



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



Eliane Voll

**RASTREAMENTO DE UNIDADES RICAS EM FERRO NO NORTE DE MINAS GERAIS:
modelamento de dados aerogeofísicos e de sensores remotos**

Nº 51

Belo Horizonte

2020

Eliane Voll

**RASTREAMENTO DE UNIDADES RICAS EM FERRO NO NORTE DE MINAS GERAIS:
modelamento de dados aerogeofísicos e de sensores remotos**

Versão final

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geologia

Área de Concentração: Geologia Econômica

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Pedrosa Soares.

Coorientadora: Prof. Dra. Adalene Moreira Silva

Belo Horizonte

2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



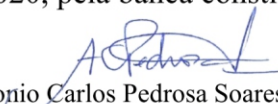
FOLHA DE APROVAÇÃO

RASTREAMENTO DE UNIDADES RICAS EM FERRO NO NORTE DE MINAS GERAIS: MODELAMENTO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS E DE SENSORES REMOTOS

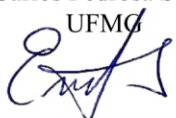
ELIANE VOLL


Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Doutora em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA.

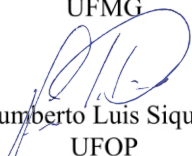
Aprovada em 01 de setembro de 2020, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Antonio Carlos Pedrosa Soares - Orientador

UFMG


Prof. Emanuele Francesco La Terra
Observatório Nacional


Prof. Aline Tavares Melo
UFMG


Prof. Humberto Luis Siqueira Reis
UFOP


Prof. Ricardo Diniz da Costa
UFMG

Belo Horizonte, 1 de setembro de 2020.

V923r
2020

Voll, Eliane.

Rastreamento de unidades ricas em ferro no norte de Minas Gerais [manuscrito] : modelamento de dados aerogeofísicos e de sensores remotos / Eliane Voll. – 2020.

98 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Antônio Carlos Pedrosa Soares.

Coorientadora: Adalene Moreira Silva.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2020.

Área de concentração: Geologia Econômica.

Inclui bibliografias.

1. Ferro – Teses. 2. Minas Gerais – Teses. 3. Modelagem de dados – Teses. 4. Lógica difusa – Teses. I. Pedrosa-Soares, Antônio Carlos. II. Silva, Adalene Moreira. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 622.341 (815.1)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Hans (*in memoriam*) e Marlene, e à minha filha Karin, pelo apoio incondicional e constante.

Ao Professor Antônio Carlos Pedrosa Soares, orientador deste trabalho, pela orientação cuidadosa e solícita, imprescindível.

À Professora Adalene Moreira Silva, co-orientadora, pela orientação, sempre atenciosa e prestativa.

Ao Professor Ricardo Diniz da Costa (Bidu), pelas discussões importantes e paciência para ouvir, sempre.

Ao amigo André Luiz Profeta, pelas discussões e apoio ao longo de todo o tempo de desenvolvimento do trabalho.

À CODEMGE, por ceder os dados aerogeofísicos utilizados no trabalho.

À Sul Americana de Metais S.A., pelos dados cedidos para elaboração do estudo de caso.

Ao programa de Pós-Graduação em Geologia da UFMG pela oportunidade de realização do trabalho.

Ao Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa - CPMTC - IGC - UGMG, pela infra-estrutura cedida.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Esta tese apresenta os principais resultados de pesquisa científica que teve como objetivo criar um modelo integrado para rastrear rochas ricas em ferro no norte de Minas Gerais, uma região com ocorrências de metadiamicritos ferruginosos (Fe entre 10 e 15% em peso) e formação ferrífera diamictítica (Fe > 15% em peso), amplamente ocultadas por extensas coberturas cenozoicas. A pesquisa se estende a um estudo de caso, em escala local, que teve como propósito testar a viabilidade do modelo para diferentes escalas. Essa região compreende os domínios geomorfológicos-geológicos do Cráton São Francisco e do Orógeno Araçuaí. O domínio oriental corresponde aos grandes planaltos suportados principalmente por unidades ricas em metadiamicrito e quartzito do Grupo Macaúbas, incluindo os metadiamicritos ricos em ferro (10-60% em peso de Fe) do membro Riacho Poções que ocorre na porção nordeste da área. O mapeamento dessas unidades é dificultado pelas grandes dimensões dos planaltos encontrados nesta região, que ocultam sua extensão real. As rochas ricas em ferro estão em grande parte escondidas sob esses revestimentos, mostrando apenas alguns afloramentos bem preservados da lateritização, que podem atingir dezenas de metros de profundidade na região estudada. Nesses locais, o ferro tende a se concentrar mais em lateritas desenvolvidas sobre rochas ricas em ferro do que em coberturas lateríticas regionais. Em estudos geológicos, em regiões sem afloramentos de rochas ricas em ferro e/ou cobertas por vegetação densa, o uso de métodos de mapeamento indireto pode ser útil, incluindo dados geofísicos e de sensoriamento remoto, com análise espacial baseada em GIS, facilitando o tratamento de dados espaciais e sua integração para modelagem, análise e interpretação do fenômeno a ser estudado. Para rastrear as rochas ricas em ferro, vários produtos foram gerados com base em dados de levantamentos aerogeofísicos (magnéticos e gamaespectrométricos) e imagens de satélite Landsat 8. Para produzir o modelo final, os dados foram selecionados e combinados, usando análise espacial baseada em lógica *Fuzzy* orientada pelo conhecimento. Dados de trabalho de campo, além de informações bibliográficas e dados provenientes da ANM (Agência Nacional de Mineração) e SAM (Sul Americana de Metais S.A.) foram utilizados no desenvolvimento do modelo e/ou na sua validação. O modelo apresentado mostrou-se eficiente em diferentes escalas, sendo coerente com o conhecimento anterior, mas expande possibilidades nos contextos regional e local ao destacar, com muito mais precisão, as áreas favoráveis à ocorrência de rochas ricas em ferro mesmo sobre extensas chapadas.

Palavras-chave: Rochas ricas em ferro. Formação ferrífera. Modelagem espacial. Lógica *Fuzzy*. Grupo Macaúbas.

ABSTRACT

The thesis presents the main results of a scientific research that aimed to create an integrated model for tracking iron-rich rocks in northern Minas Gerais, a region with occurrences of ferruginous metadiamicrites (Fe = 10-15 wt%) and diamicritic iron formation (Fe > 15 wt%) that are largely hidden by extensive Cenozoic tablelands (plateaus). The research extends to a case study, on a local scale, which aimed to test the model feasibility for different scales. In geological studies on regions lacking rock exposures and/or covered by dense vegetation, the use of indirect mapping methods is useful, including geophysical and remote sensing data with GIS-based spatial analysis, facilitating the treatment of spatial data and its integration for modeling, analysis, and interpretation of the studied phenomenon. The study region comprises the geomorphological-geological domains of the easternmost São Francisco Craton and the western Araçuaí Orogen. The eastern domain of the focused region corresponds to the large plateaus supported mainly by units rich in metadiamicrite and quartzite of the Macaúbas Group, including the iron-rich metadiamicrites (10-60 wt% Fe) of the Riacho Poçoões Member. However, the iron-rich rocks are largely hidden under covers on tablelands, showing only a few well-preserved outcrops from lateritization, a weathering-related process that can reach dozens of meters deep in the studied region. Along those sites, iron tends to be more concentrated in laterites developed on iron-rich rocks than in lateritic soils formed on other rocks. To track the iron-rich rocks, several products were generated based on magnetic and gammaespectrometric data from aerogeophysical surveys and Landsat 8 satellite images. To produce the final model, the selected data were combined using spatial analysis by knowledge-driven fuzzy logic methodology. Fieldwork data and compiled information, including data from ANM (National Mining Agency) and SAM (Sul Americana de Metais S.A.), were used for the development and validation of the model. Being coherent with previous knowledge on the region, the final model has proved to be efficient from regional to local scales, enhancing the accuracy to outline favorable areas for the occurrence of iron-rich rocks even in the large tableland domains.

Keywords: Iron ore. Glaciation. Spatial modeling. Fuzzy Logic. Macaúbas Group.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Localização das áreas de estudo _____	15
Figura 1.2. Mapa hipsométrico da região estudada mostrando as bacias hidrográficas do Médio Rio São Francisco, do Rio Pardo e do Rio Jequitinhonha e seus divisores de águas (em vermelho), indicando a localização da área de estudo local (em azul). _____	16
Figura 2.1. Mapa geológico simplificado cobrindo a região estudada (Voll et al. 2020), indicando a localização da área de estudo local (em azul). _____	20
Figura 3.1. Mapa geológico da área de estudo de caso (modificado de SAM, 2013). _____	21
Figura 3.2. Localização da Área 8 (Minas Novas-Riacho dos Machados-Espinosa) do Programa de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais (CODEMIG-SEDE-CPRM 2006), indicando a localização das áreas de estudo. _____	22
Figura 3.3. a) Gradiente total (GT). b) Domínios magnéticos, definidos por texturas e limites de anomalias. _____	24
Figura 3.4. Mapa do Gradiente Total associado às soluções Euler para a área de estudo local, mostrando as áreas de pesquisa da SAM S.A. _____	25
Figura 3.5. Mapas gamaespectrométricos para a região estudada: a) K (%); b) Th (ppm); c) U (ppm); d) composição ternária K-Th-U; e) razão Th/K; f) razão U/K. _____	27
Figura 3.6. a) Composição ternária (RGB) com os canais individuais de K, Th e U. b) Domínios gama-espectrométricos. As concentrações interpretadas de radioelementos são mostradas na tabela à direita. _____	28
Figura 3.7. Imagens Landsat 8 (banda 4, vermelho; banda 3, verde; e banda 2, azul; (USGS, 2018) cobrindo a região estudada (retângulo preto). _____	29
Figura 3.8. Posição das bandas do satélite Landsat 8 em relação ao espectro eletromagnético e as assinaturas espectrais de hematita, campo seco e vegetação densa (USGS, 2019). _____	30
Figura 3.9. Mudança e rotação dos eixos e a transformação dos dados em uma análise por componentes principais, usando uma imagem composta por duas bandas (modificado de ESRI, 2016). _____	31
Figura 3.10. Gráficos de correlação entre as bandas 2 e 4 (satélite Landsat 8) e entre as bandas 1 e 4 do resultado da análise por componentes principais dessas duas bandas _____	32
Figura 3.11. Componente principal seletivo aplicado para realçar o (a) óxido-hidróxido de ferro e (b) os minerais argilosos. Índice para realçe de hematita no solo (c). _____	32
Figura 3.12. Fluxograma de processamento da análise para geração de modelos de distribuição de unidades ricas em ferro, com base no modelo orientado pelo conhecimento, utilizando lógica Fuzzy. _____	35
Figura 3.13. Modelo de distribuição de áreas (em vermelho) com maior favorabilidade para ocorrência significativa de rochas ricas em ferro no mapa da região estudada; a) e b) áreas do Grupo Macaúbas e do Supergrupo Espinhaço (polígonos brancos são áreas legalmente registradas para prospecção de ferro na Agência Nacional de Mineração (cf. ANM, 2019); c) e d) áreas do Grupo Bambuí, Formação Salinas e Bloco Porteirinha; e) e f) fotos da formação de ferro diamictítico em exposições de campo (locais indicados no mapa principal do modelo). _____	37
Figura 3.14. Mapa 1) Modelo prospectivo para minério de ferro mostrando áreas com alta favorabilidade à prospecção de minério de ferro, em vermelho, e localização dos pontos A, B, C e D (afioramentos de metadiamictito hematítico descritos em campo). Mapa 2) Modelo prospectivo para minério de ferro mostrando as áreas de requerimento de lavra da SAM S.A. (ANM, 2019) e os limites da unidade que contém o minério (modificado de SAM, 2013). _____	39
Figure 4.1. Simplified geologic map covering the studied region (compiled and modified from 1:100000 scale geological maps by Mourão et al., 1997; Mourão and Grossi-Sad, 1997; Roque et al., 1997; Guimarães, 1997; Guimarães et al., 1997; Oliveira et al., 1997; Noce, 1997; Pedrosa-Soares and Grossi-Sad, 1997; all of them from the Projeto Espinhaço; Grossi-Sad et al., 1997). _____	44
Figure 4.2. Total magnetic intensity (TMI-reduced from IGRF) of the study region. _____	48

Figure 4.4. Gammaspectrometric maps (input) for the studied region: a) K (wt%); b) Th (ppm); c) U (ppm); d) K-Th-U ternary composition; e) Th/K ratio; f) U/K ratio. _____	52
Figure 4.5. a) Ternary composition (RGB) with the individual channels of K, Th, and U. b) Gammaspectrometric domains. The interpreted concentrations of radioelements are shown in the inserted table. _____	54
Figure 4.6. Landsat 8 images (true-color image – band 4, red; band 3, green; and band 2, red) covering the studied region (black rectangle). _____	57
Figure 4.7. Landsat 8 bands in relation to the electromagnetic spectrum, and the hematite, dry field, and dense vegetation spectral signatures (USGS, 2019). _____	57
Figure 4.8. Selective Principal Component applied to enhance the (a) oxide-hydroxide of iron and (b) clay-minerals, and the enhancement index for hematite on soil (c). _____	59
Figure 4.9. Analysis processing flowchart for iron-rich units classification model generation, based on the knowledge-driven model using Fuzzy logic. _____	62
Figure 4.11. Distribution model of areas (in red) with the best favorability for significant occurrence of iron-rich rocks on the studied region map; a) and b) areas on the Macaúbas Group and Espinhaço Supergroup (white polygons are areas legally registered for iron prospecting in the National Mining Agency (cf. DNPM, 2019); c) and d) areas on the Bambuí Group, Salinas Formation, and Porteirinha block; e) and f) photos from diamictitic iron formation in field exposures (locations indicated in the main model map). _____	64
Figure 5.1. Mapa geológico simplificado da Folha Padre Carvalho (modificado de Mourão & Grossi Sad, 1997). Retângulo azul indica a área selecionada para este estudo. _____	76
Figure 5.2. Localização da área de estudo, mostrando blocos de prospecção da SAM (ANM 2019) sobre a geologia simplificada da Folha Padre Carvalho (ver Figura 5.1). _____	77
Figure 5.3. Mapa geológico da área de estudo (modificado de SAM, 2013). _____	78
Figure 5.4. Formação ferrífera metadiamictítica rica em hematita (UTM23S-WGS84, 741.246E, 8.201.332N). _____	78
Figure 5.5. Mapa do Gradiente Total associado às soluções Euler para a área de pesquisa da SAM S.A. Visualização das profundidades das soluções Euler (a, b) sobre o mapa geológico da Figura 5.3, visada NW (a) e EW (b). _____	80
Figure 5.6. a) Composição ternária com as concentrações de K (vermelho), Th (verde) e U (azul). b) Razão Th/K. c) Razão U/K. _____	82
Figure 5.7. a) Imagem Landsat 8 (b4, vermelho; b3, verde; b2, azul) mostrando as coberturas que sustentam o relevo circundadas por vales onde afloram as rochas da Formação Nova Aurora. b) IH. ACP para realce de óxido-hidróxido de Ferro (c) e argilominerais (d). _____	82
Figure 5.8. Bloco de hematita especular à beira da estrada, contendo níveis quase inteiramente compostos por hematita e magnetita (UTM23S-WGS84, 740.468E, 8.201.919N). _____	85
Figure 5.9. Fluxograma de processo para análise para geração de modelo prospectivo para minério de ferro. _____	86
Figure 5.10. Mapa 1) Modelo prospectivo para minério de ferro mostrando áreas com alta favorabilidade à prospecção de minério de ferro em vermelho e localização dos pontos A, B, C e D (afloramentos de metadiamictito hematítico descritos em campo). Mapa 2) Modelo prospectivo para minério de ferro mostrando as áreas de requerimento de lavra da SAM S.A. (ANM, 2019) e os limites da unidade que contém o minério (modificado de SAM, 2013). (A), (B), (C) e (D) Afloramentos de metadiamictito hematítico (UTM23S-WGS84 A - 741.246E, 8.201.332N; B - 740.468E, 8.201.919N; C - 740.858E, 8.203.248N; D - 742.962E, 8.203.719N). _____	87

LISTA DE ABREVIATURAS

ANM	Agência Nacional de Mineração
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CODEMIG	Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FUNDEP	Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa
IAEA	International Atomic Energy Agency
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
MGD	Laboratório de Mapeamento Geológico, Geotectônica e Geodiversidade do CPMTC-IGC-UFMG,
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration.
OLI	Operational Land Imager sensor
SAM	Sul Americana de Metais S.A.
SEDE	Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TIRS	Thermal Infrared Sensor
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 ESTRUTURA DA TESE	12
1.2 NATUREZA DA PESQUISA	13
1.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	15
1.3.1 Localização	15
1.3.2 Aspectos geomorfológicos	16
2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA	18
3 DADOS, MÉTODOS E RESULTADOS	21
3.1 DADOS AEROGEOFÍSICOS	21
3.1.1 Dados magnéticos	22
3.1.1.1 Gradiente Total	23
3.1.1.2 Deconvolução de Euler	24
3.1.2 Dados gamaespectrométricos	25
3.1.2.1 Composição ternária K-Th-U e a discriminação de domínios geológicos	26
3.2 IMAGENS LANDSAT 8	28
3.2.1 Análise por Componente Principal	30
3.2.2 Índice para realce de hematita	32
3.3 MODELAGEM ESPACIAL - MODELO GUIADO PELO CONHECIMENTO	33
3.3.1 Modelagem dos dados	34
3.4 RESULTADOS	36
3.4.1 Área de estudo regional	36
3.4.2 Área de estudo local	38
4 1º artigo: TRACKING IRON-RICH ROCKS BENEATH CENOZOIC TABLELANDS: AN INTEGRATION OF GEOLOGICAL, AIRBORNE GEOPHYSICAL AND REMOTE SENSING DATA FROM NORTHERN MINAS GERAIS STATE, SE BRAZIL	40
4.1 ABSTRACT	40
4.2 INTRODUCTION	41
4.3 GEOLOGICAL SETTING	42
4.4 DATA, APPLIED METHODS AND RESULTS	46
4.4.1 Airborne Magnetic and Gamma-ray spectrometric data	46
4.4.1.1 Magnetic data processing and interpretation	47
4.4.1.1.1 Total Gradient (TG)	49
4.4.1.1.2 Gamma-ray spectrometric data processing and interpretation	51
4.4.1.2.1 K-Th-U ternary composition assisting discrimination of geological domains	53
4.4.2 Landsat 8 satellite images	55
4.4.2.1 Principal Component Analysis	57
4.4.2.2 Enhancement Index for hematite	58
4.4.3 Spatial Modeling	59
4.4.3.1 Knowledge-driven model	59
4.4.3.2 Lithologic controls	60
4.4.3.3. Data modeling	61
4.5 DISCUSSION AND CONCLUSION	65
4.6 ACKNOWLEDGMENTS	67
4.7 REFERENCES	67
5 2º artigo: MODELAGEM DE DADOS GEOFÍSICO-ESPACIAIS POR LÓGICA FUZZY APLICADA AO DISTRITO FERRÍFERO NOVA AURORA, NORTE DE MINAS GERAIS	74
5.1 RESUMO	74
5.2 ABSTRACT	75

5.3 INTRODUÇÃO	76
5.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	77
5.4 DADOS, MÉTODOS E RESULTADOS	79
5.4.1 Dados aerogeofísicos	79
5.4.1.1 Gradiente total	79
5.4.1.2 Deconvolução de Euler	80
5.4.1.3 Dados gamaespectrométricos	81
5.4.2 Imagens Landsat 8	82
5.4.2.1 Índice para realçe de hematita (IH)	82
5.4.2.2 Análise por Componente Principal (ACP)	82
5.5 MODELAGEM ESPACIAL	83
5.5.1 Caracterização da formação ferrífera	84
5.5.2 Modelagem dos dados	84
5.6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	87
5.7 AGRADECIMENTOS	89
5.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	92
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese apresenta os principais resultados de um trabalho de pesquisa científica com o objetivo de criar um modelo integrado para rastreamento de rochas ricas de ferro, geralmente cobertas por depósitos sedimentares cenozoicos em chapadas. A pesquisa se estende a um estudo de caso, em escala local, que teve como propósito testar a viabilidade do modelo para diferentes escalas.

O trabalho é apresentado na forma de dois artigos científicos, precedidos por capítulos que descrevem o trabalho, seus objetivos, o contexto geológico da região, além dos materiais, métodos e fluxo de trabalho para desenvolvimento dos modelos propostos. Segue abaixo a relação dos capítulos apresentados neste volume, bem como a respectiva síntese do seu conteúdo:

- **Capítulo 1 (Introdução):** descrição da pesquisa, seus objetivos, localização, caracterização da área de estudo e créditos às agências financiadoras e instituições envolvidas;
- **Capítulo 2 (Caracterização geológica):** contexto geológico da área, descrevendo as principais unidades encontradas na região estudada;
- **Capítulo 3 (Dados, métodos e resultados):** descrição dos dados e processo utilizados para desenvolvimento do modelo proposto;
- **Capítulo 4 (1º artigo):** intitulado “*Tracking iron-rich rocks beneath cenozoic tablelands: an integration of geological, airborne geophysical and remote sensing data from northern Minas Gerais State, SE Brazil*”, por E. Voll, A.M. Silva e A.C. Pedrosa-Soares, publicado no *Journal of South American Earth Sciences* (doi: 10.1016/j.jsames.2020.102604), classificado como A2 pelo atual Qualis-Capes. O artigo descreve o desenvolvimento de modelo de favorabilidade para ocorrência de rochas ricas em ferro na região estudada e seu resultado;
- **Capítulo 5 (2º artigo):** intitulado “Modelagem de dados geofísico-espaciais por lógica *fuzzy* aplicada ao Distrito Ferrífero Nova Aurora, norte de Minas Gerais”, por E. Voll, A.M. Silva, A.C. Pedrosa-Soares, A. Ranufo e F.T. Vilela, submetido ao *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*,

classificado como B1 pelo atual Qualis-Capes. O artigo descreve o desenvolvimento de modelo de favorabilidade para ocorrência de minério de ferro na área de estudo local e seu resultado;

- **Capítulo 6 (Discussão e conclusões):** discussão dos resultados encontrados na área de estudo e na área de estudo local, e conclusões sobre o trabalho;
- **Capítulo 7 (Referências bibliográficas):** referências bibliográficas contidas no texto.

1.2 NATUREZA DA PESQUISA

A integração de dados geográficos, como os de pesquisas geofísicas, geológicas e de sensoriamento remoto, tem sido usada com sucesso para identificar ocorrências de vários ativos minerais e para auxiliar no mapeamento geológico em todo o mundo. Depósitos de ferro, zinco e ouro, bem como rochas máficas e ultramáficas, são exemplos de alvos para essa técnica (Carneiro *et al.*, 2008; Zacchi *et al.*, 2010; Andrade *et al.*, 2014; Motta & Faria Júnior, 2016 ; Leväniemi *et al.*, 2017). As características distintivas de cada alvo tornam sua localização muito eficiente e as técnicas disponíveis, usando Sistemas de Informação Geográfica (SIG), facilitam o tratamento de dados espaciais e sua integração para modelagem, análise e interpretação do fenômeno a ser estudado (Bonham-Carter, 1994). Pesquisas para encontrar ocorrências de rochas ricas em ferro, bem como modelagem prospectiva, têm utilizado com sucesso essas técnicas (Zacchi *et al.*, 2010; Mario, 2015; Uchoa, 2016). Em estudos geológicos, em regiões onde rochas ricas em ferro não afloram ou estão sob densa cobertura vegetal, o uso de métodos de mapeamento indireto é útil, incluindo dados geofísicos, de sensoriamento remoto e análises espaciais usando GIS (Crósta *et al.*, 1994; Paradella *et al.*, 1997). Imagens aerogeofísicas, juntamente com o sensoriamento remoto, fornecem informações essenciais, tornando os resultados da pesquisa mais precisos em áreas de difícil acesso ou com coberturas que mascaram o posicionamento do ativo mineral.

A região estudada nesta pesquisa se localiza no norte de Minas Gerais, sudeste do Brasil, onde foi aplicada uma abordagem integrada envolvendo dados geológicos, aerogeofísicos e de sensoriamento remoto. Dados coletados em trabalhos de campo, além de pesquisa bibliográfica e dados originários da ANM (Agência Nacional de

Mineração) e SAM (Sul Americana de Metais S.A.) foram utilizados no desenvolvimento do modelo ou em sua validação.

Essa região compreende os domínios geomorfológicos-geológicos do Craton de São Francisco e do Orógeno Araçuaí. O domínio oriental compreende grandes planaltos sustentados principalmente por unidades ricas em metadiamictito e quartzito do Grupo Macaúbas, incluindo os metadiamictitos ricos em ferro (10 - 60% em peso de Fe) do membro Riacho Poções, descrito na porção nordeste da área (Viveiros *et al.*, 1978; Grossi-Sad *et al.*, 1997; Vilela, 2010; Pedrosa-Soares *et al.*, 2011; Vilela *et al.*, 2014). Correspondem a unidades de difícil mapeamento, uma vez que rochas ricas em ferro estão em grande parte recobertas por depósitos sedimentares e solos cenozoicos. Estes depósitos, por sua vez, sustentam extensas chapadas que correspondem às principais unidades de relevo da região. Sendo assim, tais sucessões ocorrem apenas na forma de afloramentos dispersos eventualmente bem preservados da lateritização, um processo de intemperismo que pode atingir dezenas de metros de profundidade na região estudada. Nesses locais, o ferro tende a ser mais concentrado em lateritas desenvolvidas sobre rochas ricas em ferro do que nas coberturas lateríticas regionais (Vilela, 2010).

Embora as informações coletadas por sensoriamento remoto e sensores gamaespectrométricos reflitam apenas as propriedades de materiais superficiais, estas ferramentas se mostraram eficientes neste trabalho na redução da ambiguidade da informação quando integradas aos dados aerogeofísicos magnéticos. Isso pode se explicar pela ocorrência de ferro nas coberturas lateríticas da superfície das chapadas, onde geralmente há concentração de ferro como resultado do intemperismo químico intenso nas rochas ricas em ferro.

O modelo apresentado neste trabalho se mostrou eficiente em escalas diversas, sendo coerente com o conhecimento disponível sobre a região. Tanto na escala regional como na de detalhe, mostrou áreas favoráveis para a ocorrência de rochas ricas em ferro, mesmo onde ocorre o recobrimento dessas rochas por extensas coberturas cenozoicas.

A realização desta tese foi possível graças aos contratos de mapeamento geológico firmados pela CODEMIG – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais e CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais com o MGD - Laboratório de Mapeamento Geológico, Geotectônica e Geodiversidade do CPMTC-

IGC-UFMG, via FUNDEP, os quais permitiram o desenvolvimento e manutenção do laboratório e de sua equipe técnico-científica, cuja coordenação técnica esteve a cargo da autora. A bolsa de doutorado, concedida pela CAPES à autora, e projetos do CNPq, coordenados pelo orientador desta tese, foram suportes permanentes durante toda a realização da tese.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

1.3.1 Localização

A região estudada nesta tese abrange uma área de 23.630 km², limitada pelas latitudes 15°30'S e 17°30'S e longitudes 43°30'W e 42°30'W (Figura 1.1), correspondendo à cobertura de 8 Folhas Topográficas do IBGE em escala 1:100.000: Janaúba (SD.23-Z-D-IV); Rio Pardo de Minas (SD.23-Z-D-V); Francisco Sá (SE.23-X-B-I); Padre Carvalho (SE.23-X-B-II); Botumirim (SE.23-X-B-IV); Grão Mogol (SE.23-X-B-V); Itacambira (SE.23-X-D-I) e Minas Novas (SE.23-X-D-II).

A área correspondente ao estudo de caso abranje 66,6 km² e se localiza no limite dos municípios de Padre Carvalho e Grão Mogol, MG (Figura 1.1).

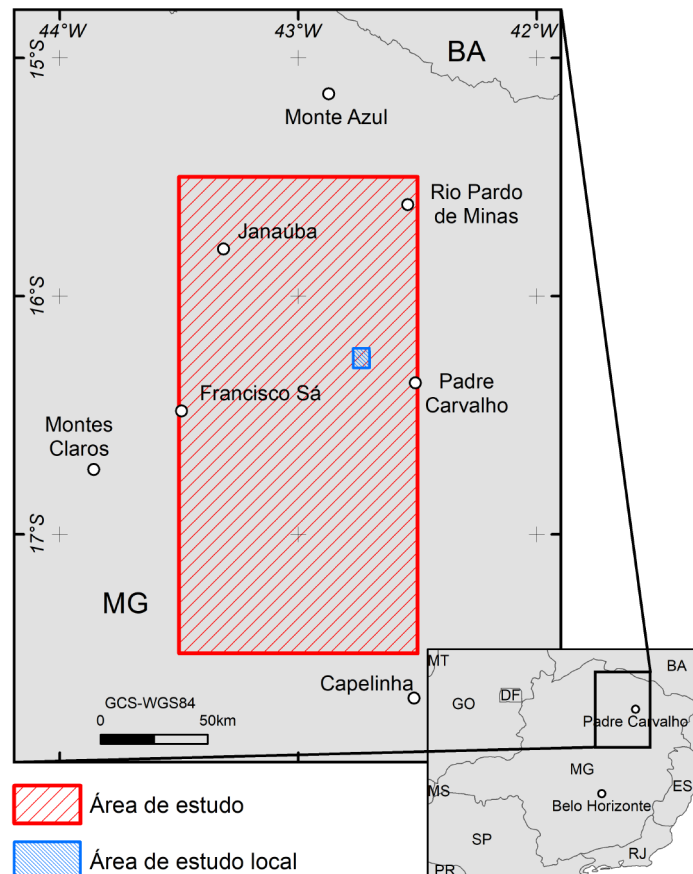


Figura 1.1. Localização das áreas de estudo.

1.3.2 Aspectos geomorfológicos

A área é banhada pelas bacias dos rios Médio São Francisco, a noroeste, Pardo, em uma pequena porção a nordeste, e Jequitinhonha, que ocupa a maior extensão na região leste, centro e sul (Figura 1.2). A confluência dos divisores de águas das bacias dos rios Médio São Francisco e do Pardo se localiza a norte da área, na região da Serra do Espinhaço, enquanto o divisor de águas entre a Bacia do Jequitinhonha e as demais se situa sobre as extensas chapadas típicas da área de trabalho.

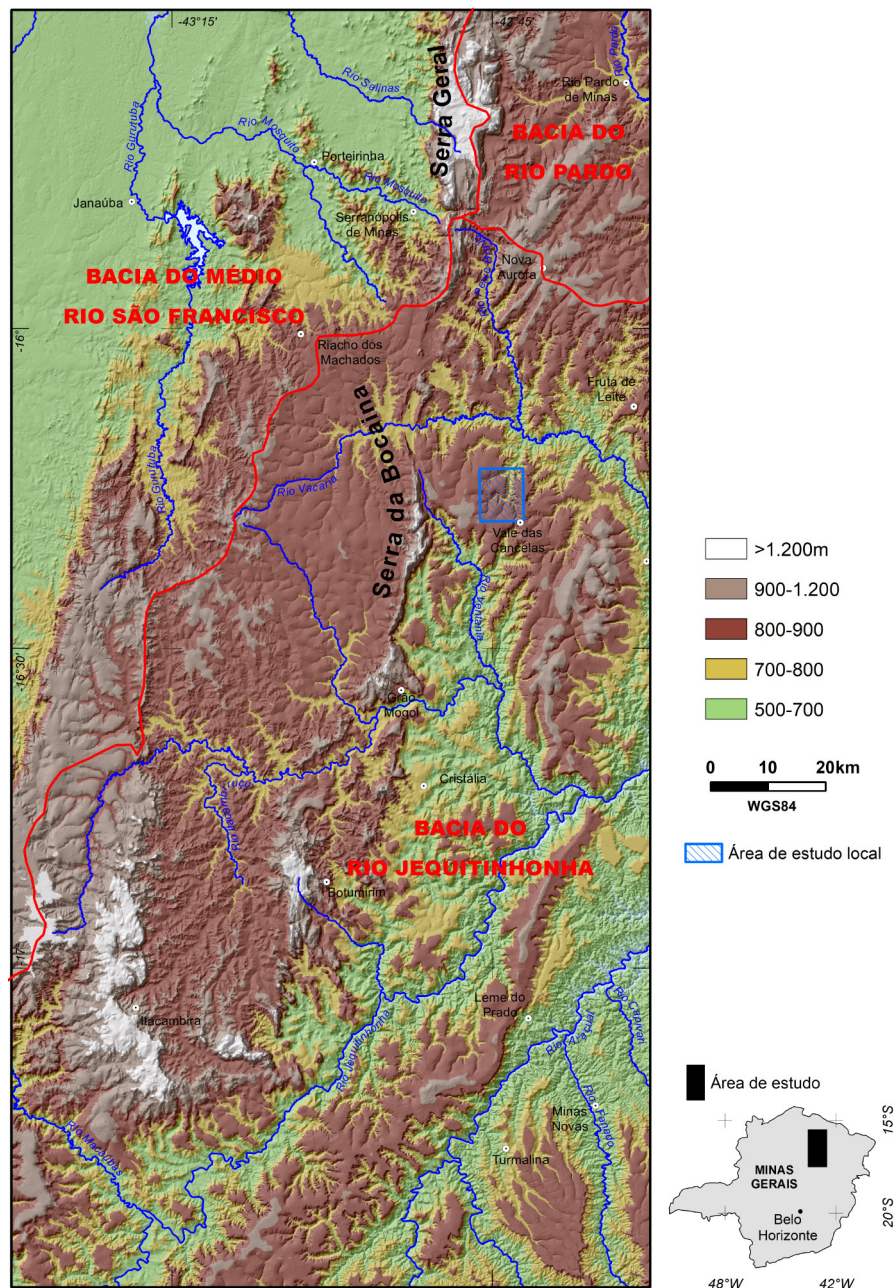


Figura 1.2. Mapa hipsométrico da região estudada mostrando as principais drenagens, as bacias hidrográficas do Médio Rio São Francisco, do Rio Pardo e do Rio Jequitinhonha e seus divisores de águas (em vermelho), indicando a localização da área de estudo local (em azul).

A área estudada está contida no Compartimento Morfoestrutural 1, que corresponde ao Planalto da Serra do Espinhaço, resultante do aplainamento sul-americano desenvolvido sobre a porção rica em metadiamicritos do Grupo Macaúbas e do Bloco Porteirinha (King, 1956; Saadi & Pedrosa Soares, 1990) e no domínio de Serras, Patamares e Escarpas do Espinhaço, que corresponde à sucessão de superfícies de aplainamento escalonadas, com escarpamentos orientados por fraturas que ocorre na região (Saadi, 1995).

No Compartimento Morfoestrutural 1 são representados o Ciclo Sulamericano (Eoceno-Oligoceno), entre as altitudes 800 e 900 m, caracterizado por extensas chapadas sustentadas por coberturas cenozoicas desenvolvidas sobre rochas do Grupo Macaúbas, e o Ciclo Velhas (Neógeno), entre as altitudes 500 e 700 m, marcado por feições de relevo desenvolvidas sobre rochas graníticas e gnáissicas da Suíte Rio Itacambiruçu e do Complexo Córrego do Cedro, a noroeste, e pelos vales encaixados dos rios Peixe Bravo e Ventania, afluentes do Rio Jequitinhonha. As chapadas, cujas coberturas elúvio-coluvionares que a sustentam cobrem essencialmente rochas do Grupo Macaúbas, estão sendo dissecadas por drenagens perenes e intermitentes, formando ravinas, onde afloraram as rochas subjacentes.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

A região abrange o Orógeno Araçuaí e uma porção menor do Cráton de São Francisco a noroeste (Pedrosa-Soares *et al.*, 2001; 2011), apresentando as seguintes assembleias litológicas (Figura 2.1):

i) *Embasamento Arqueano-Paleoproterozoico e unidades supracrustais relacionadas*: correspondente na área de estudo ao Bloco Porteirinha, compreende ortognaisses e rochas metamáficas e metaultramáficas relacionadas ao Complexo Córrego do Cedro e às suítes Rio Itacambiruçu e Paciência, além do granito Catolé e o sienito Serra Branca (Figura 2.1). Sobrepondo-se aos ortognaisses do embasamento, o Grupo Riacho dos Machados inclui mica xistos com intercalações de metachert, formação ferrífera e rochas metaultramáficas, além de rochas ricas em sulfetos que hospedam mineralização de ouro (Fonseca, 1993; Guimarães *et al.*, 1997);

ii) *Supergrupo Espinhaço (Estateriano-Mesoproterozoico)*: inclui arenitos, conglomerados, pelitos, rochas vulcânicas félsicas e básicas metamorfisadas (Lopes-Silva & Knauer, 2011). O Bloco Porteirinha também mostra rochas vulcânicas e subvulcânicas félsicas metamorfisadas, provavelmente correlacionadas à unidade estateriana basal (ca. 1,75 Ga) do Supergrupo Espinhaço;

iii) *Grupo Macaúbas (Neoproterozoico)*: da base para o topo e de oeste para leste, o Grupo Macaúbas inclui as formações Planalto de Minas e Rio Peixe Bravo, de idade toniana, e as unidades criogenianas com diamictitos, denominadas Serra do Catuni, Chapada Acauã e Nova Aurora (Figura 2.1). A Formação Planalto de Minas, exposta a sul do bloco Porteirinha, inclui xisto verde (basalto metamorfisado) e magnetita-sericita quartzito, interpretado como produto do vulcanismo máfico fissural de 900 Ma (Souza *et al.*, 2019). A Formação Rio Peixe Bravo compreende uma sucessão de camadas alternadas de quartzito e filito, localmente com quantidades significativas de óxidos de ferro acessórios (principalmente hematita e magnetita), expostos junto à margem oriental da Cordilheira Espinhaço. A Formação Serra do Catuni inclui principalmente metadiamictito maciço com intercalações raras de quartzito e metassiltito, geralmente muito pobres para liberar óxidos e sulfetos de ferro durante o intemperismo, cobrindo uma área muito extensa no orógeno Araçuaí (a oeste), ao longo da fronteira com o Craton São Francisco (Figura 2.1). Mais a leste, a

sul do bloco Porteirinha, a Formação Serra do Catuni passa lateral e verticalmente para a Formação Chapada Acauã. Esta unidade compreende, na base, metadiamicrito intercalado com quartzito e metapelito com diamicrito ferruginoso raro, passando para o topo a uma sucessão de quartzito e metapelito (Figura 2.1). A Formação Nova Aurora ocorre a leste do bloco Porteirinha, sobre a Formação Rio Peixe Bravo e subjacente à Formação Chapada Acauã (Figura 2.1). A Formação Nova Aurora inclui uma sucessão pobre em ferro de metadiamicritos maciços a estratificados com intercalações de quartzito e metapelito e uma unidade rica em ferro, o Membro Riacho Poções (Viveiros *et al.*, 1978; Vilela *et al.*, 2014). Esse membro é o datum estratigráfico com alta susceptibilidade magnética mais importante na região estudada, pois contém principalmente metadiamicritos ricos em hematita e/ou magnetita com 10 a 60% em peso de Fe total. Até mesmo os metadiamicritos mais pobres em hematita mostram anomalias magnéticas significativas nos afloramentos preservados da laterização. No entanto, os metadiamicritos ricos em ferro, bem como todas as outras rochas pré-cambrianas, são quase completamente soterrados por coberturas cenozoicas nas chapadas, impedindo sua representação confiável em mapas geológicos produzidos antes do levantamento aerogeofísico (CODEMIG-SEDE-CPRM, 2006). Tal levantamento revelou uma série de anomalias magnéticas, sugerindo novos alvos para pesquisa de rochas ricas em ferro;

iv) *Formação Salinas (Ediacarano)*: inclui uma sucessão de grauvacas, pelitos, conglomerados e carbonatos metamorfisados, além de rochas ricas em ferro muito escassas e relacionadas a zonas de cisalhamento;

v) *Grupo Bambuí*: compreende uma sucessão de rochas carbonáticas e pelito, depositada principalmente entre o final do Ediacarano e o início do Cambriano (Warren *et al.*, 2014; Paula-Santos *et al.*, 2015);

vi) *Coberturas cenozoicas*: são formadas pelos sedimentos siliciclásticos da Formação São Domingos (Paleogeno; Pedrosa-Soares, 1997) e unidades quaternárias lateríticas elúvio-coluvionares (Figura 2.1). Na região estudada, as chapadas são sustentadas por extensas coberturas lateríticas e afloramentos muito raros de rochas frescas cambrianas ou pré-cambrianas. Falésias e drenagens de dissecação de chapadas moldadas na Formação Nova Aurora exibem localmente metadiamicritos ricos em ferro (Mourão *et al.*, 1997; Roque *et al.*, 1997).

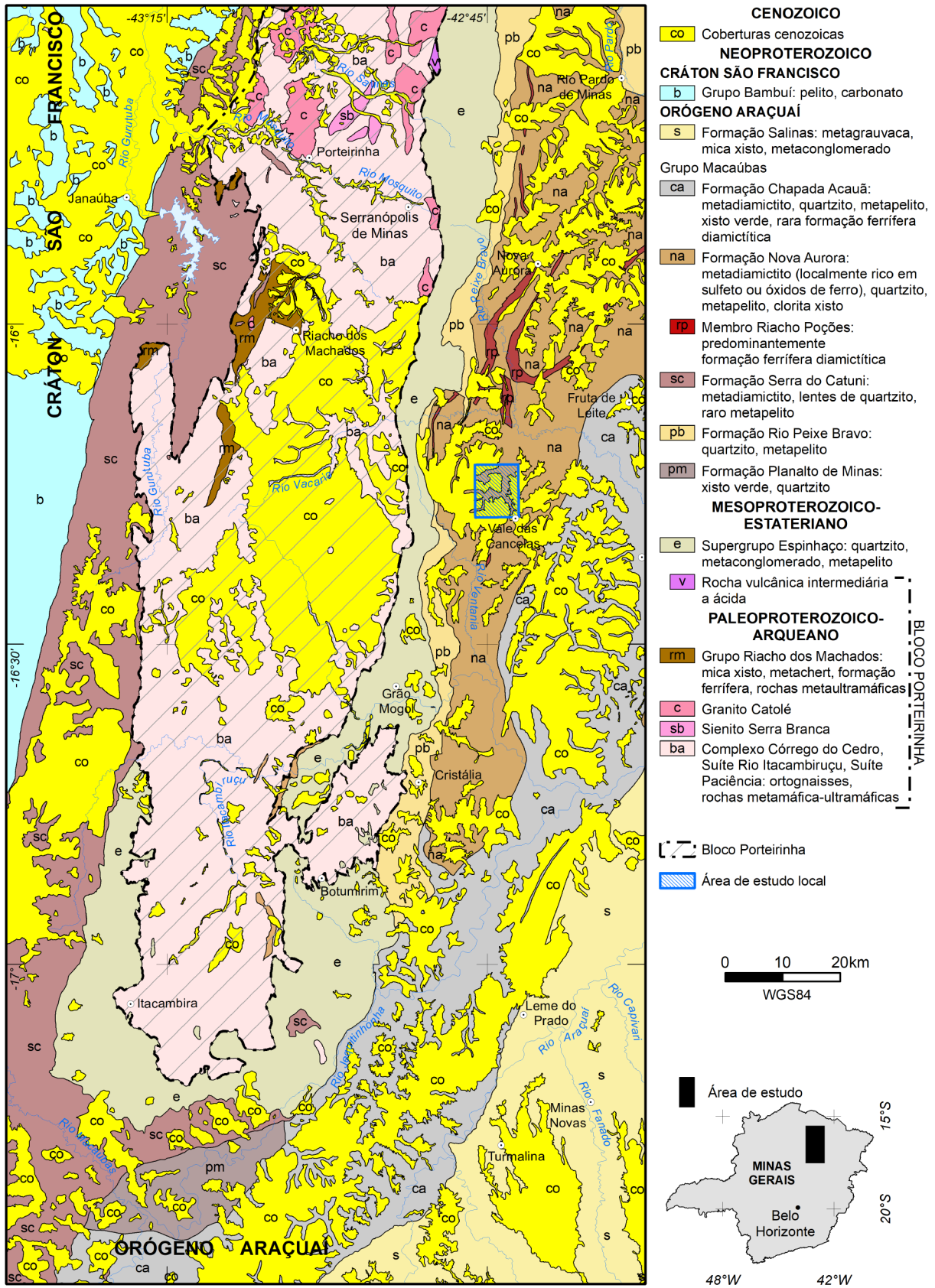


Figura 2.1. Mapa geológico simplificado cobrindo a região estudada (Voll et al., 2020), indicando a localização da área de estudo local (em azul).

3 DADOS, MÉTODOS E RESULTADOS

Os dados utilizados no trabalho são:

i) Mapas geológicos: Projeto Espinhaço (Escala 1:100.00; Janaúba, Rio Pardo de Minas, Francisco Sá, Padre Carvalho, Botumirim, Grão Mogol, Itacambira, e Minas Novas (Figura 2.1; Grossi-Sad *et al.*, 1997)

Mapa geológico da área de estudo de caso, elaborado pela Sul Americana de Metais S.A., em escala 1:15.000 (Figura 3.1; SAM, 2013).

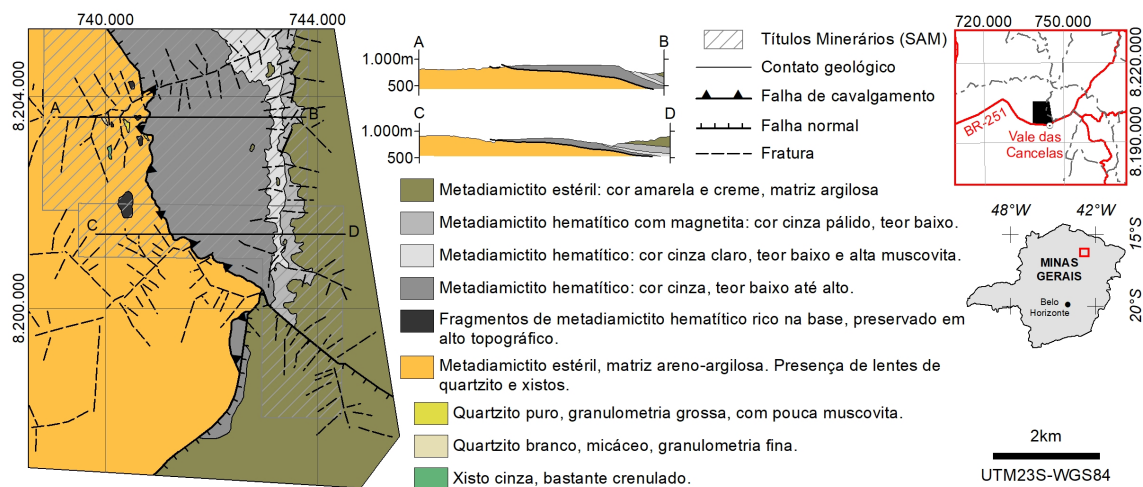


Figura 3.1. Mapa geológico da área de estudo de caso, onde as coberturas não são representadas (modificado de SAM, 2013).

ii) Modelo digital de elevação SRTM (Figura 1.2; USGS, 2004);

iii) Dados aerogeofísicos magnéticos e gamaespectrométricos da Área 8 do “Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais – Programa 2005/2006” (Figura 3.2, CODEMIG-SEDE-CPRM, 2006);

iv) Imagens de satélite Landsat 8 (Figura 3.7; USGS, 2018).

Na elaboração dos modelos, foram utilizados os dados aerogeofísicos e as imagens de satélite.

3.1 DADOS AEROGEOFÍSICOS

Os dados aerogeofísicos são os da Área 8 (Minas Novas-Riacho dos Machados-Espinosa) do Programa de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais (Figura 3.2; CODEMIG-SEDE-CPRM, 2006). Esta área corresponde ao recobrimento de 87.212,45 km de perfis aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos, com linhas de voo e de controle espaçadas de 0,5 km e 10,0 km e orientação das linhas

nas direções N25W e N65E, respectivamente. Os intervalos de tempo entre medições geofísicas consecutivas são de 0,1s (magnetômetro) e 1,0s (espectrômetro), a altura média de voo de 100 m e a velocidade aproximada de 280 km/h.

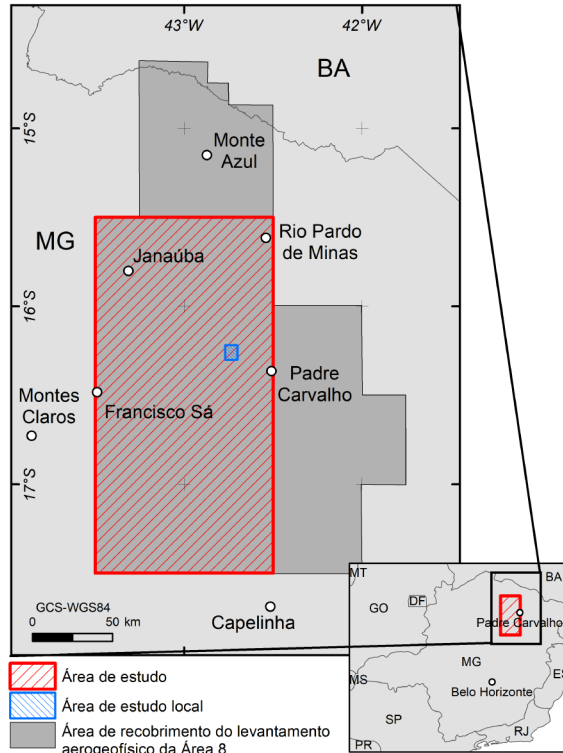


Figura 3.2. Localização da Área 8 (Minas Novas-Riacho dos Machados-Espinosa) do Programa de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais (CODEMIG-SEDE-CPRM, 2006), indicando a localização das áreas de estudo.

3.1.1 Dados magnéticos

Dependendo da latitude, as respostas da fonte magnética podem variar de acordo com a característica dipolar e a direção da magnetização relacionadas. As formas de anomalia magnética dependem da latitude, uma vez que as inclinações magnéticas variam de -90° (no Polo Magnético Norte), passando por 0° (no equador magnético) até 90° (no Polo Magnético Sul). Mesmo que a forma da fonte seja idêntica, a forma da anomalia é diferente em cada latitude (Dentith & Mudge, 2014). Para resolver isso, a redução ao pólo (RP) pode ser usada, transformando uma anomalia magnética que está relacionada ao magnetismo inclinado de uma região não polar em sua resposta polar equivalente, onde o magnetismo do corpo é vertical. No entanto, em baixas latitudes, os dados magnéticos podem gerar resultados de baixa qualidade se reduzidos ao polo (Dentith & Mudge, 2014). Dessa forma, o Gradiente Total (GT) foi utilizado para a elaboração dos modelos pois a inclinação magnética

varia entre valores baixos (-33° e -36°; NOAA, 2019) na região estudada (latitude 15°30'S a 17°30'S e longitude 43°30'W a 42°30'W).

A deconvolução de Euler foi utilizada no estudo da área de detalhe.

3.1.1.1 Gradiente Total

Nabighian (1972) e Roest *et al.* (1992) propuseram a amplitude do sinal analítico como a amplitude do vetor gradiente total de um dado magnético. O Gradiente Total fornece resultados independentes da inclinação da magnetização, particularmente úteis em baixas latitudes magnéticas (Nabighian *et al.*, 2005; Dentith & Mudge, 2014). Foi calculado tomando a raiz quadrada da soma dos quadrados de cada uma das primeiras derivadas direcionais do campo magnético, a partir da expressão:

$$GT = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$$

Onde: GT = Gradiente total; dx = derivada em x; dy = derivada em y; dz = derivada em z

O cálculo do gradiente total resulta em valores máximos nas bordas do corpo, destacando as posições dos corpos relativamente estreitos (por exemplo, diques) e as bordas dos corpos maiores (Dentith & Mudge, 2014). Este produto ajuda a traçar os limites das fontes magnéticas (Roest *et al.*, 1992) e a definir domínios magnéticos bidimensionais (2D), destacando áreas prováveis para ocorrências de rochas ricas em ferro devido aos seus altos valores de intensidade de GT.

Nove domínios magnéticos (D1 a D9) foram delimitados usando imagem gradiente total, após diferenciação de texturas e limites de anomalias (Figura 3.3). O domínio D1 mostra a intensidade mais forte e a textura mais áspera, enquanto o domínio D9 exibe a intensidade mais baixa e a textura mais uniforme. Os domínios D1, D2 e D3, que são os de maior rugosidade e intensidade, geralmente abrangem áreas com ocorrências previamente conhecidas de metadiamicritos ricos em ferro do Grupo Macaúbas e suas prováveis extensões ocultas por coberturas cenozóicas nas chapadas (Figura 2.1). No setor leste da região estudada (Figura 2.1), o Grupo Macaúbas compõe uma complexa estrutura tectono-estratigráfica, incluindo quartzitos micáceos e ferruginosos, metadiamicritos com matriz rica em quartzo e mica e pobre em óxidos de Fe, formação ferrífera diamictítica (Fe total >15%), metadiamicritos ferruginosos, filito e metassiltito, fortemente dobrados, transpostos ao longo de zonas de cisalhamento dúcteis, redobrados e cortados por falhas e fraturas tardias (Viveiros

et al., 1978; Grossi-Sad *et al.*, 1997; Vilela *et al.*, 2014). Refletindo essa estrutura complexa, as assinaturas magnéticas freqüentemente mostram limites mal definidos em relação às unidades litoestratigráficas, mas destacam fortemente o Membro Riacho Poções que compreende principalmente formações ferríferas diamictíticas e metadiamicritos ferruginosos (Figura 3.3). Os domínios traçados estão descritos em maior detalhe no 1º artigo 1, (Item 4).

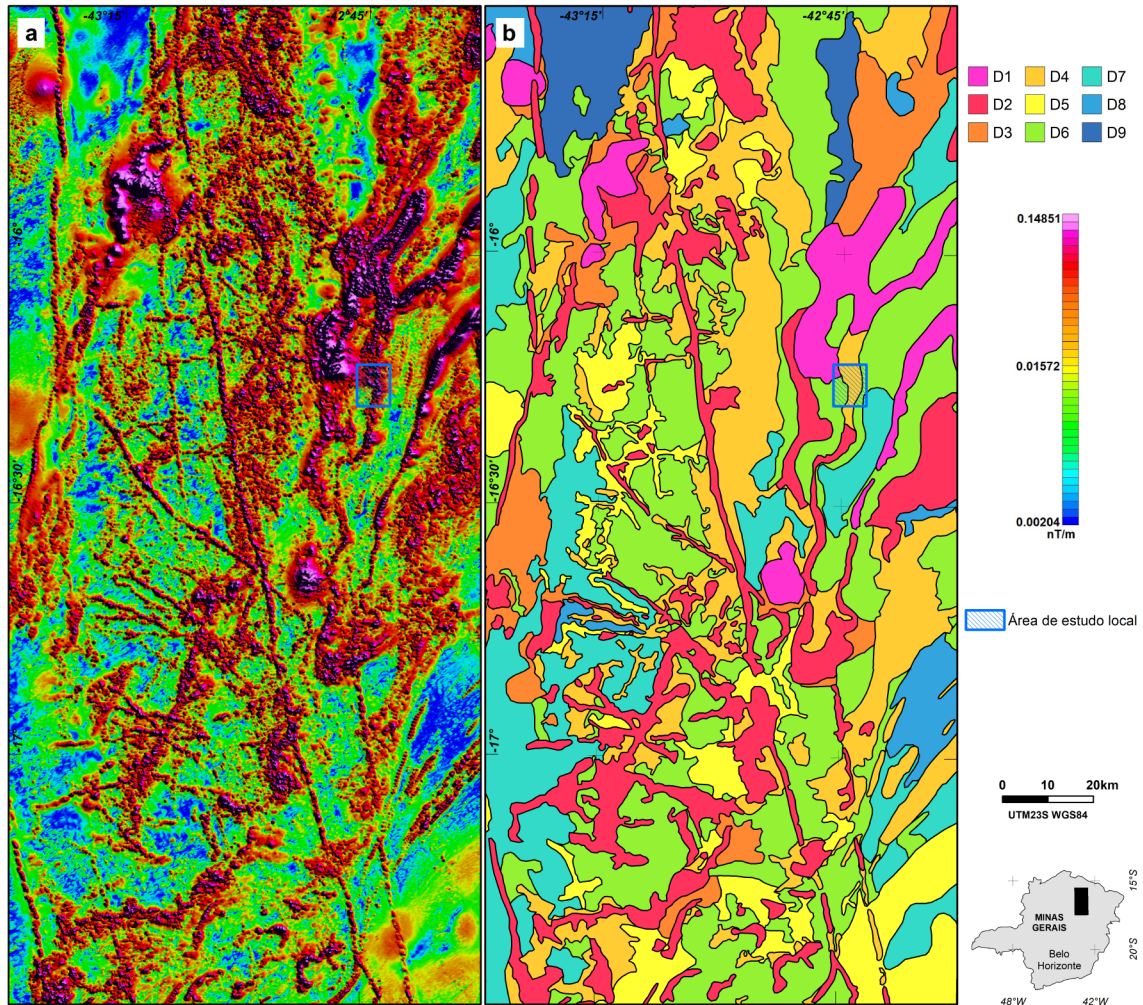


Figura 3.3. a) Gradiente total (GT). b) Domínios magnéticos, definidos por texturas e limites de anomalias, indicando a localização da área de estudo local (em azul).

3.1.1.2 Deconvolução de Euler

O algoritmo de deconvolução Euler 3D (Thompson, 1982) foi executado sobre a área de estudo local com a finalidade de se comparar os resultados calculados das profundidades das fontes magnéticas com os dados de campo e de furos de sondagem executados nessa área pela Sul Americana de Metais S.A. (SAM), empresa que detem os títulos minerários neste local. Foi utilizado o índice estrutural $N=1$, correspondente a corpo planar de duas dimensões, que é o tipo de geometria

esperado para o depósito. O processamento gerou 59 soluções, com profundidades entre 0 e 399 m para as fontes magnéticas, sendo cerca de 60% das soluções para profundidade de até 200 m, e outros 22% para profundidade de até 300 m (Figura 3.4).

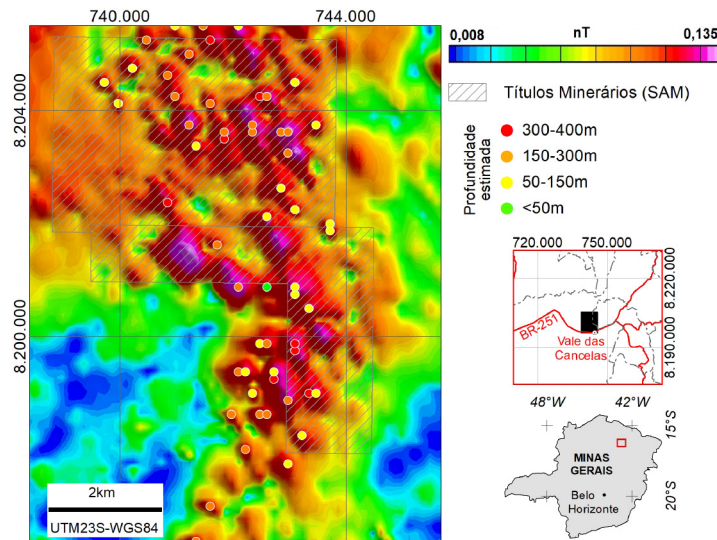


Figura 3.4. Mapa do Gradiente Total associado às soluções Euler para a a área de estudo local, mostrando as áreas de pesquisa da SAM S.A.

3.1.2 Dados gamaespectrométricos

Em regiões onde as rochas apresentam alto grau de intemperismo, as interpretações baseadas em dados gamaespectrométricos podem ser dificultadas pela falta de afloramentos de rocha fresca. Variações nas concentrações de radioelementos nas coberturas lateríticas podem dificultar significativamente ou mesmo impedir o reconhecimento de unidades de rochas subjacentes. No entanto, se os processos de intemperismo local forem bem compreendidos, o levantamento gamaespectrométrico pode ser útil para distinguir unidades litológicas (IAEA, 2003). Na região estudada, solos lateríticos para lateritas bem desenvolvidos geralmente cobrem a maioria dos tipos de rochas, e as chapadas são amplamente sustentadas por lateritas ricas em hidróxidos de ferro e materiais amorfos contendo ferro (Salgado *et al.*, 2019). Embora o conteúdo médio de radioelementos (K, Th, U) medido por gamaespectrometria seja baixo em formações ferríferas (U = 2 ppm, Th = 3 ppm; Boyle, 1982) e nas rochas sedimentares mais comuns (por exemplo, K = 0,6 % em peso, Th = 14,9 ppm e U = 3,6 ppm, em rochas sedimentares químicas; Kileen, 1979), esses elementos podem mostrar concentrações significativamente variáveis em lateritas, solos e rochas intemperizadas. Em solos lateríticos e lateritas, o urânio e o tório tendem a ser adsorvidos por minerais de argila e hidróxidos de ferro, as lateritas

tendem a concentrar altos teores de tório, o urânio pode ser enriquecido nos níveis mais rasos do solo e o potássio, por ser o mais móvel dos três radioelementos, tende a ser eliminado no processo de laterização (Boyle, 1982; Wilford *et al.*, 1997).

Conseqüentemente, o uso de dados gamaespectrométricos neste trabalho leva em consideração o baixo conteúdo geral de isótopos radioativos em lateritas, aplicando mapas de proporções de três canais para refinar interpretações em alvos potencialmente mascarados por coberturas cenozoicas. De fato, as variações nas concentrações de isótopos radioativos podem ser realçadas pelas razões entre os canais K, Th e/ou U. A razão Th/K destaca concentrações anômalas de tório relacionadas a coberturas extensas de laterita em chapadas (Figura 3.5e), porque lateritas podem ter conteúdos relativamente altos de tório em relação ao seu conteúdo de potássio (Boyle, 1982). As razões U/K realçam solos colúvio-eluviais nas bordas da chapada (Figura 3.5f), porque o K é facilmente removido pelos processos de intemperismo, enquanto o urânio pode ser fixado em depósitos ricos em hidróxido de ferro, como os lateritas e os solos lateríticos encontrados na região (Wilford *et al.*, 1997). Mapas para cada um dos canais de potássio (K), tório (eTh) e urânio (eU) (Figuras 3.5a, b e c), a composição ternária (RGB), bem como para as razões U/K e Th/K (Figuras 3.5d, e e f) também são apresentados.

3.1.2.1 Composição ternária K-Th-U e a discriminação de domínios geológicos

O mapa ternário (K-Th-U) realça variações relativas de concentrações dos elementos (IAEA, 2003). A imagem da composição ternária (Figura 3.6a) revela a contribuição de cada elemento, permitindo distinguir domínios gama-espectrométricos (Figura 3.6b), mostrando diferentes proporções desses elementos em domínios litológicos distintos. Vinte domínios são delimitados visualmente após avaliação das proporções de radioelemento, definidas como alta (A), média (M) ou baixa (B), em toda a região estudada. Eles são interpretados através da distinção de cores e combinações de seus tons. Esses domínios são úteis para melhorar a compreensão dos contextos geológicos variáveis na região estudada, sendo indispensáveis para o desenvolvimento do modelo final de favorabilidade. Os domínios traçados estão descritos no 1º artigo (Item 4).

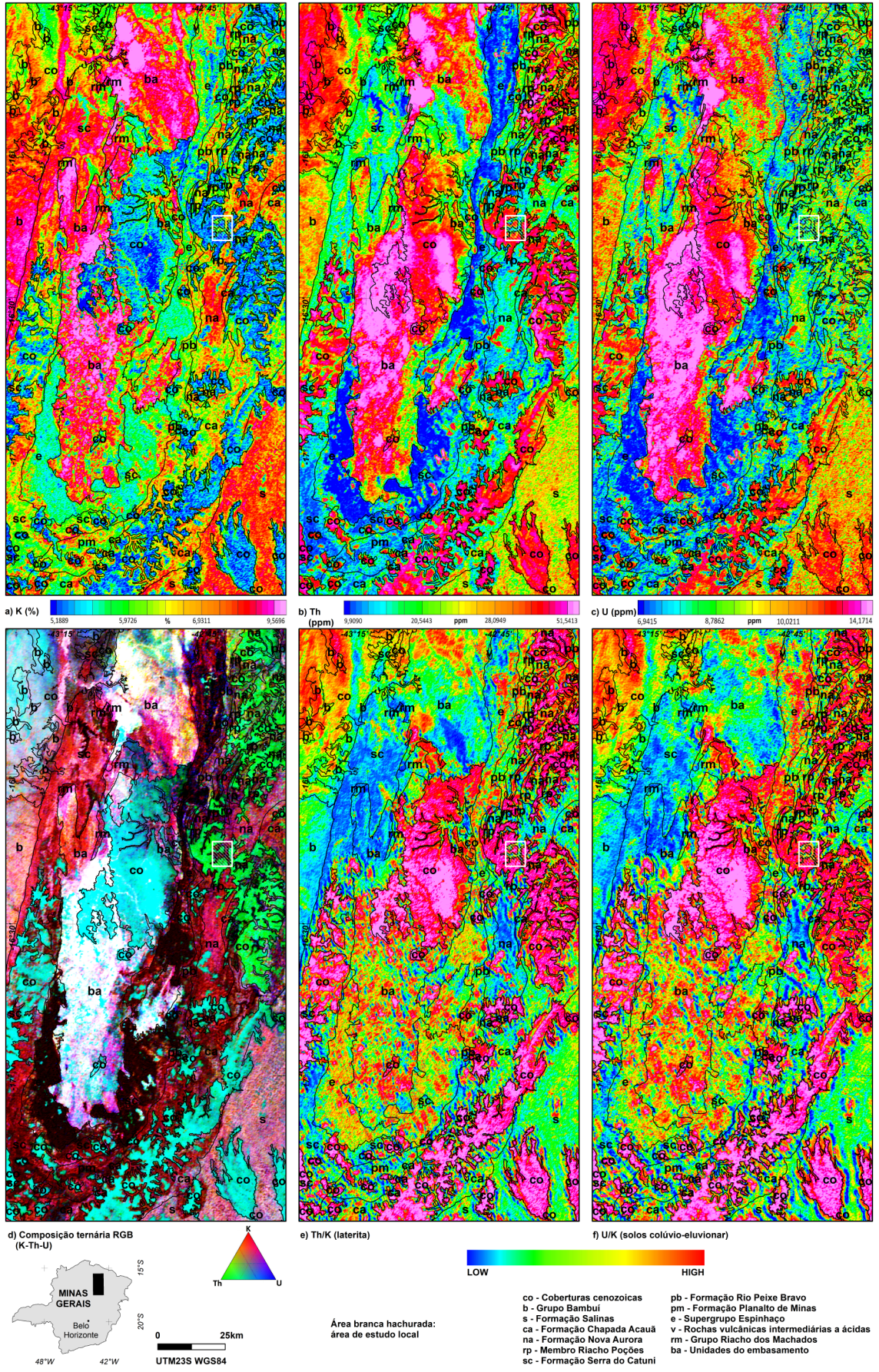


Figura 3.5. Mapas gamaespectrométricos para a região estudada: **a)** K (%); **b)** Th (ppm); **c)** U (ppm); **d)** composição ternária K-Th-U; **e)** razão Th/K; **f)** razão U/K.

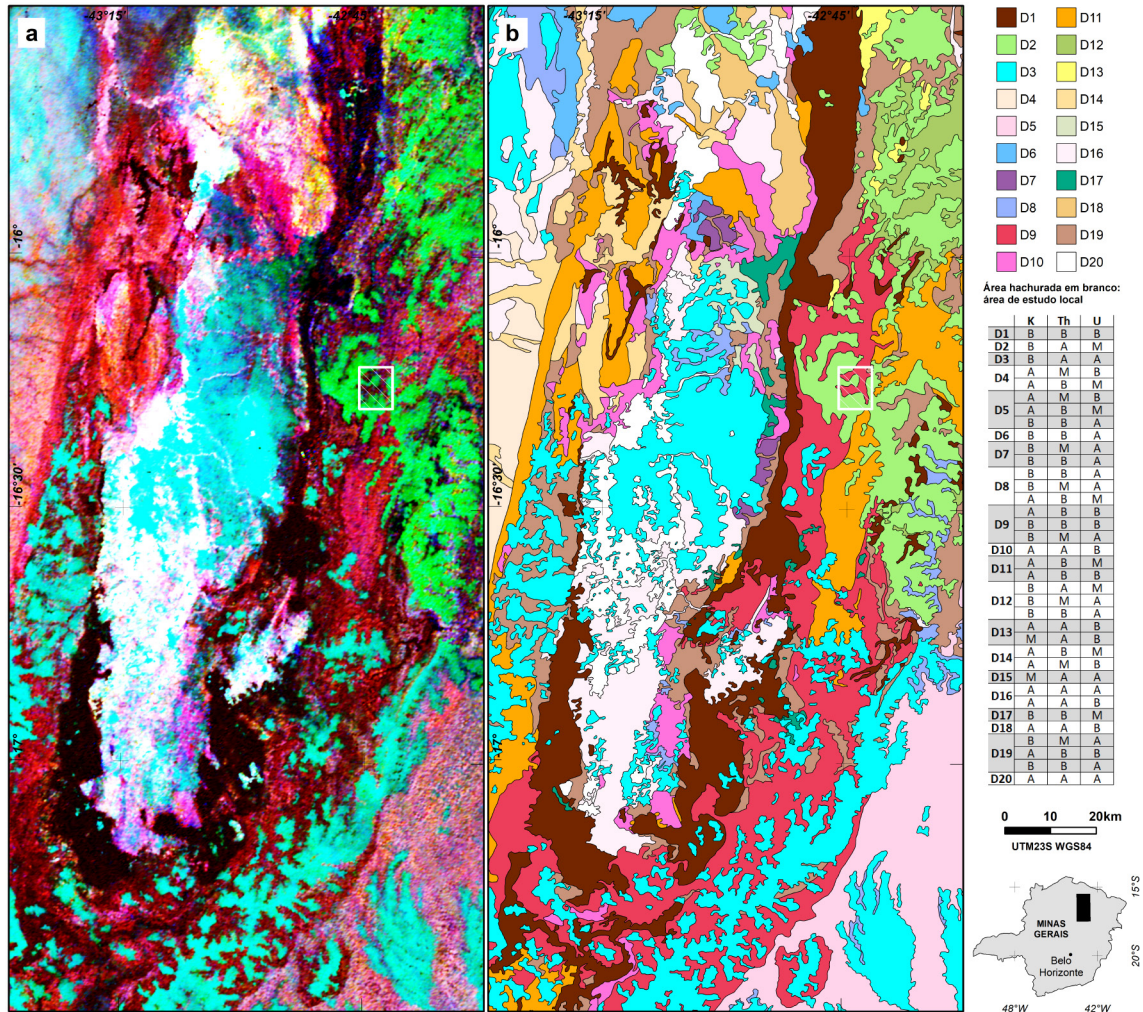


Figura 3.6. a) Composição ternária (RGB) com os canais individuais de K, Th e U. b) Domínios gama-espectrométricos. As concentrações (A; alta, M: média, B: baixa) de radioelementos interpretadas são mostradas na tabela à direita.

3.2 IMAGENS LANDSAT 8

Os dados de sensoriamento remoto têm sido usados extensivamente e com sucesso no mapeamento geológico e na prospecção de ferro. Estudos em regiões áridas mostram melhores resultados (White *et al.*, 1997; Abdelsalam *et al.*, 2000; Feizi & Mansouri, 2013), enquanto que em áreas tropicais a extensa vegetação e a espessa cobertura do solo podem limitar sua aplicação para esses objetivos.

O Landsat 8, o mais recente satélite da série Landsat, carrega uma carga útil de dois sensores, incluindo o Operational Land Imager (OLI). O sensor OLI coleta dados de imagem para 9 bandas espectrais de ondas curtas em uma faixa de 190 km, com resolução espacial de 30 m para todas as bandas, exceto para a banda Pan, de 15 m (USGS, 2018). O Operational Land Imager Landsat 8 (OLI; USGS, 2017a, b) tem sido amplamente utilizado para estudos geológicos como mapeamento litológico ou

prospecção mineral (Salem & El Gammal, 2015; Ducart *et al.*, 2016 ; Ourhzig *et al.*, 2019).

Neste estudo, as cenas 217-72 (1 de junho de 2017) e 218-71 e 218-72 (10 de junho de 2017), todas adquiridas durante a estação seca, foram combinadas para obter o melhor mosaico que foi recortado de acordo com os limites da região estudada (Figura 3.7).

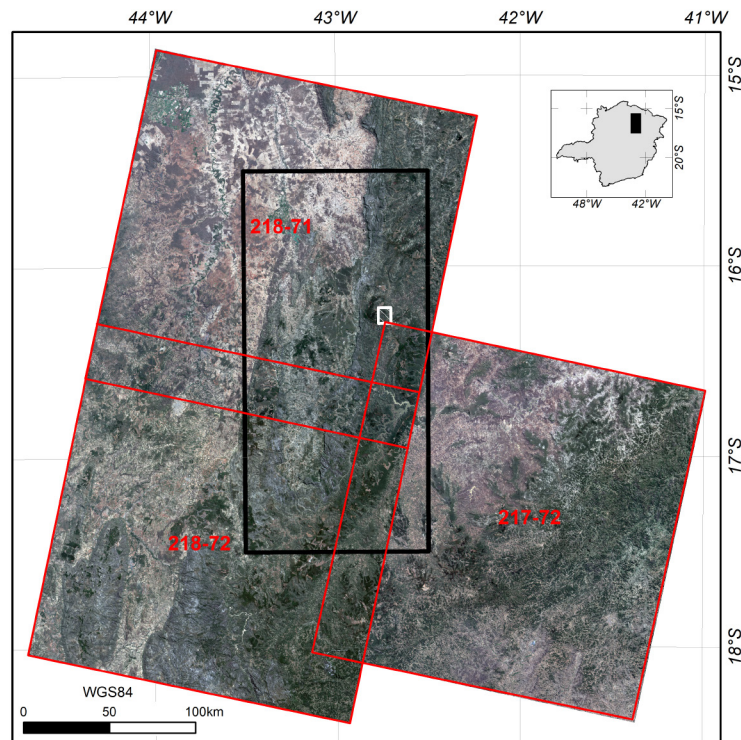


Figura 3.7. Imagens Landsat 8 (banda 4, vermelho; banda 3, verde; e banda 2, azul; (USGS, 2018) cobrindo a região estudada (retângulo preto) e a área de estudo local (retângulo branco).

Entre os produtos gerados pelas técnicas de processamento digital de imagens, foram selecionadas a análise de componentes principais e as operações aritméticas (razões entre bandas). Os resultados do processamento foram analisados e interpretados de acordo com seu potencial de discriminar áreas com rochas ricas em ferro. A resolução espectral deste sensor de satélite, com 11 bandas, é uma característica relevante a ser considerada, uma vez que os íons de ferro possuem importantes propriedades de absorção ao longo do espectro eletromagnético, coincidindo com os intervalos espectrais das bandas do sensor. Isso nos permite definir melhor as áreas com maior concentração de óxido de ferro na superfície, analisando os espectros eletromagnéticos de vários alvos, como a hematita, o campo seco e a vegetação densa, em relação à banda espectral do satélite Landsat (Figura 3.8).

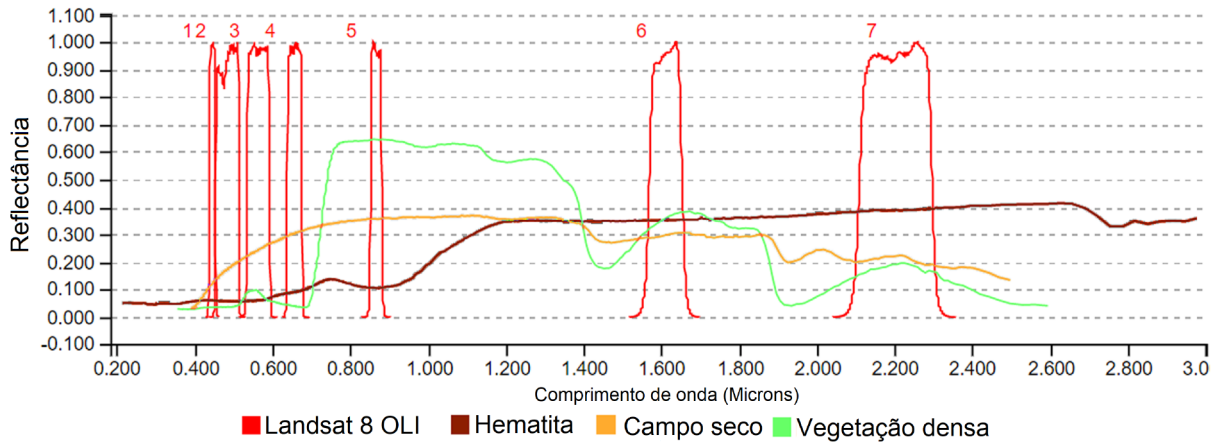


Figura 3.8. Posição das bandas do satélite Landsat 8 em relação ao espectro eletromagnético e as assinaturas espectrais de hematita, campo seco e vegetação densa (USGS, 2019).

3.2.1 Análise por Componente Principal

Pode haver redundância significativa entre imagens espectrais, porque as bandas de imagens multiespectrais freqüentemente exibem altas correlações entre si, eventualmente tornando ineficaz ou mesmo inútil a análise das bandas espectrais originais (Ready & Wintz, 1973; Schowengerdt, 2007). Projetada para remover ou reduzir a redundância espectral, a Análise de Componentes Principais (ACP) resulta da combinação linear dos dados originais e dos vetores próprios em uma base pixel a pixel em toda a imagem, aplicada a imagens correlacionadas, fornecendo um novo conjunto de imagens não correlacionadas (Ready & Wintz, 1973; Lillesand *et al.*, 2004; Jensen, 2005).

Os dados são plotados em um gráfico de dispersão e uma elipse é calculada para limitar os pontos no gráfico de dispersão (Figura 3.9a; ESRI, 2016). O eixo principal da elipse é determinado (Figura 3.9b). Esse eixo mostra a maior variação porque é o maior transecto que pode ser desenhado através da elipse. O eixo principal passa a ser o *novo eixo x*, o primeiro componente principal (PC1). A direção do PC1 é o *vetor próprio* e sua magnitude é o *valor próprio*. O ângulo do eixo x para PC1 é o ângulo de rotação usado na transformação (Figura 3.9b). Uma linha ortogonal perpendicular a PC1 é calculada (Figura 3.9c). Essa linha é o segundo componente principal (PC2) e o *novo eixo y*. O novo eixo descreve a maior variação não descrita por PC1.

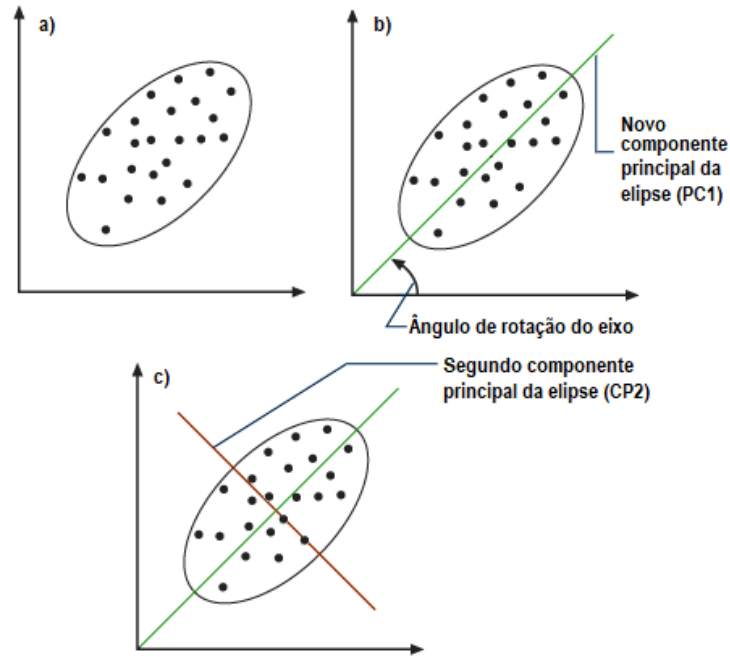


Figura 3.9. Mudança e rotação dos eixos e a transformação dos dados em uma análise por componentes principais, usando uma imagem composta por duas bandas (modificado de ESRI, 2016).

A Análise Seletiva de Componentes Principais (Chavez & Kwarteng, 1989) usa apenas um par de imagens selecionadas para mapear contrastes entre diferentes partes do espectro, com o objetivo de encontrar informações bastante distintas para cada banda e obter evidências únicas de uma banda espectral específica, simplificando as imagens, selecionando as informações desejadas e eliminando a redundância. Para tanto, utiliza-se um par de imagens com correlação moderada (0,7 a 0,98) a baixa (<0,7), e o segundo componente gerado, que é o que traz as informações mais contrastantes, é o adotado (Figura 3.10; Chavez & Kwarteng, 1989). Ao usar apenas duas bandas como entrada, o primeiro componente terá as informações comuns às duas imagens (como sombra topográfica e albedo), enquanto o segundo componente terá as diferenças ou o contraste entre as duas imagens.

Com o objetivo de destacar óxidos e hidróxidos de ferro, a ACP foi aplicada nas bandas 2 e 4 e a ACP com as bandas 6 e 7 foi utilizada para mapear superfícies ricas em argila (Zacchi *et al.*, 2010). Nos dois casos, o segundo componente foi utilizado por ser o mais contrastante (Figura 3.11a,b).

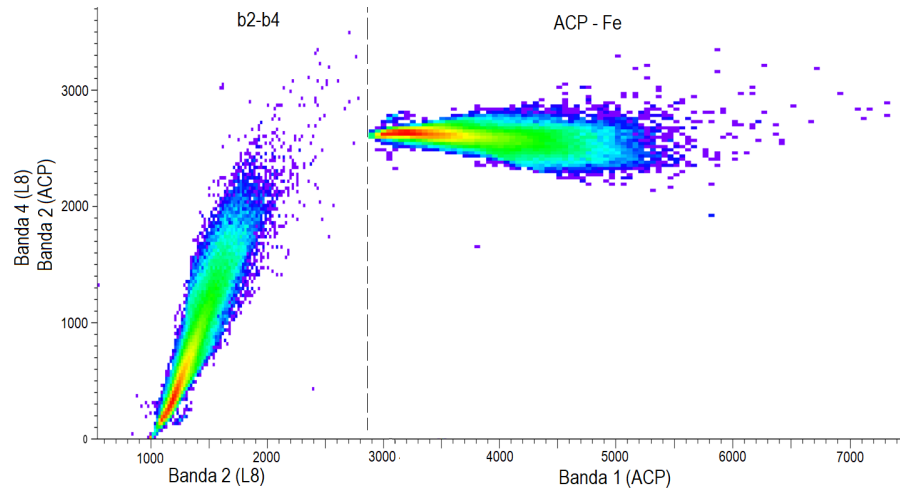


Figura 3.10. Gráficos de correlação entre as bandas 2 e 4 (satélite Landsat 8) e entre as bandas 1 e 2 do resultado da análise por componentes principais dessas duas bandas

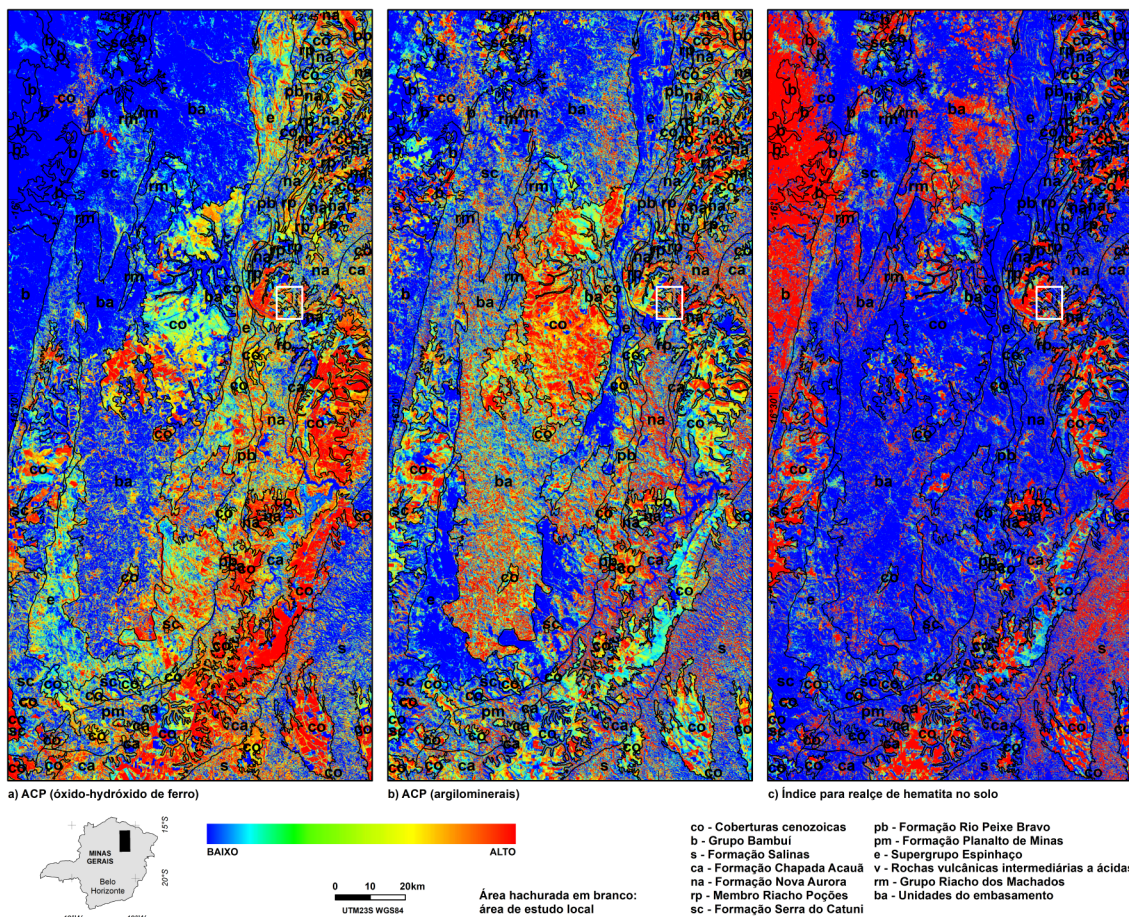


Figura 3.11. Componente principal seletivo aplicado para realçar o (a) óxido-hidróxido de ferro e (b) os minerais argilosos. Índice para realçe de hematita no solo (c).

3.2.2 Índice para realçe de hematita

De acordo com Madeira *et al.* (1997), que trabalhou com índices espectrométricos visíveis baseados no conteúdo de hematita e goethita em solos lateríticos, o índice de vermelhidão geralmente fornece uma boa correlação com o

conteúdo de hematita em lateritas. Este modelo foi aplicado a uma imagem TM Landsat (bandas 1, 2 e 3) para estimar o conteúdo de hematita nos horizontes do solo e corresponde a um índice radiométrico, o índice para realce da hematita (cf. Madeira *et al.*, 1997). A equação adiante fornece o cálculo do índice de realce da hematita em solos (Figura 3.11c), usando as bandas visíveis do sensor do satélite Landsat 8.

$$IH = \frac{(B4)^2}{(B3)^3 \times (B2)}$$

IH = Índice de realce para hematita;

B2, B3, B4 = bandas 2, 3 e 4 (Landsat 8).

3.3 MODELAGEM ESPACIAL - MODELO GUIADO PELO CONHECIMENTO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo para rastrear rochas ricas em ferro em uma região com ocorrências locais de metadiamicritos ferruginosos e formação ferrífera diamicítica que são amplamente ocultos por vastas coberturas que ocorrem sobre as chapadas da região. É baseado em combinações de dados espaciais utilizadas para reduzir interpretações ambíguas que geralmente surgem sempre que a análise é realizada por métodos exclusivamente analógicos. As áreas potenciais foram selecionadas com base no conhecimento prévio e em um conjunto de informações de entrada disponíveis que permitem suas delimitações, atendendo a critérios predefinidos (An *et al.*, 1991; Chung & Fabbri, 1993; Bonham-Carter, 1994; Jensen, 2005; Raines *et al.*, 2010). No entanto, existem modelos distintos apropriados para diferentes objetivos e metas. O modelo booleano envolve a combinação lógica de mapas binários que exibem, cada um, as informações aplicáveis como condição para que as suposições levantadas sejam atingidas (Bonham-Carter, 1994). Por exemplo, a suposição que é ou não favorável à ocorrência de ferro, sendo os valores 1 ou 0 atribuídos a cada classe, respectivamente. Em seguida, um conjunto de mapas é combinado para gerar um resultado expresso em forma binária (0, hipótese não satisfeita; 1, hipótese satisfeita). Por outro método, os mapas do modelo baseado em lógica *Fuzzy* são organizados de acordo com seu grau de pertinência, com valores crescendo continuamente entre 0 e 1, onde 1 é o valor máximo de favorabilidade em relação ao alvo estudado. Este é um modelo adequado para determinar as classes de caracterização quando limites rígidos não podem ser definidos entre conjuntos de dados (An *et al.*, 1991; Bonham-Carter, 1994)

3.3.1 Modelagem dos dados

Os produtos ou camadas geofísicas e de sensoriamento remoto foram reclassificados e combinados usando os operadores de lógica *Fuzzy* para modelagem de dados, de acordo com as seguintes etapas do procedimento aplicadas à região de estudo (Figura 3.12):

- i) Definição de problemas focados no rastreamento de rochas ricas em ferro;
- ii) subdivisão de dados em submodelos, utilizando produtos derivados calculados a partir de dados geofísicos e de sensoriamento remoto (conforme descrito nos itens 3.1 e 3.2);
- iii) determinação de níveis significativos de informação para análise de imagem, usando imagem gradiente total, imagens de razão Th/K e U/K, composição ternária K-Th-U; índice de realce da hematita no solo (IH); e óxido-hidróxido de ferro (ACP-Fe) e argila-minerais (ACP-argila) gerados pela Análise Seletiva de Componentes Principais;
- iv) reclassificação ou transformação de dados em cada nível de informação;
- v) adição ou combinação dos níveis de informação;
- vi) análise e interpretação dos resultados.

A imagem do gradiente total mostra anomalias de alta intensidade magnética e, conseqüentemente, tende a destacar rochas com conteúdo significativo de minerais magnéticos que devem ocorrer na região, como metadiamicictitos ricos em hematita magnética e/ou magnetita (Figura 3.3, Figura 3.4). As razões gamaespectrométricas Th/K (Figura 3.5e) e U/K (Figura 3.5f) realçam as características da superfície relacionadas ao clima, destacando áreas com altas concentrações de Th e U e baixas concentrações de K, relacionadas ao alto teor de hidróxido de ferro nas lateritas. Esses dados, juntamente com os resultados da análise seletiva de componentes principais para óxido-hidróxido de ferro (ACP-Fe, Figura 3.11a) e minerais argilosos (ACP-argila, Figura 3.11b), e o índice para realce de hematita no solo (IH, Figura 3.11c) fornecem uma base sólida para realçar unidades de rochas ricas em ferro e refinar seus traços na superfície, mesmo em grandes chapadas com pouca ou nenhuma exposição de rochas frescas.

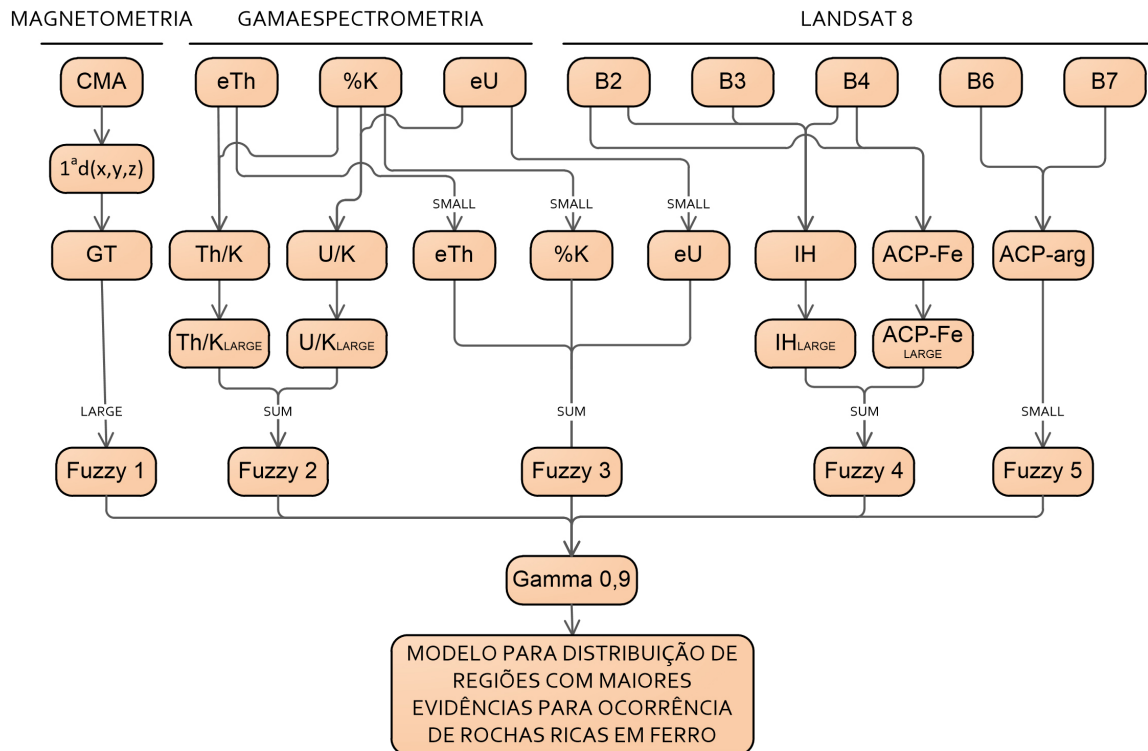


Figura 3.12. Fluxograma de processamento da análise para geração de modelos de distribuição de unidades ricas em ferro, com base no modelo orientado pelo conhecimento, utilizando lógica *Fuzzy*.

Utilizando a lógica *Fuzzy*, os dados selecionados foram reclassificados, transformando seu intervalo de valores em intervalos de 0 (favorabilidade mínima) a 1 (favorabilidade máxima) através do uso das funções *Fuzzy Large* e *Fuzzy Small*. A função *Fuzzy Large* é usada quando os valores mais altos em cada dado correspondem à maior favorabilidade do alvo estudado, enquanto a função *Fuzzy Small* é aplicada se os valores mais baixos em cada dado se referem à maior favorabilidade. O operador *Fuzzy Large* foi aplicado às imagens GT, Th/K, IH e ACP-Fe, enquanto o operador *Fuzzy Small* foi aplicado à ACP-arg e às imagens K%, Th_{ppm} e U_{ppm}; e, então, as imagens K_{SMALL}, Th_{SMALL} e U_{SMALL} foram combinadas usando o operador de soma algébrica *Fuzzy* (Bonham-Carter, 1994), da seguinte maneira:

$$\mu = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$$

μ_i = valor do membro *Fuzzy* para um plano de informação i ;

$i = 1, 2, 3...n$, mapas a serem combinados.

Finalmente, as imagens resultantes foram combinadas de acordo com o operador *Fuzzy gama* (Bonham-Carter, 1994), de acordo com a equação adiante, e mostrado no fluxograma da Figura 3.12.

$$\mu = \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right]^{\gamma} \times \left[\prod_{i=1}^n \mu_i \right]^{1-\gamma}$$

μ_i = valor do membro Fuzzy para um plano de informação i ;
 $i = 1, 2, 3...n$, mapas a serem combinados;
 γ = índice de importância.

O índice de importância γ (gama), variando entre 0 e 1, define a relevância de cada membro do operador. Resultados derivados da aplicação da função *Fuzzy gama* em relação à variação do índice γ , quando uma série de imagens μ_i é combinada (com $i = 1... n$, sendo μ_{\min} e μ_{\max} os valores mínimo e máximo em um ponto), mostram o efeito da variação de γ para a combinação dos valores em um ponto específico. Após a aplicação desse operador, a imagem resultante mostra locais com maior favorabilidade para a ocorrência de rochas ricas em ferro na região de estudo (Figura 3.13, Figura 3.14).

3.4 RESULTADOS

A descrição detalhada dos resultados do processo de desenvolvimento dos modelos e a análise sobre cada uma das áreas estudadas se encontram no 1º e no 2º artigos (Capítulo 4, Capítulo 5)

3.4.1 Área de estudo regional

O modelo apresentado para a área de estudo (Figura 3.13) mostra correspondências consistentes entre os principais locais favoráveis e os dados utilizados para validação, como informações de campo, descrições compiladas da literatura e afloramentos localizados em mapas geológicos. As maiores e mais bem definidas áreas ricas em ferro estão localizadas nas porções leste e centro-sul da região estudada, onde predominam os planaltos com coberturas lateríticas, recobrendo todos os tipos de rochas subjacentes. De fato, essas áreas anômalas de ferro correspondem aproximadamente às maiores concentrações de licenças de prospecção de ferro concedidas pela Agência Nacional de Mineração (ANM - Agência Nacional de Mineração; ANM, 2019). As áreas mais favoráveis para rochas ricas em ferro, indicadas pelo modelo, geralmente cobrem ocorrências conhecidas de metadiamicrito ferruginoso, formação ferrífera diamictítica, quartzito ferruginoso e rochas metavulcânicas básicas do Grupo Macaúbas (Figura 3.13 e,f), que foram descritas em afloramentos e furos (Viveiros *et al.*, 1978; Grossi-Sad *et al.*, 1997; Vilela,

2010; Pedrosa-Soares *et al.*, 2011; Vilela *et al.*, 2014; Souza *et al.*, 2019; e referências nele contidas).

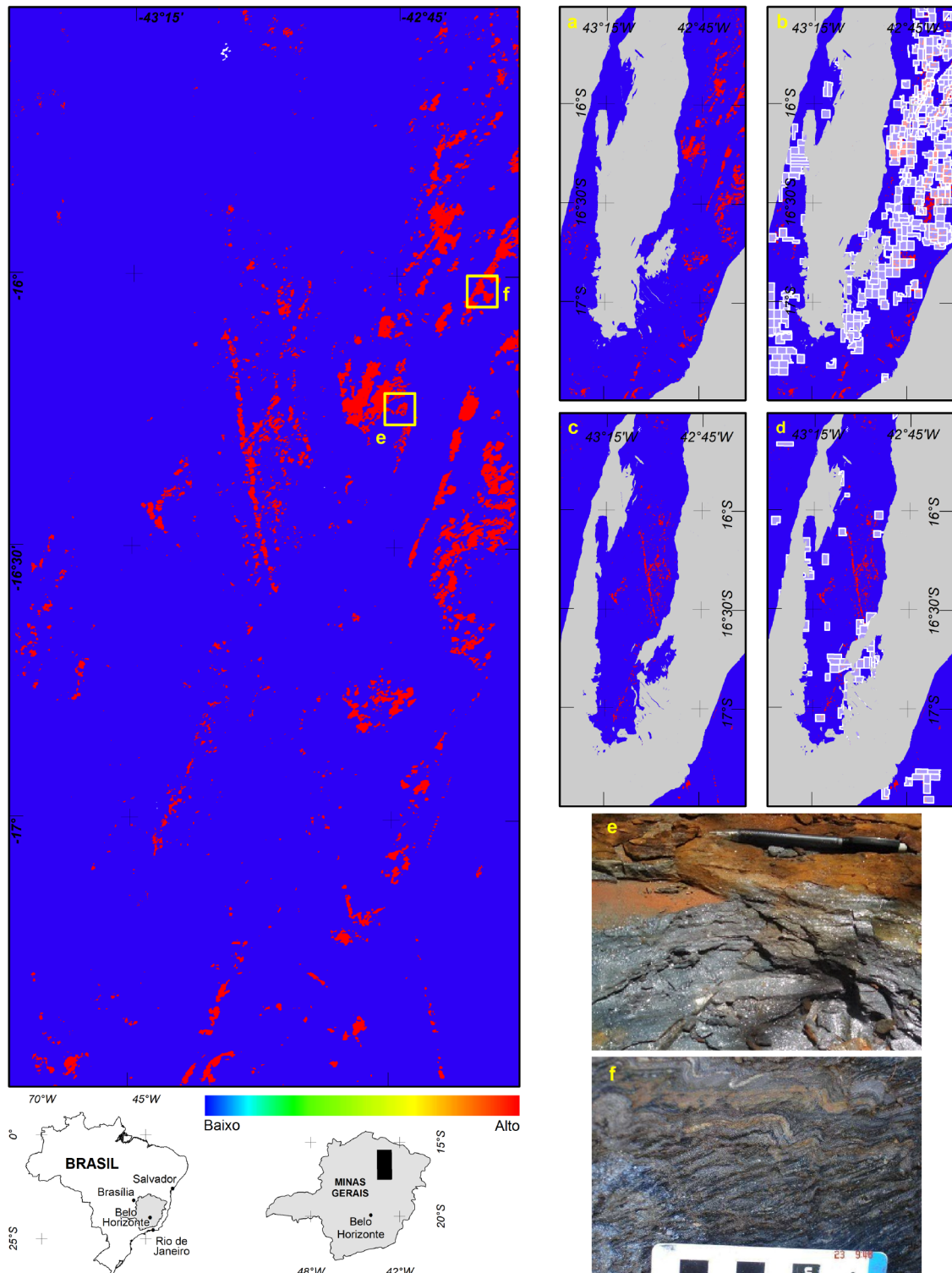


Figura 3.13. Modelo de distribuição de áreas (em vermelho) com maior favorabilidade para ocorrência significativa de rochas ricas em ferro no mapa da região estudada; **a)** e **b)** áreas do Grupo Macaúbas e do Supergrupo Espinhaço (polígonos brancos são áreas legalmente registradas para prospecção de ferro na Agência Nacional de Mineração (cf. ANM, 2019); **c)** e **d)** áreas do Grupo Bambuí, Formação Salinas e Bloco Porteirinha; **e)** e **f)** fotos da formação de ferro diamictítico em exposições de campo (locais indicados no mapa principal do modelo).

A maioria dessas áreas, extensivamente cobertas por laterita sobre chapadas, está provavelmente relacionada ao membro Riacho Poções (Formação Nova Aurora), a unidade mais rica em formação ferrífera diamictítica e diamictito ferruginoso na região estudada (Figura 3.13a, b). Portanto, o modelo fornece uma ferramenta para refinar os modelos de mapeamento geológico e de prospecção no Grupo Macaúbas, especialmente no membro Riacho Poções.

Os locais favoráveis para rochas ricas em ferro no Supergrupo Espinhaço oriental, mais dispersos, estão relacionados a ocorrências de quartzito ferruginoso (Mourão & Grossi Sad, 1997). Áreas favoráveis de forma alongada também ocorrem em áreas desde o sul do Bloco Porteirinha até o Grupo Bambuí, a noroeste da área (Figura 3.13c), sugerindo diques máficos bem marcados no mapa de gradiente total (Figura 2.1). Na porção centro-norte do Bloco Porteirinha, os principais locais favoráveis para rochas ricas em ferro ocorrem no Grupo Riacho dos Machados, que compreende rochas ricas em sulfetos, anfíbolitos e corpos ultramáficos (Figura 3.13c).

3.4.2 Área de estudo local

O modelo apresentado para a área de estudo local (Figura 3.14), assim como para a área de estudo de menor escala, mostra coerência entre os principais locais favoráveis e os dados utilizados para validação, como informações de campo, descrições compiladas da literatura e afloramentos localizados em mapas geológicos, bem como os registros oficiais de licenças para prospecção de ferro da Sul Americana de Metais - SAM nesta área (ANM, 2019).

O modelo se mostrou coerente com mapa geológico cedido pela empresa, que não mostra as coberturas lateríticas (Figura 3.1), assim como também se mostraram coerentes as profundidades estimadas para as fontes magnéticas geradas pela deconvolução de Euler (Figura 3.4), quando comparadas com as espessuras do corpo de minério mostradas nas seções geológicas do mapa geológico elaborado pela SAM (baseadas em furos de sondagem) mostradas na Figura 3.1. Os pontos de controle coletados em campo mostram correspondência entre o modelo e a ocorrência do minério (Figura 3.14).

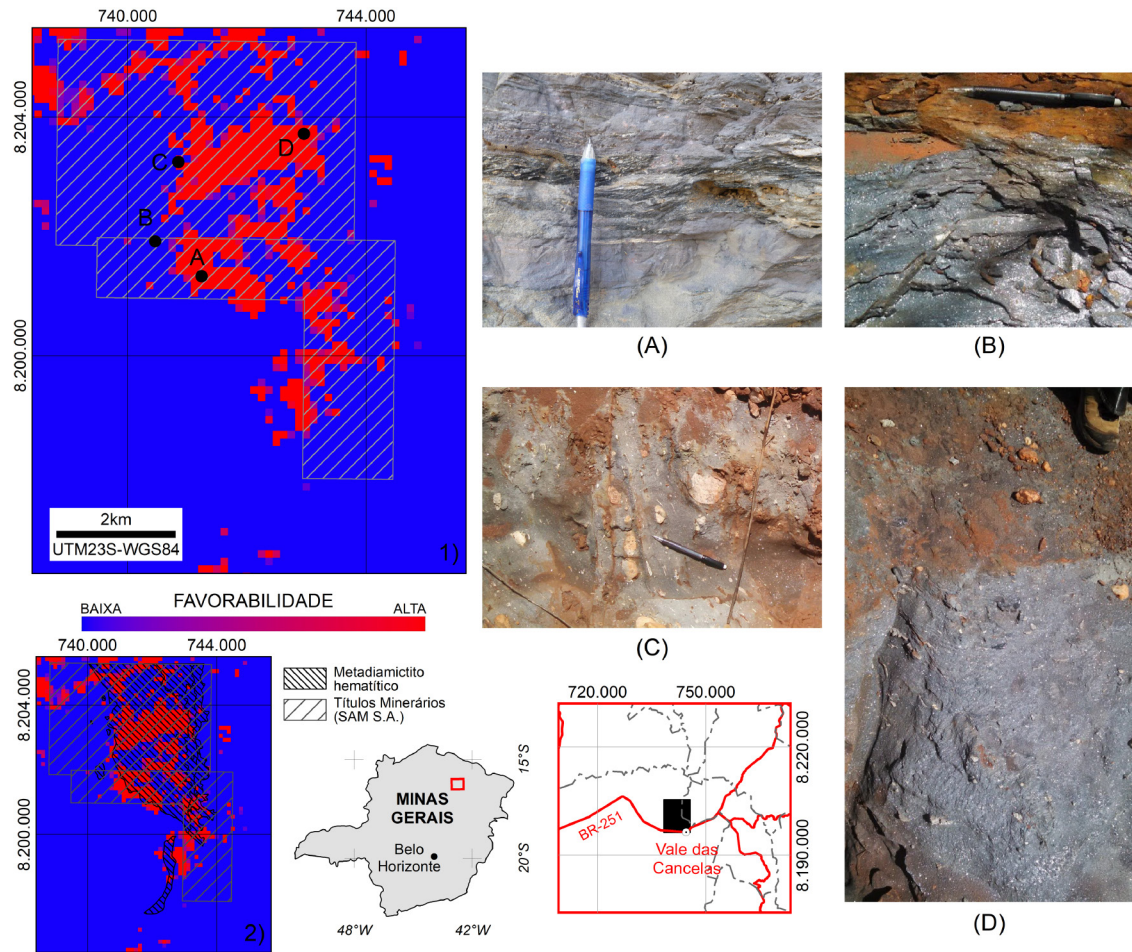


Figura 3.14. Mapa 1) Modelo prospectivo para minério de ferro mostrando áreas com alta favorabilidade à prospecção de minério de ferro, em vermelho, e localização dos afloramentos de metadiamiccito hematítico descritos em campo pontos (A, B - bloco rolado sobre a chapada, C e D). **Mapa 2)** Modelo prospectivo para minério de ferro mostrando as áreas de requerimento de lavra da SAM S.A. (ANM, 2019) e os limites da unidade que contém o minério (modificado de SAM, 2013).

4 1º ARTIGO: TRACKING IRON-RICH ROCKS BENEATH CENOZOIC TABLELANDS: AN INTEGRATION OF GEOLOGICAL, AIRBORNE GEOPHYSICAL AND REMOTE SENSING DATA FROM NORTHERN MINAS GERAIS STATE, SE BRAZIL

Eliane Voll^{1#}, Adalene Moreira Silva^{2}, Antonio Carlos Pedrosa-Soares^{1*}*

¹*Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Geologia, IGC-CPMTC, 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brazil. eliane.voll@gmail.com, pedrosasoares@gmail.com*

²*Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Asa Norte, 70910-900 Brasília, DF, Brazil. adalene@unb.br*

#Corresponding author: Eliane Voll, eliane.voll@gmail.com

**Fellow of the Brazilian Research Council (CNPq)*

4.1 ABSTRACT

Integration of multisource data has been successfully used in geological mapping and mineral exploration projects around the world. In areas covered by extensive regolith, colluvial and/or alluvial deposits, with scarce rock outcrops, the application of airborne geophysics and remote sensing products has become a key tool to unravel the geological framework and lithological units. The integration of all those data files requires the use of geographic information systems (GIS) and spatial analysis techniques. More than 87,200 km of linear-collected airborne geophysics data have been acquired by government companies to subsidize mineral prospecting and geological mapping in northern Minas Gerais State, SE Brazil. Together, geomorphological, geological and geophysical data outline distinct domains on the studied region. The eastern domain shows large tablelands (plateaus) sustained by metadiamictite-quartzite-rich units of the Neoproterozoic Macaúbas Group and related glaciogenic iron deposits, like those of the Nova Aurora Formation, comprising hematite- and/or magnetite-rich metadiamictites with 10–60 wt% Fe. However, on tablelands, the known Neoproterozoic iron deposits are largely hidden beneath Cenozoic covers, although there are scattered outcrops of iron-rich rocks well-preserved from lateritization, a weathering process that can reach dozens of meters deep in the region. Applying Fuzzy logic methodology, our thematic maps provide great progress to define lithological units and structural trends, supporting new guides to track iron-rich rocks. The favorability maps allow us to suggest new targets, and a prospective model to trace locations and structural trends of iron-anomalous rock units. The regional model shows scattered favorable areas with few high-density concentrations of probable iron-rich rocks or even iron ore deposits. Magnetic data

images disclose the main occurrences of iron-rich rocks, although lacking resolution for more specific studies. Although gamma spectrometry and Landsat 8 data only reflect responses from surface materials, they may reduce information ambiguity after integrated with magnetic data on areas covered by laterites richer in iron. Our final integrated models constrain the most favorable areas for the occurrence of iron-rich rocks, even in the large tableland domains.

Keywords: *Iron formation; glacial ironstone, spatial model, Fuzzy logic; Macaúbas Group.*

4.2 INTRODUCTION

This article presents the main results from a research work aiming to develop an integrated model to track occurrences of iron-rich rocks largely hidden by covers on tableland (plateau) domains. Data geographic integration, involving those from geophysical, geological and remote sensing surveys, has been successfully used to identify occurrences of various mineral assets and to assist geological mapping around the world. Iron, zinc and gold deposits, as well as mafic and ultramafic rocks, are examples of targets to apply data integration methods (Carneiro *et al.*, 2008; Zacchi *et al.*, 2010; Andrade *et al.*, 2014; Motta and Faria Júnior, 2016; Leväniemi *et al.*, 2017). Distinctive target characteristics may make their locations very efficient whilst techniques using Geographic Information Systems (GIS) ease the handling and integration of spatial data for modeling, analysis, and phenomenon interpretation (Bonham-Carter, 1994). Exploration research and prospective modeling on iron-rich rocks have successfully used those methods and techniques (Zacchi *et al.*, 2010; Mario, 2015; Uchoa, 2016). Geological studies on regions lacking outcrops of iron-rich rocks and/or covered by dense vegetation also have efficaciously applied mapping methods using airborne geophysical and remote sensing data with GIS-based spatial analysis (Crósta *et al.*, 1994; Paradella *et al.*, 1997). Airborne geophysical images along with remote sensing provide essential information, making search results more accurate in hard-to-reach areas or with coverings that mask the location of specific rock units and mineral targets.

Aiming to track Precambrian iron-rich rock units over a large region with extensive Cenozoic tablelands (plateaus) in the northern Minas Gerais State, Southeast Brazil, we have applied an integrated approach involving geological, airborne geophysical and remote sensing data. The studied region encompasses

23,630 km², limited by latitude 15°30' S to 17°30' S and longitude 43°30' W to 42°30' W, comprising distinct geomorphological-geological domains of the São Francisco Craton and Araçuaí Orogen (Figure 4.1). The eastern domain comprises large tablelands mainly sustained by metadiamicite-quartzite-rich units of the Macaúbas Group, including the iron-rich (10 – 60 wt% Fe) metadiamicites of the Riacho Poções Member (Viveiros *et al.*, 1978; Grossi-Sad *et al.*, 1997; Vilela, 2010; Pedrosa-Soares *et al.*, 2011; Vilela *et al.*, 2014). Despite their resistance to erosion, the iron-rich rocks are largely hidden beneath Cenozoic covers in tableland domains, showing only scattered outcrops well-preserved from lateritization, a weathering process that can reach dozens of meters deep in the studied region. Indeed, iron tend to be more concentrated in laterites developed over iron-rich rocks than in regional lateritic covers (e.g., Vilela, 2010).

Applying GIS-based processing and integration of geological, airborne geophysical and remote sensing data, and using spatial analysis by knowledge-driven Fuzzy logic methodology, this paper presents the development of a prospective model mainly founded on geographic relations of iron-rich versus iron-poor rocks, aiming to improve the geological mapping resolution and accuracy on the focused region and to assist the creation of prospecting models on the Riacho Poções Member. The presented model also provides further support to trace locations and general trends of other iron-anomalous units of the Macaúbas Group. Magnetic data images disclose the main occurrences of iron-rich rocks, although lacking resolution for more specific studies. Although gammaspectrometry and Landsat 8 data only reflect responses from surface materials, they may reduce information ambiguity after integrated with magnetic data on areas covered by laterites richer in iron. Our final integrated models constrain the most favorable areas for occurrence of iron-rich rocks, even in the large tableland domains.

4.3 GEOLOGICAL SETTING

The focused region covers the central-west and northwestern Araçuaí Orogen and a minor portion of the adjacent São Francisco Craton (Pedrosa-Soares *et al.*, 2001; 2011), presenting the following major lithologic assemblages: i) the Archean-Paleoproterozoic basement and related supracrustal units; ii) units of the Statherian-Mesoproterozoic Espinhaço Supergroup; iii) units of the Neoproterozoic Macaúbas

Group; iv) the Ediacaran Salinas Formation; v) the Bambuí Group covering the São Francisco Craton; and vi) Cenozoic covers on tablelands (Figure 4.1).

The Archean-Paleoproterozoic basement, cropping out in the Porteirinha block, comprises orthogneisses and related metamafic and metaultramafic rocks of the Córrego do Cedro Complex, and Rio Itacambiruçu and Paciência suites, as well as the Catolé granite and Serra Branca syenite (Figure 4.1). Overlying basement orthogneisses, the Riacho dos Machados Group includes micaschists with intercalations of metachert, iron formation, and metaultramafic rocks, as well as sulfide-rich rocks related to gold mineralization (Fonseca, 1993; Guimarães *et al.*, 1997). The Porteirinha block also shows felsic volcanic and subvolcanic rocks probably correlated to the basal Statherian unit (ca. 1.75 Ga) of the Espinhaço Supergroup. This supergroup includes metamorphosed sandstones, conglomerates, pelites, felsic volcanic rocks and basic rocks (Lopes-Silva and Knauer, 2011). The Porteirinha block is a relatively low-relief area surrounded by ridges sustained by quartzite-rich units of the Espinhaço Supergroup and tablelands shaped on the Macaúbas Group (Figure 4.1).

From base to top and west to east, the Macaúbas Group includes the Planalto de Minas and Rio Peixe Bravo formations of the pre-diamictite Tonian succession, and the Cryogenian diamictite-bearing units named Serra do Catuni, Chapada Acauã and Nova Aurora formations (Figure 4.1). The Planalto de Minas Formation, located to the south of the Porteirinha block, includes greenschist (metamorphosed basalt) and magnetite-sericite quartzite, associated with the rift-related mafic volcanism dated around 900 Ma (Souza *et al.*, 2019). The Rio Peixe Bravo Formation comprises a succession of alternating layers of quartzite and phyllite, locally with significant amounts of accessory iron oxides (mostly hematite and minor magnetite), bordering the eastern ridge sustained by the Espinhaço Supergroup. The Serra do Catuni Formation mostly includes massive metadiamictite with minor intercalations of quartzite and rare metasiltite, generally very poor to free in iron oxides and sulfides, covering a very extensive area in the proximal (western) Araçuaí Orogen, along the boundary with the São Francisco Craton (Figure 4.1).

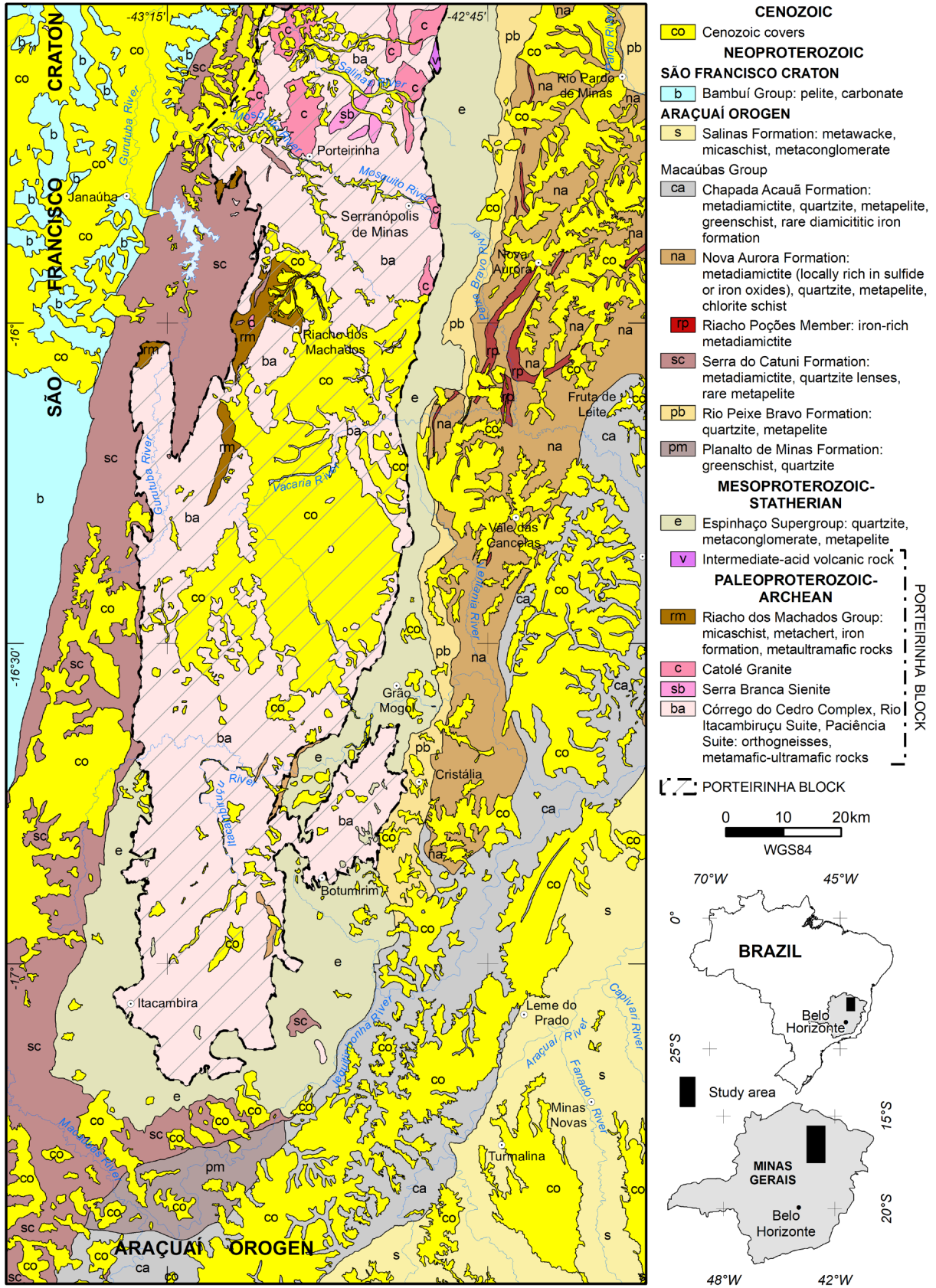


Figure 4.1. Simplified geologic map covering the studied region (compiled and modified from 1:100.000 scale geological maps by Mourão *et al.*, 1997; Mourão and Grossi-Sad, 1997; Roque *et al.*, 1997; Guimarães, 1997; Guimarães *et al.*, 1997; Oliveira *et al.*, 1997; Noce, 1997; Pedrosa-Soares and Grossi-Sad, 1997; all of them from the Projeto Espinhaço; Grossi-Sad *et al.*, 1997).

Further east, to the south of the Porteirinha block, the Serra do Catuni Formation passes laterally and vertically to the Chapada Acauã Formation. This unit comprises, at the base, metadiamicrite intercalated with quartzite and metapelite with rare ferruginous diamicrite, passing upwards to a succession of quartzite and metapelite (Figure 4.1). The Nova Aurora Formation occurs eastward of the Porteirinha block, overlying the Rio Peixe Bravo Formation, to the west, and underlying the Chapada Acauã Formation, to the east (Figure 4.1). The Chapada Acauã and Nova Aurora formations were originally separated one from each other based on their different contents of ferruginous metadiamicrites (Grossi-Sad *et al.*, 1997), but they also represent distinct sedimentary settings in the Macaúbas Basin (Pedrosa-Soares *et al.*, 2011; Babinski *et al.*, 2012). The Nova Aurora Formation includes an iron-poor succession of massive to stratified metadiamicrites with intercalations of graded quartzite and minor metapelite, and an iron-rich unit, the Riacho Poções Member (Viveiros *et al.*, 1978; Vilela *et al.*, 2014). This member is the most important magnetic-stratigraphic datum in the studied region because it mostly encompasses hematite- and/or magnetite-rich metadiamicrites with 10 to 60 wt% total Fe, and even the metadiamicrites richest in hematite show significant magnetic anomalies in outcrops well preserved from laterization. However, the iron-rich metadiamicrites, as well as all other Precambrian rocks, are almost completely hidden by Cenozoic covers on tablelands, precluding their reliable representation on geological maps produced before the airborne geophysical survey (CODEMIG-SEDE-CPRM, 2006) that has unraveled a number of magnetic anomalies suggesting new targets to find iron-rich rocks.

The Salinas Formation includes a succession of metamorphosed wackes, pelites, conglomerates and marls, and very scarce iron-rich rocks related to shear zones. After being considered the distal unit of the Macaúbas Group (Pedrosa-Soares *et al.*, 1992; 1998; 2001; Pedrosa-Soares and Oliveira, 1997), it was redefined as an Ediacaran orogenic basin based on U-Pb ages from detrital zircon grains and volcanic clasts, lithochemical signatures, and tectonic and sedimentological studies (Lima *et al.*, 2002; Santos *et al.*, 2009; Costa *et al.*, 2018; Deluca *et al.*, 2019).

The Bambuí Group, comprising a pelite-carbonate succession mainly deposited in the Late Ediacaran (Warren *et al.*, 2014; Paula-Santos *et al.*, 2015), sustains the low and flat relief with local hills along the eastern margin of the São Francisco Craton in

the studied region (Figure 4.1). The limit between the Bambuí Group and Serra do Catuni Formation is a west-verging thrust front highlighted by the Serra do Catuni ridge, making the boundary between the low and flat relief of the São Francisco Craton, to the west, and the high tablelands sculpted on the Macaúbas Group, to the east.

The covers on tablelands comprise siliciclastic sediments of the Tertiary São Domingos Formation (Pedrosa-Soares, 1997) and Quaternary lateritic elluvium-colluvium deposits (Figure 4.1). The morphology, relief, sediment deposits and height of the tablelands (in Brazilian Portuguese: plural, “chapadas”; singular, “chapada”) are related to the South American geomorphological cycle and Cenozoic neotectonic processes (King, 1956; Saadi and Pedrosa-Soares, 1990; Saadi, 1995). In the studied region, the tablelands are as high as 800 m to 1000 m over sea-level, showing extensive lateritic covers and very rare fresh-rock outcrops. Cliffs and dissecting drainages of tablelands shaped on the Nova Aurora Formation locally display iron-rich metadiamicrites (Mourão *et al.*, 1997; Roque *et al.*, 1997). This geomorphological domain is particularly important to apply the integration of multisource data, aiming to improve geological mapping and iron prospecting models as most iron deposits and occurrences are hidden by thick lateritic covers.

4.4 DATA, APPLIED METHODS AND RESULTS

Geological information on the studied region (Figure 4.1) together with airborne gammaespectrometry and magnetometry data, and orbital sensing data were comprehended, processed, and aggregated, using specific tools in GIS (Geographic Information System) environment. All data cartographic parameters were homogenized and outlined under the Universal Transverse of Mercator Projection, zone 23S, and horizontal datum WGS84. Applying processed models allows enhancing contrasts in-between targets by separating iron-rich bodies, whether they crop out or are hidden beneath tablelands.

4.4.1 Airborne Magnetic and Gamma-ray spectrometric data

The geophysical data are from Area 8 (Minas Novas - Riacho dos Machados - Espinosa) of an airborne survey provided by CODEMIG, a government company of the Minas Gerais State (the “Programa de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais”, CODEMIG-SEDE-CPRM, 2006). This survey includes gammaespectrometric and magnetic signals in high resolution measured along 87,212.45 km, with flight lines

and crosslines spaces ranging between 0.5 km to 10.0 km, and guided directions of N25W and N65E, respectively. The intervals in-between consecutive geophysical measurements were 0.1 s, for magnetometer, and 1.0 s, for spectrometer. The average flying height was 100 m at approximately 280 km/h speed. The accessible magnetic data were partially processed, concerning the required applicable adjustments due to the parallax errors and the removal of daily magnetic variations, the profiles leveling and microleveling, and the removal of the reference data indicated therein by the International Geomagnetic Reference Field (IGRF). Before making accessible the gammaspectrometric data, a succession of procedures were applied, including filtering process, dead time correction, calculation of effective values of flight height with the removal of the aircraft cosmic background and the radon, estimation of skyshining coefficients, and corrections on Compton effects and altimetry. Parallax errors were not detected in the radiometric data provided by CODEMIG-SEDE-CPRM (2006). Forthcoming items describe the sequential procedures applied to generate products derived from the available geophysical data. Total magnetic intensity (TMI) was reduced from the IGRF (Figure 4.2).

4.4.1.1 Magnetic data processing and interpretation

Depending on latitude, magnetic source responses can vary according to related dipolar characteristic and magnetization direction. Magnetic anomaly shapes depend on latitude since magnetic inclinations range from -90° (in the North Magnetic Pole), 0° (in the magnetic equator) to 90° (in the South Magnetic Pole). Even if the source shape is identical, the anomaly shape is different in each latitude (Dentith and Mudge, 2014). To solve this, the pole reduction operator (RTP) can be used by transforming a magnetic anomaly related to the inclined magnetism of a non-polar region into its equivalent polar response where the body magnetism is vertical. However, in low latitudes, magnetic data may generate quality-poor results if reduced-to-pole (Dentith and Mudge, 2014). Accordingly, the Total Gradient (TG) was applied to enhance the magnetic field intensity, because the magnetic inclination varies between low values (-33° and -36° ; NOAA, 2019) in the studied region (latitude $15^\circ30'$ S to $17^\circ30'$ S and longitude $43^\circ30'$ W to $42^\circ30'$ W).

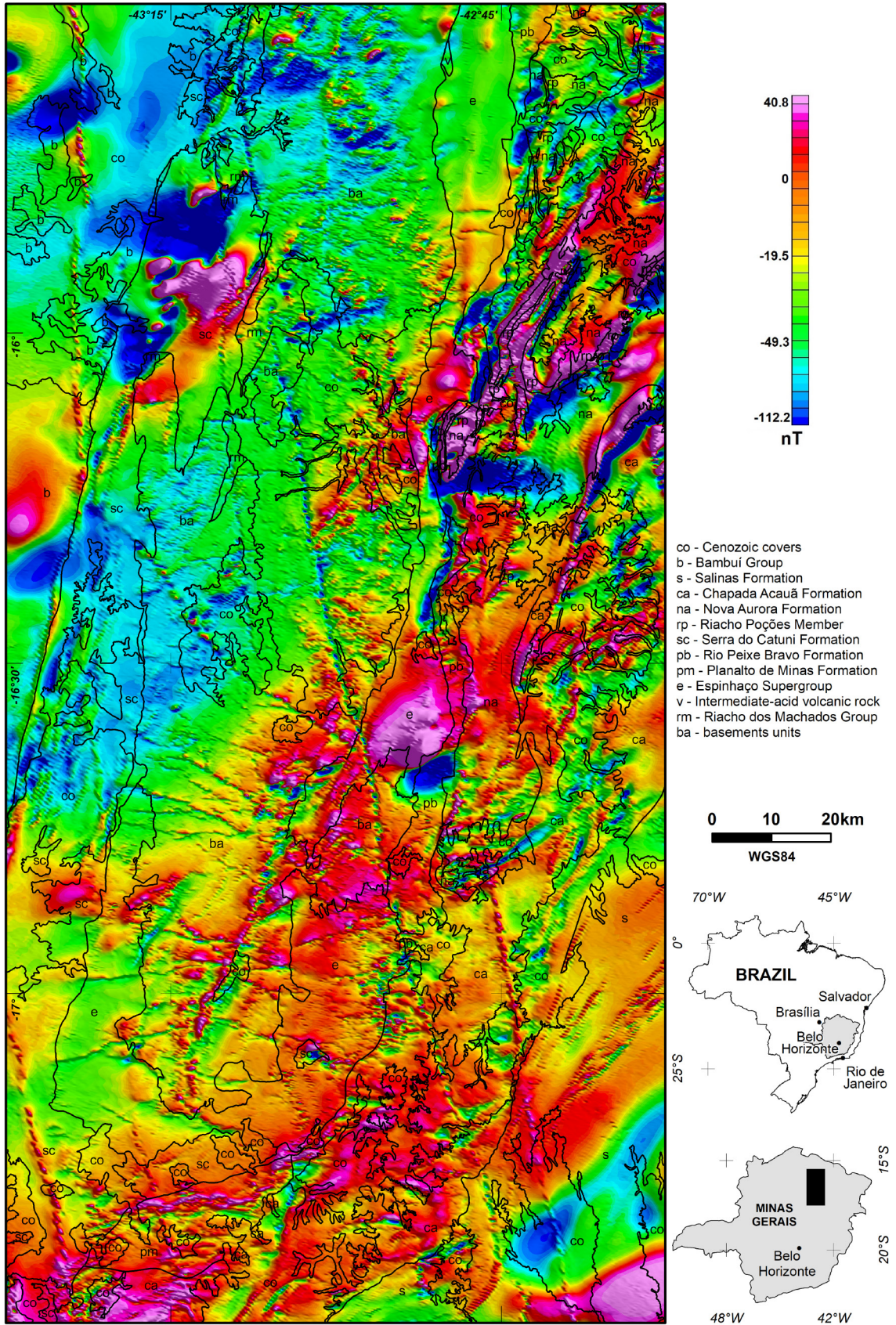


Figure 4.2. Total magnetic intensity (TMI-reduced from IGRF) of the study region.

4.4.1.1.1 Total Gradient (TG)

The Total Gradient was calculated by taking the square root of the sum of the squares of each of the directional first derivatives of the magnetic field, providing results independent from the magnetization inclination and particularly useful at low magnetic latitudes (Dentith and Mudge, 2014). The total gradient calculation results in maximum values at body edges, highlighting positions of relatively narrow bodies (e.g., dikes) and the borders of larger bodies (Dentith and Mudge, 2014). This product helps to sharp the boundaries of magnetic sources (Roest *et al.*, 1992) and define two-dimensional (2D) magnetic domains, highlighting areas with occurrences of iron-rich rocks owing to their high TG intensity values.

Nine magnetic domains (D1 to D9) were delimited using total gradient image, after differentiating textures and boundaries of anomalies (Figure 4.3). D1 domain shows the strongest intensity and the roughest texture, while the D9 domain displays the lowest intensity and the most uniform texture. D1, D2 and D3 domains, which are those with the strongest roughness and intensity, generally encompass areas with previously known occurrences of iron-rich metadiamicrites of the Macaúbas Group, and their probable extensions hidden by Cenozoic covers on tablelands (Figure 4.3). In the eastern sector of the studied region (Figure 4.1), the Macaúbas Group shows iron-rich rocks involved by an intricate tectono-stratigraphic framework, including micaceous and ferruginous quartzites, metadiamicrites with quartz-mica-rich matrix poor in Fe oxides, diamictitic iron formation (total Fe > 15%), ferruginous metadiamicrites, phyllite, and metasilite, which are tightly folded, transposed along shear ductile zones, refolded and cut by late faults and fractures (Viveiros *et al.*, 1978; Grossi-Sad *et al.*, 1997; Vilela *et al.*, 2014). Reflecting that complex framework, the magnetic signatures frequently show poorly defined boundaries in relation to lithostratigraphic units but sharply highlight the Riacho Poçoões Member that mostly comprises diamictitic iron formations and ferruginous metadiamicrites (Figure 4.1). In the Porteirinha block, the D1 and D2 domains roughly represent the Riacho dos Machados Group that includes iron formation, sulfide-bearing metachert, and associated metamafic-ultramafic bodies. The D2 domain, represented by long and narrow anomalies with strong intensity and roughness, like those with NW direction cutting across the studied region, seems to record mafic dikes generally not shown on geological maps and their extensions in the subsurface (Figure 4.3).

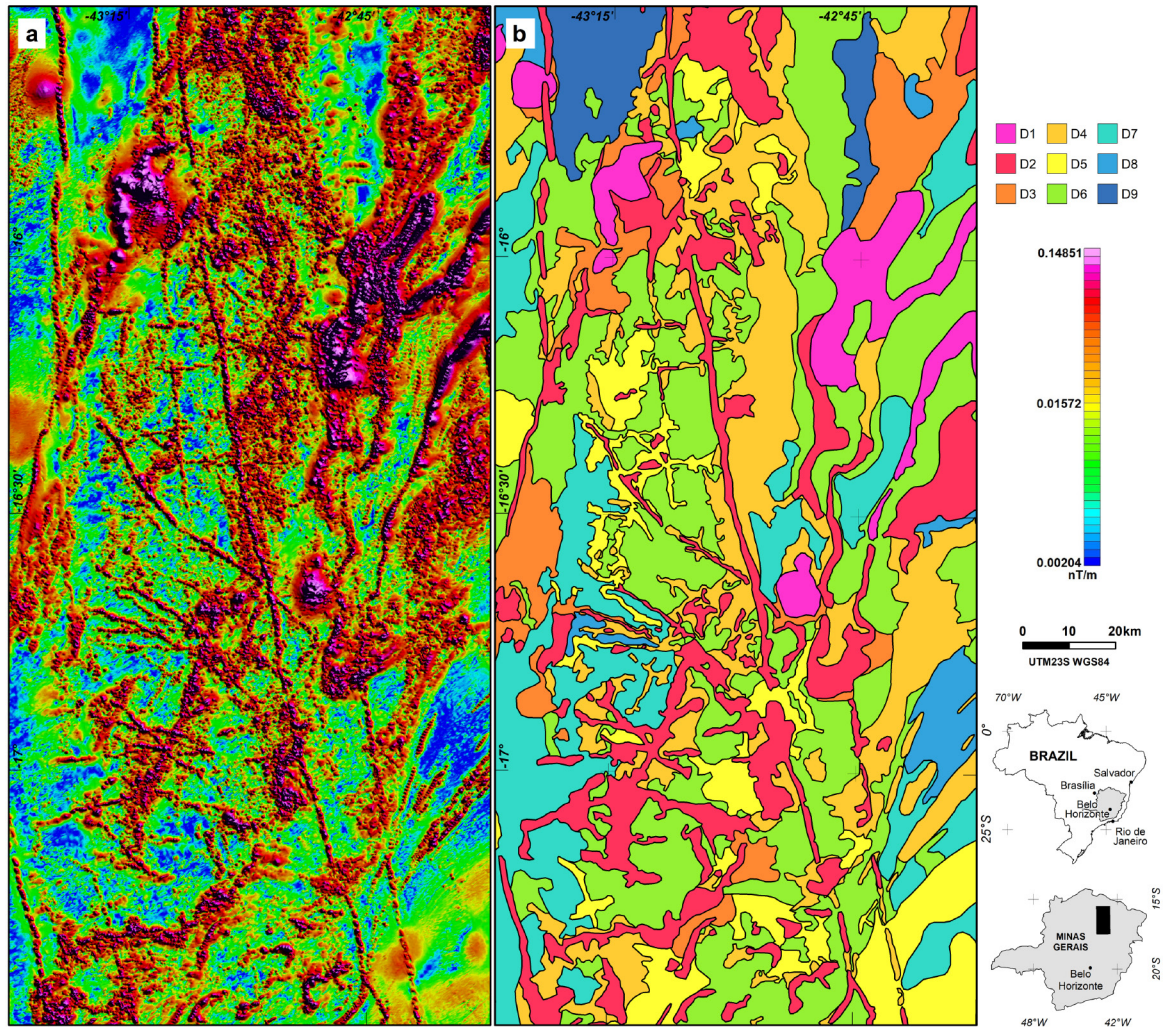


Figure 4.3. a) total gradient (TG). b) magnetic domains, defined by textures and boundaries of anomalies (D1 domain shows the strongest intensity and the roughest texture, whilst D9 domain displays the lowest intensity and the most uniform texture).

The domains with intermediate magnetic intensity and roughness (D4, D5, and D6) occur throughout the Porteirinha block, whilst the domains with weak roughness and magnetic intensity (D7 and D8) appear in its southern portion, reflecting the general lithological composition (orthoquartzites and granites, and very minor amphibolite and metaultramafic rock; Figure 4.3). Along the Espinhaço Supergroup, edging the Porteirinha block, the D6 domain predominates in the eastern and southern segments, while the D7 domain prevails in the west segment, corresponding to areas with intermediate magnetic intensity and roughness (Figure 4.3) that correlate to packages of orthoquartzite and micaceous quartzite, with local intercalations of ferruginous quartzite. Some long and narrow anomalies with strong magnetic intensity and roughness, typical of the D2 domain, suggest mafic dikes cutting across the Espinhaço Supergroup. Domains with low to intermediate roughness and magnetic intensity (D5 to D8) occur over the Salinas Formation, reflecting siliciclastic rocks

(metawacke, micaschist, and metaconglomerate) with no significant iron content. D5 to D9 domains characterize the pelite-carbonate succession of the Bambuí Group, also reflecting an overall lithological composition very poor in magnetic minerals. The Cenozoic covers show no correspondence with magnetic domains because their thicknesses are much smaller than those of the underlying Precambrian rock packages.

4.4.1.2 Gamma-ray spectrometric data processing and interpretation

Interpretations based on gamma-ray spectrometric data from regolith, surficial sedimentary cover and any kind of weathered rocks can be hindered by the lack of fresh-rock outcrops, masking responses from the bedrock. Therefore, variations in radioelement concentrations in lateritic covers can significantly hamper or even prevented the recognition of rock units. However, if the local weathering processes are well-understood, gammaspectrometric surveying can be useful to distinguish lithologic units (IAEA, 2003). As a typical feature of the studied region, lateritic soils to well-developed laterites generally overlay most rock types, and the tablelands are largely covered by laterites rich in iron-hydroxide minerals and iron-bearing amorphous materials (e.g., Salgado *et al.*, 2019). Although the mean contents of radioelements (K, Th, U) measured for gammaspectrometry surveys are low in banded iron formations (U = 2 ppm, Th = 3 ppm; Boyle, 1982) and the most common sedimentary rocks (e.g., K = 0.6 wt%, Th = 14.9 ppm, and U = 3.6 ppm, in chemical sedimentary rocks; Kileen, 1979), those elements may show significantly variable concentrations in laterites, soils, and weathered rocks. In lateritic soils and laterites, uranium and thorium tend to be adsorbed by clay minerals and iron hydroxides, laterites tend to concentrate high contents of thorium, uranium may be enriched in the highest soil levels, and potassium is the most mobile of the three radioelements, tending to be eliminated from common laterites (Boyle, 1982; Wilford *et al.*, 1997).

Accordingly, the use of gammaspectrometric data in the present paper takes into account the general low content of radioactive isotopes in laterites, applying maps of ratios from three channels to refine interpretations on masked targets. In fact, the variations in concentrations of radioactive isotopes may be enhanced by the ratios between K, Th and/or U channels (Figure 4.4).

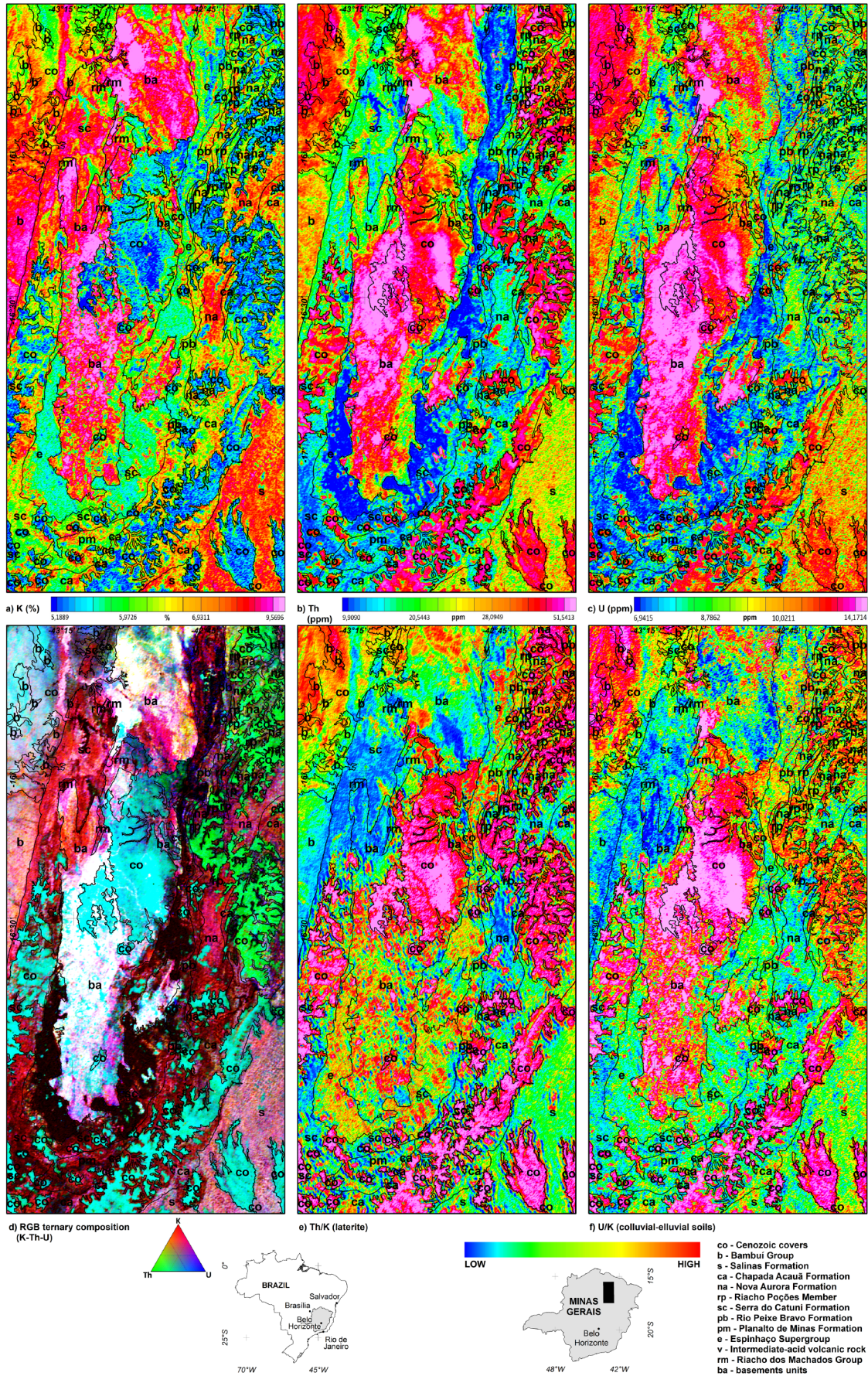


Figure 4.4. Gamma-spectrometric maps (input) for the studied region: a) K (wt%); b) Th (ppm); c) U (ppm); d) K-Th-U ternary composition; e) Th/K ratio; f) U/K ratio.

Hence, the eTh/K ratio highlights anomalous thorium concentrations related to extensive laterite covers on tablelands (Figure 4.4e), because laterites may have relatively high thorium contents (Boyle, 1982). Conversely, laterites generally have very low concentrations of K, a mobile element easily removed by chemical weathering, so that eU/K ratios distinguish colluvial-eluvial soils at tableland edges (Figure 4.4f) because the U content (an element more mobile than thorium) is higher than the K content in those soils. Those sites can be highlighted by the U/K ratio because K is easily removed by weathering processes while uranium may be fixed in iron-hydroxide-rich deposits like the laterites and lateritic soils found in the studied region (Wilford *et al.*, 1997). Maps for total count (TC) and for each one of the channels of potassium (K), thorium (eTh), and uranium (eU) (Figure 4.4a, b, and c), as well as for the U/K and Th/K ratios, and a ternary composition (RGB) with the individual channels of potassium, thorium, and uranium (Figure 4.4d, e, and f) are also presented.

4.4.1.2.1 K-Th-U ternary composition assisting discrimination of geological domains

The ternary (K-Th-U) radioelement map emphasizes relative variations of concentrations (IAEA, 2003). The ternary composition image (Figure 4.5a) unravels the contribution of each element, allowing to distinguish gamma-spectrometric domains (Figure 4.5b) and showing different proportions of these elements in distinct lithological domains. Twenty domains are delimited after evaluating radioelement proportions, defined as high (H), medium (M) or low (L), throughout the studied region. They are represented by distinct colors and combinations of color hues. These domains are useful to improve the understanding on the variable geological contexts in the studied region, being indispensable to develop the final favorability model.

The Porteirinha block (Figure 4.1) mainly comprises the gamma-spectrometric domains D10 (high %K and eU; low eTh) and D20 (high %K, eTh, and eU), with smaller areas showing an interplay of both domains that define the domain 16 (Figure 4.5a, b). Some areas show higher K and Th concentrations (domain 18, with high %K and eTh, low eU; and domain 14, with high %K, low eTh, medium eU; high %K, medium eTh, low eU). Those features are related to granitic rocks of distinct compositions, with relatively high K, Th and U contents, forming predominant lithological units in the Porteirinha block.

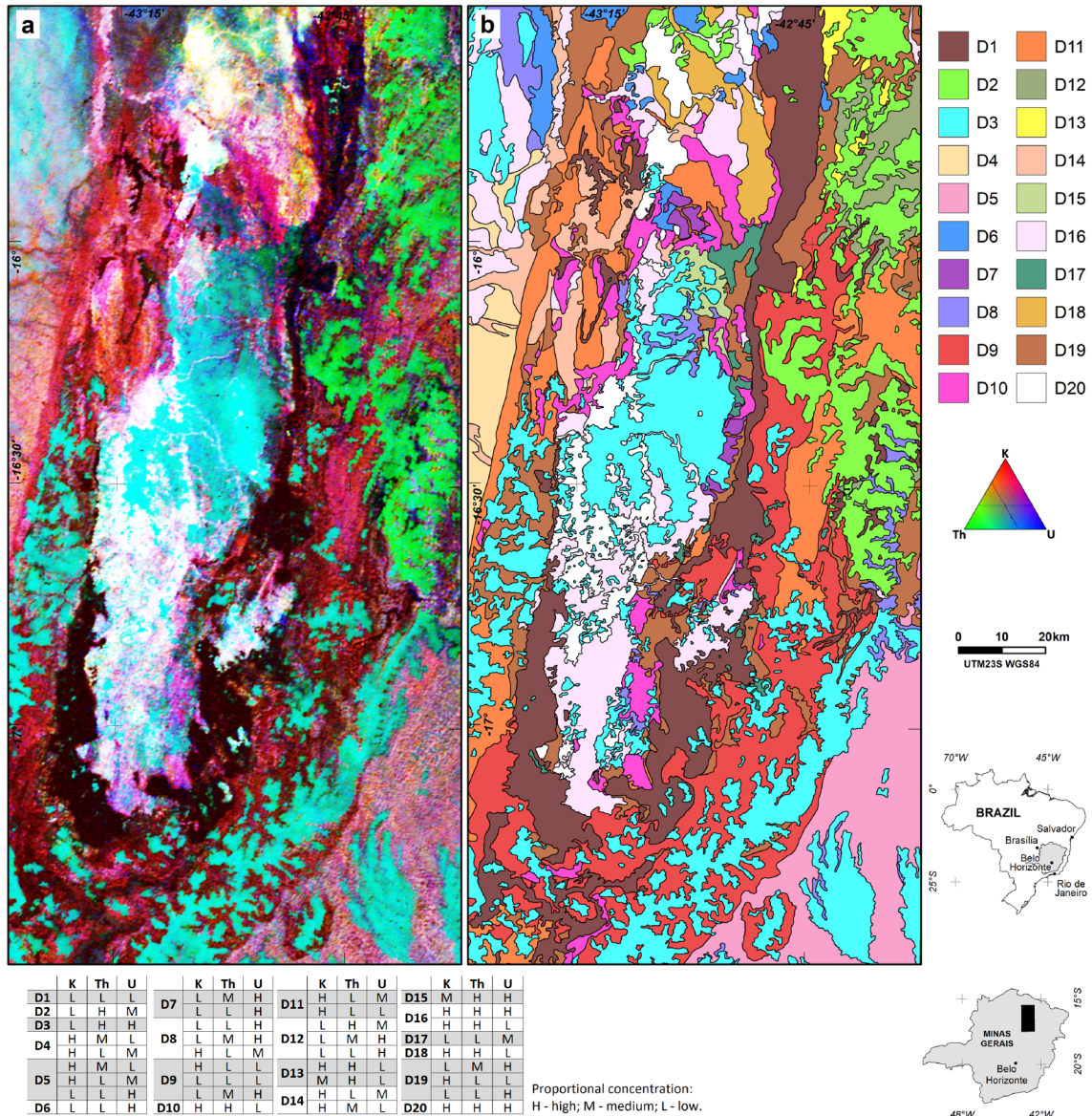


Figure 4.5. a) Ternary composition (RGB) with the individual channels of K, Th, and U. b) Gammaspectrometric domains. The interpreted concentrations of radioelements are shown in the inserted table.

On the Espinhaço Supergroup (Figure 4.1) predominates the domain D1 (low% K, eTh and eU; Figure 4.5a, b), which low gammaspectrometric values reflect the quartzites very poor in heavy minerals (e.g., monazite) and light minerals (e.g., K-felspar and micas).

The Macaúbas Group has a large diversity of rocks (Figure 4.1), implying in a complex interplay of gammaspectrometric domains. Based on visual interpretation, it seems to predominate the domains 11 (high %K, low eU, medium eTh; high eU and %K, low eTh and eU), 9 (high %K, low eTh, and eU; low %K, eTh, and eU; low %K, medium eTh, high eU), and 19 (low %K, medium eTh, high eU; high %K, low eTh, and eU; and low %K and eTh, high eU areas), showing distinct grainy patterns owing to the

lithological diversity of the Macaúbas Group (Figure 4.5a, b). The domain 13 (high %K and eTh; or medium %K, high eTh, low eU) occurs in the northeastern area on the Macaúbas Group, whilst dark spots in domain 1 (low %K, eTh, and eU), in the eastern and southern sectors, correspond to iron-rich rocks (generally very poor in those three radioelements).

On Salinas Formation occurs the domain 5 (high %K, medium eTh, low eU; high %K, low eTh, medium eU; or low %K and eTh, high eU), and the Bambuí Group can be correlated to areas of the domain 4 (high %K, medium eTh, low eU; interplayed with high %K, low eTh, and medium eU; Figures 4.1 and 4.5a,b). On tablelands (Figure 4.1), the eluvial – colluvial covers show the best defined gamma-spectrometric signature in the studied region, recording domains 2 (low %K, high eTh, medium eU) and 3 (low %K, high eTh, and eU; Figure 4.5a, b). Large areas of Cenozoic covers in southern and western sectors of the studied region show similar Th and U concentrations, whilst covers over the northeastern area are richer in thorium. Tableland edges and incipiently eroded areas with relatively low topographic levels in internal parts of plateaus are highlighted by domain 12 (low %K, high eTh, medium eU; low %K, medium eTh, high eU; low %K and eTh, high eU), mainly in the northeast portion of the studied region (Figure 4.5a, b). Domain 12, characterized by the predominance of Th over U but with Th concentration lower than that found on the highest topographic levels of tablelands, can be explained by the partial removal of thorium owing to erosional dissection and weathering leaching along edges and internal lower parts of plateaus. In southwestern and central areas, the domain 8 (low %K and eTh, high eU; low %K, medium eTh, high eU; together with sites of high %K, low eTh, and medium eU; Figure 4.5a, b) shows higher uranium concentration than domain 12. In the northernmost portion of the region, areas with higher uranium concentration relatively to potassium and thorium, like domains 6 (low %K and eTh, high eU), 7 (low %K, medium eTh, high eU; low %K and eTh, high eU) and 15 (medium %K, high eTh and eU), correspond to thin soil covers over the Bambuí Group and Porteirinha block (Figure 4.5a, b).

4.4.2 Landsat 8 satellite images

Remote-sensing data has been extensively and successfully used in geological mapping and iron prospecting. Studies in arid regions show better results (White *et al.*, 1997; Abdelsalam *et al.*, 2000; Feizi and Mansouri, 2013), while in tropical areas the

extensive vegetation and thick soil covers may limit the application of remote sensing for those aims.

Landsat 8, the latest satellite of the Landsat Series, carries a two-sensor payload, including the Operational Land Imager (OLI) and the Thermal Infrared Sensor (TIRS). OLI sensor collects image data for 9 shortwave spectral bands over a 190 km swath with a 30 m spatial resolution for all bands, except the 15 m Pan band (USGS, 2018). The Operational Land Imager Landsat 8 (OLI; USGS, 2017a, b) has been widely used for geological studies such as lithological mapping or mineral prospecting (Zacchi *et al.*, 2010; Salem and El Gammal, 2015; Ducart *et al.*, 2016; Ourhzif *et al.*, 2019).

In this study, the scenes 217-72 (June 1st, 2017), and 218-71 and 218-72 (June 10th, 2017), all of them acquired during the dry season, were combined to get the best mosaic that was, then, clipped on the studied region (Figure 4.6). Among products generated by techniques of digital image processing, there were selected the principal component analysis, arithmetical operations (band ratios) and color composite bands. The processing results were analyzed and interpreted according to their potential to discriminate areas with iron-rich rocks. This satellite sensor's spectral resolution with 11 bands is a relevant feature to be considered, since the iron ions have important absorption properties along the electromagnetic spectrum, coinciding with the spectral intervals of the sensor bands. This allows us to better define areas with higher concentration of iron oxide on the surface by analyzing the electromagnetic spectra of hematite, the dry field, and dense vegetation, in relation to the spectral band of the Landsat satellite (Figure 4.7). This sensor's spectral resolution with 11 bands was important for it to be chosen since the iron ions have important absorption properties along the electromagnetic spectrum, which coincide with the spectral intervals of the sensor bands. The objective was to enhance the regions with a higher concentration of iron oxide on the surface, whilst analyzing the electromagnetic spectra of hematite, the dry field, and the dense vegetation, in relation to the spectral band of the Landsat satellite. (Figure 4.7).

Owing to its 11-band spectral resolution, the Landsat 8 satellite provides different responses across the spectrum making it an essential tool to identify and discriminate among a number of targets. However, redundant information between bands may mask results, hampering to distinguish targets (Chavez and Kwarteng, 1989).

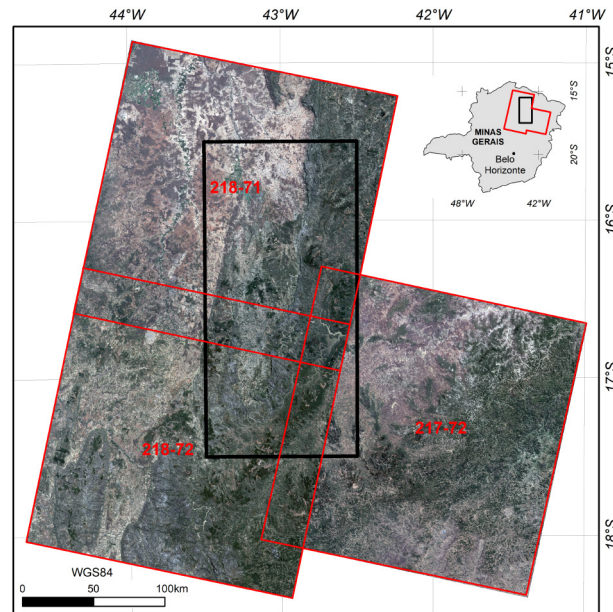


Figure 4.6. Landsat 8 images (true-color image – band 4, red; band 3, green; and band 2, red) covering the studied region (black rectangle).

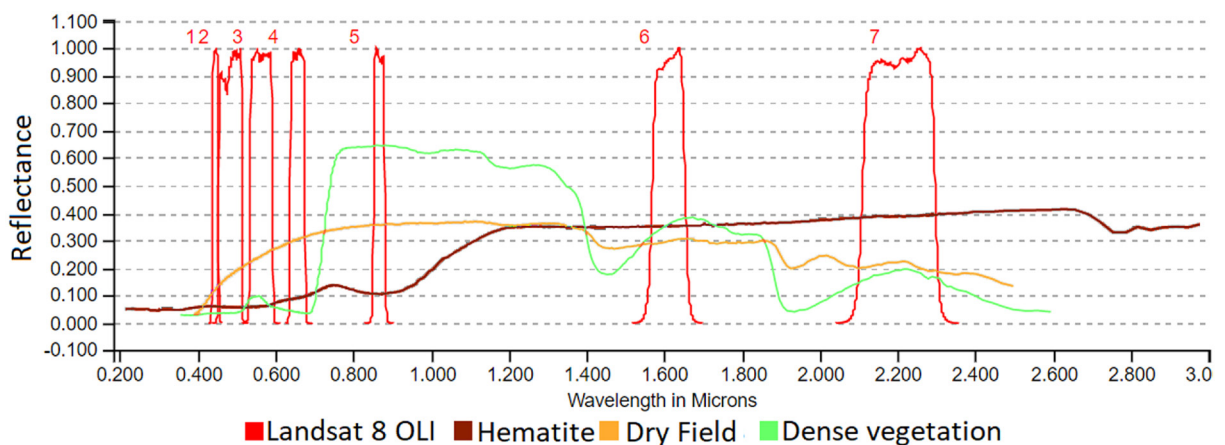


Figure 4.7. Landsat 8 bands in relation to the electromagnetic spectrum, and the hematite, dry field, and dense vegetation spectral signatures (USGS, 2019).

Although on tablelands the Precambrian rocks are extensively hidden beneath lateritic covers rich in iron hydroxides, there are sparse outcrops of iron-rich rocks, like diamictitic iron formation, preserved from lateritization. Therefore, data obtained from remote sensing and Gamma-ray spectrometry allow to refine interpretations from magnetic data, especially on units comprising iron-rich rocks.

4.4.2.1 Principal Component Analysis

Significant redundancy may exist between spectral images because multispectral image bands frequently can exhibit high interband correlations, eventually making ineffectively or even useless the analysis of the original spectral bands (Ready and Wintz, 1973; Schowengerdt, 2007). Designed to remove or reduce

the spectral redundancy, the Principal Component Analysis (PCA) results from the linear combination of the original data and the eigenvectors on a pixel-by-pixel basis throughout the image, applied to correlated images, providing a new set of uncorrelated images (Ready and Wintz, 1973; Lillesand *et al.*, 2004; Jensen, 2005). The Selective Principal Component Analysis (Chavez and Kwarteng, 1989) uses only one pair of the selected images to map spectral contrasts between different parts of the spectrum, aiming to found rather distinctive information for each band and to get unique evidence from a particular spectral band by simplifying images, selecting desired information, and eliminating redundancy. For this purpose, it is utilized a pair of images having a moderate (0.7 to 0.98) to low (< 0.7) correlation, being assumed the second generated component that brings the most contrasting information (Chavez and Kwarteng, 1989). By using only two bands as input, the first component will have the information that is common to both images (as topographic shadow and albedo), while the second component will have the differences or contrast between the two images. Aiming to highlight iron oxides and hydroxides, PCA was applied to bands 2 and 4, and PCA with bands 6 and 7 were used to map clay-rich surfaces (Zacchi *et al.* 2010). In both cases, the second was used because it is the most contrasting component (Figure 4.8a, b).

4.4.2.2 Enhancement Index for hematite

According to Madeira *et al.* (1997), working on visible spectrometric indexes based on hematite and goethite contents in lateritic soils, the redness index generally provides a good correlation with hematite content in laterites. This model has been applied to a TM Landsat image to estimate hematite content in soil horizons, and corresponds to a radiometric index, the enhancement index for hematite (cf. Madeira *et al.*, 1997). Accordingly, the equation ahead provides the calculation of the enhancement index for hematite in soils, using the sensor's visible bands of the Landsat 8 satellite, which results for the studied region are shown in Figure 4.8c.

$$HI = \frac{(B4)^2}{(B3)^3 \times (B2)}$$

HI = enhancement index for hematite;
B2, B3, B4 = bands 2, 3 and 4 (Landsat 8 sensors).

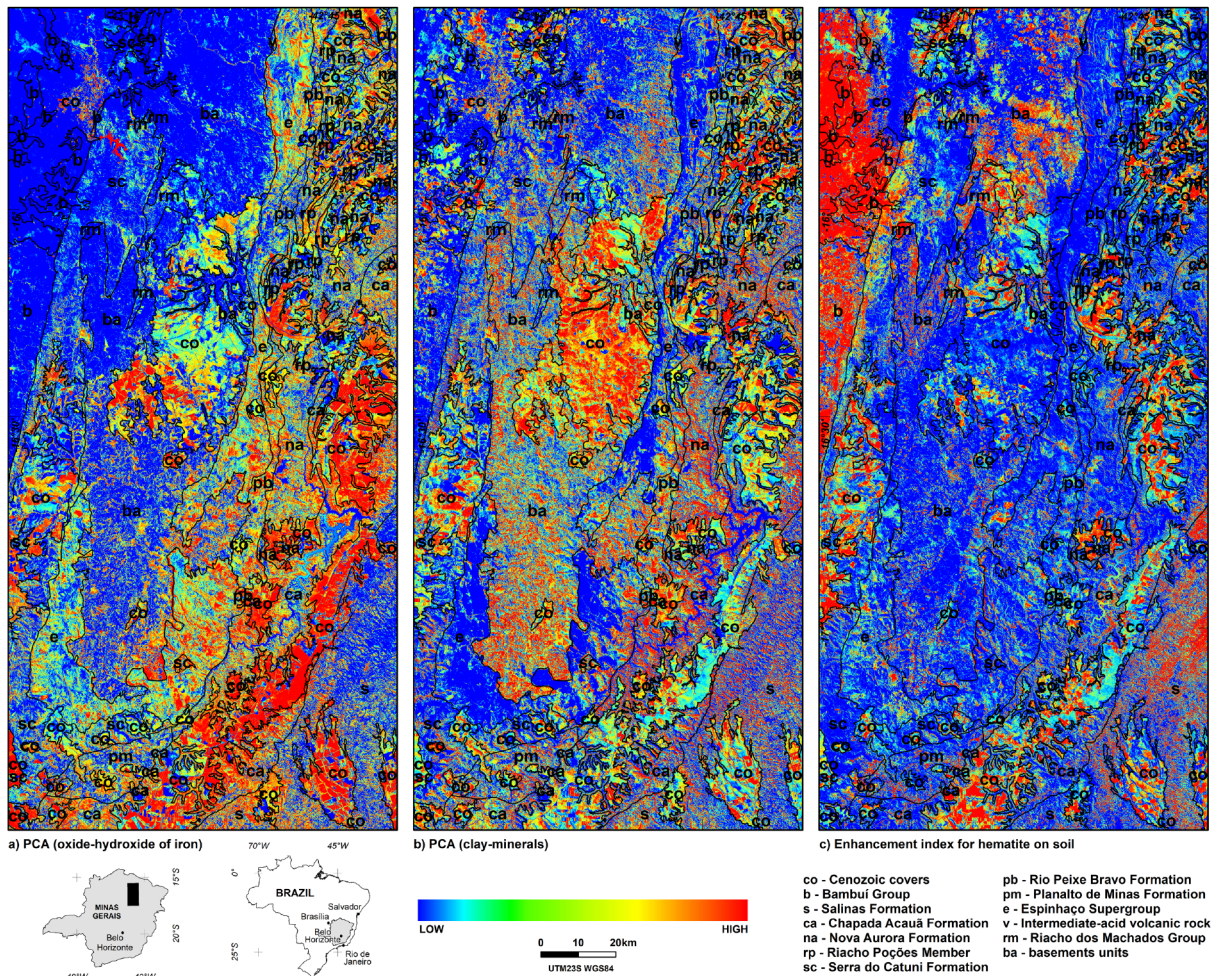


Figure 4.8. Selective Principal Component applied to enhance the (a) oxide-hydroxide of iron and (b) clay-minerals, and the enhancement index for hematite on soil (c).

4.4.3 Spatial Modeling

4.4.3.1 Knowledge-driven model

This work aims to develop a model to unravel lithological units with iron-rich rocks to assist geological mapping and iron prospecting on a region with local occurrences of ferruginous metadiamicrites and diamicritic iron formation that, however, are largely hidden by vast covers over tablelands. It is based on spatial data combinations to reduce ambiguous interpretations that commonly arise whenever the analysis is personally carried on by solely analogic methods. Potential areas were selected in line with the developing model, based on previous knowledge, and on a set of available input information that allow to their delimitations, meeting pre-defined criteria (An *et al.*, 1991; Chung and Fabbri, 1993; Bonham-Carter, 1994; Jensen, 2005; Raines *et al.*, 2010). Nevertheless, there are distinct models appropriate for different aims and targets. The Boolean model involves the logic combination of binary maps

that display, each one, the applicable information as a condition for the raised assumptions to be achieved (Bonham-Carter, 1994); e.g., the assumption that is or not favorable to iron occurrence, being the values 1 or 0 ascribed to each class, respectively. Then, a set of maps is combined to generate an expressed result in binary form (0, non-satisfied hypothesis; 1, satisfied hypothesis). By another method, maps from the Fuzzy logic model are arranged according to their pertinence degree, with values continuously rising between 0 and 1, where 1 is the maximum value of favorability in relation to the studied target. This is a model to determine the adequate characterization classes when rigid limits cannot be defined in-between datasets (An *et al.*, 1991; Bonham-Carter, 1994).

4.4.3.2 Lithologic controls

Geological maps and information from drill holes show that the Serra do Catuni, Nova Aurora and Lower Chapada Acauã formations are rich in metadiamicrites (Figure 1), but only the Nova Aurora Formation includes large amounts of ferruginous metadiamicrites (Viveiros *et al.*, 1978; Vilela, 2010; Pedrosa-Soares *et al.*, 2011; Vilela *et al.*, 2014). The lower unit of the Nova Aurora Formation, called Riacho Poções Member (Viveiros *et al.*, 1978), essentially comprises hematite-rich or magnetite-rich metadiamicrites with minor intercalations of hematite-bearing quartzite and magnetite-bearing phyllite, reaching up to 600 m in thickness (Viveiros *et al.*, 1978; Grossi-Sad *et al.*, 1997; Uhlein *et al.*, 1999), whilst the Nova Aurora Formation as a whole may be as thick as 3 km, despite uncertainties owing to tight folding and thrust faults (Pedrosa-Soares *et al.*, 2011). Primary iron concentration in the diamictitic layers seems to be related to glaciogenic processes, although a possible contribution related to volcanism is not ruled out (Vilela, 2010). A ductile shear zone characterizes the basal contact of the Riacho Poções Member (Vilela, 2010). Along this basal shear zone, there is strong recrystallization of specularite and/or magnetite, reaching up to 60% (by volume) of the matrix of hematite-rich to magnetite-rich metadiamicrite, with coarse-grained (> 1 mm) magnetite porphyroblasts. From the basal contact rich in specularite and/or magnetite upwards, there is a predominance of hematitic metadiamicrite with variable iron content decreasing towards the top (Vilela, 2010). Viveiros *et al.* (1978) interpreted the Riacho Poções Member as only one tightly folded layer exposed in a conjugated syncline – anticline megastructure. Mourão and Grossi Sad (1997) envisaged two main layers of ferruginous diamictite comprising the Riacho Poções Member, one of them forming a

syncline – anticline structure, and the other outlining an isoclinal syncline. However, the Riacho Poções Member is largely hidden beneath covers on the tablelands, and reliable interpretations on its stratigraphy and tectonic structure require data from drill holes and detailed integration data studies, besides surface geological mapping (e.g., Vilela, 2010; Vilela *et al.*, 2014; Voll, 2015).

4.4.3.3. Data modeling

The geophysical and remote sensing products or layers were reclassified and combined by using the Fuzzy logic operators for data modeling, according to the following procedure steps applied to the study region (Figure 4.9):

- Problem definition focused on searching and mapping iron-rich rocks;
- Data subdivision into sub-models, using derivative products calculated from geophysical and remote sensing data (as described in items 4.4.1 and 4.4.2);
- Determining significant levels of information for image analysis, using total gradient image, Th/K and U/K ratio images, K-Th-U ternary composition; enhancement index of hematite in soil (HI); and iron oxide-hydroxide (PCA-Fe) and clay-minerals (PCA-clay) enhanced by Selective Principal Component Analysis;
- Data re-classification or transformation in each information level;
- Addition or combination of the information levels;
- Analysis and interpretation of the results.

The total gradient image shows anomalies of high magnetic intensity and, consequently, tends to highlight rock units with significant contents of magnetic iron minerals expected to occur in the region, like metadiamicrites rich in magnetic hematite and/or magnetite (Figure 4.3). The Th/K (Figure 4.4e) and U/K (Figure 4.4f) gamma-spectrometric images enhance surface features related to weathering, highlighting areas with high concentrations of Th and U, and low concentrations of K, related to the high content of iron hydroxide in laterites (Figure 4.4e, f; Figure 4.5a, b, c). Those data together with results from the selective principal component analysis on iron oxide-hydroxide (PCA-Fe, Figure 4.8a) and clay-minerals (PCA-clay, Figure 4.8b), and the enhanced index of hematite in soil (HI, Figure 4.9c)

provide a solid basis to unravel iron-rich rock units and refine their traces on surface, even over large tablelands lacking fresh-rock exposures.

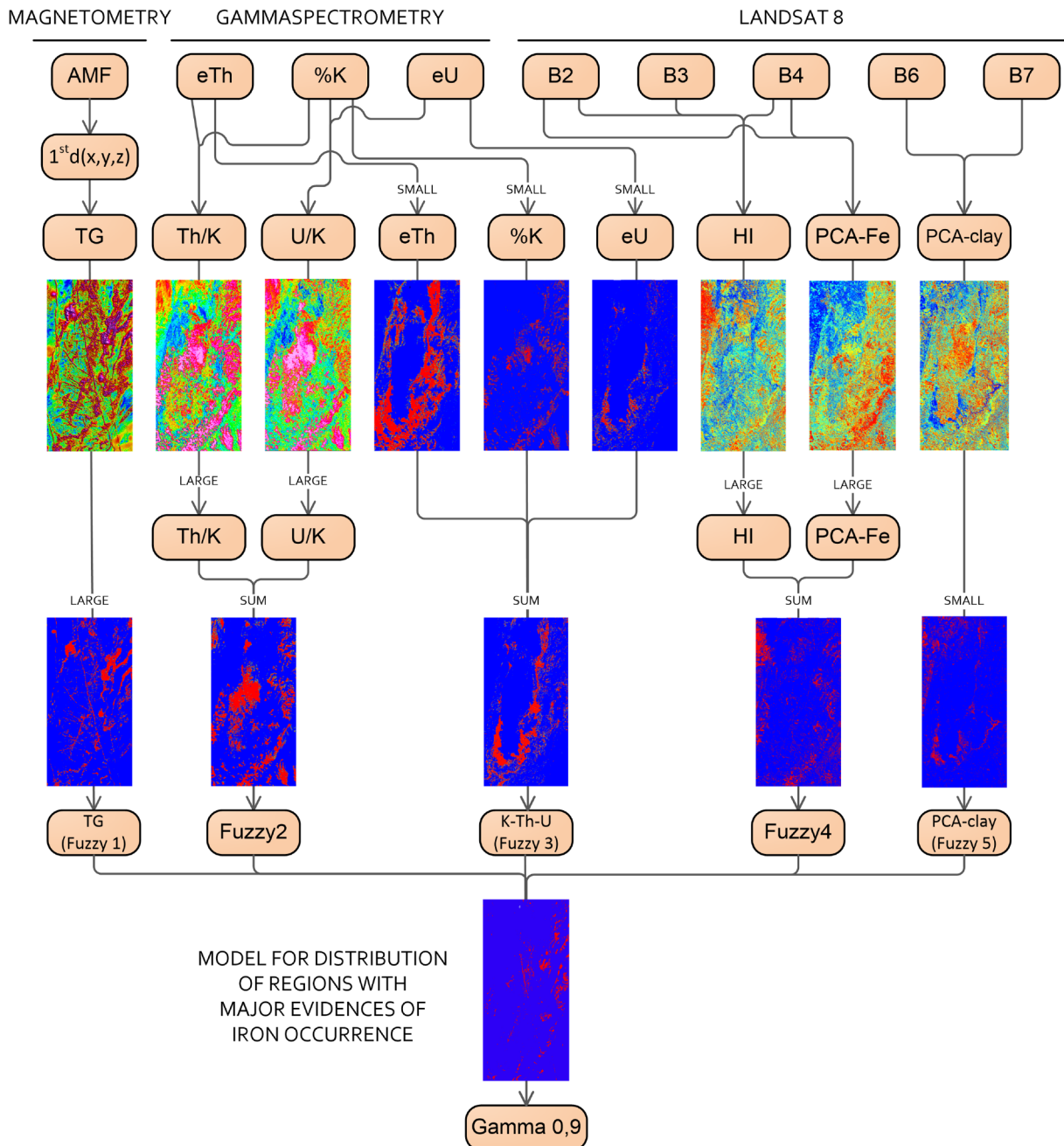


Figure 4.9. Analysis processing flowchart for iron-rich units classification model generation, based on the knowledge-driven model using Fuzzy logic.

Applying Fuzzy logic method, selected data were reclassified by turning their range of values into intervals from 0 (minimum favorability) to 1 (maximum favorability) after using the Fuzzy large and Fuzzy small functions. The large function is used when the highest values in each data correspond to the major favorability of the studied target, while the small function is applied if the lowest values in each data refer to the major favorability. The large operator was applied to the TG, Th/K, HI and PCA-Fe

images, whilst the Fuzzy small operator was applied to the PCA-clay, and to the %K, Th ppm, and U ppm images; and, then, the K_{SMALL} , Th_{SMALL} , and U_{SMALL} images were combined using the Fuzzy algebraical sum operator (Bonham-Carter, 1994), as follows:

$$\mu = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$$

μ_i = Fuzzy membership function for the i -th map;
 $i = 1, 2, 3...n$, the maps to be combined.

Finally, the resulting images were combined in conformity with the Fuzzy gamma operator (Bonham-Carter, 1994), according to the equation ahead, and shown in Figure 4.9.

$$\mu = \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right]^{\gamma} \times \left[\prod_{i=1}^n \mu_i \right]^{1-\gamma}$$

μ_i = Fuzzy membership function for the i -th map;

$i = 1, 2, 3...n$, the maps to be combined;
 γ = index of importance.

The index of importance γ (gamma), varying between 0 and 1, defines the relevance of each operator member (Figure 4.10). Accordingly, the data were modeled to reflect evidence from iron-minerals major favorability (Figure 4.9).

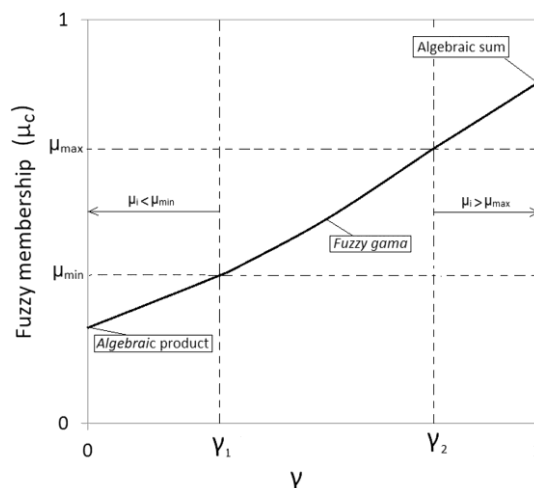


Figure 4.10. Results derived from the Fuzzy gamma function in relation to the index variation γ (see details on text). Modified from Bonham-Carter (1994).

Results derived from the application of the Fuzzy gamma function in relation to index variation γ , when a series of μ_i images are combined (with $i=1...n$, being μ_{min} and μ_{max} are the minimum and maximum values in a specific point), show the variation effect of γ for the combination of the values in a specific point. After applying this

operator, the resulting image shows sites with major favorability for occurrence of iron-rich rocks in the study region (Figure 4.11).

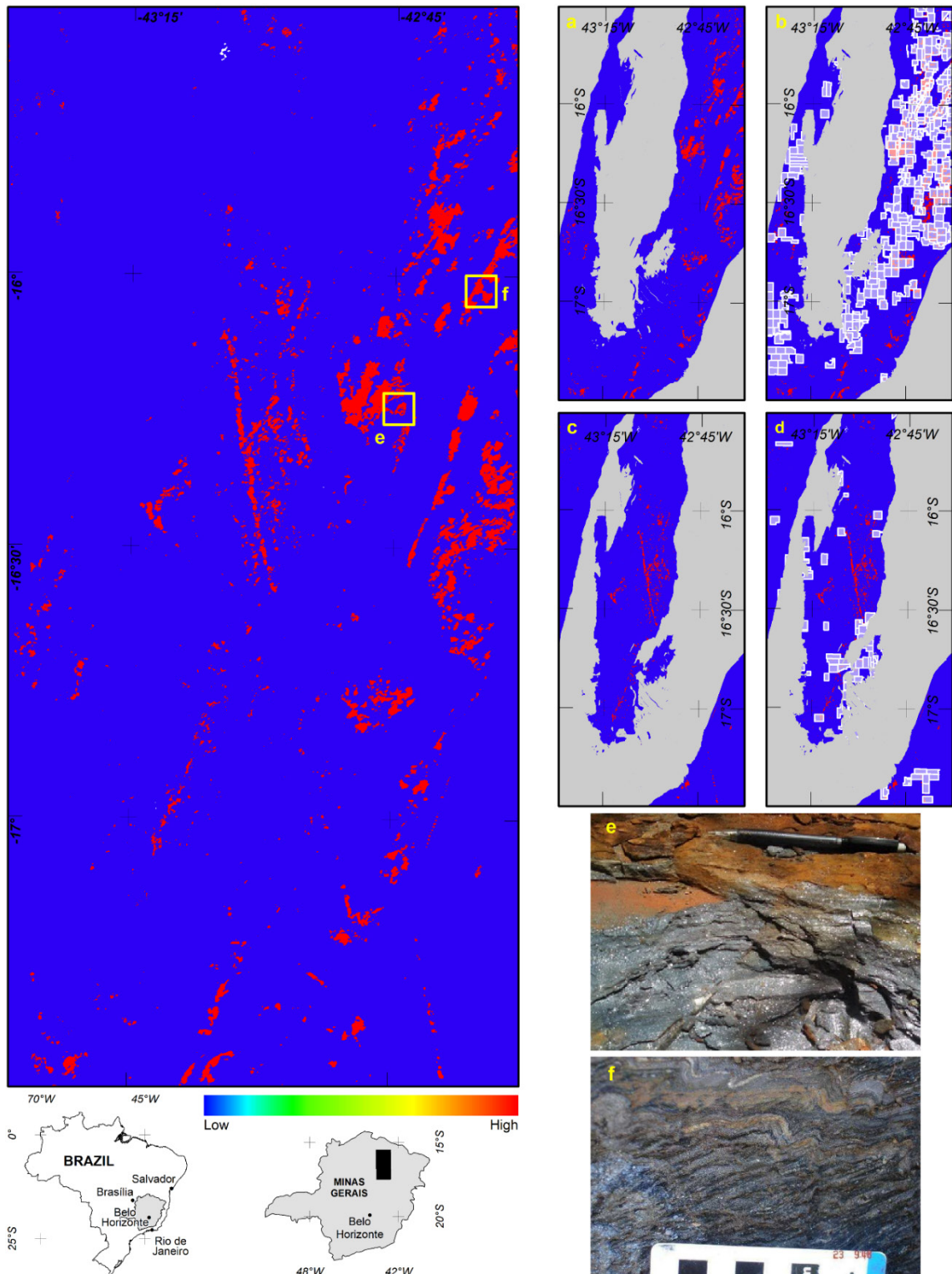


Figure 4.11. Distribution model of areas (in red) with the best favorability for significant occurrence of iron-rich rocks on the studied region map; a) and b) areas on the Macaúbas Group and Espinhaço Supergroup (white polygons are areas legally registered for iron prospecting in the National Mining Agency (cf. DNPM, 2019); c) and d) areas on the Bambuí Group, Salinas Formation, and Porteirinha block; e) and f) photos from diamictitic iron formation in field exposures (locations indicated in the main model map).

4.5 DISCUSSION AND CONCLUSION

Data integration from airborne geophysical survey and remote sensing imagery has been increasingly used to investigate geological targets, especially in regions where surficial covers largely hide fresh rocks and mineral deposits. Geological mapping and mineral prospecting are application areas increasingly improving the use of data integration methods and techniques, offering several options according to distinct aims and needs in relation to available data (Yousefi *et al.*, 2019). As our work mainly aims to track iron-rich rocks hidden by lateritic covers over tablelands, we have generated a number of products based on data from geophysical magnetic and gammaspectrometric airborne surveys, and satellite imagery from Landsat 8. As the magnetic data reveal relatively deep sites with anomalous concentrations of iron-rich rocks, we also have used data from gammaspectrometry and remote sensing to refine the integration products, improving surface outlines over tablelands. The vast extent of lateritic covers can mask the surficial response of iron-rich rocks in gammaspectrometry and Landsat 8 images, as those sensors only collect the response of surface material. However, there are scattered outcrops of iron-rich rocks preserved from lateritization on tablelands, aiding to check the integrations models. In addition, iron hydroxides are usually more concentrated in laterites developed over layers of ferruginous metadiamicrite and diamicritic iron formation. Therefore, the use of gammaspectrometry and remote sensing data, integrated with magnetic data, has revealed to be effective in reducing information ambiguity, because the magnetic data provide information from relatively deeper levels, but by themselves are not sufficient to more reliably delimit the most favorable sites for the occurrence of iron-rich rocks on tableland surfaces.

The products here presented were generated by visual interpretation and digital image processing. After, we selected those that have the best features required to create favorability models, according to the research aim. As the focused problem (i.e., searching iron-rich rocks hidden beneath tablelands largely covered by laterite) hinders the application of rigid boundaries among data classes, we have applied Fuzzy logic to produce knowledge-driven models (Yousefi *et al.*, 2019; Porwal *et al.*, 2015; Porwal *et al.*, 2003; An *et al.*, 1991, Bonham-Carter, 1994). The result is an integrated model displaying the most favorable sites for the occurrence of iron-rich rocks in the studied region (Figure 4.11).

Our final model shows the distribution, size and shape of the most favorable areas for the concentration of iron-rich rocks (Figure 4.11). The largest and best-defined iron-rich areas are located in the eastern and central-southern portions of the studied region, where tablelands with lateritic covers largely predominate, hiding all kinds of subjacent rocks. Indeed, those iron-anomalous areas roughly match with the greater concentrations of iron prospecting permits given by the National Mining Agency (ANM – Agência Nacional de Mineração; DNPM, 2019). Actually, most applications for iron prospecting permit in the studied region were submitted after the geophysical airborne data became available in the 2000's first decade (CODEMIG-SEME-CPRM, 2006), because prospecting areas were selected based almost solely on magnetic anomalies. As expected, the most favorable areas for iron-rich rocks generally cover known occurrences of ferruginous metadiamicite, diamicitic iron formation, ferruginous quartzite and basic metavolcanic rocks of the Macaúbas Group (Figure 4.11e, f), which have been described in outcrops and boreholes (cf. Viveiros *et al.*, 1978; Grossi-Sad *et al.*, 1997; Vilela, 2010; Pedrosa-Soares *et al.*, 2011; Voll, 2015; Vilela *et al.*, 2014; Souza *et al.*, 2019; and references therein). Most of those areas, extensively covered by laterite over tablelands, are much probably related to the Riacho Poções Member (Nova Aurora Formation), the unit richest in diamicitic iron formation and ferruginous diamicite in the studied region (Figure 4.11a, b). Therefore, our model provides a tool to refine the geological mapping and prospecting models on the Macaúbas Group, especially on the Riacho Poções Member.

The scattered favorable sites for iron-rich rocks on the eastern Espinhaço Supergroup are related to occurrences of ferruginous quartzite (Mourão and Grossi Sad, 1997). Iron-favorable elongated sites also occur on areas from the southern Porteirinha block to the Bambuí Group (Figure 4.11c), suggesting mafic dikes that are well marked in the total magnetic gradient map (Figure 4.3). In the central-northern portion of the Porteirinha block, the main favorable sites for iron-rich rocks occur on the Riacho dos Machados Group that comprises sulfide-rich rocks, amphibolite and ultramafic bodies (Figure 4.11c).

The presented model shows consistent correspondences among the main favorable sites for concentrations of iron-rich rocks and the data used for validation, such as field information checked by the authors, compiled descriptions from the literature, and outcrops located on geological maps, as well as official records of iron

prospecting permits. Our data integration shows that even considering the very large tablelands covered by ferruginous laterites, it is possible to identify and delimit favorable sites for concentration of iron-rich rocks beneath those plateaus. Therefore, the presented procedures of data integration and resulting models are useful to improve the resolution and accuracy of geological mapping in the focused region and to assist the creation of more detailed prospecting models applied on the Riacho Poções Member and its extensions hidden by lateritic covers over tablelands. This model can also be applied to several situations in other regions, not only in the study area. As it is knowledge-driven modeling, it can be adapted for various purposes, according to distinct research aims and work needs. It is a model that evolves from the understanding of the phenomenon to be studied, which makes it versatile for many other approaches.

4.6 ACKNOWLEDGMENTS

We are grateful to the Brazilian research and development agencies CNPq (Brazilian Scientific and Technological Council) and CODEMIG-CODEMGE (Company for the Development of Minas Gerais State) for financial support to our research work in the Laboratory of Geological Mapping and Geotectonics (MGD) of the CPMTC Research Centre, UFMG – Federal University of Minas Gerais. The first author acknowledges CAPES for her doctorate scholarship, and the coauthors are grateful to CNPq for their research productivity grants. Our gratitude to Odete Alves Pedrosa for the kind help on a first English version of the original manuscript, to Benjamin J. Drenth and an anonymous reviewer for their comments, corrections, and suggestions that greatly have helped us to improve the former manuscript of this article, and to Reinhardt Fuck for his kind and careful editorial work.

4.7 REFERENCES

- Abdelsalam M.G., Stern R.J., Berhane W.G. 2000. Mapping gossans in arid regions with Landsat TM and SIR-CIX-SAR images: The Beddaho alteration zone in northern Eritrea. *Journal of African Earth Sciences*, **30**(4):903-916. doi: 10.1016/S0899-5362(00)00059-2
- An P., Moon W.M., Rencz A.N. 1991. Application of Fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, **27**(1):1–11.
- Andrade L.B., Silva A.M., Souza Filho C.R. 2014. Nickel prospective modelling using Fuzzy logic on Nova Brasilândia Metasedimentary Belt, Rondônia, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, **32**(3):419-431. doi: 10.22564/rbgf.v32i3.533

- Babinski M., Pedrosa-Soares A.C., Trindade R.I.F., Martins M., Noce C.M., Liu D. 2012. Neoproterozoic glacial deposits from the Araçuaí orogen, Brazil: Age, provenance and correlations with the São Francisco craton and West Congo belt. *Gondwana Research*, **21**:451–465. doi: 10.1016/j.gr.2011.04.008
- Bonham-Carter G.F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Ontario. Pergamon Press. 398 p. ISBN: 0 08 041867 8
- Boyle R.W. (ed.) 1982. *Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits*. Developments in Economic Geology, Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, vol. 16, 498 p. ISBN: 978-0-444-42070-1
- Carneiro C.C., Crósta A.P., Silva A.M., Barros C.E.M. 2008. Identification of mafic-ultramafic rocks using Fuzzy logic classification of airborne geophysical data in the Anapu-Tuerê region, Brazilian Amazon. SPIE 7106, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XII, 710601, Cardiff, United Kingdom, *Proceedings*, **7110**:1-8. doi: 10.1117/12.802135
- Chavez Jr. P.S. and Kwarteng A.Y. 1989. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **55**(3):339-348.
- Chung C.F. and Fabbri A.G. 1993. The representation of geoscience information for data integration. *Natural Resources Research*, **2**(2):122-139. doi: 10.1007/BF02272809
- CODEMIG-SEDE-CPRM. 2006. *Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais, Programa 2005/2006. Área 8: Minas Novas – Riacho dos Machados – Espinosa*. Relatório final do levantamento e processamento de dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Vol. 1 – Texto técnico. Belo Horizonte. 201 p.
- Costa F.G.D., Alkmim F.F., Magalhães P.M. 2018. The Ediacaran Salinas turbidites, Araçuaí Orogen, MG: tectonics and sedimentation interplay in a syn-orogenic basin. *Brazilian Journal of Geology*, **48**(4):783-804. doi: 10.1590/2317-4889201820180020
- Crósta A.P., Bicho C.P., Ferreira J.F.F. 1994. Image processing applied to aerogeophysics: an important tool for geological mapping and exploration in the Brazilian Amazon. 10th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing - *Anais*, San Antonio, Texas, **2**:539-550.
- Deluca C., Pedrosa-Soares A.C., Lima S., Cordani U., Sato K. 2019. Provenance of the Ediacaran Salinas Formation (Araçuaí Orogen, Brazil): Clues from lithochemical data and zircon U-Pb (SHRIMP) ages of volcanic clasts. *Brazilian Journal of Geology*, **49**(2):e20190017. doi: 10.1590/2317-4889201920190017
- Dentith M. and Mudge S.T. 2014. *Electrical and electromagnetic methods*. In: Dentith M. and Mudge S.T. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge University Press pp.235-350. doi: 10.1017/cbo9781139024358.007. ISBN: 9780521809511
- DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. 2019. *SIGMINE - Sistema de Informações Geográficas da Mineração*. <http://www.dnpm.gov.br/>. access in 13/05/2019.
- Ducart D.F., Silva A.M., Toledo C.L.B., Assis L.M. 2016. Mapping iron oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion imagery from the Serra Norte iron deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, **46**(3):331-349. doi: 10.1590/2317-4889201620160023

- Feizi F. and Mansouri E. 2013. Introducing the Iron Potential Zones Using Remote Sensing Studies in South of Qom Province, Iran. *Open Journal of Geology*, **3**(4):278-286. doi: 10.4236/ojg.2013.34032
- Fonseca E. 1993. Depósito aurífero de Riacho dos Machados, norte de Minas Gerais: hidrotermalismo, deformação e mineralização associada. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte, 179 p.
- Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). 1997. *Projeto Espinhaço em CD-ROM*. CODEMIG, Belo Horizonte, 2693 p. and 23 maps.
- Guimarães M.L.V., Grossi Sad J.H., Fonseca E. 1997. *Geologia da Folha Francisco Sá, Minas Gerais*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). *Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos)*. Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 223-313.
- Guimarães M.L.V. 1997. *Geologia da Folha Botumirim, Minas Gerais*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). *Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos)*. Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 543-610.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma-ray spectrometry data*. Viena, 173 pp.
- Jensen J.R. 2005. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. 3rd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 621p. ISBN: 0-13-145361-0
- Kileen PG. 1979. Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration – application and interpretation. *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores*. Geological Survey of Canada, *Economic Geologic Report*, **31**:163–229. doi: 10.4095/106037
- King L.C. 1956. Geomorfologia do Brasil Oriental. *R. Bras. Geogr.*, **18**:147-265.
- Leväniemi H., Hulkki H., Tiainen M. 2017. SOM guided Fuzzy logic prospectivity model for gold in the Häme Belt, southwestern Finland. *Journal of African Earth Sciences*, **128**:72-83. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2016.10.010
- Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. 2004. *Remote Sensing and Image Processing*. 5th ed. John Wiley and Sons. ISBN: 0-471-15227-7
- Lima S.A.A., Martins-Neto M., Pedrosa-Soares A.C., Cordani U.G., Nutman A. 2002. A Formação Salinas na área tipo, NE de Minas Gerais: uma proposta de revisão da estratigrafia da Faixa Araçuaí com base em evidências sedimentares, metamórficas, e idades U–Pb SHRIMP. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(4):491-500. doi: 10.25249/0375-7536.2002324491500
- Lopes-Silva L. and Knauer L.G. 2011. Posicionamento estratigráfico da Formação Bandeirinha na região de Diamantina, Minas Gerais: Grupo Costa Sena ou Supergrupo Espinhaço? *Geonomos*, **19**(2):131-151. doi: 10.18285/geonomos.v19i2.49
- Madeira J.S., Bedidi A., Cervelle B., Pouget M., Flay N. 1997. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: The application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia. *International Journal of Remote Sensing*. **18**(13):2835-2852. doi: 10.1080/014311697217369

- Mario A.F.G. 2015. *Caracterização geofísica e geológica das formações ferríferas do Grupo Macaúbas - MG*. PhD Thesis. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 315 p.
- Motta J.G. and Faria Júnior I.R. 2016. A mineral potential mapping approach for supergene nickel deposits in southwestern São Francisco Craton, Brazil. Uma abordagem de mapeamento de potencial mineral dos depósitos de níquel supérgeno do sudeste do Cráton do São Francisco. *Brazilian Journal of Geology*, **46**(2):261-273. doi: 10.1590/2317-4889201620160021
- Mourão M.A.A. and Grossi Sad J.H. 1997. *Geologia da Folha Padre Carvalho, Minas Gerais*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 315-418.
- Mourão M.A.A., Grossi Sad J.H., Fonseca E. 1997. *Geologia da Folha Janaúba, Minas Gerais*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 9-123.
- Noce C.M. 1997. *Geologia da Folha Itacambira, Minas Gerais*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 853-924.
- Oliveira M.J.R., Grossi Sad J.H., Romano A.W., Lobato L.M. 1997. *Geologia da Folha Grão Mogol, Minas Gerais*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 611-713.
- Ourhzi Z., Algouti A., Algout. A., Hadach F. 2019. Lithological mapping using Landsat 8 OLI and ASTER multispectral data in Imini-Ounilla District south high atlas of Marrakech. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **XLII-2/W13**:1255-1262. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1255-2019
- Paradella W., Bignelli P.A., Veneziani P., Pietsch R.W., Toutin T. 1997. Airborne and spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) integration with Landsat TM and gamma ray spectrometry for geological mapping in a tropical rainforest environment, the Carajás Mineral Province, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, **18**(7):1483-1501. doi: 10.1080/014311697218232
- Paula-Santos G.M., Babinski M., Kuchenbecker M., Caetano-Filho S., Trindade R.I., Pedrosa-Soares A.C., 2015. New evidence of an Ediacaran age for the Bambuí Group in southern São Francisco craton (eastern Brazil) from zircon U–Pb data and isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, **28**(2):702-720. doi: 10.1016/j.gr.2014.07.012
- Pedrosa-Soares A.C. 1997. *Geologia da Folha Araçuaí*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 715-852.
- Pedrosa-Soares A.C. and Grossi-Sad J.H. 1997. *Geologia da Folha Minas Novas, Minas Gerais*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 925-1052.

Pedrosa-Soares A.C. and Oliveira M.J.R. 1997. *Geologia da Folha Salinas*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 419-541.

Pedrosa-Soares A.C., Babinski M., Noce C., Martins M., Queiroga G., Vilela F.T. 2011. The Neoproterozoic Macaúbas Group (Araçuaí orogen, SE Brazil) with emphasis on the diamictite formations. In: Arnaud E., Halverson G. P., Shields-Zhou G. (eds). The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations. *Geological Society of London, Memoir*, **36**(49):523-534. doi: 10.1144/M36.49.

Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Pinto C.P., Wiedemann C., Faria L.F., Achtschin A.B., Aracema L.W., França A.V.M., Daconti B.C., Ferreira D.C. 1998. Da litosfera oceânica ao arco magmático cálcio-alcalino: uma síntese das evidências de subducção-B no Orógeno Araçuaí-Oeste Congo. In: XL Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte. SBG-Núcleo Minas Gerais. *Anais*, p. 19-19.

Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Vidal P., Monteiro R.L.B.P. 1992. Discussão Sobre Novo Modelo Tectônico Para A Faixa Araçuaí. *Revista Escola de Minas-REM*, **45**(1-2):38-49.

Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Wiedemann C.M., Pinto C.P. 2001. The Araçuaí–West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. *Precambrian Research*, **110**:307-323. doi: 10.1016/S0301-9268(01)00174-7

Porwal A., Deb Das R., Chaudhary B., Gonzalez-Alvarez I., Kreuzer O. 2015. Fuzzy inference systems for prospectivity modeling of mineral systems and a case-study for prospectivity mapping of surficial Uranium in Yeelirrie Area, Western Australia. *Ore Geol. Rev.* **71**:839–852. Doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.10.016

Porwal A., Carranza E.J.M., Hale M. 2003. Knowledge-driven and data-driven Fuzzy models for predictive mineral potential mapping. *Nat. Resour. Res.* **12**:1–25. doi: 10.1023/A:1022693220894

Raines G.L., Sawatzky D.L., Bonham-Carter G.F.. 2010. Incorporating Expert Knowledge - New Fuzzy logic tools in ArcGIS 10. *ArcUser Spring 2010*, p. 8-13. <https://www.esri.com/news/arcuser/0410/files/Fuzzylogic.pdf> access in 5/10/2019

Ready P.J. and Wintz P.A. 1973. Information extraction, SNR improvement and data compression in multispectral imagery. *IEEE Transactions on Communications*, **COM-21**(10):1123-1131.

Roest, W. R., J. Verhoef, and M. Pilkington, 1992, Magnetic interpretation using the 3D analytic signal: *Geophysics*, **57**(1):116–125. doi: 10.1190/1.1443174

Roque N.C., Grossi Sad J.H., Noce C.M., Fonseca E. 1997. *Geologia da Folha Rio Pardo de Minas, Minas Gerais*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais. p. 125-221.

Saadi A. and Pedrosa-Soares A.C. 1990. Um graben cenozóico no Médio Jequitinhonha, MG. In: I Workshop sobre Neotectônica e Sedimentação Cenozóica Continental no Sudeste Brasileiro, 1990, Belo Horizonte. SBG Núcleo MG, 1990. 1º Workshop sobre Neotectônica e Sedimentação Cenozóica Continental no Sudeste Brasileiro, *Boletim do Núcleo Minas Gerais da Sociedade Brasileira de Geologia*, v. 11, p. 101-124.

- Saadi A. 1995. A geomorfologia da Serra do Espinhaço em Minas Gerais e de suas margens. *Geonomos*, **3**(1):41-63. doi: 10.18285/geonomos.v3i1.215.
- Salgado A.A.R., Santos, L.J.C., Paisani, J.C. 2019. *The Physical Geography of Brazil: Environment, Vegetation and Landscape*. Springer Nature, 222 p. ISBN 978-3-030-04333-9
- Salem S.M. and El Gammal E.A. 2015. Iron ore prospection East Aswan, Egypt, using remote sensing techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, **18**:195–206. doi: 10.1016/j.ejrs.2015.04.003
- Santos R.F, Alkmim F.F., Pedrosa-Soares A.C. 2009. A Formação Salinas, Orógeno Araçuaí (MG): história deformacional e significado tectônico. *Revista Brasileira de Geociências*, **39**(1):81-100.
- Schowengerdt R.A. 2007. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Third Edition, Elsevier 558 p. ISBN 13: 978-0-12-369407-2 ISBN 10: 0-12-369407-8
- Souza M.E., Martins M.S., G.N. Queiroga, Leite M., R.G. Oliveira, Dussin I., Pedrosa-Soares A.C. 2019. Paleoenvironment, sediment provenance and tectonic setting of Tonian basal deposits of the Macaúbas basin system, Araçuaí orogen, southeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 96 (2019) 102393. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102393>
- Uchoa E.B. 2016. *Integração de dados multifonte com base em Lógica Fuzzy na modelagem prospectiva do depósito de ferro de Quiterianópolis/CE*. Ms Dissertation, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 118 p.
- Uhlein A., Trompette R.R., Alvarenga C.J.S. 1999. Neoproterozoic glacial and gravitational sedimentation on a continental rifted margin: The Jequitaí-Macaúbas sequence (Minas Gerais, Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, **12**(5):435-451. doi: 10.1016/S0895-9811(99)00032-2
- USGS - United States Geological Survey. 2019. *Spectral Characteristics Viewer*. <https://landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer> access in 2/5/2019.
- USGS - United States Geological Survey. 2018. *Landsat 8 Data Users Handbook*. <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook> access in 3/4/2019
- USGS - United States Geological Survey. 2017a. *Landsat Missions*. <http://landsat.usgs.gov> access in 10/7/2017.
- USGS - United States Geological Survey. 2017b. *Landsat 8 Surface Reflectance Code (Lasrc) Product*. https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lasrc_product_guide.pdf access in 13/10/2017.
- Vilela F.T. 2010. *Caracterização de metadiamicititos ferruginosos da Formação Nova Aurora (Grupo Macaúbas, Orógeno Araçuaí) a Oeste de Salinas, MG*. MS Dissertation, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 135 p.
- Vilela F.T., Pedrosa-Soares A.C., Carvalho M.T.N., Arimatéia R., Santos E., Voll E. 2014. Metalogênese da Faixa Araçuaí: o Distrito Ferrífero Nova Aurora (Grupo Macaúbas, norte de Minas Gerais) no contexto dos recursos minerais do Orógeno Araçuaí. In: Silva M.G., Rocha Neto M.B., Jost H., Kuyumjian R.M. (org.) 2014. *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. CPRM. p. 415-430.

Viveiros J.F.M., Sá E.L., Vilela O.V., Santos O.M., Moreira J.M.P., Holder-Neto F., Vieira V.S. 1978. Geologia dos vales dos rios Peixe Bravo e Alto Vacaria, norte de Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife. SBG, *Anais*, v. 1:243, p. 243-254.

Voll E. 2015. *Integração de dados aerogeofísicos e de sensores remotos aplicada à prospecção no Distrito Ferrífero Nova Aurora, Minas Gerais*. MS Dissertation. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 78 p.

Warren L.V., Quaglio F., Riccomini C., Simões M.G., Poiré D.G., Strikis N.M., Anelli L.E., Strikis P.C. 2014. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil *Cloudina* reveals an old proto-Gondwana seaway. *Geology*, **42**(5):391-394. doi: 10.1130/G35304.1

White K., Walden J., Drake N., Eckardt F., Settle J. 1997. Mapping the iron oxide content of dune sands, Namib Sand Sea, Namibia, using Landsat Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*. **62**:30-39. doi: 10.1016/S0034-4257(97)00068-0

Wilford J.R., Bierwirth P.N., Craig M.A. 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2):201–216.

Yousefi M., Kreuzer O.P., Nykänen V., Hronsky J.M.A. 2019. Exploration information systems – A proposal for the future use of GIS in mineral exploration targeting. *Ore Geology Reviews*, 111 (2019) 103005. doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.103005

Zacchi E.N.P., Silva A.M., Rolim V.K. 2010. Análise integrada de dados multifonte e sua aplicação no mapeamento geológico das formações ferríferas da Serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG. *Revista Brasileira de Geofísica*. **28**(4):643-656. doi: 10.1590/S0102-261X2010000400009

5 2º ARTIGO: MODELAGEM DE DADOS GEOFÍSICO-ESPACIAIS POR LÓGICA FUZZY APLICADA AO DISTRITO FERRÍFERO NOVA AURORA, NORTE DE MINAS GERAIS

Geophysical-spatial data modeling using Fuzzy Logic applied to Nova Aurora Iron District, Northern Minas Gerais State, Southeast Brazil

Eliane Voll^{1#}, Adalene Moreira Silva^{2*}, Antônio Carlos Pedrosa-Soares^{1*}, Ranufo Arimatéia³ & Francisco Teixeira Vilela^{1,4}

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Geologia, CPMTC-IGC, Campus Pampulha, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

²Universidade de Brasília (IG/UnB), Instituto de Geociências, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil.

³SAM – Sul Americana de Metais S/A. Av. do Contorno, 5919, 10º andar, 30110-927, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴CPRM – Serviço Geológico do Brasil, SUREG-BH, Avenida Brasil, 1731, 30140-002, Belo Horizonte, MG, Brasil.

E-mails: eliane.voll@gmail.com; adalene@unb.br; pedrosasoares@gmail.com; ranufo.arimateia@sammetais.com.br; francisco.vilela@cprm.gov.br

#Autor correspondente: Eliane Voll, eliane.voll@gmail.com

*Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq

5.1 RESUMO

A integração e modelagem de dados geofísicos, geológicos e de sensores remotos, em sistemas de informação geográfica (SIG), tem sido usada com sucesso em mapeamento geológico e exploração mineral, em todo o mundo, particularmente em áreas com escassos afloramentos rochosos e extensas coberturas cenozoicas. Situado no norte de Minas Gerais, o Distrito Ferrífero Nova Aurora engloba metadiamicritos ricos em ferro do Grupo Macaúbas, relacionados a uma glaciação global do Criogeniano. O distrito, cujas reservas totais superam vinte bilhões de toneladas de minério de ferro (15-60 %Fe), situa-se numa área de extensas chapadas largamente cobertas por espessos regolitos e sedimentos cenozoicos, escondendo os depósitos de ferro. Os metadiamicritos ricos em ferro contêm quantidades variáveis de hematita (largamente predominante) e magnetita (concentrada em zonas de cisalhamento) na matriz foliada que também inclui quartzo, mica, feldspato, granada, clorita e carbonato, dentre outros minerais. Mapas regionais de favorabilidade, baseados em Lógica *Fuzzy*, apresentados em artigo anterior publicado pelos autores, indicaram grande número de alvos, alguns deles em prospecção avançada pela Companhia Sul Americana de Metais (SAM). O presente artigo focaliza um desses alvos trabalhados pela SAM, visando testar a aplicação daquela metodologia de

integração e modelagem de dados geofísicos-espaciais sobre uma área reduzida. O modelo resultante foi validado: i) pelo mapa geológico de detalhe, elaborado durante o trabalho de prospecção; ii) pela distribuição de afloramentos de minério que coincide com as áreas de maior favorabilidade no modelo e; iii) pelas profundidades calculadas, por deconvolução de Euler, para as fontes magnéticas que são compatíveis com as espessuras do corpo de minério nas seções geológicas controladas por furos de sonda. Os dados e método utilizados foram eficazes na redução da ambiguidade da informação e o modelo integrado restringe as áreas mais favoráveis à ocorrência do minério de ferro.

Palavras-chave: Minério de ferro, diamictito, glaciação, Grupo Macaúbas

5.2 ABSTRACT

Integration and modeling of geophysical, geological, and remote sensor data, using geographic information system (GIS), have been successfully applied in geological mapping and mineral prospecting worldwide, particularly in areas with scarce outcrops and extensive Cenozoic covers. In northern Minas Gerais State (SE Brazil), the Nova Aurora Iron District encompasses iron-rich metadiamicrites of the Macaúbas Group, related to a global Cryogenian glaciation. The district, with total reserves exceeding twenty billion tons of iron ore (15-60 wt%Fe), is located in an area of extensive plateaus (chapadas) largely covered by thick regoliths and Cenozoic sediments that hide the iron deposits. The iron-rich metadiamicrites contain varying amounts of hematite (largely prevalent) and magnetite (concentrated in shear zones) in a foliated matrix which also includes quartz, mica, feldspar, garnet, chlorite, and carbonate, among other minerals. Regional favorability maps, based on *Fuzzy Logic* modeling, published in a previous article by the authors, indicated a large number of targets, some of them in advanced prospecting by the Companhia Sul Americana de Metais (SAM). The present paper focuses on one of these SAM targets, aiming to test the application of data integration and *Fuzzy Logic* modeling on a small area. The resulting model was validated by the: i) geological detail map, developed during the prospecting work; ii) distribution of ore outcrops that coincides with the sites of greatest favorability in the model; and iii) calculated depths for the magnetic sources, by using Euler deconvolution, that are compatible with the thickness of the ore body in the geological sections controlled by data from drill holes. The data and method used were

effective in reducing the information ambiguity so that the integrated model proved to be efficient in restricting the most favorable areas for iron ore occurrence.

Keywords: Iron ore; diamictite; glaciation, Macaúbas Group

5.3 INTRODUÇÃO

Modelagem de dados geofísicos, geológicos e de sensoriamento remoto tem sido usada com sucesso para identificar alvos minerais e auxiliar no mapeamento geológico em todo o mundo, a exemplo de modelagem prospectiva voltada para depósitos de ferro, usando técnicas de análise espacial em Sistema de Informação Geográfica – SIG (Crósta *et al.*, 1994; Zacchi *et al.*, 2010; Andrade *et al.*, 2014; Voll *et al.*, 2020).

Com o objetivo de rastrear depósitos de ferro do Grupo Macaúbas (Neoproterozoico) em alvos situados em planaltos (chapadas) cenozoicos no norte de Minas Gerais, aplicamos método baseado em lógica *Fuzzy* para integração de dados geológicos, aerogeofísicos e de sensoriamento remoto sobre uma área de 66,6 km² do Distrito Ferrífero Nova Aurora (Figura 5.1). O Distrito Ferrífero Nova Aurora é caracterizado por formações ferríferas diamictíticas (Fe > 15%) e metadiamictitos ferruginosos (Fe entre 5 e 15%), variavelmente ricos em hematita e/ou magnetita, que compõem o Membro Riacho Poções da Formação Nova Aurora, Grupo Macaúbas (Viveiros *et al.*, 1978; Pedrosa-Soares *et al.*, 2011; Vilela *et al.*, 2014).

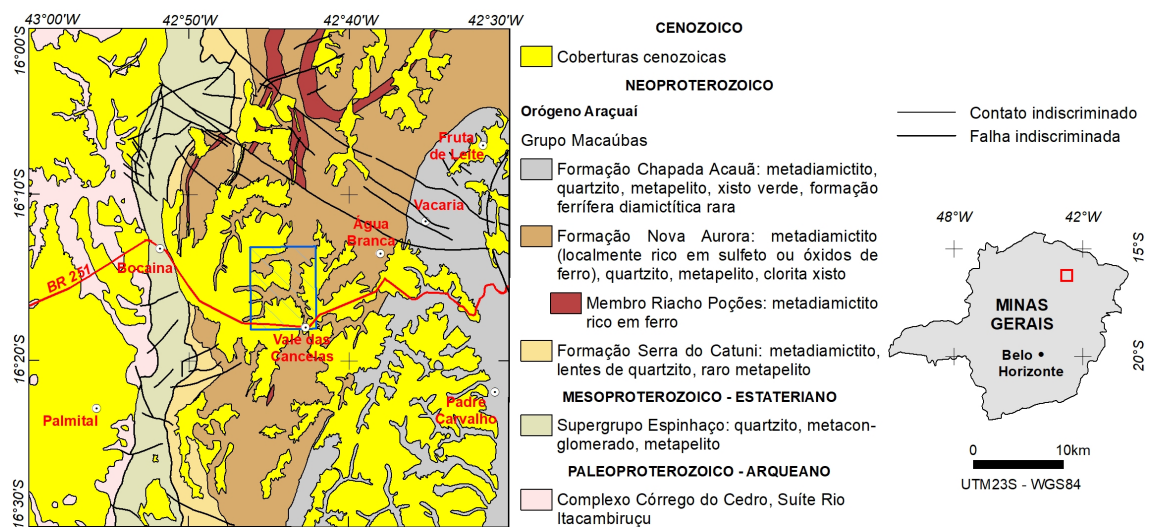


Figura 5.1. Mapa geológico simplificado da Folha Padre Carvalho (modificado de Mourão & Grossi Sad, 1997). Retângulo azul indica a área selecionada para este estudo.

A partir da modelagem, este artigo apresenta um modelo prospectivo para área selecionada (Figura 5.1), com base nas relações geográficas entre rochas ricas e

pobres em ferro no Distrito Ferrífero Nova Aurora, conforme metodologia aplicada em escala regional por Voll *et al.* (2020). Neste estudo de caso, comparam-se os resultados encontrados pelo modelo com verificações em campo, e com o mapa geológico de detalhe (que inclui informação de 450 furos de sondagem rotativa), elaborado pela empresa Sul Americana de Metais S.A. (SAM), além de dados da Agência Nacional de Mineração (ANM).

5.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo abranje 66,6 km² e se localiza no limite dos municípios de Padre Carvalho e Grão Mogol, MG (Figura 5.2).

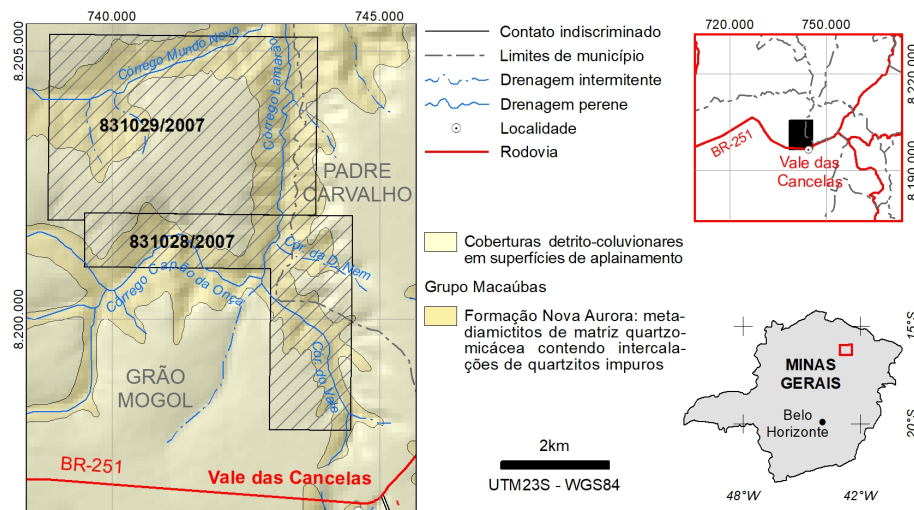


Figura 5.2. Localização da área de estudo, mostrando blocos de prospecção da SAM (ANM 2019) sobre a geologia simplificada da Folha Padre Carvalho (ver Figura 5.1).

Coberturas elúvio-colúvionares ocorrem em grande parte da área, ocultando largamente as rochas da Formação Nova Aurora, inclusive aquelas ricas em ferro, as quais afloram em vales internos e limitantes do planalto (Figura 5.1). A geomorfologia e geologia regionais estão descritas em Saadi (1995), Mourão & Grossi Sad (1997), Pedrosa-Soares *et al.* (2011) e Voll *et al.* (2020). As rochas que ocorrem em afloramentos e testemunhos de sondagem (Figura 5.3), na área de estudo estão sumariamente descritas adiante (Vilela, 2010).

Metadiamicrito estéril: é a rocha encaixante dos depósitos de ferro, composto de ampla variedade composicional de clastos, desde matações a seixos, suportados por matriz foliada, variavelmente rica em quartzo e micas.

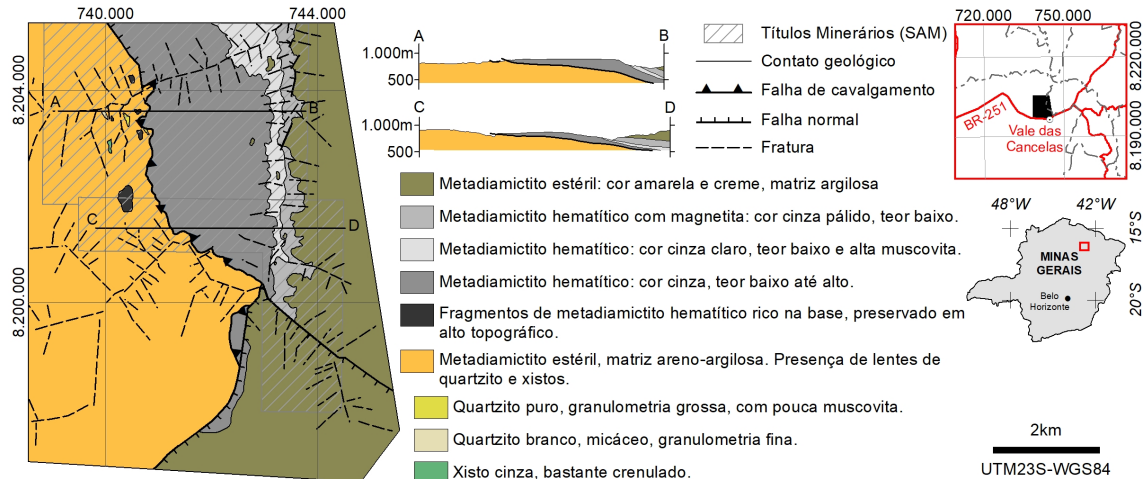


Figura 5.3. Mapa geológico da área de estudo (modificado de SAM, 2013).

Metadiamicictito hematítico e formação ferrífera metadiamicictítica rica em hematita: a diferença entre estas duas rochas é apenas o teor em ferro total que, quando maior que 15%, caracteriza a formação ferrífera, e entre 5 e 15%, corresponde ao metadiamicictito hematítico ou ferruginoso (Figura 5.4). A quantidade de hematita da matriz desses metadiamicictitos varia entre 5% e 60%. Hematita e micas ocorrem em concentrações inversamente proporcionais, observando-se em campo a clara diminuição na concentração de hematita rumo ao topo mais enriquecido em mica. A hematita, incipientemente magnética, ocorre disseminada na matriz do metadiamicictito, mas se concentra em lâminas, bandas e lentes correspondentes à foliação regional e foliação de crenulação. Magnetita, parcial a totalmente martitzada, geralmente não passa de 2%, exceto em zonas de cisalhamento onde ocorre enriquecimento em magnetita.



Figura 5.4. Formação ferrífera metadiamicictítica rica em hematita (UTM23S-WGS84, 741.246E, 8.201.332N).

Metadiamicrito magnético e formação ferrífera metadiamicrítica rica em magnetita: revelados por furos de sondagem, também são diferenciados apenas pelo teor em ferro total (ver acima), apresentam tonalidade cinza mais escura que os termos hematíticos e se caracterizam pelo aumento progressivo na quantidade de magnetita em relação à de hematita. Pode ser bandado, com bandas de cor cinza, ricas em magnetita, intercaladas com bandas mais ricas em quartzo e muscovita. A quantidade de hematita especular aumenta nas bandas ricas em magnetita. Quando mostra tons esverdeados, o metadiamicrito magnético apresenta aumento na concentração de clorita e biotita.

5.4 DADOS, MÉTODOS E RESULTADOS

Para a modelagem, os dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto foram trabalhados em ambiente GIS, após terem seus parâmetros cartográficos homogeneizados para a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 23S e datum horizontal WGS84.

5.4.1 Dados aerogeofísicos

Os dados aerogeofísicos utilizados foram os da Área 8 (Minas Novas - Riacho dos Machados - Espinosa; CODEMIG-SEDE-CPRM, 2006), que incluem levantamentos gamaespectrométricos e magnéticos em alta resolução ao longo de 87.212,45 km, com intervalo entre linhas de vôo e linhas de controle de 0,5 e 10,0 km, com direções N25W e N65E, respectivamente. Os intervalos entre as medições geofísicas consecutivas foram de 0,1s (magnetômetro) e 1,0s (espectrômetro). A altura média de vôo foi de 100 m, a uma velocidade média de 280 km/h.

5.4.1.1 Gradiente total

O gradiente total (GT) foi utilizado neste trabalho, porque a inclinação magnética possui valores baixos, em torno de -34° , na latitude $16^\circ 15' 30''$ S e longitude $42^\circ 44' W$ (NOAA, 2019). O resultado do GT é independente da inclinação da magnetização e é particularmente útil em baixas latitudes (Dentith & Mudge, 2014). Foi calculado a partir da raiz quadrada da soma dos quadrados de cada uma das primeiras derivadas direcionais do campo magnético (Figura 5.5). Este cálculo resulta em valores máximos nas bordas dos corpos, destacando a posição de corpos estreitos, como diques, e as bordas dos corpos maiores (Dentith & Mudge, 2014),

sendo útil para realçar limites de fontes magnéticas (Roest *et al.*, 1992). O resultado do cálculo do GT mostra anomalias magnéticas positivas na porção centro-norte da área (Figura 5.5), aproximadamente coincidentes com o metadiamicrito hematítico que tem teor variável de magnetita. Grande anomalia negativa é vista nas porções sudeste e sudoeste da área, coincidindo aproximadamente com a localização dos metadiamicritos estéreis (Figura 5.5).

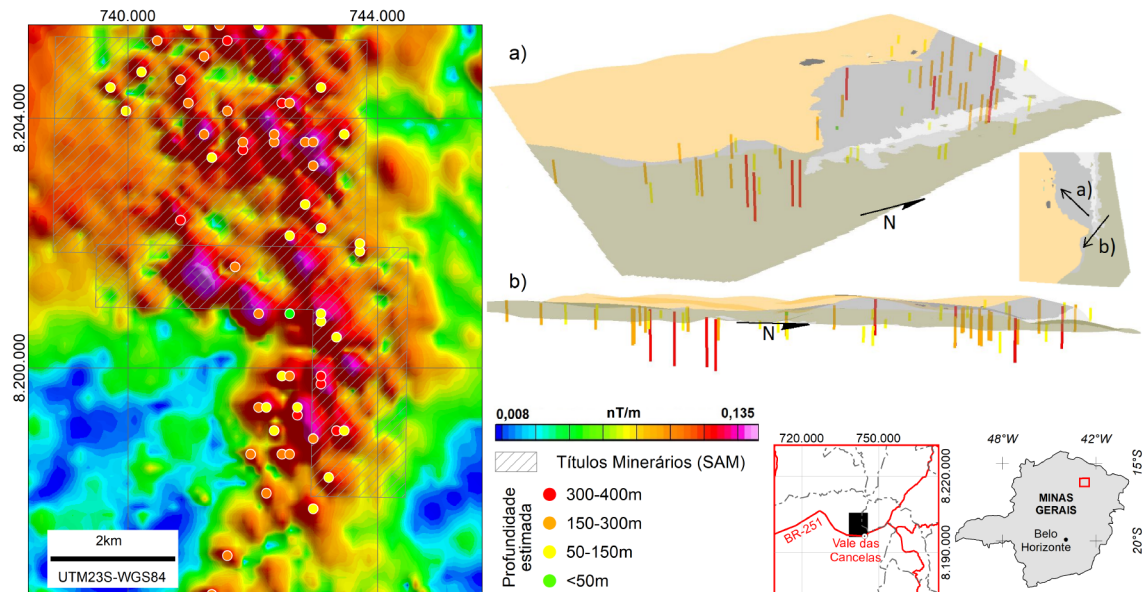


Figura 5.5. Mapa do Gradiente Total associado às soluções Euler para a área de pesquisa da SAM S.A. **a), b)** Visualização das profundidades das soluções Euler sobre o mapa geológico da Figura 5.3, visada NW (a) e EW (b).

5.4.1.2 Deconvolução de Euler

Detalhado trabalho de prospecção em superfície e sub-superfície foi executado pela SAM na área estudada, incluindo cerca de 450 furos de sondagem com profundidade suficiente para se atingir a unidade estéril na base do corpo de minério. O algoritmo de deconvolução de Euler 3D (Thompson, 1982) foi executado com a finalidade de se comparar os resultados calculados das profundidades das fontes magnéticas com os dados de campo e de furos de sondagem da SAM. Foi utilizado o índice estrutural $N=1$, correspondente a corpo planar de duas dimensões, que é o tipo de geometria esperado para o depósito. O processamento gerou 59 soluções, com profundidades entre 0 e 399 m para as fontes magnéticas, sendo cerca de 60% das soluções para profundidade de até 200 m, e outros 22% para profundidade de até 300 m (Figura 5). As soluções encontradas na Deconvolução de Euler são coerentes com as profundidades do corpo de minério em seção geológica (Figura 5.3).

5.4.1.3 Dados gamaespectrométricos

Interpretações baseadas em dados gamaespectrométricos de coberturas sedimentares, rocha intemperizadas ou regolitos, podem ser prejudicadas pela falta de afloramentos de rocha fresca. Na região estudada, solos lateríticos bem desenvolvidos para lateritas geralmente cobrem a maioria dos tipos de rochas e as chapadas são amplamente cobertas por lateritas ricas em minerais de hidróxido de ferro e materiais amorfos contendo ferro (Salgado *et al.*, 2019). Embora o conteúdo médio dos radioelementos (K, Th, U) medidos para pesquisas por gamaespectrometria seja baixo em formações ferríferas bandadas e nas rochas sedimentares mais comuns (Boyle, 1982; Kileen, 1979), esses elementos podem mostrar variações significativas nas concentrações em lateritas, solos e rochas intemperizadas.

A composição ternária com os canais de potássio, tório e urânio mostra as diferentes proporções destes elementos na superfície (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** 5.6a). Neste caso, a imagem mostra que, sobre as coberturas detrito-lateríticas, o potássio já foi praticamente todo lixiviado e só aparece, em tons de magenta, vermelho e amarelo, nas regiões dos vales que circundam estas chapadas. Tons de roxo e magenta mostram a presença de urânio nestas áreas, assim como sobre as coberturas, em tons de ciano. O tório aparece em maiores concentrações nos topos das chapadas, mas também está presente nos vales, nos pontos onde as cores ciano, amarelo e branco aparecem.

Em solos lateríticos e lateritas, o urânio e o tório tendem a ser adsorvidos por minerais de argila e hidróxidos de ferro, as lateritas tendem a concentrar altos teores de tório, o urânio pode ser enriquecido nos níveis mais altos do solo e o potássio é o mais móvel dos três radioelementos, tendendo a ser facilmente removido por intemperismo químico em lateritas comuns (Boyle, 1982; Wilford *et al.*, 1997). A razão Th/K destaca concentrações anômalas de tório relacionadas a coberturas extensas de laterita em chapadas (Figura 5.6b). As razões U/K distinguem solos colúvio-eluviais nas bordas da chapada (Figura 5.6c), já que o conteúdo de U é superior ao teor de K nesses solos e pode ser fixado em depósitos ricos em hidróxido de ferro, como nas lateritas e nos solos lateríticos encontrados na região estudada (Wilford *et al.*, 1997).

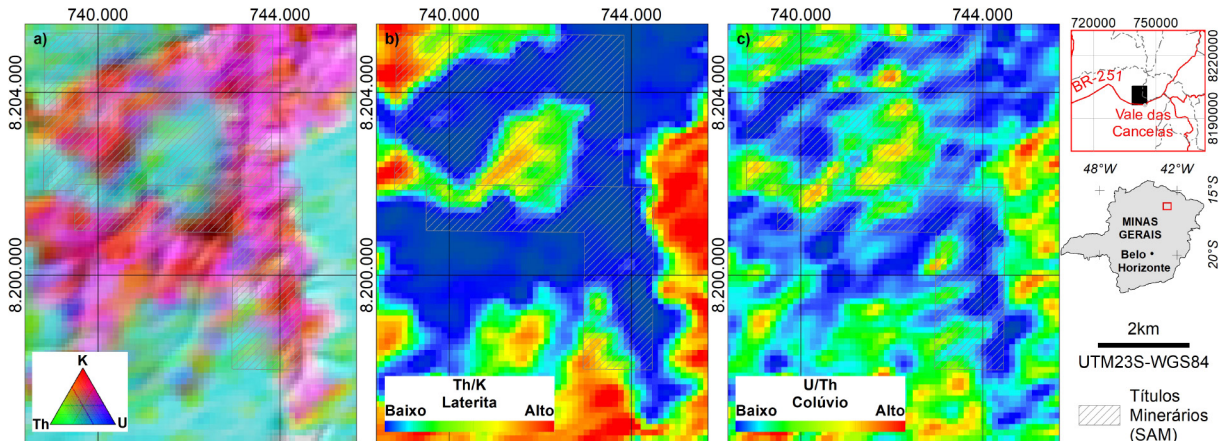


Figura 5.6. a) Composição ternária com as concentrações de K (vermelho), Th (verde) e U (azul).
b) Razão Th/K. c) Razão U/K.

5.4.2 Imagens Landsat 8

O satélite Landsat 8 carrega o sensor Operational Land Imager OLI, que coleta dados de imagem para 9 bandas espectrais de ondas curtas em uma faixa de 190 km, com uma resolução espacial de 30 m para todas as bandas, exceto a banda Pan, de 15 m (USGS, 2018). Produtos desse sensor têm sido amplamente utilizado para estudos geológicos como mapeamento litológico ou prospecção mineral (Zacchi *et al.*, 2010; Salem & El Gammal, 2015). Neste estudo, a cena 218-71, adquirida durante a estação seca (1/6/2017), foi recortada na região estudada (Figura 5.7a).

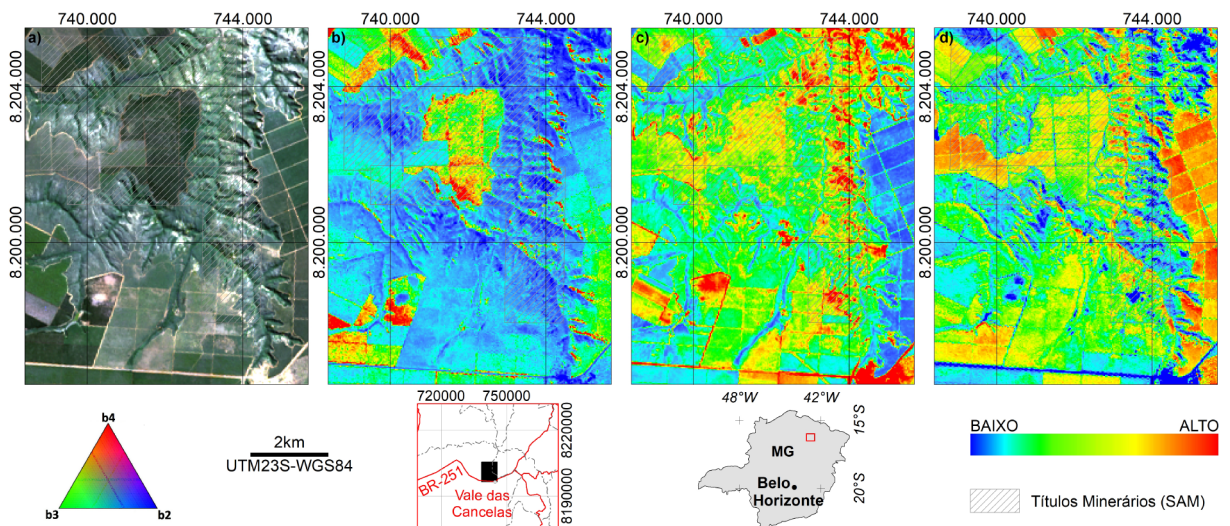


Figura 5.7. a) Imagem Landsat 8 (b4, vermelho; b3, verde; b2, azul) mostrando as coberturas que sustentam o relevo circundadas por vales onde afloram as rochas da Formação Nova Aurora. b) IH. ACP para realce de óxido-hidróxido de Ferro (c) e argilominerais (d).

5.4.2.1 Índice para realce de hematita (IH)

De acordo com Madeira *et al.* (1997), trabalhando em índices espectrométricos visíveis baseados no conteúdo de hematita e goethita em solos lateríticos, o índice de

vermelhidão geralmente fornece uma boa correlação com o conteúdo de hematita em lateritas. Os autores aplicaram este modelo a uma imagem TM Landsat (bandas 1, 2 e 3) para estimar o conteúdo de hematita nos horizontes do solo, que corresponde a um índice radiométrico chamado por eles de índice para realçe de hematita (IH; Madeira *et al.*, 1997). O cálculo do IH, usando as bandas visíveis (bandas 2, 3 e 4) do sensor do satélite Landsat 8, sugere alta concentração de hematita nas áreas onde há solo exposto (Figura 5.7b).

5.4.2.2 Análise por Componente Principal (ACP)

A Análise por Componente Principal (ACP), resulta da combinação linear dos dados originais e dos vetores próprios aplicada, pixel a pixel, a imagens correlacionadas, fornecendo um novo conjunto de imagens não correlacionadas (Ready & Wintz, 1973; Lillesand *et al.*, 2004). A Análise Seletiva por Componentes Principais (Chavez e Kwarteng, 1989) usa apenas um par de imagens selecionadas para mapear contrastes espectrais entre diferentes partes do espectro, com o objetivo de encontrar informações distintas para cada banda, simplificando as imagens, selecionando as informações desejadas e eliminando a redundância. Para isso, é utilizado um par de imagens com correlação moderada (0,7 a 0,98) a baixa (<0,7), sendo que o segundo componente gerado traz as informações mais contrastantes (Chavez e Kwarteng, 1989). Com o objetivo de destacar óxidos e hidróxidos de ferro, a ACP foi aplicada nas bandas 2 e 4 (correlação 0,92; Figura 5.7c), e a ACP com as bandas 6 e 7 (correlação 0,96; Figura 5.7d) foi utilizada para mapear superfícies ricas em argila (Zacchi *et al.*, 2010).

5.5 MODELAGEM ESPACIAL

Este trabalho tem como objetivo criar um modelo integrado prospectivo para minério de ferro, geralmente oculto sob coberturas em chapadas em uma região com ocorrências locais de metadiamicritos ferruginosos e formação de ferro diamictítica. É baseado em combinações de dados espaciais que reduzem a ambiguidade de interpretações que geralmente surgem quando a análise é realizada exclusivamente por métodos analógicos. A área potencial foi selecionada de acordo com conhecimento prévio e por um conjunto de informações de entrada disponíveis que permitem suas delimitações, atendendo a critérios predefinidos (An *et al.*, 1991; Bonham -Carter, 1994; Raines *et al.*, 2010). No modelo de lógica *Fuzzy*, aplicado

neste trabalho, os mapas são classificados de acordo com seu grau de pertinência, com valores crescendo continuamente entre 0 e 1, onde 1 é o valor máximo de favorabilidade em relação ao alvo estudado. Este modelo é adequado para determinar as classes de caracterização quando limites rígidos não podem ser definidos entre conjuntos de dados (An *et al.*, 1991; Bonham-Carter, 1994).

O modelo utilizado para este estudo de caso foi aplicado por Voll *et al.* (2020) em escala regional, com o objetivo de rastrear rochas ricas em ferro. Cobrindo uma área de 23,630 km², que engloba a área deste estudo de caso, o modelo resultante se mostra eficiente para realçar áreas potenciais para a existência de rochas ricas em ferro, mesmo quando essas estão recobertas por extensas chapadas. Utilizando esse modelo, pretendemos, de forma suplementar, determinar se também pode ser considerado eficiente para estudos locais.

5.5.1 Caracterização da formação ferrífera

As unidades das formações Serra do Catuni, Nova Aurora e Chapada Acauã Inferior, do Grupo Macaúbas, contêm diamictitos interpretados como depósitos glaciogênicos. As rochas da Formação Nova Aurora se compõem predominantemente metadiamicrito, com quartzito e filito subordinados. O portador do minério de ferro da formação é o Membro Riacho Poções, individualizado por Viveiros *et al.* (1978), que se trata de um metadiamicrito hematítico com intercalações de quartzito e filito hematíticos, com espessura estimada em até 600 m (Viveiros *et al.*, 1978; Grossi-Sad *et al.*, 1997). O contato basal do Membro Riacho Poções é caracterizado por uma zona de cisalhamento dúctil, onde o minério é concentrado por lixiviação, resultando em um itabirito com grande concentração de hematita e magnetita (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** 5.8), atingindo quantidade de até 60% (em volume) da matriz do metadiamicrito hematítico. A partir do contato basal, há predominância de metadiamicrito hematítico com teor variável de ferro, que decresce rumo ao topo (Vilela, 2010).

5.5.2 Modelagem dos dados

Os dados geofísicos e de sensoriamento remoto foram reclassificados e combinados usando os operadores de lógica *Fuzzy* para modelagem de dados (Bonham-Carter, 1994). Os dados significativos de informação escolhidos são: i) o GT, que mostra anomalias de alta intensidade magnética e, conseqüentemente, tende a

destacar unidades de rocha com conteúdo significativo de minerais de ferro magnético, como metadiamicritos ricos em hematita magnética e/ou magnetita (Figuras 4 e 8); ii) as razões gamaespectrométricas de Th/K (Figura 5.6b) e U/K (Figura 5.6c), que realçam as características da superfície relacionadas ao intemperismo, destacando áreas com altas concentrações de Th e U e baixas concentrações de K, relacionadas ao alto teor de hidróxido de ferro em lateritas; iii) o IH (Figura 5.7b); e iv) os resultados da ACP-Fe, para óxido-hidróxido de ferro (Figura 5.7c) e da ACP-arg, para argilo-minerais (Figura 5.7d).



Figura 5.8. Bloco de hematita especular à beira da estrada, contendo níveis quase inteiramente compostos por hematita e magnetita (UTM23S-WGS84, 740.468E, 8.201.919N).

Os dados selecionados foram reclassificados (Figura 5.9), inicialmente transformando seu intervalo de valores originais em intervalos de 0 (favorabilidade mínima) a 1 (favorabilidade máxima). O operador *large* foi aplicado às imagens TG, Th/K, U/K, IH e ACP-Fe, enquanto o operador *small* foi aplicado à ACP-arg e às imagens %K, Th_{ppm} e U_{ppm} . A função *large* é usada quando os valores mais altos em cada dado correspondem à maior favorabilidade do alvo estudado, enquanto a função *small* é aplicada se os valores mais baixos em cada dado se referem à maior favorabilidade. Em seguida, as imagens K_{small} , Th_{small} e U_{small} ; Th/K_{large} e U/K_{large} ; e IH_{large} e $ACP-Fe_{large}$ foram combinadas usando o operador soma algébrica *Fuzzy*. O resultado do operador soma algébrica *Fuzzy* é sempre maior que (ou igual a) o maior valor de membro *Fuzzy*. O efeito é, portanto, "crescente". Neste caso as evidências que favorecem uma hipótese se reforçam e a evidência combinada é mais favorável do que qualquer evidência obtida individualmente (Bonham-Carter, 1994).

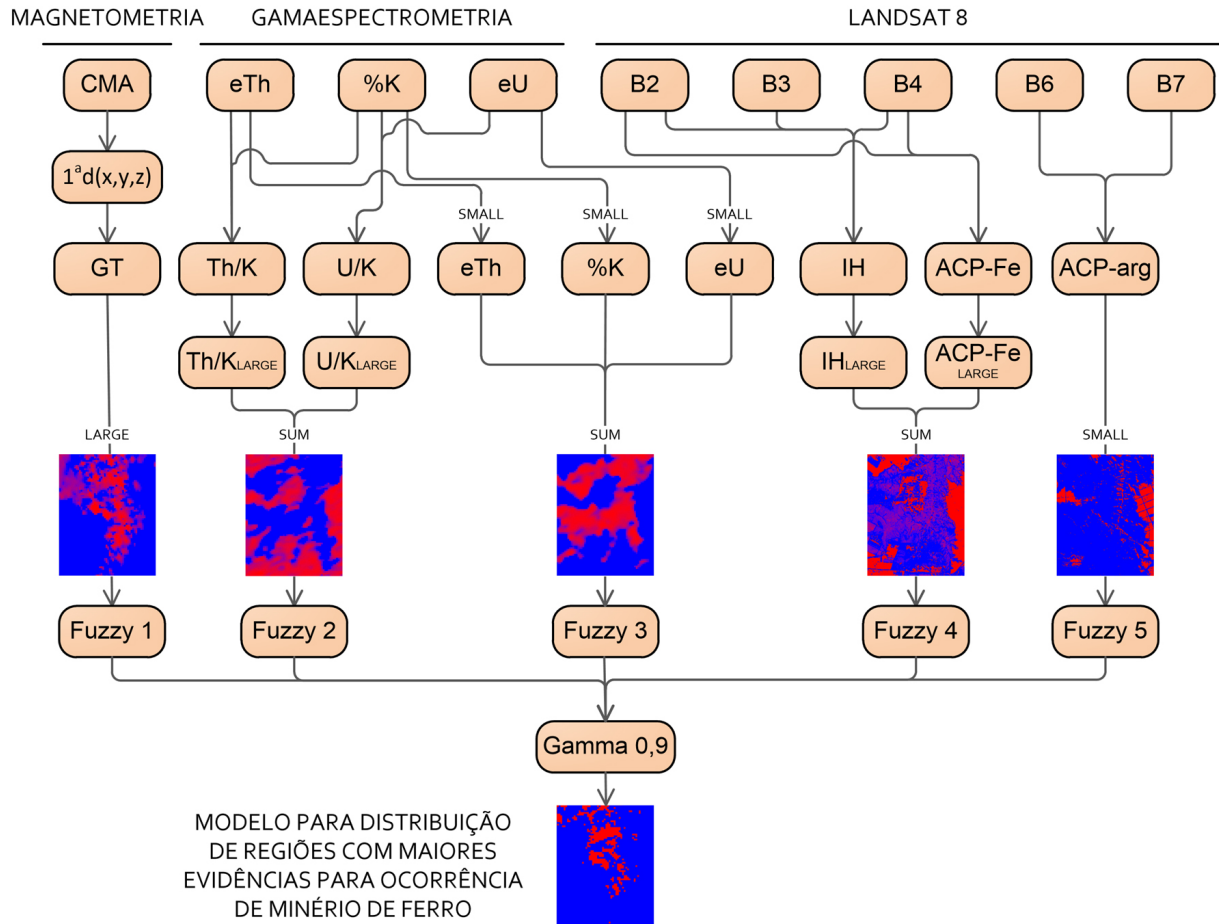


Figura 5.9. Fluxograma de processo para análise para geração de modelo prospectivo para minério de ferro.

Finalmente, as imagens resultantes foram combinadas com o operador Fuzzy gama (Bonham-Carter, 1994; Voll *et al.*, 2020; Figura 5.9). O índice de importância γ (gama), variando entre 0 e 1, define a relevância de cada membro do operador. A modelagem foi feita de forma que os maiores valores reflitam maior favorabilidade para a ocorrência de minério de ferro. Depois de uma sequência de testes, foi utilizado o índice de importância $\gamma=0,9$ para a geração do modelo. A imagem resultante mostra locais com maior favorabilidade para a ocorrência de minério de ferro na região de estudo (Figura 5.10).

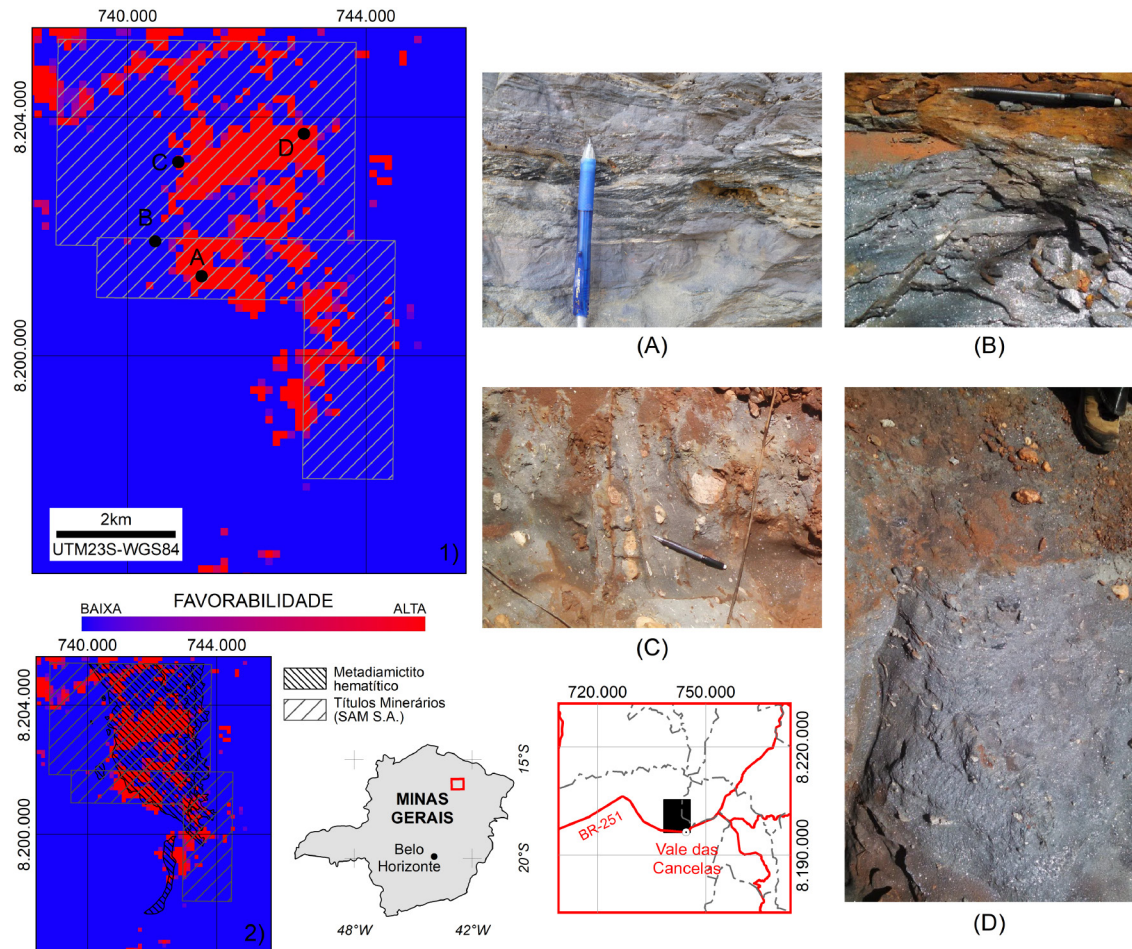


Figura 5.10. Mapa 1) Modelo prospectivo para minério de ferro mostrando áreas com alta favorabilidade à prospecção de minério de ferro em vermelho e localização dos pontos A, B, C e D (afioramentos de metadiamicrito hematítico descritos em campo). **Mapa 2)** Modelo prospectivo para minério de ferro mostrando as áreas de requerimento de lavra da SAM S.A. (ANM, 2019) e os limites da unidade que contém o minério (modificado de SAM, 2013). (A), (B – bloco rolado sobre a chapada), (C) e (D): afioramentos de metadiamicrito hematítico (UTM23S-WGS84 A - 741.246E, 8.201.332N; B - 740.468E, 8.201.919N; C - 740.858E, 8.203.248N; D - 742.962E, 8.203.719N).

5.6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Com fim de rastrear minério de ferro em uma área de estudo local, largamente oculta por coberturas lateríticas sobre chapadas, geramos vários produtos com base em dados de levantamentos aerogeofísicos magnéticos e gamaespectrométricos, além de imagens de satélite do Landsat 8. Como os dados magnéticos revelam locais relativamente profundos com concentrações anômalas de rochas ricas em ferro, também usamos dados da gamaespectrometria e sensoriamento remoto para refinar os produtos de integração, melhorando a interpretação sobre as chapadas. A vasta extensão de coberturas lateríticas pode mascarar a resposta superficial de rochas ricas em ferro na gamaespectrometria e nas imagens Landsat 8, pois esses sensores coletam apenas a resposta do material da superfície. No entanto, existem

afloramentos dispersos de rochas ricas em ferro preservadas da lateritização em chapadas, pois os hidróxidos de ferro são geralmente mais concentrados em lateritas desenvolvidas sobre camadas de metadiamicrito ferruginoso e formação ferrífera diamicítica. Portanto, o uso de gamaespectrometria e dados de sensoriamento remoto, integrados aos dados magnéticos, revelou-se eficaz na redução da ambiguidade da informação, porque os dados magnéticos por si só, não são suficientes para delimitar com confiabilidade os locais mais favoráveis para a ocorrência do minério de ferro em superfícies de chapadas.

Como o problema focado (ou seja, pesquisar minério de ferro oculto sob as chapadas amplamente cobertas por laterita) dificulta a aplicação de limites rígidos entre as classes de dados, aplicamos a lógica *Fuzzy* para produzir modelos orientados pelo conhecimento (An *et al.*, 1991; Bonham-Carter, 1994; Porwal *et al.*, 2015). O modelo utilizado para este estudo de caso foi aquele aplicado por Voll *et al.* (2020) em escala regional, com o objetivo de rastrear rochas ricas em ferro. Esse modelo mostrou-se eficiente para estudos locais. O resultado é um modelo integrado que mostra os locais mais favoráveis para a ocorrência de minério de ferro na região estudada (Figura 5.10). Nosso modelo final mostra que as maiores e mais bem definidas áreas ricas em ferro estão localizadas nas porções noroeste e centro da região estudada, onde predominam os platôs e chapadas com coberturas lateríticas, escondendo todos os tipos de rochas subjacentes.

O modelo apresentado mostra correspondências consistentes entre os principais locais favoráveis e os dados utilizados para validação, como informações de campo, descrições compiladas da literatura e afloramentos localizados em mapas geológicos, bem como os registros oficiais de licenças para prospecção de ferro da SAM nesta área (ANM, 2019).

O modelo se mostrou coerente com mapa geológico cedido pela empresa, que não mostra as coberturas lateríticas (Figura 5.3), assim como também se mostraram coerentes as profundidades estimadas para as fontes magnéticas geradas pela deconvolução de Euler (Figura 5.7), quando comparadas com as espessuras do corpo de minério mostradas nas seções geológicas (baseadas em furos de sondagem) mostradas na Figura 5.3. Os pontos de controle coletados em campo mostram correspondência entre o modelo e a ocorrência do minério (Figura 5.10).

Nossa integração de dados mostra que, mesmo em circunstâncias onde há espessas coberturas sedimentares e lateríticas, é possível identificar e delimitar locais favoráveis à concentração de minério de ferro sob esses platôs. O modelo apresentado por Voll *et al.* (2020) se mostrou aplicável em escala local e os procedimentos apresentados para integração de dados e modelos resultantes se mostraram úteis para ajudar na criação de modelos de prospecção mais detalhados aplicados ao Membro Riacho Poções e suas extensões ocultas por coberturas lateríticas sobre chapadas. Esse modelo mostrou ser eficientemente aplicado a escalas diversas Voll *et al.* (2020), podendo ser utilizado em várias situações em outras regiões, não apenas na área de estudo. Por ser uma modelagem orientada pelo conhecimento, pode ser adaptada para vários propósitos, de acordo com objetivos distintos de pesquisa e necessidades de trabalho. É um modelo que evolui da compreensão do fenômeno a ser estudado, o que o torna versátil para muitas outras abordagens..

5.7 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à CODEMIG-CODEMGE pelo apoio financeiro. À Companhia Sul Americana de Metais (SAM) pela cessão de informações geológicas para a elaboração deste estudo de caso. Eliane Voll agradece à CAPES pela bolsa de doutorado, e os co-autores agradecem ao CNPq por suas bolsas de produtividade em pesquisa.

5.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- An, P.; Moon, W.M. & Rencz, A.N. 1991. Application of *Fuzzy* set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27(1):1–11.
- Andrade, L.B.; Silva, A.M. & Souza Filho, C.R. 2014. Nickel prospective modelling using *Fuzzy* logic on Nova Brasilândia Metasedimentary Belt, Rondônia, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 32(3):419-431. doi: 10.22564/rbgf.v32i3.533.
- ANM - Agência Nacional de Mineração. 2019. Sistema de Informações Geográficas da Mineração – SIGMINE. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/assuntos/ao-minerador/sigmine>>. Acesso em: 12 abr. 2019.
- Bonham-Carter, G.F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Ontario. Pergamon Press. 398 p. ISBN: 0 08 041867 8.
- Boyle, R.W. (ed.) 1982. *Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits*. Developments in Economic Geology, Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, vol. 16, 498 p. ISBN: 978-0-444-42070-1

Chavez Jr., P.S. & Kwarteng, A.Y. 1989. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(3):339-348.

CODEMIG-SEDE-CPRM. 2006. *Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais, Programa 2005/2006. Área 8: Minas Novas – Riacho dos Machados – Espinosa. Relatório final do levantamento e processamento de dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Vol. 1 – Texto técnico. Belo Horizonte. 201 p.*

Crósta, A.P.; Bicho, C.P. & Ferreira, J.F.F. 1994. Image processing applied to aerogeophysics: an important tool for geological mapping and exploration in the Brazilian Amazon. *In: 10TH THEMATIC CONFERENCE ON GEOLOGIC REMOTE SENSING. Anais, San Antonio, Texas, vol. 2, p. 539-550.*

Dentith, M. & Mudge, S.T. 2014. Electrical and electromagnetic methods. *In: DENTITH M. & MUDGE S.T. Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist. Cambridge University Press pp. 235-350. doi: 10.1017/cbo9781139024358.007. ISBN: 9780521809511*

Grossi-Sad, J.H.; Lobato, L.M.; Pedrosa-Soares, A.C. & Soares-Filho, B.S. (coords., eds.). 1997. *Projeto Espinhaço em CD-ROM. Belo Horizonte, CODEMIG, 2693 p. e 23 mapas.*

Kileen, PG. 1979. Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration – application and interpretation. *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores. Geological Survey of Canada, Economic Geologic Report, 31:163–229. doi: 10.4095/106037*

Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W. & Chipman, J.W. 2004. *Remote Sensing and Image Processing. 5th ed. John Wiley and Sons. ISBN: 0-471-15227-7*

Madeira, J.S.; Bedidi, A.; Cervelle, B.; Pouget, M. & Flay, N. 1997. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: The application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia. *International Journal of Remote Sensing. 18(13):2835-2852. doi: 10.1080/014311697217369*

Mourão, M.A.A. & Grossi Sad, J.H. 1997. Geologia da Folha Padre Carvalho, Minas Gerais. *In: GROSSI-SAD, J.H.; LOBATO, L.M.; PEDROSA-SOARES, A.C. & SOARES-FILHO, B.S. (coords., eds.). Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 315-418.*

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. 2019. Magnetic Field Calculators. Disponível em: <<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/>>. Acesso em: 15 jul. 2019.

Pedrosa-Soares, A.C.; Babinski, M.; Noce, C.M.; Martins, M.; Queiroga, G. & Vilela, F.T. 2011. The Neoproterozoic Macaúbas Group (Araçuaí orogen, SE Brazil) with emphasis on the diamictite formations. *In: Arnaud, E.; Halverson, G.P. & Shields-Zhou, G. (eds). The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations. Geological Society of London, Memoir, 36(49):523-534. doi: 10.1144/M36.49.*

Porwal, A.; Deb Das, R.; Chaudhary, B.; Gonzalez-Alvarez, I. & Kreuzer, O. 2015. Fuzzy inference systems for prospectivity modeling of mineral systems and a case-study for prospectivity mapping of surficial Uranium in Yeelirrie Area, Western Australia. *Ore Geol. Rev., 71:839–852. doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.10.016*

Raines, G.L.; Sawatzky, D.L. & Bonham-Carter, G.F. 2010. Incorporating Expert Knowledge - New Fuzzy logic tools in ArcGIS 10. *ArcUser Spring 2010, p. 8-13. Disponível em: <<https://www.esri.com/news/arcuser/0410/files/Fuzzylogic.pdf>> Acesso em: 5 out. 2019.*

- Ready, P.J. & Wintz, P.A. 1973. Information extraction, SNR improvement and data compression in multispectral imagery. *IEEE Transactions on Communications*, COM-21(10):1123-1131.
- Roest, W. R.; Verhoef, J. & Pilkington, M. 1992, Magnetic interpretation using the 3D analytic signal. *Geophysics*, 57(1):116–125. doi: 10.1190/1.1443174
- Saadi, A. 1995. A geomorfologia da Serra do Espinhaço em Minas Gerais e de suas margens. *Geonomos*, 3(1):41-63. doi: 10.18285/geonomos.v3i1.215.
- Salem, S.M. & El Gammal, E.A. 2015. Iron ore prospection East Aswan, Egypt, using remote sensing techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 18:195–206. doi: 10.1016/j.ejrs.2015.04.003
- Salgado, A.A.R.; Santos, L.J.C. & Paisani, J.C. 2019. *The Physical Geography of Brazil: Environment, Vegetation and Landscape*. Springer Nature, 222 p. ISBN 978-3-030-04333-9
- SAM - Sul Americana de Metais S.A. 2013. *Mapa Geológico-Estrutural Integrado com Sondagem e Topografia - Bloco 8, Alvarás de Pesquisa 831.028/2007-831.029/2007*. SAM - Sul Americana de Metais S.A. Relatório Técnico.
- Thompson, D.T. 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47:31-37.
- USGS - United States Geological Survey. 2018. Landsat 8 Data Users Handbook. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>> Acesso em: 3 abr. 2019.
- Vilela, F.T. 2010. *Caracterização de metadiamictitos ferruginosos da Formação Nova Aurora (Grupo Macaúbas, Orógeno Araçuaí) a Oeste de Salinas, MG*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, 135 p.
- Vilela, F.T.; Pedrosa-Soares, A.C.; Carvalho, M.T.N.; Arimatéia, R.; Santos, E. & Voll, E. 2014. Metalogênese da Faixa Araçuaí: o Distrito Ferrífero Nova Aurora (Grupo Macaúbas, norte de Minas Gerais) no contexto dos recursos minerais do Orógeno Araçuaí. In: SILVA, M.G.; ROCHA NETO, M.B.; JOST, H. & KUYUMJIAN, R.M. (org.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. CPRM. p. 415-430.
- Viveiros, J.F.M.; Sá, E.L.; Vilela, O.V.; Santos, O.M.; Moreira, J.M.P.; Holder-Neto, F. & Vieira, V.S. 1978. Geologia dos vales dos rios Peixe Bravo e Alto Vacaria, norte de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Anais, Recife, SBG, v. 1:243, p. 243-254.
- Voll, E.; Silva, A.M. & Pedrosa-Soares, A.C. 2020. 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*, 101:102604. doi: 10.1016/j.jsames.2020.102604
- Wilford, J.R.; Bierwirth, P.N. & Craig, M.A. 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2):201–216.
- Zacchi, E.N.P.; Silva, A.M. & Rolim, V.K. 2010. Análise integrada de dados multifonte e sua aplicação no mapeamento geológico das formações ferríferas da Serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(4):643-656. doi: 10.1590/S0102-261X2010000400009

6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A integração de dados de levantamentos aerogeofísicos e imagens de sensoriamento remoto tem sido cada vez mais usada para investigar alvos geológicos, especialmente em regiões onde as coberturas superficiais escondem amplamente rochas frescas e depósitos minerais. Mapeamento geológico e prospecção mineral são áreas de aplicação que aprimoram cada vez mais o uso de métodos e técnicas de integração de dados, oferecendo várias opções de acordo com objetivos e necessidades distintas em relação aos dados disponíveis (Yousefi *et al.*, 2019). Para rastrear rochas ricas em ferro ocultas por coberturas lateríticas sobre as chapadas em escalas distintas, foram gerados vários produtos com base em dados de pesquisas aerogeofísicas magnéticas e gamaespectrométricas e imagens do satélite Landsat 8. Como os dados magnéticos indicam locais relativamente profundos com concentrações anômalas de rochas ricas em ferro, também foram utilizados dados de gamaespectrometria e sensoriamento remoto para refinar os produtos de integração, melhorando as respostas na superfície sobre as chapadas. A grande extensão das coberturas lateríticas pode mascarar a resposta superficial de rochas ricas em ferro na gamaespectrometria e nas imagens Landsat 8, pois esses sensores coletam apenas a resposta do material da superfície. No entanto, existem afloramentos dispersos de rochas ricas em ferro preservadas da lateritização nas chapadas, auxiliando na verificação dos modelos de integração. Além disso, os hidróxidos de ferro são geralmente mais concentrados em lateritas desenvolvidas sobre camadas de metadiamicrito ferruginoso e formação ferrífera diamictítica. Portanto, o uso de gamaespectrometria e dados de sensoriamento remoto, integrados aos dados magnéticos, revelou-se eficaz na redução da ambiguidade da informação, porque os dados magnéticos fornecem informações de níveis relativamente mais profundos, mas, por si só, não são suficientes para delimitar com mais confiabilidade os locais favoráveis para a ocorrência de rochas ricas em ferro em superfícies de chapadas.

Os produtos aqui apresentados foram gerados por interpretação visual e processamento de imagem digital. Depois, foram selecionados aqueles que possuem as melhores características necessárias para criar os modelos de favorabilidade, de acordo com o objetivo da pesquisa. Como para o problema definido (ou seja, pesquisar rochas ricas em ferro escondidas sob as chapadas amplamente cobertas

por laterita) não é adequada a aplicação de limites rígidos entre as classes de dados, os dados selecionados foram combinados com ferramentas baseadas em lógica *Fuzzy* para produzir modelos orientados pelo conhecimento (Yousefi *et al.*, 2019; Porwal *et al.*, 2015; Porwal *et al.*, 2003; An *et al.*, 1991, Bonham-Carter, 1994). O resultado são modelos integrados que mostram os locais mais favoráveis para a ocorrência de rochas ricas em ferro nas regiões estudadas (Figura 3.13, Figura 3.14).

Os modelos finais mostram a distribuição, tamanho e forma das áreas mais favoráveis para a concentração de rochas ricas em ferro, tanto para a área regional como para a área de estudo local (Figura 3.13, Figura 3.14).

Os modelos apresentados mostram correspondências consistentes entre os principais locais favoráveis para concentrações de rochas ricas em ferro e os dados utilizados para validação, como informações de campo verificadas pelos autores, descrições compiladas da literatura e afloramentos localizados em mapas geológicos, registros oficiais de licenças de prospecção de ferro, bem como furos de sondagem executados pela SAM (na área de estudo local). As integrações de dados mostram que, mesmo considerando as grandes chapadas cobertas por lateritas ferruginosas, é possível identificar e delimitar locais favoráveis para a concentração de rochas ricas em ferro sob esses platôs. Portanto, os procedimentos apresentados para integração de dados e modelos resultantes são úteis para melhorar a resolução e a precisão do mapeamento geológico na região focada e para ajudar na criação de modelos de prospecção mais detalhados aplicados ao Membro Riacho Poções e suas extensões ocultas pelas coberturas lateríticas sobre chapadas. Esse modelo também pode ser aplicado a diversas situações em outras regiões, não apenas na área de estudo e em diversas escalas. Por ser uma modelagem orientada pelo conhecimento, pode ser adaptada para vários propósitos, de acordo com objetivos distintos de pesquisa e necessidades de trabalho. É um modelo que evolui da compreensão do fenômeno a ser estudado, o que o torna versátil para muitas outras abordagens.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelsalam M.G., Stern R.J., Berhane W.G. 2000. Mapping gossans in arid regions with Landsat TM and SIR-CIX-SAR images: The Beddaho alteration zone in northern Eritrea. *Journal of African Earth Sciences*, **30**(4):903-916. doi: 10.1016/S0899-5362(00)00059-2
- An P., Moon W.M., Rencz A.N. 1991. Application of *Fuzzy* set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, **27**(1):1–11.
- Andrade L.B., Silva A.M., Souza Filho C.R. 2014. Nickel prospective modelling using *Fuzzy* logic on Nova Brasilândia Metasedimentary Belt, Rondônia, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, **32**(3):419-431. doi: 10.22564/rbgf.v32i3.533
- ANM - Agência Nacional de Mineração. 2019. Sistema de Informações Geográficas da Mineração – SIGMINE. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/ao-minerador/sigmine>. Acesso em: 12 abr. 2019.
- Bonham-Carter G.F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with G/S*. Ontario. Pergamon Press. 398 p. ISBN: 0 08 041867 8
- Boyle R.W. (ed.) 1982. *Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits*. Developments in Economic Geology, Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, vol. 16, 498 p. ISBN: 978-0-444-42070-1
- Carneiro C.C., Crósta A.P., Silva A.M., Barros C.E.M. 2008. Identification of mafic-ultramafic rocks using *Fuzzy* logic classification of airborne geophysical data in the Anapu-Tuerê region, Brazilian Amazon. SPIE 7106, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XII, 710601, Cardiff, United Kingdom, *Proceedings*, **7110**:1-8. doi: 10.1117/12.802135
- Chavez Jr. P.S. & Kwarteng A.Y. 1989. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **55**(3):339-348.
- Chung C.F. & Fabbri A.G. 1993. The representation of geoscience information for data integration. *Natural Resources Research*, **2**(2):122-139. doi: 10.1007/BF02272809
- CODEMIG-SEDE-CPRM. 2006. *Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais, Programa 2005/2006. Área 8: Minas Novas – Riacho dos Machados – Espinosa. Relatório final do levantamento e processamento de dados magnetométricos e gamaespectrométricos*. Vol. 1 – Texto técnico. Belo Horizonte. 201 p.
- Crósta A.P., Bicho C.P., Ferreira J.F.F. 1994. Image processing applied to aerogeophysics: an important tool for geological mapping and exploration in the Brazilian Amazon. 10th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing - *Anais*, San Antonio, Texas, **2**:539-550.
- Dentith M. & Mudge S.T. 2014. Electrical & electromagnetic methods. In: Dentith M. & Mudge S.T. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge University Press pp. 235-350. doi: 10.1017/cbo9781139024358.007. ISBN: 9780521809511
- Ducart D.F., Silva A.M., Toledo C.L.B., Assis L.M. 2016. Mapping iron oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion imagery from the Serra Norte iron deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, **46**(3):331-349. doi: 10.1590/2317-4889201620160023
- ESRI - Environmental Systems Research Institute. 2016. How Principal Components works. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-principal-components-works.htm#>. Acesso em: 25 out.2019
- Feizi F. & Mansouri E. 2013. Introducing the Iron Potential Zones Using Remote Sensing Studies in South of Qom Province, Iran. *Open Journal of Geology*, **3**(4):278-286. doi: 10.4236/ojg.2013.34032

- Fonseca E. 1993. Depósito aurífero de Riacho dos Machados, norte de Minas Gerais: hidrotermalismo, deformação e mineralização associada. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, 179 p.
- Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). 1997. *Projeto Espinhaço em CD-ROM*. CODEMIG, Belo Horizonte, 2693 p. and 23 maps.
- Guimarães M.L.V., Grossi Sad J.H., Fonseca E. 1997. *Geologia da Folha Francisco Sá, Minas Gerais*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 223-313.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma-ray spectrometry data*. Viena, 173 pp.
- Jensen J.R. 2005. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. 3rd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 621p. ISBN: 0-13-145361-0
- Kileen PG. 1979. Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration – application and interpretation. Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores. Geological Survey of Canada, *Economic Geologic Report*, **31**:163–229. doi: 10.4095/106037
- King L.C. 1956. Geomorfologia do Brasil Oriental. *R. Bras. Geogr.*, **18**:147-265.
- Leväniemi H., Hulkki H., Tiainen M. 2017. SOM guided Fuzzy logic prospectivity model for gold in the Häme Belt, southwestern Finland. *Journal of African Earth Sciences*, **128**:72-83. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2016.10.010
- Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. 2004. *Remote Sensing and Image Processing*. 5th ed. John Wiley and Sons. ISBN: 0-471-15227-7
- Lopes-Silva L. & Knauer L.G. 2011. Posicionamento estratigráfico da Formação Bandeirinha na região de Diamantina, Minas Gerais: Grupo Costa Sena ou Supergrupo Espinhaço? *Geonomos*, **19**(2):131-151. doi: 10.18285/geonomos.v19i2.49
- Madeira J.S., Bedidi A., Cervelle B., Pouget M., Flay N. 1997. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: The application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia. *International Journal of Remote Sensing*. **18**(13):2835-2852. doi: 10.1080/014311697217369
- Mario A.F.G. 2015. *Caracterização geofísica e geológica das formações ferríferas do Grupo Macaúbas - MG*. PhD Thesis. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 315 p.
- Motta J.G. & Faria Jr. I.R. 2016. A mineral potential mapping approach for supergene nickel deposits in southwestern São Francisco Craton, Brazil. Uma abordagem de mapeamento de potencial mineral dos depósitos de níquel supérgeno do sudeste do Cráton do São Francisco. *Brazilian Journal of Geology*, **46**(2):261-273. doi: 10.1590/2317-4889201620160021
- Mourão M.A.A. & Grossi Sad J.H. 1997. *Geologia da Folha Padre Carvalho, Minas Gerais*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 315-418.
- Mourão M.A.A., Grossi Sad J.H., Fonseca E. 1997. *Geologia da Folha Janaúba, Minas Gerais*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 9-123.
- Nabighian M.N., Grauch V.J.S., Hansen R.O., LaFehr T.R., Li Y., Peirce J.W., Phillips J.D., Ruder M.E. 2005. The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, **70**(6):33-61. doi: 10.1190/1.2133784

- Nabighian, M.N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section - Its properties and use for automated anomaly interpretation: *Geophysics*, **37**(3): 507–517. doi: 10.1190/1.1440276
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. 2019. Magnetic Field Calculators. Disponível em: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/>. Acesso em: 15/7/2019.
- Ourhzif Z., Algouti A., Algout. A., Hadach F. 2019. Lithological mapping using Landsat 8 OLI and ASTER multispectral data in Imini-Ounilla District south high atlas of Marrakech. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **XLII-2/W13**:1255-1262. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1255-2019
- Paradella W., Bignelli P.A., Veneziani P., Pietsch R.W., Toutin T. 1997. Airborne and spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) integration with Landsat TM and gamma ray spectrometry for geological mapping in a tropical rainforest environment, the Carajás Mineral Province, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, **18**(7):1483-1501. doi: 10.1080/014311697218232
- Paula-Santos G.M., Babinski M., Kuchenbecker M., Caetano-Filho S., Trindade R.I., Pedrosa-Soares A.C., 2015. New evidence of an Ediacaran age for the Bambuí Group in southern São Francisco craton (eastern Brazil) from zircon U–Pb data and isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, **28**(2):702-720. doi: 10.1016/j.gr.2014.07.012
- Pedrosa-Soares A.C. 1997. *Geologia da Folha Araçuaí*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 715-852.
- Pedrosa-Soares A.C., Babinski M., Noce C., Martins M., Queiroga G., Vilela F.T. 2011. The Neoproterozoic Macaúbas Group (Araçuaí orogen, SE Brazil) with emphasis on the diamictite formations. In: Arnaud E., Halverson G. P., Shields-Zhou G. (eds). The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations. *Geological Society of London, Memoir*, **36**(49):523-534. doi: 10.1144/M36.49.
- Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Wiedemann C.M., Pinto C.P. 2001. The Araçuaí–West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. *Precambrian Research*, **110**:307-323. doi: 10.1016/S0301-9268(01)00174-7
- Porwal A., Carranza E.J.M., Hale M. 2003. Knowledge-driven and data-driven *Fuzzy* models for predictive mineral potential mapping. *Nat. Resour. Res.* **12**:1–25. doi: 10.1023/A:1022693220894
- Porwal A., Deb Das R., Chaudhary B., Gonzalez-Alvarez I., Kreuzer O. 2015. *Fuzzy* inference systems for prospectivity modeling of mineral systems and a case-study for prospectivity mapping of surficial Uranium in Yeelirrie Area, Western Australia. *Ore Geol. Rev.* **71**:839–852. doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.10.016
- Raines G.L., Sawatzky D.L., Bonham-Carter G.F.. 2010. Incorporating Expert Knowledge - New *Fuzzy* logic tools in ArcGIS 10. *ArcUser Spring 2010*, p. 8-13. Disponível em: <https://www.esri.com/news/arcuser/0410/files/Fuzzylogic.pdf>. Acesso em: 5/10/2019
- Ready P.J. & Wintz P.A. 1973. Information extraction, SNR improvement and data compression in multispectral imagery. *IEEE Transactions on Communications*, **COM-21**(10):1123-1131.
- Roest, W. R., J. Verhoef, M. Pilkington, 1992, Magnetic interpretation using the 3D analytic signal: *Geophysics*, **57**(1):116–125. doi: 10.1190/1.1443174
- Roque N.C., Grossi Sad J.H., Noce C.M., Fonseca E. 1997. *Geologia da Folha Rio Pardo de Minas, Minas Gerais*. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords., eds.). Projeto Espinhaço Em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais. p. 125-221.

- Saadi A. 1995. A geomorfologia da Serra do Espinhaço em Minas Gerais e de suas margens. *Geonomos*, **3**(1):41-63. doi: 10.18285/geonomos.v3i1.215.
- Saadi A. & Pedrosa-Soares A.C. 1990. Um graben cenozóico no Médio Jequitinhonha, MG. In: I Workshop sobre Neotectônica e Sedimentação Cenozóica Continental no Sudeste Brasileiro, 1990, Belo Horizonte. SBG Núcleo MG, 1990. 1º Workshop sobre Neotectônica e Sedimentação Cenozóica Continental no Sudeste Brasileiro, *Boletim do Núcleo Minas Gerais da Sociedade Brasileira de Geologia*, v. 11, p. 101-124.
- Salem S.M. & El Gammal E.A. 2015. Iron ore prospecting East Aswan, Egypt, using remote sensing techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, **18**:195–206. doi: 10.1016/j.ejrs.2015.04.003
- Salgado, A.A.R.; Santos, L.J.C. Paisani, J.C. 2019. *The Physical Geography of Brazil: Environment, Vegetation and Landscape*. Springer Nature, 222 p. ISBN 978-3-030-04333-9
- SAM - Sul Americana de Metais S.A. 2013. *Mapa Geológico-Estrutural Integrado com Sondagem e Topografia - Bloco 8, Alvarás de Pesquisa 831.028/2007-831.029/2007*. SAM - Sul Americana de Metais S.A. Relatório Técnico.
- Schowengerdt R.A. 2007. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Third Edition, Elsevier 558 p. ISBN 13: 978-0-12-369407-2 ISBN 10: 0-12-369407-8
- Souza M.E., Martins M.S., G.N. Queiroga, Leite M., R.G. Oliveira, Dussin I., Pedrosa-Soares A.C. 2019. Paleoenvironment, sediment provenance and tectonic setting of Tonian basal deposits of the Macaúbas basin system, Araçuaí orogen, southeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 96 (2019) 102393. doi:10.1016/j.jsames.2019.102393
- Thompson, D.T. 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, **47**:31-37.
- Uchoa E.B. 2016. *Integração de dados multifonte com base em Lógica Fuzzy na modelagem prospectiva do depósito de ferro de Quiterianópolis/CE*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 118 p.
- USGS - United States Geological Survey. 2004. *Reprocessing by the GLCF. (1, 3, 30) Arc Second SRTM Elevation, Reprocessed to GeoTIFF*. College Park, Maryland: The Global Land Cover Facility. Version 1.0.
- USGS - United States Geological Survey. 2017a. *Landsat Missions*. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov>. Acesso em: 10/7/2017.
- USGS - United States Geological Survey. 2017b. *Landsat 8 Surface Reflectance Code (Lasrc) Product*. Disponível em: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lasrc_product_guide.pdf. Acesso em: 13/10/2017.
- USGS - United States Geological Survey. 2018. *Landsat 8 Data Users Handbook*. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>. Acesso em 3/4/2019.
- USGS - United States Geological Survey. 2019. *Spectral Characteristics Viewer*. Disponível em: <https://landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer>. Acesso em: 2/5/2019.
- Vilela F.T., Pedrosa-Soares A.C., Carvalho M.T.N., Arimatéia R., Santos E., Voll E. 2014. Metalogênese da Faixa Araçuaí: o Distrito Ferrífero Nova Aurora (Grupo Macaúbas, norte de Minas Gerais) no contexto dos recursos minerais do Orógeno Araçuaí. In: Silva M.G., Rocha Neto M.B., Jost H., Kuyumjian R.M. (org.) 2014. *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. CPRM. p. 415-430.
- Vilela, F.T. 2010. *Caracterização de metadiamicritos ferruginosos da Formação Nova Aurora (Grupo Macaúbas, Orógeno Araçuaí) a Oeste de Salinas, MG*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, 135 p.

- Viveiros J.F.M., Sá E.L., Vilela O.V., Santos O.M., Moreira J.M.P., Holder-Neto F., Vieira V.S. 1978. Geologia dos vales dos rios Peixe Bravo e Alto Vacaria, norte de Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife. SBG, *Anais*, v. 1:243, p. 243-254.
- Voll, E.; Silva, A.M. & Pedrosa-Soares, A.C. 2020. 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*, 101:102604. doi: 10.1016/j.jsames.2020.102604
- Warren L.V., Quaglio F., Riccomini C., Simões M.G., Poiré D.G., Strikis N.M., Anelli L.E., Strikis P.C. 2014. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil *Cloudina* reveals an old proto-Gondwana seaway. *Geology*, 42(5):391-394. doi: 10.1130/G35304.1
- White K., Walden J., Drake N., Eckardt F., Settle J. 1997. Mapping the iron oxide content of dune sands, Namib Sand Sea, Namibia, using Landsat Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*. 62:30-39. doi: 10.1016/S0034-4257(97)00068-0
- Wilford J.R., Bierwirth P.N., Craig M.A. 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2):201–216.
- Yousefi M., Kreuzer O.P., Nykänen V., Hronsky J.M.A. 2019. Exploration information systems – A proposal for the future use of GIS in mineral exploration targeting. *Ore Geology Reviews*, 111 (2019) 103005. doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.103005
- Zacchi E.N.P., Silva A.M., Rolim V.K. 2010. Análise integrada de dados multifonte e sua aplicação no mapeamento geológico das formações ferríferas da Serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG. *Revista Brasileira de Geofísica*. 28(4):643-656. doi: 10.1590/S0102-261X2010000400009