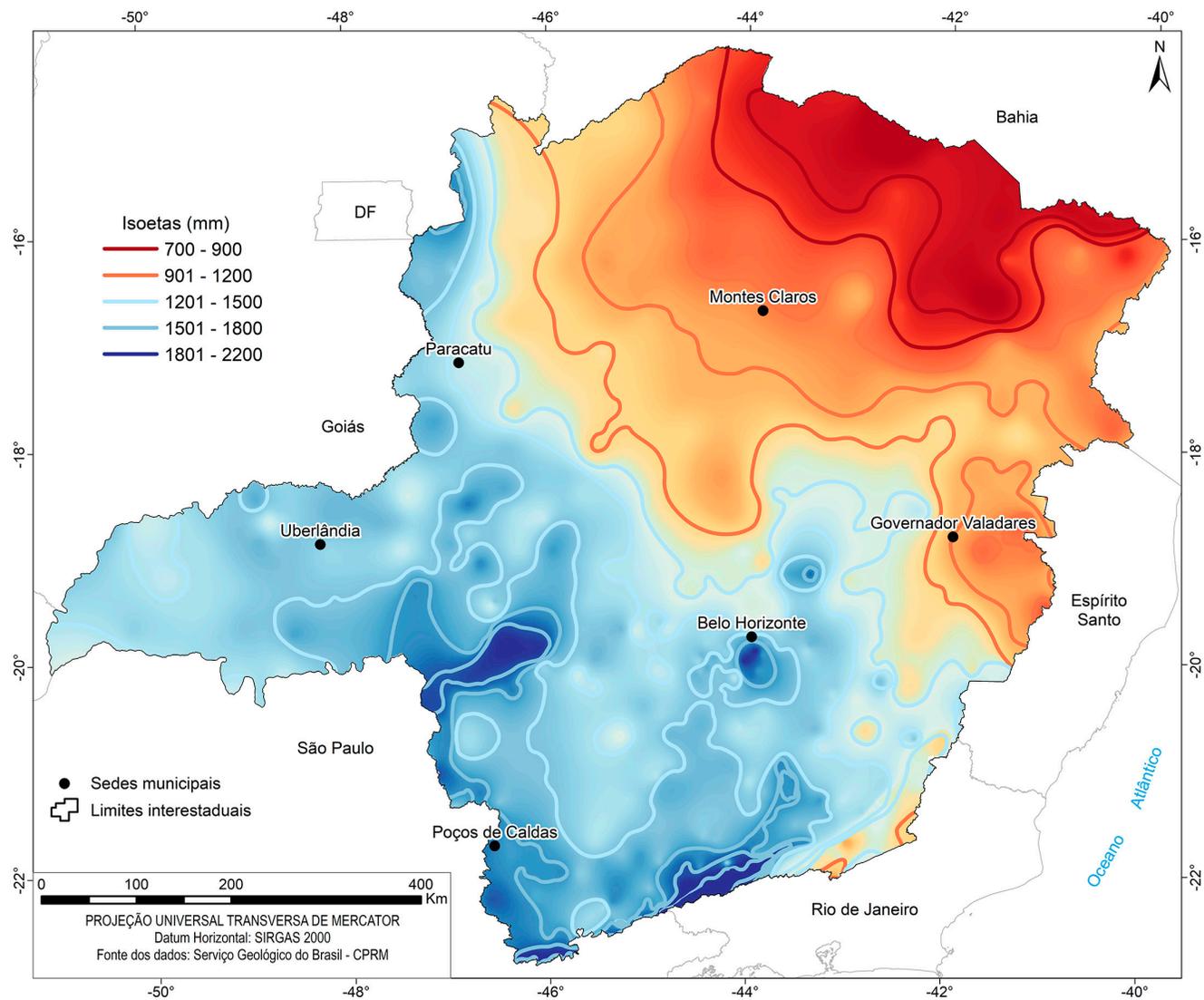


Figura 8: Mapa de precipitação pluviométrica média anual em Minas Gerais, para o período entre 1977 e 2006.

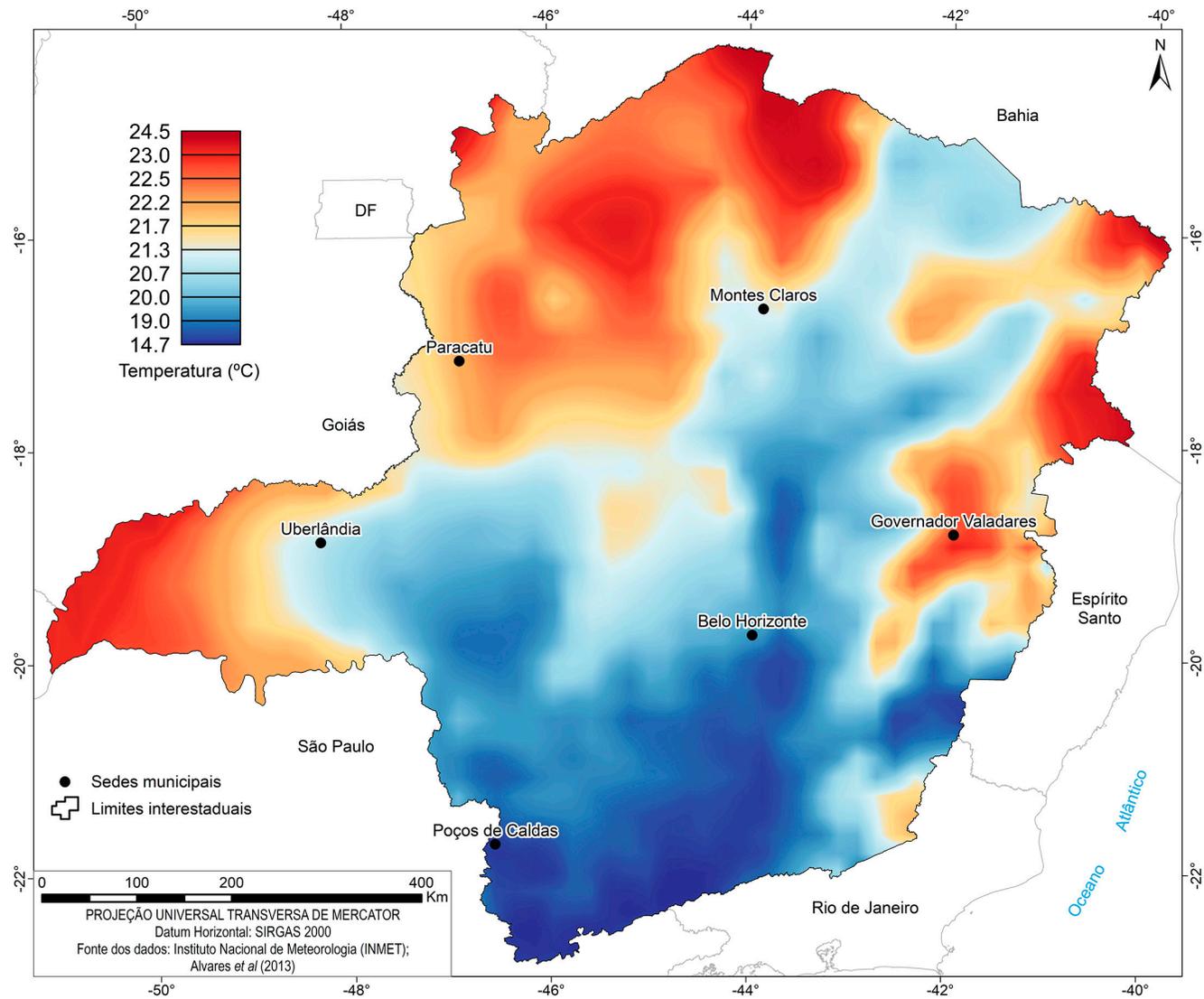


Figura 9: Mapa da temperatura média anual entre os anos 1977 e 2006 para o estado de Minas Gerais.

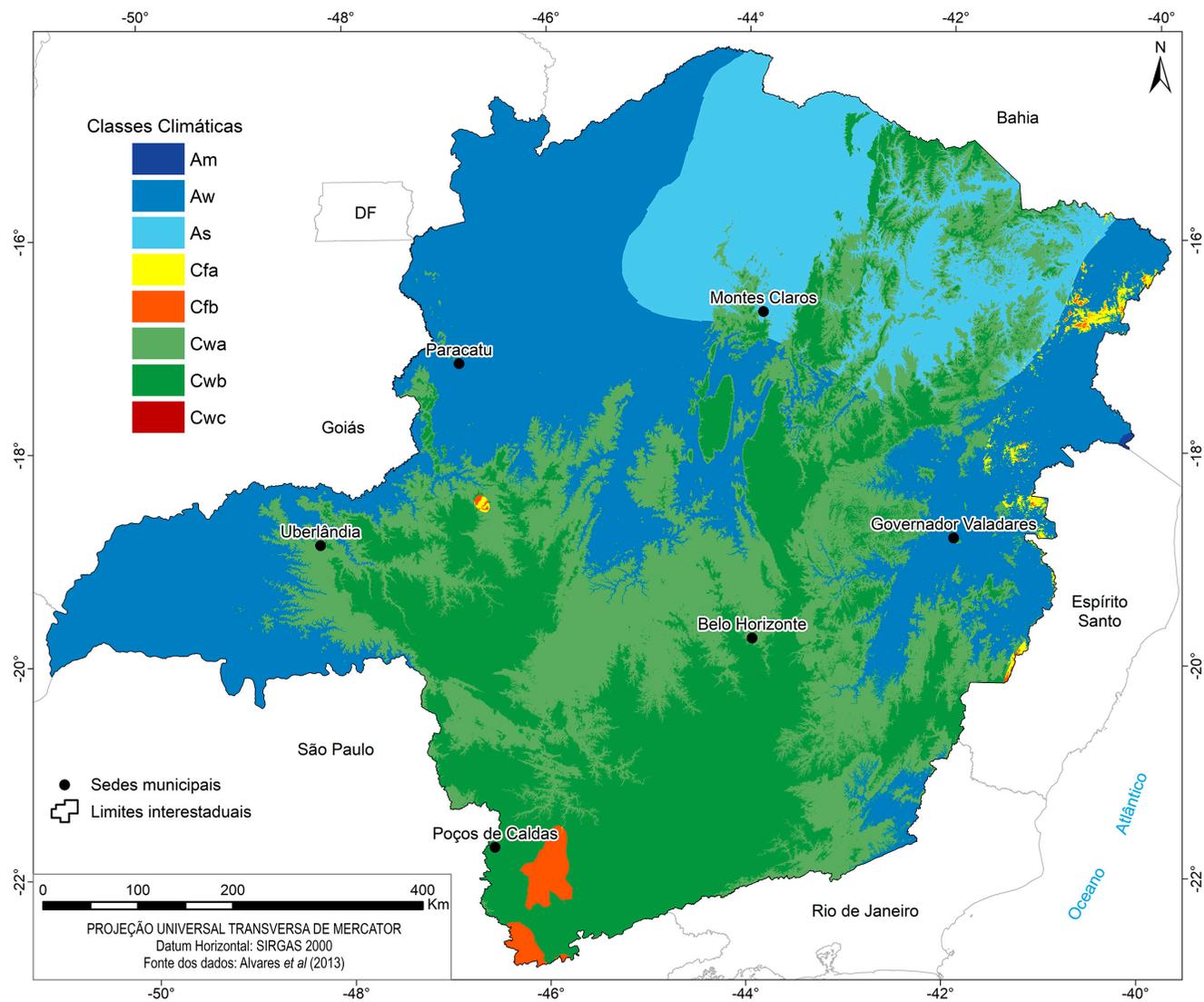


Figura 10: Mapa do zoneamento climático do estado de Minas Gerais segundo a classificação de Köppen-Geiger.

MATERIAIS E MÉTODOS

DADOS AEROGEOFÍSICOS

Os dados aerogeofísicos mais recentes do estado de Minas Gerais foram adquiridos por vinte e seis projetos aerogeofísicos e, em parceria com o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) ou individualmente, sendo contratados pelas seguintes empresas: SGB-CPRM; Secretaria de Estado de Minas e Energia do Estado de Minas Gerais (SEME); Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG); Agência Nacional do Petróleo (ANP). Segue a relação de todos os projetos aerogeofísicos utilizados na composição do atlas aerogeofísico do estado de Minas Gerais (Figura 11):

- 1) Área 01 – Unaí-Paracatu-Vazante-Coromandel (SEME, 2001);
- 2) Área 02 – Pitangui-São João del Rei-Ipatinga (SEME, 2001);
- 3) Área 03 – Morro do Pilar-Serro-Guanhães (SEME, 2001);
- 4) Área 04 – Faixa São João da Chapada-Datas (SEME, 2001);
- 5) Área 05 – Januária-Itacarambi-Montalvânia (SEME, 2001);
- 6) Área 06 – Pedra Azul-Salto da Divisa (SEME, 2001);
- 7) Área 07 – Patos de Minas-Araxá-Divinópolis (CODEMIG, 2006);
- 8) Área 08 – Minas Novas-Riacho dos Machados-Espinosa (CODEMIG, 2007);
- 9) Área 09 – João Pinheiro-Presidente Olegário-Tiros (CODEMIG, 2007);
- 10) Área 10 – Belo Horizonte-Curvelo-Três Marias (CODEMIG, 2009);
- 11) Área 11A – Jaíba-Montes Claros-Bocaiúva (CODEMIG, 2009);
- 12) Área 11B – Montezuma-Indaiabira-Taiobeiras (CODEMIG, 2009);
- 13) Área 12 – Teófilo Otoni-Governador Valadares-Caratinga (CODEMIG, 2009);
- 14) Área 13 – Ubaí-Pirapora-Joaquim Felício (CODEMIG, 2010);
- 15) Área 14 – Poços de Caldas-Varginha-Andrelândia (CODEMIG, 2011);
- 16) Área 15 – Juiz de Fora-Cataguases-Manhuaçu (CODEMIG, 2011);
- 17) Área 16 – Padre Paraíso-Nanuque-Mantena (CODEMIG, 2011);
- 18) Área 17 – Almenara-Itaobim-Jequitinhonha (CODEMIG, 2011);
- 19) Área 18 – Porto Cajueiro-São Francisco-São João da Ponte (CODEMIG, 2011);
- 20) Área 19 – Formoso-Buritis-Lagoa Grande (CODEMIG, 2011);
- 21) Área 20 – Uberaba-Uberlândia-Frutal (CODEMIG, 2012);
- 22) Área 21 – Ituiutaba-Iturama-Fronteira (CODEMIG, 2013);
- 23) ANP – Bacia do São Francisco (ANP, 2006);
- 24) IF – Itabira Ferros-Gemas de Minas Gerais (CPRM, 1996);
- 25) RV – Rio das Velhas (DNPM, 1992);
- 26) SJC-RES – São José dos Campos-Resende (CPRM, 2013).

Estes projetos aerogeofísicos levantaram perfis magnetométricos do campo magnético total e gamaespectrométricos de alta densidade, as características técnicas que variam muito entre os projetos (Tabela 3).

Foram empregadas aeronaves equipadas com magnetômetro e gamaespectrômetro, posicionadas pelo sistema de observação de satélite GPS com precisão de 1 m. O magnetômetro com sensor de vapor de césio normalmente é montado na cauda da aeronave, tipo *stinger* (Figura 12 – Fotografia 1). O gamaespectrômetro com detectores de cristais de iodeto de sódio, NaI, (Figura 12 – Fotografia 2) capta a radiação gama e, através da análise espectral, retira-se a área correspondente dos fotopicos de potássio (K), equivalente tório (eTh) e equivalente urânio (eU).

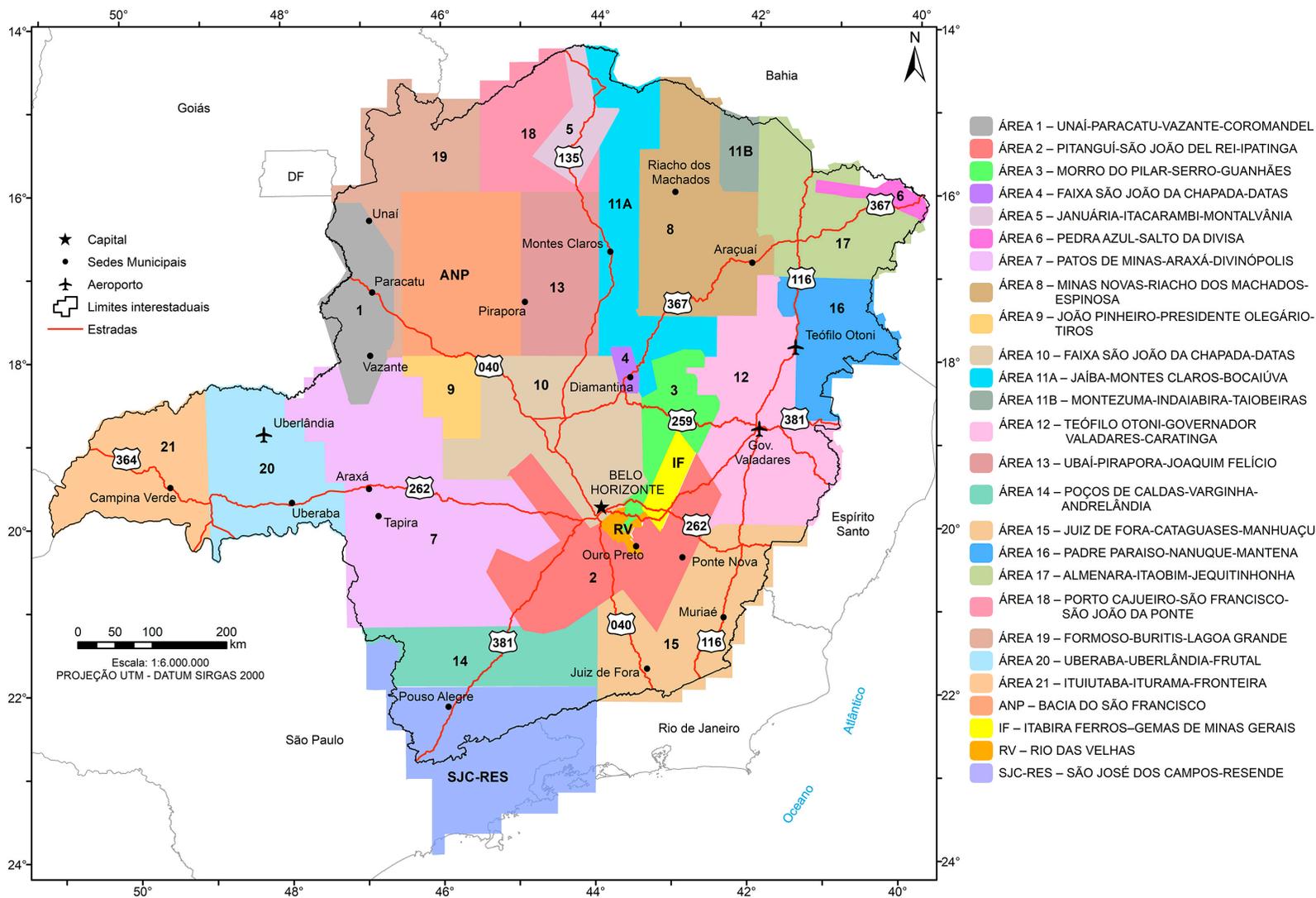


Figura 11: Localização dos projetos aerogeofísicos utilizados na composição do atlas geofísico do estado de Minas Gerais. Período de aquisição entre 1992 e 2013.

Tabela 3: Principais características técnicas dos projetos aerogeofísicos, realizados entre 1992 e 2013 do estado de Minas Gerais.

PROJETOS AEROGEOFÍSICOS	EMPRESA CONTRATANTE	EMPRESA CONTRATADA/ EXECUTORA	LOCALIZAÇÃO	PERÍODO DO PROJETO	PERÍODO DE AQUISIÇÃO	ÁREA TOTAL (km ²)	DADOS DO VOO		EXTENSÃO TOTAL (km)		SISTEMA DE COORDENADAS	TAXA MÉDIA DE AMOSTRAGEM (s)		DIREÇÃO		ESPAÇAMENTO (m)	
							ALTURA MÉDIA (m)	VELOCIDADE APROXIMADA (km/h)	LP	LC		MAG	GAMA	LP	LC	LP	LC
ÁREA 1 - NORTE	SEME	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Unai/ Paracatu/ Vazante/ Coromandel	2000/ 2001	10/08 a 19/12/2000	10059.03	100	200	42.946,4	4.137,7	SAD69	0,1	1,0	N30E	N60W	250	2.500
ÁREA 1 - SUL	SEME	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Unai/ Paracatu/ Vazante/ Coromandel	2000/ 2001	10/08/2000 a 19/12/2001	8573.9	100	200	35.073,4	3.581,1	SAD69	0,1	1,0	N30W	N60E	250	2.500
ÁREA 2 - OESTE	SEME	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Pitangui/ São João Del Rei/ Ipatinga	2000/ 2001	24/08/2000 a 25/03/2001	21564	100	200	86.519,48	8.663,05	Córrego Alegre	0,1	1,0	N30E	N60W	250	2.500
ÁREA 2 - LESTE	SEME	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Pitangui/ São João Del Rei/ Ipatinga	2000/ 2001	24/08/2000 a 25/03/2002	13611	100	200	54.610,69	5.468,07	Córrego Alegre	0,1	1,0	N30W	N60E	250	2.500
ÁREA 3	SEME	Megafísica Survey Aerolevantamentos S.A.	Morro do Pilar/ Cerro/ Guanhães	2000/ 2001	07/12/2000 a 26/06/2001	10141	100	200	49.501		SAD69	0,1	1,0	N30W	N60E	250	2.500
ÁREA 4	SEME	Megafísica Survey Aerolevantamentos S.A.	Faixa São João da Chapada/ Datas	2000	26/08 a 15/09/2000	1600	100	200	7040		SAD69	0,1	1,0	N20E	N70W	250	2.500

continua

Tabela 3: Principais características técnicas dos projetos aerogeofísicos, realizados entre 1992 e 2013 do estado de Minas Gerais. (Continuação)

PROJETOS AEROGEOFÍSICOS	EMPRESA CONTRATANTE	EMPRESA CONTRATADA/ EXECUTORA	LOCALIZAÇÃO	PERÍODO DO PROJETO	PERÍODO DE AQUISIÇÃO	ÁREA TOTAL (km ²)	DADOS DO VOO		EXTENSÃO TOTAL (km)		SISTEMA DE COORDENADAS	TAXA MÉDIA DE AMOSTRAGEM (s)		DIREÇÃO		ESPAÇAMENTO (m)	
							ALTURA MÉDIA (m)	VELOCIDADE APROXIMADA (km/h)	LP	LC		MAG	GAMA	LP	LC	LP	LC
ÁREA 5	SEME	Megafísica Survey Aerolevantamentos S.A.	Januária/ Itacarambi/ Montalvânia	2000/ 2001	16/09 a 10/11/2000	8.297	100	200	36.507		WGS84	0,1	1,0	N30W	N60E	250	2.500
ÁREA 6	SEME	Megafísica Survey Aerolevantamentos S.A.	Faixa Pedra Azul/Salto da Divisa	2000/ 2001	18/12/2000 a 18/01/2001	3.200	100	200	13.000		SAD69	0,1	1,0	N-S	E-W	250	2.500
ÁREA 7	CODEMIG/ SGB	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Patos de Minas/Araxá/ Divinópolis	2006	14/02 a 31/10/2006	70.473	100	280	185.264,98		WGS84	0,05	1,0	N-S	E-W	400	8.000
ÁREA 8	CODEMIG/ SGB	Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas LTDA.	Minas Novas/ Riacho dos Machados/ Espinosa	2005/ 2006	06/02 a 08/06/2006	40.868,68	100	280	83.039,52	4172,93	Córrego Alegre	0,1	1,0	N25W	N65E	500	10.000
ÁREA 9	CODEMIG/ SGB	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	João Pinheiro/ Presidente Olegário/Tiros	2007	20/01 a 12/03/2007	9.067	100	270	23.868,25		Córrego Alegre	0,1	1,0	N-S	E-W	400	8.000
ÁREA 10	CODEMIG/ SGB	Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas LTDA.	Belo Horizonte/ Curvelo/Três Marias	2009	09/01 a 24/04/2009	40.790,23	100	270	83.070,2	4222,7	Córrego Alegre	0,1	1,0	N-S	E-W	500	10.000

continua

Tabela 3: Principais características técnicas dos projetos aerogeofísicos, realizados entre 1992 e 2013 do estado de Minas Gerais. (Continuação)

PROJETOS AEROGEOFÍSICOS	EMPRESA CONTRATANTE	EMPRESA CONTRATADA/ EXECUTORA	LOCALIZAÇÃO	PERÍODO DO PROJETO	PERÍODO DE AQUISIÇÃO	ÁREA TOTAL (km ²)	DADOS DO VOO		EXTENSÃO TOTAL (km)		SISTEMA DE COORDENADAS	TAXA MÉDIA DE AMOSTRAGEM (s)		DIREÇÃO		ESPAÇAMENTO (m)	
							ALTURA MÉDIA (m)	VELOCIDADE APROXIMADA (km/h)	LP	LC		MAG	GAMA	LP	LC	LP	LC
ÁREA 11A	CODEMIG/ SGB	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Jaíba/Montes Claros/ Bocaiúva	2009	05/05 a 02/09/2009	31.579	100	273	66.355,02		WGS84	0,1	1,0	N25W	N65E	500	10.000
ÁREA 11B	CODEMIG/ SGB	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Montezuma/ Indaiabira/ Taiobeiras	2009	07/04 a 04/05/2009	5.827	100	266	12.385,98		WGS84	0,1	1,0	N25W	N65E	500	10.000
ÁREA 12	CODEMIG/ SGB	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Teófilo Otoni/ Governador Valadares/ Caratinga	2008/ 2009	11/12/2008 a 29/07/2009	41.660	100	275	87.793,67		WGS84	0,1	1,0	N30W	N60E	500	10.000
ÁREA 13	CODEMIG/ SGB	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Ubai/Pirapora/ Joaquim Felício	2009/ 2010	26/09/2009 a 21/01/2010	24.078	100	270	50.222,74		WGS84	0,1	1,0	N25W	N65E	500	10.000
ÁREA 14	CODEMIG/ SGB	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Poços de Caldas/ Varginha/ Andrelândia	2010/ 2011	10/12/2010 a 15/03/2011	23.476	100	263	49.353,73		WGS84	0,1	1,0	N-S	E-W	500	10.000
ÁREA 15	CODEMIG/ SGB	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Juiz de Fora/ Cataguases/ Manhuaçu	2010/ 2011	10/12/2010 a 25/07/2011	36.378	100	242	76.954,6		Córrego Alegre	0,1	1,0	N-S	E-W	500	10.000

continua

Tabela 3: Principais características técnicas dos projetos aerogeofísicos, realizados entre 1992 e 2013 do estado de Minas Gerais. (Continuação)

PROJETOS AEROGEOFÍSICOS	EMPRESA CONTRATANTE	EMPRESA CONTRATADA/ EXECUTORA	LOCALIZAÇÃO	PERÍODO DO PROJETO	PERÍODO DE AQUISIÇÃO	ÁREA TOTAL (km²)	DADOS DO VOO		EXTENSÃO TOTAL (km)		SISTEMA DE COORDENADAS	TAXA MÉDIA DE AMOSTRAGEM (s)		DIREÇÃO		ESPAÇAMENTO (m)	
							ALTURA MÉDIA (m)	VELOCIDADE APROXIMADA (km/h)	LP	LC		MAG	GAMA	LP	LC	LP	LC
ÁREA 16	CODEMIG/ SGB	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Padre Paraíso/ Nanuque/ Mantena	2011	13/01 a 27/04/2011	20762	100	259	46.618,96		Córrego Alegre	0,1	1,0	N-S	E-W	500	10.000
ÁREA 17	CODEMIG/ SGB	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Almenara/ Itaobim/ Jequitinhonha	2011	13/01 a 27/04/2011	27066	100	259	60.827,66		Córrego Alegre	0,1	1,0	N-S	E-W	500	10.000
ÁREA 18	CODEMIG/ SGB	Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica LTDA	Porto Cajueiro – São Francisco – São João da Ponte	2010/ 2011	19/01 a 25/03/2011	20145	100	275	41.724		WGS84	0,1	1,0	N-S	E-W	500	10.000
ÁREA 19	CODEMIG/ SGB	Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica LTDA.	Formoso/ Buritis/Lagoa Grande	2011	29/04 a 25/06/2011	26295	100	275	54.961		Córrego Alegre	0,01 e 0,1	1,0	N-S	E-W	500	10000
ÁREA 20	CODEMIG/ SGB	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Uberaba/ Uberlândia/ Frutal	2011/ 2012	10/12/2011 a 13/03/2012	31.054	100	242	34.264,33		Córrego Alegre	0,1	1,0	N-S	E-W	1000	10.000
ÁREA 21	CODEMIG/ SGB	Lasa Engenharia e Prospecções S.A.	Ituiutaba/ Iturama/ Fronteira	2013	12/11 a 16/12/2013	2.9171	100	270	31.947,33		Córrego Alegre	0,1	1,0	N-S	E-W	1000	10.000

continua

Tabela 3: Principais características técnicas dos projetos aerogeofísicos, realizados entre 1992 e 2013 do estado de Minas Gerais. (Continuação)

PROJETOS AEROGEOFÍSICOS	EMPRESA CONTRATANTE	EMPRESA CONTRATADA/ EXECUTORA	LOCALIZAÇÃO	PERÍODO DO PROJETO	PERÍODO DE AQUISIÇÃO	ÁREA TOTAL (km ²)	DADOS DO VOO		EXTENSÃO TOTAL (km)		SISTEMA DE COORDENADAS	TAXA MÉDIA DE AMOSTRAGEM (s)		DIREÇÃO		ESPAÇAMENTO (m)	
							ALTURA MÉDIA (m)	VELOCIDADE APROXIMADA (km/h)	LP	LC		MAG	GAMA	LP	LC	LP	LC
ANP	ANP	Lasa Engenharia e Prospecções S.A. / Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas LTDA.	Bacia do São Francisco	2006	07/2006	35942	100	270	81.237,12		SAD69	0,01	1,0	N-S	E-W	500	4.000
SJC-RES	SGB	Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica LTDA.	São José dos Campos/ Resende	2013	19/10/2010 a 11/10/2013	47.321	100	265	101.085		WGS84	0,01 e 0,1	1,0	N-S	E-W	500	10.000
RV* 1 - 4	DNPM	Prospec S/A	Nova Lima/ Caeté	1992	17/07 a 04/10/1992	1.700	80	70 a 110	6.726		SAD69	0,2	1,0	N40W	N50E	250	5.000
RV* 2 - 3	DNPM	Prospec S/A	Santa Bárbara/ Barão de Cocais	1992	17/07/1992 a 04/10/1993	1.700	80	70 a 110	6.726		SAD69	0,2	1,0	N50E	N40W	250	5.000
ITABIRA-FERROS	SGB	GEOMAG S.A. - Prospecções Aerogeofísicos	Faixa Itabira/ Ferros	1996	13/02 a 17/04/1996	4.600	150	180	9.170		SAD69	1,2	1,2	N40W	N24E	500	12.000

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

SEME - Secretaria de Estado de Minas e Energia do Governo de MG

SGB - Serviço Geológico do Brasil (CPRM-Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais)

LP - Linhas de Produção

LC - Linhas de Controle

*O RV também tem aquisição ELETROMAGNÉTICA e VLF-EM com taxa de amostragem de 0.2 seg.



Fotografia 1 - Avião equipado com magnetômetro do tipo vapor de cézio montado na cauda da aeronave (tipo stinger). Este magnetômetro mede o campo magnético total a cada 0,1 s.



Fotografia 2 - Avião equipado com gamaespectrômetro com detector de cristal de iodeto de sódio. Este gamaespectrômetro mede dados de radioatividade natural a cada 1,0 s.

Figura 12: Aeronave com magnetômetro acoplado na cauda (Fotografia 1) e, em detalhe, os equipamentos necessários para a aquisição dos dados gamaespectrométricos (Fotografia 2).

OS PRIMEIROS TRABALHOS DE JUNÇÕES DOS AEROLEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS

Os primeiros mapas com as junções de todos os aerolevantamentos geofísicos (Tabela 3 e Figura 13) são decorrentes do árduo trabalho de um dos maiores defensores da geofísica, o Engenheiro de Minas e especialista em geofísica Antonino Juarez Borges (*in memoriam*) que sempre pôs essa ciência como uma das principais ferramentas

para a prospecção mineral. Ele atuou no Convênio Geofísica Brasil-Alemanha (CGBA) e no Projeto Geofísico Brasil-Canadá (PGBC). Posteriormente, com a criação do Centro de Geofísica Aplicada (CGA) participou da coordenação e execução de setenta projetos em várias regiões do território brasileiro. Contribuiu também com sua larga experiência em geofísica, adquirida depois de décadas de trabalho, nos projetos aerogeofísicos de alta densidade de dados a partir do ano 2000, realizados no estado de Minas Gerais.

CONVÊNIO CODEMIG - CPRM

LEVANTAMENTOS AEROGEOFÍSICOS DO ESTADO DE MINAS GERAIS

COBERTURA AEROGEOFÍSICA COM MAGNETOMETRIA E GAMAESPECTROMETRIA

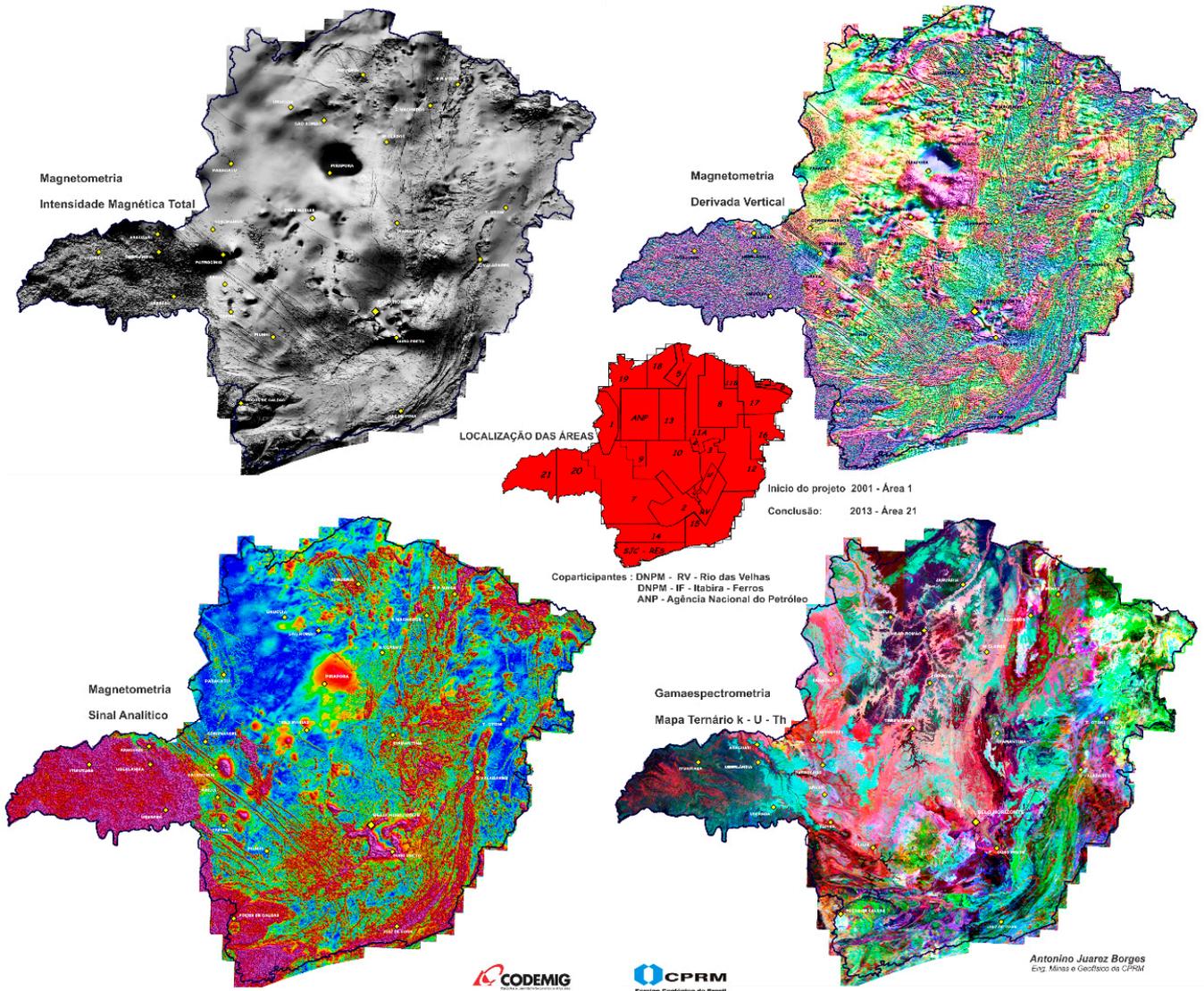


Figura 13: Encarte com os mapas geofísicos de autoria de Antonino Juarez Borges (*in memoriam*) foram referência para diversos projetos de pesquisa do Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO MAGNETOMÉTRICO

O método magnetométrico é um dos mais antigos métodos geofísicos. Desde o seu início foi muito utilizado nos estudos exploratórios de recursos minerais metálicos, já que estão normalmente associados a fontes magnéticas. A indústria de exploração de petróleo também fez e ainda faz intenso emprego dessa metodologia. Na pesquisa por metais base, os minerais, sobretudo aqueles portadores de ferro, têm elevada importância e a relação direta com jazidas/depósitos são bastante evidentes, em decorrência das propriedades físicas desses minerais. Em outros casos,

como o do petróleo, a magnetometria permite a identificação de estruturas, tais como domos e falhas, que podem condicionar a formação de jazidas.

O campo magnético terrestre (F) é produzido por um momento de dipolo localizado no centro da Terra, apontando para o sul e formando um ângulo em relação ao eixo de rotação, nomeado de declinação magnética. Os pontos em que o eixo do dipolo intercepta a superfície da Terra são denominados polos geomagnéticos (Figura 14A e B). As linhas do campo magnético atravessam a esfera terrestre e são paralelas com a superfície nas proximidades do equador e perpendiculares nos polos magnéticos. Sendo composto por três partes, o campo principal

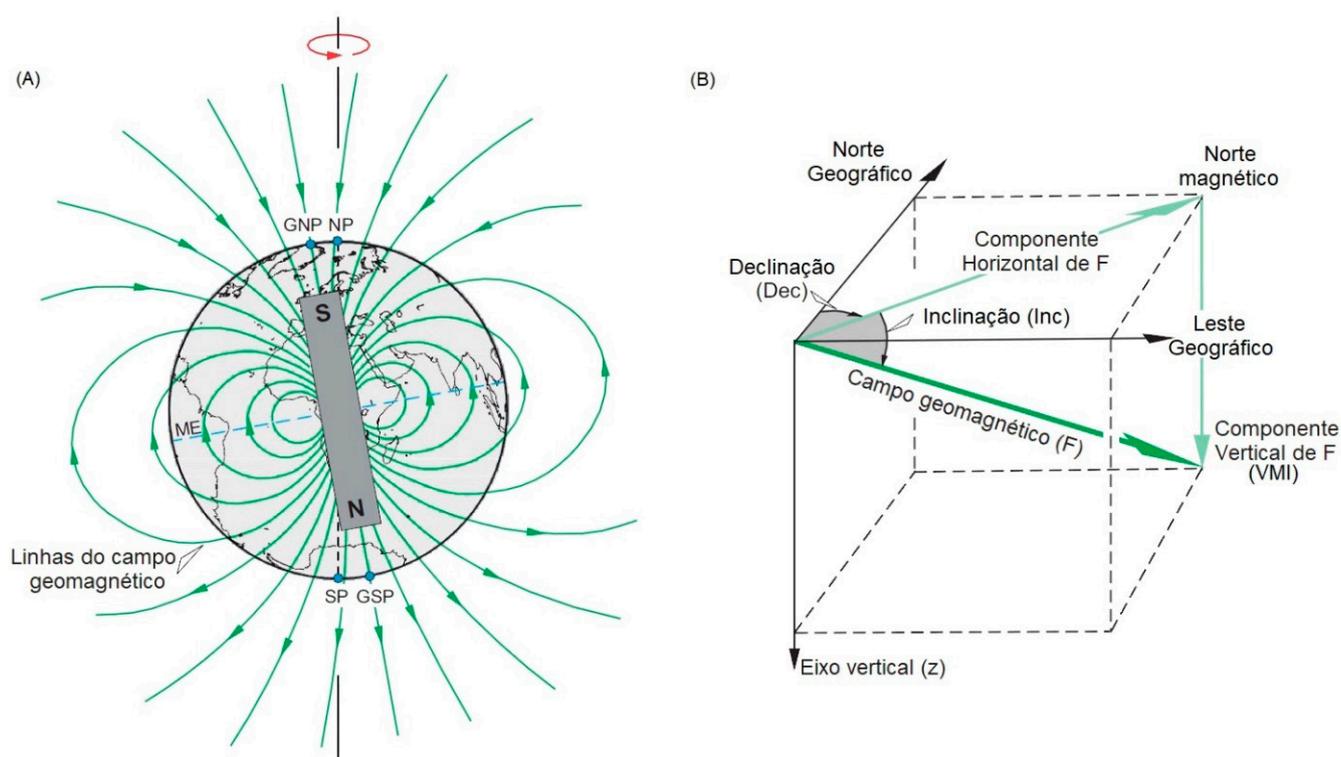


Figura 14: A – Representação esquemática do Campo Magnético da Terra (F), que pode ser comparado com um dipolo de um grande ímã cuja direção forma um ângulo agudo (Dec) com o eixo de rotação, norte geográfico, que pode variar dependendo da região, polo norte geomagnético (GNP), polo sul geomagnético (GSP), equador magnético (ME), polo norte geográfico (NP) e polo sul geográfico (SP). B – A decomposição do campo geomagnético (F) nos componentes horizontal e vertical, o vetor do campo geomagnético é definido pelos ângulos de inclinação (Inc) e declinação (Dec), intensidade do componente vertical do campo magnético (VMI). (modificado de DENTITH & MUDGE, 2014).

que tem origem no núcleo externo da Terra, o campo externo produzido por correntes elétricas que circulam a ionosfera e variam rapidamente e, variações do campo principal que são causadas por anomalias magnéticas locais geradas por rochas e minerais magnéticos próximos da superfície da Terra (TELFORD et al., 1990). No caso, o método magnetométrico consiste na medida da resultante da somatória vetorial de todos os campos magnéticos oriundos das mais diversas fontes magnéticas.

De acordo com Telford et al. (1990), todos os materiais podem ser classificados em três grupos de acordo com as suas propriedades magnéticas: diamagnético, paramagnético e ferromagnético. As substâncias diamagnéticas apresentam susceptibilidade magnética (μ) negativa. Isso significa que a magnetização induzida (B) por um campo externo (H) apresenta direção oposta à do campo H. As substâncias que não são diamagnéticas são denominadas paramagnéticas, ou seja, apresentam susceptibilidade magnética positiva. Os ferromagnéticos são materiais paramagnéticos no qual a interação entre os átomos é tão forte que ocorre um alinhamento de momentos de dipolos magnéticos.

A temperatura Curie é o ponto de excitação atômica a partir do qual um material perde as suas características ferromagnéticas e passa a se comportar como paramagnético,

por exemplo, o ferro (Fe) a 750°C, o níquel (Ni) a 310°C e a magnetita (Fe_3O_4) a 515°C.

A susceptibilidade magnética é um parâmetro adimensional que define a intensidade da magnetização induzida em uma rocha ($H = \mu \cdot B$). Tem relação direta com a quantidade e dimensão dos minerais magnéticos contidos nas rochas, os principais minerais magnéticos são magnetita, ilmenita (FeTiO_3) e pirrotita ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$, x variando entre 0.0 e 0.17). Sendo que a magnetita é o que apresenta os maiores valores de susceptibilidade.

Já entre as rochas, os basaltos e peridotitos são as que têm os maiores valores de susceptibilidade magnética (TELFORD et al., 1990).

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO RADIOMÉTRICO

O método radiométrico é baseado na detecção da emissão natural de radiação gama produzida pelo decaimento radioativo de vários radioisótopos (KEAREY et al., 2002).

O decaimento radioativo leva a formação de elementos mais estáveis e sua taxa de decaimento é exponencial, segue a fórmula $N = N_0 e^{-\lambda t}$, onde N é o número de átomos restantes após um tempo t, a partir de um número inicial N_0

o tempo $t = 0$, λ é a constante de decaimento característica de cada elemento (KEAREY et al., 2002).

A importância do método radiométrico nas últimas décadas se deve à grande demanda por minerais radioativos, provocada pela necessidade de combustíveis nucleares (KEAREY et al., 2002). Entretanto, levantamentos radiométricos também são muito úteis no mapeamento geológico para o reconhecimento e diferenciação de diversos tipos de rochas (PIRES & HARTHILL, 1989).

Na natureza ocorrem em torno de 50 isótopos radioativos, mas são quase todos muito raros ou fracamente radioativos. Em radiometria os elementos de maior interesse são o urânio (^{238}U), o tório (^{232}Th) e o potássio (^{40}K), pois são os únicos elementos com radioisótopos que produzem radiação gama com energia suficiente para serem medidos em levantamentos aéreos (MINTY, 1997). A janela de energia do potássio pode ser monitorada pelo fotopico de 1.460 MeV emitido pelo ^{40}K na faixa da radiação gama. Já o tório e o urânio podem ser monitorados nas janelas de energia pelos produtos das suas respectivas séries de decaimento. Para o tório é utilizado o radioisótopo tálio (^{208}Tl) com fotopico de 2.614 MeV, enquanto o urânio é detectado pelo fotopico emitido pelo radioisótopo bismuto (^{214}Bi) com 1.765 MeV (Figura 15), (IAEA, 2003). A área da janela espectral é diretamente proporcional à concentração do elemento em superfície e a área total dessa da faixa espectral da radiação gama corresponde a contagem total (Figura 15). Em média, a crosta terrestre contém 2,5 % de

potássio, 12 ppm de tório e 3,5 ppm de urânio (DICKSON & SCOTT, 1997).

Existe um grande número de minerais radioativos, porém os mais comuns são aqueles apresentados na Tabela 4.

PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS

Neste item estão descritas as metodologias utilizadas para o tratamento dos dados magnetométricos objetivando sua apresentação em formato adequado para os trabalhos de interpretação e integração geológica. De acordo com Isles & Rankin (2013), a tarefa de controle de qualidade de um levantamento aeromagnetométrico requer experiência geofísica especializada e nem sempre é realizada pela pessoa responsável pela interpretação dos dados. Os principais problemas para o intérprete são os níveis de ruído nos dados, que precisam ser baixos e sua remoção não deve afetar os objetivos dos trabalhos de interpretação e correlação geológica.

Os projetos aerogeofísicos contratados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) incluem contratualmente que as companhias que realizam os aerolevantamentos entreguem os resultados com os dados nivelados em malhas interpoladas e, no caso dos dados magnetométricos, com o efeito do campo magnético da Terra removido por meio de um modelo do campo denominado *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF).

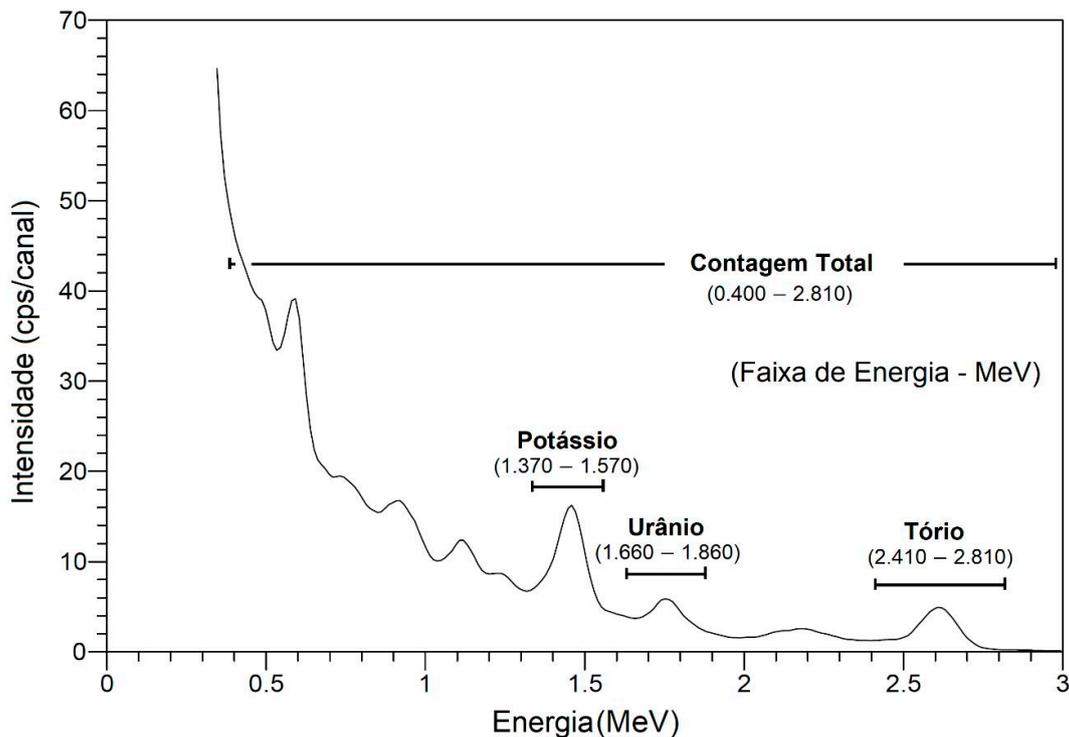


Figura 15: Espectro típico correspondente à faixa da radiação gama natural na superfície terrestre com as posições das janelas espectrais (fotopicos) para os canais dos elementos radiométricos potássio, urânio e tório (modificado de IAEA, 2003).

Tabela 4: Principais minerais radioativos de acordo com Telford *et al.* (1990).

Mineral	Ocorrência
Potássio	
Feldspatos (ortoclásio, microclinas)	Rochas ígneas ácidas e pegmatitos
Alunita	Rochas ígneas ácidas e pegmatitos Alterações em ácidas vulcânicas
Silvita, carnalita	Depósitos salinos em sedimentos
Tório	
Monazita	Granitos, pegmatitos, gnaisses
Torianita	Granitos, pegmatitos, aluviões
Torita, uranotorita	Granitos, pegmatitos, aluviões
Urânio	
Uraninita	Granitos, pegmatitos
Carnotita	Arenitos
Gumita	Associadas com uraninita

Plataforma de Processamento

Nos trabalhos de processamento são empregadas várias ferramentas disponíveis no programa GEOSOFT *Oasis Montaj* 9.7 (GEOSOFT, 2019) e os mapas foram elaborados no ArcGIS 10.7 (ARCGIS, 2019). Entre as ferramentas disponíveis, as mais utilizadas foram: *Geophysic Leveling* para o nivelamento, *Grid and Image* para interpolação e apresentação dos resultados em mapas, *GridKnit* para as junções dos diferentes projetos em uma mesma malha e *MAGMAP filtering* para a aplicação de transformações e filtros nos dados.

Interpolação

Os dados são entregues pelas companhias de aerolevantamentos já interpolados. Entretanto, pode ser necessária, de acordo com a necessidade do geofísico, reprocessamento dos dados em diferentes etapas do seu projeto de trabalho. A interpolação é o processo em que se determina o valor de uma função em um ponto interno de um intervalo a partir dos valores dessa função nas fronteiras desse intervalo. Esse procedimento foi executado com o objetivo de transformar dados discretos em um mapa de registro contínuo, mais adequado à interpretação. A partir dos bancos de dados produzidos pelos levantamentos aerogeofísicos, os dados corrigidos e nivelados foram interpolados em uma malha de 125 x 125 m pelos métodos de *Bi-directional*

para os dados magnetométricos, da mínima curvatura para os dados gamaespectrométricos e de *krigagem* com malha de 1.000 x 1.000 m para os dados gravimétricos terrestres. O método *Bi-directional* produz malhas interpoladas em duas etapas de processamento: a) cada linha é interpolada ao longo da linha original do levantamento produzindo valores na intersecção de cada linha da malha com o valor observado; b) os pontos de intersecção para cada linha são interpolados na direção ortogonal para produzir valores em cada ponto requerido da malha. O método da mínima curvatura usa *splines* bidimensionais para ajustar os dados da linha de voo à superfície da malha, o procedimento é iterativo e os pesos vão sendo adaptados de modo que a curvatura da superfície da malha é minimizada (BRIGGS, 1974). Já a *krigagem* foi desenvolvida inicialmente para o estudo dos depósitos de ouro da África do Sul por Daniel G. Krige em 1951, que verificou que para encontrar sentido nas variâncias era preciso levar em conta as distâncias das amostras, e Matheron completou com o desenvolvimento da teoria das variáveis regionalizadas (CRESSIE, 1990). Esta é uma técnica que leva em consideração a natureza estocástica dos dados, logo, os cálculos abrangem explicitamente a questão da variação não espacial para o resultado de cada ponto da malha, decompondo uma variável regionalizada em três componentes: 1) uma tendência (*trend*), 2) um componente espacialmente dependente ou autocorrelacionado e 3) um componente de ruído.

Junção dos Diferentes Projetos

No estado de Minas Gerais, o levantamento completo de todo o estado com dados aerogeofísicos necessitou da execução de vinte e seis projetos (Figura 11). A primeira tarefa no processo de união dos dados é transformar o sistema de coordenadas original de cada projeto num único sistema de coordenadas, no caso, foi utilizado para padronização o sistema SIRGAS 2000. Posteriormente, uma das tarefas mais importantes deste projeto foi juntar os dados magnetométricos e gamaespectrométricos de cada projeto aerogeofísico em uma única malha para todo o estado. Esta tarefa implicou algumas vezes na necessidade do reprocessamento e nivelamento dos dados brutos. Para junção dos projetos foi empregada a ferramenta *GridKnit*, que utiliza técnicas de fusão de malhas que reduzem o efeito de artefato e ocorre geralmente nas interfaces entre os dados de diferentes projetos. Esta tarefa normalmente é muito mais complicada quando aplicada aos dados gamaespectrométricos, por causa das enormes diferenças técnicas entre os sensores e/ou equipamentos utilizados em cada aerolevantamento. O canal do urânio equivalente é onde ocorrem os principais problemas na união dos dados, em alguns casos resultam em mapas que visivelmente se observa um “degrau” entre os aerolevantamentos, ou seja, os dados ficam defasados.

A qualidade das junções depende também do tamanho da área de interseção entre os aerolevantamentos geofísicos. Na maioria das vezes, quanto maior a área, melhor será o resultado (Figura 16). Os limites entre os projetos aerogeofísicos das áreas SJC-RES e 14, IF e 02, RV e 02 e das áreas 18 e 19 não possuem área de sobreposição, logo, nos mapas geofísicos finais do estado podem aparecer alguns “buracos”, que representam vazios entre os aerolevantamentos geofísicos decorrentes da falta de dados, ou uma ligeira marca da linha de sutura (Figura 16).

A utilização de inúmeros projetos aerogeofísicos culminou em centenas de tentativas para encontrar uma ordem adequada das junções que resultasse em mapas de qualidade satisfatória. Para os dados magnetométricos os melhores produtos foram obtidos seguindo a ordem de junção descrita no organograma da Figura 17, e para os dados gamaespectrométricos seguindo a ordem do organograma da Figura 18.

É sempre recomendado também verificar as direções das linhas de voo e, em áreas de estudo com mais de um projeto aerogeofísico, a localização dos limites entre os aerolevantamentos geofísicos, para verificar se existem “artefatos” não geológicos que podem prejudicar as interpretações.

Aplicação de Transformações e Filtros nos Dados Aeromagnetométricos

Os procedimentos de filtragens dos dados aeromagnetométricos foram efetuados por meio do *MAGMAP filtering*. Esse sistema é constituído por um pacote de programas que aplicam filtragens bidimensionais em dados interpolados de campo potencial, magnéticos e gravimétricos, no domínio do número de onda. As técnicas utilizadas são adaptadas dos trabalhos de Bhattacharyya (1966) e Spector & Grant (1970). Os filtros são aplicados aos dados após um pré-processamento para remover tendências, preenchimento de espaços vazios e sua transformação para o domínio do número de onda por meio da técnica de *Fast Fourier Transform (FFT)*. Após filtragem, a malha de dados é transformada de volta para o domínio do espaço. Nos itens a seguir, onde estão apresentados os mapas aerogeofísicos, para cada produto resultante de uma transformação ou filtragem existe uma breve descrição dos fundamentos teóricos e utilidades práticas dos resultados.

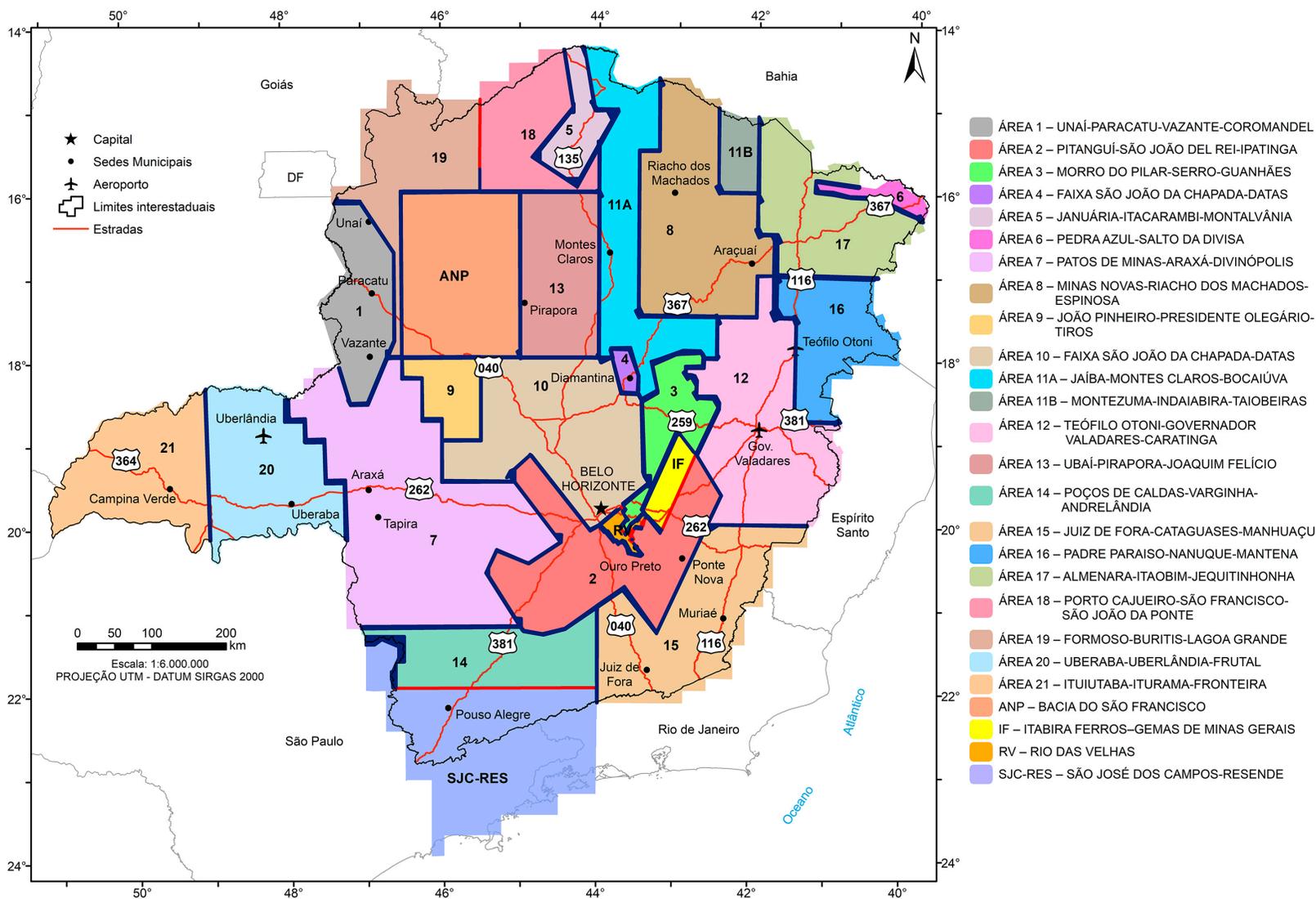


Figura 16: Em destaque as áreas de interseção entre os aerolevantamentos geofísicos, observar que em alguns trechos não existem áreas de interseção.

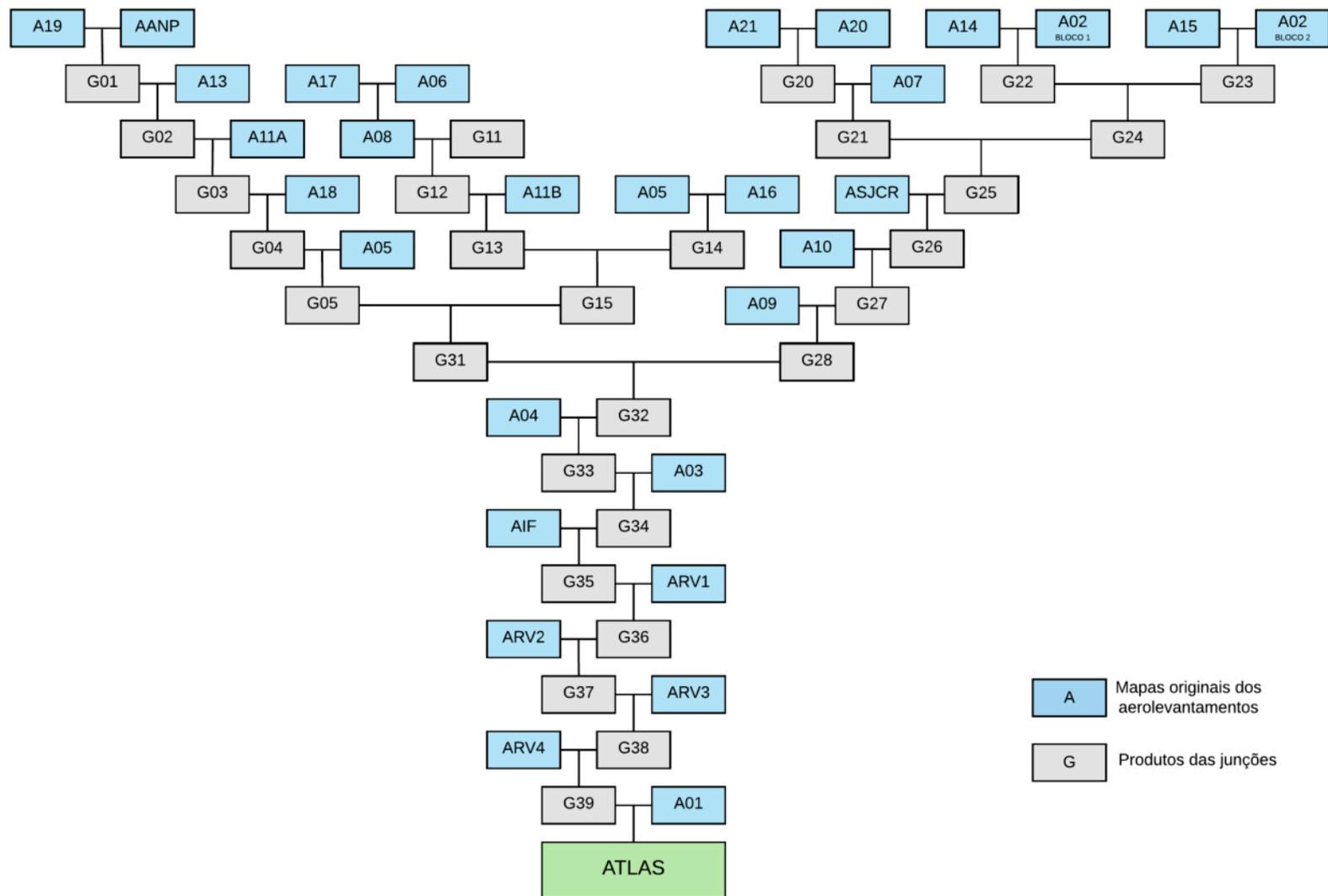


Figura 17: Organograma com a ordem das junções dos aerolevamentos geofísicos (A) para os dados magnetométricos. A nomenclatura utilizada no organograma segue a mesma numeração dos projetos aerogeofísicos da Tabela 3 e da Figura 11. Para o projeto SJC-RES foi utilizado ASJCR.

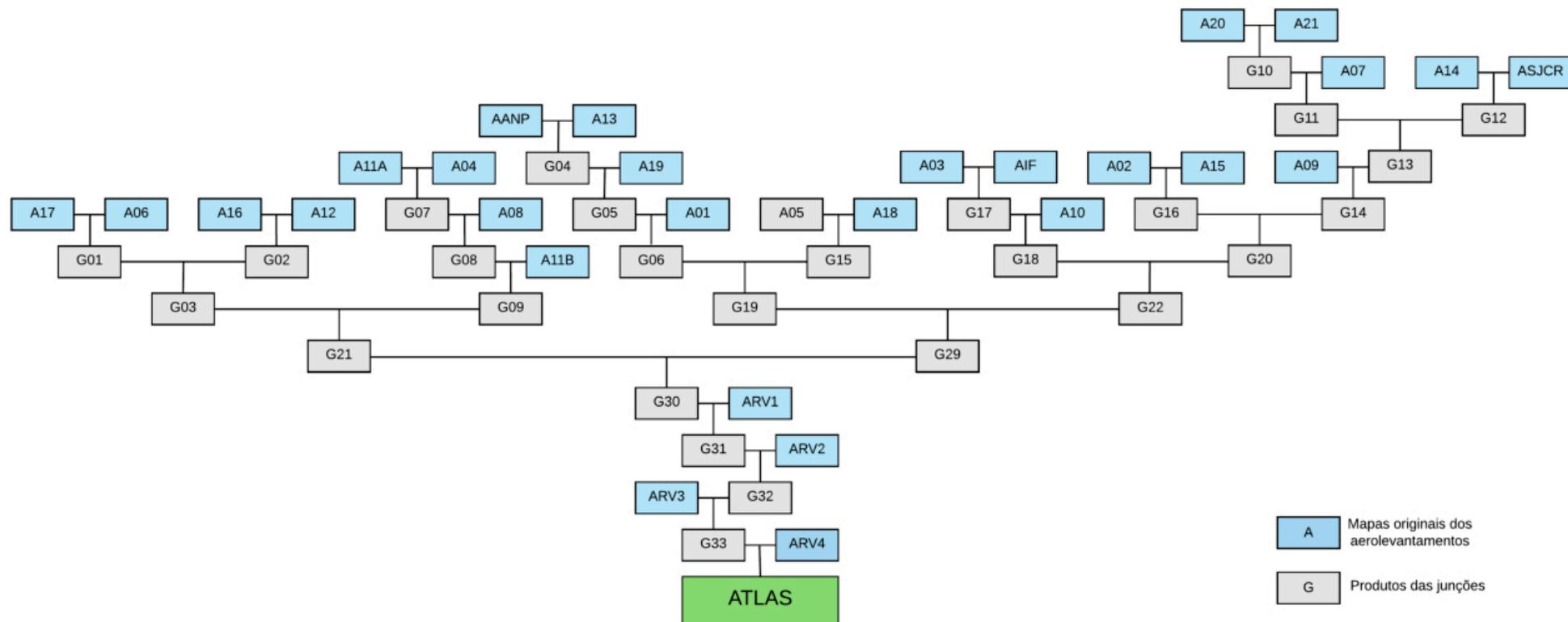


Figura 18: Organograma com a ordem das junções dos aerolevantamentos geofísicos (A) para os dados gamaespectrométricos. A nomenclatura utilizada no organograma segue a mesma numeração dos projetos aerogeofísicos da Tabela 3 e da Figura 11. Para o projeto SJC-RES foi utilizado ASJCR.

▶ MAPAS AEROMAGNETOMÉTRICOS

Um das principais finalidades do uso de dados magnetométricos é encontrar corpos de minério. Só com uma extensa cobertura de dados magnetométricos é possível descobrir novas jazidas de minerais metálicos. De acordo com ISLES & RANKIN (2013), sem os extensos levantamentos magnetométricos realizados na Austrália e Canadá grandes minas de classe mundial não teriam sido encontradas.

Um das mais importantes contribuições dos dados magnetométricos é sua potencialidade para desvendar a terceira dimensão dos dados geológicos. Feições geológicas como corpos e estruturas podem ser inferidas em profundidade por meio de interpretações e modelagens. As zonas de cisalhamentos são um dos objetos geológicos mais evidentes em mapas magnetométricos; contudo, sua contribuição para a delimitação tridimensional de formações vulcânicas, intrusões de rochas básicas e de granitoides magnético é fundamental.

Atualmente, em todo mundo, sobretudo nos países com dimensão continental, os governos tem empreendido um grande esforço de levantamento de dados magnetométricos

com vistas ao reconhecimento geológico de seus territórios. O Brasil foi um entre esses países que nas últimas décadas empreendeu uma grande campanha de levantamentos aerogeofísicos como apresentado na introdução deste atlas. No Brasil, entre os principais empregos dos dados magnetométricos está o mapeamento geológico.

No início das pesquisas para localização de jazidas de petróleo e antes do advento e avanços nas técnicas do método sísmico, a magnetometria foi uma ferramenta importante. Entretanto, a mesma técnica aplicada com dados magnetométricos na pesquisa de petróleo pode ser empregada para estudos de água subterrânea. Estruturas, tais como zonas de cisalhamentos, facilmente identificadas pelo método, podem estar condicionando depressões tectônicas com maior acúmulo de água ou barreiras hidráulicas, que dificultam o fluxo da água e compartimentam bacias sedimentares. Nas rochas cristalinas, alinhamentos magnéticos são correlacionados com falhas ou zonas de fraturas regionais, com importância na identificação de áreas de detalhes para prospecção de aquíferos fraturados.

▶ ANOMALIAS MAGNETOMÉTRICAS

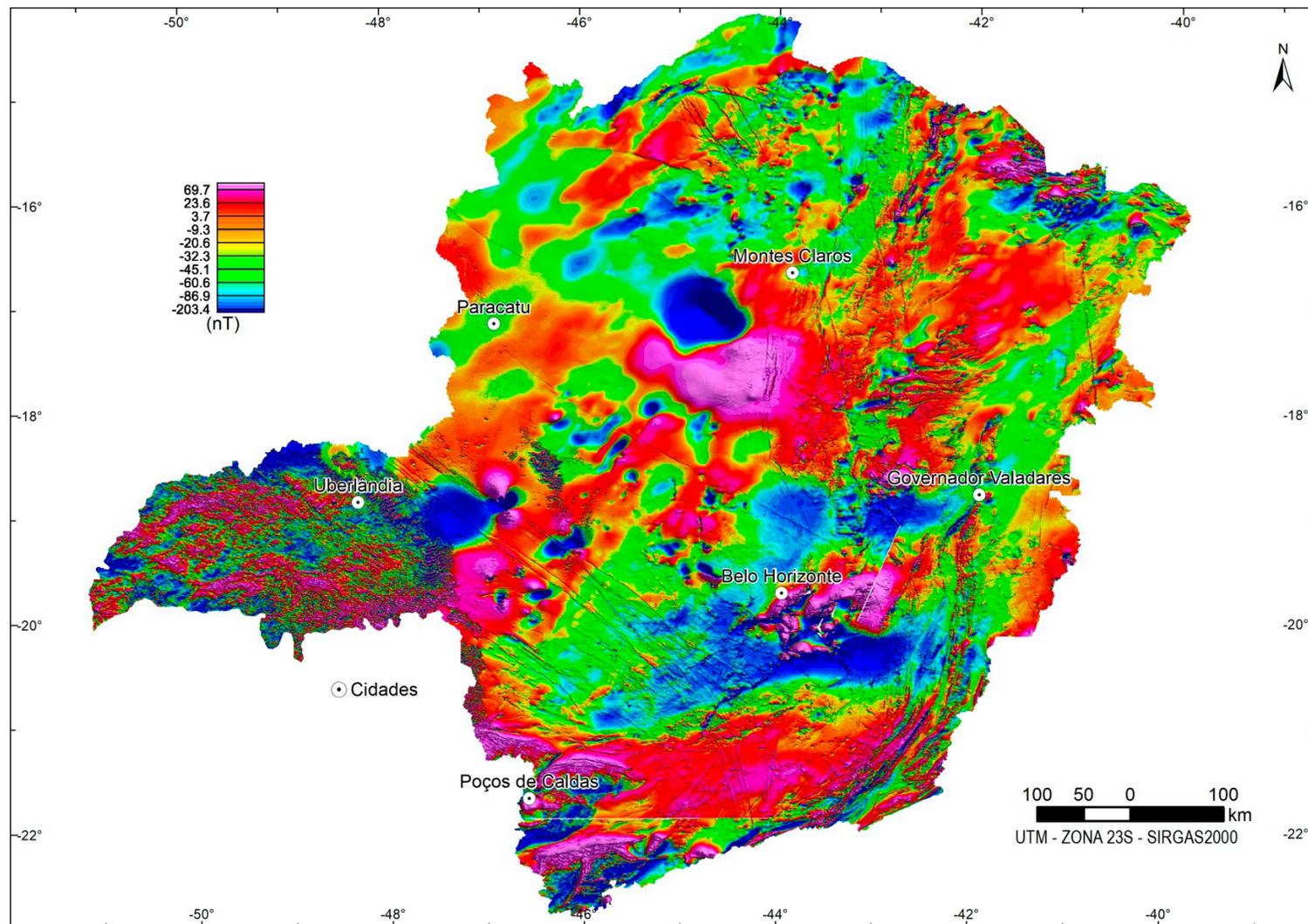
PARA A INTEPRETAÇÃO de dados magnetométricos regionais e sua aplicação em estudos geológicos é necessária a remoção de um modelo de campo magnético da Terra (*International Geomagnetic Reference Field - IGRF*). O resultado da diferença entre os valores medidos e os calculados pelo modelo são considerados anômalos e são empregados nas interpretações das fontes/anomalias magnéticas, domínios magnéticos, alinhamentos magnéticos e modelagens dos dados para integração com informações geológicas e, conseqüentemente, de recursos minerais.

Observa-se na Anomalia Magnetométrica que o padrão mais frequente é de emparelhamento do seu dipolo, positivo e negativo, com o positivo a noroeste e o negativo a sudeste. Este padrão é característico de levantamentos próximos do equador magnético. Neste caso, a relação frequência-amplitude das anomalias magnéticas permite interpretá-las qualitativamente em termos de dimensão e profundidade das fontes magnéticas. Nos trabalhos de mapeamento e/ou prospecção devem ser destacadas as anomalias magnéticas cuja relação frequência-amplitude indique profundidades rasas. Nas latitudes magnéticas atuais do estado de Minas Gerais, as fontes das anomalias magnéticas devem ser procuradas próximas dos centros dos dipolos. Mas, variações no formato desses dipolos são importantes, pois podem indicar diferenças quanto a forma, sentido de mergulho e profundidade do corpo magnético.

Para Isles & Rankin (2013), embora a Anomalia Magnetométrica sem aplicação de transformações ou filtros possa não ser a forma de dados mais usada na interpretação, deve sempre ser considerada como o passo inicial na interpretação e um ponto de referência essencial em relação aos produtos transformados e/ou filtrados.

Os mapas magnetométricos serão apresentados na seqüência, em alguns casos, com escalas de cores variadas, e dependendo da escala utilizada será possível enfatizar determinadas características, por exemplo, a escala de cinza para o mapa do campo magnético anômalo enfatiza muito bem o relevo magnético.

Mapa do Campo Magnético Anômalo



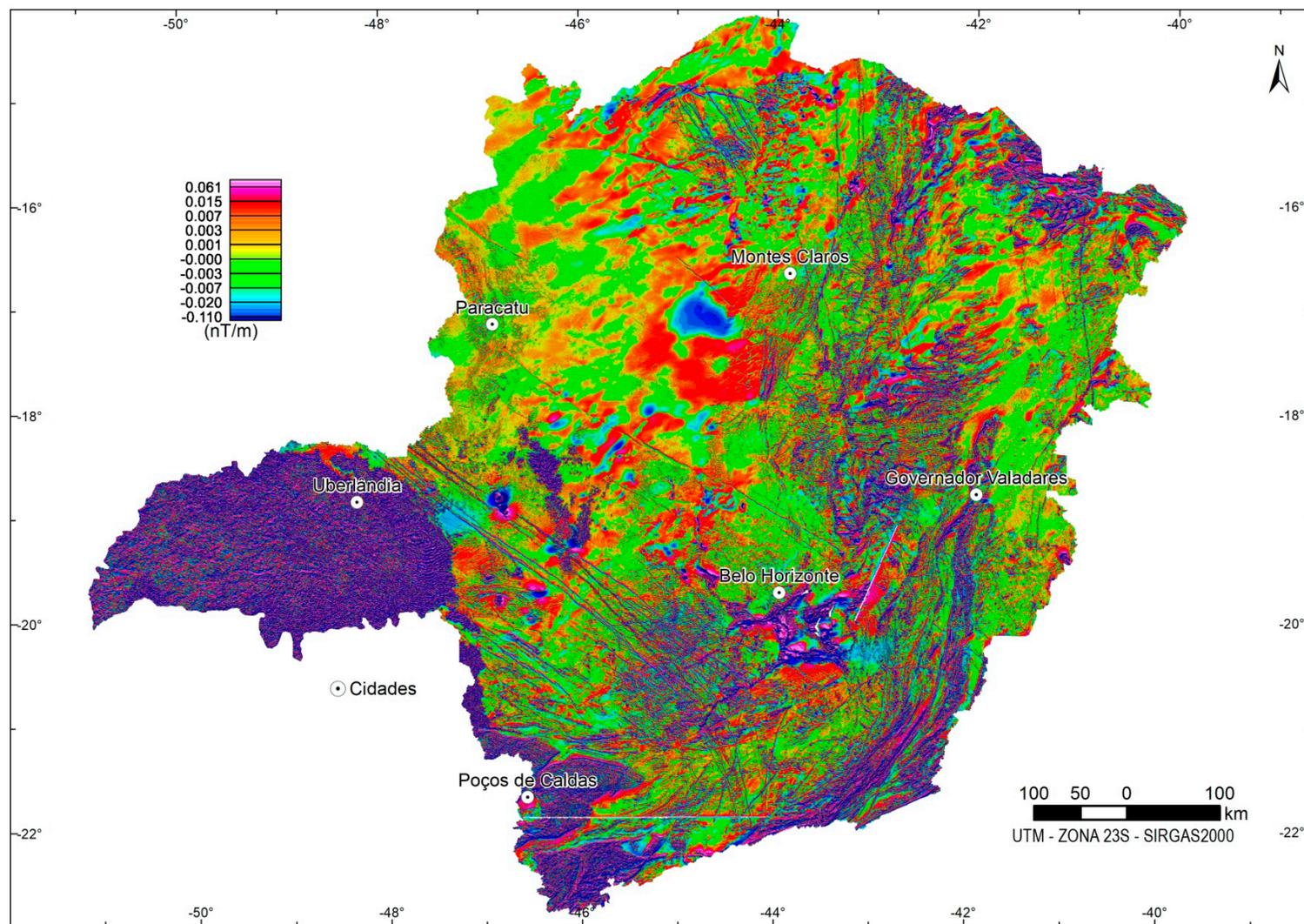
▶ 1ª DERIVADA VERTICAL DA ANOMALIA MAGNETOMÉTRICA – DZ1

AS DERIVADAS SÃO filtros empregados para enfatizar fontes rasas e são muito utilizadas nas interpretações dos lineamentos magnéticos. Pela característica desses operadores de removerem fontes magnéticas profundas apresentam boa aplicabilidade no entendimento da tectônica rasa e em trabalhos de prospecção mineral. O operador matemático da 1ª derivada é definido pela seguinte expressão:

$$L(r) = r^n,$$

onde $n=1$ é a ordem de diferenciação aplicada.

Mapa da Primeira Derivada Vertical da Anomalia Magnetométrica



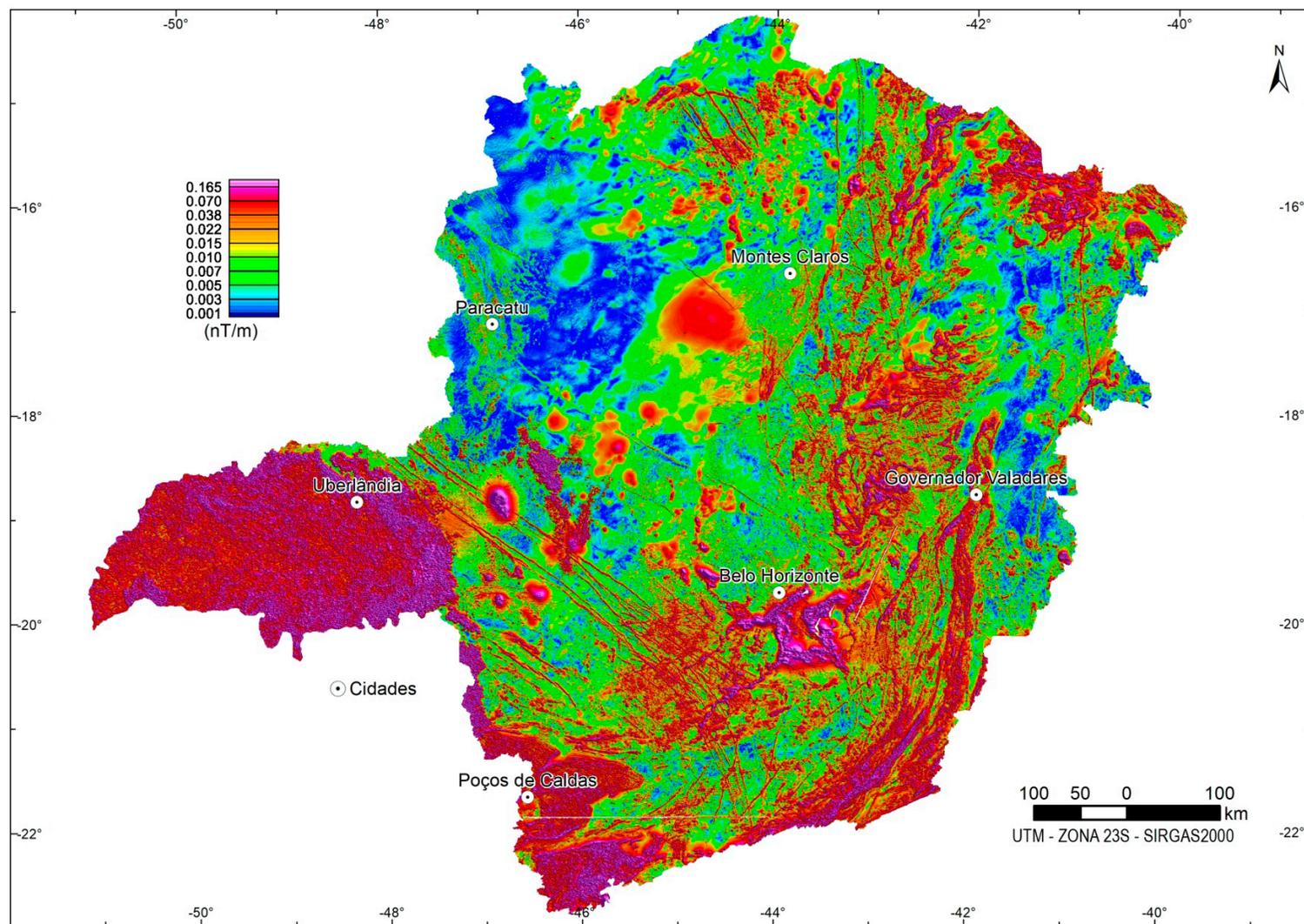
▶ GRADIENTE TOTAL DA ANOMALIA MAGNETOMÉTRICA

ANTERIORMENTE DENOMINADO de Amplitude do Sinal Analítico (MACLEOD et al., 1993), o Gradiente Total (GT) é uma técnica de filtragem muito eficiente na determinação dos limites e na profundidade dos corpos magnéticos. Sua função é expressa por um vetor de adição de duas componentes reais nas direções horizontais, x e y , e por mais uma componente imaginária na direção vertical z . O Gradiente Total é uma opção alternativa muito boa à redução ao polo para o problema de localização de fontes magnéticas em baixas latitudes. Por causa do emprego de derivadas, este filtro remove fontes profundas, porém evidencia e define muito bem a localização das fontes rasas, tendo um emprego bastante eficiente em estudos de prospecção mineral e na definição de pontos para perfuração de corpos magnéticos. O operador matemático do Gradiente Total é definido pela seguinte expressão:

$$GT = \sqrt{\frac{\partial M^2}{\partial x} + \frac{\partial M^2}{\partial y} + \frac{\partial M^2}{\partial z}},$$

onde M é a Anomalia Magnetométrica e x e y são direções horizontais e z é a direção vertical.

Mapa do Gradiente Total da Anomalia Magnetométrica



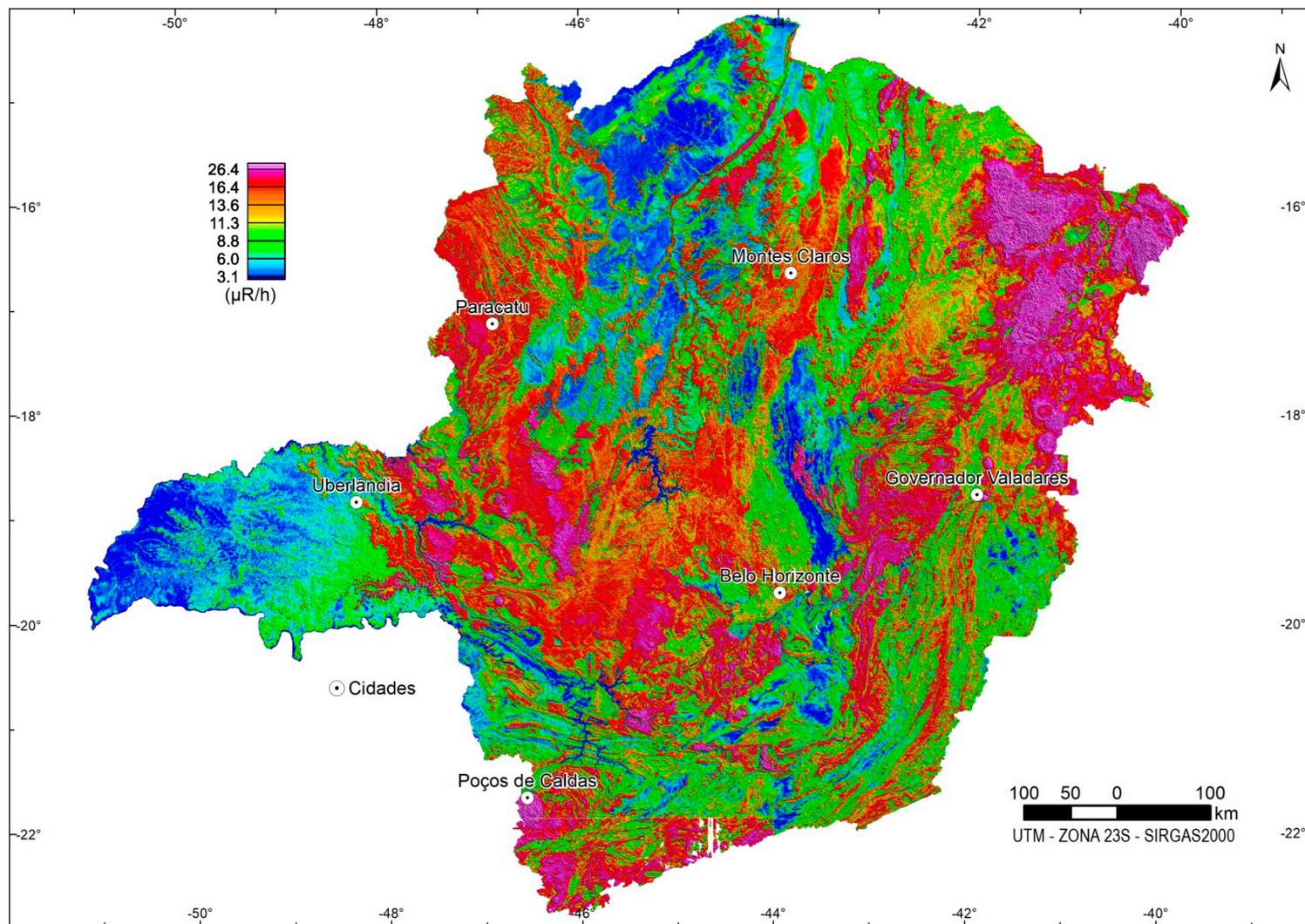
MAPAS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS

O método gamaespectrométrico mede a taxa e a energia da radiação gama proveniente dos elementos potássio, tório e urânio contidos nas rochas (MINTY, 1997). Nos levantamentos são empregados cristais detectores, geralmente de iodeto de sódio (NaI). Os cristais absorvem a radiação gama e a cintilação dessa radiação no cristal pode ser medida em contagem por segundo (cps). Quando o sistema está calibrado é possível quantificar o potássio em porcentagem (%), o tório e o urânio em partes por milhão (ppm). Contudo, não é medida diretamente a intensidade da energia desses radioisótopos, e sim, dos radioisótopos filhos provenientes do decaimento radioativo, no caso, ^{40}K para o potássio, tálio (^{208}Tl) para o tório e bismuto (^{214}Bi) para o urânio. Por este motivo, foi convencionado o uso de “e” antes dos símbolos do urânio (eU) e do tório (eTh), para indicar que as concentrações são equivalentes. É importante enfatizar que o método gamaespectrométrico é empregado para investigação de variações que ocorrem apenas na superfície da rocha ou solo, pois a radiação gama em média não atravessa mais do que meio metro de rocha. Qualquer obstáculo não radioativo sobre a rocha causa supressão do sinal. Por exemplo, uma cobertura de 20 cm de areia quartzosa é capaz de suprimir metade da radiação da rocha. Por esse motivo, é necessário

ao intérprete levar em consideração o efeito causado por coberturas sedimentares alóctones, vegetação densa e corpos d’água que ocorrem na área do levantamento geofísico. Neste último caso, rios que carregam muito material erodido em suspensão na água, podem apresentar sinal radioativo, como é o caso dos rios da região amazônica. Por outro lado, os rios secos da região semiárida do nordeste do Brasil podem apresentar aluviões com sinal radioativo de material que foi carregado por longas distâncias.

As concentrações dos elementos potássio, o tório e o urânio aumentam nas rochas ácidas e diminuem nas rochas básicas. Entre eles, o tório tem o comportamento menos móvel, enquanto o urânio é o mais móvel, mas é o cátion potássio o mais solúvel em água nas condições em superfície. Comumente, o urânio quando liberado das rochas hospedeiras, tende a ser absorvido pelos minerais argilosos formados pelo intemperismo. De outra forma, nas rochas sedimentares arenosas, a existência de anomalias radiométricas indica a presença de minerais pesados, tais como, zircão e monazita, ricos em tório. Também, é possível inferir pela observação prática e como regra geral que nas rochas graníticas o aumento de concentração desses radioelementos é às vezes também uma indicação do aumento da alcalinidade.

Mapa Gamaespectrométrico da Contagem Total

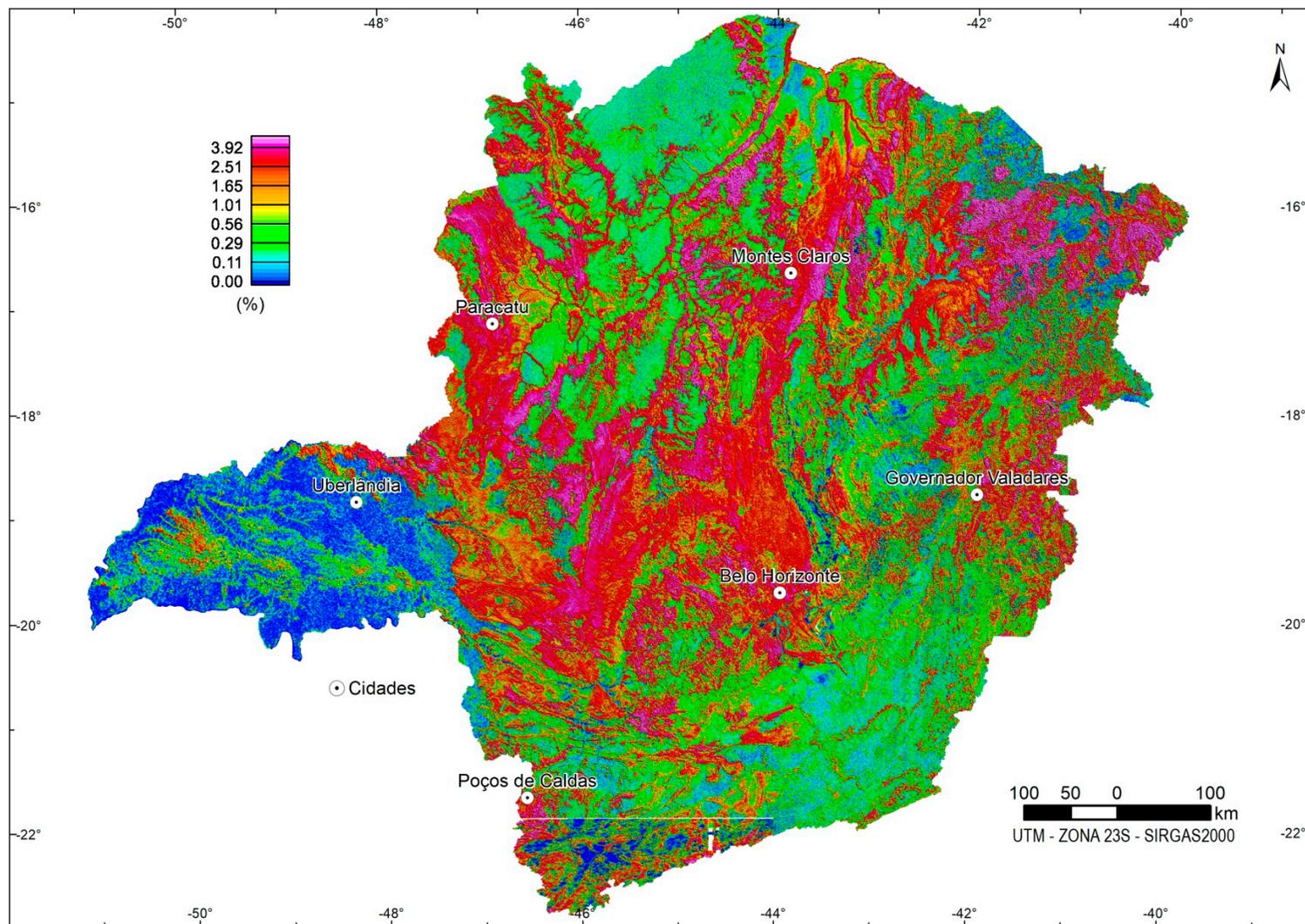


► POTÁSSIO

O POTÁSSIO É UM METAL ALCALINO, de cor prateada, mole, bom condutor de calor e eletricidade, oxidado facilmente e, depois do lítio (Li), é o metal mais leve. Em virtude de sua alta reatividade não é encontrado na forma metálica naturalmente no Planeta Terra. Devido à similaridade entre os raios atômicos, pode ser substituído por rubídio (Rb), céσιο (Cs), bário (Ba), chumbo (Pb) e tálio (Tl). É um dos maiores constituintes dos minerais formadores de rocha e o sexto mais comum na natureza, depois do cálcio (Ca). Durante a diferenciação magmática o mesmo se concentra progressivamente em K-feldspatos, como o ortoclásio e microclina, e outros silicatos, entre eles alunita, leucita e muscovita, o que faz com que seja mais enriquecido em rochas ácidas do que básicas (KOLJONEN et al., 1997). Pode também estar presente em soluções hidrotermais associado às mineralizações de cobre pórfiro e em pegmatitos (MINEROPAR, 2005). Minerais de minério: evaporitos, como a silvinita, mistura de silvita (KCl) e halita (NaCl), nitro ou caliche, rocha sedimentar contendo vários sais, carnalita ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), polialita ($\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cainita ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), langbeinita ($\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$), schoenita ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e singernita ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (SUMÁRIO, 2009).

Principais utilidades: o principal uso do potássio (K) é como fertilizante na agricultura, proveniente de sais como sulfatos e cloretos, em complementação ao uso de nitratos e fosfatos. A liga metálica de K-Na é usada como meio de transferência de calor. Como agente redutor é utilizado em aplicações terapêuticas e na produção de sal de cozinha “sem” sódio (Na). Impactos biológicos: seus sais são essenciais para os processos vitais. É um macronutriente não tóxico, ativando reações enzimáticas. É um elemento importante para o crescimento das plantas e da dieta humana. Os cátions de potássio (K^+) assim como os de sódio (Na^+) agem nas membranas celulares na transmissão de impulsos eletroquímicos dos nervos e fibras musculares. Por outro lado, os sais de potássio são extremamente tóxicos quando injetados na corrente sanguínea. A mobilidade ambiental depende do pH do meio, em condições oxidantes ($\text{pH} < 4$ e $5 < \text{pH} < 8$) e redutoras são ligeiramente móveis (LICHT et al., 2007). Os depósitos sedimentares químicos relacionados aos evaporitos são as principais fontes desses sais (BIONDI, 2003). Principais jazidas: Canadá, Rússia, Bielorrússia, Alemanha e China. O Brasil até 2009 ocupava a décima colocação em termos de reservas e produção mundial de sais de potássio. As principais reservas subterrâneas de sais de potássio no Brasil localizam-se nos estados de Sergipe, mina Taquari/Vassouras e Santa Rosa do Lima e no Amazonas em Fazendinha e Arari (SUMÁRIO, 2009).

Mapa Gamaespectrométrico do Potássio

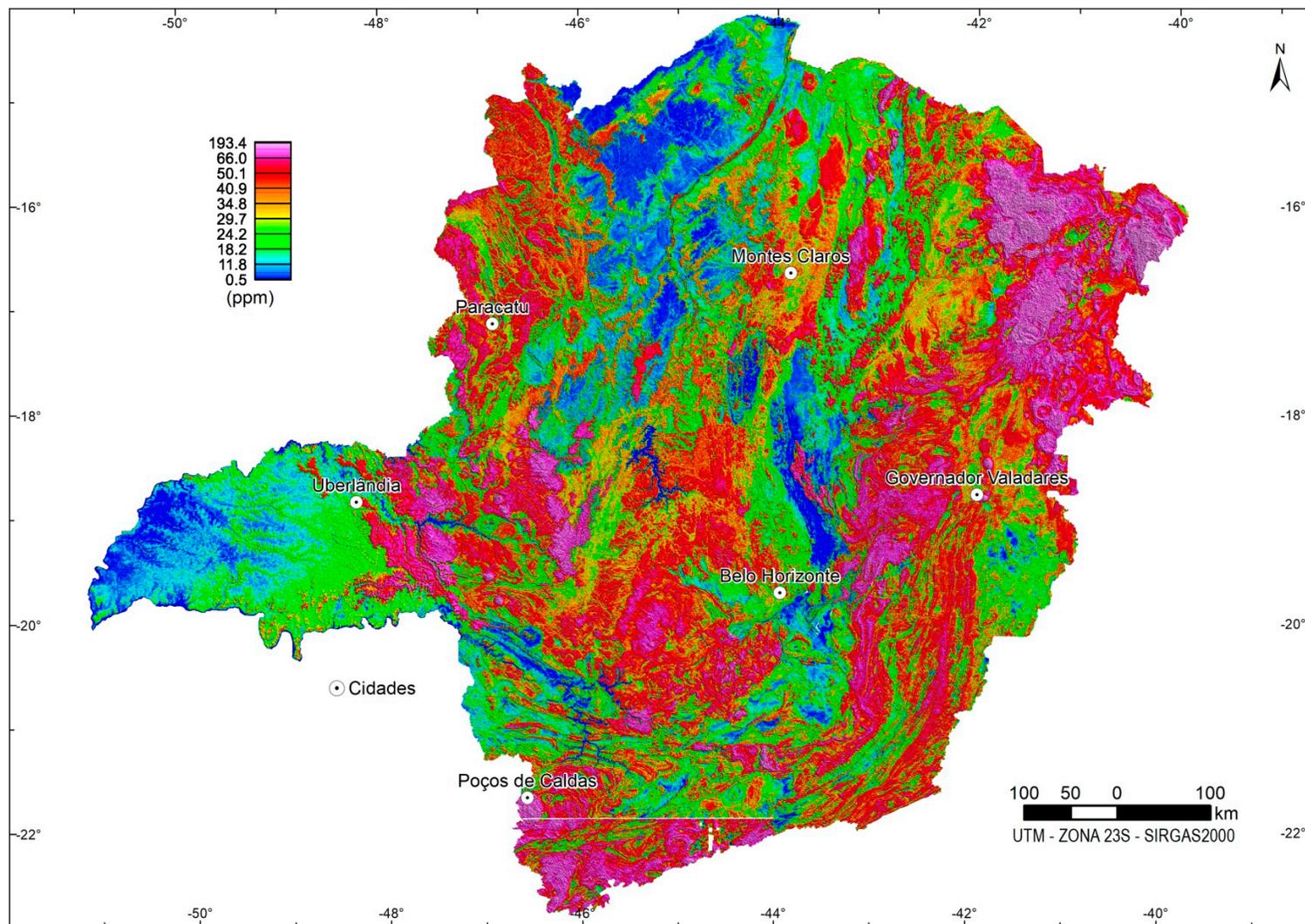


► EQUIVALENTE TÓRIO

O TÓRIO É UM METAL da série dos actínídeos, sendo o isótopo ^{232}Th o único disponível naturalmente. Em condição ambiente é sólido, de cor branca brilhante a prateada, e quando exposto ao ar é levemente radioativo. É um condutor intermediário de calor e corrente elétrica. Possui forte caráter litófilo concentrando-se na parte superior da litosfera, sendo sua distribuição fortemente controlada pelos estados de oxidação e pelo sistema Eh-pH (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 1992). O íon Th^{+4} é facilmente solúvel e rapidamente adsorvido ou precipitado em sedimentos de materiais hidrolisados. Os minerais de tório e os enriquecidos em tório são geralmente resistentes e possuem mobilidade reduzida ao intemperismo, concentrando-se assim nos sedimentos residuais em regiões de clima tropical, ou em areias e placers como minerais pesados (KOLJONEN et al., 1997). Minerais de minério: monazita (CeLaNdThPO_4), thorita (ThUSiO_4), euxenita ((Y,Ca,Ce,U,Th)(Nb,Ta,Ti) $_2\text{O}_6$), sendo também encontrado em outros minerais, associado aos ETR's (elementos terras raras) e urânio, bem como a esfalerita (ZnS), apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$) e zircão (ZrSiO_4).

Principais utilidades: como fonte de energia nuclear no processo de obtenção de urânio-233 (^{233}U), ligas metálicas com o magnésio (Mg), catalisador de reações, fabricação de filamentos de tungstênio (W) e células fotoelétricas. Impactos biológicos: o tório não tem função biológica conhecida e quando disperso no ar, geralmente pela mineração, pode ocasionar câncer de pulmão, pâncreas e sangue. Caso esteja acondicionado em algum recipiente e posteriormente seja exposto ao ar, poderá explodir. Mesmo com baixa radioatividade, oferece risco à saúde humana, pois pode originar espécies radioativas como o gás radônio-230 (^{230}Rn) e o chumbo-208 (^{208}Pb). Mobilidade ambiental: em condições oxidantes, seja com $\text{pH} < 4$ ou $5 < \text{pH} < 8$, ou ainda em ambiente redutor, o mesmo é imóvel (LICHT et al., 2007). Tipos de depósitos: em veios de rochas alcalinas, tipo Barra do Itapirapuã. Principais jazidas: Estados Unidos, Índia, Sri Lanka, Austrália e Madagascar. No Brasil, o tório é encontrado incluso no minério de ferro-nióbio nas minas de Catalão-Ouvidor em Goiás, e associado a uma série de intrusões alcalinas de idade neocretácea, situadas entre a borda NE da Bacia do Paraná e a borda SW do Cráton do São Francisco.

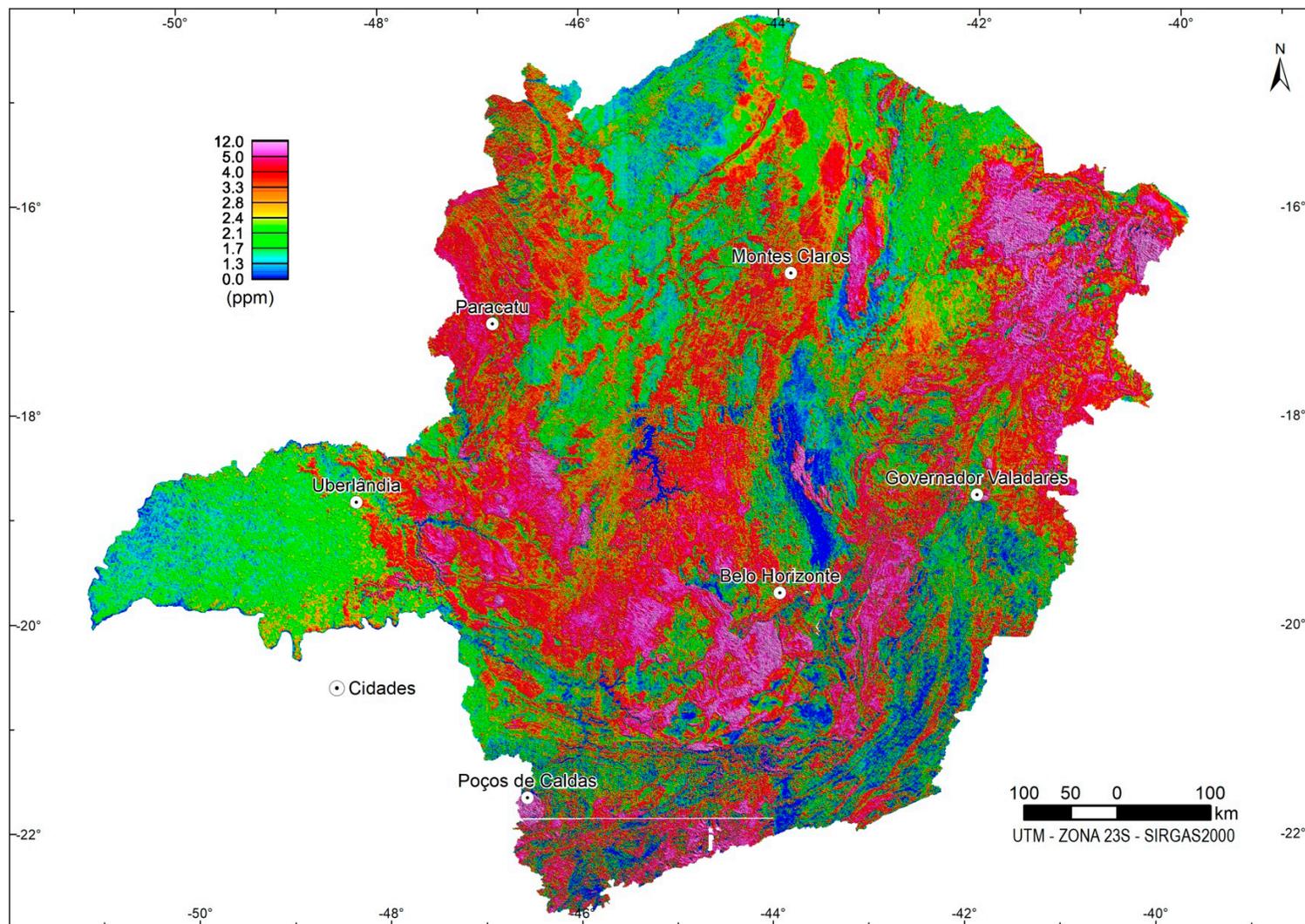
Mapa Gamaespectrométrico do Equivalente Tório



▶ EQUIVALENTE URÂNIO

O URÂNIO É UM METAL do grupo dos actínídeos, não possui cor característica, é denso, reativo, dúctil, maleável, oxida-se facilmente e possui como característica principal ser altamente radioativo. Existe na forma de três isótopos: ^{234}U , ^{235}U e ^{238}U . O íon U^{+4} concentra-se nos últimos estágios de diferenciação magmática, nas estruturas do zircão, allanita, esfalerita, apatita, monazita e minerais de tório, ítrio e lantanídeos. O urânio é comumente enriquecido nos granitos, pegmatitos e depósitos hidrotermais. Suas associações metalogenéticas são com vanádio (V), arsênio (As), fósforo (P), molibdênio (Mo), selênio (Se), chumbo (Pb) e cobre (Cu) (KOLJONEN et al., 1997). Em condições de intemperismo forma complexos orgânicos facilmente solúveis e móveis e relativamente estáveis em condições áridas. Na litosfera sua distribuição é controlada pelos estados de oxidação e pelo sistema Eh-pH. Por ser muito reativo, não é encontrado em seu estado elementar (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 1992). Minerais de minério: uraninita (UO_2), pechblenda (U_3O_8), variedade impura e amorfa da uraninita, carnotita ($\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), euxenita ($(\text{Y,Ca,Ce,U,Th})(\text{Nb,Ta,Ti})_2\text{O}_6$), autunita ($\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10-12\text{H}_2\text{O}$), torbenita ($\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2$), samarskita ($(\text{Y,Fe}^{3+},\text{U})(\text{Nb,Ta})\text{O}_4$ ou $(\text{Y,Fe}^{3+},\text{U})(\text{Nb,Ta})_5\text{O}_4$), margaritasita ($(\text{Cs,K,H}_3\text{O})_2(\text{UO}_2)_2\text{V}_2\text{O}_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$), lantinita (óxido de U^{+6} e U^{+4}) e albertnyite. Principais utilidades: como combustível nuclear para geração de energia elétrica, explosivos nucleares e produção de raios X. Impactos biológicos: não é um elemento nutriente e ocorre em alguns locais devido a vazamentos e acidentes em usinas nucleares e no armazenamento do lixo atômico. Por ser radioativo e bioacumulativo, pode causar sérios problemas ao sangue, ossos, rins e fígado, sendo altamente carcinogênico (ATSDR, 1999). Mobilidade ambiental: em condições oxidantes, com $\text{pH} < 4$ e $5 \leq \text{pH} \leq 8$, a mobilidade é moderadamente alta, e em condições redutoras mostra-se imóvel (MINEROPAR, 2005; KOLJONEN et al., 1997). Tipos de depósitos: relacionados com vulcânicas félsicas e máficas subaéreas; associado aos depósitos de Au em rochas sedimentares clásticas, tipo folhelhos negros (Suécia) ou conglomerados e arenitos tipo Witwatersrand; em rochas metamórficas regionais do tipo discordância junto com o Au; em rochas alcalinas (carbonatitos) e depósitos do tipo IOCG; relacionados a inconformidades (LICHT et al., 2007). Principais jazidas: Austrália, Cazaquistão, Canadá, Namíbia, Rússia, Níger e Uzbequistão. No Brasil, encontra-se na Bahia (Lagoa Real, município de Caitité), no Ceará (Itataia, município de Santa Quitéria) e Minas Gerais (Poços de Caldas).

Mapa Gamaespectrométrico do Equivalente Urânio



▶ MAPA DE COMPOSIÇÃO TERNÁRIA

ESTES MAPAS SÃO RESULTANTES de uma composição em falsa cor dos canais radiométricos de K, eTh e eU , em que para cada radioelemento é atribuída uma cor. Na Composição Ternária RGB (Figura 19), a escala de cor vermelha (*R-red*) é atribuída ao K, a escala de cor verde (*G-green*) é atribuída ao eTh e a escala de cor azul (*B-blue*) é atribuída ao eU . Quando os três apresentam elevadas concentrações, a soma das cores resulta na cor branca, já o inverso, a soma resultante é a cor preta. Porém, corpos d'água quando não possuem muito material em suspensão também apresentam cor preta porque na água limpa a radioatividade é baixa para os três radioelementos. Outro tipo de composição ternária, a CMY (Figura 19), a escala de cor ciano (*C-cyan*) é atribuída ao K, a escala de cor magenta (*M-magenta*) é atribuída ao eTh e a escala de cor amarela (*Y-yellow*) é atribuída ao eU . E quando os três apresentam elevadas concentrações, a soma das cores resulta na cor preta, já o inverso, a soma resultante é a cor branca.

Os mapas de composição ternária têm o potencial de distinguir muito bem as unidades geológicas a partir da análise combinada dos três radioelementos. Contudo, alguns cuidados são necessários na sua interpretação, sobretudo pela ambiguidade associada ao processo de interpretação e correlação geológica de dados geofísicos. Como exemplos, as cores avermelhadas que devem representar teores elevados de K e baixos teores de eTh e eU podem estar correlacionadas com granitos ou sedimentos imaturos como grauvas. A cor branca pode ser produzida por sienitos ou vulcânicas ácidas. A cor preta pode ser atribuída às rochas ultramáficas ou arenitos puros quartzosos. As cores esverdeadas podem ser associadas aos metassedimentos ou lateritas. Portanto, a interpretação de dados gamaespectrométricos requer a adição de informações complementares para que seja consistente no seu emprego em mapeamentos geológicos e na prospecção de recursos minerais.

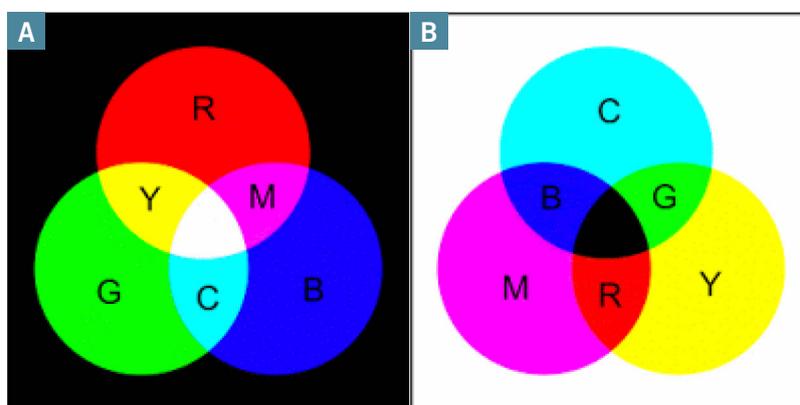


Figura 19: (A) Modelo do sistema de cores aditivas RGB. (B) Modelo do sistema de cores aditivas CMY.

A Figura 20 apresenta as diversas possibilidades de correlações geológicas que podem ser feitas a partir da Composição Ternária RGB. Além de demonstrar o seu potencial, também revela as muitas possibilidades de interpretações ambíguas.

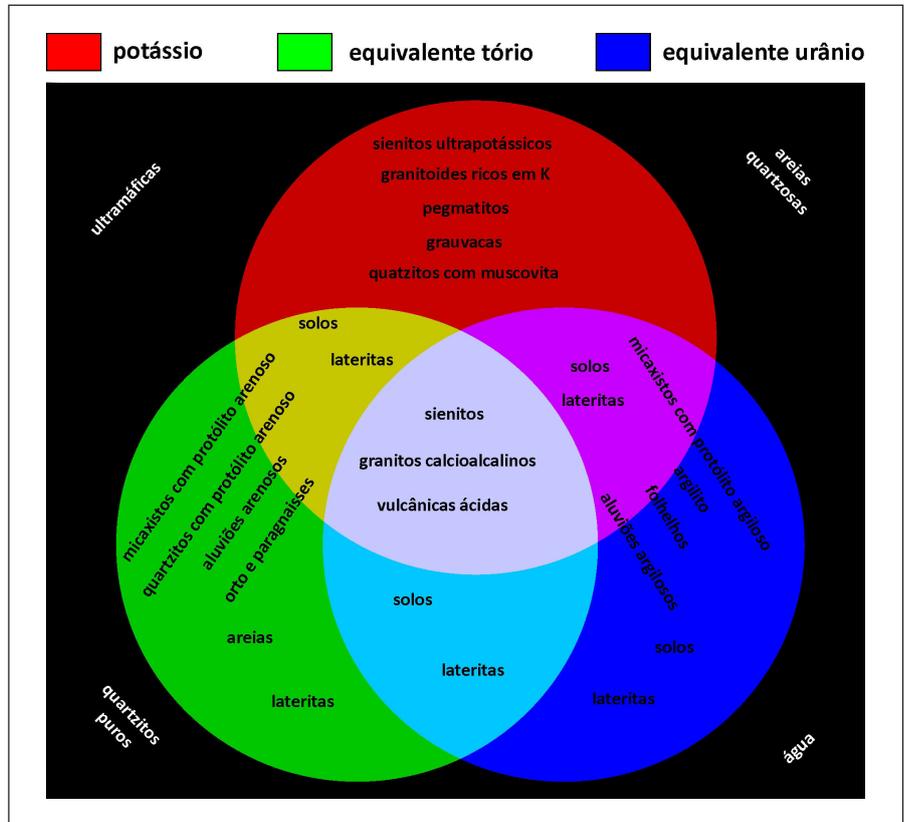
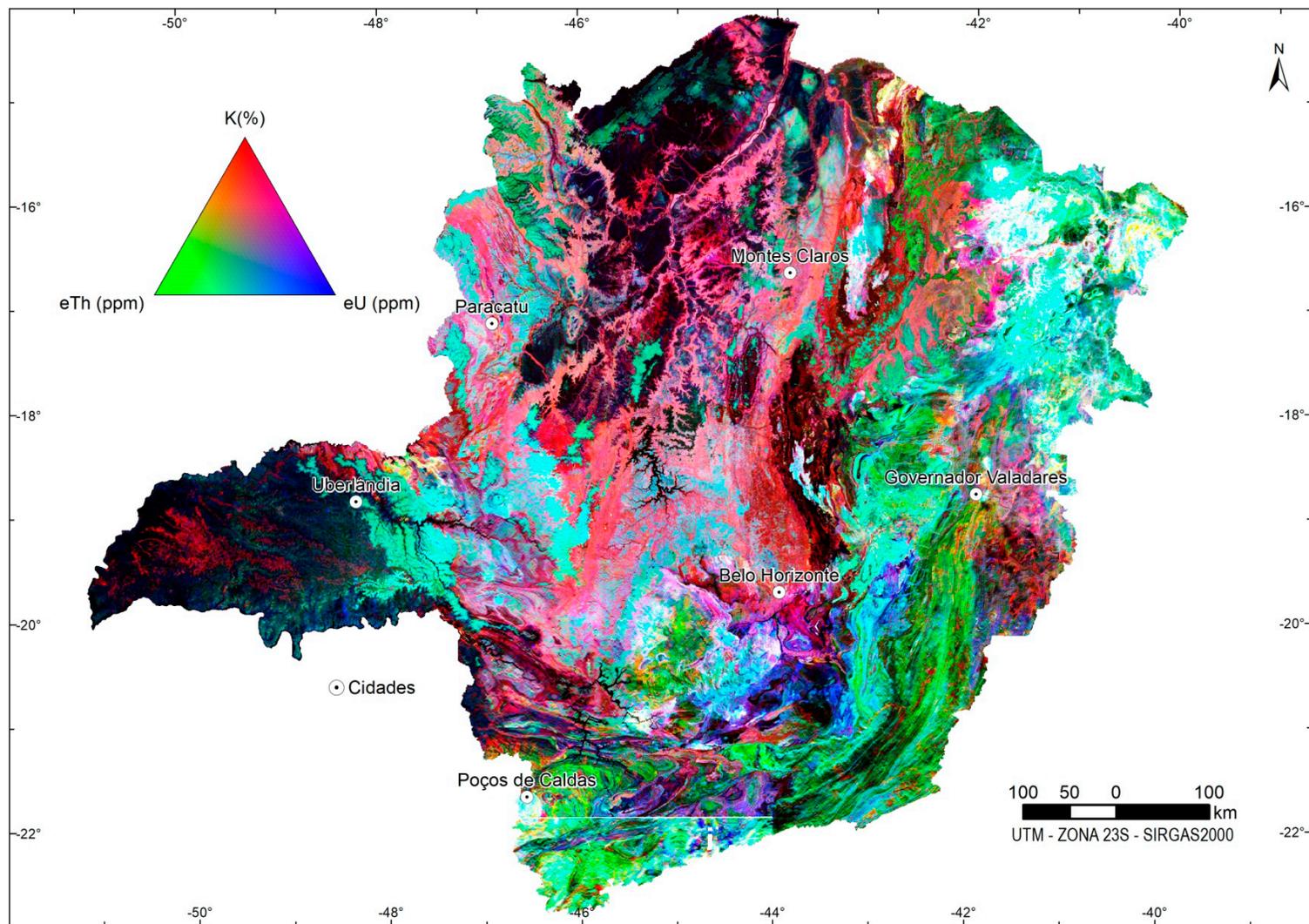


Figura 20: Possibilidades de correlação entre tipos litológicos e tonalidades de cores em uma composição ternária RGB.

Mapa Gamaespectrométrico de Composição Ternária RGB

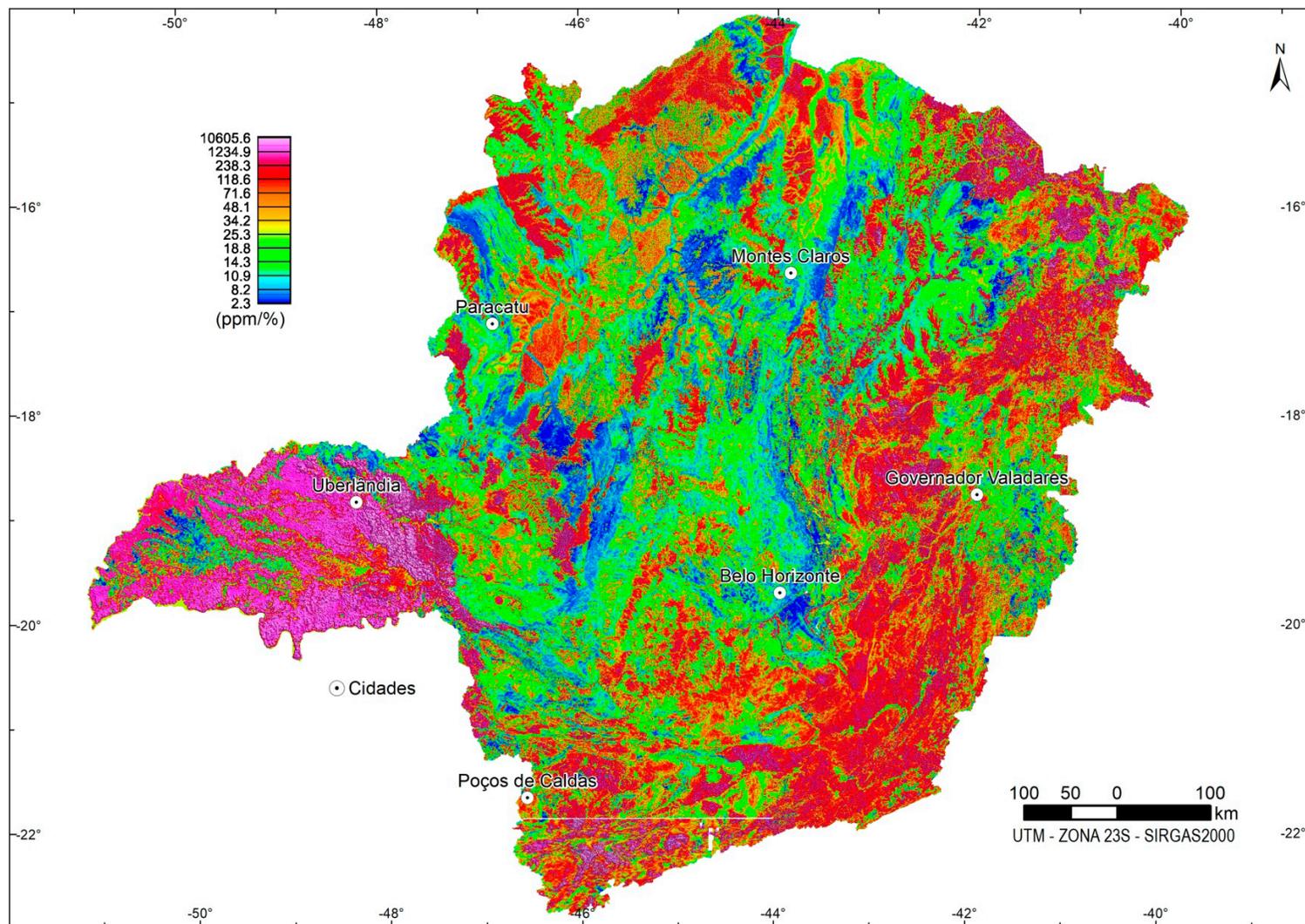


▶ RAZÕES eU/K , eTh/K e eU/eTh

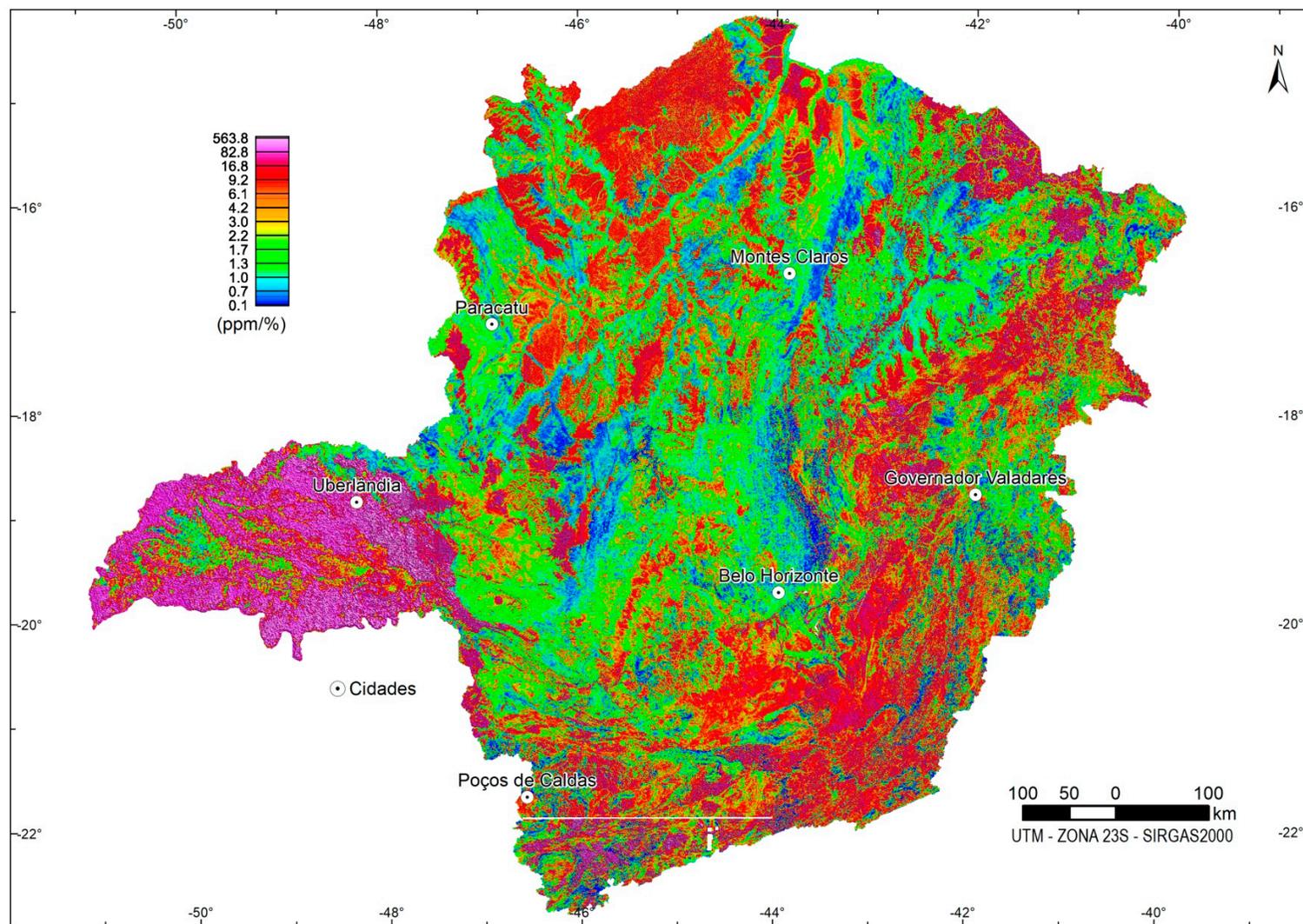
A PARTIR DOS MAPAS individuais de cada canal radiométrico K, eU e eTh é possível calcular as razões eU/eTh , eU/K e eTh/K . Alguns efeitos que atenuam a resposta gamaespectrométrica, como umidade do solo, vegetação, e topografia, são menos evidentes nas razões (IAEA, 2003). Portanto, as razões frequentemente apresentam elevada correlação com as unidades geológicas e, geralmente, mostram diferenças sutis que não são aparentes nos mapas individuais de cada radioelemento. As razões eU/K e eTh/K , normalmente, apresentam resultados menos ruidosos, ou seja, maiores contrastes em relação a razão eU/eTh .

Os mapas das razões podem ser utilizados, por exemplo, na identificação e separação de fácies graníticas, identificação de áreas com elevado grau de alteração hidrotermal do tipo potássica e/ou silicificada, já que são alterações que apresentam concentrações elevadas de potássio (RIBEIRO et al., 2014).

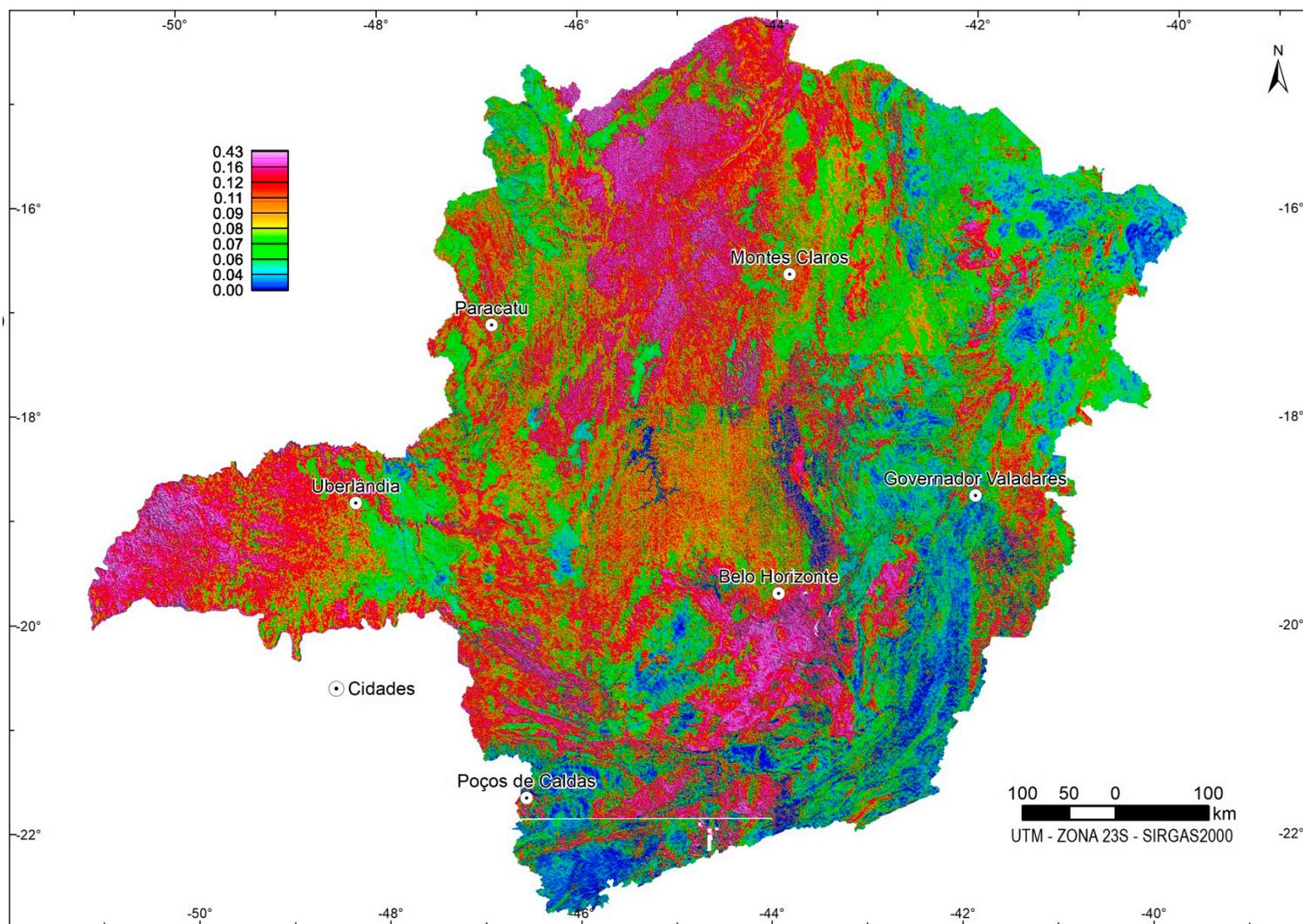
Mapa Gamaespectrométrico da Razão Tório/Potássio



Mapa Gamaespectrométrico da Razão Urânio/Potássio



Mapa Gamaespectrométrico da Razão Urânio/Tório



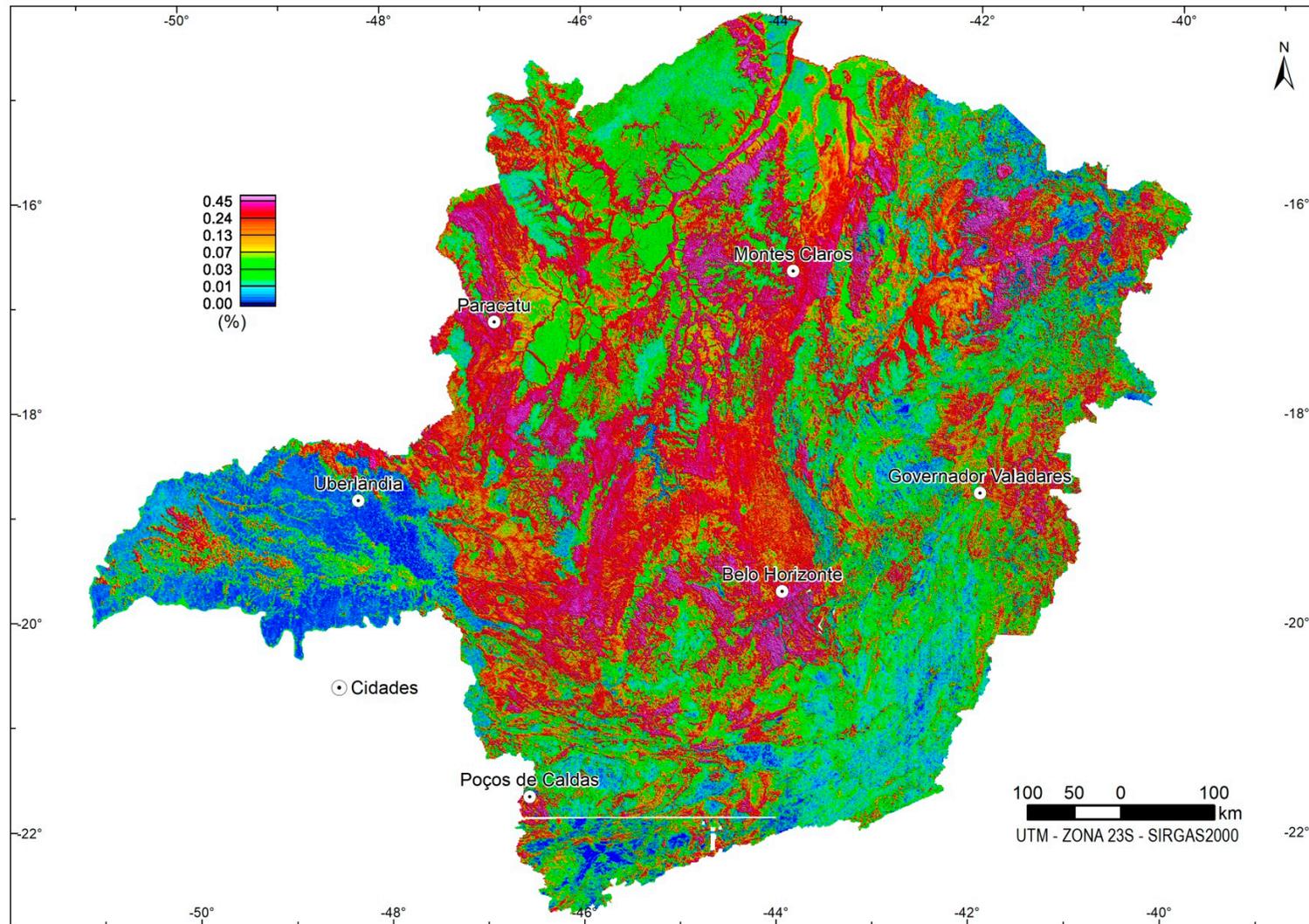
▶ PARÂMETRO F

ESTE PARÂMETRO é obtido por meio do cálculo de efeito de crescimento do K e do eU em relação ao eTh em situações geológicas específicas. Geralmente, o conteúdo relativo dos radioelementos é alterado nos processos de hidrotermalismo. Segundo Airo (2002) a alteração potássica resulta frequentemente em K elevado, particularmente para rochas máficas. Então, relações anômalas entre o K e eTh ao longo de zonas de cisalhamentos ou fraturas podem ser indicativas de mineralizações de ouro.

O cálculo do Parâmetro F é obtido por meio da fórmula proposta por EFIMOV (1978 apud GNOJEK & PRICHYSTAL, 1985):

$$F = K \cdot eU / eTh.$$

Mapa Gamaespectrométrico do Parâmetro F



▶ ÍNDICE LATERÍTICO

O ÍNDICE LATERÍTICO permite distinguir áreas com diferentes graus de intemperismo (IZA et al., 2017), e quanto maior o índice, mais elevada a probabilidade de se encontrar terrenos com processos avançados de laterização, ou seja, terrenos associados a crostas lateríticas e latossolos, perfis lateríticos muito desenvolvidos ou completos. O inverso representa maior possibilidade de se encontrar rocha sã, ou pouco intemperizada, e saprólitos, ou seja, perfis lateríticos com baixo desenvolvimento de laterização. As áreas com elevado Índice Laterítico têm maior probabilidade de estarem associadas com alterações supergênicas.

A técnica consiste na relação entre o potássio (K) e os elementos eU e eTh, pois o íon potássio (K^+) é facilmente lixiviado pela água em superfície/subsuperfície, portanto em processos avançados de laterização a concentração desse íon tende a diminuir com o tempo em locais de maior precipitação pluviométrica e, em contrapartida, ocorre o enriquecimento relativo de urânio e tório (IZA et al., 2020). O Índice Laterítico (IL) é calculado pelo produto entre as razões eU/K e eTh/K:

$$IL_1 = (eU/K) * (eTh/K)$$

Observando o mapa do IL_1 para o estado de Minas Gerais percebe-se que a escala de cores apresenta uma distribuição quase monocolor (Figura 21). Isso acontece, pois em teoria a razão entre os canais radiométricos pode variar de zero ao infinito e, quando ocorrem valores resultantes muito altos e/ou muito baixos, a escala de cores fica com essa distribuição quase monocolor. Esse problema pode ser contornado aplicando-se a função inversa da tangente (arco tangente), e o resultado são valores mais simétricos em torno de 45° , obtendo-se uma vantagem, pois o intervalo é dimensionado de maneira mais uniforme quando renderizado nas imagens de cinza e pseudo-cores (IAEA, 2003). Logo, a fórmula do IL fica assim:

$$IL_2 = \tan^{-1} [(eU/K) * (eTh/K)]$$

Na comparação dos dois mapas do índice laterítico, obtidos pelas fórmulas IL_1 e IL_2 , fica evidente a melhora na distribuição da escala de cores quando é utilizado o artifício matemático do arco tangente (Figura 21).

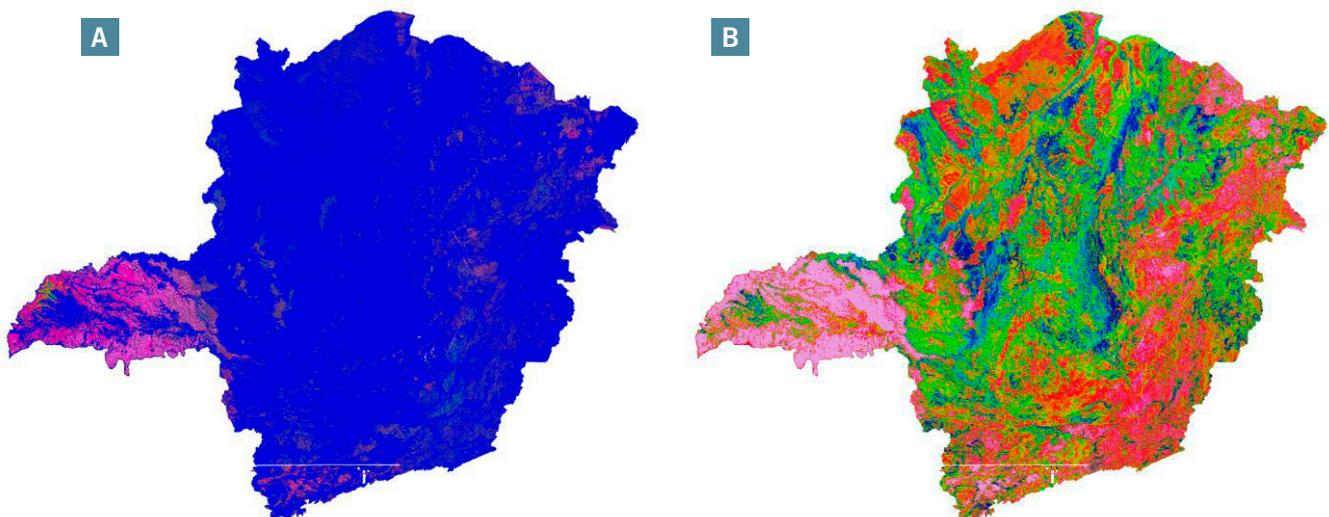
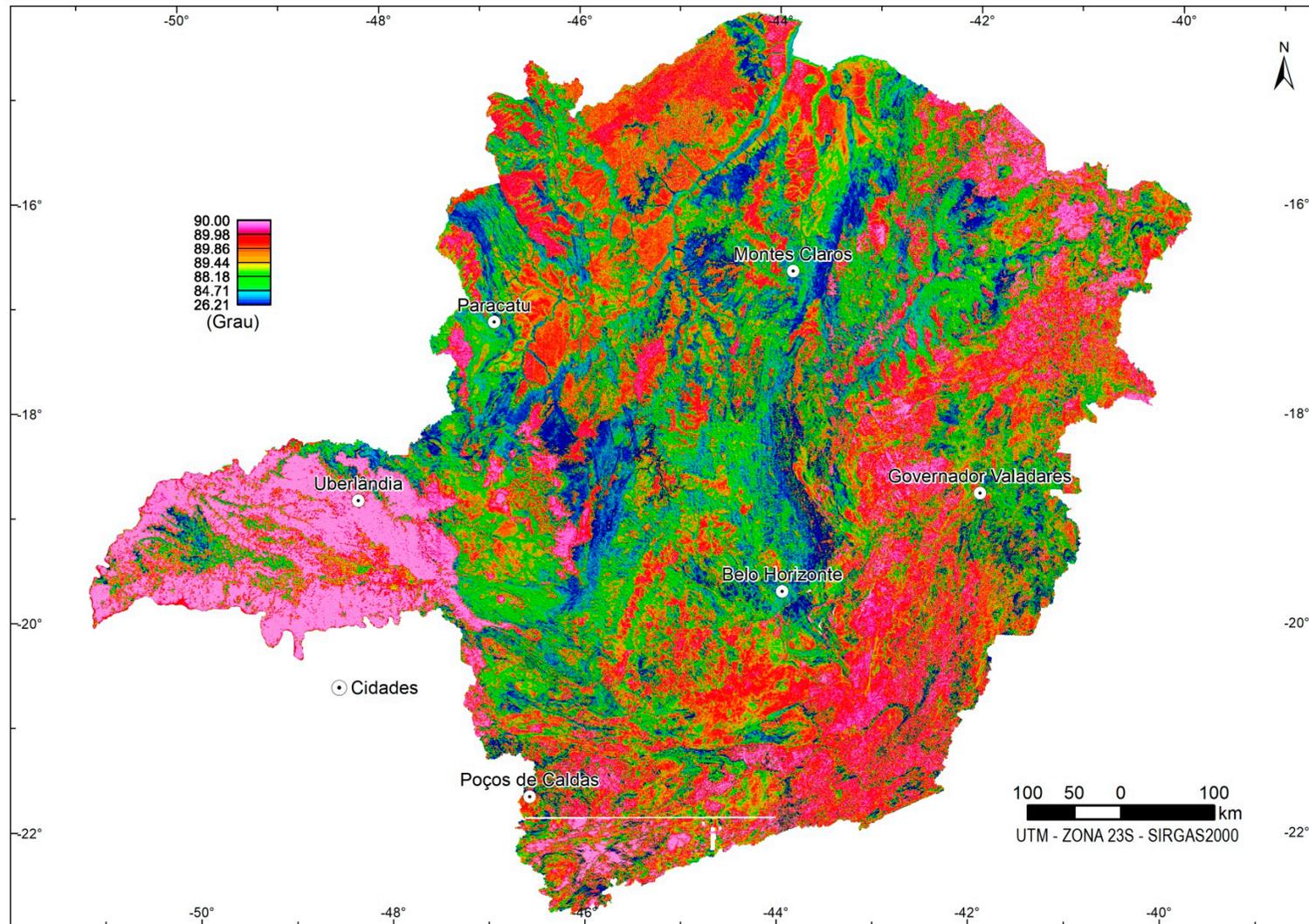


Figura 21: Mapas do Índice Laterítico para as fórmulas (A) IL_1 e (B) IL_2 , para comparação dos resultados.

Mapa do Índice Laterítico IL₂



▶ ÍNDICE MÁFICO

O ÍNDICE MÁFICO (IM), frequentemente utilizado com o objetivo de delimitar os corpos máficos e ultramáficos (PIRES & MORAES, 2006), tem como base teórica a tentativa de eliminar a influência dos materiais ricos em ferro (Fe), frequentemente, associados às crostas lateríticas. Pode ser calculado de acordo com a fórmula IM_1 (BARBOSA, 2012):

$$IM_1 = GT/(K \cdot eTh \cdot eU)$$

onde GT é o Gradiente Total da Anomalia Magnetométrica.

Novamente é aplicado o artifício do arco tangente ao mapa do índice máfico (IM_1).

$$IM_2 = \tan^{-1} [GT/(K \cdot eTh \cdot eU)]$$

A contagem gamaespectrométrica total (CT) é diretamente proporcional às concentrações dos elementos tório, urânio e potássio, logo, o produto “ $K \cdot eTh \cdot eU$ ” pode ser substituído nas fórmulas do IM_1 e IM_2 por “ CT^2 ”, obtendo o IM_3 e IM_4 :

$$IM_3 = GT/CT^2 \quad IM_4 = \tan^{-1} [GT/CT^2].$$

Comparando-se os mapas obtidos através das fórmulas IM_1 e IM_3 com os mapas resultantes das fórmulas IM_2 e IM_4 observa-se a melhora significativa da distribuição da escala de cores (Figura 22). O IM_4 também mostrou-se uma ferramenta muito eficaz no delineamento dos corpos máficos e ultramáficos (Figura 22), principalmente quando são avaliadas áreas menores e as escalas de cor para esses polígonos são redistribuídas.

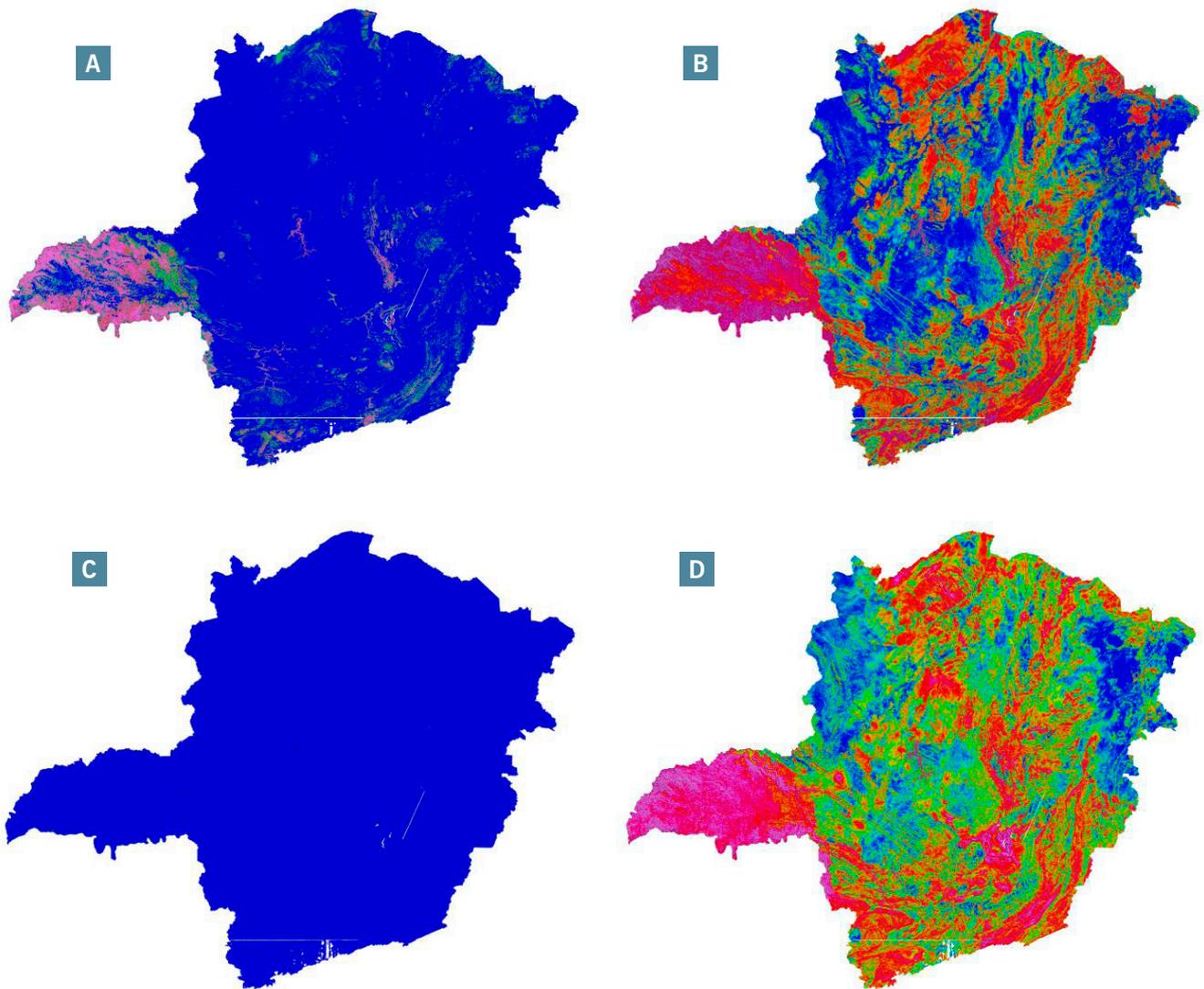
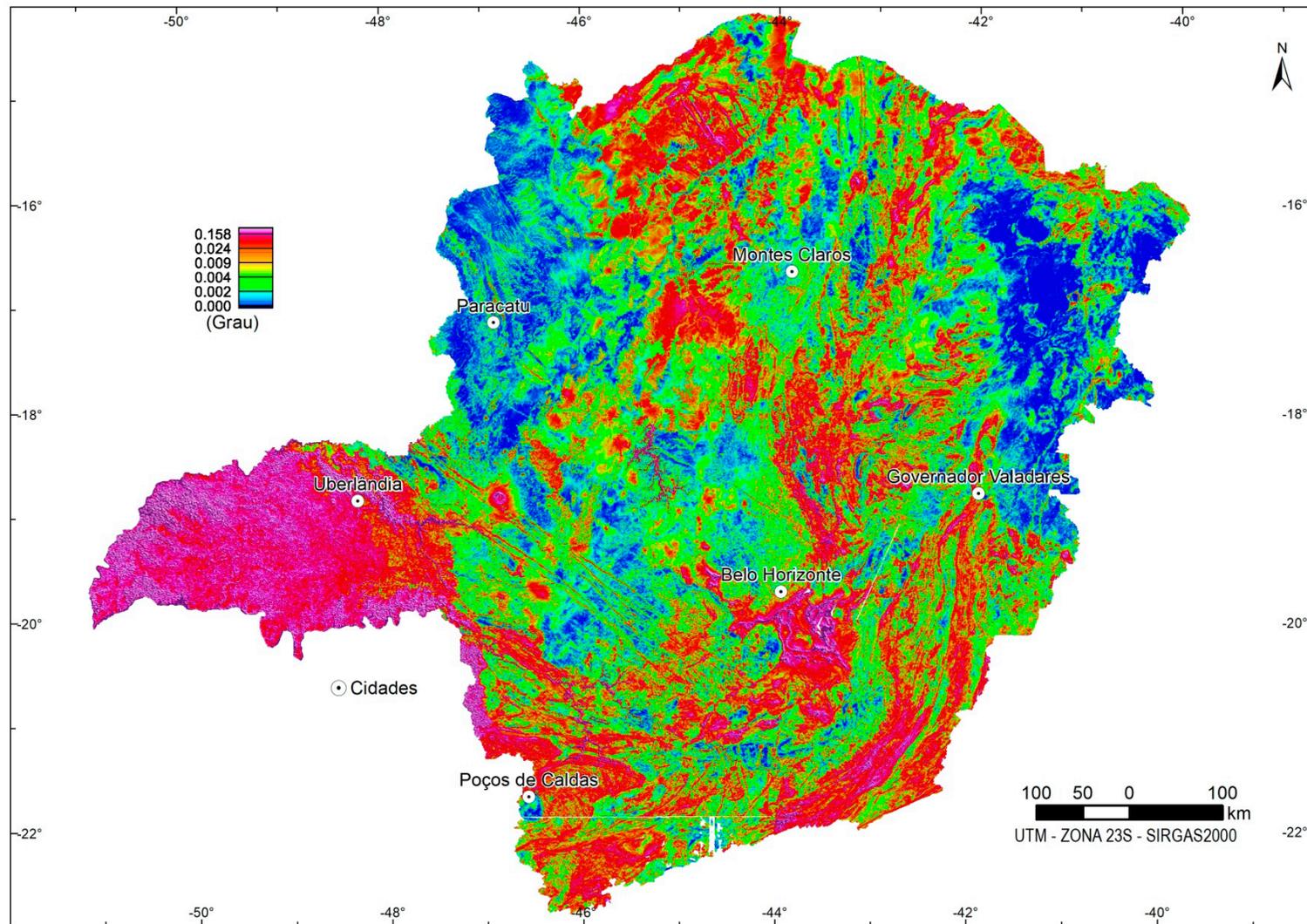


Figura 22: Mapas do Índice Máfico utilizando as fórmulas (A) IM_1 , (B) IM_2 , (C) IM_3 e (D) IM_4 , para comparação dos resultados.

Mapa do Índice Máfico (IM₄)



▶ MAPA GRAVIMÉTRICO TERRESTRE

A gravimetria é um método que consiste no estudo do gradiente da aceleração da gravidade terrestre e, a causa dessas variações, provém da rotação, do achatamento, do acoplamento gravitacional com o Sol e a Lua, variações morfológicas e variações da densidade decorrentes das mudanças composicionais e/ou geológicas da crosta. Mas para a prospecção mineral e a pesquisa do substrato terrestre o fator mais importante são as variações da densidade, que refletem diretamente as variações morfológicas e as heterogeneidades composicionais do interior do planeta Terra. São possíveis tais investigações gravimétricas, pois o gravímetro, instrumento utilizado nas medições pontuais do valor da aceleração da gravidade, é muito preciso e sensível. Portanto, variações pequenas de densidade do substrato terrestre podem ser detectadas e, conseqüentemente, quantificadas.

A unidade de aceleração da gravidade no SI é m/s^2 e, em homenagem a Galileu Galilei, utiliza-se o Gal (cm/s^2). No entanto as alterações da aceleração da gravidade

ocasionadas por variações da densidade são muito sutis, logo, é mais usual a utilização do mGal ($10^{-5} m/s^2$).

Apesar de não apresentar dados adquiridos por aerolevantamentos, o estado de Minas Gerais possui uma distribuição de estações gravimétricas terrestres que possibilita a elaboração de um mapa gravimétrico na escala regional, de fundamental importância na correlação entre as anomalias gravimétricas, magnetométricas, gamaespectrométricas e as ocorrências minerais do estado, o que justifica a inserção do mapa gravimétrico neste atlas.

Os dados terrestres das estações gravimétricas utilizadas para a confecção do mapa gravimétrico terrestre da anomalia Bouguer do estado de Minas Gerais são oriundos das bases de dados das seguintes instituições:

- Serviço Geológico do Brasil (CPRM);
- Banco Nacional de Dados Gravimétricos (BNDG);
- Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP);
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);
- Observatório Nacional (ON).

▶ ANOMALIA BOUGUER

A ANOMALIA GRAVIMÉTRICA (ou anomalia da gravidade) é obtida através da diferença (Δg) entre a aceleração da gravidade observada (g_o) num ponto da superfície do planeta e um valor de referência (γ).

$$\Delta g = g_o - \gamma$$

O valor de referência é calculado através da fórmula internacional da gravidade de 1967 (Sistema Geodésico de Referência 1967) adotado pela União de Geodésia e Geofísica Internacional (UGGI):

$$\gamma = 978031,8(1 + 0,0053024 \sin^2\varphi - 0,0000059\sin^2\varphi) \text{ mGal},$$

onde φ é a latitude geodésica. No entanto, a fórmula que não utiliza o dobro da latitude é considerada mais precisa

$$\gamma = 978031,846(1 + 0,005278895 \sin^2\varphi - 0,000023462 \sin^4\varphi) \text{ mGal}.$$

A gravidade medida deve ser compensada aplicando-se uma série de correções para se obter a gravidade observada (g_o). A sequência de correções da maré, da deriva do instrumento, de Eötvös (se necessário) e da latitude são procedimentos padrão. Mas, ainda se faz necessário a redução da Anomalia de Ar-Livre (Δg_{AL}), que é a compensação existente entre a superfície de referência do geóide e a superfície real (h).

$$\Delta g_{AL} = 0,3086h$$

Por último, a redução de Bouguer (Δg_B), que é a compensação da massa existente entre a superfície de referência do geóide e a real do local onde a medição é realizada (h):

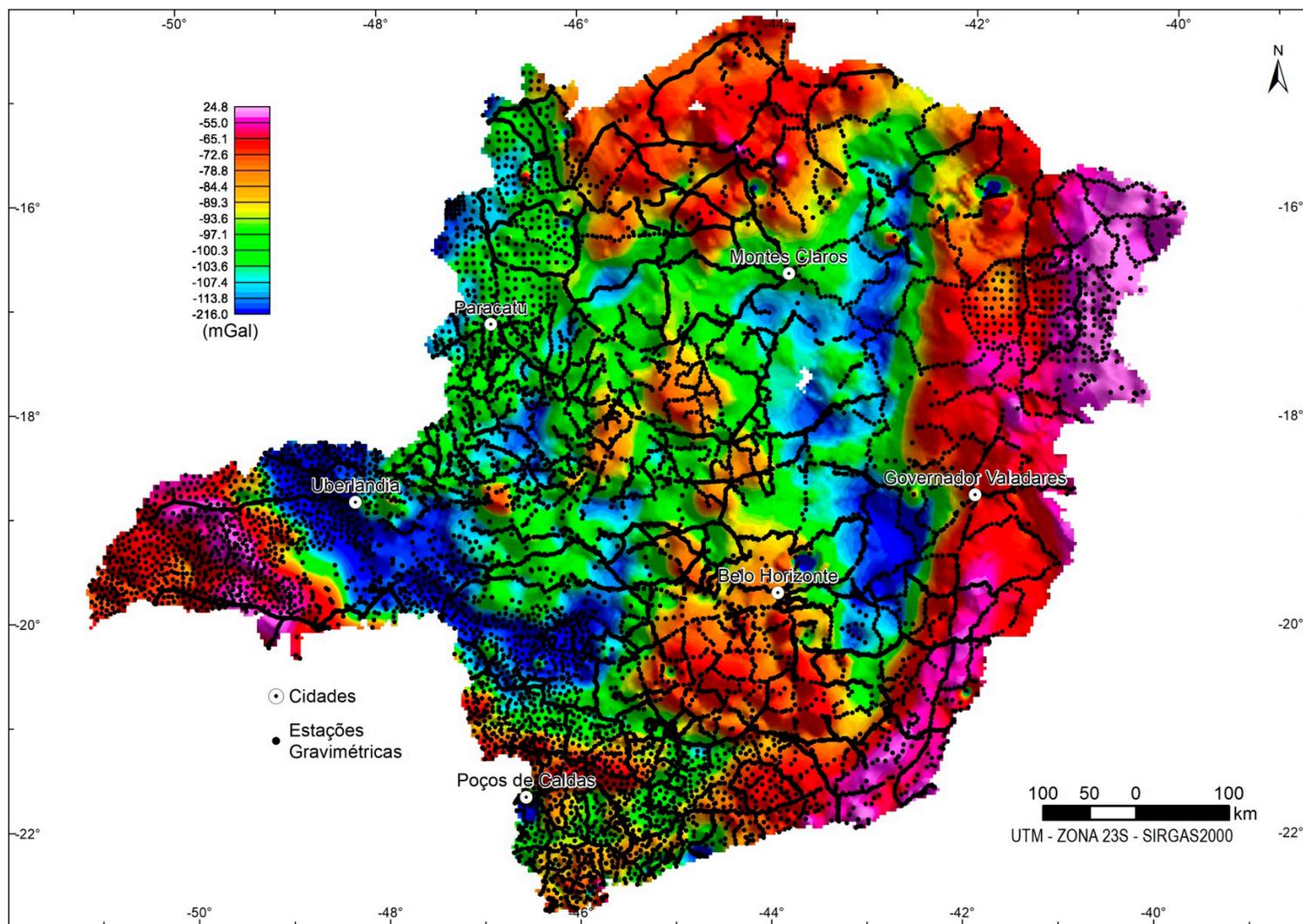
$$\Delta g_B = - 0,1119h - B + C,$$

onde B é a diferença entre a atração de um platô horizontal teórico de espessura h e uma calota de raio esférico de 166,7 km e C é a correção de terreno. Normalmente, o valor de B é muito pequeno, portanto desconsiderado, e C é a maior fonte de erros nos levantamentos gravimétricos devido a imprecisão das malhas topográficas, assim só é relevante para trabalhos de precisão em maiores escalas. Quando a variável C é calculada obtém-se a Anomalia Bouguer completa.

Logo, a Anomalia Bouguer (Δg_B) é obtida através da expressão:

$$\Delta g_B = g - \gamma + 0,3086h - 0,1119h - B + C \text{ mGal}.$$

Mapa da Anomalia Bouguer



▶ PRINCIPAIS CORRELAÇÕES GEOLÓGICAS COM OS DADOS DOS LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS NO ESTADO DE MINAS GERAIS

O estado de Minas Gerais possui um bom conhecimento geológico e uma cobertura cartográfica na escala 1:100.000. Com base nessa cartografia, Pinto & Silva (2014a e b) elaboraram o mapa geológico e de recursos minerais do estado. O mapa de recursos minerais tem como base geológica a divisão em entidades tectônicas, cuja versão simplificada está apresentada na Figura 23.

A partir das observações dos mapas geofísicos do estado de Minas Gerais é possível destacar várias anomalias geofísicas de grandes dimensões, as quais serão descritas e, quando possível, correlacionadas com a base geológica apresentada (Figura 23). São elas:

- Anomalia Magnética de Pirapora;
- Lineamentos Magnéticos NW – Azimute 125°;
- Anomalias Geofísicas Circulares – Intrusões Alcalinas;
- Anomalias Geofísicas do Triângulo Mineiro e Oeste de Minas Gerais;
- Anomalias Magnéticas do Quadrilátero Ferrífero;
- Alto Gravimétrico de Januária;
- Anomalias Geofísicas das Faixas Marginais do Cráton do São Francisco.

ANOMALIA MAGNÉTICA DE PIRAPORA

Na região central do estado de Minas Gerais, próximo a cidade de Pirapora, 300 km a NNW de Belo Horizonte, ocorre uma anomalia magnética isolada, e conhecida como anomalia magnética de Pirapora (USSAMI, 1981; BORGES & DREWS, 2001; OLIVEIRA & ANDRADE, 2014).

Essa anomalia magnética (Figura 24) apresenta forma circular/ elíptica e alto gradiente magnético, como observado no mapa de Gradiente Total e apresenta um diâmetro médio de 80 km (ou 60 x 100 km). Nos mapas do campo magnético anômalo (CMA), figura 24, o dipolo dessa anomalia tem um grande comprimento de onda e amplitude magnética da ordem de 800 nT, significando que possui um contraste da propriedade física bem marcado em relação aos terrenos adjacentes.

No mapa de composição ternária RGB (Figura 25) não foi identificada nenhuma resposta ou diferenciação compatível com a forma dessa anomalia magnética. No mapa gravimétrico, anomalia Bouguer, existe um alto gravimétrico, apresentando entre 78 e 100 mGal, também com formato circular e diâmetro semelhante (Figura 26), de aproximadamente 80 km. Entretanto essa anomalia está localizada a sul da anomalia magnética de Pirapora no mapa do Gradiente Total.

Geologicamente, essa anomalia está inserida na região central do Cráton do São Francisco onde aflora, principalmente, rochas do Grupo Bambuí (Bacias de Antepaís) e em menor quantidade do Grupo Areado (Bacias Intracontinentais) (PINTO & SILVA, 2014). Ussami (1981) propõe que a anomalia de Pirapora seria resposta de um corpo retangular localizado em profundidade. Enquanto Borges & Drews (2001) relatam que essa anomalia é condizente com um corpo magnético maciço, rico em minerais magnéticos, com grandes dimensões e localizado a 5 km de profundidade, aproximadamente. Nesse sentido, tal anomalia seria parte do embasamento das bacias supracitadas.

LINEAMENTOS MAGNÉTICOS NW – AZIMUTE 125°

Outra feição geofísica que se destaca no estado é o conjunto de lineamentos magnéticos com centenas de quilômetros e direção principal NW-SE, conhecido como Lineamento Azimute 125° (Figura 24). Esse conjunto de lineamentos magnéticos foi anteriormente abordado por diversos trabalhos (e.g., BORGES & DREWS, 2001; ROCHA, 2013; ROCHA et al., 2014, 2019; OLIVEIRA & ANDRADE, 2014), e são formados por feições lineares orientadas variando a direção entre N40-60W, com média para o azimute 125 e comprimento médio 400 km. Ocorrem principalmente, na região sudoeste do estado, e se estendem por mais centenas de quilômetros para o estado de Goiás e do Mato Grosso (CORREA, 2019).

A resposta magnética em perfil ortogonal desse conjunto de lineamentos magnéticos são anomalias magnéticas de curto comprimento de onda e amplitudes de 50 nT, em média. Entretanto, esses lineamentos magnéticos não são identificados no mapa de composição ternária RGB (Figura 25) e também não foram identificadas feições regionais compatíveis com esses lineamentos magnéticos no mapa de anomalia Bouguer terrestre (Figura 26), o que pode ser uma questão de espaçamento da malha gravimétrica.

Oliveira & Andrade (2014) indicam que esses lineamentos magnéticos apresentam relação com zonas de deformação frágil, e o posicionamento de intrusões alcalinas carbonatíticas (Complexos Plutônicos Alcalinos) na região de Goiás e Minas Gerais. Outros trabalhos (e.g., BOSUM, 1973; HASUI & HARALAYI, 1991) relatam que esses lineamentos magnéticos são a expressão de diques básicos.

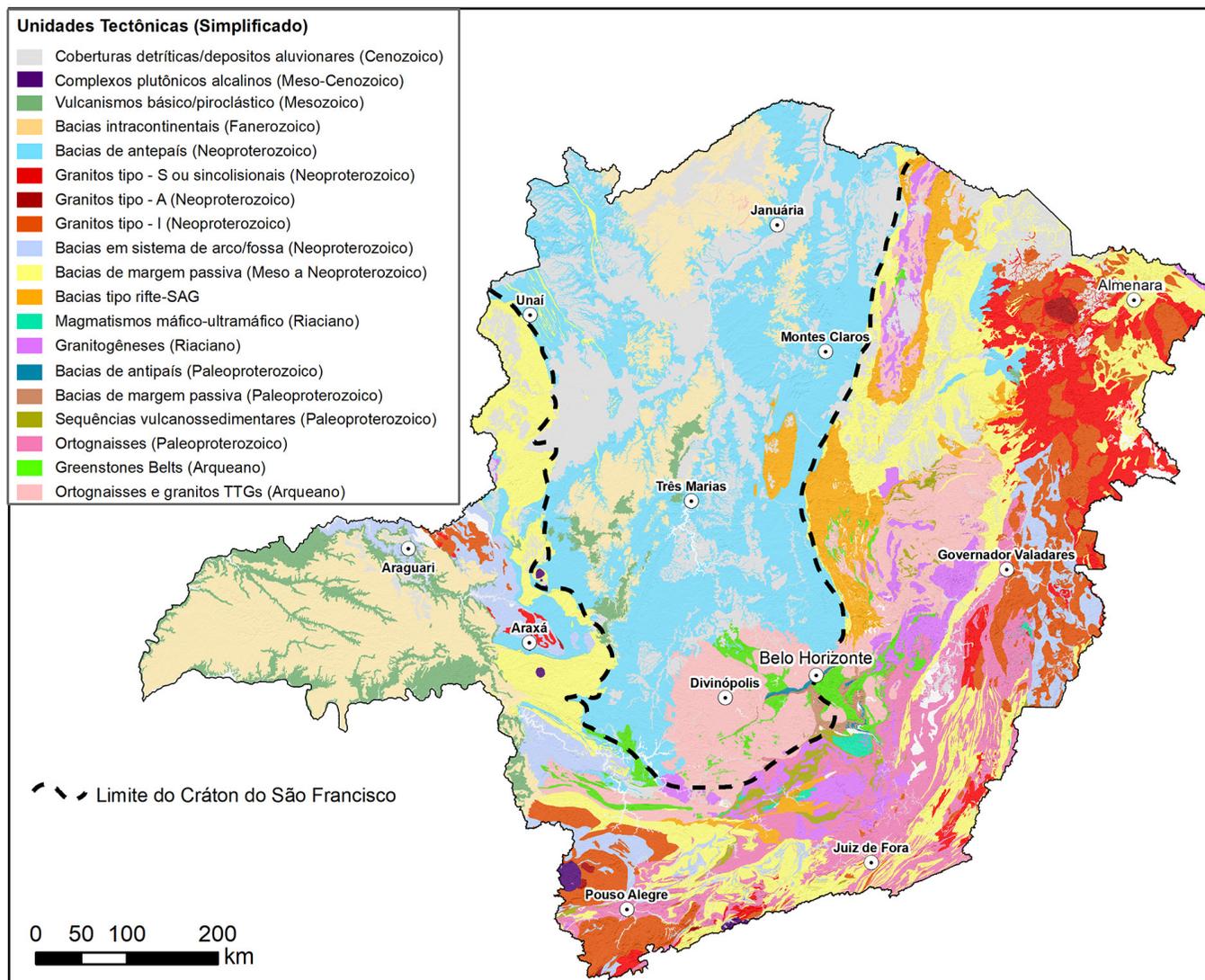


Figura 23: Mapa geotectônico do estado de Minas Gerais (simplificado de PINTO & SILVA, 2014).

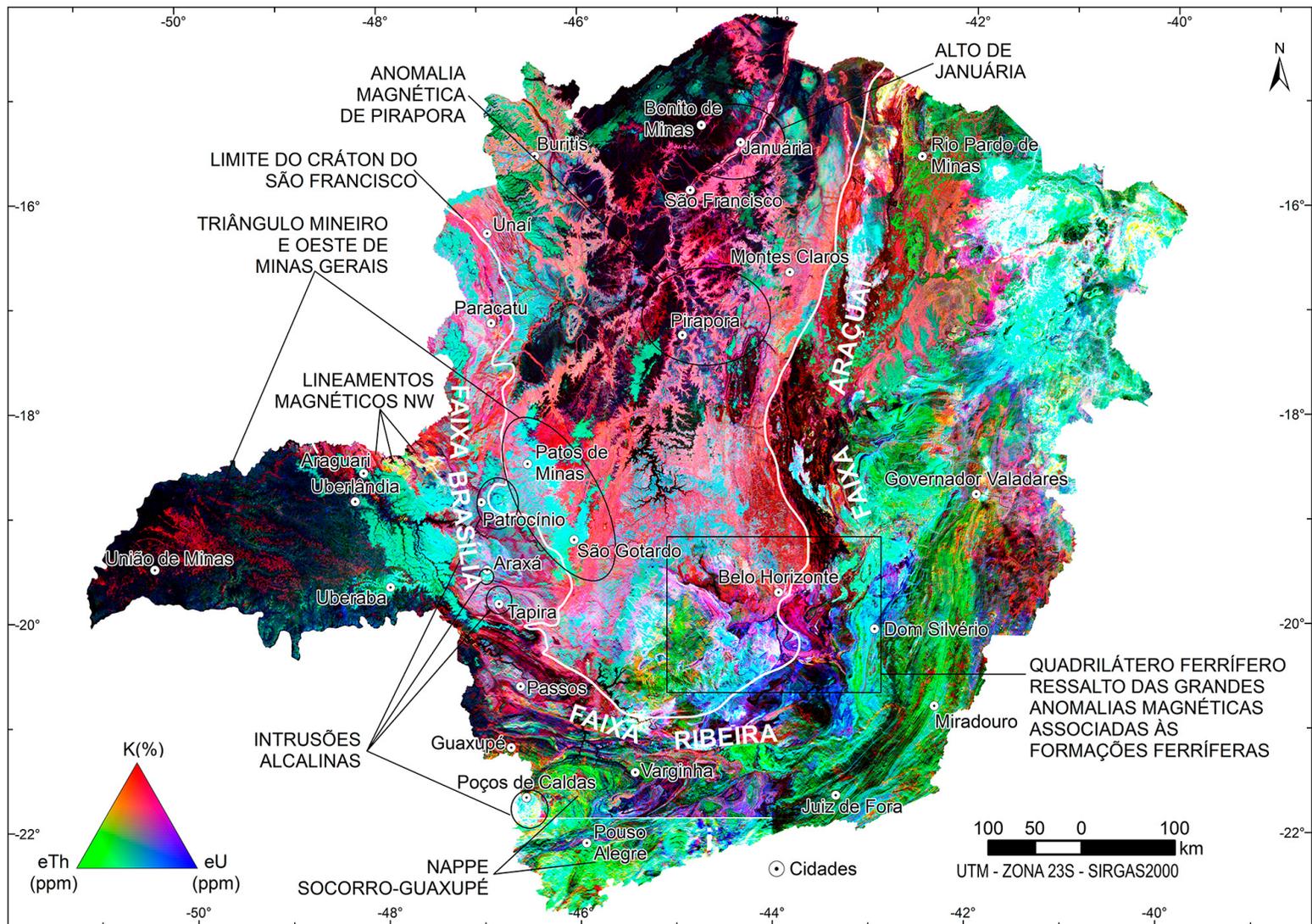


Figura 25: Mapa gamaespectrométrico de composição ternária RGB. Observar como algumas anomalias magnéticas não apresentam expressão superficial na gamaespectrometria e outras ficam muito bem marcadas.

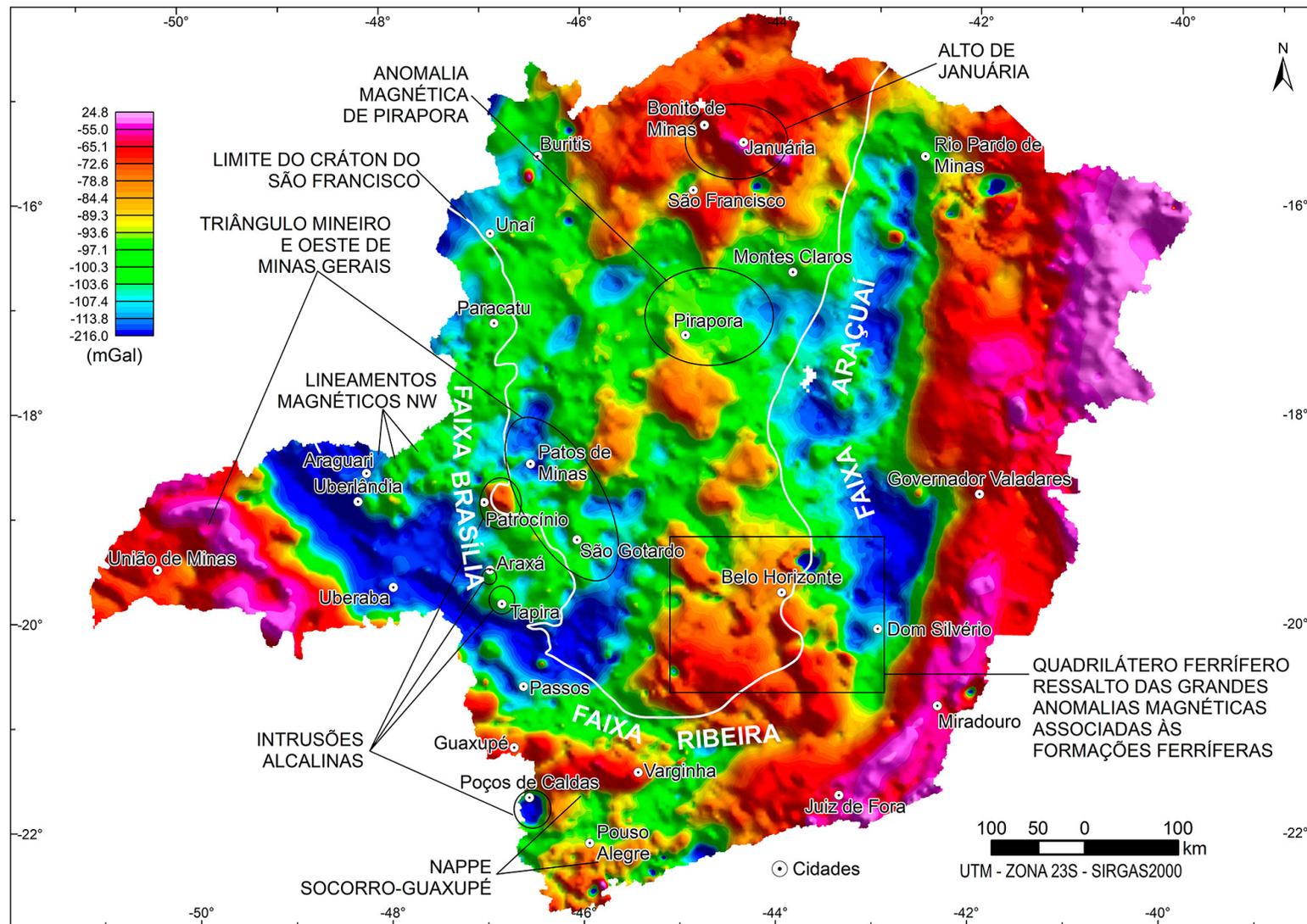


Figura 26: Mapa da anomalia Bouguer do estado de Minas Gerais. Observar como são bem marcadas as Faixas Marginais do Crátom do São Francisco, as Intrusões Alcalinas e o Alto Gravimétrico de Januária.

Borges & Drews (2001) também interpreta esses lineamentos magnéticos como diques, mas ressalta que eles são discordantes das outras estruturas regionais, sendo relacionados a anomalias magnéticas rasas e possivelmente com as raízes profundas.

Esse conjunto de lineamentos magnéticos corta as rochas do Grupo Bambuí, as unidades relacionadas à Faixa Brasília e ao embasamento do Cráton do São Francisco.

ANOMALIAS GEOFÍSICAS CIRCULARES – INTRUSÕES ALCALINAS

No estado de Minas Gerais ocorrem diversas anomalias magnetométricas (Figura 24), gamaespectrométricas (Figura 25) e até mesmo gravimétricas (Figura 26) relacionadas a formas circulares, como por exemplo nas regiões oeste (Patrocínio-Araxá) e sudoeste do estado (Poços de Caldas). Tais anomalias geofísicas são relacionadas às intrusões alcalinas carbonatíticas com idade meso-cenozoica, ou Complexos Plutônicos Alcalinos (Figura 23). Essas intrusões fazem parte da Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP) (GIBSON et al., 1995), que contém mineralizações de fosfato, nióbio (Nb) e titânio (Ti), ou do Lineamento Magmático de Cabo Frio (ALMEIDA, 1991), com mineralizações de Urânio (U). Essas anomalias geofísicas estão detalhadas no item subsequente, referente à assinatura geofísica das intrusões alcalinas.

ANOMALIAS GEOFÍSICAS DO TRIÂNGULO MINEIRO E OESTE DE MINAS GERAIS

Na região do Triângulo Mineiro (Uberlândia, Uberaba, Araguari, União de Minas) e no Oeste de Minas (Patos de Minas), observa-se uma assinatura magnética marcante em todos os mapas magnetométricos. Essa assinatura magnética é marcada por uma somatória de milhares de pequenas anomalias magnéticas de altas frequências e baixas amplitudes, até 200 nT, e apresenta uma boa correlação com a resposta nos mapas gamaespectrométricos.

Essas assinaturas magnéticas (Figura 24) e gamaespectrométricas (Figura 25) correspondem ao domínio geológico da Bacia do Paraná, no Triângulo Mineiro, e das rochas vulcânicas do Grupo Mata da Corda, entre a região de Patos de Minas e São Gotardo, representados respectivamente pelas unidades do Vulcanismo Básico/Piroclástico e Bacias Intracontinentais no mapa geotectônico da Figura 23.

Nos mapas gamaespectrométricos é possível diferenciar os basaltos da Bacia do Paraná, os quais apresentam baixa contagem total (<8.0 μ R/h) e concentrações de urânio <2.50 ppm, tório <30.0 ppm e potássio <0.30%; enquanto que, os tufos vulcânicos do Grupo Mata da Corda possuem elevada contagem total (>20.0 μ R/h) e concentrações de urânio >4.00 ppm, tório >50.0 ppm e potássio >2.00%, evidenciando assinaturas gamaespectrométricas muito distintas.

ANOMALIAS MAGNÉTICAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Na região central do estado, no entorno de Belo Horizonte, existe uma feição magnética de extrema importância, formada por anomalias magnéticas referentes às formações ferríferas que compõem a quadrícula denominada de Quadrilátero Ferrífero (Figura 24). Essas anomalias magnéticas estão detalhadas no item referente à assinatura geofísica da Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero.

ALTO DE JANUÁRIA

Na região norte do estado, nos arredores da cidade de Januária, destaca-se uma importante anomalia geofísica nos mapas gravimétricos e magnetométricos. Representada principalmente por um alto gravimétrico (Figura 26), essa anomalia é denominada de Alto de Januária e já foi abordada em diversos trabalhos (MOLINA et al., 2001 *in* ALKMIM & MARTINS-NETO, 2001; BORGES & DREWS, 2001; SCHOBENHAUS et al., 2004; OLIVEIRA, 2009; REIS, 2013; OLIVEIRA & ANDRADE, 2014).

Esse alto gravimétrico é composto por uma anomalia regional com um longo comprimento de onda e amplitude de até cerca de 46 mGal. Trata-se de um alto gravimétrico importante na região, já que aparece mesmo em mapas de escala regional.

As dimensões desse alto são de 300 km de largura (W-E) e acima de 200 km de comprimento (N-S), apenas dentro de Minas Gerais, prolongando-se para o estado da Bahia por centenas de quilômetros.

Esse alto gravimétrico de Januária é correlacionado ao alto do embasamento da Bacia de Antepáis (Neoproterozoico, Grupo Bambuí) (Figura 23), e caracterizado principalmente pelos afloramentos de granitos e gnaisses localizados entre Januária e Bonito de Minas (ALKMIM & MARTINS-NETO, 2001; REIS & ALKMIM, 2015; REIS, 2016; REIS & SUSS, 2016; RESENDE, 2017).

Ao norte dessa estrutura, Borges & Drews (2001) caracterizam um conjunto de anomalias magnéticas contíguas e alinhadas sob a forma de um arco, denominado de Arco ao Norte de Januária, composta por lineamentos magnéticos ENE que inflete para WNW em sua parte ocidental, melhor visualizados no mapa de primeira derivada vertical. Outra estrutura em forma de arco aparece a uma distância de 60 km a sudoeste da estrutura em arco descrita anteriormente, passando a NE da cidade de São Francisco/MG e indo até a cidade de Buritis/MG. Tal feição é bem menos marcada, esmaecida segundo Borges & Drews (2001). Essa atenuação do sinal magnético sugere que neste ponto da Bacia do São Francisco o embasamento é mais profundo.

Ocorre ainda na região de Januária vários lineamentos magnéticos, bem marcados nos mapas aeromagnetométricos,

de direção NW e comprimentos de até 120 km, formando uma faixa lineamentos de 94 km. É possível detectar também lineamentos magnéticos de dimensões regionais, esmaecidos, de direção NE, com até 220 km de comprimento.

ANOMALIAS GEOFÍSICAS DAS FAIXAS MARGINAIS DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO

As margens do Cráton do São Francisco que estão inseridas no estado de Minas Gerais, apresentam assinaturas e anomalias geofísicas bem marcadas.

Os limites do cráton com as faixas orogênicas marginais podem ser determinados através dos maiores gradientes gravimétricos e, possivelmente, definem a região de maior espessamento crustal devido à flexura da litosfera durante as orogenias brasileiras (OLIVEIRA & ANDRADE, 2014).

No mapa gravimétrico de anomalia Bouguer observam-se expressivas anomalias gravimétricas negativas (Figura 26), com amplitudes entre -30 e -70 mGal (OLIVEIRA & ANDRADE, 2014), representando as faixas marginais ao Cráton do São Francisco, principalmente aos *fold thrust belts* (faixas) Brasília e Araçuaí (REIS, 2011; OLIVEIRA & ANDRADE, 2014). Na margem leste do cráton, a Faixa Araçuaí, o baixo gravimétrico forma uma estrutura N-S, com quase 500 km de comprimento, entre as cidades de Rio Pardo de Minas e Dom Silvério, e média de 100 km de largura, com amplitudes entre -100 e -120 mGal.

Na região sudoeste, a Faixa Brasília, o baixo gravimétrico varia entre -110 e -145 mGal e é marcado por uma estrutura NW-SE, nas regiões de Araguari-Araxá-Passos, com pelo menos 400 km de comprimento em Minas Gerais, estendendo para o estado de Goiás. Nos mapas gravimétricos regionais (e.g., REIS, 2011), observa-se que esse baixo inflete para norte-nordeste, no estado de Goiás, conectando com o baixo gravimétrico encontrado na região de Unaí. Observa-se ainda que existem altos

gravimétricos compatíveis com a geometria do sistema da *nappe* Socorro-Guaxupé, sendo que a anomalia Bouguer para o domínio Guaxupé apresenta uma grande anomalia gravimétrica de -60 a -90 mGal, já o domínio Socorro fica entre -80 e -90 mGal.

No mapa de Gradiente Total (Figura 24) e composição ternária RGB (Figura 25) as melhores correlações das anomalias geofísicas das faixas marginais com a geologia são em relação à estruturação.

Na Faixa Araçuaí e, sua conexão com a Ribeira, ocorre uma assinatura magnética bem marcada, de alta frequência e amplitude de até 150 nT, compondo uma faixa com direção NNE-SSW que se inicia na região de Governador Valadares, infletindo para NE-SW próximo a Miradouro, o que mostra também um deslocamento para oeste, onde segue até a região de Juiz de Fora, passando para o estado do Rio de Janeiro. Essa assinatura magnética tem um comprimento de quase 500 km e largura média de 25 km. Essa faixa magnética se assemelha principalmente com a estruturação do Complexo Juiz de Fora e zonas de cisalhamento existentes (e.g., Zona de Cisalhamento Abre Campo; ALKMIM et al., 2017) no mapa de Pinto & Silva (2014a). Essa mesma estruturação também é muito bem marcada no mapa gamaespectrométrico ternário RGB e no mapa do canal eTh.

Na Faixa Brasília, em sua porção extremo sul, região de Pouso Alegre e Varginha-Guaxupé, também é possível identificar uma assinatura magnética marcante e bem estruturada. Essa assinatura geofísica é marcada por um conjunto de anomalias magnéticas de alta frequência e amplitude entre 50 e 250 nT, correspondendo a estruturação do sistema da *nappe* Socorro-Guaxupé. A estruturação desse sistema também está bem marcada nos mapas gamaespectrométricos ternários, RGB e CMY, com destaque para o canal do tório equivalente. É possível ainda separar, através destes mapas geofísicos, variações internas da *nappe* Socorro-Guaxupé.

ASSINATURAS AEROGEOFÍSICAS DAS PRINCIPAIS PROVÍNCIAS/ DISTRITOS MINERAIS NO ESTADO DE MINAS GERAIS

Os dados aerogeofísicos sempre foram uma ferramenta muito importante para a prospecção mineral e geração de alvos, além de fornecerem informações fundamentais para o entendimento do contexto geológico regional de depósitos minerais conhecidos.

O estado de Minas Gerais apresenta diversas províncias e distritos minerais, com os mais variados contextos geológicos e substâncias. Em 2019, essas províncias/distritos foram responsáveis por cerca de 40% da arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) no Brasil, destacando-se os depósitos de ferro, ouro, nióbio, além dos depósitos de zinco, chumbo, fosfato e urânio. Nesse capítulo foram selecionadas três

províncias/distritos minerais, cujas assinaturas geofísicas apresentam destaques regionais, os quais estão listados a seguir (Figura 27):

- Província Metalogenética do Quadrilátero Ferrífero;
- Província Mineral relacionada às Intrusões Alcalinas Mesozoicas;
- Distrito Ferrífero de Nova Aurora.

PROVÍNCIA METALOGENÉTICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O termo Quadrilátero Ferrífero foi inicialmente utilizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States*

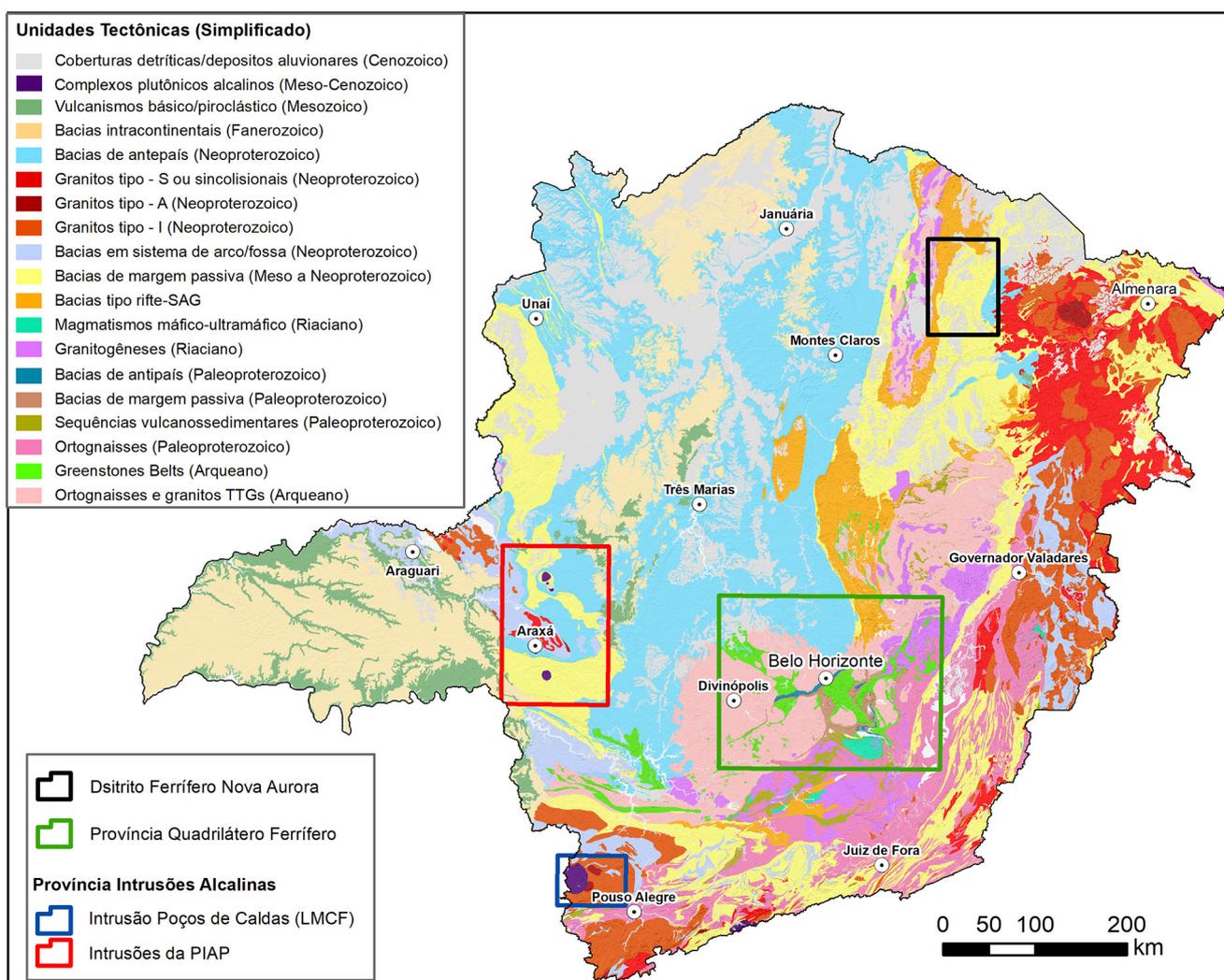


Figura 27: Mapa geotectônico do estado de Minas Gerais (simplificado de PINTO & SILVA, 2014) com destaque para as províncias minerais.

Geological Survey-USGS) para definir a feição geomorfológica “quadrangular” formada por cristas de serras sustentadas por formações ferríferas bandadas que ocorrem na região centro-sul de Minas Gerais (DORR, 1969) (Figura 28).

O Quadrilátero Ferrífero é mundialmente conhecido por hospedar depósitos de classe mundial de ferro e ouro, além de conter depósitos de manganês, gemas (e.g., topázio imperial), alumínio, entre outros bens minerais. Embora a definição original abarque inequivocamente os principais corpos de minério de ferro da região, o mesmo não pode ser dito em relação a outro importante recurso mineral, o ouro. Dessa forma, iremos utilizar o termo Quadrilátero Ferrífero no sentido de província metalogenética, a qual abrange toda a área com mineralizações e história metalogenética correlacionável com aquelas ocorrências da área definida originalmente (Figura 27).

Nesse sentido, essa província engloba quatro unidades tectônicas principais: 1) Ortognaisses TTGs e Granitoides arqueanos (embasamento granito-gnáissico); 2) Sequências arqueanas do tipo *Greenstone Belt* (Supergrupo Rio das Velhas); 3) Bacias Rífte e Margem Passiva de idade

paleoproterozoica (Supergrupo Minas); 4) Bacia de Antepaís de idade paleoproterozoica (grupos Sabará e Itacolomi); e 5) Rochas sedimentares meso a neoproterozoica (supergrupos Espinhaço e São Francisco), relacionadas a Bacia Rífte-SAG e de Antepaís, as quais recobrem parcialmente as unidades anteriores (Figura 27).

Ferro

Os depósitos de ferro estão majoritariamente relacionados às formações ferríferas bandadas (FFB) do Grupo Itabira, inserido dentro do Supergrupo Minas (Figura 28). As rochas hospedeiras da mineralização são principalmente itabirito e itabirito dolomítico, que estão metamorfizadas em fácies xisto verde a anfibolito. Os minérios de ferro apresentam altos teores (62 a 67%p/p de Fe), formados por hematita compacta hidrotermal, ou teores mais baixos (>30%p/p de Fe), quando representados por itabiritos friáveis a parcialmente enriquecidos (eg., DORR, 1964, 1965, 1969; PIRES, 1995; ROSIÈRE et al., 2001, 2004, 2008, 2009).

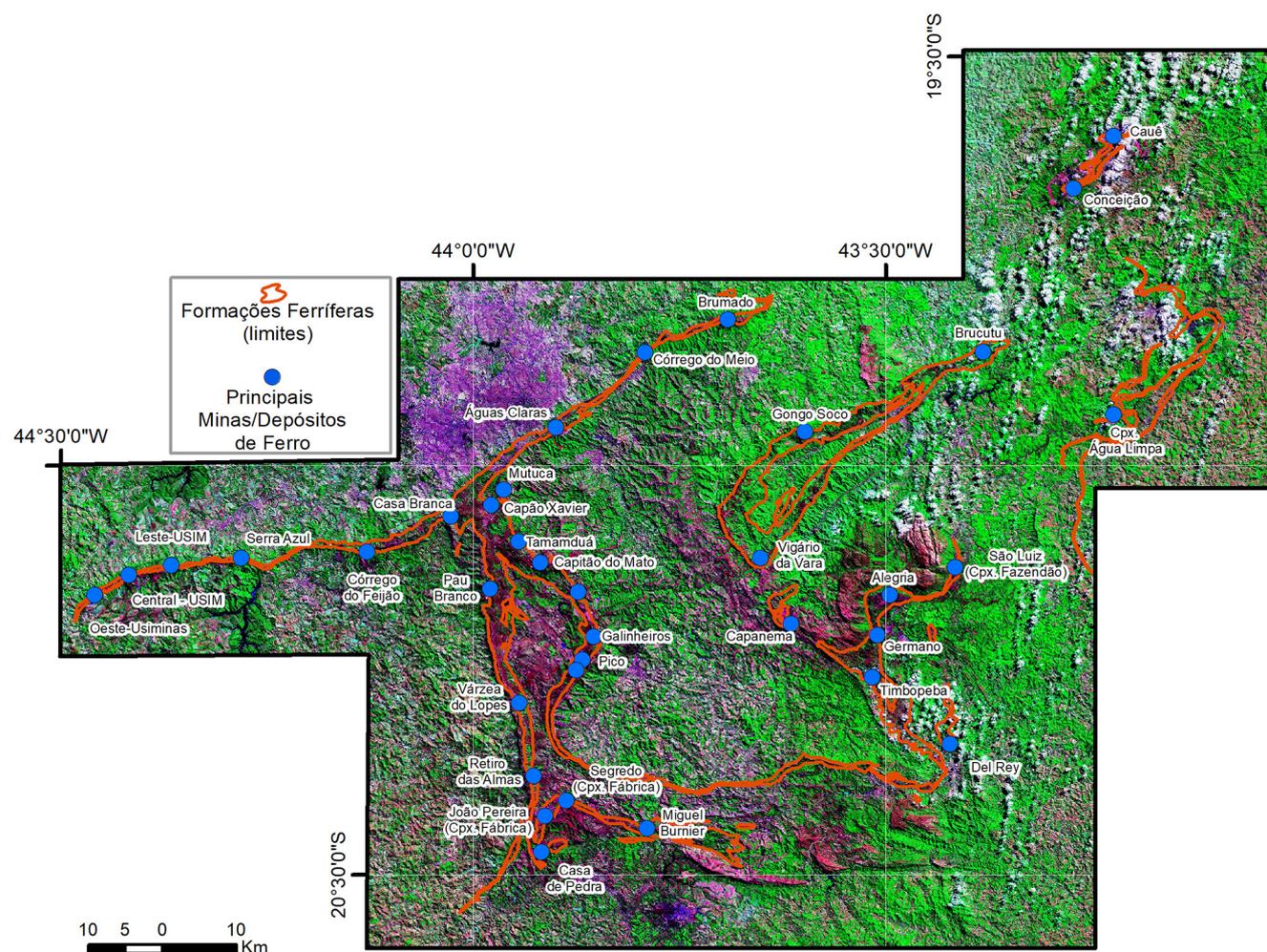


Figura 28: Distribuição das principais minas/depósitos de ferro na quadrícula do Quadrilátero Ferrífero.

As principais minas de ferro do Quadrilátero Ferrífero podem ser agrupadas em complexos mineiros conhecidos como: a) Complexo Minas Centrais (minas Brucutu, Água Limpa e Gongo Soco); b) Complexo Itabira (minas Cauê e Conceição); c) Complexo Mariana (minas Fábrica Nova, Alegria, Fazendão e Timbopeba); d) Complexo Pico (minas Dump Ore, Sapecado, Galinheiro e Pico); e) Complexo Vargem Grande (minas Tamadua, Capitão do Mato e Abóboras); f) Complexo Fábrica (minas João Pereira, Segredo e Bandeira); g) Complexo Paraopeba (minas Capão Xavier, Jangada, Córrego do Feijão e Mar Azul), além das minas localizadas na região oeste (minas Serra Azul, e da Usiminas).

Assinatura Geofísica das FFB – Grupo Itabira

As FFB do Grupo Itabira se destacam muito bem nos mapas geofísicos em relação às outras unidades, principalmente nos mapas magnéticos. No mapa do Campo Magnético Anômalo as anomalias associadas às FFB se apresentam com elevadas frequências e amplitudes variadas de até 2.500 nT, ao passo que no mapa Gradiente Total destaca-se a correlação entre a geometria das anomalias magnéticas e as feições geomorfológicas das principais serras do Quadrilátero Ferrífero, evidenciada pelo alto gradiente magnético (Figura 29). No mapa da Primeira Derivada Vertical podemos identificar as relações entre os elementos geométricos dos principais lineamentos primários e secundários que compõem as anomalias.

Nos mapas gamaespectrométricos, as FFB se destacam, principalmente, pelos valores baixos, em média, de contagem total (6,39 $\mu\text{R/h}$), tório equivalente (16,4 ppm), urânio equivalente (2,52 ppm) e potássio (0,53%) (Tabela 5), os quais lhes conferem cores mais escuras no mapa de composição ternária RGB (Figura 29). Já nos mapas de razões, as FFB também se destacam muito bem pelas elevadas relações $e\text{Th}/K$ ($\approx 76 \text{ ppm}\cdot\%^{-1}$) e eU/K ($\approx 12 \text{ ppm}\cdot\%^{-1}$) em relação a formações ferríferas do Supergrupo Rio das Velhas (Tabela 5).

Ouro

Os principais depósitos e minas de ouro do Quadrilátero Ferrífero estão relacionados a sequências metavulcanosedimentares do tipo *greenstone belt* (Supergrupo Rio das Velhas), meso a neoarqueanas, e a rochas metassedimentares do Supergrupo Minas (MACHADO et al., 1992; NOCE et al., 1995; VIAL et al., 2007; MARINHO et al., 2019).

Os depósitos relacionados ao Grupo Nova Lima possuem dois depósitos de classe mundial (Morro Velho e Cuiabá) e apresentam forte controle lito-estrutural, associados a intensa alteração hidrotermal ao longo zonas de cisalhamento arqueanas. Foram classificados por Lobato et al. (2001) como depósitos de ouro orogênico e têm sua fase

de mineralização atribuída aos estágios finais da orogênese arqueana, no intervalo de 2,72-2,67 Ga (DE WITT et al., 1996; LOBATO et al., 2001, 2007; MARTINS et al., 2016).

De acordo com Vial et al. (2007a) esses depósitos podem ser divididos nos seguintes tipos: 1) associadas às formações ferríferas bandadas, fácies silicato ou carbonato (e.g., Cuiabá e São Sebastião); 2) hospedados em rochas carbonáticas maciças – Lapa Seca – (e.g., Morro Velho); 3) associados a veios de quartzo com alteração hidrotermal (e.g., Juca Vieira); 4) associados a sulfetos disseminados e vênulas de quartzo em metassedimentos (e.g., Córrego do Sítio e Turmalina); e 5) associados anfibolitos, com alternância de leitos de sulfeto e anfibólio (e.g., Pari) e, mais raramente, ocorrendo em associação a metais base (e.g., Bico de Pedra).

Os depósitos hospedados em rochas do Supergrupo Minas constituem dois principais tipos (VIAL et al., 2007a): (1) ouro em veios de quartzo com arsenopirita e turmalina e (2) associação Au-Pd em depósitos do tipo Jacutinga. Os primeiros estão normalmente hospedados em filitos carbonosos, quartzitos e itabiritos do Supergrupo Minas e têm como principal depósito a mina de Passagem de Mariana (OLIVEIRA, 1998; CHAUVET et al., 2001; VIAL et al., 2007b), ao passo que os segundos hospedam-se em itabiritos da Formação Cauê, como exemplo os depósitos de Itabira e Gongo Soco (CABRAL et al., 2015).

A Figura 30 mostra a relação em planta das ocorrências/minas/depósitos de ouro com as anomalias geofísicas do Quadrilátero Ferrífero. No mapa do GT, as ocorrências/minas/depósitos são associados a um alto gradiente magnético e no mapa da composição ternária RGB, evidencia uma relativa maior contribuição do radioelemento potássio.

Assinatura Geofísica do Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas destaca-se por ser a unidade hospedeira dos principais depósitos auríferos da região (e.g., Morro Velho e Cuiabá). Nos mapas gamaespectrométricos, principalmente, no ternário RGB e CMY, contagem total e potássio, o *greenstone belt* do Supergrupo Rio das Velhas (GB) fica bem delimitado, exibindo uma assinatura geofísica distinta das unidades do entorno (Figura 31). De forma geral, a assinatura gamaespectrométrica do Supergrupo Rio das Velhas é marcada por baixos valores, em média, de potássio (1,38%), da contagem total (8,51 $\mu\text{R/h}$), de tório (21,2 ppm) e de urânio (2,61 ppm) (ver Tabela 5).

Ao analisar em detalhe o mapa ternário RGB, o *greenstone belt* pode ser dividido em dois grandes domínios gamaespectrométricos. O primeiro domínio exibe tonalidades escuras, de azul a negro, e o segundo domínio é composto por tonalidades variadas com predomínio de vermelho escuro e localmente tons esverdeados, róseos e azulados (Figura 31).

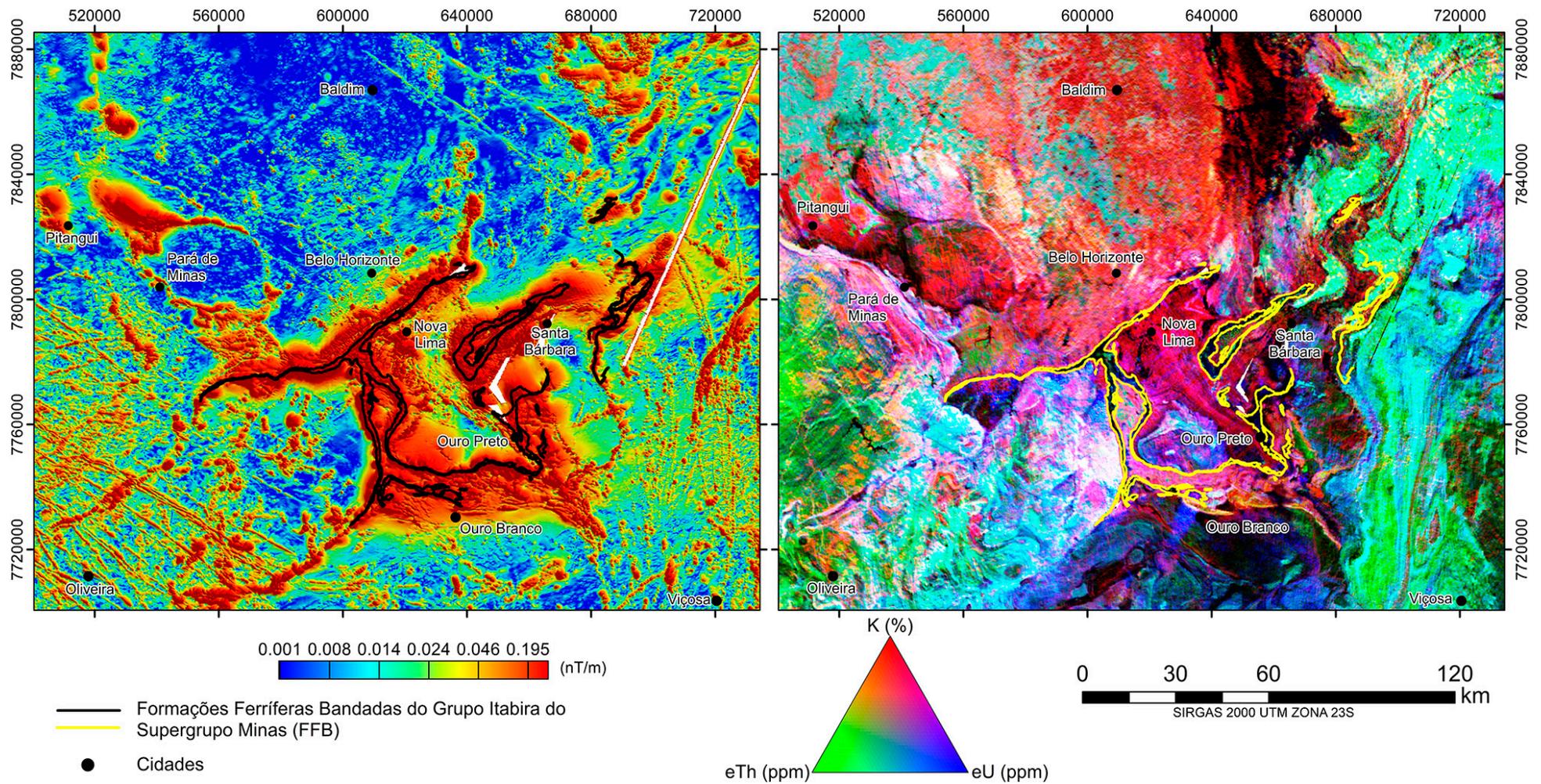


Figura 29: Mapa do gradiente total (à esq.) e de composição ternária RGB (à dir.), com destaque às formações ferríferas bandadas do Grupo Itabira do Supergrupo Minas.

Tabela 5: Parâmetros estatísticos dos dados aerogamaespectrométricos os para principais domínios de potencial metalogénico no Quadrilátero Ferrífero.

DOMÍNIOS GEOFÍSICOS - GEOLÓGICOS	UNIDADES GEOLÓGICAS	CANAL GAMAESPECTROMÉTRICO	Nº	MÉDIA	PERCENTIS		
					Q1(25%)	MEDIANA - Q2(50%)	Q3(75%)
FFB	Grupo Itabira	Contagem Total - CT ($\mu\text{R/h}$)	44.968	6,39	3,65	5,89	8,47
GB			269.731	8,51	5,62	7,66	10,47
GBMS	Supergrupo Rio das Velhas		236.557	8,99	6,07	8,13	10,93
GBMF			38.095	5,01	3,60	4,91	6,21
FFB	Grupo Itabira	Tório - eTh (ppm)	44.968	16,45	7,32	13,88	22,07
GB			269.731	21,16	11,02	16,38	26,54
GBMS	Supergrupo Rio das Velhas		236.557	22,27	11,38	17,28	28,14
GBMF			38.095	12,71	8,21	12,41	16,63
FFB	Grupo Itabira	Urânio - eU (ppm)	31.295	2,52	1,43	2,15	3,08
GB			187.212	2,61	1,33	2,25	3,36
GBMS	Supergrupo Rio das Velhas		164165	2,71	1,46	2,35	3,45
GBMF			26488	1,83	0,58	1,39	2,45
FFB	Grupo Itabira	Potássio - K (%)	44972	0,58	0,07	0,29	0,83
GB			269755	1,39	0,58	1,23	2,02
GBMS	Supergrupo Rio das Velhas		236581	1,51	0,73	1,38	2,13
GBMF			38095	0,51	0,19	0,36	0,66
FFB	Grupo Itabira	Razão eTh/K (ppm/%)	44968	76,17	17,29	34,89	91,74
GB			269731	38,28	7,78	14,48	32,75
GBMS	Supergrupo Rio das Velhas		236.557	36,73	7,40	13,06	28,30
GBMF			38.095	50,51	17,21	31,80	60,19
FFB	Grupo Itabira	Razão eU/K (ppm/%)	31.278	12,23	2,36	6,05	17,44
GB			187.139	4,65	0,98	1,76	3,48
GBMS	Supergrupo Rio das Velhas		164.092	4,23	0,96	1,68	3,18
GBMF			26.488	8,00	1,36	3,04	6,94
FFB	Grupo Itabira	Razão eU/eTh	31.273	0,24	0,09	0,15	0,28
GB			31.273	0,16	0,08	0,14	0,21
GBMS	Supergrupo Rio das Velhas		164.077	0,16	0,07	0,12	0,21
GBMF			26.488	0,17	0,05	0,11	0,21

Siglas: FFB - formações ferríferas bandadas do Grupo Itabira (Supegrupo Minas); GB – Supergrupo Rio das Velhas; GBMS – Domínio metassedimentar vulcanogênico; GBMF – Domínio máficas e formações ferríferas bandadas.

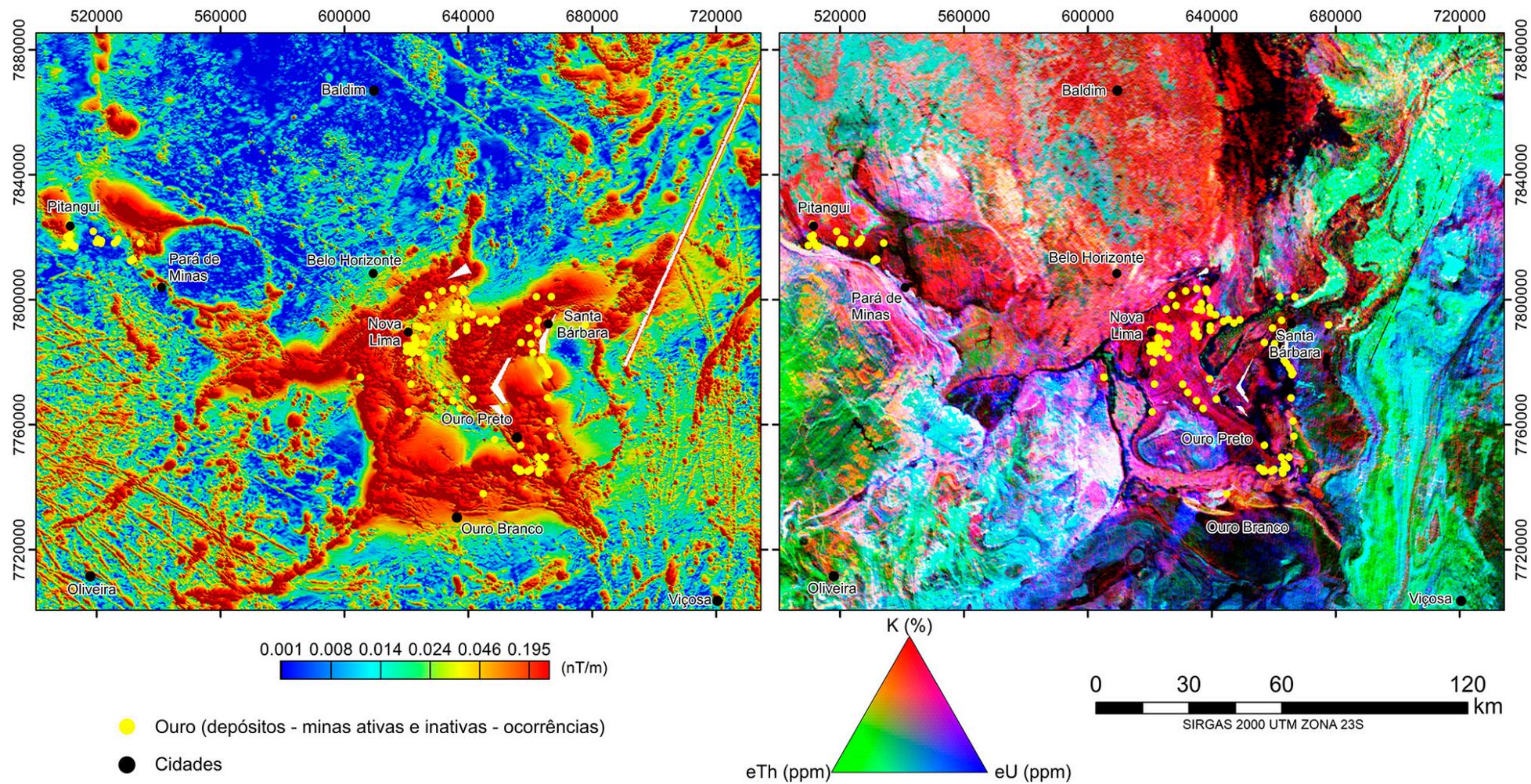


Figura 30: Principais depósitos, minas e ocorrências de ouro e a correlação espacial com os mapas geofísicos do gradiente total (à esq.) e de composição ternária RGB (à dir.).

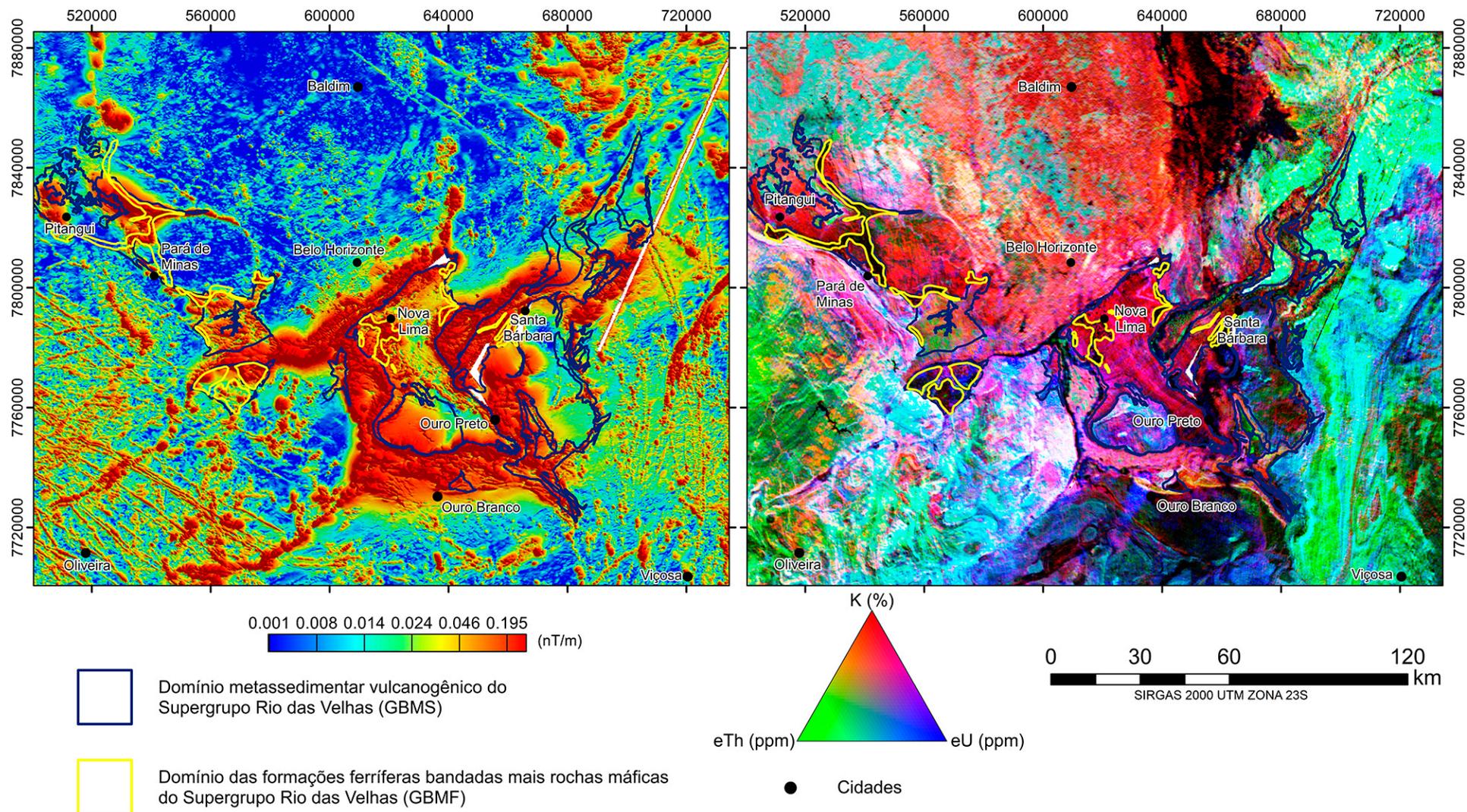


Figura 31: Mapa do gradiente total (à esq.) e da composição ternária RGB (à dir.), com destaque ao Supergrupo Rio das Velhas com a separação de domínios que apresentam assinaturas geofísicas distintas.

Os domínios de tons negros a azul escuro (primeiro domínio gamaespectrométrico) apresentam área de exposição mais reduzida e estão correlacionadas, principalmente, às regiões com predominância de rochas máficas/ultramáficas e/ou formações ferríferas bandadas (e.g., região de Nova Lima, Santa Bárbara e Pará de Minas). Subordinadamente, ocorrem intercaladas nesses domínios rochas metavulcanoclásticas de composição intermediária associadas. A assinatura gamaespectrométrica apresenta valores de Contagem Total mais baixos e concentrações inferiores de K (0,4%), eU (1,4 ppm) e eTh (12,4 ppm) em comparação aos valores observados para o GB (Tabela 5 e Figura 32).

O segundo domínio gamaespectrométrico, com predomínio da tonalidade vermelho escura, possui a maior extensão dentro do Supergrupo Rio das Velhas e é constituído por metassedimentos vulcanogênicos, cuja origem varia desde termos piroclásticos a rochas epiclásticas (BALTAZAR & ZUCCHETTI, 2007). Em termos litológicos são representados majoritariamente por metagrauvacas de matriz clorítica a sericítica, ricos ou não em fragmentos líticos.

A assinatura gamaespectrométrica dentro desse segundo domínio é, por vezes, heterogênea e permite a delimitação

de subdomínios gamaespectrométricos. Por exemplo, as rochas metassedimentares vulcanogênicas da região de Mateus Leme (CT: 10,8 μ R/h; K: 1,6%; U: 2,5 ppm; Th: 28,8 ppm) apresentam características bem distintas daquelas observadas no domínio metassedimentar em si (CT: 7,7 μ R/h; K: 1,4%; U: 2,4 ppm; Th: 17,3 ppm). Tais fatos são provavelmente condicionados por questões intrínsecas a gênese e proveniência desses pacotes.

As porções do *greenstone belt* do domínio máfico que são coincidentes com pequenas anomalias magnéticas positivas, com amplitudes de até 1.200 nT, estão associadas com camadas de formações ferríferas bandadas. Essas anomalias magnéticas podem mostrar relação direta com as principais mineralizações de ouro associadas às formações ferríferas bandadas, existentes nessa região (e.g., Raposos, Lamego, Roças Grandes e São Bento).

Na região noroeste do Quadrilátero Ferrífero, entre as cidades de Pará de Minas e Pequi, ocorrem expressivas anomalias magnéticas, com amplitudes de até 700 nT, associadas ao domínio de rochas máficas. Inserido no contexto dessas anomalias magnéticas, destaca-se o depósito aurífero de São Sebastião, hospedado em formações ferríferas fácies silicato (SOARES et al., 2018).

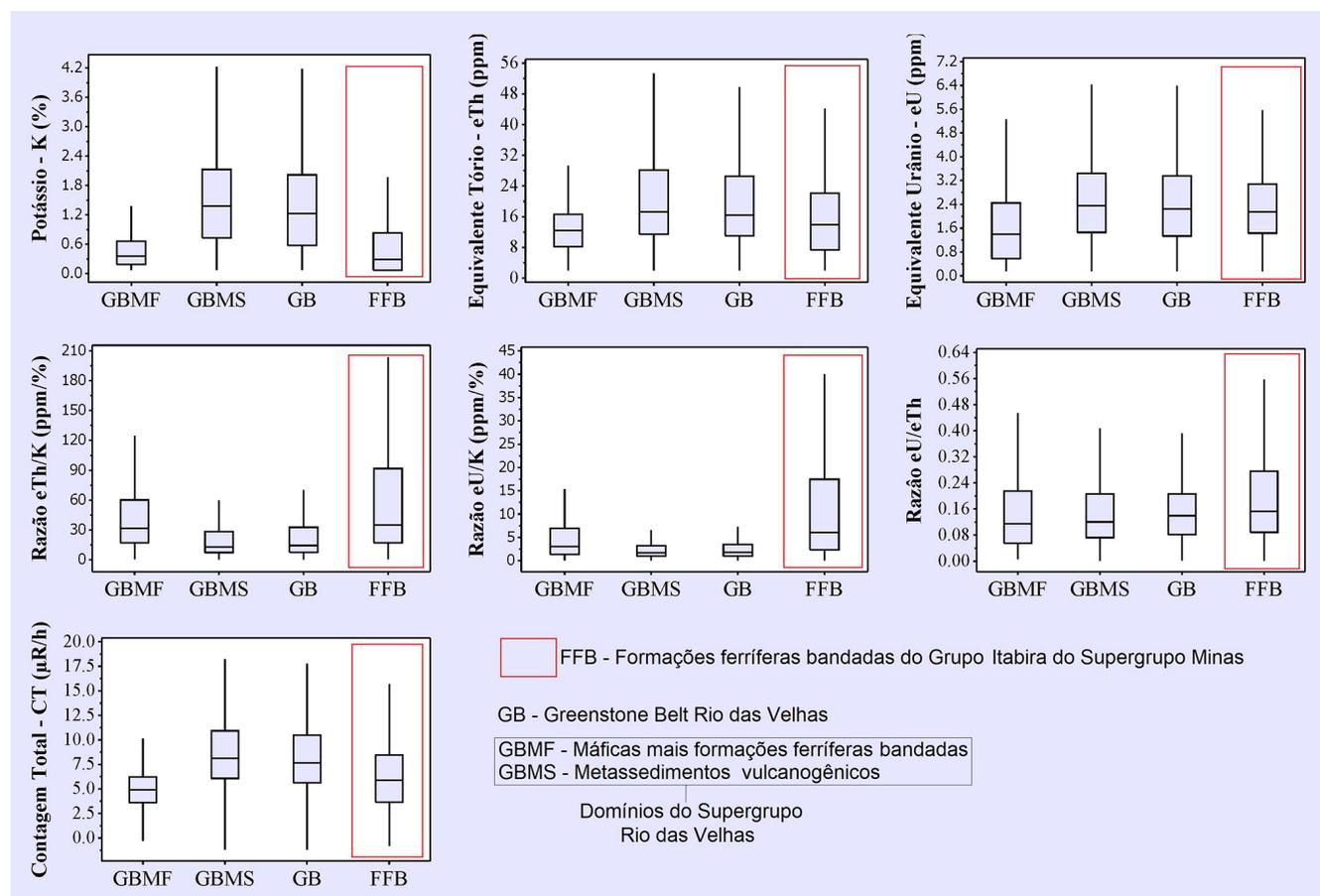


Figura 32: Diagrama de caixa (*boxplot*) para os canais da contagem total, do eTh, do eU, do K e para as razões gamaespectrométricas.

PROVÍNCIA MINERAL RELACIONADA ÀS INTRUSÕES ALCALINAS MESOZOICAS – NIÓBIO, FÓSFORO E URÂNIO

No estado de Minas Gerais as intrusões alcalinas são, em sua maioria, integrantes da Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP) GIBSON et al., 1995) e do Lineamento Magmático de Cabo Frio (e.g., Maciço de Poços de Caldas) (ALMEIDA, 1991). Essas províncias representam o registro de um extenso magmatismo alcalino-carbonatítico continental com idade meso-cenozoica (Figura 33).

Essas províncias têm sido objeto de estudos geológicos e geofísicos em virtude de sua dimensão espacial e variedade litológica (e.g., GIBSON et al., 1995; THOMPSON et al., 1998; COMIN-CHIARAMONTI & GOMES, 2005) e, principalmente, pela importância econômica de suas reservas minerais de nióbio, fosfato, urânio e minerais radioativos, titânio e elementos terras raras (ETR).

As intrusões alcalinas que representam essas províncias são muito bem marcadas por anomalias gamaespectrométricas

e magnetométricas, devido ao seu contraste das propriedades físicas entre essas intrusões alcalinas e as rochas encaixantes, consequência da concentração de minerais radioativos e magnéticos.

Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP)

Localizada na região oeste do estado, às margens da Bacia do Paraná (Figura 33), a PIAP representa uma das maiores províncias de natureza máfica-potássica do mundo (>15.000 km³ em volume; GIBSON et al., 1995), abrangendo um conjunto de complexos alcalino-carbonatíticos, corpos com afinidade kimberlítica e lamproítica, além de derrames kamafugíticos do Grupo Mata da Corda (CARLSON et al., 1996, 2007; ARAUJO et al., 2001). Em geral, as intrusões apresentam idades referentes ao Cretáceo Superior (90-80 Ma; GIBSON et al., 1995) e estão encaixadas no embasamento cristalino proterozoico da Faixa Brasília, ao longo de uma estrutura denominada Arco do Alto Paranaíba, com direção NW-SE (HASUI & HARALYI, 1991).

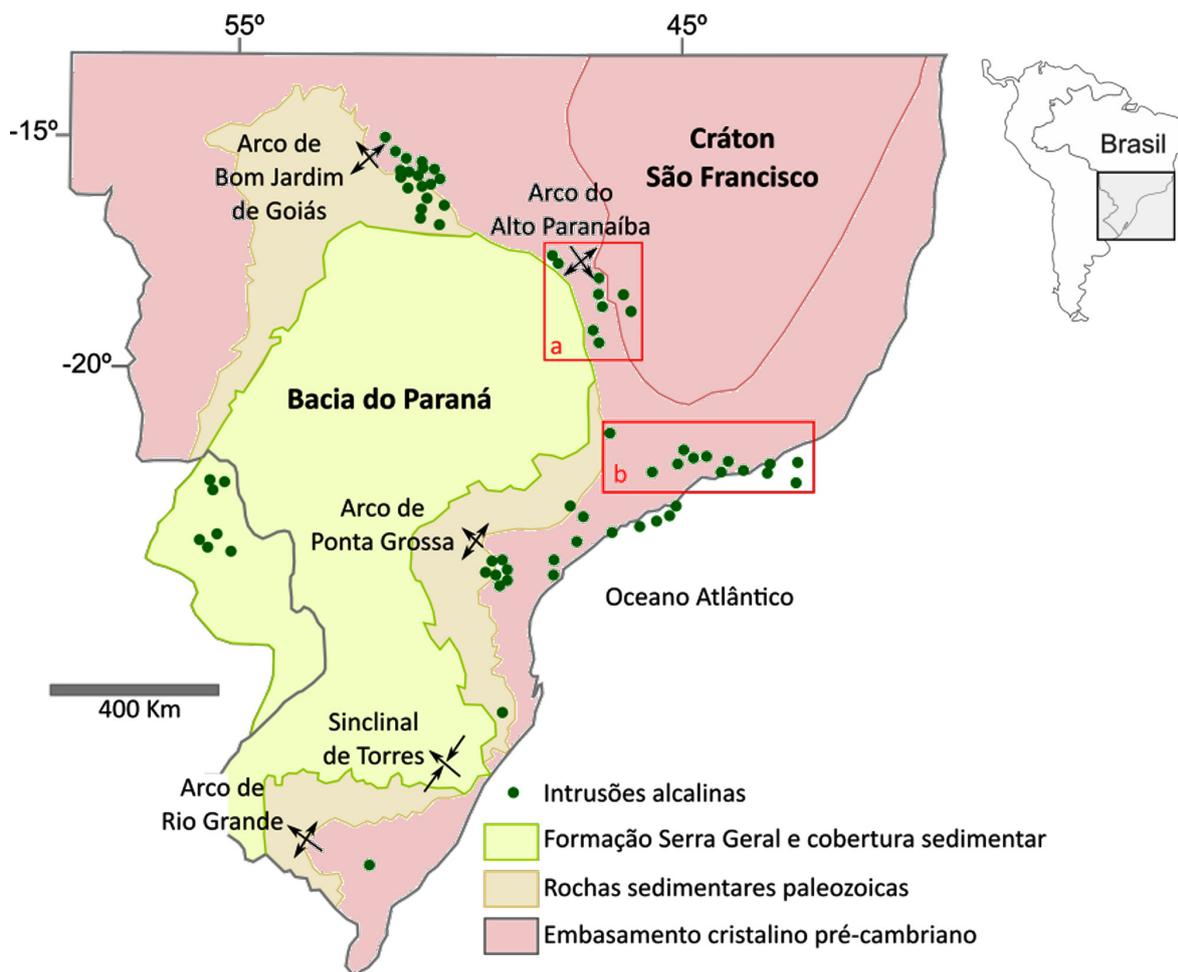


Figura 33: Mapa das ocorrências de rochas alcalinas nas margens da Bacia do Paraná, com a indicação da (a) Província Ígnea Alto Paranaíba, (b) Lineamento Magmático de Cabo Frio e setor norte da Província Ígnea da Serra do Mar (adaptado de JUNQUEIRA-BROD et al., 2002).

As ocorrências alcalinas da PIAP variam desde pequenos diques, *pipes*, *plugs* a complexos maiores com até 65 km² (e.g., Tapira, Barreiro/Araxá e Serra Negra/Salitre) (BROD et al., 2000). Os litotipos com afinidade kamafugítica são os mais abundantes e estão, em geral, presentes nos derrames caracterizados por uma alta concentração de clinopiroxênio (BROD et al., 2000; GOMES & COMIN-CHIARAMONTI, 2005). Os complexos carbonatíticos apresentam afinidade ultrapotássica e foram formados como resultado de processos de cristalização fracionada e imiscibilidade líquida (BROD et al., 2000; GOMIDE et al., 2015).

A diversidade de litotipos alcalinos apresenta importante papel no potencial mineral da região, com depósitos de diamante em fonte primária (e.g., Kimberlito Canastra-1; CABRAL NETO et al., 2017) a depósitos de fosfato, nióbio, minerais de terras raras, titânio, vermiculita e barita nos carbonatitos (Barreiro/Araxá, Tapira e Salitre; EBERHARDT, 2014). O intemperismo tropical da área favorece a concentração dos minerais e a viabilidade econômica para a exploração desses recursos (EBERHARDT, 2014).

O Complexo de Serra Negra/Salitre, à leste da cidade de Patrocínio, é composto por dunito, peridotito, piroxenito, carbonatito, e hospeda um depósito de fosfato (apatita), além de ocorrências de titânio (magneto-ilmenita e anatásio) (BROD et al., 2000) e de nióbio-pirocloro (BIONDI, 2003). As intrusões alcalinas de Serra Negra e Salitre apresentam anomalias magnetométricas com elevado gradiente magnético e amplitudes da ordem de até 10.400 nT e 7.400 nT, respectivamente (Figura 34). Diferentemente, no mapa de anomalia Bouguer as duas intrusões alcalinas aparecem como uma única anomalia gravimétrica, portanto, não é possível separar essas intrusões, pois as estações gravimétricas não são adensadas o suficiente para discretizar as anomalias gravimétricas (Figura 34). O alto gravimétrico das duas intrusões alcalinas se destaca no mapa gravimétrico com -78 mGal e -83 mGal, Serra Negra e Salitre, respectivamente.

O complexo carbonatítico do Barreiro-Araxá engloba a mais importante mina de Nióbio (pirocloro) do Brasil e do mundo, além de hospedar uma mina de fosfato, e também ter potencial para depósitos de ETR, magnetita e de barita (BIONDI, 2003; EBERHARDT, 2014).

Por fim o Complexo de Tapira, constituído principalmente por peridotito, piroxenito, dunito e carbonatito, contempla uma grande mina de fosfato (apatita) e um depósito de titânio (anatásio), além de apresentar potencial para nióbio e ETR (DARDENNE & SCHOBENHAUS, 2001; BIONDI, 2003).

As assinaturas magnéticas das anomalias geofísicas associadas às intrusões alcalinas de Araxá e Tapira, apresentam formas circulares caracterizadas por altos gradientes magnéticos e amplitudes, da ordem de 1.200 nT e

2.400 nT (Figura 34), respectivamente; entretanto sendo estas menores em relação a de Serra Negra. Também aparecem como um alto gravimétrico com -97 mGal e -99 mGal, Araxá e Tapira, respectivamente.

As intrusões alcalinas da PIAP são todas bem marcadas no mapa de Anomalia Bouguer evidenciando o elevado contraste da propriedade física com as rochas encaixantes e, mesmo apresentando baixos comprimentos de onda, aparecem nos mapas regionais como altos gravimétricos.

Os complexos da PIAP também mostram assinaturas gamaespectrométricas muito bem marcadas. Os mapas de composição ternária RGB (Figura 34), marcam perfeitamente os limites de cada intrusão, caracterizadas principalmente pelos elevados teores de tório/urânio e valores relativamente baixos de potássio em comparação a intrusão de Poços de Caldas (Tabela 6, Figura 33).

A caracterização da assinatura gamaespectrométrica de cada intrusão alcalina pode ser realizada através da comparação dos parâmetros estatísticos de todos os canais radiométricos (Tabela 6). Essa tabela mostra que a intrusão de Araxá apresenta as maiores concentrações de urânio, tório e potássio, ao passo que a intrusão de Serra Negra apresenta as menores concentrações desses elementos radiométricos, em média.

A assinatura gamaespectrométrica de cada intrusão alcalina também fica evidente quando se observa as razões entre os canais dos elementos radiométricos (eTh/K, eU/K e eU/eTh) (Tabela 6 e Figura 35) e seus respectivos mapas. As razões são as melhores ferramentas para se descrever a assinatura gamaespectrométrica e evidenciar as diferenças litológicas que não são tão nítidas ou não apresentam tanta precisão nos mapas dos canais dos elementos radiométricos separadamente.

Lineamento Magmático de Cabo Frio – Intrusão Poços de Caldas

O Lineamento Magmático de Cabo Frio (LMCF), definido por Almeida (1991) e estabelecido como uma província por Riccomini *et al.* (2005), consiste em uma feição estrutural, com direção WNW-ESE, que se estende desde Jaboticabal, estado de São Paulo, até a região limite entre as crostas continental e oceânica (Banco Almirante Saldanha; RICCOMINI *et al.*, 2005).

A área, com 1.150 km de comprimento e 60 km de largura, inclui 26 corpos alcalinos formados por maciços, *stocks*, *plugs*, centros efusivos e diques com idades que variam do Cretáceo Superior ao Paleógeno (RICCOMINI *et al.*, 2005; ROSA, 2017). As ocorrências estão, em geral, encaixadas no embasamento cristalino pré-cambriano das faixas Brasília e Ribeira (FALEIROS *et al.*, 2011), sendo compostas por nefelina sienitos e sienitos, juntamente com seus correspondentes vulcânicos (RICCOMINI *et al.*, 2005).

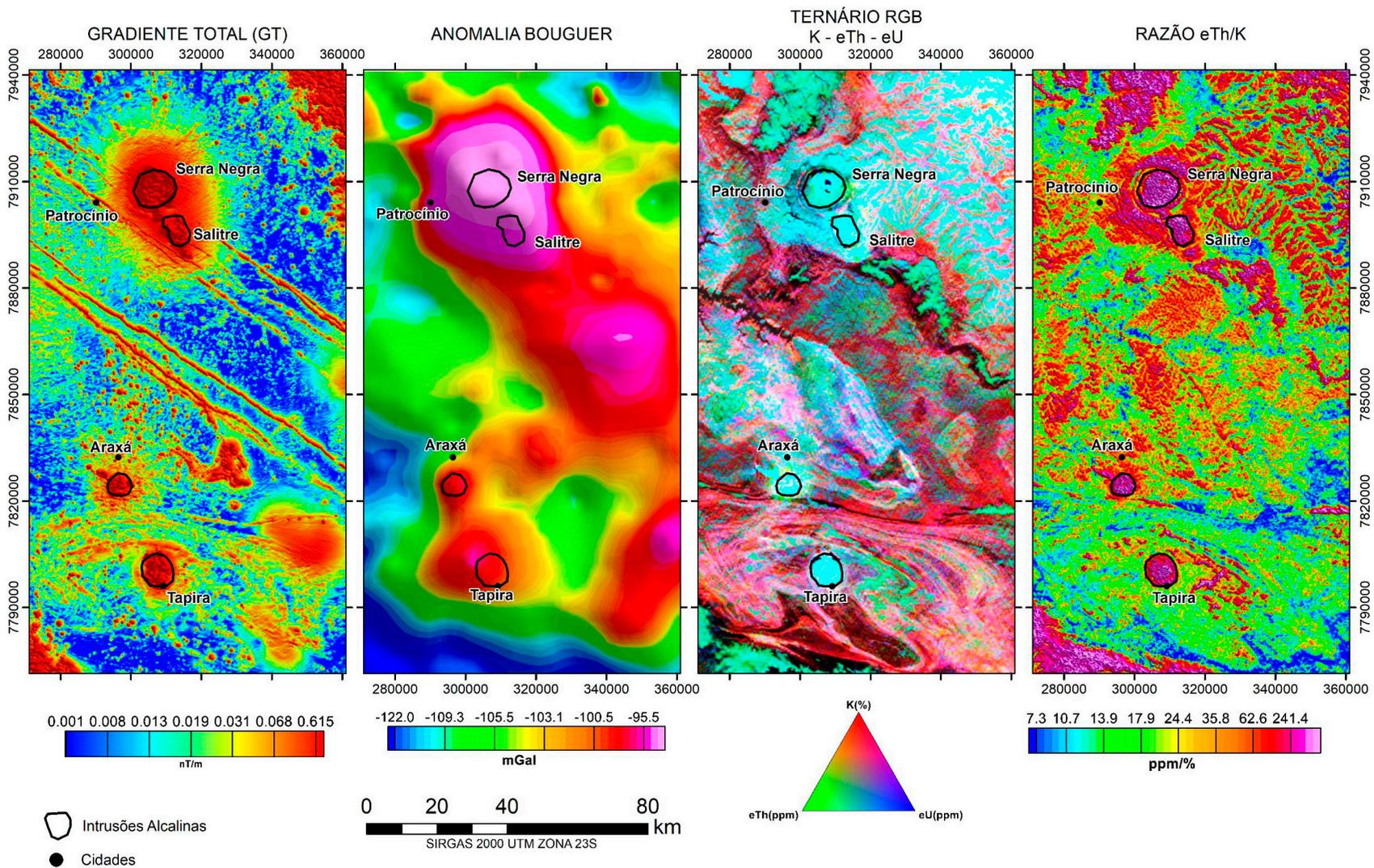


Figura 34: Mapa do gradiente total, da Anomalia Bouguer, de composição ternária RGB e da razão eTh/K com destaques para as intrusões alcalinas de Serra Negra, Salitre, Araxá e Tapira. Observa-se o elevado contraste das propriedades físicas entre as intrusões alcalinas da PIAP com as rochas encaixantes.

Tabela 6: Parâmetros estatísticos dos dados aerogamaespectrométricos para as intrusões alcalinas.

INTRUSÃO ALCALINA	CANAL GAMAESPECTROMÉTRICO	Nº	MÉDIA	PERCENTIS		
				Q1(25%)	MEDIANA - Q2(50%)	Q3(75%)
ARAXÁ	Contagem Total - CT ($\mu\text{R/h}$)	2.133	151,77	91,81	139,08	200,38
SALITRE		2.904	60,11	38,27	49,29	72,79
SERRA NEGRA		6.173	26,67	18,62	23,92	30,71
TAPIRA		4.211	53,27	33,47	44,14	63,54
POÇOS DE CALDAS		36.970	43,09	32,44	36,70	45,53
ARAXÁ	Tório - eTh (ppm)	2.133	632,05	389,30	583,76	831,10
SALITRE		2.904	235,11	143,93	189,00	277,86
SERRA NEGRA		6.173	105,39	71,35	95,44	122,16
TAPIRA		4.211	201,18	121,80	164,52	236,05
POÇOS DE CALDAS		35.544	145,70	107,50	122,20	155,50
ARAXÁ	Urânio - eU (ppm)	1.487	27,76	13,80	23,10	38,58
SALITRE		2.015	16,03	10,89	14,57	20,16
SERRA NEGRA		4.277	6,41	4,59	5,59	7,21
TAPIRA		2.919	16,11	9,91	13,77	21,19
POÇOS DE CALDAS		24.604	15,66	7,17	10,93	17,45
ARAXÁ	Potássio - K (%)	2.133	1,49	0,57	1,29	2,13
SALITRE		2.904	0,58	0,11	0,42	0,86
SERRA NEGRA		6.173	0,19	0,07	0,09	0,22
TAPIRA		4.211	0,75	0,28	0,60	1,07
POÇOS DE CALDAS		35.544	3,31	1,98	2,93	4,23
ARAXÁ	Razão eU/K (ppm/%)	1.487	46,96	10,86	20,71	42,62
SALITRE		2.015	71,62	18,93	35,47	95,85
SERRA NEGRA		4.277	57,54	25,28	50,50	78,52
TAPIRA		2.919	48,16	12,79	23,51	48,51
POÇOS DE CALDAS		24.495	7,19	2,07	4,29	7,74
ARAXÁ	Razão eTh/K (ppm/%)	2.133	1.298,40	287,30	489,70	1.057,20
SALITRE		2.904	1.088,40	273,80	503,60	1.599,10
SERRA NEGRA		6.173	991,00	381,00	867,00	1.387,00
TAPIRA		4.211	767,40	136,00	279,10	656,60
POÇOS DE CALDAS		35.544	77,20	29,30	47,00	71,20
ARAXÁ	Razão eU/eTh (ppm/%)	1.487	0,043	0,033	0,040	0,049
SALITRE		2.015	0,074	0,059	0,073	0,087
SERRA NEGRA		4.277	0,071	0,053	0,061	0,073
TAPIRA		2.919	0,087	0,068	0,084	0,103
POÇOS DE CALDAS		24.495	0,102	0,059	0,086	0,121

Símbolos: AX-Araxá; TP-Tapira; SL-Salitre; SN-Serra Negra; e PC-Poços de Caldas.

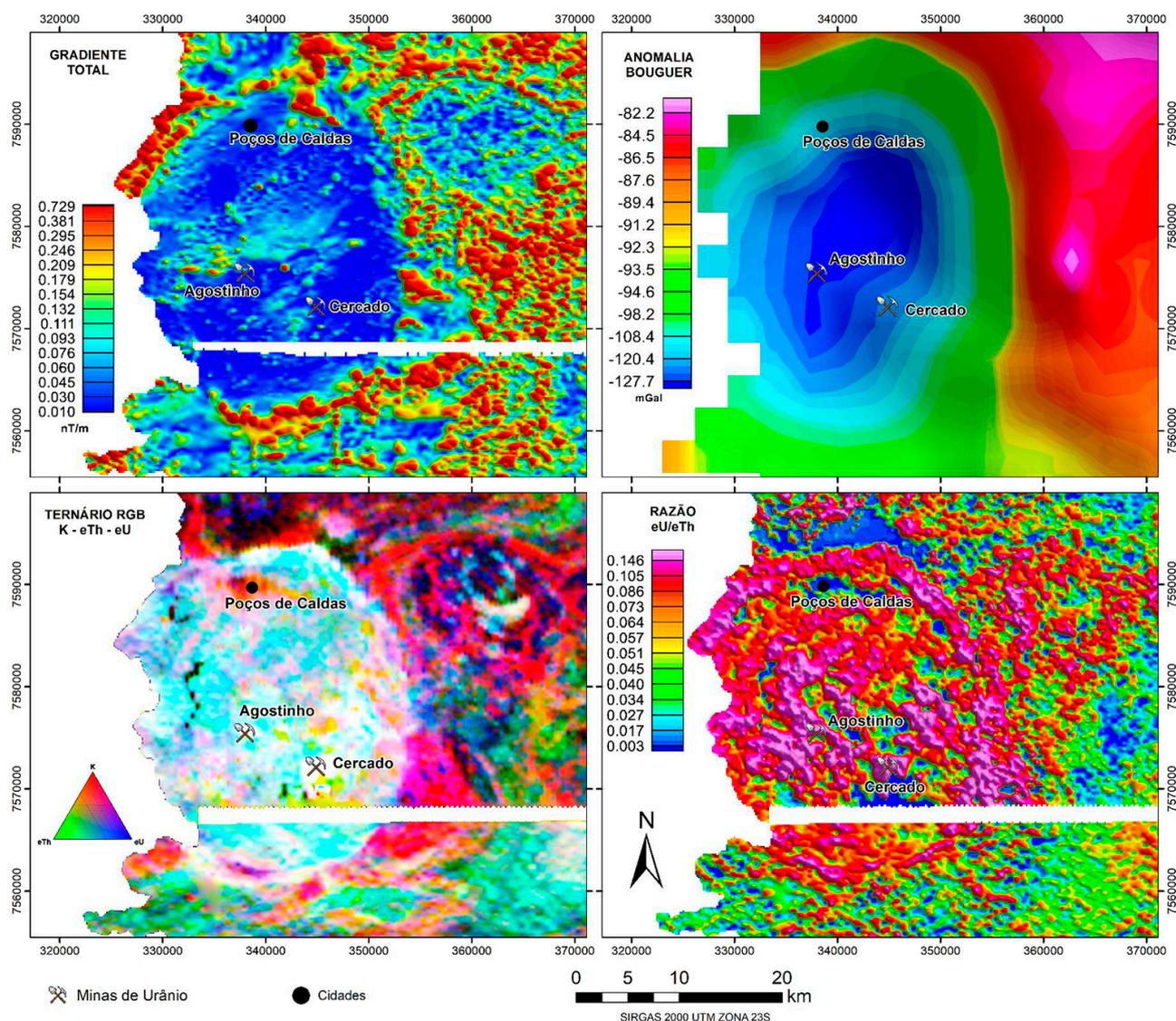


Figura 35: Mapas geofísicos com destaque para a intrusão alcalina de Poços de Caldas/MG e seu alto contraste petrofísico.

O Maciço Alcalino de Poços de Caldas (Figura 35) é a intrusão que mais se destaca do LMCF e consistem o maior corpo alcalino do Brasil (cerca de 800 km²) e um dos maiores do mundo (ULBRICH, 2005). Esse maciço é considerado como representante de uma estrutura tipo caldeira (ELLERT, 1959), e apresenta uma associação de fonolitos e nefelina sienitos com litotipos agpaíticos, estes com grande concentração de minerais raros (lujavritos e khibinitos; ULBRICH, 2005).

O Maciço de Poços de Caldas apresenta mineralizações de urânio, zircônio, terras raras e molibdênio associadas a um hidrotermalismo potássico que gerou anomalias radioativas (GARDA, 1990; WABER et al., 1992). Nesse maciço está localizado o principal depósito de urânio e zircônio do estado de Minas Gerais (Morro do Ferro), composto pelas minas de Usamu Utsumi, ou Cercado, e Agostinho (BIONDI, 2003) (Figura 35).

Em todos os mapas geofísicos é evidente o contraste das propriedades físicas entre as rochas da intrusão alcalina do sul de Minas Gerais com as rochas encaixantes da *Nappe Socorro-Guaxupé* (Figura 35).

A assinatura magnética do Maciço de Poços de Caldas é muito bem marcada, devido ao contraste do baixo gradiente magnético com as rochas encaixantes, caracterizada por uma anomalia negativa com amplitudes máximas de até 228 nT (Figura 35), diferentemente das intrusões relacionadas a PIAP.

Já no mapa da Anomalia Bouguer a intrusão alcalina de Poços de Caldas se destaca regionalmente como uma enorme anomalia gravimétrica negativa de -121 mGal (Figura 35), contrastando plenamente com todas as intrusões da PIAP.

Em relação à assinatura gamaespectrométrica do maciço de Poços de Caldas observa-se maiores concentrações de potássio, média de 3,31%, em contraste com as intrusões da PIAP (ver Tabela 6 e Figura 36). Este maciço apresenta

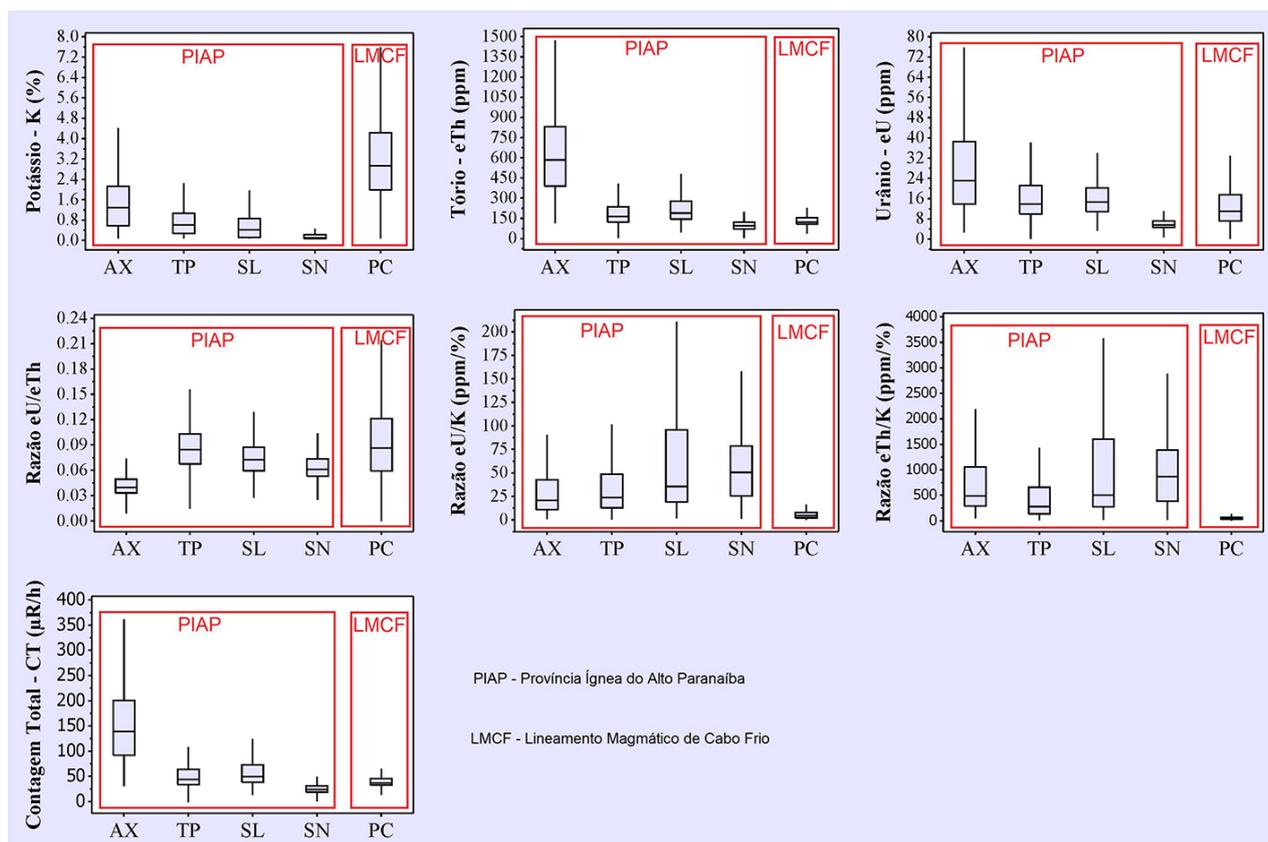


Figura 36: Diagrama de caixa (boxplot) para os canais da contagem total, do eTh, do eU, do K, das razões gamaespectrométricas para intrusões alcalinas de Araxá (AX), Tapira (TP), Salitre (SL), Serra Negra (SN) e Poços de Caldas (PC). Os diagramas evidenciam muito bem as diferenças das assinaturas geofísicas.

no mapa de composição ternária RGB cores brancas com porções azuladas que representam locais dentro do maciço com relativa maior contribuição do radioelemento urânio (Figura 35). Analisando-se as razões radiométricas fica evidente que a assinatura gamaespectrométrica das intrusões alcalinas da PIAP é completamente diferente dessa intrusão alcalina do LMCF (Figura 36), que comparativamente apresenta baixos valores para as razões eTh/K e eU/K.

O mapa da razão eU/eTh mostra que as minas de urânio, Usamu Utsumi e Agostinho, estão localizadas numa região onde essa razão gamaespectrométrica se eleva, ou seja, ocorre uma elevação da concentração de urânio e/ou uma diminuição da concentração de tório (Figura 35). Esse mapa poderia servir como um guia prospectivo de urânio dentro do maciço. De acordo com IAEA (2003), são as razões gamaespectrométricas os indicadores mais adequados para a análise de variações litológicas, logo, o que corrobora para utilização do mapa da razão eU/eTh como guia prospectivo.

DISTRITO FERRÍFERO DE NOVA AURORA

O Distrito Ferrífero Nova Aurora (DFNA) localiza-se no norte de Minas Gerais, nos arredores de Rio Pardo de Minas e Salinas, inserido na porção oeste do Orógeno

Araucaí-Congo Ocidental (PEDROSA-SOARES et al., 1998, 2001, 2007, 2008; PEDROSA-SOARES & WIEDEMANN-LEONARDOS, 2000).

A mineralização de ferro nesse distrito é relacionada às formações ferríferas diamictíticas (FFD) da Formação Nova Aurora, base do Grupo Macaúbas, e individualizadas no Membro Riacho Poções (VIVEIROS et al., 1978). Apesar da grande distribuição geográfica da Formação Nova Aurora, o Membro Riacho Poções encontra-se restrito à porção central dessa unidade e exibe variação tanto na espessura como nos teores de ferro. As rochas na região estão estruturadas principalmente por uma foliação regional de direção N-S e mergulho entre 20° e 50°, sendo esse o plano axial de dobras apertadas a isoclinais vergentes para oeste.

As FFD se estendem por mais de 60 km (SCHOBENHAUS, 1972) com potencial de recursos superiores a 20 bilhões de toneladas de minério de ferro de baixo teor (17-35% p/p de Fe, CARVALHO et al., 2014), com teores máximos inferiores a 70% p/p de Fe (VELASCO & COSTA, 1970; SCHOBENHAUS, 1972; VIVEIROS et al., 1978).

As FFD podem conter matriz rica em hematita ou magnetita, predominando a primeira. Na base da mineralização de ferro encontra-se um metadiamicrito com matriz arenosa com intercalações de quartzitos e xistos. No topo da

sequência o metadiamicrito tem matriz silto-argilosa, com maior concentração de micas, predominando a muscovita. A FFD hematítica é caracterizada por metadiamicrito cinza, matriz suportado, com uma foliação milonítica, contendo de 5 a 60%p/p de óxido de ferro na matriz. Especularita de granulação fina (< 0,1 mm a 0,55 mm) ocorre disseminada na matriz ou concentrada em bandas deformacionais, onde pode alcançar até 1 mm.

A FFD magnetítica ocorre somente em alguns locais ao longo do Membro Riacho Poções, aparentemente em zonas de maior deformação. O metadiamicrito magnetítico é cinza escuro e caracterizado pelo aumento da concentração de magnetita em relação a hematita (<10%p/p a ausente). A magnetita pode representar até 40% da matriz, geralmente porfiroblástica, euédrica a subédrica.

Os metadiamicritos, incluindo as FFD hospedeiras dos depósitos de ferro, são interpretados como tendo sido depositados em ambiente glacio-marinho na fase rifte da bacia Macaúbas, durante o Criogeniano, aproximadamente em 700 Ma, possivelmente ao final da glaciação Sturtiana. No entanto, ainda faltam dados para melhor restringir a idade de deposição das FFD. Vilela (2010) sugere que a bacia precursora estivesse enriquecida em Fe^{2+} e que a precipitação ocorreu pela oxidação em Fe^{3+} na forma de hidróxido de ferro simultaneamente com o aporte dos demais componentes detríticos ao final do período glacial. Os eventos tectônicos posteriores recristalizaram o hidróxido de ferro em hematita e definiram a configuração dos depósitos atuais.

Os principais projetos e seus alvos de pesquisa, conhecidos atualmente (CARVALHO et al., 2014), são denominados

de: Projeto PRT, Projeto Jibóia, Projeto Vale do Rio Pardo (blocos 7 e 8) e o Projeto Nova Aurora (Figura 37).

A assinatura geofísica dessas formações ferríferas diamicriticas são principalmente visualizadas nos mapas magnetométricos. As anomalias magnéticas de alta frequência relativas às formações ferríferas e, conseqüentemente, aos principais projetos de pesquisa na região, mostram uma direção principal dessa anomalia NNE, mas também apresentam as feições de dobramentos descritas na região (Figura 37).

Essas anomalias geofísicas apresentam uma assinatura magnética com altos gradientes e amplitudes atingindo o máximo de 600 nT e observa-se sua continuidade (também no mapa da primeira derivada vertical DZ1) para NE, em direção a Rio Pardo de Minas. Entretanto a correlação dessa assinatura geofísica com as FFD ainda é incerta e caso essa unidade seja responsável por essa anomalia magnética, a mesma se encontra subaflorante (Figura 37).

O mapa de composição ternária RGB não mostra uma boa assinatura gamaespectrométrica para as FFD, justificado principalmente por sua delgada espessura (<100 m) e falta de exposição, em muito decorrente do intenso processo de lateritização que ocorre na região. Em trabalhos recentes, utilizando da metodologia da lógica *Fuzzy*, Voll et al. (2020) integra vários mapas, inclusive os mapas geofísicos, obtendo mapas de favorabilidade para a ocorrência de rochas ricas em ferro, possivelmente, associadas as FFD.

Os dados gravimétricos terrestres de Minas Gerais (ver cap. 6) também não apresentam nenhuma assinatura gravimétrica bem marcada que poderia ser associada as FFD, neste caso, muito em virtude do baixo adensamento da malha na região do DFNA.

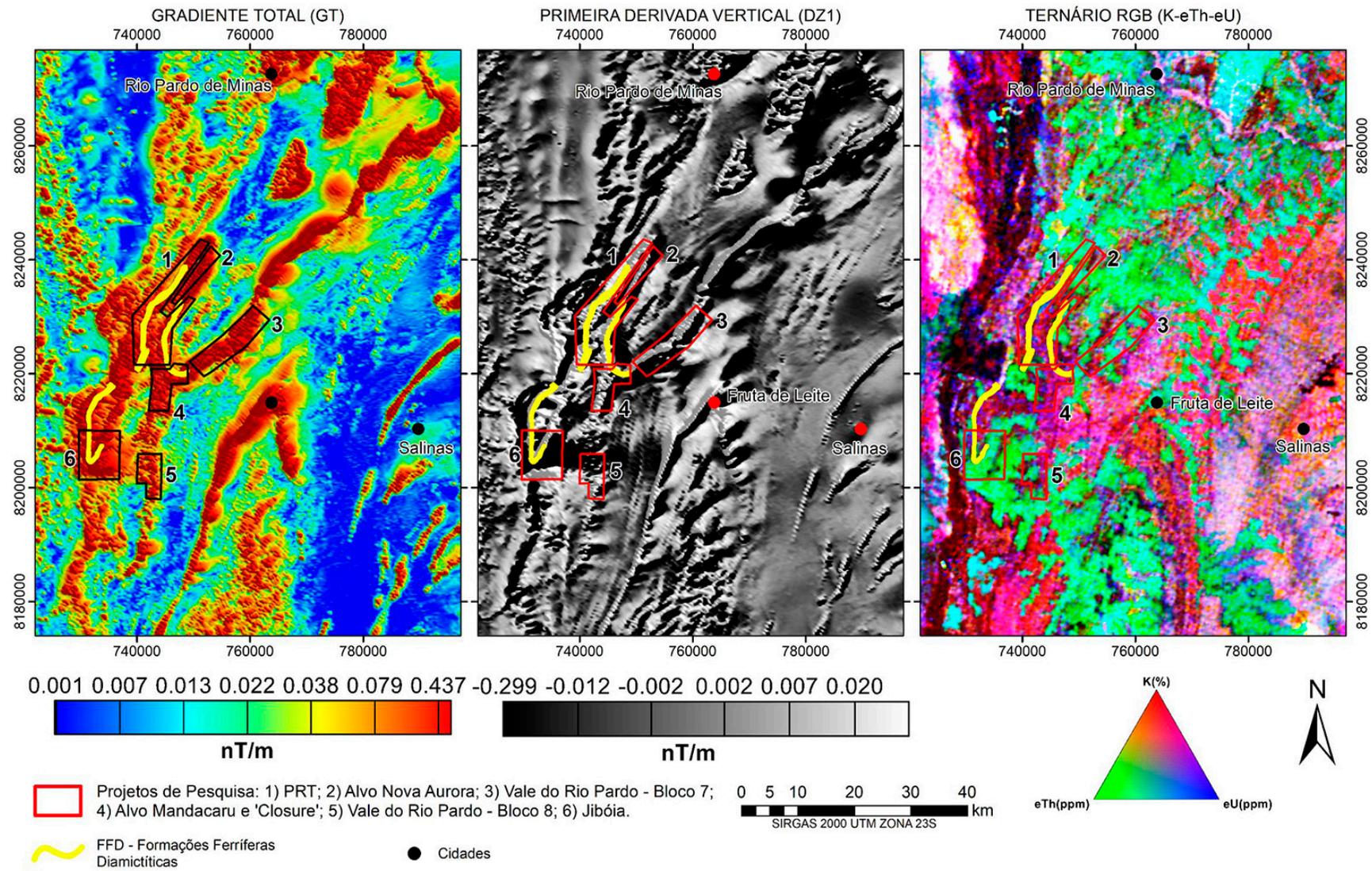


Figura 37: Mapas geofísicos para a região do Distrito Ferrífero de Nova Aurora

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (Brasil). Bacia do São Francisco: relatório final de aquisição e processamento de dados. *In*: AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (Brasil). **Levantamento aeromagnetométrico e aerogamaespectrométrico**: Bacia do São Francisco. [S. l.]: ANP; Lasa; Prospectors, 2006. v.1, 46 p. 17 mapas. Relatório interno.
- AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASES REGISTRY - ATSDR. Toxic Substances Portal, 2020. Página Inicial. Disponível em: <https://wwwn.cdc.gov/TSP/index.aspx>. Acesso em: 05 jul. 2020.
- AIRO, M. L. Aeromagnetic and aeroradiometric response to hydrothermal alteration. **Surveys in Geophysics**, Dordrecht, v. 23, p. 273–302, July 2002.
- ALKMIM, F. F.; KUCHENBECKER, M.; REIS, H. L. S.; PEDROSA-SOARES, A. C. **The Araçuaí Belt**: regional geology reviews. Switzerland: Springer International Publishing, 2017. p. 255-276.
- ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. A Bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. *In*: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. (ed.). **Bacia do São Francisco**: geologia e recursos naturais. Belo Horizonte: SBG. Núcleo Minas Gerais, 2001. p. 9-30.
- ALMEIDA, F. F. M. O alinhamento magmático de Cabo Frio. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2., 1991, São Paulo. **Atas [...]**. São Paulo: Rio de Janeiro: SBG. Núcleo São Paulo e Rio de Janeiro, 1991. p. 423-428.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ARAÚJO, A. L. N.; CARLSON, R. W.; GASPAR, J. C.; BIZZI, L. A. Petrology of kamafugites and kimberlites from the Alto Paranaíba Alkaline Province, Minas Gerais, Brazil. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, Berlin, v. 142, n. 2, p. 63-177, Nov. 2001.
- ARCGIS DESKTOP ADVANCED: release 10.7. Redlands, CA: ESRI., 2019.
- BALTAZAR, O. F.; ZUCCHETTI, M. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. **Ore Geology Reviews**, Amsterdam, v. 32, n. 3, p. 471-499, 2007.
- BARBOSA, I. O. **Modelo de depósito do complexo máfico-ultramáfico de Niquelândia, GO, com base em dados multitemáticos**. 2012. 107 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/11972>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- BHATTACHARYYA, B. K. Continuous spectrum of the total magnetic field anomaly due to a rectangular prismatic body. **Geophysics**, Tulsa, v. 31, p. 97-121, Feb. 1966.
- BIONDI, J. C. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 528 p.
- BORGES, A. J.; DREWS, M. G. P. Características magnetométricas da Bacia do São Francisco em Minas Gerais. *In*: PINTO, C. C.; MARTINS-NETO, M. A. (ed.) **Bacia do São Francisco**: geologia e recursos naturais. Belo Horizonte: SBG. Núcleo de Minas Gerais, 2001. p. 57-62.
- BOSUM, W. O levantamento aeromagnético de Minas Gerais e Espírito Santo e sua sequência quanto a estrutura geológica. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 3, n. 3, p. 149-159, 1973.
- BRIGGS, I. C. Machine contouring using minimum curvature. **Geophysics**, Tulsa, v. 39, n. 1, p. 39-48, Feb 1974.
- BROD, J. A.; GIBSON, S. A.; THOMPSON, R. N.; JUNQUEIRA-BROD, T. C.; SEER, H. J.; MORAES, L. C. de; BOAVENTURA, G. R. The kamafugite-carbonatite association in the Alto Paranaíba Igneous Province (APIP) southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 404-408, 2000.
- CABRAL, A. R.; ZEH, A.; GALBIATTI, H. F.; LEHMANN, B. Late cambrian au-pd mineralization and fe enrichment in the Itabira District, Minas Gerais, Brazil, at 496 Ma: constraints from U-Pb monazite dating of a Jacutinga Lode. **Economic Geology**, Lancaster, v. 110, n. 1, p. 263-272, 2015.
- CABRAL NETO, I.; NANNINI, F.; SILVEIRA, F. V.; CUNHA, L. M. **Áreas kimberlíticas e diamantíferas do estado de Minas Gerais**. Brasília: CPRM, 2017. 230 p. (Informe de Recursos Minerais. Série Pedras Preciosas, 10)
- CAIAFA, R. Convênio Geofísica Brasil-Alemanha: A origem de Grandes Projetos no Brasil. **Tecnologia & defesa**, [S. l.], 27 set. 2018. Disponível em: <https://tecnodefesa.com.br/convenio-geofisica-brasil-alemanha-a-origem-de-grandes-projetos-no-brasil/#:~:text=Conv%C3%AAnio%20Geof%C3%ADsica%20Brasil%2DAlemanha%3A%20A%20origem,de%20Grandes%20Projetos%20no%20Brasil.&text=Firmado%20em%201970%20e%20iniciado,para%20prospec%C3%A7%C3%A3o%20de%20recursos%20minerais>. Acesso em: 10 jul. 2019.

- CARLSON, R. W.; ARAÚJO, A. L. N.; JUNQUEIRA- BROD, T. C.; GASPAS, J. C.; BROD, J. A.; PETRINOVIC, I. A.; HOLLANDA, M. H. B. M.; PIMENTEL, M. M.; SICHEL, S. Chemical and isotopic relationships between peridotites xenoliths and mafic- ultrapotassic rocks from Southern Brazil. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 242, n. 3/4, p. 415-434, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.04.009>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- CARLSON, R. W.; ESPERANÇA, S.; SVISERO, D. P. Chemical and os isotopic study of cretaceous potassic rocks from Southern Brazil. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, Berlin, v. 125, p. 393-405, Nov. 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s004100050230>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- CARVALHO, M. T. N. de; VILELA, F. T.; DIAS, P. H, A.; LOMBELLO, J. C. **A Província Mineral do Norte de Minas Gerais**. Ouro Preto: Simexmin, 2014. Trabalho apresentado no 6º Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, 2014, Ouro Preto. Disponível em: <<http://www.adimb.com.br/simexmin2014/pdfs/14/10H40%20MARCO%20TULIO%20NAVES.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2018
- CHAUVET, A.; PIANTONE, P.; BARBANSON, L., NEHLIG, PEDROLETTI, I. Gold Deposit Formation during Collapse Tectonics: Structural, Mineralogical, Geochronological, and Fluid Inclusion Constraints in the Ouro Preto Gold Mines, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. **Economic Geology**, Lancaster, v. 96, n. 1, p. 25-48, Jan. 2001.
- COMIN-CHIARAMONTI, P.; GOMES, C. B. (ed.). **Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform**. São Paulo: EDUSP; FAPESP, 2005. Disponível em: <http://www.livrosabertos.edusp.usp.br/edusp/catalog/book/6>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Almenara - Itaobim – Jequitinhonha: área 17: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: programa 2010/2011, texto técnico. [S./I.]: CODEMIG; Lasa, 2011. v. 1, 210 p. 32 mapas. Relatório interno.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Belo Horizonte - Curvelo - Três Marias: área 10: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: programa 2008/2009, texto técnico. [S./I.]: CODEMIG; Prospectors, [2009]. v. 1, 128 p. 28 mapas. Relatório interno.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Formoso – Buritis – Lagoa Grande: área 19: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: programa 2010/2011, texto técnico. [S./I.]: CODEMIG; Microsurvey, 2011. v. 1, 52 p. 33 mapas. Relatório interno.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Ituiutaba - Iturama – Fronteira: área 21: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: programa 2013, texto técnico. [S./I.]: CODEMIG; Lasa, 2013. v. 1, 52 p. 32 mapas. Relatório interno.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Jaíba - Montes Claros Bocaiúva: área 11A: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: programa 2008/2009, texto técnico. [S./I.]: CODEMIG; Lasa, 2009. v. 1, 264 p. 32 mapas. Relatório interno.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. João Pinheiro – Presidente Olegário – Tiros: área 9: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais: programa 2005/2006, texto técnico**. [S./I.]: CODEMIG; Lasa, 2007. v. 1, 44 p. 21 mapas. Relatório interno.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Juiz de Fora – Cataguases - Manhuaçu: área 15: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: programa 2010/2011, texto técnico. [S./I.]: CODEMIG; Lasa, 2011. v. 1, 251 p. 32 mapas. Relatório interno.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Minas Novas - Riacho dos Machados – Espinosa: área 8: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: programa 2005/2006: texto técnico. [S./I.]: CODEMIG; Prospectors, [2005?]. v. 1, 140 p. 34 mapas. Relatório interno.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Montezuma – Indaiabira – Taiobeiras: área 11B: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: programa 2008/2009, texto técnico. [S./]: CODEMIG; Lasa, 2009. v. 1, 107 p. 22 mapas. Relatório interno.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Padre Paraíso - Nanuque – Mantena: área 16: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: programa 2010/2011, texto técnico. [S./]: CODEMIG; Lasa, 2011. v. 1, 207 p. 32 mapas. Relatório interno.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Patos de Minas - Araxá – Divinópolis: área 7: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: texto técnico. [S./]: CODEMIG; Lasa, 2006. v. 1, 64 p. 44 mapas. Relatório interno.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Poços de Caldas - Varginha – Andrelândia: área 14: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: programa 2010/2011, texto técnico. [S./]: CODEMIG; Lasa, 2011. v. 1, 165 p. 32 mapas. Relatório interno.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Porto Cajueiro – São Francisco – São João da Ponte: área 18: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: programa 2010/2011, texto técnico. [S./]: CODEMIG; Microsurvey, 2011. v. 1, 48 p. 33 mapas. Relatório interno.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Teófilo Otoni – Governador Valadares Caratinga: área 12: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: programa 2008/2009, texto técnico. [S./]: CODEMIG; Lasa, 2009. v. 1, 159 p. 42 mapas. Relatório interno.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Ubaí - Pirapora - Joaquim Felício: área 13: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: programa 2008/2009, texto técnico. [S./]: CODEMIG; Lasa, 2010. v. 1, 130 p. 32 mapas. Relatório interno.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Uberaba – Uberlândia – Frutal: área 20: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: programa 2010/2011, texto técnico. [S./]: CODEMIG; Lasa, 2012. v. 1, 116 p. 32 mapas. Relatório interno.

CGBA. Convênio Geofísica Brasil-Alemanha: **Adendo ao Plano de Execução**: Jun/71. Belo Horizonte: CPRM/SUREG-BH, 1971. Convênio Geofísica Brasil-Alemanha - CGBA. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/14011>. Acesso em: 22 jun. 2020.

CORREA, R. T. **Mapa Magnetométrico do Brasil**. [S./]: CPRM, 2019. Escala: 1:5.500.000. Disponível em: <http://www.geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>. Acesso em: 10 abr. 2020.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Catálogo geral de produtos e serviços**: geologia: levantamentos aerogeofísicos: base de dados AERO. 2. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 1995. 359 p.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto Aerogeofísico São José dos Campos – Resende**: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e eletromagnetométricos. Rio de Janeiro: Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica, 2013. v. 1, 55 p. 33 mapas.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto Gemas de Minas Gerais**: levantamento aeromagnetométrico e gamaespectrométrico da Faixa Itabira Ferros: relatório final de levantamento e processamento de dados. Belo Horizonte: CPRM, 1996. v.1., 36 p. 14 mapas. Convênio CPRM; GEOMAG.

CRESSIE, N. The origins of kriging. **Mathematical Geology**, New York, v. 22, n. 3, p. 239-252, Apr. 1990.

DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C. **Metalogênese do Brasil**. Brasília: UNB; CPRM, 2001. p. 78-83.

DENTITH, M. AND MUDGE, S.T., 2014. **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist**. Cambridge University Press. doi.org/10.1007/s00126-014-0557-9

- DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL. Nova Lima - Caeté: aquisição, processamento e interpretação de dados: relatório final. *In: Levantamento aéreo magnetométrico, gamaespectrométrico e eletromagnético*: projeto Rio das Velhas, texto técnico. Belo Horizonte: DNPM; Prospec, 1992. v. 1. 18 mapas. Relatório interno.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL. Santa Bárbara - Barão de Cocais: aquisição, processamento e interpretação de dados: relatório final. *In: Levantamento aéreo magnetométrico, gamaespectrométrico e eletromagnético*: projeto Rio das Velhas, texto técnico. Belo Horizonte. DNPM; Prospec, 1992. v. 1. 18 mapas.
- DE WITT, E.; THORMAN, C. H.; LANDIS, G. P.; ZARTMAN, R. E. A progress report on the age and origin of gold deposits hosted by iron-formation in the Belo Horizonte area, Minas Gerais, Brazil. *In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA*, 39., 1996, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: SBG, 1996. v. 7, p. 199–202.
- DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, Canberra, v. 17, p. 187–200, 1997.
- DORR, J. V. N. Nature and origin of the high-grade hematite ores of Minas Gerais, Brazil. **Economic Geology**, Lancaster, v. 60, p. 1-46, 1965.
- DORR, J. V. N. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Geological Survey Professional Paper**, Washington, v. 614-A, 110 p., 1969.
- DORR, J. V. N. Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil. **Economic Geology**, Lancaster, v. 59, p. 1203-1240, 1964.
- EBERHARDT, D. B. **Elementos-traços em minerais do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Tapira- MG**. 2014. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/14697>. Acesso em: 8 de maio 2020.
- ELLERT, R. Contribuição à geologia do maciço alcalino de Poços de Caldas. **Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Geologia**, São Paulo, n. 18, p. 5-63, 1959.
- FALEIROS, F. M.; CAMPANHA, G. A. C.; MARTINS, L.; VALCH, S. R. F. Ediacaran high-pressure collision metamorphism and tectonics of the southern Ribeira Belt (SE Brazil): Evidence for terrane accretion and dispersion during Gondwana assembly. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 189, n. 3-4, p. 263-291, Sept. 2011.
- GARDA, G. M. **A alteração hidrotermal no contexto da evolução geológica do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP**. 1990. 161 f. Dissertação de Mestrado em Mineralogia e Petrologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.
- GEOISOFT Oasis Montaj Standard Edition. Versão 9.7. [S. l.]: Geosoft Inc., 2019.
- GIBSON, S. A.; THOMPSON, R. N.; LEONARDOS, O. H.; DICKIN, A. P.; MITCHELL, L. G. The Late cretaceous impact of the Trindade mantle plume: evidence from large volume, mafic, potassic magmatism in southeastern Brazil. **Journal of Petrology**, Oxford, v. 36, p. 189-229, 1995.
- GNOJEK, I.; PRICHYSTAL, A. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia, Czechoslovakia. **Geoexploration**, Amsterdam, v. 23, n. 4, p. 491- 502, Dec. 1985.
- GOMES, C. B.; COMIN-CHIARAMONTI, P. Some notes on the Alto Paranaíba Igneous Province. *In: COMIN-CHIARAMONTI, P.; GOMES, C. B. (ed.) Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform*. São Paulo: EDUSP; FAPESP, 2005. p. 317- 340. Disponível em: <http://www.livrosabertos.edusp.usp.br/edusp/catalog/book/6>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- GOMIDE, C. S. Geoquímica e química mineral de carbonatitos e isótopos estáveis em carbonatitos da Província Ígnea do Alto Paranaíba. 2015. 132 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- HASUI, Y.; HARALYI, N. L. E. Aspectos lito-estruturais e geofísicos do soerguimento do Alto Paranaíba. **Geociências**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 57-77, 1991.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data**. Vienna: IAEA, 2003.
- ISLES, D. J.; RANKIN, L. R. **Geological Interpretation of Aeromagnetic Data**. Austrália: Australian Society of Exploration Geophysicists; CSIRO, 2013.
- IZA, E. R. H. de F. **Coberturas lateríticas do SW do Cráton Amazônico: aspectos geofísicos e geoquímicos**. 2017. 89 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/19003>. Acesso em: 8 maio 2020.
- IZA, E. R. H. F.; SANTOS, R. S. V. dos; CRUZ FILHO, B. E. da. Integration of multisource data to support the identification of lateritic regolith in Eastern - Bahia, northeastern Brazil. **Journal of the Geological Survey of Brazil**. Brasília, v. 3, n. 1, p. 1-24. abr. 2020. Disponível em: <https://jgsb.cprm.gov.br/index.php/journal/article/view/74>. Acesso em: 18 abr. 2020.
- JUNQUEIRA-BROD, T. C.; ROIG, H. L.; GASPAR, J. C.; BROD, J. A.; MENESES, P. R. A Província Alcalina de Goiás

e a extensão do seu vulcanismo kamafugítico. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 559-566, 2002.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 2nd. ed. Boca Raton: CRC Press, 1992. 365 p.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Na Introduction to Geophysical Exploration**. 3rd ed. London: Wiley-Blackwell, 2002.

KOLJONEN, K.; STENIUS, P.; BUCHERT, J. The surface chemistry of PGW pulp fibre fractions. *In*: INTERNATIONAL MECHANICAL PULPING CONFERENCE, 1997., Stockholm, Sweden. **Proceedings** [...]. Stockholm: Swedish Association of Pulp and Paper Engineers, 1997. p. 407-411.

LICHT, O. A. B.; MELLO, C. S. B. de; SILVA, C. R. da (ed.). **Prospecção geoquímica**: depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás. Rio de Janeiro: CPRM, 2007. 780 p.

LOBATO, L. M.; RIBEIRO-RODRIGUES, L. C.; VIEIRA, F. W. R. Brazil's premier gold deposits. Part II: geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. **Mineralium Deposita**, Berlin, v. 36, n. 3-4, p. 249-277, July 2001.

LOBATO, L. M.; SANTOS J. O. S.; MCNAUGHTON; N. J.; FLETCHER, I. R.; NOCE, C. M. U-Pb SHRIMP monazite ages of the giant Morro Velho and Cuiabá gold deposits, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Ore Geology Reviews**, Amsterdam, v. 32, n. 3-4, p. 674-680, Nov. 2007.

LUZ, A. Á. da; PAULA, W. de P. (coord.). **Detalhamento aerogeofísico por helicóptero**: área de Pitangui - Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 1975. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/7445>. Acesso em: 8 maio 2020.

MACHADO, N.; NOCE, C. M.; LADEIRA, E. A.; OLIVEIRA, O. B. de. U-Pb geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil. **Geological Society American Bulletin**, New York, v. 104, n. 9, p. 1221-1227, Sept. 1992.

MACLEOD, I. N.; JONES, K.; DAI, T. F. 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. **Exploration Geophysics**, New York, v. 24, n. 4, p. 679-688, jan. 1993.

MARINHO, M. S.; SILVA, M. A.; LOMBELLO, J. C.; DI SALVIO, L. P.; SILVA R. N.; FÉBOLI, W. L.; BRITO, D. C. **Áreas de Relevante Interesse Mineral**: noroeste do Quadrilátero Ferrífero. Belo Horizonte: CPRM, 2019. 1 mapa. Escala 1:75.000. Mapa Geológico Integrado do Sinclínio Pitangui.

MARTINS, B. de S.; LOBATO, L. M.; ROSIÈRE, C. A.; HAGEMANN S. G.; SANTOS, J. O. S.; VILLANOVA, F. L. dos S. P.; SILVA, R. C. F. e; LEMOS, L. H. A. The Archean BIF-hosted Lamego gold deposit, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero: Evidence for Cambrian structural modification of an Archean orogenic gold deposit. **Ore Geology Reviews**, Amsterdam, v. 72, pt. 1, p. 963-988, Jan. 2016.

MARTINS, F.; GONZAGA, G.; SANTOS, D.; REBOITA, M. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: Cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, Presidente Prudente, ano 14, p. 129-156, nov. 2018. Edição Especial Dossiê Climatologia de Minas Gerais.

MINAS GERAIS (Estado). Secretaria de Estado de Minas e Energia. Faixa São João da Chapada-Datas: área 4: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: MINAS GERAIS (Estado). Secretaria de Estado de Minas e Energia. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: texto técnico. [S.l.]: SEME; Megafísica Survey Aerolevantamentos S.A., 2001. v. 1, 37 p. 21 mapas. Relatório interno.

MINAS GERAIS (Estado). Secretaria de Estado de Minas e Energia. Faixa Pedra Azul - Salto da Divisa: área 6: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: MINAS GERAIS (Estado). Secretaria de Estado de Minas e Energia. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: texto técnico. [S.l.]: SEME; Megafísica Survey Aerolevantamentos S.A., 2001. v. 1, 37 p. 14 mapas. Relatório interno.

MINAS GERAIS (Estado). Secretaria de Estado de Minas e Energia. Januária - Itacarambi - Montalvânia: área 5: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: MINAS GERAIS (Estado). Secretaria de Estado de Minas e Energia. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: texto técnico. [S.l.]: SEME; Megafísica Survey Aerolevantamentos S.A., 2001. v. 1, 37 p. 14 mapas. Relatório interno.

MINAS GERAIS (Estado). Secretaria de Estado de Minas e Energia. Morro do Pilar - Cerro - Guanhães - Área 3: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: MINAS GERAIS (Estado). Secretaria de Estado de Minas e Energia. **Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais**: texto técnico. [S.l.]: SEME; Megafísica Survey Aerolevantamentos S.A., 2001. v. 1, 41 p. 14 mapas. Relatório interno.

MINAS GERAIS (Estado). Secretaria de Estado de Minas e Energia. Pitangui - São João Del Rei - Ipatinga - Área 2: relatório final do Levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: MINAS GERAIS (Estado). Secretaria de Estado de Minas e Energia.

Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais: texto técnico. [S.l.]: SEME; Lasa Engenharia e Prospecções, 2001. v. 1, 44 p. 22 mapas. Relatório interno.

MINAS GERAIS (Estado). Secretaria de Estado de Minas e Energia. Unaí – Paracatu - Vazante - Coromandel - Área 1: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. *In*: MINAS GERAIS (Estado). Secretaria de Estado de Minas e Energia.

Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais: texto técnico. [S.l.]: SEME; Lasa Engenharia e Prospecções, 2001. v. 1, 44 p. 12 mapas. Relatório interno.

MINERAIS DO PARANÁ S/A. **Levantamento geoquímico multielementar do Estado do Paraná:** geoquímica de solo; horizonte B. relatório final de projeto. Curitiba: Mineropar, 2005. v. 2.

MINTY, B. R. S. Fundamentals of airborne gamma-ay spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, Austrália, v. 17, n. 2, p. 39–50, 1997.

NOCE, C. M. **Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.** 1995. 129 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

OLIVEIRA, L. G. S. **A missão GRACE e a estrutura da litosfera na região do Cráton São Francisco.** 2009. 173 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

OLIVEIRA, R. F. **Contribuição ao estudo da geologia estrutural e da gênese do depósito aurífero de Passagem de Mariana-MG.** 1998. 127 f. Dissertação (Mestrado em Metalogênese)-Universidade de Campinas, Campinas, 1998.

OLIVEIRA, R. G. de; ANDRADE, J. B. F. de. Interpretação geofísica dos principais domínios tectônicos brasileiros. *In*: SILVA, M. da G. da; ROCHA NETO, M. B. da; JOST, H.; KUYUMJIAN, R. M. (org.). **Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras.** Belo Horizonte: CPRM, 2014. p. 21-40.

PEDROSA-SOARES, A. C.; ALKMIM, F. F.; LACK, L.; NOCE, C. M.; BABINSKI, M.; SILVA, L. C.; MARTINS-NETO, M. A. Similarities and differences between the Brazilian and African counterparts of Neoproterozoic Araçuaí-West Congo orogen. **Geological Society. Special Publications**, London, v. 294, n. 1, p. 153, Jan. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1144/SP294.9>. Acesso em: 22 jun. 2020.

Pedrosa-Soares, A. C., Noce, C. M., Alkmim, F. F., Silva, L. C., Babinski, M., Cordani, U., Castañeda, C. 2007. **Orógeno Araçuaí: Síntese do Conhecimento 30 anos após Almeida 1977.** *Geonomos* 15(1): 1 - 16.

PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; WIEDEMANN, C.; PINTO, C. P. The Araçuaí-West-Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 110, n. 1-4, p. 307-323, Aug. 2001.

PEDROSA-SOARES, A. C.; VIDAL, P.; LEONARDOS, O. H.; NEVES, B. B. de B. Neoproterozoic oceanic remnants in eastern Brazil: Further evidence and refutation of an exclusively ensialic evolution for the Araçuaí- West Congo Orogen. **Geology**, Lancaster, v. 26, n. 6, p. 519-522, June 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1130/0091-613\(1998\)026<0519:NO RIEB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-613(1998)026<0519:NO RIEB>2.3.CO;2). Acesso em: 22 jun. 2020.

PEDROSA-SOARES, A. C.; WIEDEMANN-LEONARDOS, C. M. Evolution of the Araçuaí Belt and its connection to the Ribeira Belt, Eastern Brazil. *In*: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ

FILHO, A.; CAMPOS, D. de A. (ed.). **Tectonic evolution of South America.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2000. p. 265-285. Trabalhos apresentados no 31 th International Geological Congress. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/19419?mode=ful>. Acesso em: 29 maio 2020.

PINTO, C. P.; SILVA, M. A. **Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, Escala 1:1.000.000.** Belo Horizonte: CODEMIG, 2014.

Pires, A.C.B. & Moraes, R.A.V. 2006. **New processing technologies applied do airborne geophysical data: impact on interpretation.** 2º Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, SIMEXMIN, Ouro Preto, MG.

PIRES, A. C. B.; HARTHILL, N. Statistical analysis of airborne gamma-ray data for geologic mapping purposes: Crixas-Itapaci area, Goiás, Brazil. **Geophysics**, Tulsa, v. 54, n. 10, p. 1326–32, Oct. 1989.

PIRES, F. R. M. Textural and mineralogical variations during metamorphism of the Proterozoic Itabira Iron Formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Anais Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 67, n. 1, p. 77-105, 1995.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, Presidente Prudente, ano 11, v. 17, p. 206-226, jul./dez. 2015.

REIS, H. L. S. Folha Serra Selada, SE-23-Y-B-V. *In*: PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; FRAGOSO, D. G. C.; VOLL, E.; REIS, H. L. S.; KUCHENBECKER, M. (org.). **Projeto Alto Paranaíba:** mapeamento geológico e levantamento de recursos minerais. Belo Horizonte: CODEMIG, 2011. v. 1, p. 741-785. Disponível em: <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/>. Acesso em: 22 jun. 2020.

- REIS, H. L. S. **The Neoproterozoic evolution of the São Francisco basin, SE Brazil**: effects of tectonic inheritance on foreland sedimentation and deformation. 2016. 191 f. Tese (Doutorado em Geologia) Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- REIS, H. L. S.; ALKMIM, F. F. Anatomy of a basin- controlled foreland fold-thrust belt curve: The Três Marias salient, São Francisco basin, Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 66, pt. 4, p. 711-731, Sept. 2015.
- REIS, H. L. S.; FONSECA, R. C. S.; ALKMIM, F. F.; NASCIMENTO, T. C.; SUSS, J. A Bacia do São Francisco (MG): registro de uma longa história de ativações e reativações em domínio cratônico. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 17.; SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 13., 2013, Juiz de Fora. **Anais [...]**. Belo Horizonte: SBG. Núcleo de Minas Gerais, 2013. Disponível em: <http://sbg-mg.org.br/anais/>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- REIS, H. L. S.; SUSS, J. F. Mixed carbonate- siliciclastic sedimentation in forebulge grabens: An example from the Ediacaran Bambuí Group, São Francisco Basin, Brazil. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 339, p. 83-103, June 2016.
- REIS, R. J. dos; TIBA, C. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Futura Express, 2016. v. 2, 130 p.
- RESENDE, C. R. de. Evidências de arco magmático paleoproterozóico na região do Alto de Januária - norte de Minas Gerais. 2017. 87 f. Dissertação (Mestre em Geologia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- RIBEIRO, V. B.; MANTOVANI, M. S. M.; LOURO, V. H. A. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. **Terra e didática**, Campinas, v. 10, n. 1, p. 29-51, 2014. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/td/articl /view/8637386/8145>. Acesso em: 9 maio 2020.
- RICCOMINI, C.; VELÁZQUEZ, V. F.; GOMES, C. B. Tectonic controls of the Mesozoic and Cenozoic alkaline magmatism in the central-southeastern Brazilian Platform. In: COMIN-CHIARAMONTI, P.; GOMES, C. B. (ed.). **Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform**. São Paulo: EDUSP; FAPESP, 2005. p. 31-56. Disponível em: <http://www.livrosabertos.edusp.usp.br/edusp/catalog/book/6>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- ROCHA, L. G. de M. **Caracterização magnética da porção central do lineamento Azimute 125°**. 2013. 1 CD-ROM. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013, Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/ handle/doc/13663>. Acesso em: 9 maio 2020.
- ROCHA, L. G. de M.; CORREA, R. T.; SILVA, A. B.; MATOS, D. R. Geophysical reassessment of the Azimuth 125° Lineament: emplacement model and propagation of its dikes. **Journal of the Geological Survey of Brazil**, Brasília, v. 2, n. 16, p. 87-98, Apr. 2019. Disponível em: <https://jgsb.cprm.gov.br/index. php/journal/article/view/64>. Acesso em: 9 maio 2020.
- ROCHA, L. G. de M.; PIRES, A. C. B.; CARMELO, A. C.; ARAÚJO FILHO, J. O. de. Geophysical characterization of the Azimuth 125° lineament with aeromagnetic data: Contributions to the geology of central Brazil. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 249, p. 273-287, Aug. 2014.
- ROSA, P. A. S. **Geologia e evolução petrogenética do Maciço Alcalino de Itatiaia, MG-RJ**. 2017. 137 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- ROSIERE, C. A. The Geology of the Iron Quadrangle, Minas Gerais (Brazil). In: CURSO LATINOAMERICANO DE METALOGENIA UNESCO-SEG-SGA, 28., 2009, Belo Horizonte. **Guia de Campo** = Field Trip Guide. Belo Horizonte: [s.n.], 2009.
- ROSIERE, C. A.; RIOS, F. J. The origin of hematite in high-grade iron ores based on infrared microscopy and fluid inclusion studies: the example of the Conceição mine, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. **Economic Geology**, Lancaster, v. 99, n. 3, p. 611-624, May 2004.
- ROSIERE, C. A.; SIEMENS, H.; QUADE, H.; BROKMEIER, H. G.; JANSEN, E. M. Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite. **Journal of structural Geology**, New York, v. 23, n. 9, p. 1429-1440, Sept. 2001.
- ROSIERE, C. A.; SPIER, C. A.; RIOS, F. J.; SUCKAU, V. E. The itabirites from the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade iron ores: an overview. **Reviews in Economic Geology**, Littleton, v. 15, p. 223-254, 2008.
- SCHOBENHAUS, C. Estudo geoeconômico preliminar do depósito de Ferro do Rio Peixe Bravo, Norte de Minas Gerais. Recife: SUDENE-DRN, 1972. 36 p. 1 mapa. (SUDENE. Geologia Econômica, 8)
- SCHOBENHAUS, 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. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**: Sistema de Informações Geográficas. Brasília: CPRM, 2004. CD- ROM. SIG e 46 folhas na escala 1:1.000.000.
- SOARES, M. B.; CORRÊA NETO, A. V.; BERTOLINO, L. C.; ALVES, F. E. A.; ALMEIDA, A. M. de; SILVA, P. H. M. da; MABUB, R. O. de A.; MANDUCA, L. G.; ARAÚJO, I. M. C. de P. Multistage mineralization at the hypozonal São Sebastião gold deposit, Pitangui greenstone belt, Minas

- Gerais, Brazil. **Ore Geology Reviews**, Amsterdam, v. 102, p. 618-638, Nov. 2018
- SPECTOR, A.; GRANT, F. S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. **Geophysics**, Tulsa, v. 35, n. 2, p. 293-302, Apr. 1970.
- SUMÁRIO MINERAL BRASILEIRO 2009. Brasília: DNPM, v. 29, 2009. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2009/view>. Acesso em: 15 out. 2019.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.; KEYS, D. A. **Applied Geophysics**. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University, 1990.
- THOMPSON, R. N.; GIBSON, S. A.; MITCHELL, J. G.; DICKIN, A. P.; LEONARDOS, O. H.; BROD, J. A.; GREENWOOD, J. C. Migrating Cretaceous- Eocene magmatism in the Serra do Mar Alkaline Province, SE Brazil: Melts from the Deflected Trindade mantle plume?. **Journal of Petrology**, Oxford, v. 39, n. 8, p. 1493-1526, 1998.
- ULBRICH, H. H. G. J.; VLACH, S. R. F.; DEMAIFFE, D.; ULBRICH, M. N. C. Structure and origin of the Poços de Caldas alkaline massif, SE Brazil. *In*: COMIN-CHIARAMONTI, P.; GOMES, C. B. (ed.). **Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform**. São Paulo: EDUSP; FAPESP, 2005. p. 367-418. Disponível em: <http://www.livrosabertos.edusp.usp.br/edusp/catalog/book/6>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- USSAMI, N., Interpretação dos dados aeromagnéticos na área compreendida entre 42°- 47°W e 15°-19°S (Minas Gerais, Brasil). 1981. 119 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.
- VELASCO, A. I.; COSTA, F. G. **Relatório dos estudos de reconhecimento geológico da Formação Ferrífera de '3 Rios' situado na região de divisa dos municípios Grão Mogol, Porteirinha e Rio Pardo do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 1970. 49 p.
- VIAL, D. S.; ABREU, G. C.; SCHUBERT, G.; RIBEIRO-RODRIGUES, L. C. Smaller gold deposits in the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. **Ore Geology Reviews**, Amsterdam, v. 32, n. 3-4, p. 651-673, Nov. 2007a.
- VIAL, D. S.; DUARTE, B. P.; FUZIKAWA K.; VIEIRA, M. B. H. An epigenetic origin for the Passagem de Mariana gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Ore Geology Reviews**, Amsterdam, v. 32, n. 3, p. 596-613, Nov. 2007b.
- VILELA, F. T. Caracterização de metadiamictitos ferruginosos da Formação Nova Aurora (Grupo Macaúbas, Orógeno Araçuai) a Oeste de Salinas, MG. 2010. 135 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- VIVEIROS, J. F. M. de; SÁ, E. L.; VILELA, O. V.; SANTOS, O. de M.; MOREIRA, J. M. P.; HOLDER NETO, F.; VIEIRA, V. S. Geologia dos vales dos rios Peixe Bravo e Alto Vacaria, norte de Minas Gerais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. **Anais [...]**. Recife: SBG, 1978. v. 1, p. 243-254.
- VOLL, E.; SILVA, A. M.; PEDROSA-SOARES, A. C. Tracking iron-rich rocks beneath Cenozoic tablelands: An integration of geological, airborne geophysical and remote sensing data from northern Minas Gerais State, SE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 101, Aug. 2020.
- WABER, N.; SCHORSCHER, H. D.; PETERS, T. Hydrothermal and supergene uranium mineralization at the Osamu Utsumi mine, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdam, v. 45, n. 1-3, p. 53-112, Nov. 1992.

O SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM E OS OBJETIVOS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - ODS

Em setembro de 2015 líderes mundiais reuniram-se na sede da ONU, em Nova York, e formularam um conjunto de objetivos e metas universais com intuito de garantir o desenvolvimento sustentável nas dimensões econômica, social e ambiental. Esta ação resultou na *Agenda 2030*, a qual contém um conjunto de *17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS*.

A Agenda 2030 é um plano de ação para as pessoas, para o planeta e para a prosperidade. Busca fortalecer a paz universal, e considera que a erradicação da pobreza em todas as suas formas e dimensões é o maior desafio global, e um requisito indispensável para o desenvolvimento sustentável.

Os 17 ODS incluem uma ambiciosa lista 169 metas para todos os países e todas as partes interessadas, atuando em parceria colaborativa, a serem cumpridas até 2030.



O **Serviço Geológico do Brasil – CPRM** atua em diversas áreas intrínsecas às Geociências, que podem ser agrupadas em quatro grandes linhas de atuação:

- Geologia
- Recursos Minerais;
- Hidrologia; e
- Gestão Territorial.

Todas as áreas de atuação do SGB-CPRM, sejam nas áreas das Geociências ou nos serviços compartilhados, ou ainda em seus programas internos, devem ter conexão com os ODS, evidenciando o comprometimento de nossa instituição com a sustentabilidade, com a humanidade e com o futuro do planeta.

A tabela a seguir relaciona as áreas de atuação do SGB-CPRM com os ODS.

Áreas de atuação do Serviço Geológico do Brasil – CPRM e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS

ÁREA DE ATUAÇÃO GEOCIÊNCIAS

LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS



LEVANTAMENTOS AEROGEOFÍSICOS



AVLIAÇÃO DOS RECURSOS MINERAIS DO BRASIL



LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS MARINHOS



LEVANTAMENTOS GEOQUÍMICOS



LEVANTAMENTOS BÁSICOS DE RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS



SISTEMAS DE ALERTA HIDROLÓGICO



AGROGEOLOGIA



LEVANTAMENTOS BÁSICOS DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS



RISCO GEOLÓGICO



GEODIVERSIDADE



PATRIMÔNIO GEOLÓGICO E GEOPARQUES



ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO



GEOLOGIA MÉDICA



RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO



ÁREA DE ATUAÇÃO SERVIÇOS COMPARTILHADOS

GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO



TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO



LABORATÓRIO DE ANÁLISE MINERAIS



MUSEU DE CIÊNCIAS DA TERRA



PALEONTOLOGIA



PARCERIAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS



REDE DE BIBLIOTECAS



REDE DE LITOTECAS



GOVERNANÇA



ÁREA DE ATUAÇÃO PROGRAMAS INTERNOS

SUSTENTABILIDADE



PRÓ-EQUIDADE



COMITÊ DE ÉTICA



PROGRAMA GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

Projeto Atlas Aerogeofísicos Estaduais

Em um país com dimensões continentais como o Brasil, levantamentos aerogeofísicos têm sido fundamentais para o incremento do conhecimento geológico, e para fomentar investimentos do setor mineral.

A grande importância dos levantamentos geofísicos consiste na sua capacidade de desvendar a terceira dimensão dos dados geológicos. Dessa forma, feições geológicas como corpos, estruturas e depósitos minerais podem ser inferidas em profundidade, através de interpretações e modelagens dos dados geofísicos.

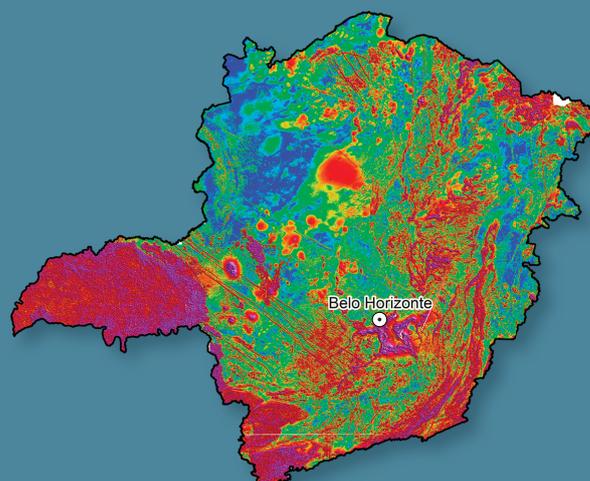
A aquisição de dados aerogeofísicos e sua ampla disponibilização representa uma das principais ações do Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Ao longo das duas últimas décadas, importantes investimentos foram feitos pelo governo federal, através do SGB-CPRM, na aquisição de dados aerogeofísicos, tendo sido recoberta uma área de cerca de 3,7 milhões de km², que corresponde a aproximadamente 43% do território nacional continental, e 92% das áreas de escudo cristalino. Em geral, nestes aerolevantamentos foram obtidos dados magnetométricos e gamaespectrométricos com espaçamento entre as linhas de voo de 500 m, e altura de voo de 100 m. Este grande esforço e investimento financeiro certamente tem contribuído para o aprimoramento do conhecimento geológico e a descoberta de depósitos minerais no Brasil.

Para incrementar a divulgação do conhecimento e a disponibilização dos dados, foi proposto o **Projeto Atlas Aerogeofísicos Estaduais**, onde dados aerogeofísicos são integrados de acordo com os limites das unidades federativas do Brasil. Esta compartimentação objetiva facilitar a gestão e emprego dos dados, de acordo com a preferência e prioridades dos setores público e privado, e segundo as características geológicas e potencialidades minerais locais.

Todos os produtos elaborados neste projeto estão disponíveis para download no banco de dados corporativo do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, o GeoSGB (<http://geosgb.cprm.gov.br>).

ATLAS AEROGEOFÍSICO

Estado de Minas Gerais



SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

Sede Brasília

Setor Bancário Norte - SBN
Quadra 02, Asa Norte
BLoco H - Edifício Central Brasília
Brasília - DF - Brasil - CEP: 70040-904
Tel.: (61) 2108-8400

Escritório do Rio de Janeiro

Avenida Pasteur, 404 - Urca
Rio de Janeiro - RJ - Brasil - CEP: 22290-255
Tel.: (21) 2295-0032

Diretoria de Geologia e Recursos Minerais

Tels: (21) 2546-0212 • (61) 3223-1166

Departamento de Geologia

Tels: (91) 3182-1326 • (91) 99944-4906 • (21) 99584-3726

Departamento de Recursos Minerais

Tel.: (21) 2295-4992

Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica

Tel.: (11) 3775-5123 • (11) 98106-8606

www.cprm.gov.br

Assessoria de Comunicação

Tels: (61) 2108-8400 • (21) 2295-4641
email: asscomdf@cprm.gov.br

Ouvidoria

Tel.: (21) 2295-4697
email: ouvidoria@cprm.gov.br

Serviço de Atendimento a Usuários – SEUS

Tel.: (21) 2295-5997
email: seus@cprm.gov.br