

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

DENIS KLISMAM SANTOS BARBOSA

Gravimetria por satélite aplicada à pesquisa mineral: estudo de casos no Brasil

São Paulo

2017

DENIS KLISMAM SANTOS BARBOSA

Gravimetria por satélite aplicada à pesquisa mineral: estudo de casos no Brasil

Versão Original

Tese apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para obtenção de título de Mestre em Ciências.

Área de concentração:

Métodos Potenciais

Orientador:

Prof. Dr. Eder Cassola Molina

São Paulo

2017

Nome: BARBOSA, Denis Klismam Santos

Título: Gravimetria por satélite aplicada à pesquisa mineral: estudo de casos no Brasil

Tese apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para obtenção de título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: _____

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Profa. Dra. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Profa. Dra. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Eder Molina pela companhia nos anos de graduação e mestrado, sempre disposto a atender prontamente quaisquer dúvidas e solicitações.

À Ph. D. Carla Braitenberg e ao M.Sc. Tomasso Pivetta por sanar dúvidas referentes ao começo da dissertação, sempre com paciência e prontidão.

Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro durante o curso de mestrado.

RESUMO

BARBOSA, Denis Klismam Santos. **Gravimetria por satélite aplicada à pesquisa mineral: estudo de casos no Brasil**. 2017. 129 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

O Brasil está entre os países que mais possuem riquezas minerais no mundo, tendo inclusive o ouro um papel importante em sua história nos séculos XVII e XVIII. Desde então, novas descobertas ocorreram e estudos geológicos e geofísicos foram realizados por universidades, empresas privadas e públicas. Destes estudos, dominam aqueles de escala local, com o objetivo de identificar novos depósitos minerais em detrimento dos estudos regionais, com objetivo de estudar a gênese e evolução da província. De modo a contribuir com os estudos regionais, o presente trabalho analisou a aplicabilidade dos modelos que utilizam dados de gravimetria por satélite e determinou qual modelo apresenta melhores resultados para estudo nas seguintes províncias minerais brasileiras: Alta Floresta, Carajás, Quadrilátero Ferrífero e Tapajós. Os modelos estudados foram: EGM96 (grau/ordem 360), EGM2008 (grau/ordem 2190/2159), EGM2008upto360 (grau/ordem 360), EIGEN-CG03C (grau/ordem 360) e go_cons_gcf_2_tim_r4 (grau/ordem 240), todos acessíveis de forma gratuita pelo portal ICGEM (International Centre for Global Earth Models).

O efeito isostático de cargas litosféricas e sua contribuição para a anomalia Bouguer foram modelados com base na equação de deflexão da litosfera. De modo a removê-lo, a modelagem foi realizada para toda a América do Sul e seu efeito foi subtraído da anomalia Bouguer de cada província mineral estudada, resultando na grandeza denominada “residual da anomalia Bouguer”. Tanto os mapas de anomalia Bouguer como os mapas de residual da anomalia Bouguer foram comparados entre si e com dados terrestres, quando disponíveis na literatura, a fim de averiguar eventuais artefatos de processamento dos modelos que poderiam ser interpretados erroneamente. Perfis representativos também foram comparados, de modo a observar a amplitude relativa das anomalias de forma quantitativa.

Os resultados obtidos mostram que há uma boa correlação em escala regional entre dados de satélite e terrestres nas províncias Alta Floresta e Quadrilátero Ferrífero para todos os modelos estudados, fato que corrobora a aplicabilidade destes dados para a metodologia utilizada.

O modelo que se mostrou mais adequado tanto em nível de detalhamento quanto em identificação de anomalias de menor comprimento de onda foi o EGM2008 – principalmente para a província do Quadrilátero Ferrífero. Para o restante das províncias houve diferenças pouco significativas entre os modelos EGM2008 e EGM2008upto360, indicando que para estas regiões as anomalias associadas a grau e ordem superiores a 360 pouco influenciam nos mapas de residual e de anomalia Bouguer em escala regional. O modelo que menos se adequa ao estudo nas áreas estudadas é o go_cons_gcf_2_tim_r4, provavelmente porque, além de possuir os menores grau e ordem dentre os modelos estudados, é o único que utiliza apenas dados de satélite em sua elaboração.

A partir dos dados de anomalia Bouguer e, principalmente, de residual da anomalia Bouguer é possível observar correlação sistemática entre altos anômalos e a localização das minas para as províncias de Quadrilátero Ferrífero e Alta Floresta. Essa correlação vista a partir de dados de acesso gratuito permite definir regiões de interesse exploratório em escala local, melhorando a eficiência e eficácia dos recursos já escassos na exploração mineral brasileira.

Palavras-chave: Gravimetria por satélite. Províncias minerais brasileiras. Alta Floresta. Carajás. Tapajós. Quadrilátero Ferrífero. EGM96. EGM2008. EIGEN-CG03C. go_cons_gcf_2_tim_r4.

ABSTRACT

BARBOSA, Denis Klismam Santos. **Satellite gravimetry applied to mineral research: study of cases in Brazil**. 2017. 129 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

Brazil is one of the countries that possess most mineral riches in the world: gold, for example, has played an important role in its history in the seventeenth and eighteenth centuries. Since then, new discoveries have occurred and geological and geophysical studies have been carried out by universities, private and public companies. These studies are mainly of local scale, focusing on identifying new mineral deposits instead of regional studies, which focus on the genesis and evolution of the province. In order to contribute to the regional studies, the present work analyzed the applicability of the models that use satellite gravimetry data and determined which model presents the best results in the following Brazilian mineral provinces: Alta Floresta, Carajás, Quadrilátero Ferrífero and Tapajós. The models studied were EGM96 (degree / order 360), EGM2008 (degree / order 2190/2159), EGM2008upto360 (degree / order 360), EIGEN-CG03C (degree / order 360) and go_cons_gcf_2_tim_r4 (degree / order 240), each of them accessible by ICGEM (International Center for Global Earth Models) portal.

The isostatic effect of the lithospheric loads and their contribution to the Bouguer anomaly were modeled based on the lithosphere deflection equation. In order to remove it, the modeling was carried out for the entire South America territory and its effect was subtracted from the Bouguer anomaly of each studied mineral province, resulting in the residual Bouguer anomaly. Both Bouguer and the residual Bouguer anomalies were compared to each other and to terrestrial data – when available in the literature – to ascertain possible processing artifacts that could be misinterpreted. Representative profiles were also compared in order to observe the relative amplitude of the anomalies quantitatively.

The results show that, for example, there is a good regional correlation between satellite and terrestrial data in the Alta Floresta and Quadrilátero Ferrífero provinces

for all the models studied, which corroborates the applicability of these data to the methodology used.

The most appropriated model regarding the level of detail and the identification of shorter wavelength anomalies was the EGM2008 – specially for the Quadrilátero Ferrífero province. For the remaining provinces there were slight differences between the EGM2008 and EGM2008upto360 models, indicating that for these regions anomalies associated with degree and order higher than 360 have little influence to the Bouguer and residual Bouguer anomalies on a regional scale. The model least suitable for the studied areas is go_cons_gcf_2_tim_r4, probably because, in addition to having the lowest degree and order among the studied models, it is the only one that uses only satellite data in its elaboration.

From the Bouguer anomaly and specially from residual Bouguer anomaly it is possible to observe systematic correlation between anomalous highs and the location of the mines for the provinces of Quadrilátero Ferrífero and Alta Floresta. This correlation, based on free access data, allows the definition of regions of exploratory interest at a local scale, improving the efficiency and effectiveness of resources already scarce in Brazilian mineral exploration.

Keywords: Satellite gravimetry. Brazilian mineral provinces. Alta Floresta. Carajás. Tapajós. Quadrilátero Ferrífero. EGM96. EGM2008. EIGEN-CG03C. go_cons_gcf_2_tim_r4.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição dos dados de gravimetria terrestre utilizados no modelo EGM96. A legenda indica o projeto de origem dos dados e a quantidade de pontos utilizados no modelo EGM96.....	6
Figura 2: Desvio padrão dos dados de gravimetria terrestres utilizados no modelo EGM96.	6
Figura 3: Cobertura dos dados de superfície. As regiões em branco não apresentam dados de superfície. Os <i>data sets</i> são explicados no decorrer do texto..	7
Figura 4: Dados que foram utilizados no modelo EGM2008. a) Disponibilidade dos dados. b) Identificação da fonte do dado.....	9
Figura 5: Modelo utilizado para exemplificação do conceito de Topografia Equivalente, no qual a coluna d'água de espessura H tem seu efeito isostático igualado ao de uma camada de crosta de espessura B	13
Figura 6: Caso de deflexão da placa litosférica devido a uma carga aplicada qa	15
Figura 7: Esquema utilizado no cálculo da contribuição da deflexão da litosfera para uma superfície com variação lateral de densidade.	18
Figura 8: Esquema geral do sistema endomagmático e seus depósitos.	26
Figura 9: Sistema metalogênico hidrotermal básico. A intrusão ígnea aquece a água (encaixante e meteórica), gerando um sistema convectivo.....	28
Figura 10: Subsistemas hidrotermais. a) Subsistema vulcânico aquático. b) Subsistema vulcânico emerso e/ou plutônico superficial. c) Subsistema plutônico profundo.	30
Figura 11: Esquema simplificado do processo mineralizador metamórfico com relação ao grau metamórfico e etapas por qual passa.....	32
Figura 12: Principais tipos de depósitos e rochas associados a cada etapa do processo de mineralização e a cada grau de metamorfismo. Destaca-se a importância dos depósitos de ouro em zonas de cisalhamento de alto grau.....	33
Figura 13: O sistema mineralizador sedimentar, seus subsistemas e principais tipos de depósitos associados.....	35

Figura 14: Províncias e distritos minerais presentes no Brasil selecionados por Bizzi et al. (2003).....	38
Figura 15: Áreas de interesse de exploração mineral no Brasil, segundo Matos et al. (2009).	40
Figura 16: Mapa geológico simplificado da Província Mineral Alta Floresta e ocorrências de ouro nesta.....	41
Figura 17: Mapa geológico simplificado da Província Carajás associado às explorações minerais.	43
Figura 18: Mapa geológico simplificado da Província do Quadrilátero Ferrífero. Estão demonstrados os minerais explorados, depósitos e principais cidades da região. Pontos pretos representam minas de ferro, vermelhos representam minas de ouro e azuis representam minas de manganês.....	45
Figura 19: Mapa geológico simplificado da Província Mineral Tapajós e suas ocorrências de ouro.....	47
Figura 20: Diagrama de aquisição e processamento dos dados.	49
Figura 21: Parâmetros utilizados na aquisição dos dados pelo site do ICGEM.	50
Figura 22: Topografia equivalente calculada para a área de estudos. Os dados de topografia originais foram retirados do ICGEM utilizando o sistema de referência EGM2008.	51
Figura 23: Anomalia Bouguer obtida no portal ICGEM para o modelo a) EGM96 b) EGM2008 c) EGM2008upto360 d) EIGEN-CG03C e) go_cons_gcf_2_tim_r4.....	52
Figura 24: Ajuste por MMQ para os dados de anomalia Bouguer calculada pelo: a) EGM96. Erro de 8 mGal (LEMOINE et al. 1997). Coeficiente angular (A) igual a $-0,100630 \pm 0,000010$ e R^2 igual a 0,9398. b) EGM2008. Coeficiente angular obtido igual a $-0,100216 \pm 0,000054$ e R^2 vale 0,9284. c) EGM2008upto360. Coeficiente angular obtido vale $-0,100319 \pm 0,000051$ e R^2 vale 0,9370. d) EIGEN-CG03C. Erro de 5 mGal (REIGBER et al. 2006). Coeficiente angular obtido igual a $-0,100684 \pm 0,000006$ e R^2 vale 0,9410. e) go_cons_gcf_2_tim_r4. Erro de 5 mGal (BRAITENBERG, 2015). Coeficiente angular obtido vale $-0,100427 \pm 0,000006$ e o R^2 vale 0,9403.....	56

Figura 25: Mapa de residual da anomalia Bouguer para o modelo **a)** EGM96 **b)** EGM2008 **c)** EGM2008upto360 **d)** EIGEN-CG03C **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4.59

Figura 26: Anomalia Bouguer para a província Alta Floresta pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos representam a localização das minas da província Valores superiores ao máximo da escala estão em branco.....64

Figura 27: Perfis A-B dos mapas de anomalia Bouguer de cada modelo para a província Alta Floresta.....66

Figura 28: Residual da anomalia Bouguer para a província Alta Floresta pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos representam a localização das minas da província. Valores superiores ao máximo da escala estão em branco.....67

Figura 29: Perfis A-B dos mapas de residual da anomalia Bouguer de cada modelo para a província Alta Floresta.....69

Figura 30: Anomalia Bouguer para a província de Alta Floresta oriundo de um convênio entre CPRM e Observatório Nacional.....69

Figura 31: Anomalia Bouguer para a província Carajás pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores em preto.71

Figura 32: Perfis A-B dos mapas de anomalia Bouguer de cada modelo para a província Carajás.74

Figura 33: Perfis C-D dos mapas de anomalia Bouguer de cada modelo para a província Carajás.75

Figura 34: Residual da anomalia Bouguer para a província Carajás pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco.76

Figura 35: Perfis A-B dos mapas de residual da anomalia Bouguer de cada modelo para a província Carajás.....	78
Figura 36: Perfis C-D dos mapas de residual da anomalia Bouguer de cada modelo para a província Carajás.....	79
Figura 37: Anomalia Bouguer para a província do Quadrilátero Ferrífero pelo modelo a) EGM96. b) EGM2008. c) EGM2008upto360. d) EIGEN-CG03C. e) go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores ao mínimo em preto.	81
Figura 38: Anomalia Bouguer do sul do cráton do São Francisco, com destaque para a província do Quadrilátero Ferrífero. O intervalo de contorno é de 20 mGal...	84
Figura 39: Perfis A-B dos mapas de anomalia Bouguer de cada modelo para a província do Quadrilátero Ferrífero.	85
Figura 40: Perfis C-D dos mapas de anomalia Bouguer de cada modelo para a província do Quadrilátero Ferrífero.	86
Figura 41: Residual da anomalia Bouguer para a província do Quadrilátero Ferrífero pelo modelo a) EGM96. b) EGM2008. c) EGM2008upto360. d) EIGEN-CG03C. e) go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores ao mínimo em preto.....	87
Figura 42: Perfis A-B dos mapas de residual da anomalia Bouguer de cada modelo para a província do Quadrilátero Ferrífero.....	90
Figura 43: Perfis C-D dos mapas de residual da anomalia Bouguer de cada modelo para a província do Quadrilátero Ferrífero.....	91
Figura 44: Anomalia Bouguer para a província Tapajós pelo modelo a) EGM96. b) EGM2008. c) EGM2008upto360. d) EIGEN-CG03C. e) go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores ao mínimo em preto.....	92
Figura 45: Perfis A-B dos mapas de anomalia Bouguer de cada modelo para a província Tapajós.....	95

Figura 46: Anomalia Bouguer para a província Tapajós pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores à escala de cor são mostrados em branco e inferiores em preto.96

Figura 47: Perfis C-D dos mapas de anomalia Bouguer de cada modelo para a província Tapajós.99

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. GRAVIMETRIA POR SATÉLITE	3
2.1. <i>Earth Gravitational Model</i> 1996 (EGM96)	5
2.2. EIGEN-CG03C	7
2.3. <i>Earth Gravitational Model</i> 2008 (EGM2008)	8
2.4. Dados Derivados do Satélite GOCE	10
2.4.1. <i>Direct approach</i> (DIR)	10
2.4.2. <i>Time-wise Approach</i> (TIM)	11
2.4.3. <i>Space-wise Approach</i> (SPW)	11
3. METODOLOGIA	13
3.1. Topografia Equivalente	13
3.2. Deflexão da Litosfera Devido a uma Carga	14
3.3. Compensação das Cargas – Anomalias Ar Livre e Bouguer	17
3.4. Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)	21
3.5. Considerações para Aplicação dos Métodos	22
4. METALOGENIA	25
4.1. Sistema Endomagmático	25
4.1.1. Processo Mineralizador do Sistema Endomagmático	26
4.2. Sistema Hidrotermal	27
4.2.1. Processo Mineralizador do Sistema Hidrotermal	27
4.2.2. Subsistemas Hidrotermais	28
4.3. Sistema Metamórfico	29
4.3.1. Processo Mineralizador do Sistema Metamórfico	30
4.4. Sistema Mineralizador Sedimentar	33
4.4.1. Processos mineralizadores dos subsistemas sedimentares	34
4.4.1.1. Processo mineralizador do subsistema continental	34

4.4.1.2. Processo mineralizador do subsistema marinho	34
4.4.1.3. Processo mineralizador do subsistema hidatogênico	34
4.5. Metalogenia e Gravimetria	35
5. PROVÍNCIAS MINERAIS	37
5.1. Províncias Minerais do Brasil	37
5.2. Província Alta Floresta	39
5.3. Província de Carajás.....	41
5.2. Província do Quadrilátero Ferrífero	44
5.4. Província Tapajós	46
6. PROCESSAMENTO, RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
6.1. Aquisição dos dados.....	49
6.2. Topografia Equivalente	50
6.3. Dados de anomalia Bouguer	50
6.4. Aplicação do MMQ.....	55
6.5. Mapas de Residual da Anomalia Bouguer.....	58
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESIDUAIS DAS PROVÍNCIAS	63
7.1. Província Alta Floresta	63
7.2. Província Carajás.....	70
7.3. Província do Quadrilátero Ferrífero	80
7.4. Província do Tapajós.....	91
8. CONCLUSÕES	101
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105

1. INTRODUÇÃO

A produção mineral do Brasil é, sem sombra de dúvidas, invejável: é o maior produtor mundial de nióbio, segundo em minério de ferro, manganês e bauxita, dentre outras posições de destaque. Contudo, os investimentos em pesquisas e exploração são inversamente proporcionais à importância da produção do país no mundo e se configuram entre os menores: vizinhos como Chile e Peru investiram aproximadamente 67% a mais em exploração do que o Brasil em 2012, sendo essa percentagem ainda maior se comparado com os maiores investidores: Austrália – conhecida por grandes investimentos em levantamentos geofísicos –, e Canadá, com respectivamente 500 e 630% a mais de investimentos do que o Brasil (IBRAM, 2012).

O pouco investimento se reflete em uma baixa cobertura nacional: cerca de apenas 30% do território conta com levantamentos geológicos para estudos mineralógicos e, além disso, são geralmente dados privados (IBRAM, 2012).

O presente trabalho inspira-se em Braitenberg (2015). Neste, a autora utiliza dados de anomalia Bouguer obtidos por satélite, realizando a remoção do efeito isostático e aplicando uma nova técnica que, utilizando localização de minas em exploração aos dados gravimétricos, ajuda a definir regiões potencialmente produtoras de minério de ouro no Zimbábue.

A maior vantagem e potencialidade mostrada pela técnica de Braitenberg (2015) é a de que os dados de gravimetria por satélite são encontrados gratuitamente no portal *International Centre for Global Earth Models* (ICGEM). O portal disponibiliza dados e modelos utilizando informações de diversos satélites, possibilitando a averiguação prévia de regiões de interesse com custo muito baixo para futuros investidores, podendo estes escolher diferentes modelos de dados disponibilizados no portal.

Objetivando comparar e constatar diferenças entre os principais destes modelos a fim de determinar qual mais se adequa à pesquisa mineral no Brasil, utilizar-se-ão dados de satélites lançados desde 1986, como o GEOSAT (*Geodetic/Geophysical Satellite*), até 2009, como o satélite GOCE (*Gravity Field and Ocean Circulation Explorer*). Para o estudo foram escolhidos os seguintes modelos originados de gravimetria por satélite e terrestre: EGM96, EGM2008,

EGM2008upto360, EIGEN-CG03C e go_cons_gcf_2_tim_r4, cada qual com suas características descritas adiante.

As regiões estudadas no presente trabalho foram definidas com base do projeto 'Áreas de Relevante Interesse Mineral para Metais' da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) (MATOS et al. 2009) a partir do qual, dentre diversas províncias minerais brasileiras com presença e exploração comprovadas, foram escolhidas as províncias de Alta Floresta, Carajás, Quadrilátero Ferrífero e Tapajós.

Além de averiguar qual modelo se adequa melhor à pesquisa mineral nestas províncias, analisar-se-á quais anomalias são comuns a todos, eliminando assim a possibilidade de anomalias geradas por processamento dos dados na geração dos modelos, visto que cada modelo utiliza um certo conjunto de dados e uma técnica de processamento.

2. GRAVIMETRIA POR SATÉLITE

O grande avanço da gravimetria por satélite começou com a corrida espacial na Guerra Fria, destacando-se o lançamento do Sputnik pela extinta União Soviética em 1957.

Poucos anos depois, em 1966, aparece o primeiro modelo de gravimetria por satélite: o *Standard Earth 1* (SE-1), documentado por Lundquist e Veis (1966).

O termo “modelo” corresponde, como o nome indica, a uma modelagem dos dados adquiridos para determinar os funcionais do campo gravitacional terrestre. Cada modelo conta com diversos parâmetros: satélite que adquiriu os dados, o período no qual os dados foram obtidos, a presença ou não de dados terrestres na modelagem, o intervalo entre os dados (grade), o modo pelo qual foi processado, o grau e ordem máximos que abrangem, dentre outros.

O grau e ordem máximos que os modelos abrangem são dois dos parâmetros mais importantes, pois definem a resolução espacial do modelo. A modelagem tem por base a resolução da Equação de Laplace, válida para o potencial gravitacional V no exterior de massas atrativas (equação 1). A resolução desta equação em harmônicos esféricos é dada pela equação (2).

$$\nabla^2 V = 0 \quad (1)$$

$$V(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=-n}^n C_{nm} Y_{nm}(\theta, \lambda) \right] \quad (2)$$

Sendo:

$$Y_{nm}(\theta, \lambda) = P_{n|m|} \cdot (\cos\theta) \cdot \begin{cases} \cos m\lambda & \text{se } m \geq 0 \\ \sin |m|\lambda & \text{se } m < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Nestas fórmulas, tem-se que:

- r é a distância geocêntrica;
- θ é a co-latitude geocêntrica;
- λ é a longitude;
- G é a constante gravitacional ($6,67408 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$);
- M é a massa da Terra ($5,9742 \times 10^{24} \text{ kg}$);
- a é um fator escalar, normalmente igual ao semi-eixo maior de um elipsoide de referência adotado;

- C_{nm} são os coeficientes do harmônico esférico;
- $P_{n|m}$ são os Polinômios Associados de Legendre;
- n é o grau até o qual se calcula a expansão;
- m é a ordem até o qual se calcula a expansão.

Como é impossível definir C_{nm} para grau e ordem infinitos, os modelos são truncados em determinados grau e ordem. Antigamente, grau e ordem eram baixos por limitações computacionais e de aquisição do satélite. Atualmente, devido aos grandes avanços tecnológicos, grau e ordem maiores podem ser alcançados. Para exemplificar, em 1970 o modelo KOCH70 alcançou grau e ordem iguais a 8, enquanto que em 2008 e 2014 alcançou-se o grau de 2159 e 2190 com os modelos EGM2008 e EIGEN-6C4, respectivamente.

Altos valores de grau e ordem, nestes três últimos casos, são alcançados devido à junção de dados de satélite com dados de gravimetria terrestre, marinha e aerotransportada, de espaçamento gradativamente menor e com menor erro de medida.

Outro elemento de grande importância para os dados de gravimetria por satélite é a sua disponibilidade: quase todos os modelos são disponibilizados gratuitamente pelo portal ICGEM (*International Centre for Global Earth Models*) via *Calculation Service* <<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>> (acesso em 05 mar. 2015). Pelo portal é possível obter dados de topografia, anomalias ar livre e Bouguer para cada modelo, além de definir regiões do globo da qual se quer realizar o *download* dos dados, o intervalo entre os dados, filtros gaussianos para minimizar efeitos indesejáveis no truncamento dos modelos, dentre outros. Todos os modelos estudados no presente trabalho foram calculados por meio deste portal.

No que tange à utilização dos dados, os modelos podem ser: *satellite-only* – utilizam em sua modelagem apenas os dados obtidos pelo satélite; e *integrados* – modelos são gerados utilizando-se tanto os dados obtidos pelo satélite quanto dados de gravimetria terrestre, marinha e aerogravimetria.

A Tabela 1 mostra os modelos que foram escolhidos. A escolha se deu com base em grau e ordem máximos alcançados e se utilizam ou não dados terrestres.

Cada modelo e as características do respectivo satélite que adquiriu os dados serão discutidos nas sessões seguintes.

Tabela 1: Dados principais dos dados de satélite escolhidos para estudo.

Modelo	Ano de lançamento	Satélites	Grau e ordem	Dados utilizados
EGM96	1996	GEOSAT, TOPEX/POS EIDON e ERS—1	360x360	Satélite, terrestre
EIGEN-CG03C	2005	CHAMP, GRACE	360x360	Satélite, terrestre
EGM2008	2008	GRACE	2190x2159	Satélite, terrestre
EGM2008upto 360	2008	GRACE	360x360	Satélite, terrestre
go_cons_gcf_2_tim_r4	2013	GOCE	250x250	Satélite

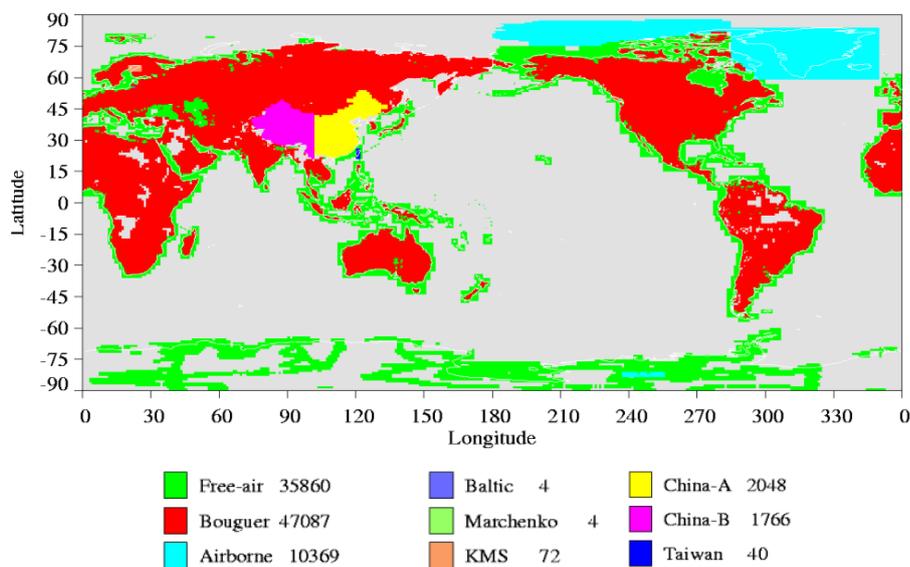
Fonte: Barbosa (2017).

2.1. Earth Gravitational Model 1996 (EGM96)

O modelo EGM96 foi desenvolvido pelo *Goddard Space Flight Center* (GSFC) da NASA, pela *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA) e pela Universidade do Estado de Ohio (EUA). No seu desenvolvimento foram utilizados dados de altimetria dos satélites TOPEX (*Topography Experiment*), GEOSAT (*Geodetic Satellite*) e ERS-1 (*European Remote-Sensing Satellite-1*), dados terrestres dos arquivos do NIMA em 30' x 30', anomalias da gravidade obtidas por altimetria do GEOSAT e ERS-1 (em regiões onde o GEOSAT não cobria) e dados de mais de 20 outros satélites (LEMOINE et al. 1997). Dados terrestres são considerados aqueles obtidos por terra, navios e aerolevantamentos.

Todos os dados e procedimentos resultaram em um modelo de grau e ordem máximos iguais a 360. A distribuição dos dados terrestres utilizados pelo modelo é mostrada na Figura 1, juntamente com a quantidade de pontos utilizados e o projeto do qual foram retirados. O desvio padrão dos dados é mostrado na Figura 2, na qual observa-se uma grande variabilidade na América do Sul e África, regiões de pouco reconhecimento geofísico na época de elaboração do EGM96.

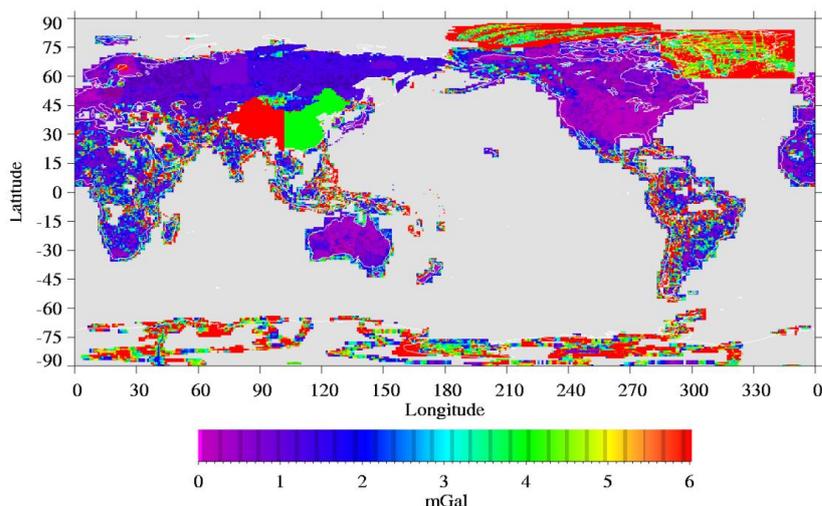
Figura 1: Distribuição dos dados de gravimetria terrestre utilizados no modelo EGM96. A legenda indica o projeto de origem dos dados e a quantidade de pontos utilizados no modelo EGM96.



Fonte: Lemoine et al. (1997, p. 3-25).

Diferentemente do que mostra a Figura 2, segundo Lemoine et al. (1997), o erro associado à anomalia Bouguer na América do Sul vai de 1 a 8 mGal e o erro associado à anomalia ar livre varia entre 5 a 15 mGal. O presente trabalho considerará, para fins práticos, um erro de anomalia Bouguer máximo de 8 mGal para todo o continente sul-americano.

Figura 2: Desvio padrão dos dados de gravimetria terrestres utilizados no modelo EGM96.



Fonte: Lemoine et al. (1997, p. 3-26).

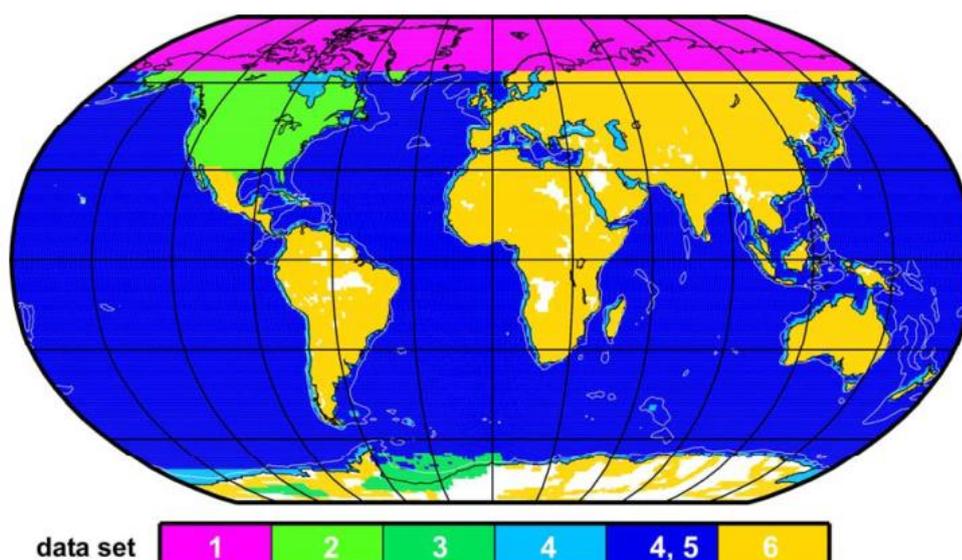
2.2. EIGEN-CG03C

O modelo EIGEN-CG03C engloba dados do satélite CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload*), GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) e dados terrestres. Possui grau e ordem máximos iguais a 360, com acurácia global estimada em 20 cm e 5 mGal para altura geoidal e anomalia Bouguer, sendo melhor nos oceanos e pior nos continentes devido à qualidade e distribuição dos dados terrestres disponíveis (REIGBER et al. 2006).

O satélite CHAMP foi lançado em órbita em julho de 2000 e em junho de 2003 sua missão foi finalizada, coletando dados por 860 dias. Já os satélites gêmeos GRACE foram lançados em órbita em março de 2002 e ainda estão em funcionamento. Os dados utilizados do GRACE por este modelo correspondem ao período entre agosto de 2002 e novembro de 2003, totalizando um período de aquisição de 200 dias não contínuos.

Os dados do modelo foram agrupados de tal forma que haja um ponto a cada intervalo de 30' x 30', exceto em regiões oceânicas, que possuem um ponto a cada célula de 1° x 1° (REIGBER et al. 2006). A Figura 3 ilustra a cobertura de dados de superfície utilizados e sua origem (*data set*).

Figura 3: Cobertura dos dados de superfície. As regiões em branco não apresentam dados de superfície. Os *data sets* são explicados no decorrer do texto.



Fonte: Reigber et al. (2006, p. 4).

A origem dos dados e sua legenda são (REIGBER et al. 2006):

- 1: *Arctic Gravity Project* (ArcGP), que cobrem regiões com latitudes maiores ou iguais a 64°N;
- 2: Anomalias da gravidade NRCan, cobrindo a América do Norte;
- 3: Anomalias da gravidade AWI e DO sobre duas pequenas regiões na Antártica e, no caso da AWI, adjacente à cobertura de gelo;
- 4: Anomalias da gravidade altimétricas sobre oceanos provenientes da NIMA, incluindo desvios padrão;
- 4,5: Ondulações do geóide sobre oceanos utilizando altimetria CLS01 *Sea Surface Heights* e *Sea Surface Topography* de simulações ECCO;
- 6: Anomalias da gravidade terrestres provenientes da NIMA (não encobertas pelas regiões 1 e 2) incluindo desvio padrão, com cobertura quase global, a exceção da Antártica e de pequenos vazios.

Vale observar que a América Latina possui regiões sem qualquer dado terrestre, sendo utilizados apenas os dados adquiridos pelo satélite.

2.3. Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)

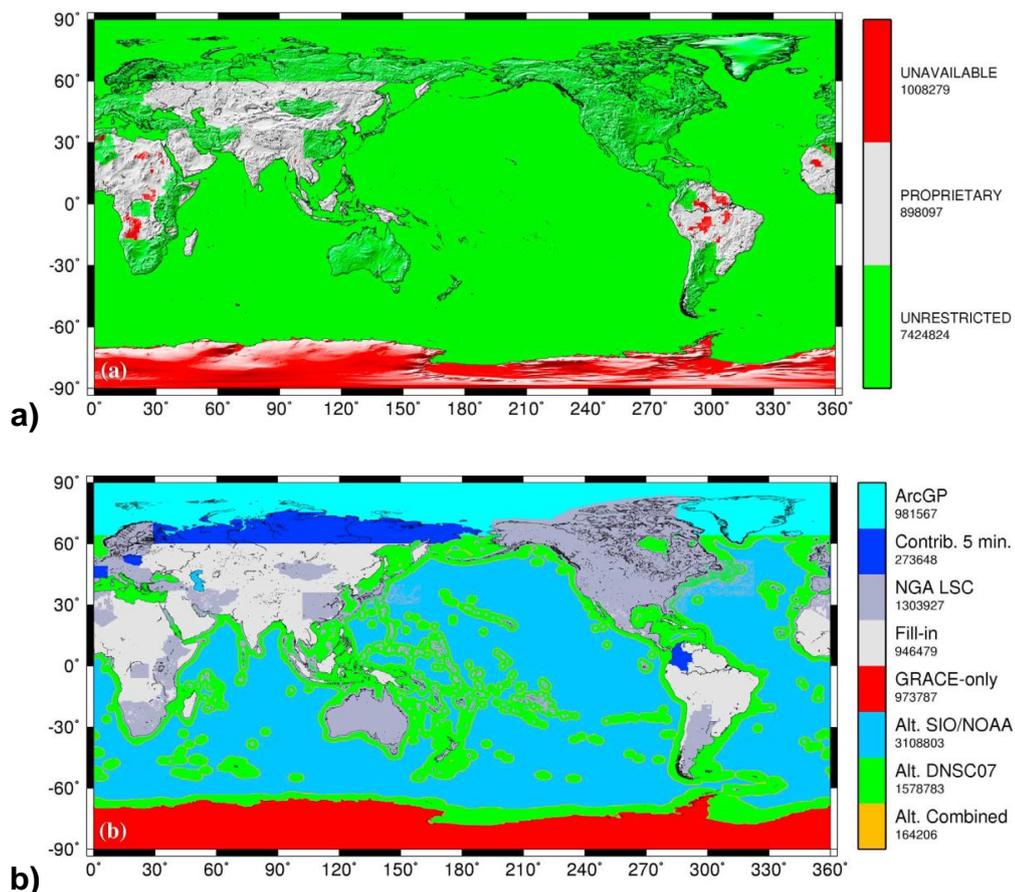
A versão mais atual do *Earth Gravitational Model* é baseada em dados do satélite GRACE, mais especificamente do modelo ITG-GRACE03S e em dados de anomalia ar livre média de espaçamento 5' x 5'. Foi o primeiro modelo a alcançar grau e ordem superiores à 2000, com exatos 2190x2159. Tal proeza só foi possível graças ao maior poder de processamento computacional, dados terrestres com menor espaçamento (grade), alto grau de homogeneidade na qualidade dos dados e boa cobertura global do satélite GRACE, de órbita quase polar (PAVLIS et al. 2012).

O modelo ITG-GRACE03S abrange dados do satélite GRACE adquiridos entre setembro de 2002 e abril de 2007, alcançando grau e ordem de 180. Os dados que preenchem grau e ordem de 180 a 2190/2159 variam entre as fontes ilustradas na Figura 4b, enquanto que a Figura 4a ilustra a disponibilidade dos dados.

No caso da Figura 4a, os dados irrestritos (*unrestricted*) são aqueles de acesso livre e com os quais foi possível obter uma grade de 5' x 5' (ou seja, dados a cada aproximadamente 9 km) na elaboração do modelo. Regiões em que não há dados ou que os dados são muito dispersos, de tal forma que não seja possível obter dados em

5' x 5', são mostradas em vermelho (*unavailable*). Já as regiões em cinza representam os dados proprietários (*proprietary*), cujo uso foi permitido apenas com grades de 15' x 15'. Neste caso, para se alcançar a resolução desejada foi implementada a técnica de cálculo de anomalias da gravidade implícitas por RTM (*Residual Terrain Model*). Segundo Pavlis et al. (2012), em uma comparação de espectro de potência entre dados da Austrália e EUA de boa qualidade observou-se que apenas após o grau 1650 é que há diferença significativa no espectro dos dados, de tal forma que a implementação corresponde bem à realidade e pouco afeta a qualidade do modelo.

Figura 4: Dados que foram utilizados no modelo EGM2008. **a)** Disponibilidade dos dados. **b)** Identificação da fonte do dado.



Fonte: Pavlis et al. (2012, p. 13).

Quanto à fonte dos dados (Figura 4b):

- ArcGP: dados do *Arctic Gravity Project*;
- Contrib. 5 min: dados cedidos para a elaboração do EGM2008 por organizações ou indivíduos;

- NGA LSC: dados da *National Geospatial-Intelligence Agency* processados com algoritmo de predição *Least Square Collocation*;
- *Fill-in* (preenchimento): dado de regiões sem adequada cobertura, nas quais dados em 30' x 30' do EGM96 foram preenchidos por dados computados por partes de baixo grau do EGM96S (dados apenas de satélite) acrescidos de coeficientes do potencial topográfico-isostático (mais detalhes em Lemoine et al. 1998, seções 7.2 e 8.3);
- GRACE-*only*: dados derivados apenas do satélite GRACE;
- Alt. SIO/NOAA: dados de anomalia da gravidade derivada de dados de altimetria por satélite do *Scripps Institution of Oceanography* em colaboração com a *National Oceanic and Atmospheric Administration*;
- Alt. DNSC07: dados de anomalia da gravidade derivada de dados de altimetria por satélite da *Danish National Space Center* do ano de 2007;
- Alt. Combined: os dados combinados de altimetria por satélite supracitados.

Vale destacar que o modelo EGM2008 conseguiu cobrir boa parte dos déficits da América Latina vistos nos modelos anteriores, em especial para o Brasil, embora ainda haja regiões sem dados (*unavailable*).

2.4. Dados Derivados do Satélite GOCE

O satélite GOCE (*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*) foi lançado em março de 2009 e teve sua missão finalizada em outubro de 2013. Pail et al. (2012) elaboraram os primeiros três modelos com base nos dados do satélite que se diferem quanto aos dados utilizados *a priori* e método de processamento dos dados. Os modelos passam por atualizações que são publicadas gratuitamente até hoje.

2.4.1. *Direct approach* (DIR)

É o método baseado na solução de mínimos quadrados para o problema inverso (mais detalhes em Pail et al., 2012, seção 4.1). Atualmente está na quinta geração (indicada por R5), cujos dados *a priori* utilizados são do modelo EIGEN-5C até grau e ordem iguais a 200. Atualmente o modelo alcança grau e ordem iguais a 300.

2.4.2. Time-wise Approach (TIM)

É o método que considera o gradiente gravitacional e observações da órbita terrestre como séries temporais medidas juntamente com a órbita do satélite (mais detalhes em Pail et al., 2012, seção 4.2). Atualmente está na quinta geração, porém no presente trabalho será utilizada a quarta geração (R4), pois para esta conhece-se o erro global da medida, de 5 mGal (BRAITENBERG, 2015). Não há dados *a priori*, sendo utilizados apenas aqueles adquiridos pelo satélite GOCE.

2.4.3. Space-wise Approach (SPW)

É o método que estima os coeficientes dos harmônicos esféricos do modelo geopotencial explorando a correlação espacial do campo gravitacional terrestre (mais detalhes em Pail et al., 2012, seção 4.3). Atualmente está na versão 4 (R4), com dados *a priori* do EGM2008 para baixos graus (PAIL et al., op. cit.), e com grau e ordem máximos iguais a 280.

Os três modelos de Pail et al. (2012) foram processados conforme os procedimentos descritos na seção 6 do presente trabalho e, embora elaborados por métodos distintos, todos os modelos apresentaram diferenças pouco significativas entre si para as regiões estudadas na dissertação. Por este motivo, foi escolhido apenas o modelo `go_cons_gcf_tim_r4` para estudo e comparação com os modelos EGM96, EGM2008, EGM2008upto360 e EIGEN-CG03C. A escolha baseou-se no fato deste ser um dos modelos *satellite-only* mais recentes disponíveis no portal ICGEM.

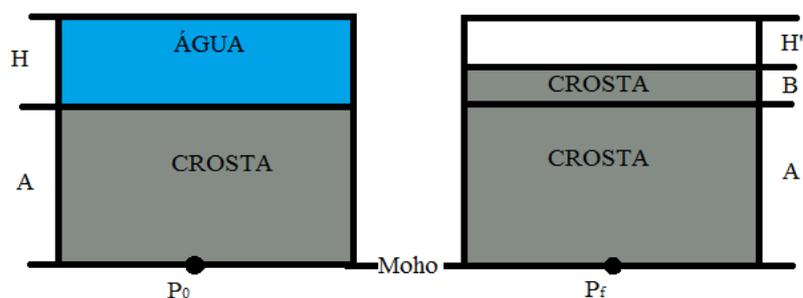
3. METODOLOGIA

A presente seção relaciona toda a teoria aplicada na dissertação. A princípio apresenta-se o conceito de Topografia Equivalente – responsável por equivaler o efeito isostático de uma coluna d’água por uma de crosta – e modela-o matematicamente (subseção 3.1). Em seguida modela-se, com base em Turcotte e Schubert (2010, p. 213-215), a deflexão da litosfera causada por cargas e sua contribuição na anomalia Bouguer (subseções 3.2 e 3.3). A penúltima etapa consiste na aplicação do Método dos Mínimos Quadrados (subseção 3.4) aos dados de Anomalia Bouguer em função da Topografia Equivalente de modo a definir o parâmetro final da modelagem. Após finalizada a modelagem, a última etapa consiste na remoção da contribuição da deflexão na anomalia Bouguer, resultando nos denominados mapas de “residual da anomalia Bouguer”, considerados como representante da geologia local.

3.1. Topografia Equivalente

O conceito de topografia equivalente consiste, como dito anteriormente, em substituir a coluna d’água em zonas oceânicas por uma camada equivalente de crosta oceânica de modo que o efeito isostático da nova camada de crosta seja equivalente ao da “extinta” coluna d’água com a crosta. Para exemplificar tem-se a Figura 5 e equações (4) e (5), que definem o conceito:

Figura 5: Modelo utilizado para exemplificação do conceito de Topografia Equivalente, no qual a coluna d’água de espessura H tem seu efeito isostático igualado ao de uma camada de crosta de espessura B .



Fonte: Barbosa (2017).

A pressão isostática em P_0 e P_f tem que ser igual:

$$P_0 = \rho_w H g + \rho_c A g$$

$$P_f = \rho_c B g + \rho_c A g$$

Obtém-se, por fim:

$$H' = H \left(\frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_c} \right) \quad (4)$$

Vale lembrar que o conceito de topografia equivalente só é utilizado em meios oceânicos. Para áreas com altitude positiva a topografia se mantém. Ou seja:

$$Topo_{equiv} = \begin{cases} topografia, & se\ topografia \geq 0 \\ topografia \left(\frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_c} \right), & se\ topografia < 0 \end{cases} \quad (5)$$

3.2. Deflexão da Litosfera Devido a uma Carga

O princípio recorrente quando se trata de estudos isostáticos é o de deflexão da litosfera devido a aplicação de uma carga, seja ela uma montanha (presença de cargas) ou um vale (ausência de cargas). Este fenômeno é descrito por:

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + F \frac{d^2 w}{dx^2} = q(x) \quad (6)$$

Sendo:

- D a rigidez flexural da litosfera;
- w a deflexão da litosfera;
- F a força aplicada horizontalmente;
- q é a força vertical por unidade de área.

Lembrando que:

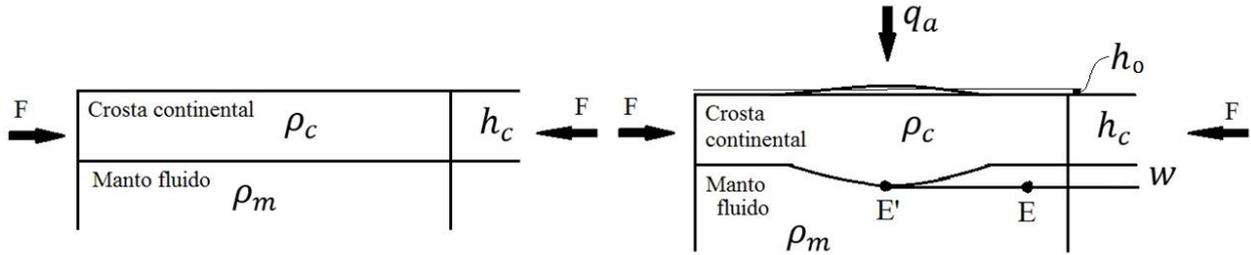
$$D = \frac{E h_e^3}{12(1-\nu^2)} \quad (7)$$

Com:

- E sendo o módulo de Young;
- ν sendo a razão de Poisson;
- h_e sendo a espessura elástica efetiva da placa.

A Figura 6 esquematiza a deflexão da litosfera continental devido a uma carga.

Figura 6: Caso de deflexão da placa litosférica devido a uma carga aplicada q_a .



Fonte: Barbosa (2017).

Neste caso, a carga aplicada q_a sofre ação do empuxo das camadas inferiores, sendo $q(x)$ a resultante derivada da diferença entre as pressões litostáticas da área intacta com a área deflexionada (pontos E e E', respectivamente) e com a própria carga aplicada, resultando em:

$$q(x) = q_a(x) - \{\rho_c h_c g + \rho_c w g + \rho_m h g - [\rho_c h_c g + \rho_m h g + \rho_m w g]\}$$

$$q(x) = q_a(x) - g w (\rho_m - \rho_c) \quad (8)$$

Unindo as equações (6) e (8) obtém-se:

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + F \frac{d^2 w}{dx^2} + g w (\rho_m - \rho_c) = q_a(x) \quad (9)$$

Uma forma de resolver esta equação é proposta por Turcotte e Schubert (2010, p. 213-215). Os autores consideram que a topografia seja periódica e dada por:

$$h = h_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \quad (10)$$

Sendo:

- h_0 a topografia máxima da região estudada;
- λ o comprimento de onda.

Como $h_0 \ll h_c$ (Figura 6), pode-se negligenciar a influência topográfica na espessura. Portanto a carga na litosfera correspondente à topografia (q_a) será:

$$q_a(x) = \rho_c g h = \rho_c g h_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \quad (11)$$

Considerar-se-á, no presente caso, que não haja forças horizontais atuantes – ou seja, $F = 0$ (equação 9), resultando em:

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + g w (\rho_m - \rho_c) = \rho_c g h_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \quad (12)$$

A carga é periódica e, por consequência, a deflexão também será, e possuirá o mesmo comprimento de onda da carga. Em termos matemáticos:

$$w = w_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \quad (13)$$

Unindo-se (12) e (13), tem-se:

$$w_0 = \frac{h_0}{\frac{\rho_m}{\rho_c} - 1 + \frac{D}{\rho_c g} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4} \quad (14)$$

É possível, por fim, fazer algumas inferências quanto ao comprimento de onda e os fatores a ele associados. Se:

$$\lambda \ll 2\pi \left(\frac{D}{g\rho_c} \right)^{0,25}$$

Então:

$$w_0 = 0$$

Ou seja, se a carga for pouco extensa e as características físicas da crosta forem altas (rigidez flexural D e densidade ρ_c), não haverá qualquer deflexão da litosfera. Caso contrário:

$$\lambda \gg 2\pi \left(\frac{D}{g\rho_c} \right)^{0,25}$$

E a equação (14) resultará em:

$$w_0 = \frac{\rho_c h_0}{\rho_m - \rho_c} \quad (15)$$

Em outras palavras, caso o comprimento de onda seja muito longo, a topografia será completamente compensada e a amplitude da deflexão será dada por (15).

3.3. Compensação das Cargas – Anomalias Ar Livre e Bouguer

É possível aferir a contribuição da deflexão (compensação isostática) de cargas a partir das anomalias ar livre e Bouguer. Para tanto, Turcotte e Schubert (2010) recorrem à fórmula de anomalia Bouguer:

$$g_y = 2\pi G \int_0^h \rho(y) dy \quad (16)$$

Ou, para uma topografia com altitude H e densidade ρ_c :

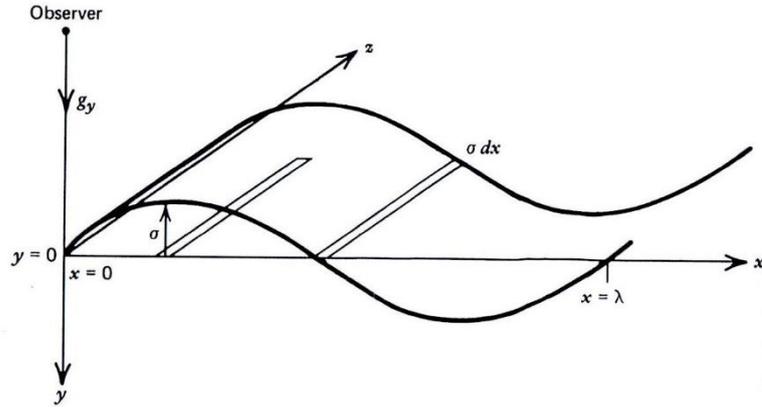
$$g_y = 2\pi G \rho_c H \quad (17)$$

Sendo que y corresponde à direção vertical e é positivo no sentido da superfície ao centro da Terra.

A equação (16) é válida apenas para situações em que o observador está imediatamente acima do corpo causador da anomalia e que sua distância com relação ao corpo seja bem menor do que a espessura da camada e das variações horizontais de densidade e, para averiguar a compensação, é de interesse que possam haver variações horizontais de densidade e que a distância observador-corpo possa ser também compatível com a espessura da camada. Para tanto, considerar-se-á o ilustrado na Figura 7, na qual admite-se que a massa do corpo é concentrada em uma camada de espessura $y = 0$. A massa por área é dada por:

$$\sigma = \lim_{h \rightarrow 0} \int_0^h \rho(y) dy \quad (18)$$

Figura 7: Esquema utilizado no cálculo da contribuição da deflexão da litosfera para uma superfície com variação lateral de densidade.



Fonte: Turcotte e Schubert (2010, p. 214).

A camada tende ao infinito nas direções $z \rightarrow \pm\infty$ e a densidade superficial da massa é dada na direção x como sendo periódica:

$$\sigma = \sigma_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \quad (19)$$

Sendo σ_0 a amplitude da variação superficial de densidade e λ é o comprimento de onda.

Para $y = 0$, logo acima da camada superficial, a componente vertical gravitacional é dada pela equação da anomalia Bouguer, ou seja, une-se as equações (19) e (16) e obtém-se:

$$g_y = 2\pi G \sigma_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \quad (20)$$

Lembrando que o potencial gravitacional V satisfaz a equação de Laplace em regiões fora da distribuição de massa e que:

$$g_y = -\frac{\partial V}{\partial y} \quad (21)$$

Então:

$$\frac{\partial^2 g_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g_y}{\partial y^2} = 0 \quad (22)$$

Resolvendo a equação de Laplace para as condições de contorno:

- $g_y(y = 0) = 2\pi G\sigma_0 \text{sen}\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$;
- $g_y(y \rightarrow \infty) = 0$

Obtém-se:

$$g_y = 2\pi G\sigma_0 \text{sen}\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) e^{2\pi y/\lambda} \quad (23)$$

Analisando em termos de anomalia ar livre, há duas contribuições:

1. A da topografia:

Neste caso, considera-se que a topografia é senoidal e da mesma forma que a equação (10), de modo que sua contribuição será dada pela união das equações (10) e (17):

$$\Delta g_{topo} = 2\pi G\rho_c h_0 \text{sen}\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (24)$$

2. A da descontinuidade de Mohorovičić

A deflexão da Mohorovičić (Moho) é a mesma da litosfera, já que esta é considerada como uma mudança composicional incorporada à litosfera. Sua densidade por área é dada pela união das equações (14) e (19):

$$\begin{aligned} \sigma &= (\rho_c - \rho_m)w \\ \sigma &= (\rho_c - \rho_m)w_0 \text{sen}\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \\ \sigma &= \frac{-(\rho_m - \rho_c)h_0}{\frac{\rho_m}{\rho_c} - 1 + \frac{D}{\rho_c g} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4} \text{sen}\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \end{aligned} \quad (25)$$

O termo σ_0 vale, portanto:

$$\sigma_0 = \frac{-(\rho_m - \rho_c)h_0}{\frac{\rho_m}{\rho_c} - 1 + \frac{D}{\rho_c g} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4} \quad (26)$$

Unindo as equações (23) e (26), e considerando que a profundidade média da deflexão da descontinuidade de Moho seja b_m , tem-se a contribuição da deflexão da litosfera para a anomalia ar livre Δg_{moho} :

$$\Delta g_{moho} = - \frac{2\pi G h_0 (\rho_m - \rho_c) e^{2\pi b_m / \lambda}}{\frac{\rho_m}{\rho_c} - 1 + \frac{D}{\rho_c g} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4} \text{sen} \left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (27)$$

A equação (27) relaciona a contribuição da deflexão causada por uma carga para a anomalia ar livre. Como a anomalia Bouguer é obtida removendo-se apenas o efeito das massas topográficas de topografia maior do que zero (equação 17), a contribuição da Moho está presente em ambas as anomalias.

Considerando que:

$$\lambda \gg \left[\frac{D}{(\rho_m - \rho_c)g} \right]^{0,25}$$

E que o comprimento de onda seja muito maior que a espessura da Moho, isto é:

$$\lambda \gg b_m$$

Obtém-se a relação da contribuição da Moho para as anomalias ar livre e Bouguer:

$$\Delta g_{moho} = -2\pi G \rho_c h_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (28)$$

Retomando o conceito de Topografia Equivalente (equação 5) e a equação (10) tem-se que:

$$\Delta g_{moho} = -2\pi G \rho_c \text{Topo}_{equiv} \quad (29)$$

A equação (29) é, por fim, um método de possível cálculo do efeito gravimétrico de uma deflexão da litosfera. Sabendo disso, é possível removê-lo dos dados segundo

a equação (30), onde $g_{Bouguer}$ é a anomalia Bouguer obtida pelos modelos de gravimetria por satélite escolhidos e $\Delta g_{Residual}$ é a doravante denominada residual da anomalia Bouguer, considerada como sendo resultante da geologia local.

$$\Delta g_{Residual} = g_{Bouguer} - \Delta g_{moho} \quad (30)$$

Utilizar-se-á no cálculo da Δg_{moho} o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) seguindo a equação (31), onde o coeficiente A (equação 32) será o parâmetro obtido pelo método.

$$\Delta g_{moho} = A \cdot Topo_{equiv} \quad (31)$$

$$A = -2\pi G\rho_c \quad (32)$$

3.4. Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)

Recorrente em meios estatísticos e experimentais, o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) visa minimizar os desvios entre o dado real e o dado a ser ajustado (equação 33), ajustando-os a uma reta com coeficientes angular e linear, sendo no presente trabalho utilizado apenas o coeficiente angular (equação 34).

$$\sum_{i=1}^N (y_i - y_a) \approx \text{mínimo} \quad (33)$$

Onde:

- y_i é o dado real na coordenada y;
- N é a quantidade de pares (x,y) com que se trabalha;
- y_a é estimativa obtida pela reta que será ajustada pelo modelo. É dada, no presente caso, por:

$$y_a = Ax_i \quad (34)$$

Sendo x_i o dado no eixo das abscissas, representando, no caso, os dados de Topografia Equivalente.

Segundo a equação (31), o coeficiente linear é igual a zero. O coeficiente angular A é, então, calculado a partir de:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i y_i)}{N(\sum_{i=1}^N x_i^2)} \quad (35)$$

O desvio padrão do termo A é dado por:

$$\sigma_A = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2} \sigma_i \quad (36)$$

Sendo σ_i o desvio padrão do respectivo y_i .

Há outros parâmetros obtidos pelo MMQ, e dentre eles está o coeficiente de determinação (R^2). É um parâmetro que indica a adequação do ajuste e é dado por:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_a - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_a - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^N (y_a - y_i)^2} \quad (37)$$

Quanto mais próximo de 1 está o coeficiente de determinação, mais adequado será o ajuste para a dispersão dos dados estudados.

A diferença entre o dado real y_i e o calculado a partir da reta ajustada y_a é chamada de residual (equação 38) e sua interpretação mudará conforme finalidade do trabalho no qual se aplica o método. No presente caso, os dados residuais são considerados como aqueles originários da geologia local.

$$y_R = y_i - y_a \quad (38)$$

3.5. Considerações para Aplicação dos Métodos

Como visto, a relação entre a contribuição da Moho para a anomalia Bouguer, considerando as condições propostas, é linear e sem coeficiente linear (equação 29). O ajuste por MMQ é então realizado com dados de anomalia Bouguer em função dos dados de topografia equivalente, de tal forma que a diferença entre os dados originais e os calculados pela reta ajustada é chamada de 'residual da anomalia Bouguer', considerada como sendo originária da geologia local. O residual é calculado ponto-a-ponto, ou seja, em cada coordenada que haja dado a equação (30) é aplicada.

Devido ao fato de a teoria não indicar a existência de um coeficiente linear (equação 32), a aplicação do MMQ realizada tem como pressuposto que ele seja nulo. Discussão e interpretações do valor do coeficiente angular serão discutidas em etapas futuras do presente trabalho.

4. METALOGENIA

A metalogenia é a área da geologia que trata da gênese e evolução de depósitos minerais, sejam eles exploráveis economicamente ou não. É uma área de grande abrangência, complexidade e variedade: abrangente, pois os depósitos passam por diversos processos geológicos; complexa, pois necessita do estudo multidisciplinar de toda a geologia (geoquímica, geologia estrutural, metamorfismo, vulcanismo, sedimentologia, entre outras); e variável pois possui grande abrangência temporal, passando por vários processos, não necessariamente concomitantes, que culminam em novos depósitos ou remodelagem.

Há quatro sistemas metalogenéticos principais, cada qual com seu processo mineralizador:

1. Sistema endomagmático;
2. Sistema hidrotermal;
3. Sistema metamórfico;
4. Sistema sedimentar.

4.1. Sistema Endomagmático

Trata-se do sistema que abrange os magmas, câmaras magmáticas e sua relação com a superfície terrestre. Este é um processo, em geral, correspondente ao início da consolidação da crosta, período no qual esta era menos espessa e facilitava a chegada desses magmas na superfície.

O supracitado período geológico corresponde ao éon Arqueano (3,85 a 2,5 Ga) e à era Paleoproterozoica (2,5 Ga a 540 Ma), sob o contexto de formação de grandes blocos cratônicos e amalgamentos.

Os depósitos minerais são formados dentro das câmaras magmáticas e são controlados: pela composição do magma que, por sua vez, era controlada pela composição do manto e da astenosfera; e pelo material com o qual o magma entra em contato no caminho até a superfície.

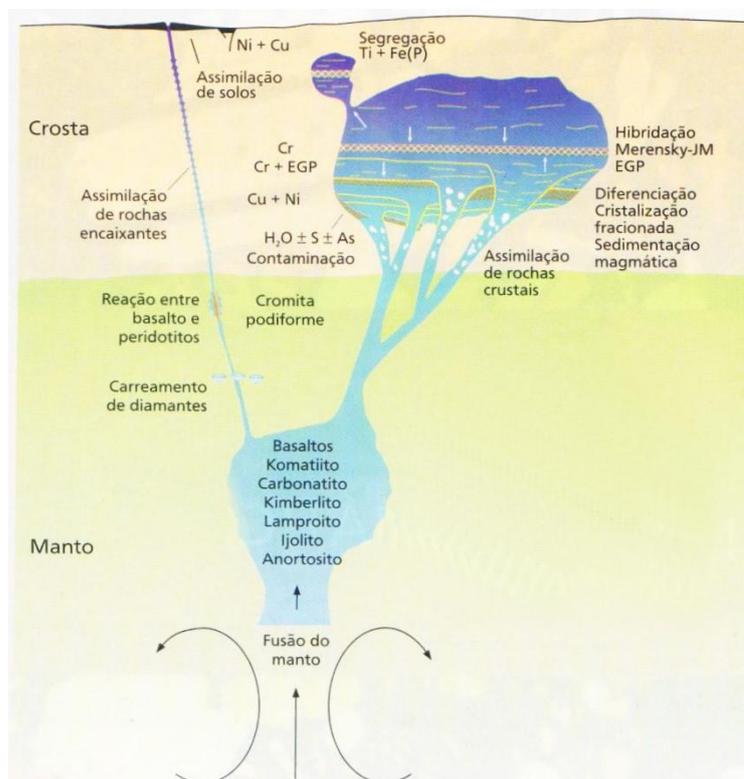
4.1.1. Processo Mineralizador do Sistema Endomagmático

Os processos mineralizadores, ou seja, processos que geram a concentração de minerais, são:

- Novos fluxos de magma: novos fluxos de magma podem ter diferentes composições e, por isso, geram depósitos minerais diferenciados;
- Cristalização fracionada: trata-se da ordem de solidificação dos minerais presentes no magma conforme queda de temperatura e/ou pressão. Cada mineral cristaliza em determinada temperatura, formando depósitos característicos;
- Diferenciação: trata-se da “deposição” dos minerais já cristalizados no fundo da câmara magmática;
- Influência da composição dos agentes externos: pode ocorrer por fluidos meteóricos (aqueles que são de fora do sistema mineralizador) e/ou contato com a crosta.

A Figura 8 apresenta um esquema didático do sistema endomagmático e seus processos mineralizadores.

Figura 8: Esquema geral do sistema endomagmático e seus depósitos.



4.2. Sistema Hidrotermal

É todo sistema alimentado essencialmente por água, esteja ela já presente no sistema ou externa a ele (água meteórica). Ocorre em todas as etapas de ascensão do magma até a superfície, inclusive quando não a alcança e, por isso, está presente em zonas crustais e até mantélicas.

Sua gênese é associada primeiramente a uma intrusão ígnea, com temperaturas superiores a 200°C, que se aloja na litosfera. A intrusão gera uma pluma hidrotermal constituída por água proveniente das rochas encaixantes e aquecida pelo corpo ígneo. Com a ascensão a água diminui a temperatura e tende a descender, sendo reaquecida pela fonte térmica e volta ao movimento ascendente, gerando assim uma convecção.

4.2.1. Processo Mineralizador do Sistema Hidrotermal

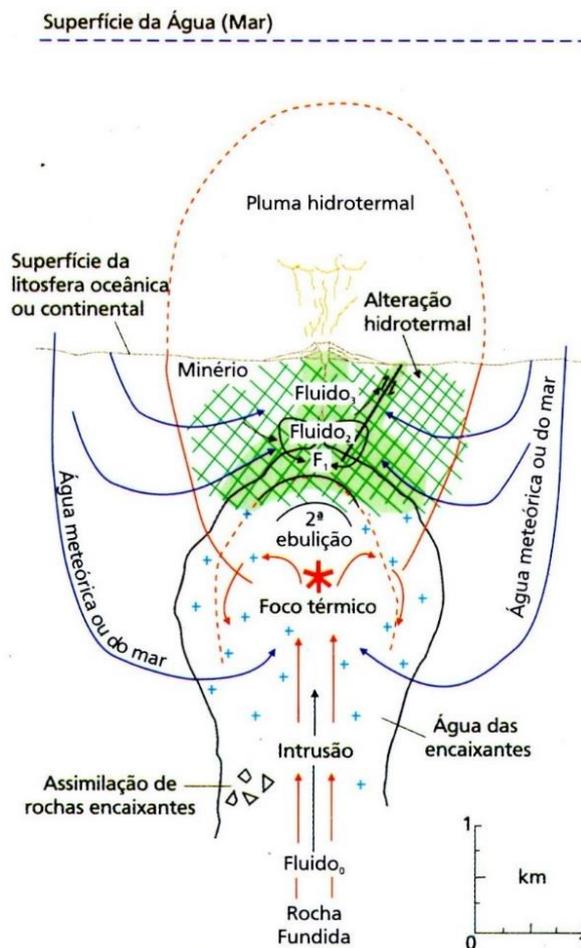
O processo mineralizador é aquele associado ao movimento convectivo da água e sua contaminação por água meteórica e pela rocha encaixante. Ocorre por diversas etapas descritas a seguir e esquematizadas pela Figura 9:

1. Primeira ebulição: é a etapa correspondente ao momento em que a pressão hidrostática supera a litostática, liberando assim o fluido aquoso do magma (Fluido₀);
2. Este líquido, associado ao magma, entra em contato com as águas meteóricas e rochas encaixantes, contaminando-o e fazendo com que sofra condensação. A condensação gera segregação em fase líquida (F₁) e fase vapor. Esta etapa é chamada de “segunda ebulição”;
3. A fase líquida condensada lixivia (processo de perda de minerais pela passagem de água em grande pressão e/ou volume) a rocha encaixante enquanto se mistura com a água meteórica presente e segue em um movimento descendente (Fluido₂);
4. A fase vapor, por sua vez, ascende e é contaminada pela rocha encaixante e por água meteórica, havendo uma nova segregação de fase líquida e vapor (Fluido₃).

Toda a segregação em fase líquida e fase vapor do fluido consiste em movimentos convectivos próprios, com contaminantes próprios. A mineralização

ocorre ao final do processo convectivo, quando a fonte termal já não consegue manter o calor do sistema. O minério preserva-se na porção superficial e sua riqueza mineral depende da constituição da rocha encaixante e da água meteórica.

Figura 9: Sistema metalogênico hidrotermal básico. A intrusão ígnea aquece a água (encaixante e meteórica), gerando um sistema convectivo.



Fonte: Biondi (2003, p.100).

4.2.2. Subsistemas Hidrotermais

Trata-se de uma divisão do sistema hidrotermal conforme ambiente geotectônico em que se formaram. É subdividido em três subsistemas esquematizados na Figura 10:

1. Subsistemas vulcânicos aquáticos: são aqueles gerados com vulcanismo predominantemente subaquático, ou seja, aquele submerso. Ocorrem em ambientes de dorsais, arcos de ilhas e *hot spots* em crosta oceânica (Figura 10a);

2. Subsistemas vulcânicos emersos e/ou plutônicos superficiais: são aqueles em que o corpo ígneo se mostra em superfície, seja via vulcões propriamente ditos ou por intrusões, domos ígneos, falhas, zona de alteração hidrotermal, entre outros. Correspondem aos maiores depósitos de ouro e prata conhecidos (Figura 10b);
3. Subsistema plutônico profundo: é aquele em que o corpo ígneo não alcança nem influencia a superfície (Figura 10c).

Vale notar que há diversos produtos para o mesmo subsistema (VHMS, SEDEX, VCO, Vulcânico HS, entre outros), reflexo da variabilidade de composição das rochas encaixantes, da água meteórica da época de formação destes depósitos e de outros processos geológicos que venham a interferir. Estes produtos não serão detalhados no presente trabalho, ficando registrada apenas sua existência.

4.3. Sistema Metamórfico

Trata-se de todo sistema mineral que envolva algum grau de metamorfismo. Seu processo é classificado conforme o grau de metamorfismo, abrangendo: temperatura, pressão, mecanismo (agente) térmico e dinâmico.

Os mecanismos térmicos e dinâmicos subdividem o metamorfismo e a metalogenia de depósitos metamórficos em:

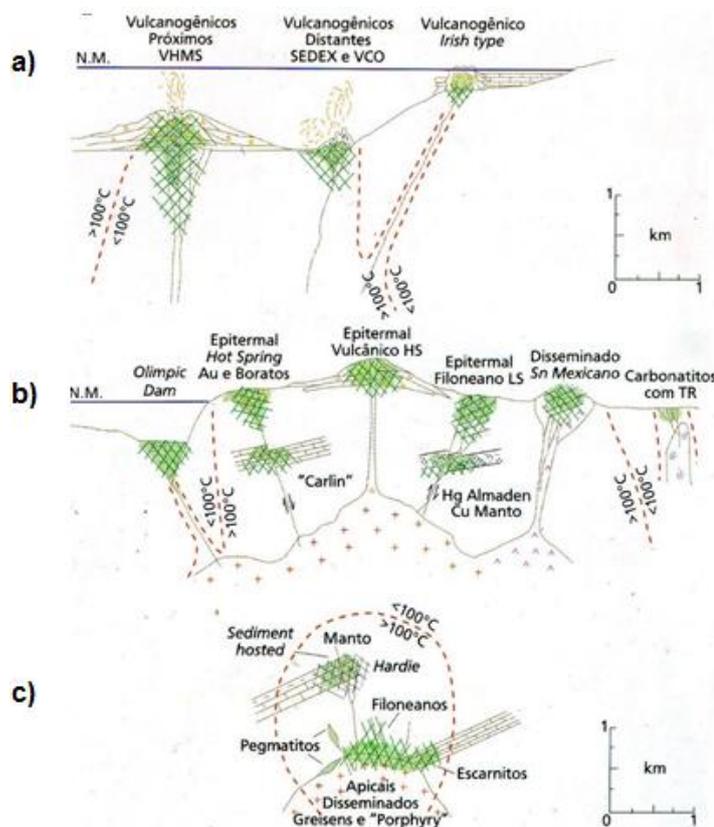
- Dinâmico: metamorfismo gerado apenas pelo movimento de bloco de rochas no sistema;
- Termal: metamorfismo gerado apenas pelo aumento de energia do sistema;
- Dinamotermal: metamorfismo gerado por ambos.

O mecanismo dinamotermal é o mais recorrente, visto que o metamorfismo na Terra acontece, em grande maioria, em ambientes de predominante convergência que, por sua vez, gera esforços que são fontes de calor. É também o domínio metamórfico mais fértil, com destaque para depósitos de ouro.

Os mecanismos termiais e dinamotermiais têm quatro graus metamórficos (ou fácies) reconhecidos, cada qual com seu material geológico característico: grau metamórfico forte, médio, fraco ou incipiente, cada qual com pressão, temperatura e deformações características. Pressão e temperatura são responsáveis pelas

mudanças mineralógicas, enquanto que as deformações são responsáveis pela geração de zonas de cisalhamento de grande importância para o processo mineralizador.

Figura 10: Subsistemas hidrotermais. **a)** Subsistema vulcânico aquático. **b)** Subsistema vulcânico emerso e/ou plutônico superficial. **c)** Subsistema plutônico profundo.



Fonte: Modificado de Biondi (2003, p. 100).

4.3.1. Processo Mineralizador do Sistema Metamórfico.

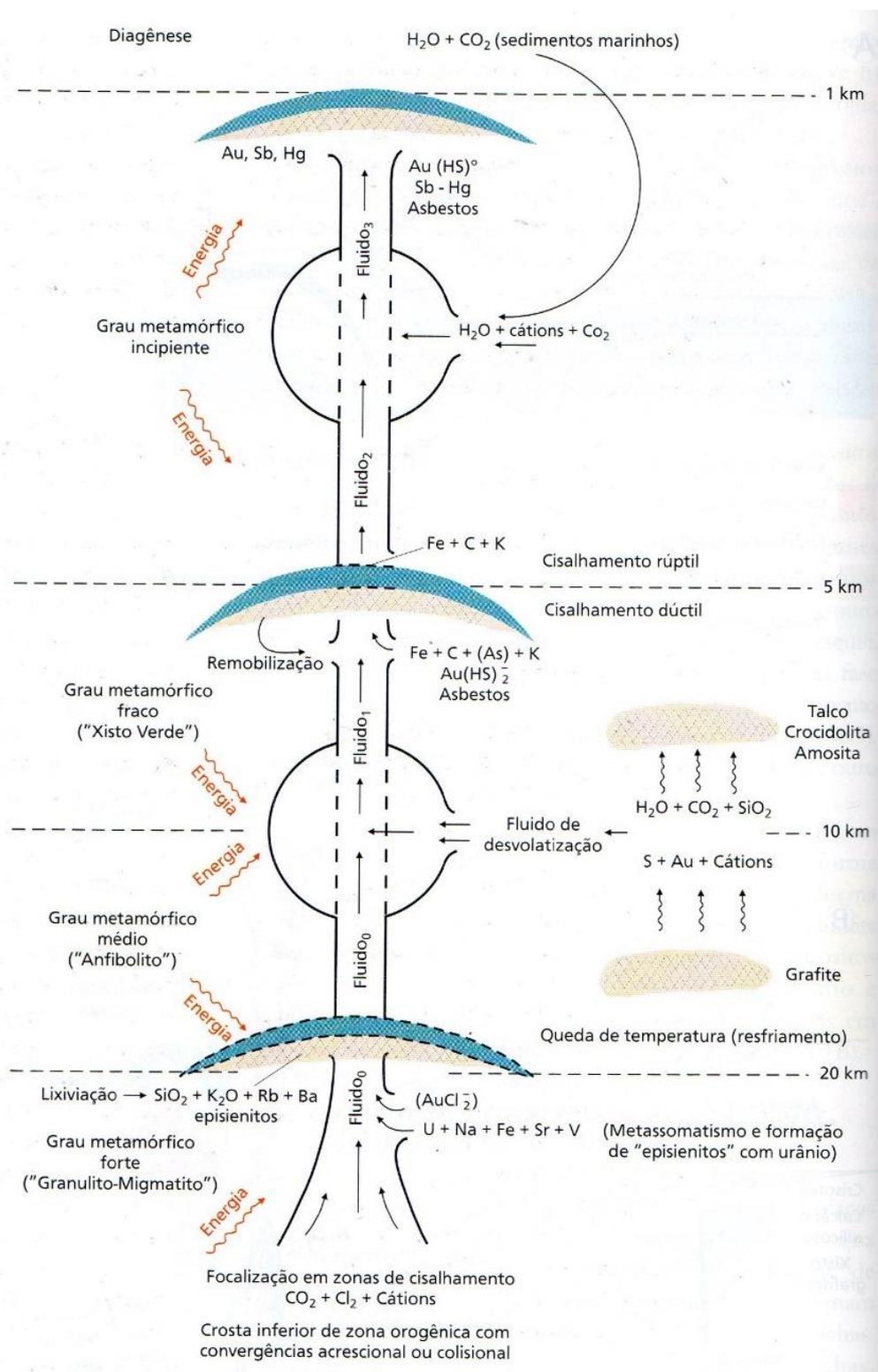
O processo mineralizador do sistema metamórfico depende da quantidade de fluidos presentes, do grau metamórfico e da temperatura alcançada. De modo geral, o processo segue a ordem descrita a seguir e esquematizada pela Figura 11:

1. Na zona de grau de metamorfismo forte há desidratação dos minerais ali presentes (devido ao aumento de temperatura), e lixiviação das rochas por ascensão deste fluido acrescido a outros fluidos já presentes no sistema, incrementando-os de íons e outros elementos (fluido₀);

2. No contato entre os graus forte e médio há queda de temperatura e precipitação de alguns destes íons e elementos. Esta precipitação, embora demonstrada no esquema geral (Figura 11), é pouco observada;
3. No contato entre os graus médio a fraco a desvolatilização ganha importância, sendo acrescentados outros íons (S, Au, Au (HS)₂⁻ e cátions) e elementos (H₂O, CO₂ e SiO₂) na mistura, resultando no fluido₁. Neste contato não há depósitos reconhecidos;
4. No contato entre os graus fraco e incipiente há precipitação dos íons da etapa anterior, gerando o fluido₂;
5. A partir do grau metamórfico incipiente, o fluido começa a entrar em contato com os materiais mais superficiais, como água, CO₂ e cátions, gerando o fluido₃;
6. Durante a etapa restante de ascensão até a superfície o restante dos íons começa a precipitar, formando os últimos depósitos em camadas sedimentares.

A Figura 12 esboça os principais tipos de depósitos de cada uma das etapas, sendo que o depósito predominante é o de ouro em zonas de cisalhamento de alto ângulo.

Figura 11: Esquema simplificado do processo mineralizador metamórfico com relação ao grau metamórfico e etapas por qual passa.



Fonte: Biondi (2003, p. 224).

4.4.1. Processos mineralizadores dos subsistemas sedimentares

Cada subsistema tem seu processo mineralizador característico e distinto, a depender do ambiente em que se forma: no continente, em ambiente marinho ou por movimento de água nos sedimentos (hidatogênicos).

4.4.1.1. Processo mineralizador do subsistema continental

Consiste na erosão dos depósitos previamente soerguidos, seja esta eólica, aluvial, de geleiras e/ou por intemperismo químico. Cada paleoclima, paleogeografia e conteúdo do material soerguido determinará as dimensões e tipos de depósitos.

Os depósitos de destaque são aqueles de minerais mais densos, que se alojam nos fundos de rios e meios aquosos, como por exemplo os depósitos de ouro, elementos do grupo da platina (EGP) e diamante.

4.4.1.2. Processo mineralizador do subsistema marinho

São os depósitos formados por reações entre soluções e precipitações de solutos, abrangendo também os depósitos continentais que interagem com a água marinha em ambientes costeiros. Nestes casos, os depósitos podem ser gravitacionais ou solubilizados (depósitos de ferro e magnésio, principalmente).

Os principais fatores que influenciam nos depósitos são o potencial de hidrogênio (pH), potencial de oxirredução (Eh), temperatura, correntes marinhas, paleobatimetria, falhas e processos ígneos ou *hotspots*.

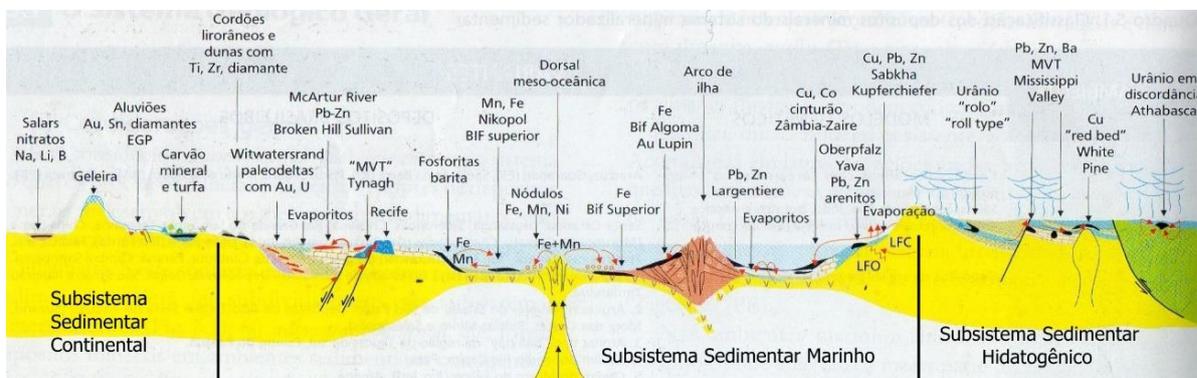
4.4.1.3. Processo mineralizador do subsistema hidatogênico

Consiste no deslocamento de águas em sedimentos ou rochas sedimentares que provocam reações ou desestabilizações de soluções que geram os depósitos por precipitação química e física.

Os depósitos podem ser de fase diagenética – enquanto as rochas sedimentares se formam – ou pós-diagenéticas – já nas rochas sedimentares consolidadas, nas quais a água se em função da permeabilidade destas rochas.

A Figura 13 esquematiza os subsistemas do sistema mineralizador sedimentar e seus principais tipos de depósitos.

Figura 13: O sistema mineralizador sedimentar, seus subsistemas e principais tipos de depósitos associados.



Fonte: Modificado de Biondi (2003, p. 276).

4.5. Metalogenia e Gravimetria

Todos os processos aqui retratados são ilustrados por modelos didáticos e, como dito anteriormente, a metalogenia é abrangente, complexa e variável, dificultando em muito qualquer relação que possa haver, *a priori*, da gravimetria com a metalogenia.

Contudo, se considerarmos que haja apenas um modelo metalogenético presente ou um sistema predominante em uma província mineral, a relação entre as duas áreas de conhecimento pode ficar mais clara, embora de ainda difícil determinação precisa. Assim, é possível prever uma relação de anomalias da gravidade em regiões com sistema endomagmático predominante, já que as câmaras magmáticas concentraram materiais de diferente densidade se comparado à crosta. Para o sistema hidrotermal - devido a sua fragilidade física e química - e sedimentar, é difícil prever uma relação clara, à exceção de concentrações hidrotermais em preenchimento de falhas e grandes concentrações em leitos de rio. O oposto é verdadeiro para o sistema mineralizador metamórfico, em que a fusão parcial de rochas tende a deixá-las mais densas e, portanto, mais perceptíveis à gravimetria.

Outro fator importante que se destaca é a escala da relação entre gravimetria e metalogenia: pode ser de curto espaçamento, como eventuais concentrações de minérios de ouro por sistema mineralizador sedimentar em leitos de rios ou

preenchimento de falhas (de difícil identificação), de médio espaçamento, como metamorfismo, ou por longos espaçamentos, como câmaras magmáticas (de mais fácil identificação). Definir esta escala é um processo que requer uma gama de estudos, desde o maior espaçamento (por gravimetria por satélite, aqui proposto), ao médio (aerolevantamentos) e ao curto, com detalhamento geológico por amostras das províncias, que ajudarão a definir também os processos mineralógicos pelos quais os depósitos minerais passaram.

5. PROVÍNCIAS MINERAIS

A nomenclatura das províncias brasileiras é variável conforme autor e época de estudo e, de forma a manter um padrão, utilizar-se-á durante toda a pesquisa a divisão de Bizzi et al. (2003). Esta divisão de províncias e distritos é apresentada nos sítios dos órgãos federais responsáveis pela coleta e regulamentação da exploração mineral, a saber: IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e CPRM.

5.1. Províncias Mineraias do Brasil

As províncias mineraias de nosso território abrangem do Arqueano (3,85 a 2,5 Ga) ao Cenozoico (65,5 Ma até os dias atuais), sendo as de maior interesse econômico formadas no Proterozoico (2500 a 540 Ma). Esta grande variedade é possível graças à evolução da placa sul-americana, com diversos contatos entre zonas cratônicas no Arqueano e Proterozoico que, por fim, aglomeraram-se e mantiveram-se estáveis até os dias de hoje.

Há 25 províncias mineraias e distritos de destaque no Brasil de acordo com Bizzi et al. (2003), como mostra a Figura 14. A grosso modo, os depósitos mineraias brasileiros estão associados à metamorfização, zonas de cisalhamento e intrusões (sistemas metalogenéticos metamórfico e hidrotermal), que por sua vez estão associadas aos eventos tectônicos de grande escala, como o Evento Carajás (2,6 Ga), Evento Transamazônico (2,0 Ga) e Evento Brasileiro (600 Ma) (BIZZI et al. 2003).

A Tabela 2 relaciona o nome, numeração e principais mineraias produzidos pelas províncias e distritos presentes na Figura 14. Tanto a Figura 14 quanto a Tabela 2 foram retiradas de Bizzi et al. (2003).

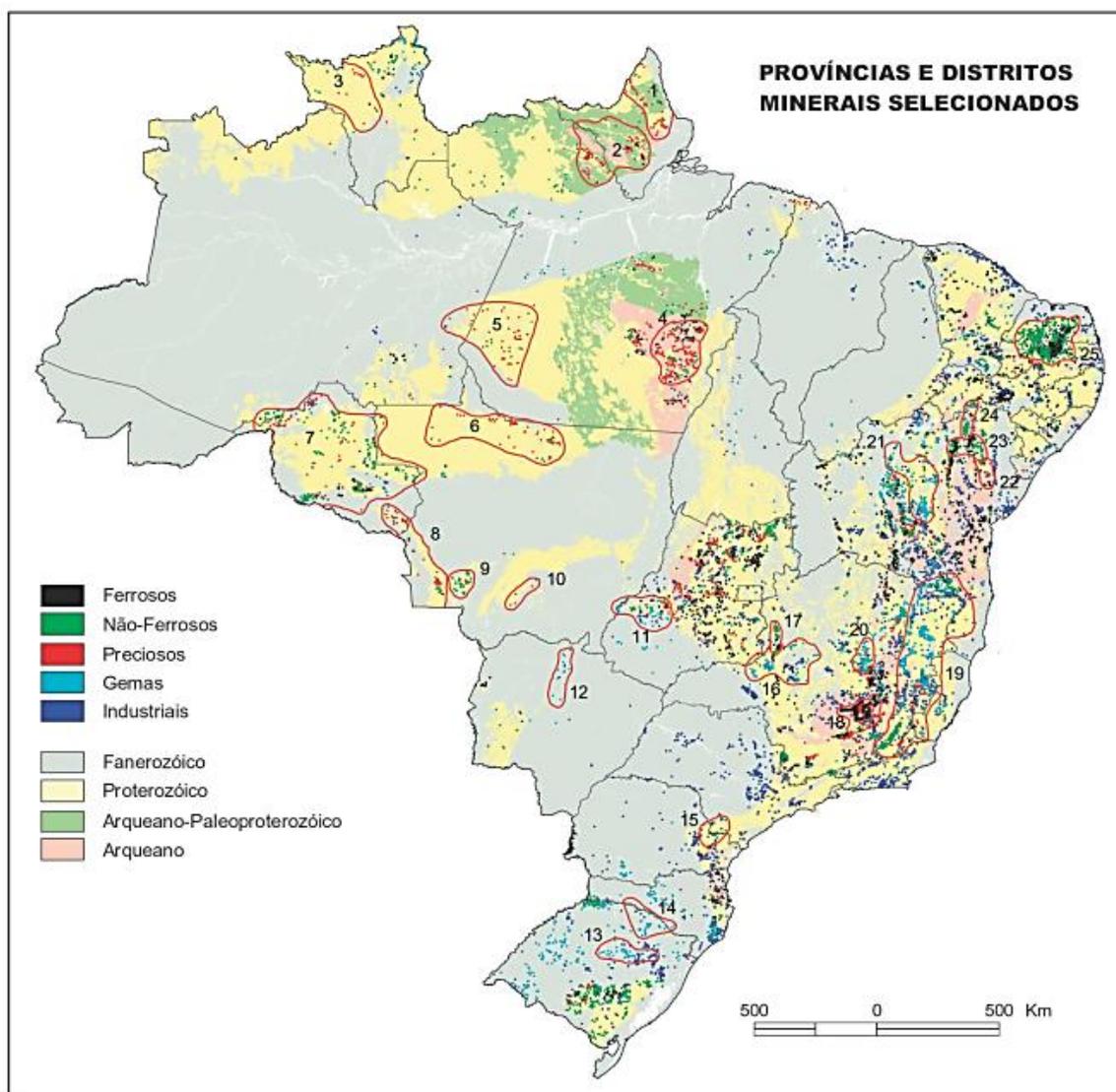
No entanto, nem todas as províncias aqui selecionadas têm presença comprovada de grandes quantidades de minérios. Para maximizar o potencial do presente trabalho, a escolha das províncias estudadas baseou-se no “Projeto Áreas De Relevante Interesse Mineral para Metais no Brasil” da CPRM (MATOS et al. 2009), conforme Figura 15.

Ao elaborar o mapa da Figura 15, Matos et al. (2009) levaram por consideração a presença real de mineraias e a aplicabilidade da exploração, seja por viabilidade de transporte, econômica, de exploração *per se* e leis ambientais vigentes. Uma simples

comparação entre as Figuras 14 e 15 demonstra que as províncias de maior interesse são as Províncias de Carajás, Alta Floresta, Tapajós, Serijó/ Borborema, Vale do Ribeira, Rondônia e Quadrilátero Ferrífero.

Há também exploração mineral que não está contida em províncias minerais e, ainda assim, são marcadas por Matos et al. (2009) como áreas de interesse. São os depósitos gerados nas Faixas Dobradas.

Figura 14: Províncias e distritos minerais presentes no Brasil selecionados por Bizzi et al. (2003).



Fonte: Bizzi et al. (2003, p. 370).

Tabela 2: Relação das províncias e distritos selecionados por Bizzi et al. (2003) da Figura 14.

Numeração	Nome	Produto (ordem de maior produção)
1	Serra Lombarda/ Tartarugalzinho	Au
2	Vila Nova	Au, Cr
3	Parima	Au, Sn
4	Carajás	Fe, Mn, Au, Cu, Ni
5	Tapajós	Au
6	Alta Floresta/ Aripuanã	Au, Zn, Pb, Cu
7	Rondônia	Sn, Au
8	Alto Guaporé	Au
9	Alto Jauru	Au, Cu
10	Cuiabá/ Poconé	Au
11	Alto Araguaia	Diamante
12	Coxim	Diamante
13	Salto do Jacuí	Ágata, ametista
14	Alto Uruguai/ Iraí	Ágata, ametista
15	Vale do Ribeira	Pb, Zn, Ba, Ag
16	Alto Parnaíba	Diamante
17	Morro Agudo/ Vazante	Zn, Pb
18	Quadrilátero Ferrífero	Fe, Mn, Au
19	Brasil Oriental	Li, Be, gemas
20	Diamantina	Diamante
21	Chapada Diamantina	Diamante
22	Rio Itapicuru	Au
23	Rio Jacurici/ Campo Formoso	Cr
24	Rio Curaça	Cu
25	Serido/ Borborema	W, Nb

Fonte: Bizzi et al. (2003, p. 370).

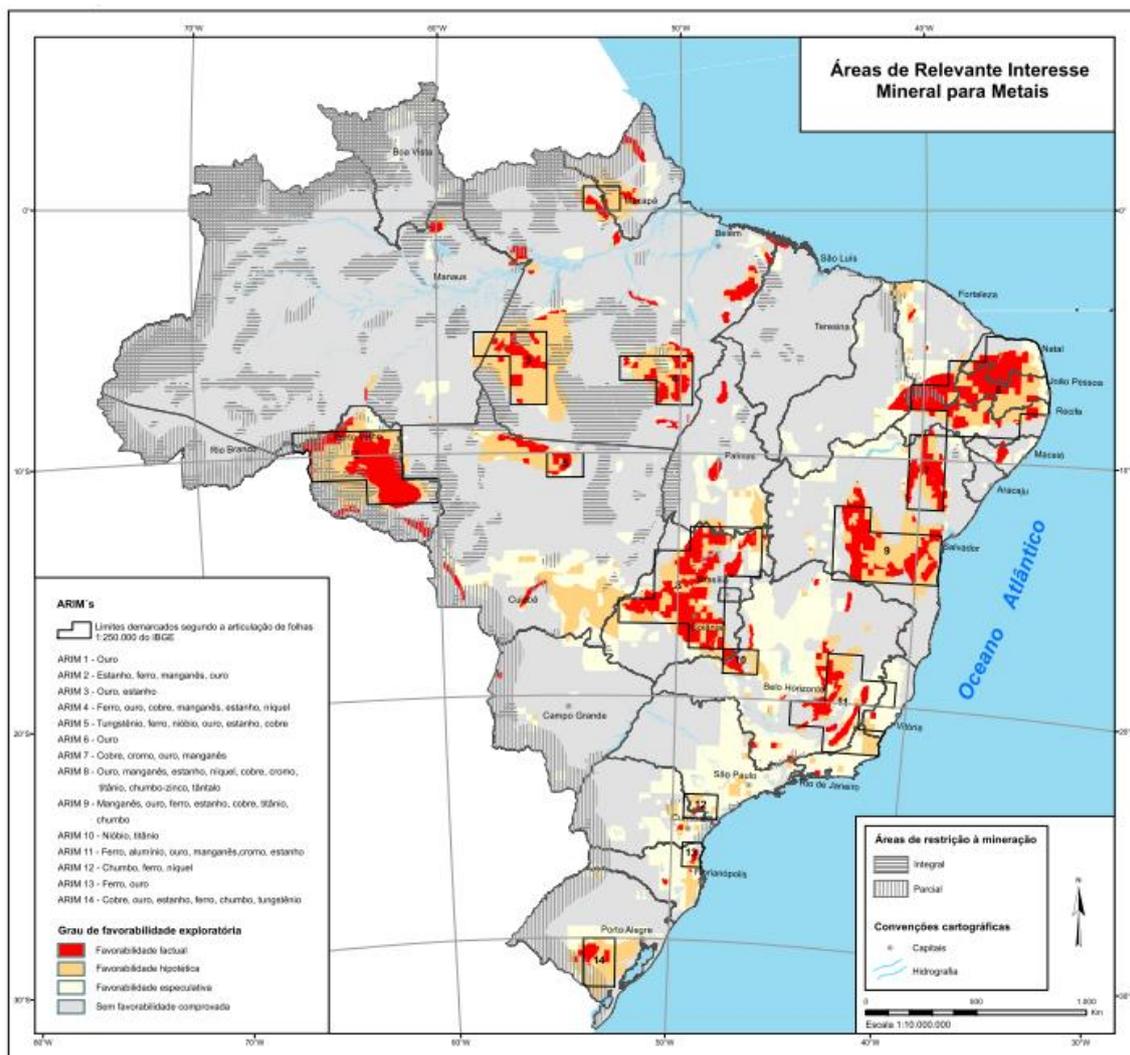
5.2. Província Alta Floresta

Trata-se de uma província Paleoproterozoica com idade entre 1,9 e 1,45 Ga. Está localizada na divisa entre os Estados do Pará, Amazonas e Mato Grosso, com quase sua totalidade no último. Produz ouro, zinco, chumbo e cobre, sendo o primeiro o mais importante, mais explorado e amplamente distribuído na região.

A província Alta Floresta teve sua produção iniciada por garimpos rudimentares que exploravam ouro em aluviões e coluviões. Com a escassez desse tipo de exploração iniciaram-se pesquisas no âmbito geológico e geofísico, com destaque para os esforços da CPRM (FRASCA; BORGES, 2005).

De acordo com estes autores, os depósitos contidos em Alta Floresta são principalmente do tipo veios de quartzo com ouro controlado por um megassistema de cisalhamento transcorrente sinistral dúctil e rúptil-dúctil com presença de falhas que, por sua vez, associam-se a processos hidrotermais. Durante sua evolução, a província sofreu metamorfismo de médio a alto grau.

Figura 15: Áreas de interesse de exploração mineral no Brasil, segundo Matos et al. (2009).

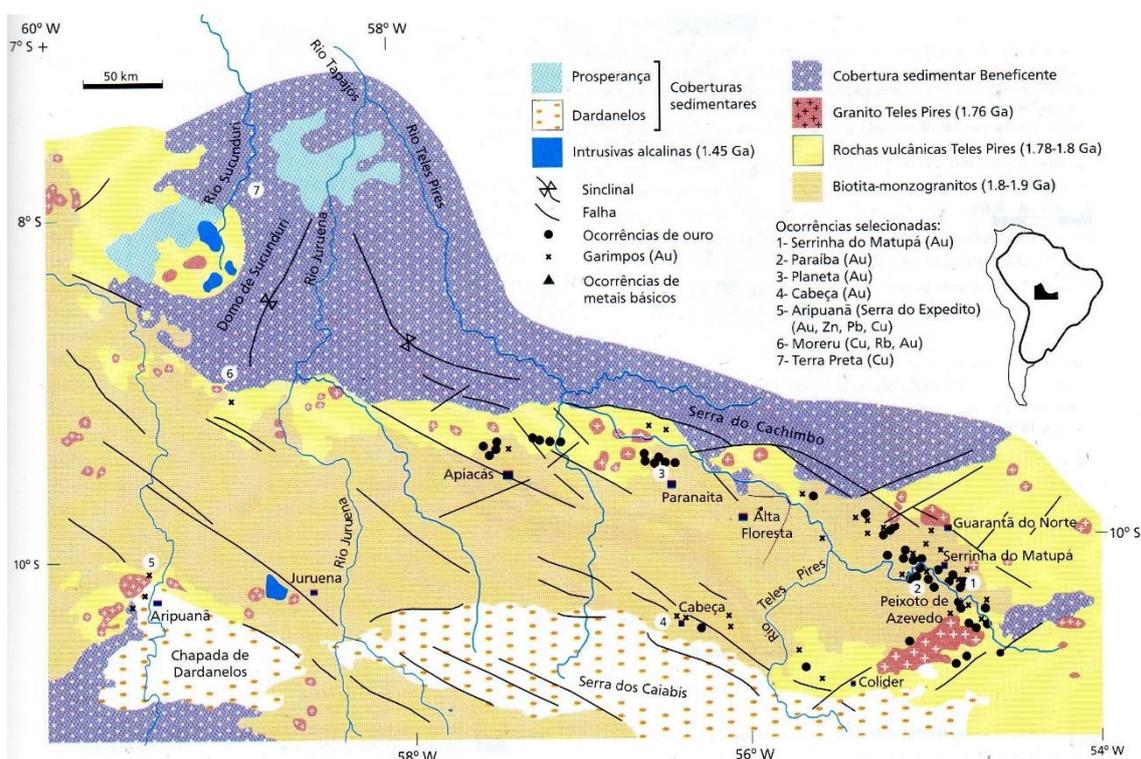


Fonte: Matos et al. (2009, p. 47).

Estes veios de quartzo, ainda de acordo com os autores, apresentam-se ao longo do eixo de dobras isoclinais, concentrados em zonas apicais de dobras, definindo-se, então, o par de controle litológico-estrutural da mineralização.

A localização dos depósitos e a geologia local são ilustradas na Figura 16. A partir dela é possível observar que a orientação geral das minas segue a direção preferencial das falhas, assim como o contato entre as rochas vulcânicas Teles Pires e Biotita-monzogranitos, correspondendo ao par litológico-estrutural proposto por Frasca e Borges (2005).

Figura 16: Mapa geológico simplificado da Província Mineral Alta Floresta e ocorrências de ouro nesta.



Fonte: Biondi (2003, p. 153).

5.3. Província de Carajás

É uma província constituída por Grupos e Formações que datam do Arqueano ao Proterozoico, com idades entre 3,0 (Complexos Xingu e Pium, Figura 16) e 1,8 Ga (Granitos tipo-A, Figura 16). Contém depósitos de ferro, manganês, ouro, cobre, níquel e EGP (Elementos do Grupo da Platina), sendo o primeiro o mineral mais explorado, alcançando uma produção anual da ordem de 110 milhões de toneladas (ASSIS, 2013).

O início da sua exploração deu-se a partir de garimpos rudimentares que exploravam coluviões e aluviões na região (PASTANA, 2001). Com a escassez desse

tipo de exploração houve a necessidade de pesquisas na região no âmbito geológico e, com maior impacto nos últimos anos, agregando o âmbito geofísico (ASSIS, 2013; LEÃO-SANTOS, 2014).

Não há consenso na literatura quanto à evolução geológica da província de Carajás. Segundo Assis (2013), a falta de estudos regionais impede um maior esclarecimento do quadro geológico, embora haja diversos estudos na escala local realizados por empresas e/ou universidades a fim de estudar depósitos minerais (ASSIS, 2013; LEÃO-SANTOS, 2014).

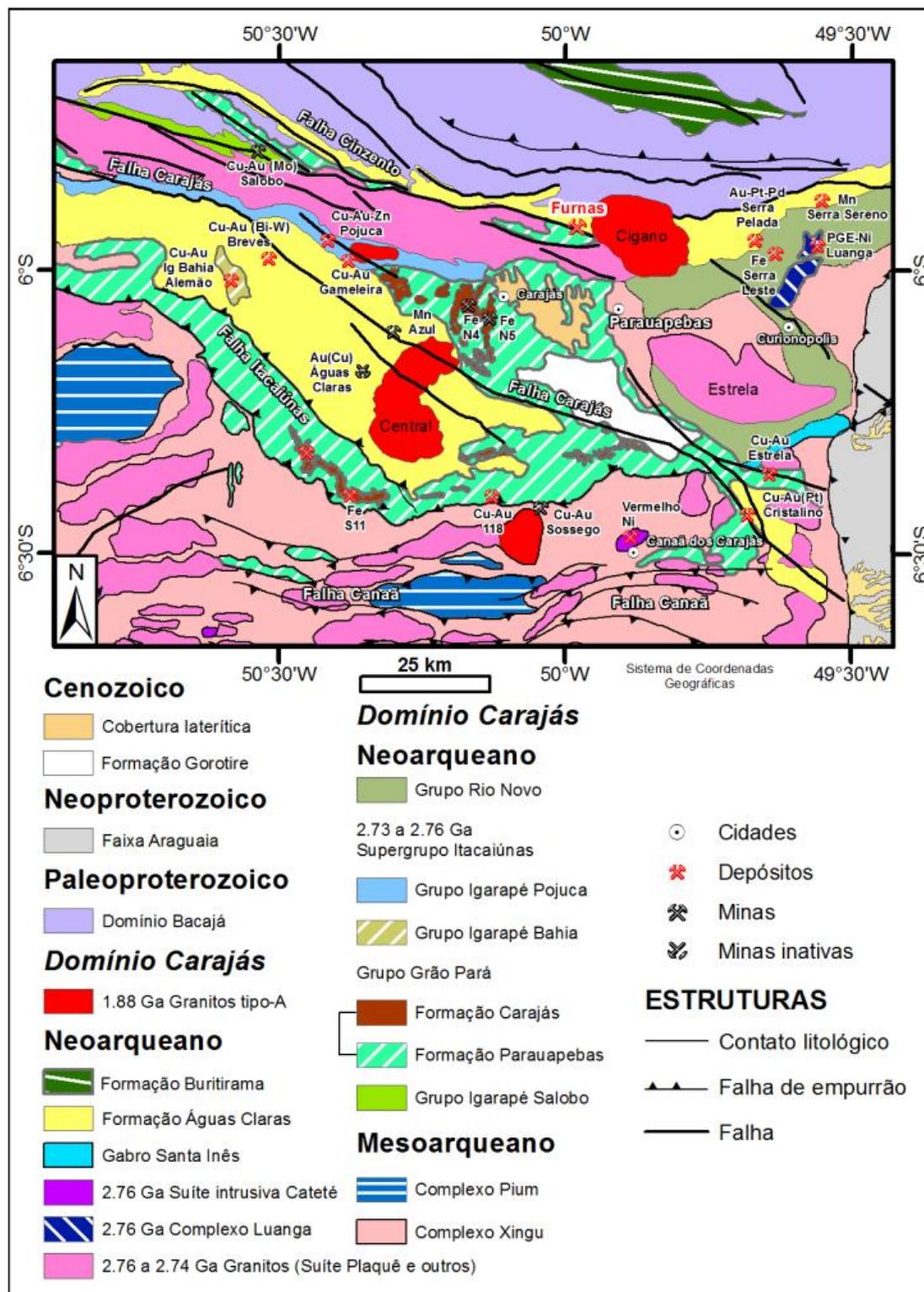
Os depósitos minerais de maior importância da província estão nos grupos/formações:

- Formação Parauapebas, constituída por basaltos hidrotermalmente alterados e com feições primárias preservadas;
- Formação Carajás, constituída por BIFs (*Banded Iron Formations*) com alto teor de ferro;
- Grupo Igarapé Bahia, constituído por rochas vulcanossedimentares de baixo grau metamórfico, com mineralização primária de cobre e secundária de Au;
- Grupo Rio Novo, contendo o depósito de Serra Leste e Serra Pelada. Nestes, a mineralização dos produtos neste depósito é extremamente relacionada às intrusões dioríticas, permitindo a concentração maciça de ouro, refletida na presença de grandes pepitas;
- Formação Águas Claras, constituída por rochas sedimentares com deformações rúpteis próximo à falhas e intrusões, onde se concentram depósitos de Au-Cu e Mn.

Em resumo, os modelos metalogenéticos presentes na Província do Carajás são o hidrotermal e metamórfico (primário) e o sedimentar (secundário). Há também a presença de veios de quartzo que podem conter ouro primário por toda a província, principalmente próximos aos garimpos que exploram aluviões e coluviões.

A Figura 17 apresenta o mapa geológico simplificado da Província Carajás, modificado de Santos (2014, p.11).

Figura 17: Mapa geológico simplificado da Província Carajás associado às explorações minerais.



Fonte: Modificado de Santos (2014, p. 11).

5.2. Província do Quadrilátero Ferrífero

É a província mineral mais conhecida do Brasil e de extrema importância histórica. Seus depósitos minerais são de ferro, ouro e manganês originados no arqueano. A localização de suas minas e seu mapa geológico simplificado são mostrados na Figura 17.

No que tange à evolução geotectônica, dados geológicos, estruturais e geocronológicos indicam uma evolução policíclica do Quadrilátero Ferrífero em três eventos (SILVA et al. 2005), a saber:

- Evento Rio das Velhas: evento compressional arqueano;
- Evento Transamazônico: evento extensional paleozoico;
- Evento Brasileiro: evento compressional Neoproterozoico.

Alkmin e Marshak (1998) sugerem que apenas os dois últimos eventos protagonizaram a evolução do Quadrilátero Ferrífero, enquanto que Baltazar e Zucchetti (2007) consideram que os três eventos estejam presentes na evolução da província.

A estratigrafia da província é dividida em Complexos Ortognaissicos, a exemplo dos Complexos de Bação e Santa Bárbara (Figura 17); Supergrupo Rio das Velhas, *greenstone belt* do arqueano, constituído pelos Grupos Quebra Ossos, Nova Lima e Maquiné; Supergrupo Minas, do paleoproterozoico, constituído pelos Grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará.

No que concerne à exploração mineral, destacam-se a Formação Cauê (Grupo Itabira), responsável por toda produção de ferro do Quadrilátero que, em sua porção superior, conta também com manganês, produto este também extraído da Formação Gandarela do Grupo Itabira (SILVA et al. 2005). A produção de ouro, por sua vez, é de destaque mundial (OLIVEIRA, 2014) e aparece de diversas formas na província, a saber:

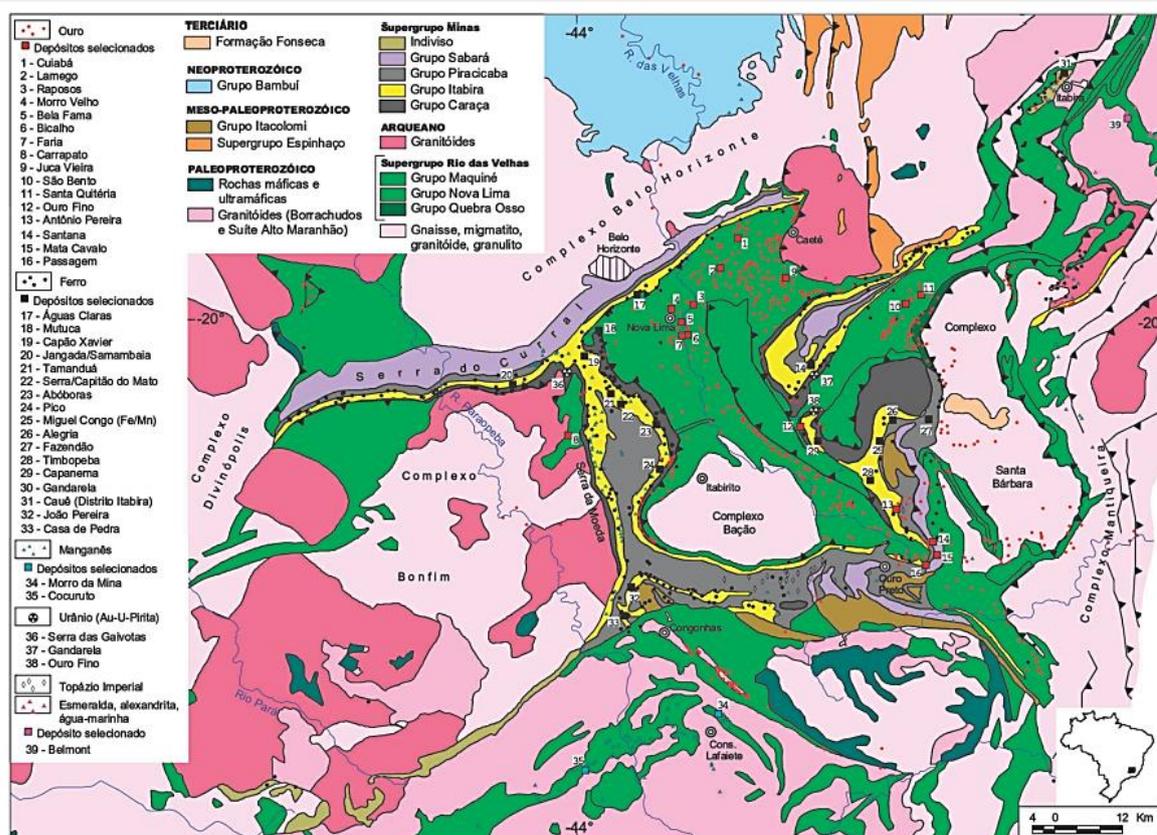
- Em veios de quartzo discordantes hospedados nas rochas granito-gnáissicas dos complexos metamórficos arqueanos;
- No *greenstone belt* arqueano Rio das Velhas, seja: em *stratabound* (contidos em uma única unidade estratigráfica) relacionados a zonas de cisalhamento

dúcteis com ouro disseminado, ouro concentrado em veios de quartzo ou em *paleoplacers*, nos metaconglomerados;

- Em depósitos de ouro em rochas sedimentares proterozoicas, subdivididas: em zonas de cisalhamento dentro de formações ferríferas – associadas a veios de quartzo em rochas do Supergrupo Minas, ou no contato entre os Supergrupos Rio das Velhas e Minas;
- Em Depósitos de aluviões e lateritas cenozoicas.

Uma breve análise da Figura 18 permite observar que todas as minas de ferro presentes na região coincidem com afloramentos da Formação Cauê (Grupo Itabira). As minas de manganês estão concentradas a leste e ao sul, enquanto que as minas de ouro encontram-se ora alinhadas à falhas de empurrão – próximo ao Complexo de Bação, ora dispersas dentro do afloramento do Grupo Nova Lima.

Figura 18: Mapa geológico simplificado da Província do Quadrilátero Ferrífero. Estão demonstrados os minerais explorados, depósitos e principais cidades da região. Pontos pretos representam minas de ferro, vermelhos representam minas de ouro e azuis representam minas de manganês.



Fonte: Bizzi et al. (2003, p. 379).

5.4. Província Tapajós

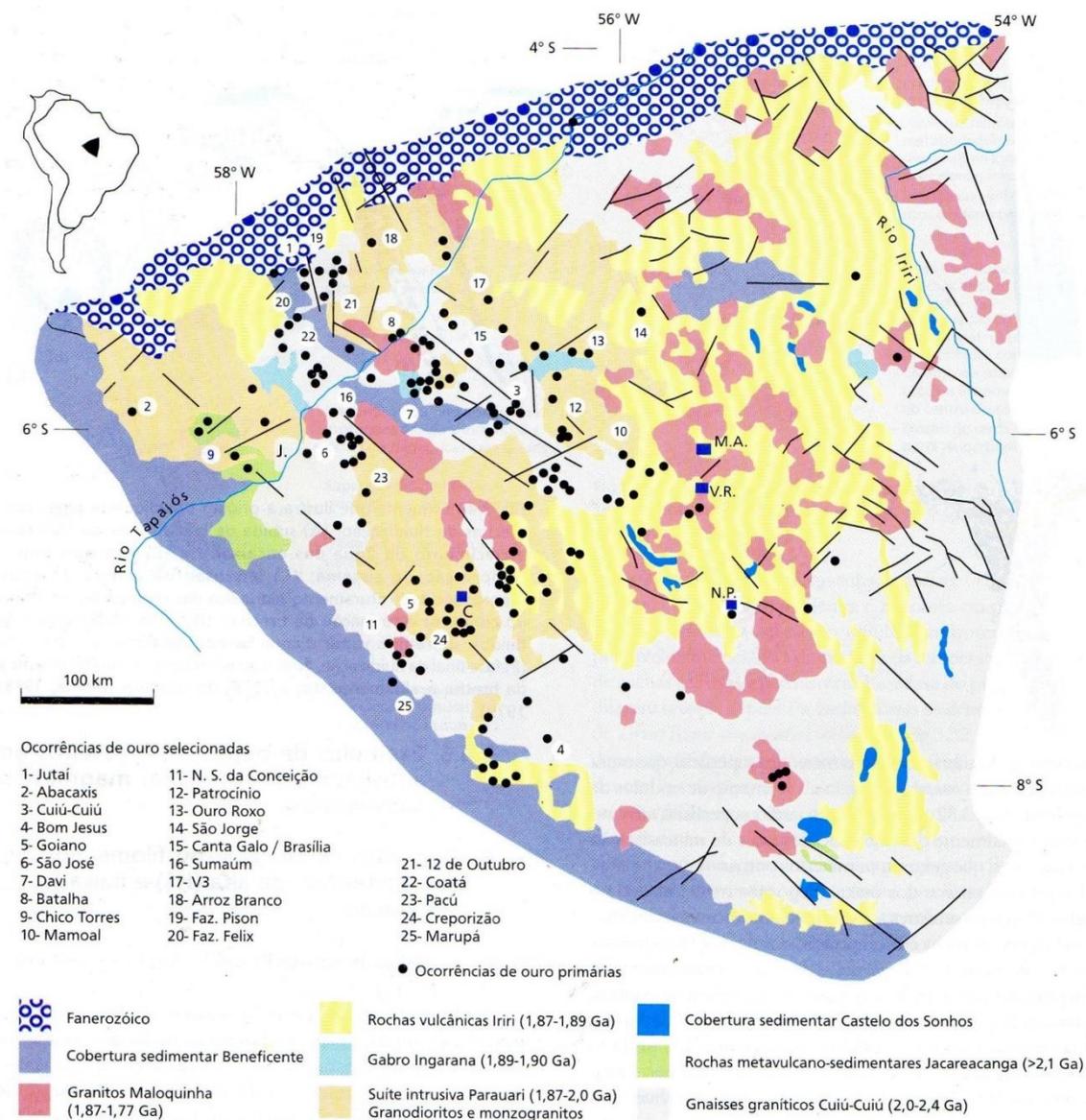
É a maior província aurífera do Brasil, apresentando uma produção entre as décadas de 1970 a 1990 de até 300 toneladas (BIZZI et al. 2003). Semelhantemente às províncias de Alta Floresta e Carajás, a exploração em Tapajós iniciou-se por aluviões, elúvios e colúvios e, apenas a partir da escassez destes, é que pesquisas da fonte das mineralizações ocorreram (PEREGOVIČH et al., 2008), com destaque para os esforços da CPRM (COUTINHO, 2008).

O ouro ocorre em todas as rochas e de forma distribuída na província (Figura 19). Modelos que explicam tais ocorrências são explicados, de acordo com Klein et al. (2001), por um ambiente tectônico de margem continental ativa durante o Paleoproterozoico. Os modelos são de (COUTINHO, 2008):

- Depósitos de ouro em veios de quartzo associados a zonas de cisalhamento;
- Ouro disseminado de sistema hidrotermal (*stockwork*);
- Ouro epitermal do sistema adularia-sericita e quartzo-alunita.

Coutinho (2008) identificou também, em escala regional, grau de metamorfismo baixo, granitoides como rocha encaixante mais comum da mineralização do ouro e ocorrências primárias orientadas segundo falhas transcorrentes de regime rúptil, dúctil-rúptil a dúctil e orientação principal NW-SE (Figura 19).

Figura 19: Mapa geológico simplificado da Província Mineral Tapajós e suas ocorrências de ouro.

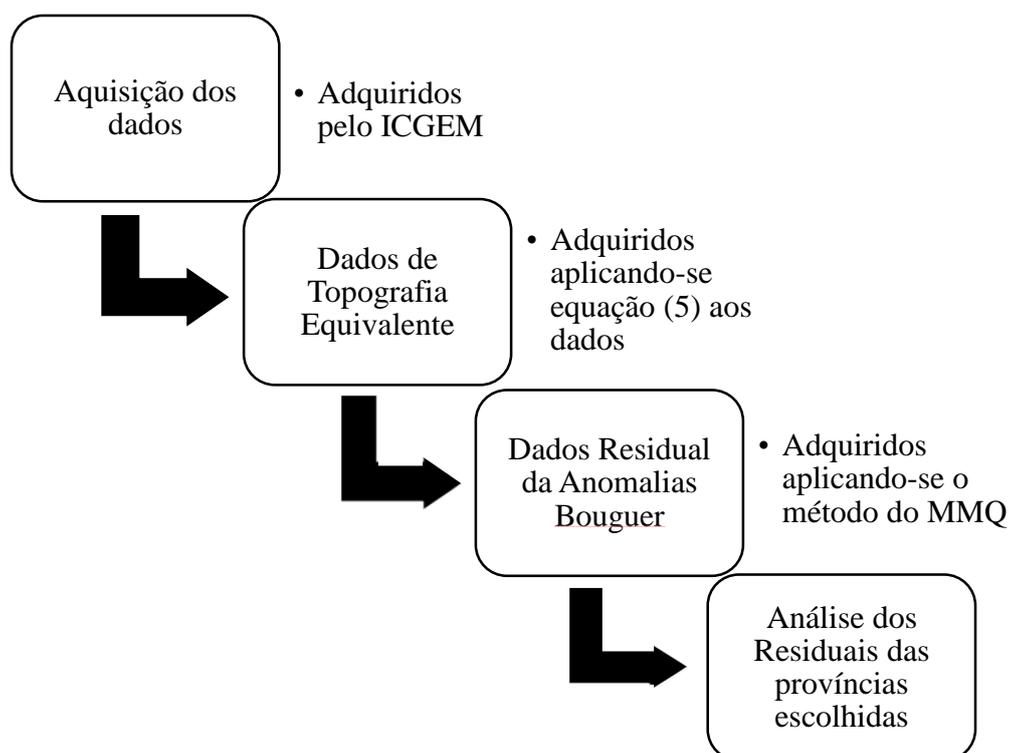


Fonte: Biondi (2003, p. 153).

6. PROCESSAMENTO, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os passos do processamento de dados são mostrados no diagrama da Figura 20, cada qual já detalhado em seções anteriores do presente trabalho.

Figura 20: Diagrama de aquisição e processamento dos dados.



Fonte: Barbosa (2017).

6.1. Aquisição dos dados

Como dito anteriormente, os dados de satélite são disponibilizados gratuitamente pelo site do ICGEM via *Calculation Service*. De cada modelo escolhido (*model file*) foram retirados os dados de anomalia Bouguer com espaçamento (*grade*) de $0,1^\circ$; altitude de medida (*Height over Ellipsoid*) definida em 7000 m, de modo a ser maior do que o pico mais alto dos Andes (6962 m); sistema de referência (*Reference System*) EGM2008 para modelos pós-2008 e WSG84 para modelos pré-2008; latitude entre 10°N e -36°S ; longitude entre 30°W e 80°W . O restante dos parâmetros foram mantidos no padrão do site, como ilustra a Figura 21.

Figura 21: Parâmetros utilizados na aquisição dos dados pelo site do ICGEM.

Fonte: ICGEM. Disponível em: <<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>>. Acessado em 30 de junho de 2015.

6.2. Topografia Equivalente

Os dados de topografia foram retirados do modelo EGM2008, *model file* topography_grd. A estes dados foi aplicada a equação (5) a partir de um algoritmo simples. Para o cálculo da Topografia Equivalente foram utilizados:

- $\rho_w = 1,040 \text{ g/cm}^3$;
- $\rho_c = 2,650 \text{ g/cm}^3$.

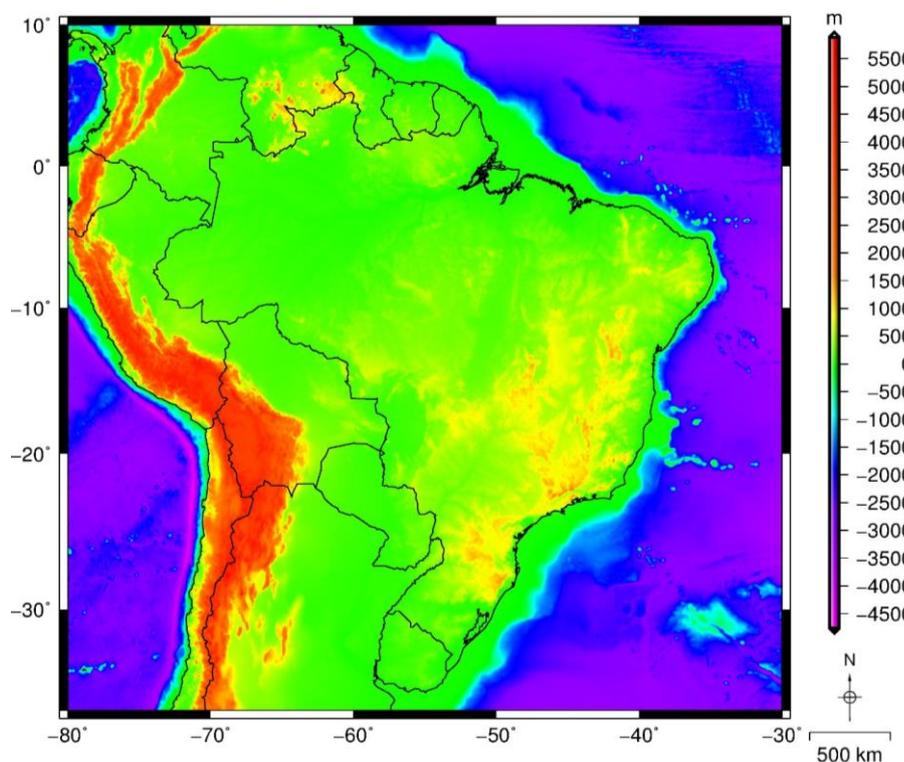
Como os dados de topografia equivalente afetam unicamente os dados de altitude menores do que zero, nenhuma mudança é vista no continente, que é a área de interesse deste trabalho. A Figura 22 mostra o resultado final, após aplicada a equação (5).

Em seguida é realizada a etapa de ajuste de reta pelo MMQ para os dados de anomalia Bouguer em função dos dados de topografia equivalente (seções 3.3 e 3.4).

6.3. Dados de anomalia Bouguer

Antes de gerar os mapas de anomalia Bouguer para os modelos estudados foi realizada uma comparação entre o mínimo e o máximo dos modelos estudados. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Figura 22: Topografia equivalente calculada para a área de estudos. Os dados de topografia originais foram retirados do ICGEM utilizando o sistema de referência EGM2008.



Fonte: Barbosa (2017).

Tabela 3: Mínimo e máximo obtidos para os modelos estudados.

Modelo	Anomalia Bouguer (mGal)	
	Mínimo	Máximo
EGM96	-449,47	370,67
EGM2008	-665,64	395,28
EGM2008upto360	-441,06	371,63
EIGEN-CG03C	-478,54	365,28
go_cons_gcf_2_tim_r4	-463,14	368,55

Fonte: Barbosa (2017).

Uma análise simples da Tabela 3 permite constatar um fato pertinente sobre o modelo EGM2008: este possui a maior variação entre mínimo e máximo, apresentando o menor mínimo e o maior máximo dentre todos os modelos. Tal fato ocorre devido ao maior grau e ordem do modelo, que permite observar anomalias pontuais (de curto comprimento de onda).

Os mapas de anomalia Bouguer dos modelos (Figuras 23) foram elaborados utilizando a mesma uma escala de cor, de forma que valores de anomalia Bouguer superiores à escala de cor são apresentados em branco e inferiores, em preto. Estes valores maiores e menores de anomalia Bouguer restringem-se às áreas oceânicas e da Cordilheira dos Andes (devido à sua raiz, que gera contraste de densidade negativo com o manto), respectivamente.

Figura 23: Anomalia Bouguer obtida no portal ICGEM para o modelo **a)** EGM96 **b)** EGM2008 **c)** EGM2008upto360 **d)** EIGEN-CG03C **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4.

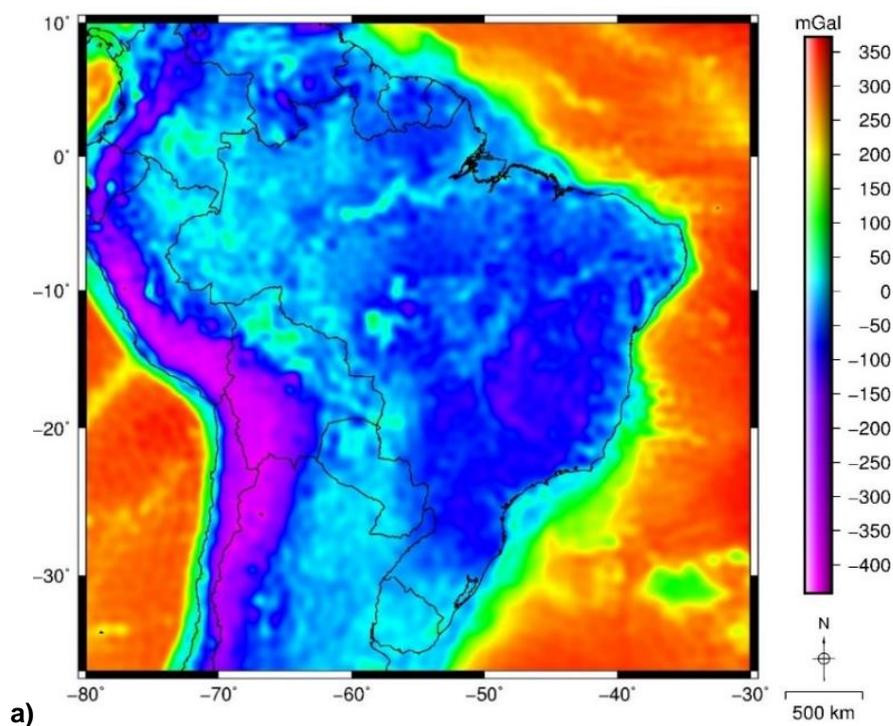


Figura 23 (cont): Anomalia Bouguer obtida no portal ICGEM para o modelo **a)** EGM96 **b)** EGM2008 **c)** EGM2008upto360 **d)** EIGEN-CG03C **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4.

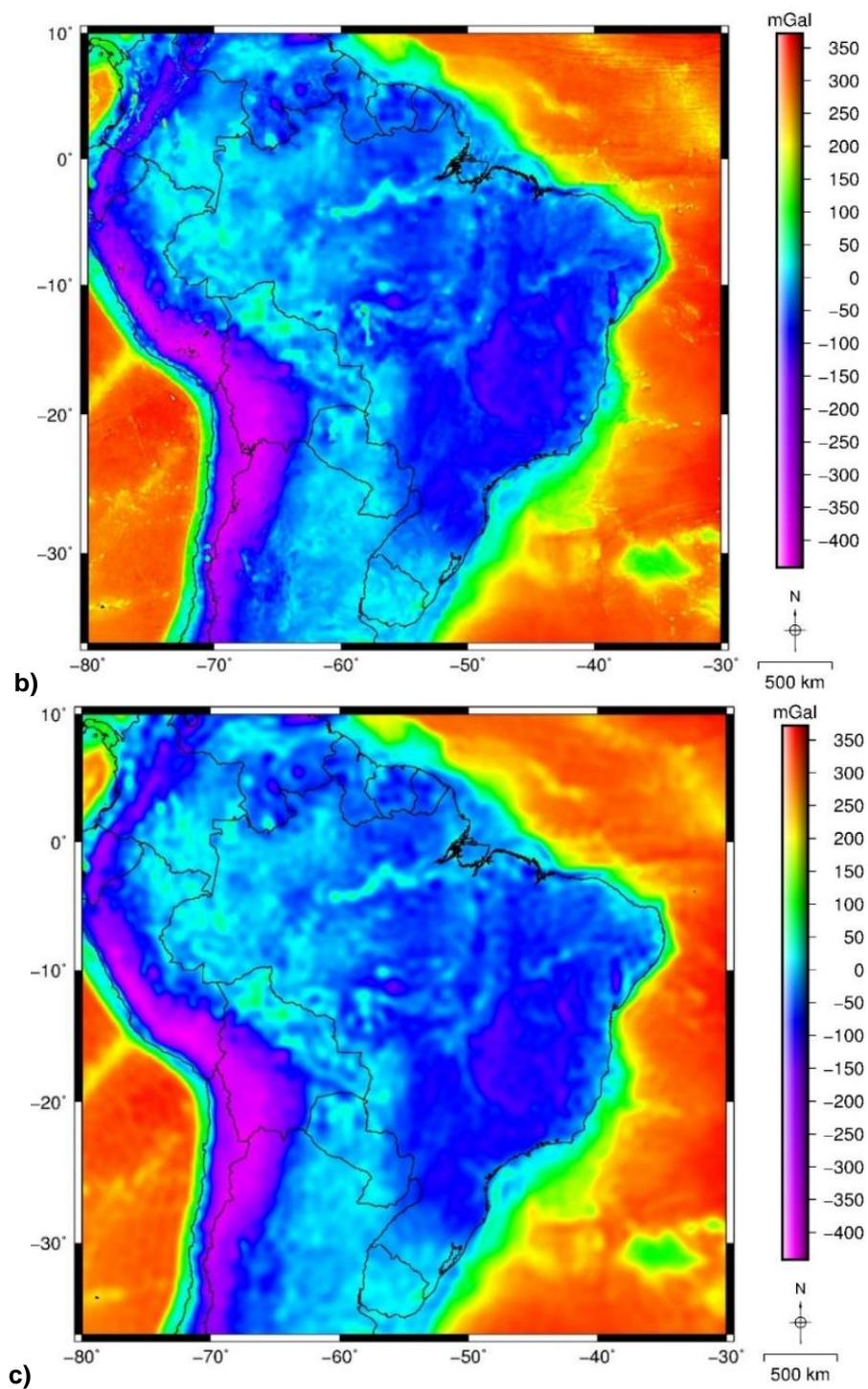
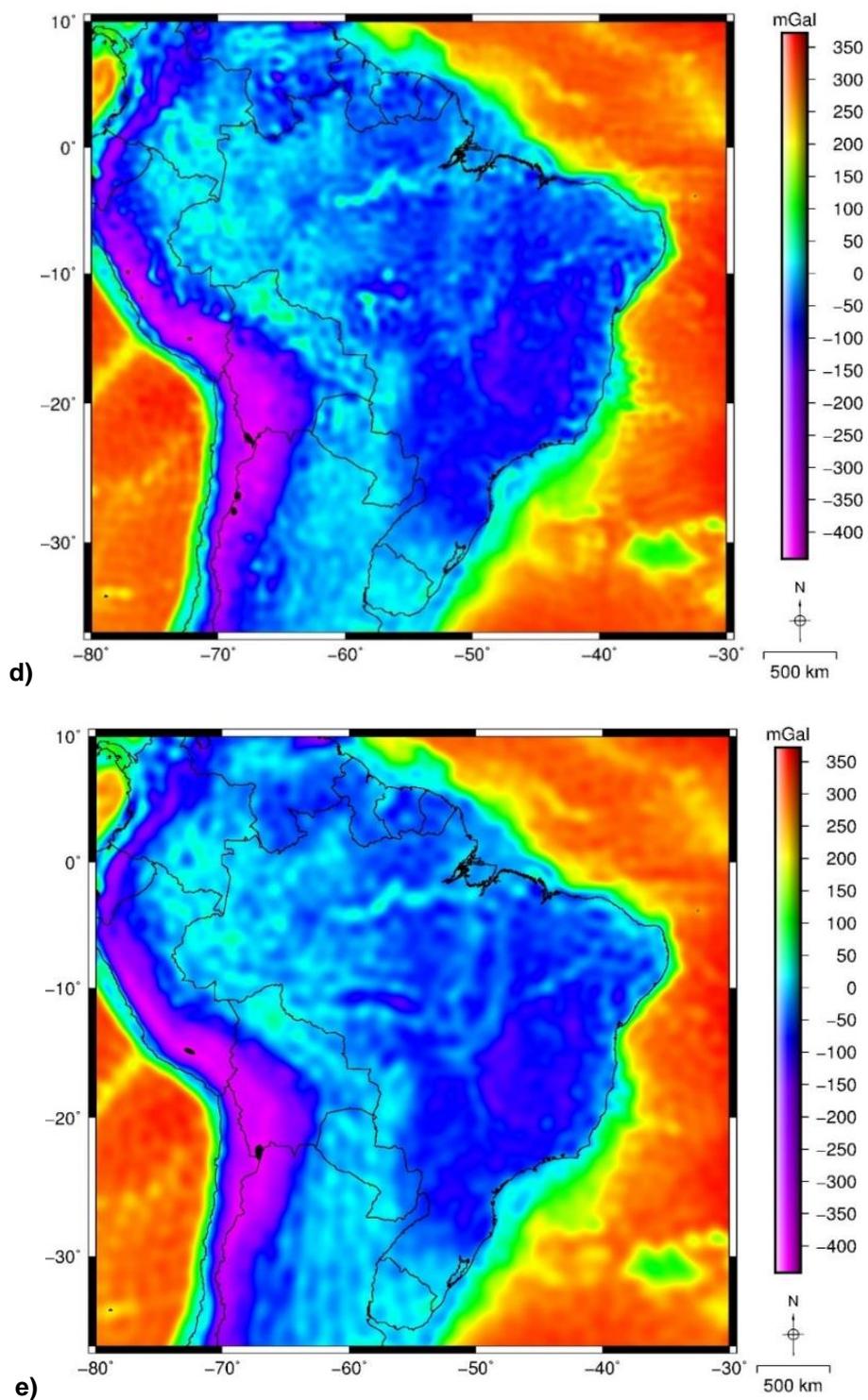


Figura 23 (cont): Anomalia Bouguer obtida no portal ICGEM para o modelo **a)** EGM96 **b)** EGM2008 **c)** EGM2008upto360 **d)** EIGEN-CG03C **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4.



Fonte: Barbosa (2017).

O modelo EGM2008 (Figura 23b) é o que mostra mais detalhes, principalmente na anomalia Bouguer negativa associada aos Andes, enquanto que os outros modelos mostram anomalias mais suaves. Isso ocorre devido ao menor espaçamento entre dados utilizados na geração do modelo EGM2008 por Pavlis et al. (2012): uma grade de 5' x 5', que reflete nos maiores grau e ordem do modelo.

Um fato que corrobora esta afirmação é a de que o modelo EGM2008upto360, que deriva do modelo EGM2008 mas alcança apenas grau e ordem 360, não mostra o mesmo grau de detalhamento.

O próximo passo, detalhado na Figura 20, é a utilização do Método dos Mínimos Quadrados para cálculo dos parâmetros de interesse neste estudo.

6.4. Aplicação do MMQ

O Método dos Mínimos Quadrados foi aplicado com os dados de Topografia Equivalente como variável independente e dados de anomalia Bouguer como variável dependente. O ajuste por MMQ foi realizado pelo programa QtiPlot v0.9.9.5 e os ajustes obtidos para cada modelo são ilustrados na Figura 24.

Um ponto importante a ser destacado dentre os modelos estudados é que apenas o EGM96, EIGEN-CG03C e o go_cons_gcf_2_tim_r4 têm erros pré-determinados: 8 mGal para o primeiro e 5 mGal para o restante (REIGBER et al., 2006; BRAITENBERG, 2015). Os outros modelos não apresentaram esta informação em literatura, provavelmente devido à grande variabilidade de erro dentro do próprio modelo, que pode chegar de 1 a 8 mGal para os dados de anomalias da gravidade para a América do Sul utilizados no EGM96, por exemplo (LEMOINE et al. 1998).

Figura 24: Ajuste por MMQ para os dados de anomalia Bouguer calculada pelo: **a)** EGM96. Erro de 8 mGal (LEMOINE et al. 1997). Coeficiente angular (A) igual a $-0,100630 \pm 0,000010$ e R^2 igual a 0,9398. **b)** EGM2008. Coeficiente angular obtido igual a $-0,100216 \pm 0,000054$ e R^2 vale 0,9284. **c)** EGM2008upto360. Coeficiente angular obtido vale $-0,100319 \pm 0,000051$ e R^2 vale 0,9370. **d)** EIGEN-CG03C. Erro de 5 mGal (REIGBER et al. 2006). Coeficiente angular obtido igual a $-0,100684 \pm 0,000006$ e R^2 vale 0,9410. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Erro de 5 mGal (BRAITENBERG, 2015). Coeficiente angular obtido vale $-0,100427 \pm 0,000006$ e o R^2 vale 0,9403.

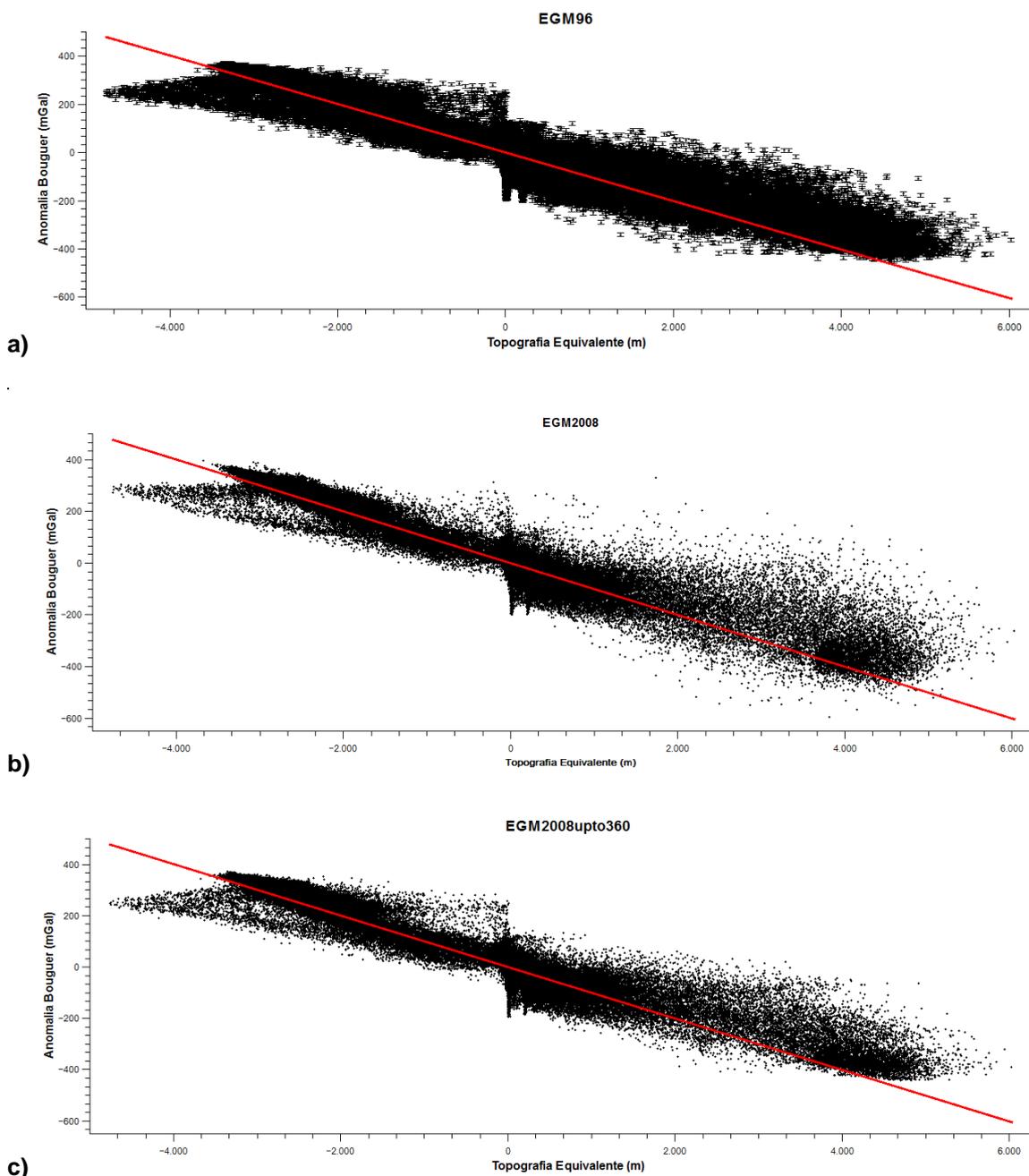
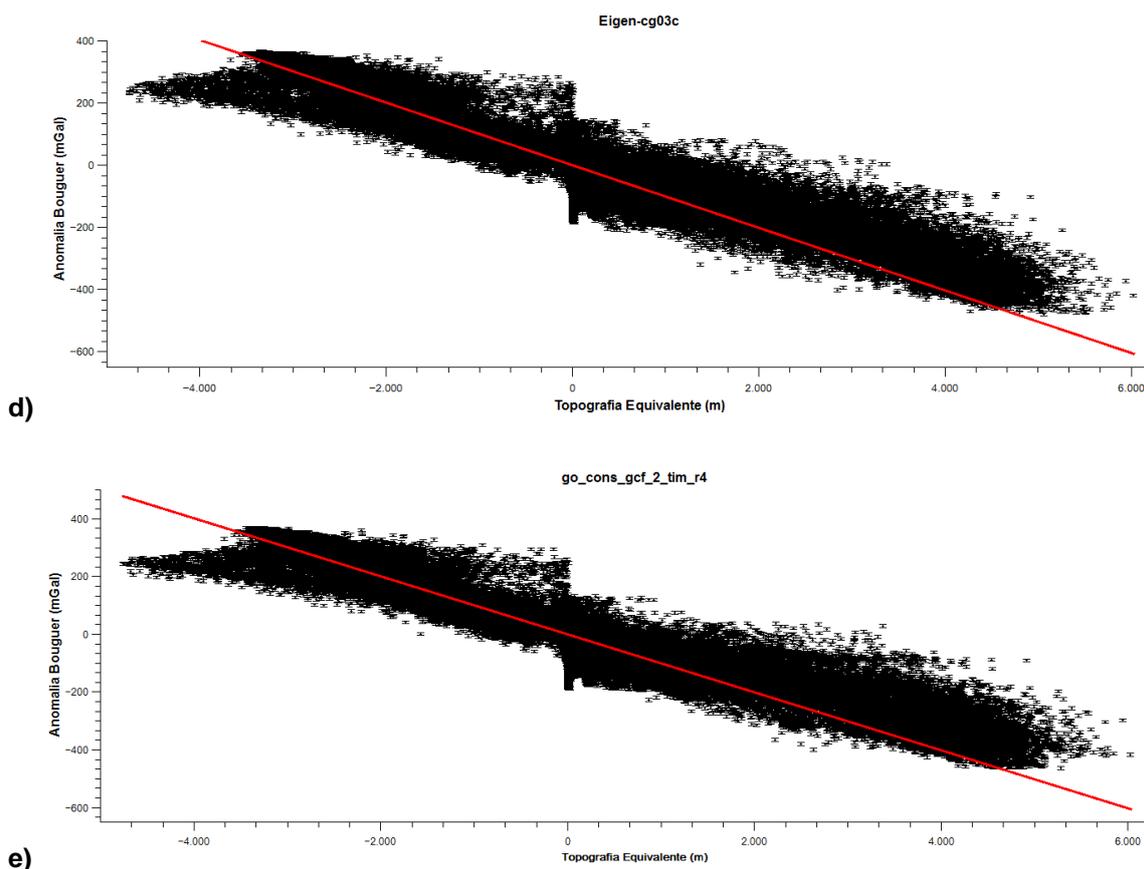


Figura 24 (cont.): Ajuste por MMQ para os dados de anomalia Bouguer calculada pelo: **a)** EGM96. Erro de 8 mGal (LEMOINE et al. 1997). Coeficiente angular (A) igual a $-0,100630 \pm 0,000010$ e R^2 igual a 0,9398. **b)** EGM2008. Coeficiente angular obtido igual a $-0,100216 \pm 0,000054$ e R^2 vale 0,9284. **c)** EGM2008upto360. Coeficiente angular obtido vale $-0,100319 \pm 0,000051$ e R^2 vale 0,9370. **d)** EIGEN-CG03C. Erro de 5 mGal (REIGBER et al. 2006). Coeficiente angular obtido igual a $-0,100684 \pm 0,000006$ e R^2 vale 0,9410. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Erro de 5 mGal (BRAITENBERG, 2015). Coeficiente angular obtido vale $-0,100427 \pm 0,000006$ e o R^2 vale 0,9403.



Fonte: Barbosa (2017).

A Tabela 4 lista os principais dados retirados dos ajustes realizados.

Tabela 4: Principais parâmetros obtidos pelo ajuste por MMQ para os modelos escolhidos.

Modelo	Ajuste		
	A	Erro A	R^2
EGM96	-0,100630	0,000010	0,9398
EGM2008	-0,100216	0,000054	0,9284
EGM2008upto360	-0,100319	0,000051	0,9370
EIGEN-CG03C	-0,100684	0,000006	0,9410
go_cons_gcf_2_tim_r4	-0,100427	0,000006	0,9403

Fonte: Barbosa (2017).

Um dos primeiros parâmetros a serem observados é o coeficiente de determinação R^2 . A partir dele é possível observar que todos os modelos têm R^2 próximo a 1, indicando que os ajustes são adequados para todos os modelos.

A Figura 24 mostram pouca dispersão em relação à reta ajustada, diferindo-se apenas o EGM2008 (Figura 24b), que apresenta uma maior dispersão e conseqüentemente menor valor de R^2 . O fenômeno ocorre, novamente, devido ao alto grau e ordem do modelo que permite maior detalhamento de anomalias pontuais, reflexo da maior amplitude dos dados (Tabela 3).

O parâmetro A (equação 32) segue a teoria, mostrando-se negativo para todos os ajustes realizados. Dentro do erro todos os modelos têm valores próximos. O modelo EIGEN-CG03C é o que mostra o maior valor e o EGM2008 mostra o menor valor.

O erro do parâmetro A só apresenta diferenças bruscas quando há um erro associado na medida da anomalia Bouguer, sendo este o caso dos modelos EGM96, EIGEN-CG03C e `go_cons_gcf_2_tim_r4`, com erro de 8 mGal para o primeiro e 5 mGal para os dois restantes (REIGBER et al., 2006; BRAITENBERG, 2015). Nestes casos, o erro cai em mais de 9/10 e dá maior confiabilidade ao residual da anomalia Bouguer resultante. Para os demais modelos, a associação de erro não foi possível pois nenhum deles apresenta uma tabela ou mapa de erro.

6.5. Mapas de Residual da Anomalia Bouguer

A próxima etapa é a geração dos mapas de residual de anomalia Bouguer, conforme equações (30 e 31). Na obtenção de cada residual foi utilizado o parâmetro A adquirido pelo ajuste por MMQ (Tabela 4), e em todos os mapas foi utilizada a mesma escala de cor. Os mapas de residual da anomalia Bouguer para cada modelo são mostrados na Figura 25.

Figura 25: Mapa de residual da anomalia Bouguer para o modelo **a)** EGM96 **b)** EGM2008 **c)** EGM2008upto360 **d)** EIGEN-CG03C **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4.

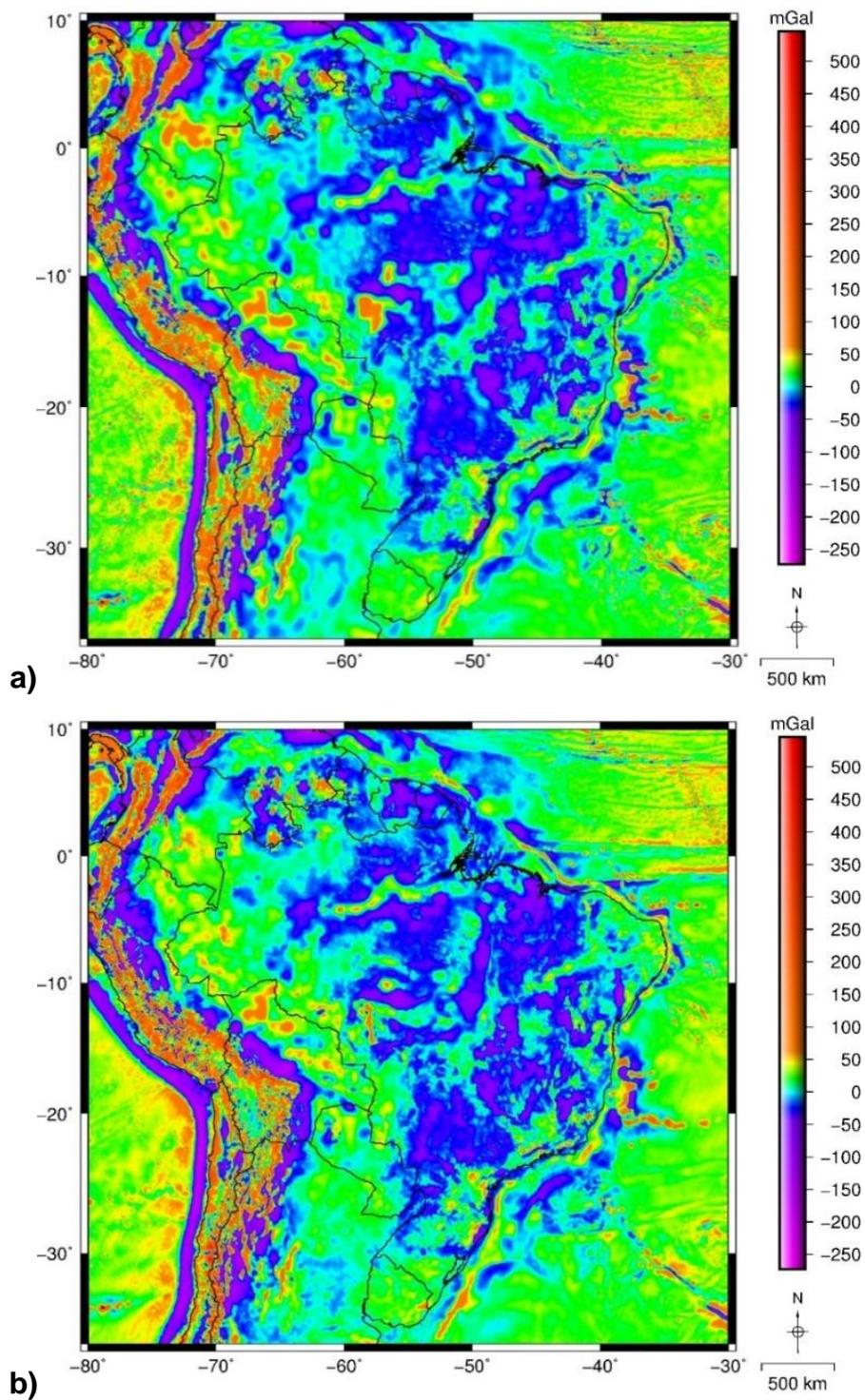


Figura 25 (cont.): Mapa de residual da anomalia Bouguer para o modelo **a)** EGM96 **b)** EGM2008 **c)** EGM2008upto360 **d)** EIGEN-CG03C **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4.

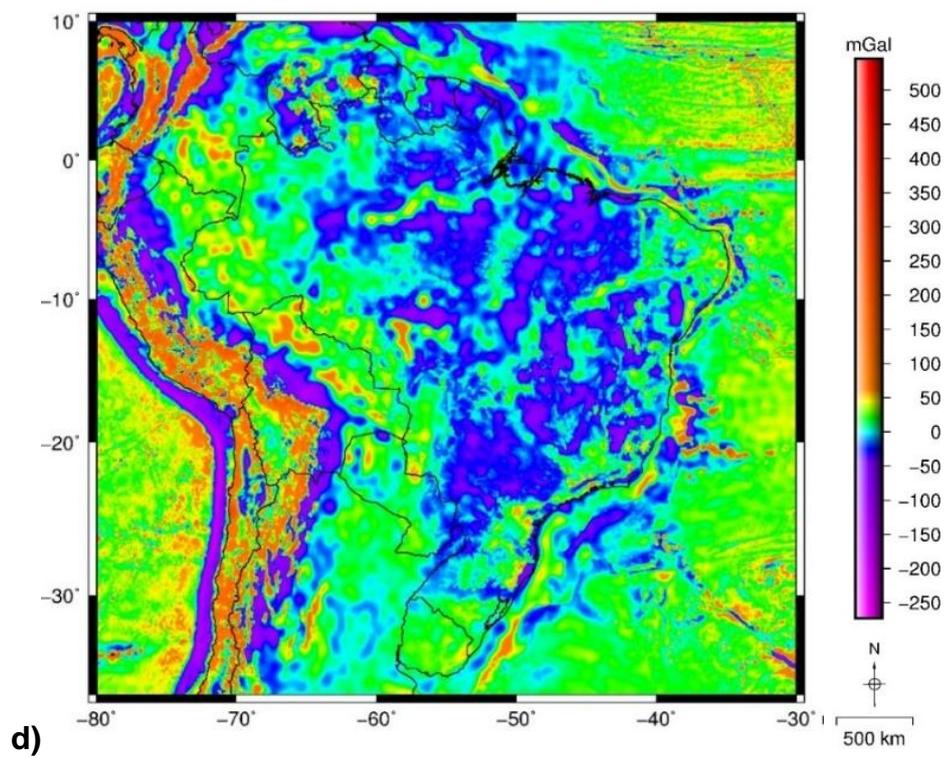
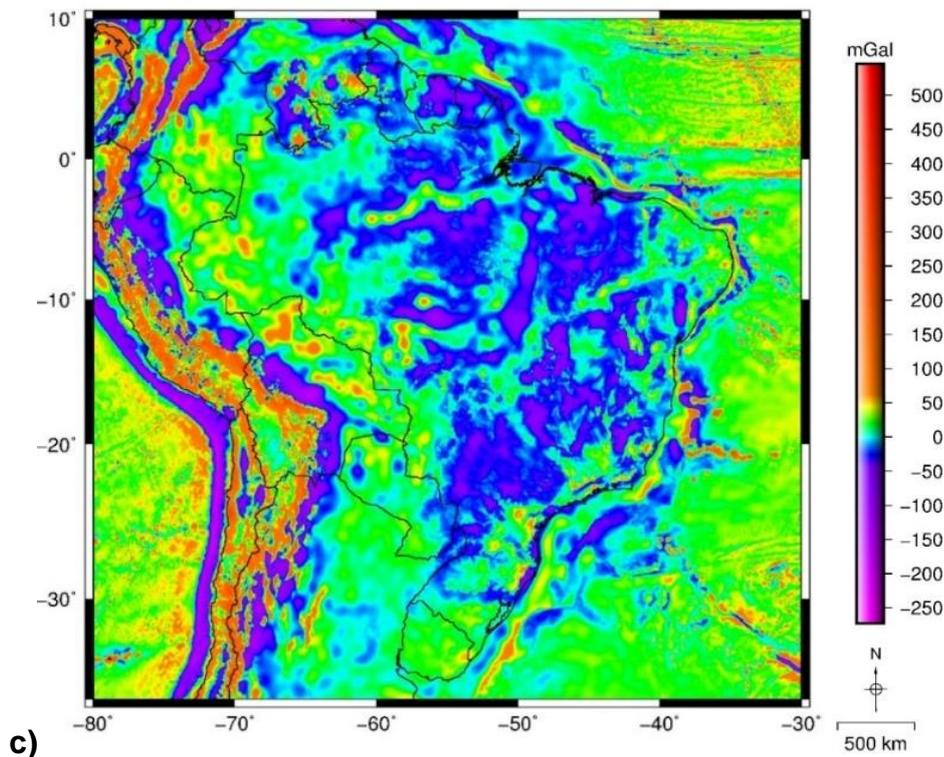
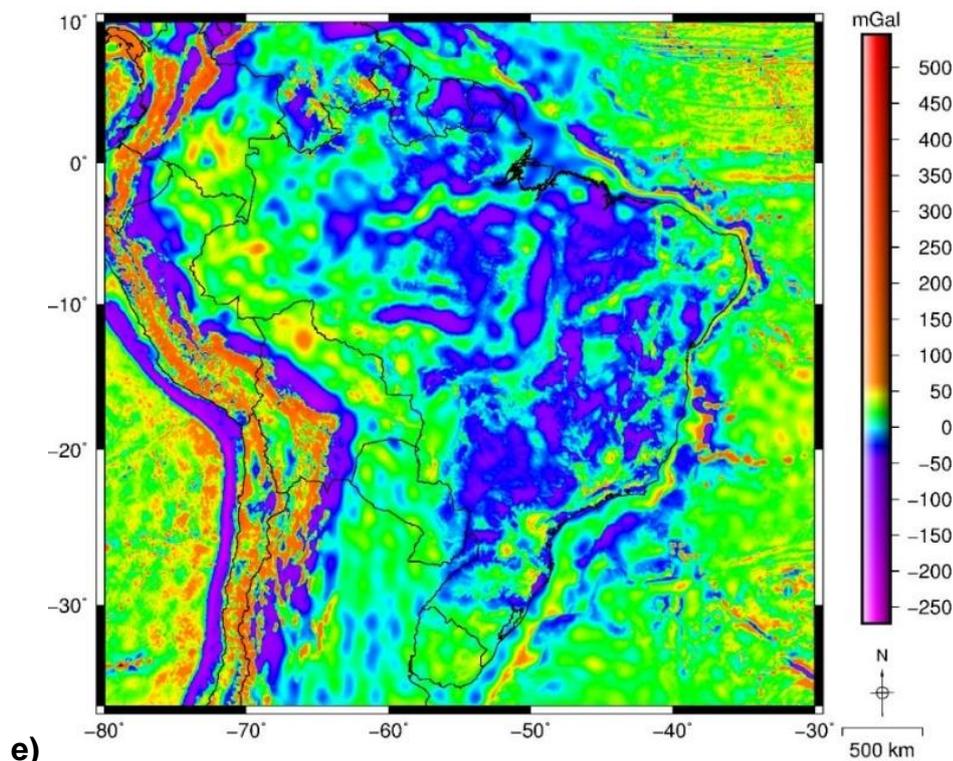


Figura 25 (cont.): Mapa de residual da anomalia Bouguer para o modelo **a)** EGM96 **b)** EGM2008 **c)** EGM2008upto360 **d)** EIGEN-CG03C **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4.



Fonte: Barbosa (2017).

Os mapas de residuais, diferentemente dos mapas de anomalia Bouguer (Figuras 23), mostram um maior número de anomalias que refletem a geologia do continente. Em todos é possível observar uma clara correlação com a dorsal meso-oceânica, com os Andes, Escudo Cristalino das Guianas, Bacia do Parnaíba e o centro-norte da Bacia do Paraná.

Uma comparação entre os residuais ilustra o grau de detalhamento presente no modelo EGM2008, fato possível graças ao alto grau e ordem alcançados por este. A diferença de detalhamento se mantém mesmo quando comparado com o EGM2008upto360. Este nível de detalhamento comprova que o espaçamento de 5' x 5' dos dados terrestres utilizados na elaboração do modelo EGM2008 fazem uma diferença significativa e podem levar a diferenças na interpretação do objeto de estudo em regiões em que o modelo é representativo.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESIDUAIS DAS PROVÍNCIAS

Com os mapas residuais obtidos é possível, por fim, estudar as regiões das províncias minerais escolhidas: Alta Floresta, Quadrilátero Ferrífero, Carajás e Tapajós. Com o intuito de averiguar a aplicabilidade e exigibilidade da técnica utilizada em Braitenberg (2015) comparar-se-ão as anomalias Bouguer de cada província (dados retirados do portal ICGEM) com os residuais da anomalia Bouguer tanto em mapa quanto em perfis destacados nos mapas.

De forma semelhante à Braitenberg (2015), os mapas foram plotados juntamente com a localização das minas de exploração mineral – estejam elas ativas ou não – cuja localização pode ser obtida pelo portal GEOBANK da CPRM <<http://geobank.cprm.gov.br>>.

7.1. Província Alta Floresta

A província mineral de Alta Floresta está localizada na divisa entre Mato Grosso, Pará e Amazonas. É produtora de cobre, chumbo, ouro e zinco e a localidade das minas produtoras (ativas ou não) são representadas por pontos pretos nos mapas de anomalia Bouguer e residuais da anomalia Bouguer (Figuras 26 e 28, respectivamente).

Em todos os mapas de anomalia Bouguer nota-se uma anomalia positiva com aparente continuidade para leste no centro da província, ora com formato oval (modelo EGM2008upto360, Figura 26c), ora elipsoidal (modelo TIM_R4, Figura 26e). Contudo, em todos os mapas constata-se que as minas circundam a anomalia positiva, indicando provável relação desta com a mineralização da província.

O modelo EGM2008 (Figura 26b) é o que mostra maior detalhamento na província, enquanto que o modelo que apresenta menor grau de detalhamento é o go_cons_gcf_2_tim_r4 (Figura 26e). Esta discrepância é explicada pelo menor grau e ordem do último modelo (240) e por este ser *satellite-only*.

Observa-se também que os modelos EGM2008 e EGM2008upto360 (Figura 26c) têm grande semelhança entre si, diferindo-se apenas no maior grau de detalhamento e realce das anomalias do primeiro, graças aos maiores grau e ordem

alcançados. Esta semelhança mostra que dados de grau e ordem maiores do que 360 têm pouca relevância para a região.

O modelo EGM96 (Figura 26a) é o único que mostra uma continuidade para norte da anomalia positiva. Trata-se de um artefato do processamento que se baseou apenas em dados de satélite, visto que a região amazônica não foi coberta por dados terrestres no modelo (Figura 1). Outro fato que corrobora a hipótese é a ausência desta continuidade nos outros modelos estudados, nem mesmo no modelo *satellite-only go_cons_gcf_2_tim_r4*.

A possibilidade de haver artefatos de processamento é real e, com o exemplo acima, mostra-se essencial comparar modelos distintos – com fontes de dados distintas, para se estudar determinada região, independente de qual seja o objetivo do estudo.

Figura 26: Anomalia Bouguer para a província Alta Floresta pelo modelo a) EGM96. b) EGM2008. c) EGM2008upto360. d) EIGEN-CG03C. e) *go_cons_gcf_2_tim_r4*. Pontos pretos representam a localização das minas da província. Valores superiores ao máximo da escala estão em branco.

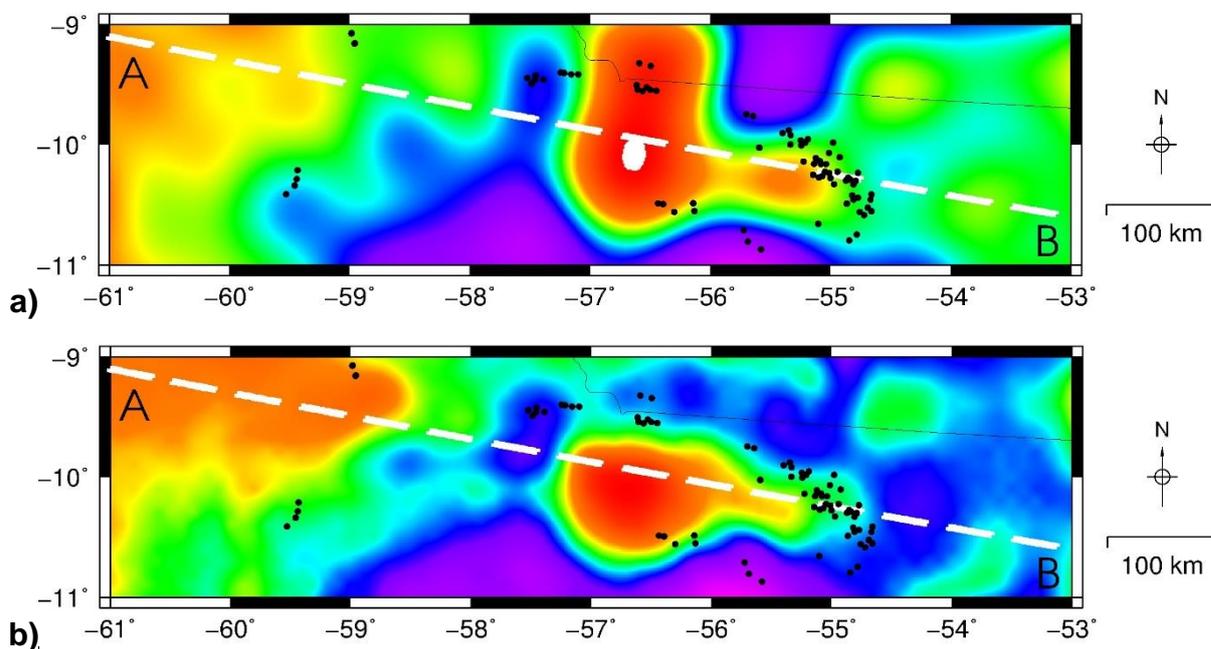
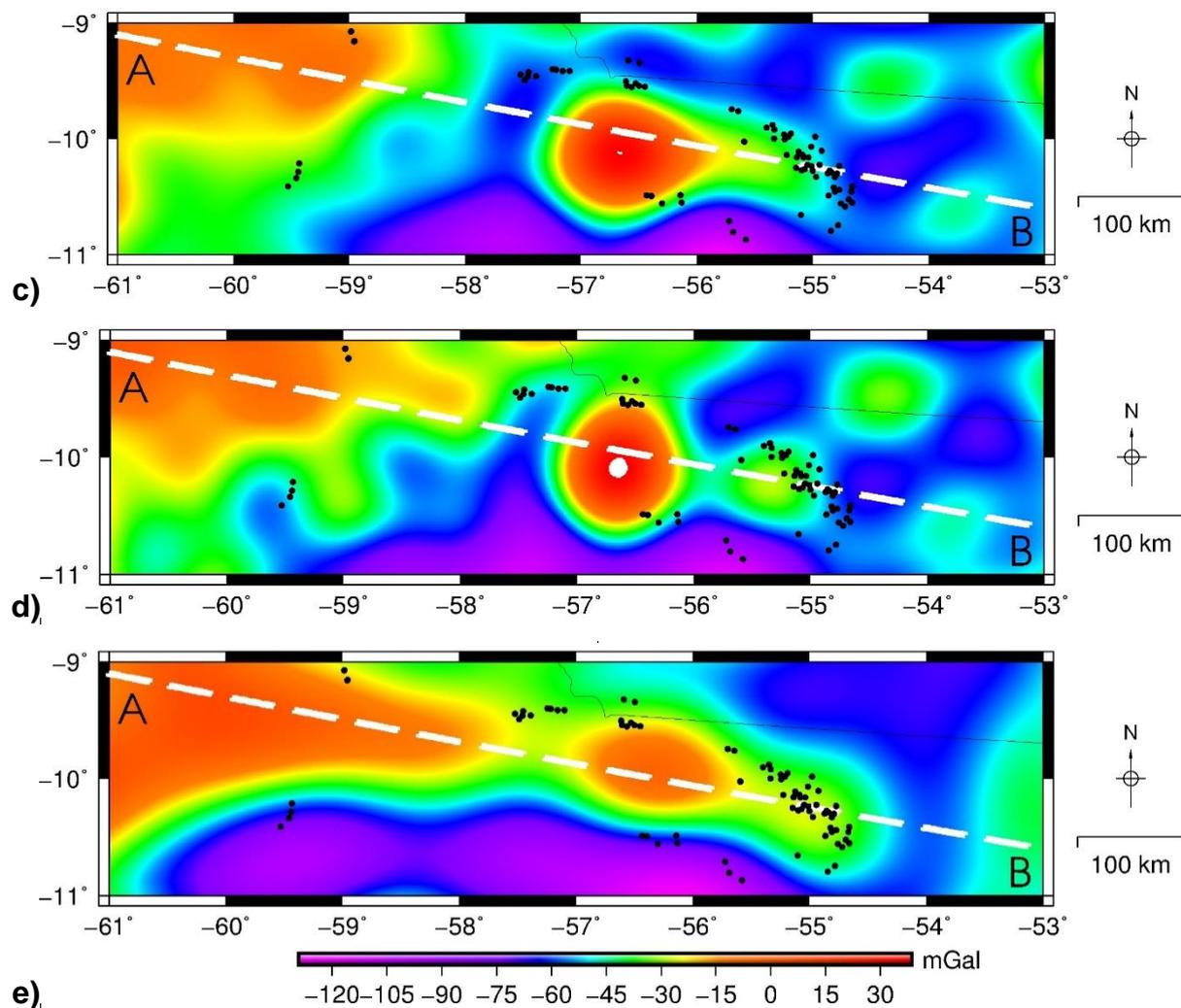


Figura 26 (cont.): Anomalia Bouguer para a província Alta Floresta pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos representam a localização das minas da província. Valores superiores ao máximo da escala estão em branco.



Fonte: Barbosa (2017).

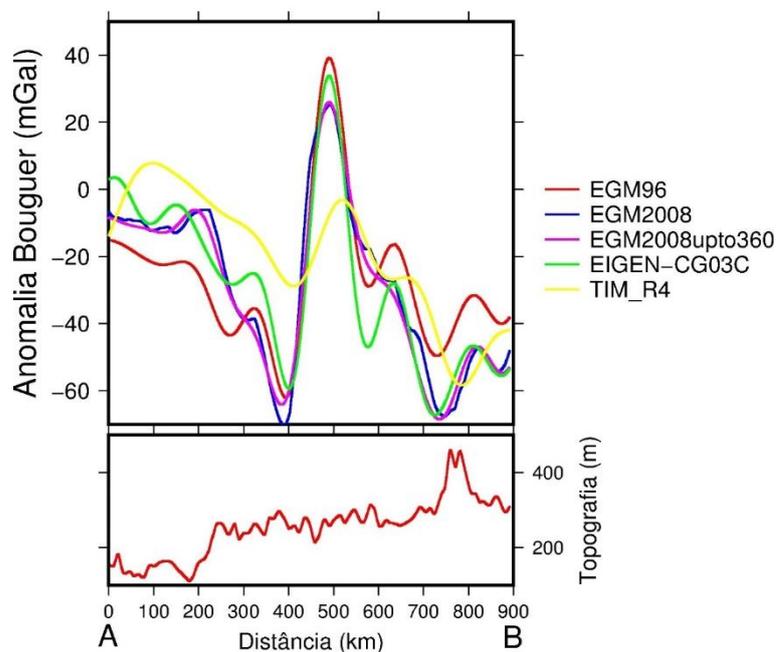
A Figura 27 apresenta os perfis A-B da Figura 26 de cada modelo estudado. Há uma grande correlação entre os modelos EGM2008 e EGM2008upto360, corroborando a baixa relevância de informações associadas a grau e ordem superiores a 360 para a região.

O modelo EGM96 apresenta amplitudes das anomalias distintas dos demais modelos, porém sempre próximas dentro do erro de 8 mGal do modelo para a América do Sul (LEMOINE et al. 1997). A mesma hipótese explica as diferenças entre o modelo EIGEN-CG03C e EGM2008, sendo que o primeiro tem erro de 5 mGal (REIGBER et al. 2006).

O modelo go_cons_gcf_2_tim_r4, por sua vez, destoa bastante dos demais não só em anomalias observadas como também na amplitude destas. Não se trata apenas de erro de medida, visto que o modelo tem erro de 5 mGal, mas também dos baixos grau e ordem que não abrangeram as anomalias de menor comprimento de onda que os outros modelos apresentam, que podem apresentar amplitudes significativas.

Novamente nota-se a importância de analisar diversos modelos de modo a não interpretar qualitativa e quantitativamente de forma inadequada os dados que podem corresponder bem ou não à região de estudo.

Figura 27: Perfis A-B dos mapas de anomalia Bouguer de cada modelo para a província Alta Floresta.



Fonte: Barbosa (2017).

A Figura 28 apresenta os mapas de residual da anomalia Bouguer para os modelos estudados. Como a técnica aplicada por Braitenberg (2015) relaciona a anomalia Bouguer com a topografia ponto-a-ponto para remover o efeito isostático (equação 30), espera-se uma correlação entre o residual da anomalia Bouguer com a topografia, além de um maior realce nas anomalias conforme variação da topografia.

O realce é aumentado em todos os mapas de residual de anomalia Bouguer, embora contorno e formato das anomalias mantiveram-se essencialmente idênticos quando comparados com a anomalia Bouguer (Figura 26).

Figura 28: Residual da anomalia Bouguer para a província Alta Floresta pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos representam a localização das minas da província. Valores superiores ao máximo da escala estão em branco.

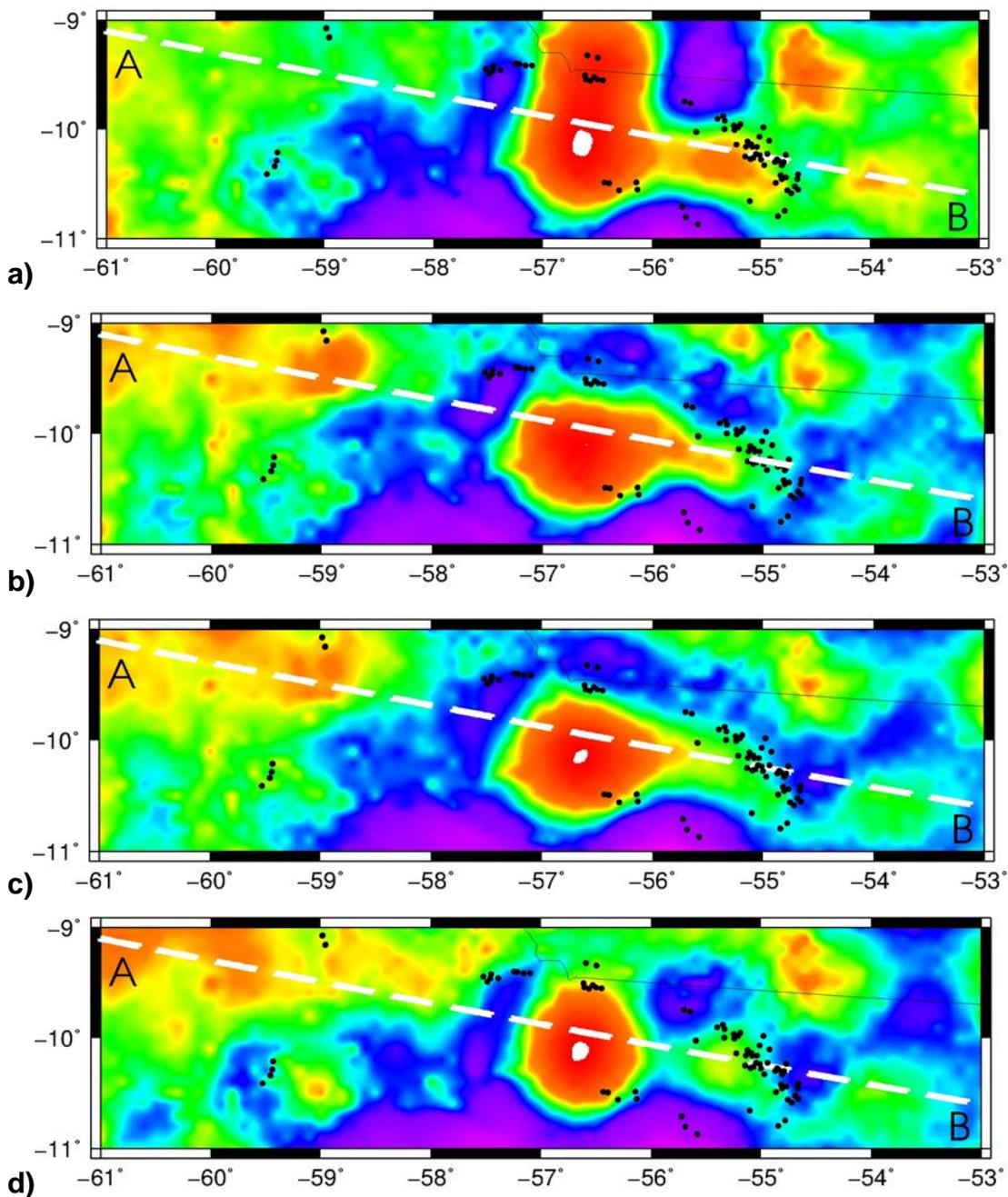
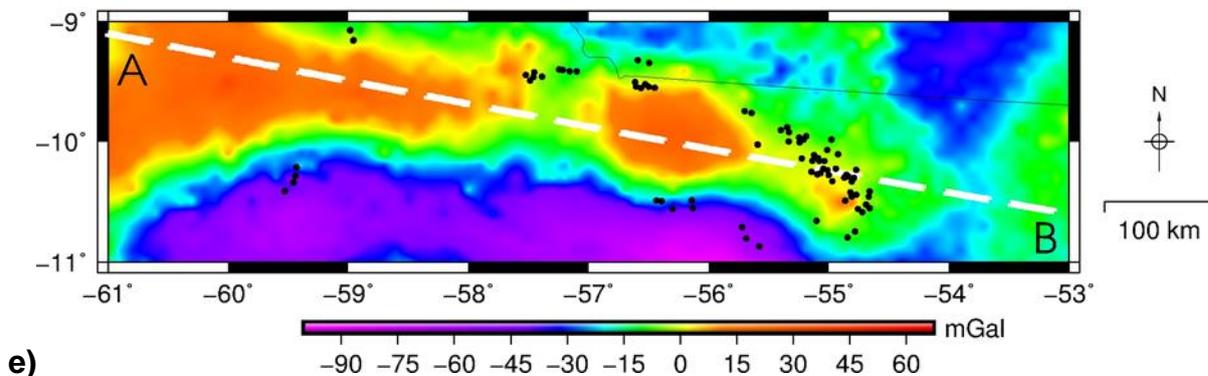


Figura 28 (cont.): Residual da anomalia Bouguer para a província Alta Floresta pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos representam a localização das minas da província. Valores superiores ao máximo da escala estão em branco.



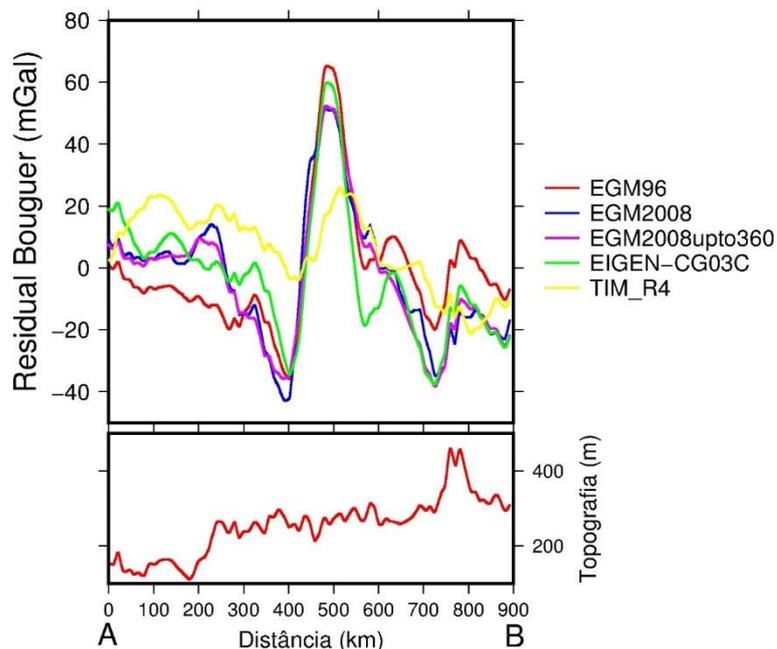
Fonte: Barbosa (2017).

Todas as discussões sobre a anomalia Bouguer dos modelos mantêm-se na comparação do residual da anomalia Bouguer. Isso se deve ao fato de, como mostra o perfil A-B da topografia (Figura 29), não haver grandes variações da topografia no perfil e esta ser baixa, de no máximo 450 metros. Portanto não há carga isostática de grande porte a ser compensada não sendo, portanto, exigida a aplicação da técnica de Braitenberg (2015) para a província.

As pequenas variações da topografia estão refletidas nas oscilações de curto comprimento de onda nos perfis A-B dos mapas de residual da anomalia Bouguer. Nestes perfis fica proeminente a assinatura da anomalia positiva vista nos mapas de anomalia Bouguer (Figura 26).

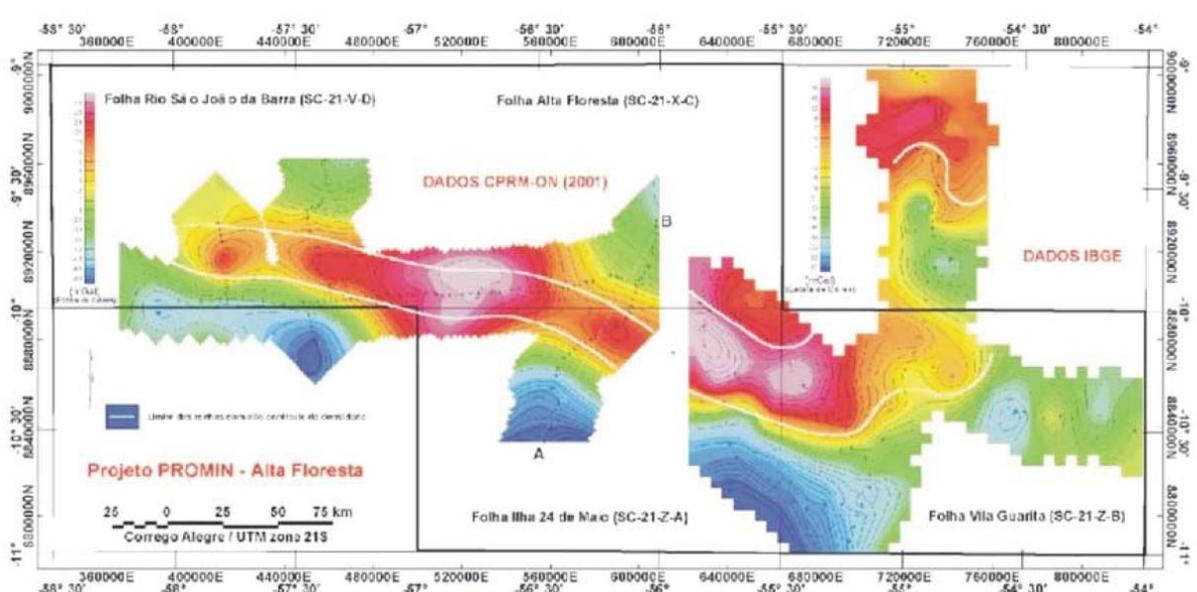
Frasca e Borges (2005) apresentam o mapa de anomalia Bouguer para a província Alta Floresta (Figura 30) oriundo de dados de gravimetria terrestre adquiridos por um convênio entre CPRM e Observatório Nacional em 2001. A região estudada por estes corresponde à região central das Figuras 26 e 28, onde se encontra o alto gravimétrico. Os supracitados autores também identificaram o alto e interpretam-no como uma “indicativa de espessamento crustal e de uma provável zona de sutura” afirmando ainda que ele está associado “[...] às rochas do terreno de alto a médio grau metamórfico constituídos pelos complexos Bacaeri-Mogno e Nova Monte Verde” (FRASCA; BORGES, 2005 p. 97). Estes complexos encontram-se na porção leste da província, agregados à Biotita-monzogranitos da Figura 16.

Figura 29: Perfis A-B dos mapas de residual da anomalia Bouguer de cada modelo para a província Alta Floresta.



Fonte: Barbosa (2017).

Figura 30: Anomalia Bouguer para a província de Alta Floresta oriundo de um convênio entre CPRM e Observatório Nacional.



Fonte: Frasca e Borges (2005, p. 17).

A boa correlação entre os mapas de anomalia Bouguer dos modelos e aquele adquirido pela CPRM e Observatório Nacional (Figuras 26 e 30, respectivamente) mostram que é possível aplicar a gravimetria por satélite em estudos de províncias

em uma escala regional. Tal aplicabilidade ganha ainda mais importância devido à dificuldade de acesso das províncias minerais na região amazônica, como é o caso de Alta Floresta, Carajás e Tapajós.

A anomalia positiva identificada tanto nos mapas de anomalia Bouguer de satélite (Figura 26), mapa terrestre (Figura 30) quanto nos residuais de anomalia Bouguer (Figura 28) não apresenta relação com a geologia aflorante e requer estudos utilizando outros métodos geofísico de modo a comprovar a interpretação de Frasca e Borges (2005). Trata-se, portanto, de uma estrutura potencialmente relacionada com a metalogenia da província.

7.2. Província Carajás

A província Carajás está localizada na porção leste do Estado do Pará. É uma das principais produtoras de ouro do Brasil, além de produzir ferro, manganês, níquel e cobre. Semelhantemente ao realizado no estudo da província Alta Floresta, os pontos pretos no mapa representam a localização das minas (ativas ou não) da região. Os mapas de anomalia Bouguer e mapas residuais de anomalia Bouguer para a Província de Carajás estão representados nas Figuras 31 e 34, respectivamente.

Com a exceção do modelo EGM96, todos apresentam um alto gravimétrico na região centro-norte e os baixos a sudeste e sul da província. Porém, as semelhanças restringem-se a essas três anomalias e cada modelo apresenta um mapa de anomalia Bouguer distinto.

O modelo EGM96 é o que mais destoa dos modelos, não apresentando as três anomalias supracitadas, além de apresentar um baixo gravimétrico ao norte (Perfis C-D, Figura 31), região em que o restante dos modelos apresenta anomalia positiva. Novamente a explicação se deve à escassez de dados terrestres utilizados no modelo para a região amazônica (Figura 1).

Figura 31: Anomalia Bouguer para a província Carajás pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores em preto.

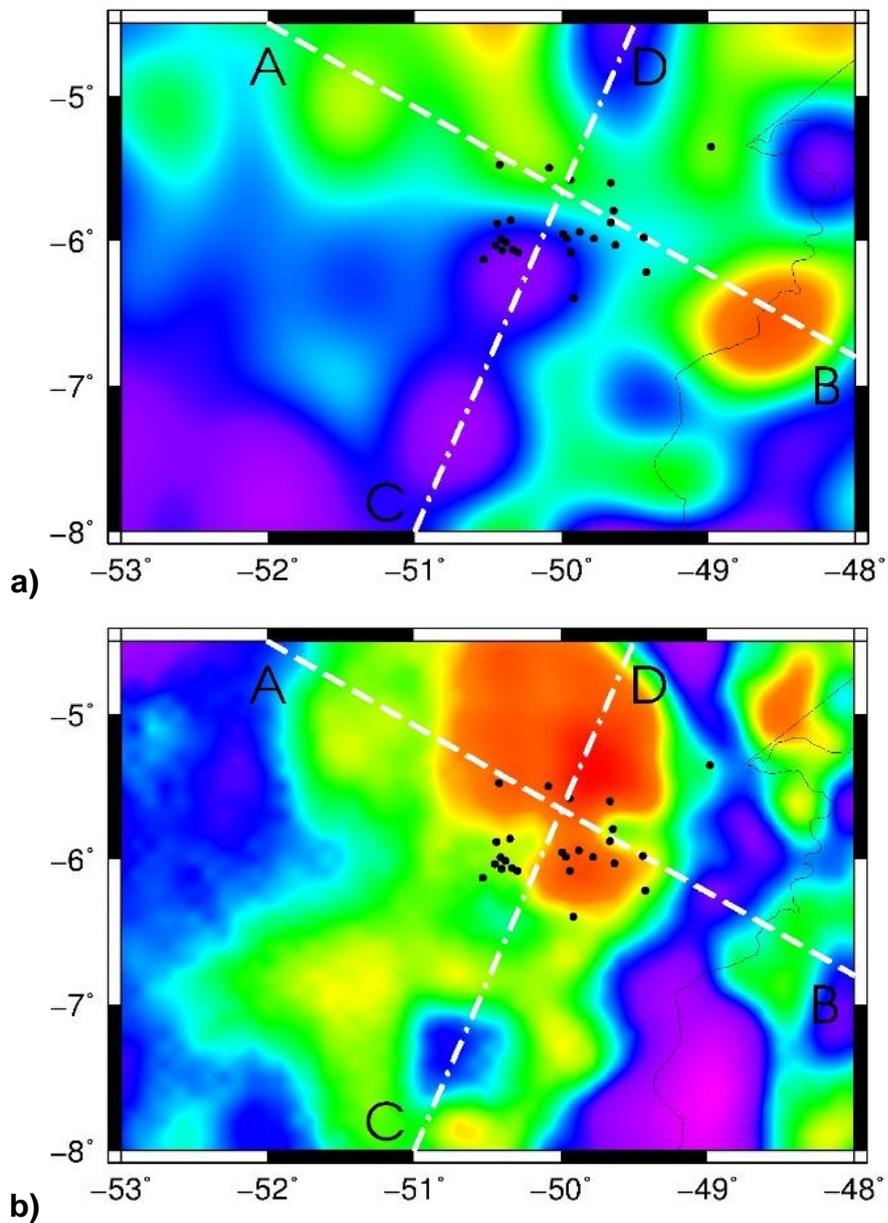


Figura 31 (cont.): Anomalia Bouguer para a província Carajás pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores em preto.

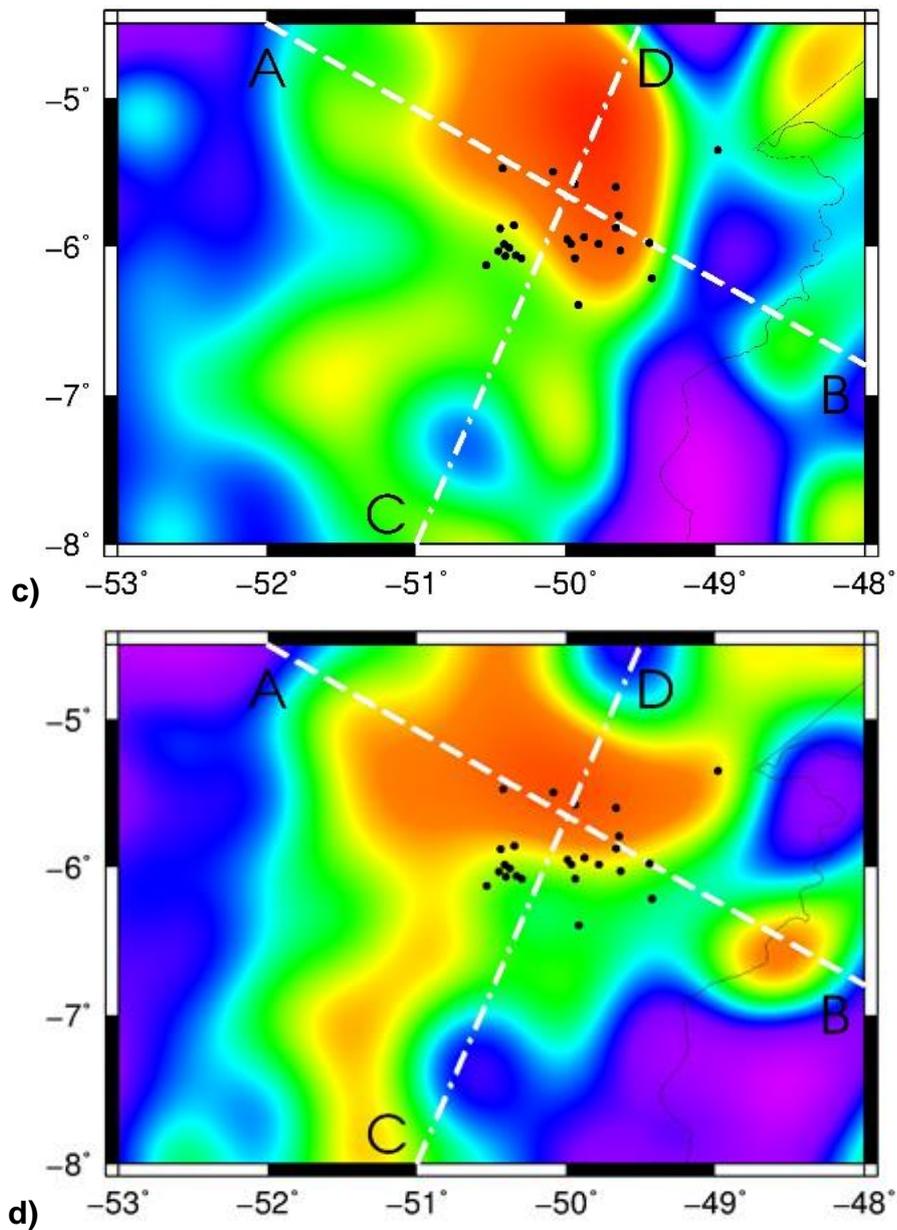
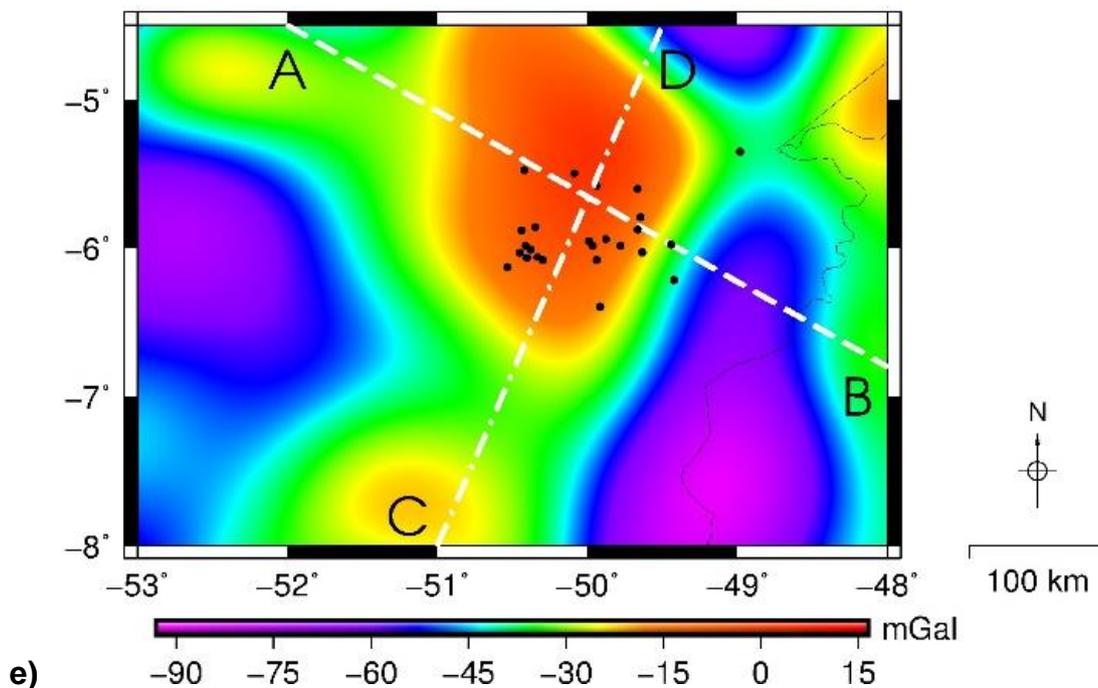


Figura 31 (cont.): Anomalia Bouguer para a província Carajás pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores em preto.



Fonte: Barbosa (2017).

Assim como ocorre em Alta Floresta, os modelos EGM2008 e EGM2008upto360 mostram uma grande semelhança entre si, diferindo-se apenas em detalhamento e realce. Isso permite afirmar que, em uma análise qualitativa da província, os maiores grau e ordem do modelo EGM2008 pouco têm influência.

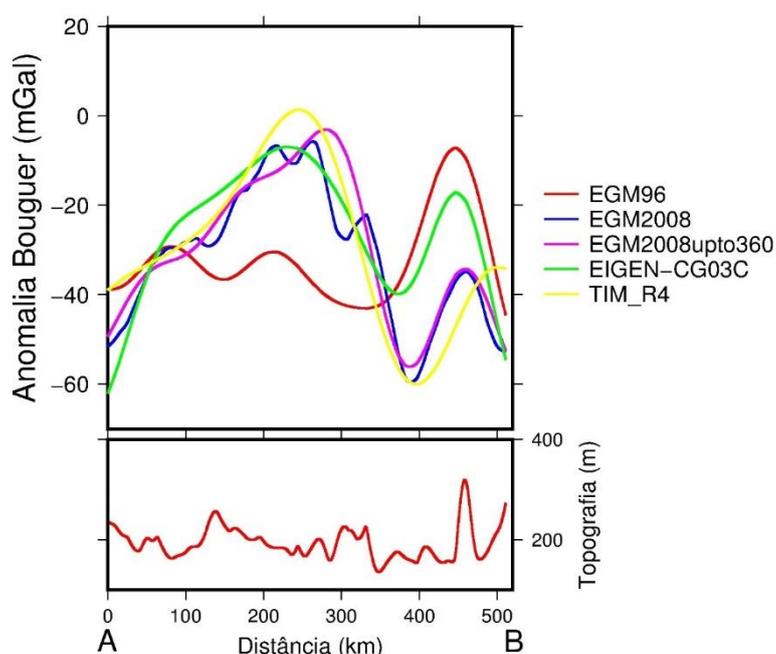
Outra anomalia que se destaca está a leste, próxima ao fim do perfil A-B (Figura 31). Trata-se de uma anomalia positiva vista nos modelos EGM96 e EIGEN-CG03C e com menor amplitude nos modelos EGM2008 e EGM2008upto360 (Figura 32).

De modo a abranger todas as anomalias citadas, as Figuras 32 e 33 apresentam os dados dos perfis A-B e C-D, respectivamente. Analisando os perfis A-B dos modelos constata-se a diferença do modelo EGM96 em relação aos demais. Com a exceção deste, todos os outros modelos apresentam um alto gravimétrico no centro da província coincidentes dentro da incerteza dos modelos: 5 mGal para o go_cons_gcf_2_tim_r4 (BRAITENBERG, 2015) e o EIGEN-CG03C (REIGBER et al. 2005) e 8 mGal para o EGM96 (LAMOINE et al. 1997). Fora do alto há uma discordância da amplitude da anomalia próxima ao ponto B dos modelos EGM96 e

EIGEN-CG03C dos demais. Por estes modelos utilizarem poucos dados terrestres na região amazônica (Figuras 1 e 3), interpreta-se que estes altos possam representar artefatos de processamento.

Observa-se também que o perfil A-B correspondente ao modelo EGM2008 apresenta anomalias de menor comprimento de onda que não são vistas no modelo EGM2008upto360. Vê-se, portanto, que diferentemente do que ocorre na província Alta Floresta, em Carajás os maiores grau e ordem do modelo EGM2008 e a menor grade (5' x 5') permitiram identificar anomalias não vistas em qualquer outro modelo aqui estudado. Trata-se de uma melhoria quantitativa única do modelo, não vista em uma análise qualitativa dos mapas.

Figura 32: Perfis A-B dos mapas de anomalia Bouguer de cada modelo para a província Carajás.

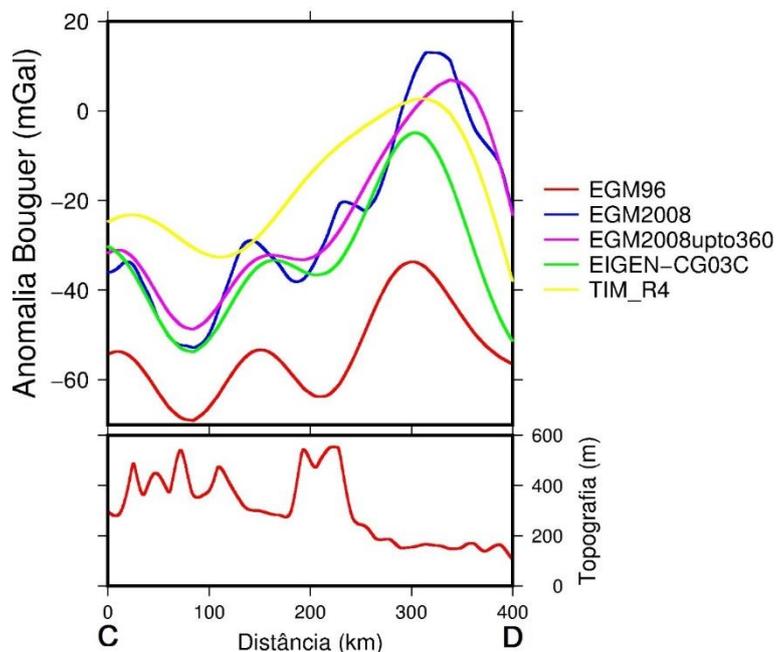


Fonte: Barbosa (2017).

Referente aos perfis C-D (Figura 33), novamente o modelo EGM2008 apresenta anomalias de menor comprimento de onda e os modelos EGM96 e go_cons_gcf_2_tim_r4 destoam dos demais. Credita-se a diferença à escassez de dados terrestres na região amazônica e aos baixos grau e ordem do modelo *satellite-only* go_cons_gcf_2_tim_r4.

Com a exceção do modelo EGM96, todos evidenciam uma anomalia positiva ao norte da província, correspondendo ao Domínio Bacajá do paleoproterozoico (Figura 17), fora dos limites do Domínio Carajás e, portanto, da província.

Figura 33: Perfis C-D dos mapas de anomalia Bouguer de cada modelo para a província Carajás.



Fonte: Barbosa (2017).

A Figura 34 apresenta os mapas de residual da anomalia Bouguer obtidos para os modelos escolhidos. Devido à correção isostática ponto-a-ponto observam-se anomalias de curto comprimento de onda oriundas das variações da topografia. No caso dos perfis A-B (Figura 35), a topografia tem poucas variações bruscas e é de aproximadamente 200 metros em média. Por isso, pouco influencia no residual da anomalia Bouguer.

Figura 34: Residual da anomalia Bouguer para a província Carajás pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco.

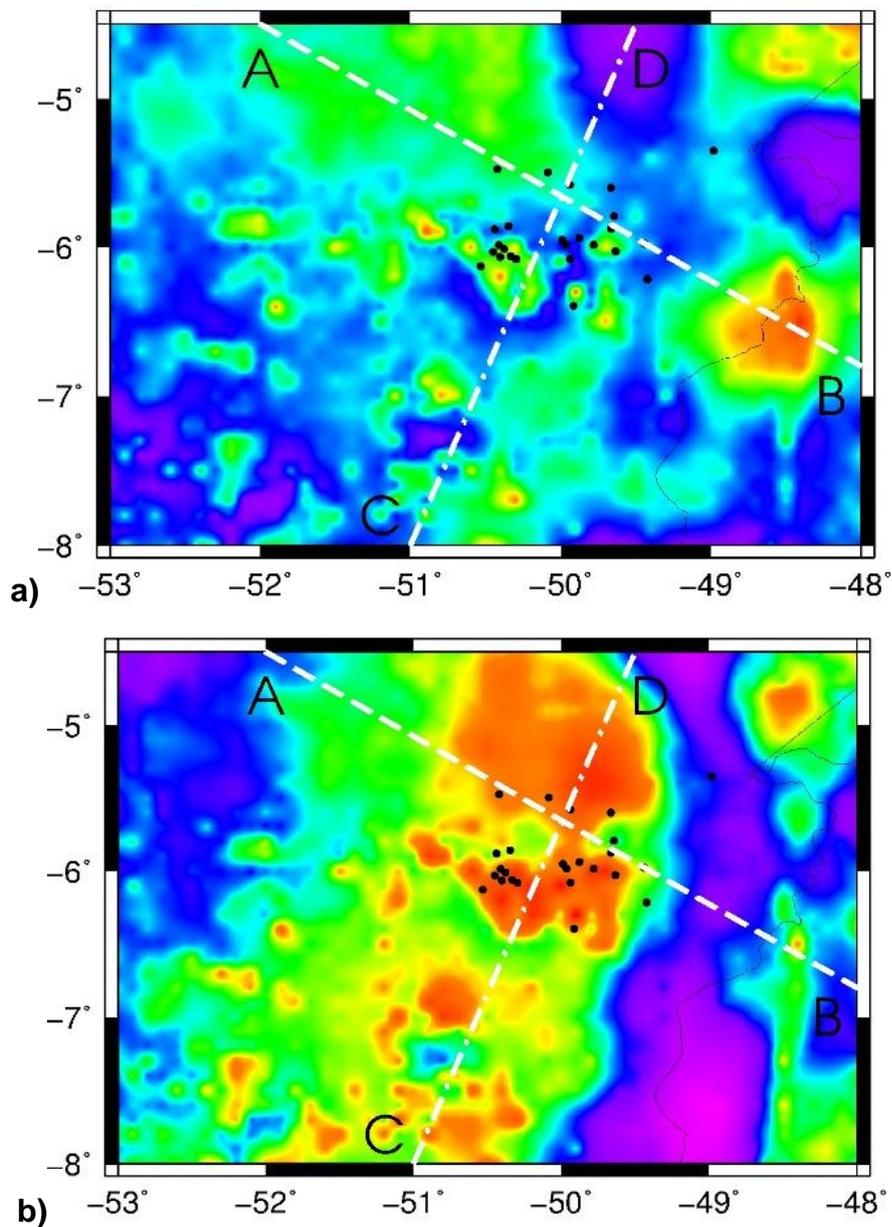


Figura 34 (cont.): Residual da anomalia Bouguer para a província Carajás pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco.

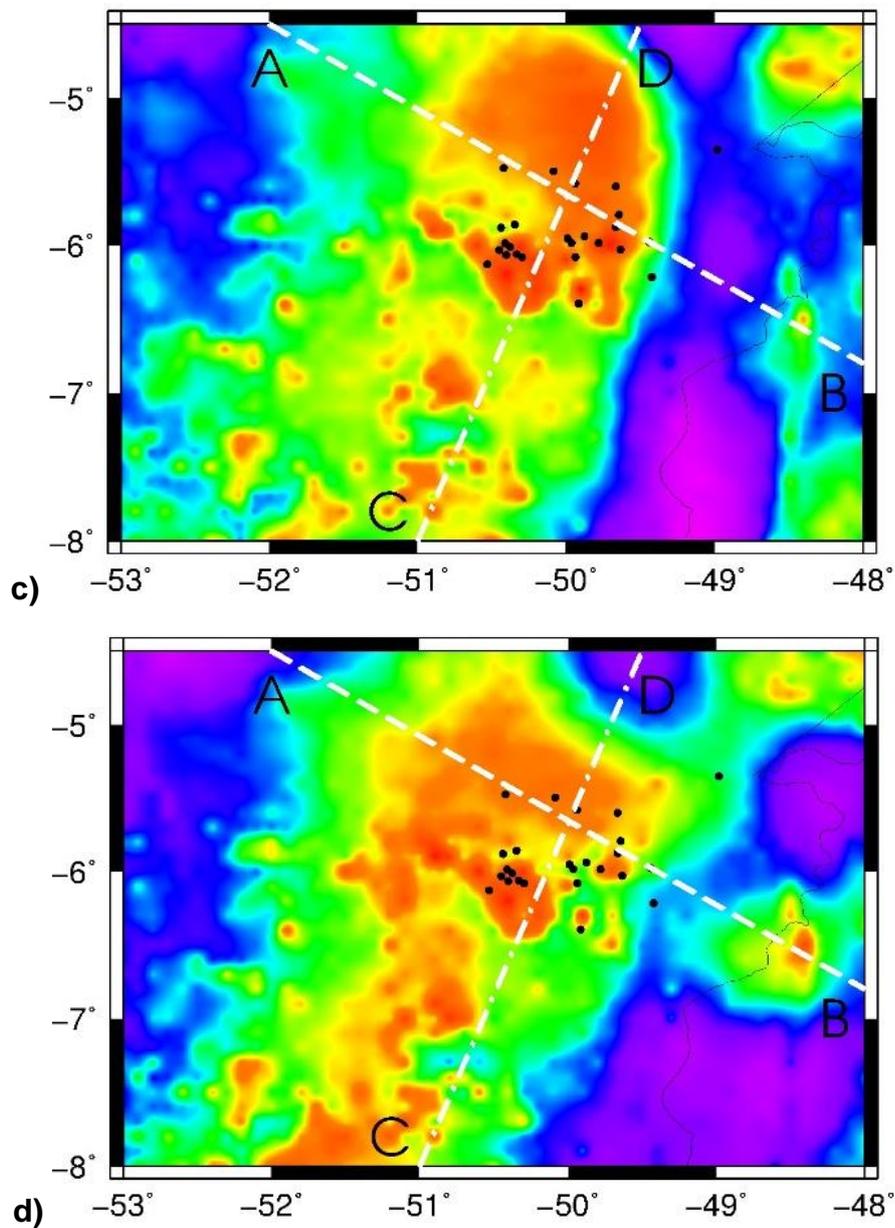
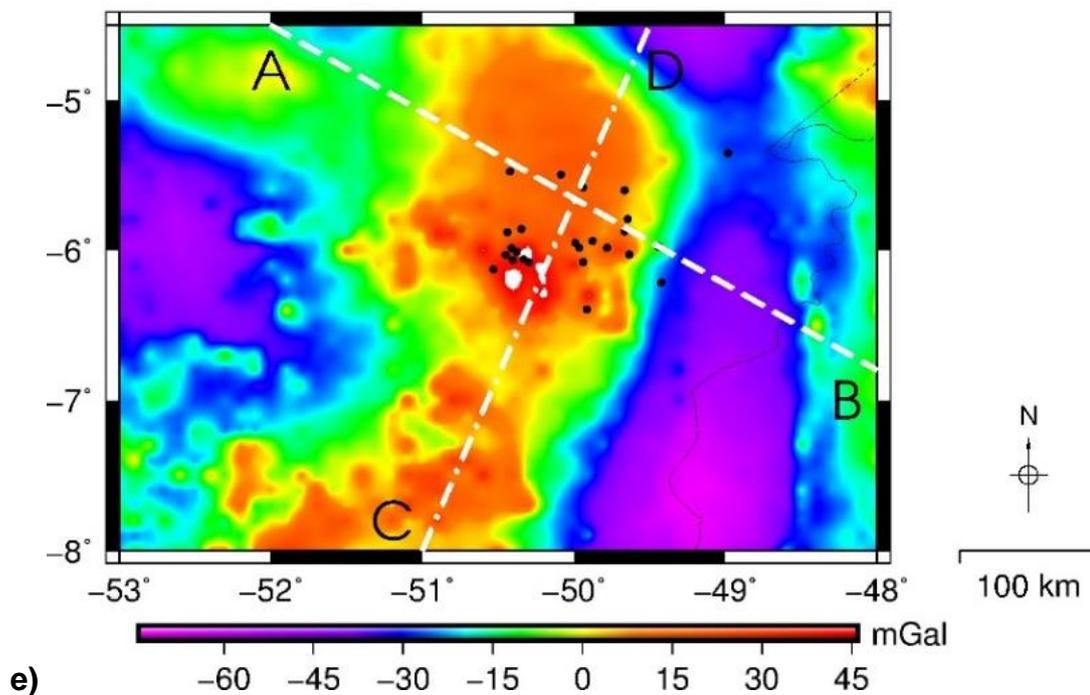
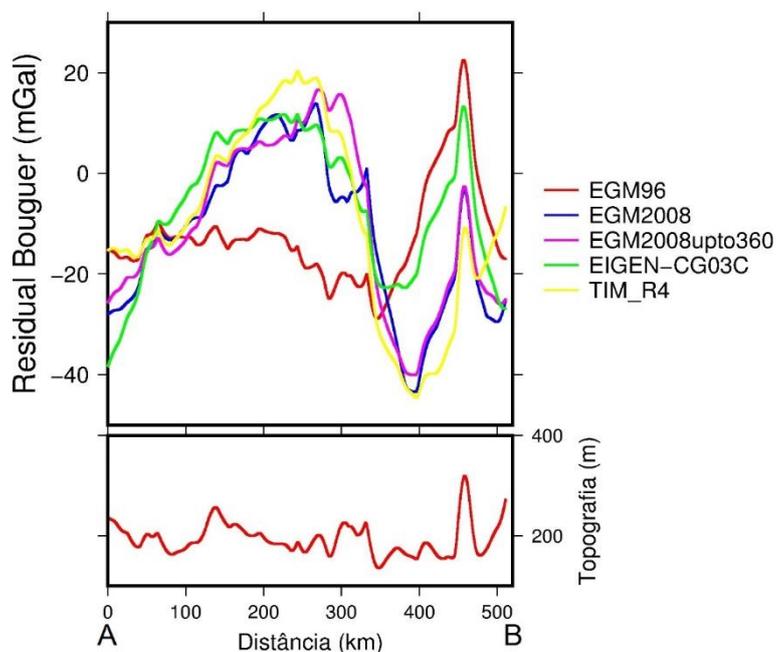


Figura 34 (cont.): Residual da anomalia Bouguer para a província Carajás pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco.



Fonte: Barbosa (2017).

Figura 35: Perfis A-B dos mapas de residual da anomalia Bouguer de cada modelo para a província Carajás.

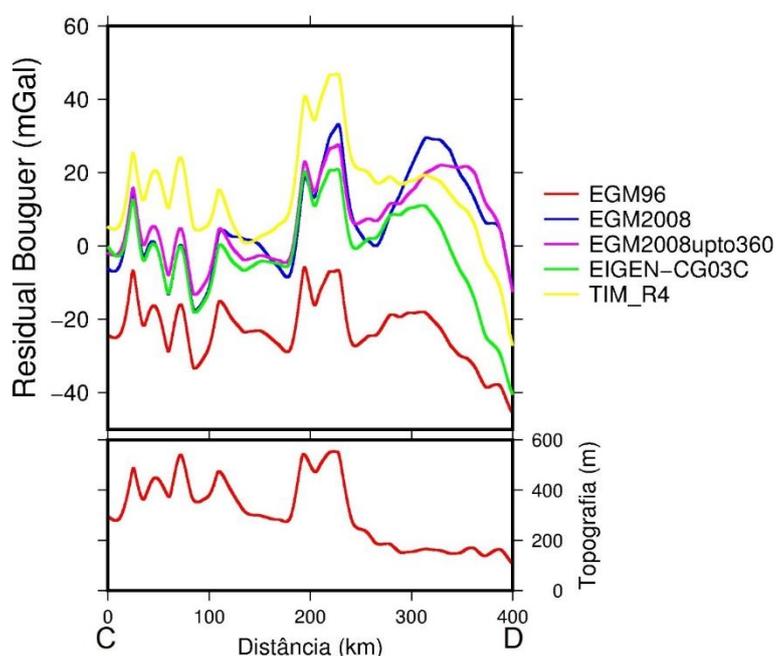


Fonte: Barbosa (2017).

O caso contrário ocorre para os perfis C-D (Figura 36), no qual há um pico de aproximadamente 600 metros que refletiu em uma anomalia residual positiva no centro da província. Trata-se de uma estrutura em que a correção isostática se fez necessária e justifica estudos em detalhe a partir de outros métodos geofísicos e geológicos. Observa-se também que o alto gravimétrico correspondente ao Domínio Bacajá continua presente.

De modo geral a província do Carajás apresenta anomalias positivas de interesse para estudos regionais. Não há uma relação clara da localização das minas com os altos na anomalia Bouguer e residual da anomalia Bouguer, embora as anomalias representem regiões que necessitam de estudos a partir de outros métodos geofísicos no âmbito de compreender a gênese e metalogênese da província.

Figura 36: Perfis C-D dos mapas de residual da anomalia Bouguer de cada modelo para a província Carajás.



Fonte: Barbosa (2017).

7.3. Província do Quadrilátero Ferrífero

A Província do Quadrilátero Ferrífero é, sem sombra de dúvidas, a de maior importância para o Brasil, influenciando fortemente a história do país. É também uma das províncias mais estudadas e, por isso, foi possível identificar a produção de cada minério em cada mina: ferro, ouro ou manganês. As minas podem produzir mais de um mineral e podem ou não estar ativas. Os mapas de anomalia Bouguer e de residual da anomalia Bouguer para o Quadrilátero Ferrífero estão representados nas Figuras 37 e 40, respectivamente.

Nos mapas de anomalia Bouguer da província (Figura 37), todos os modelos mostram uma anomalia positiva a oeste da região de estudo, já nos limites do perímetro da província. Tratam-se dos granitoides do Arqueano e dos Complexos Bonfim e Divinópolis (Paleoproterozoico), apresentadas no mapa geológico da Figura 18. Outro ponto em comum entre os modelos estudados é o negativo a leste e nordeste da província, correspondendo ao Complexo Santa Bárbara, Mantiqueira e granitoides Borrachudo e Suíte Alto Maranhão.

Diferentemente do relatado nas outras províncias, no Quadrilátero Ferrífero os modelos EGM2008 e EGM2008upto360 mostram diferenças entre si: o primeiro se mostra com maior grau de detalhamento e identifica mais anomalias do que o restante dos modelos, principalmente na região central da província, onde é possível identificar rochas máficas e ultramáficas, além da porção norte do afloramento do Grupo Piracicaba, circundado por minas de ferro.

Para a província do Quadrilátero Ferrífero em especial considerar-se-á o EGM2008 como modelo-base para comparações com os demais. A decisão é tomada com base na presença de dados de gravimetria terrestre no supracitado modelo levantados pelo IAG entre março de 2002 e abril de 2003 na região sul do cráton São Francisco, incluindo a região do Quadrilátero (PINTO et al. 2007). A Figura 38 apresenta o mapa de anomalia Bouguer da região estudada por Pinto et al. (2007) utilizando os dados terrestres.

Figura 37: Anomalia Bouguer para a província do Quadrilátero Ferrífero pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores ao mínimo em preto.

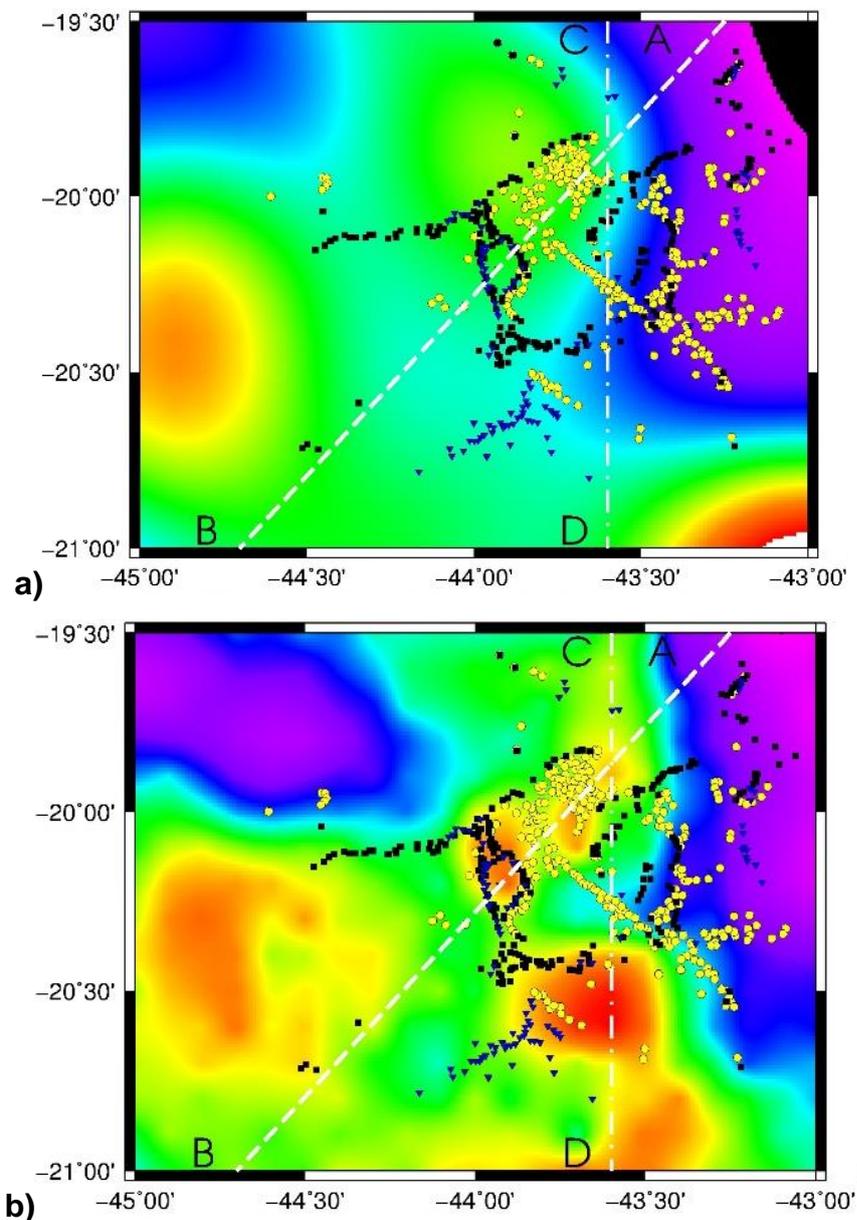


Figura 37 (Cont.): Anomalia Bouguer para a província do Quadrilátero Ferrífero pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores ao mínimo em preto.

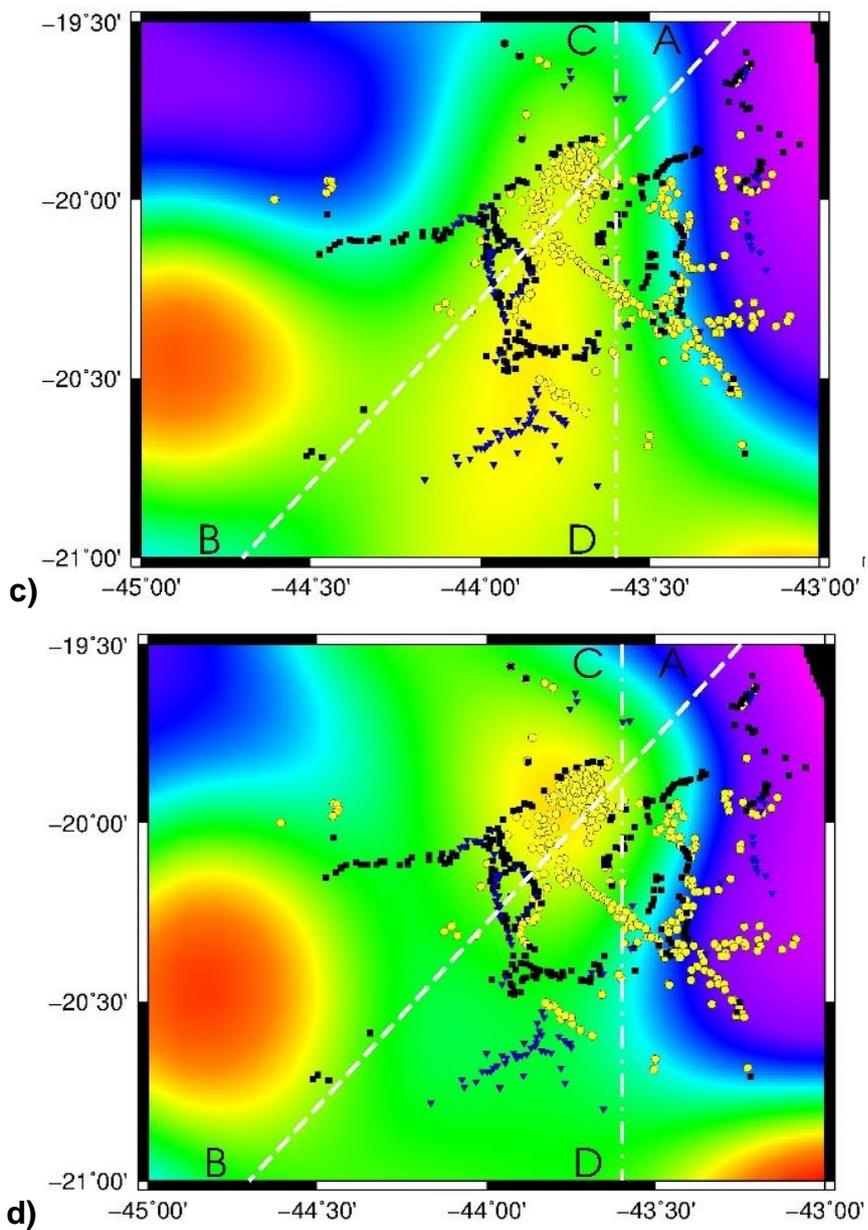
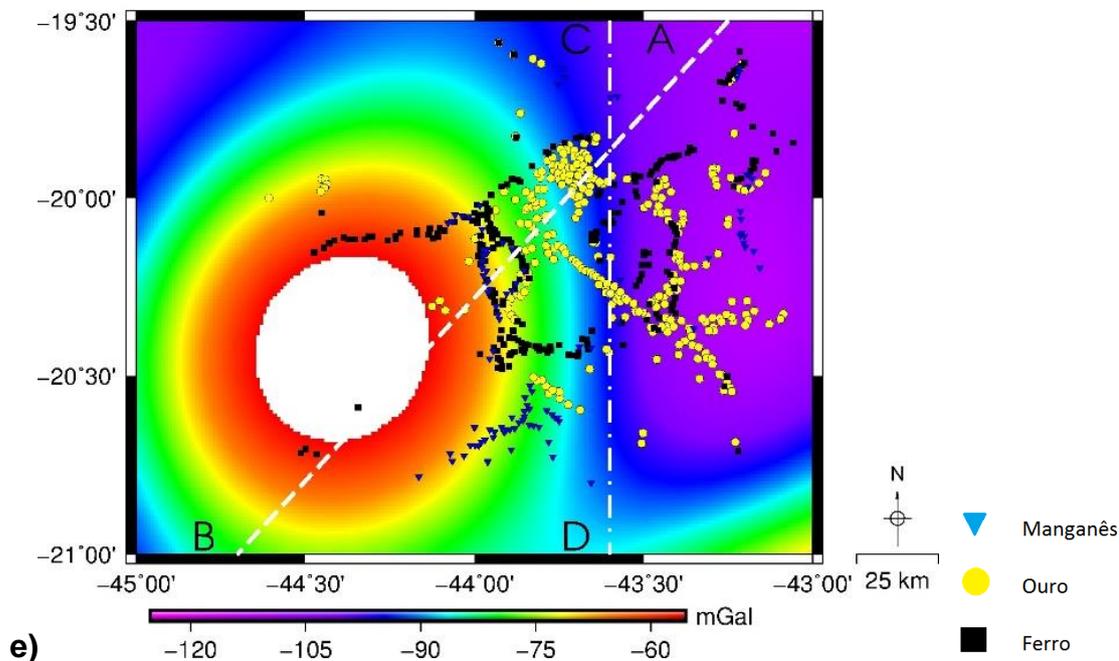
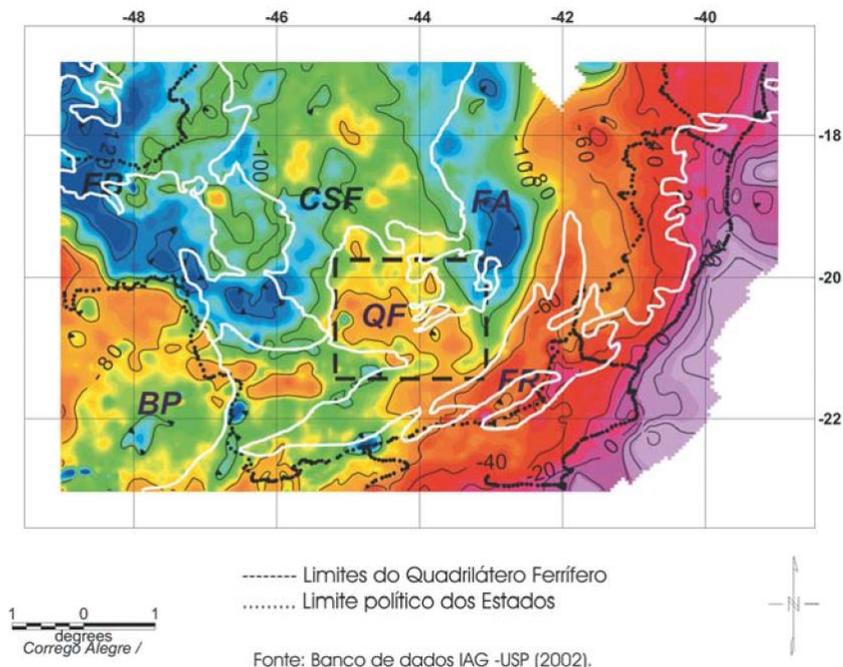


Figura 37 (Cont.): Anomalia Bouguer para a província do Quadrilátero Ferrífero pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores ao mínimo em preto.



Comparando as Figuras 37 e 38 observa-se que o alto anômalo a oeste e o baixo a nordeste nos dados terrestre também estão presente em todos os modelos, corroborando a aplicabilidade de dados de satélite para anomalias regionais. O restante das anomalias vistas na Figura 37, contudo, só estão bem delineadas no modelo EGM2008. Observa-se, portanto, a importância da inclusão de dados terrestres na melhoria da resolução, interpretação e até mesmo calibragem dos modelos.

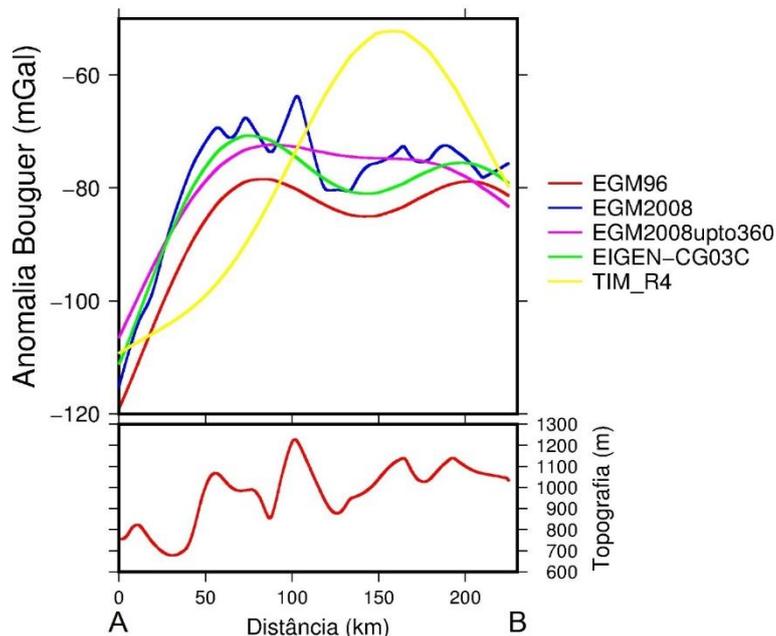
Figura 38: Anomalia Bouguer do sul do cráton do São Francisco, com destaque para a província do Quadrilátero Ferrífero. O intervalo de contorno é de 20 mGal.



Fonte: Pinto et al. 2007, p. 25.

No que tange aos perfis A-B dos modelos (Figura 39), observa-se que o EGM2008 de fato observa anomalias de menor comprimento de onda graças à sua grade 5' x 5'. Com a exceção do modelo *go_cons_gcf_2_tim_r4*, os outros modelos têm anomalias de médio comprimento de onda idênticas às do EGM2008 dentro do erro de medida. O modelo *satellite-only* mostra uma discrepância significativa com relação aos demais modelos neste perfil, ilustrando a pouca representatividade deste para a região da província devido ao seu baixo grau e ordem.

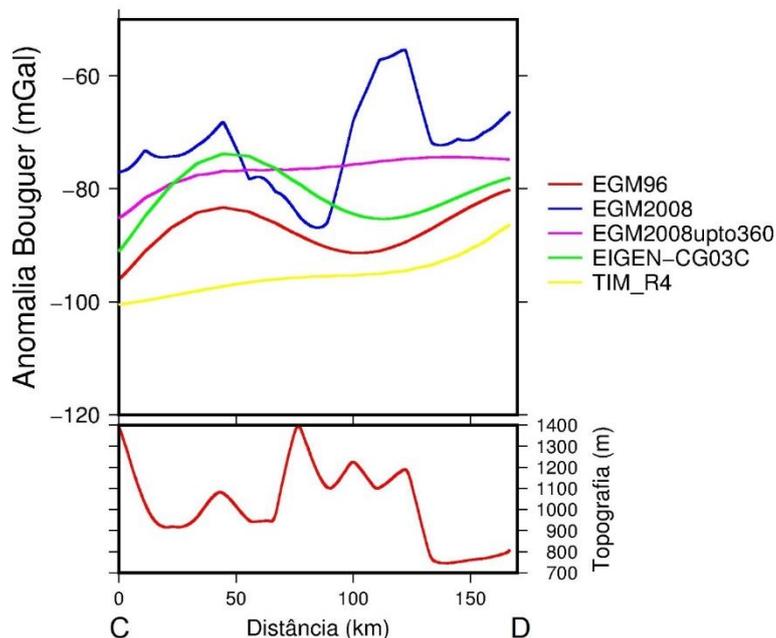
Figura 39: Perfis A-B dos mapas de anomalia Bouguer de cada modelo para a província do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Barbosa (2017).

Quanto aos perfis C-D dos modelos (Figura 40), o EGM2008 novamente identifica anomalias de menor comprimento de onda e apresenta uma discrepância significativa com o modelo EGM2008upto360. Para este perfil, não só a grade de dados originais de 5' x 5' utilizada para seu cálculo se mostra mais adequada, mas também necessária para estudar a região, haja vista a discrepância existente com o restante dos modelos.

Figura 40: Perfis C-D dos mapas de anomalia Bouguer de cada modelo para a província do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Barbosa (2017).

A Figura 41 apresenta os mapas de residual da anomalia Bouguer para a província do Quadrilátero Ferrífero. Comparando-os com os mapas de anomalia Bouguer é possível observar um maior nível de detalhamento das anomalias na província em todos os modelos, refletindo a necessidade da remoção do efeito isostático na região devido a topografia elevada da província, em torno de 1000 m (Figuras 39 e 40).

Verifica-se também uma maior semelhança entre os modelos e constata-se a relação das anomalias com a localização das minas: a grande maioria das minas de ferro e ouro encontra-se nas bordas dos altos residuais, indicando uma possível relação causal entre os dois parâmetros. O Complexo Bação, antes visto apenas no mapa de anomalia Bouguer do modelo EGM2008, agora é visto em todos os modelos. Assim como ocorre com o Complexo Bonfim e os granitoides do arqueano (Figura 18).

Figura 41: Residual da anomalia Bouguer para a província do Quadrilátero Ferrífero pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores ao mínimo em preto.

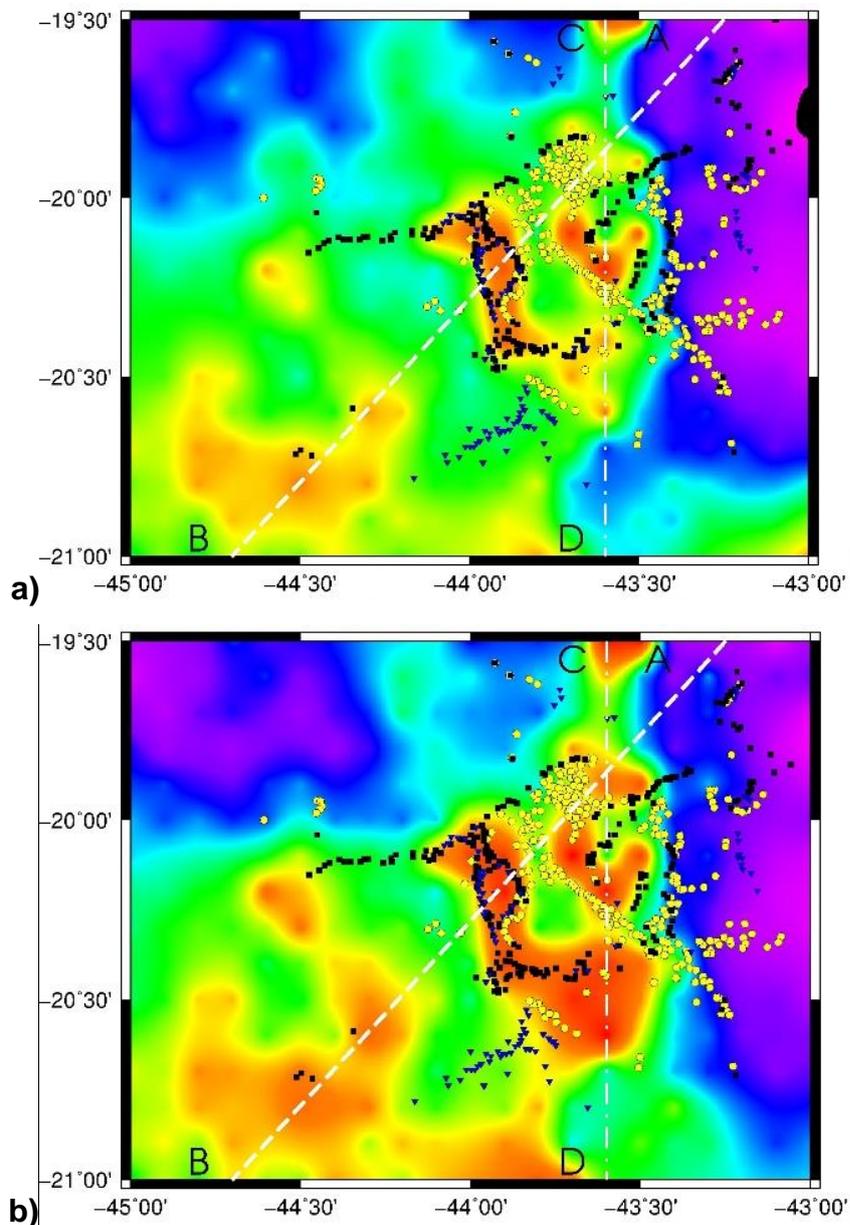


Figura 41 (cont.): Residual da anomalia Bouguer para a província do Quadrilátero Ferrífero pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores ao mínimo em preto.

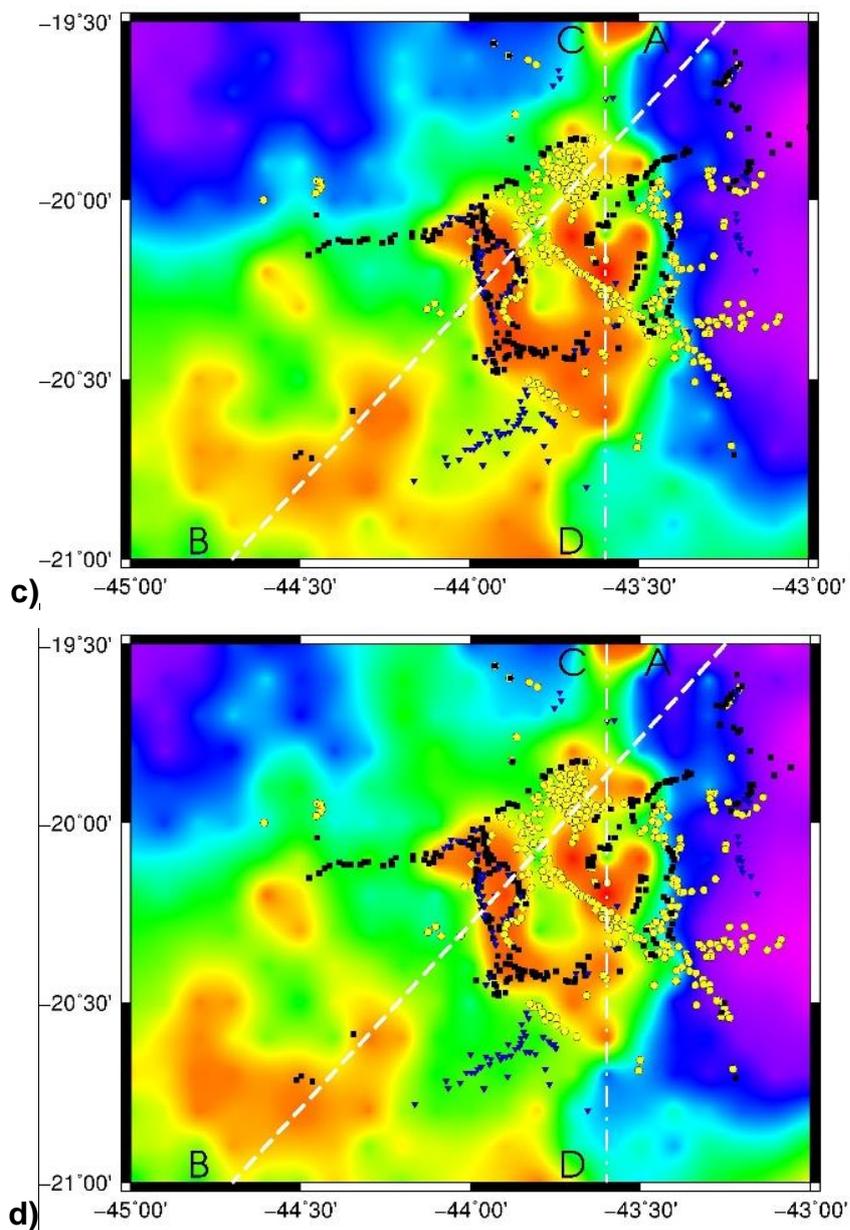
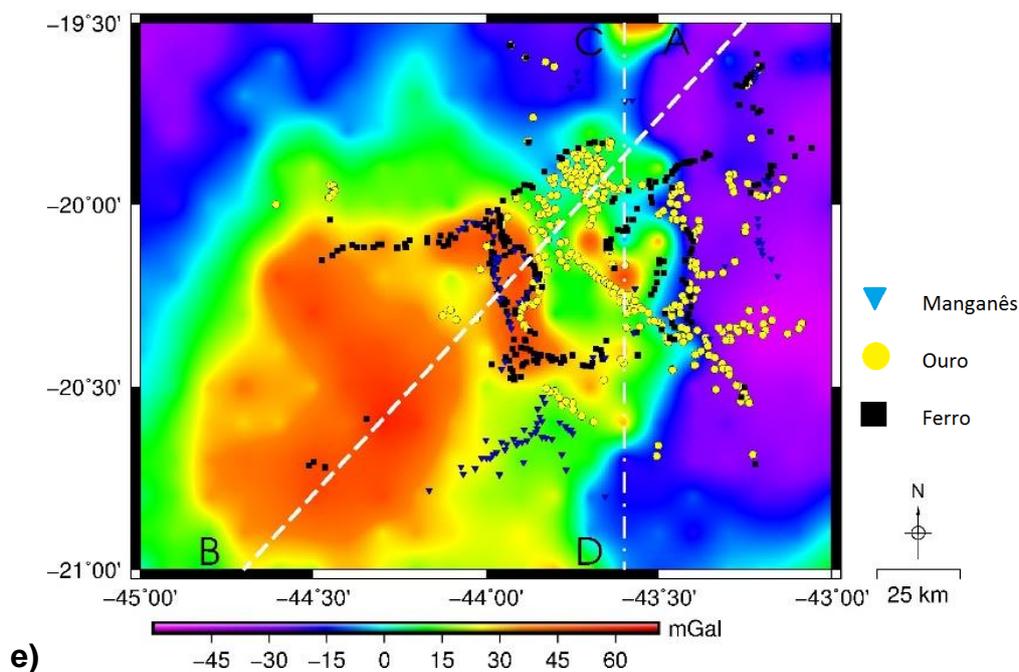


Figura 41 (cont.): Residual da anomalia Bouguer para a província do Quadrilátero Ferrífero pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores ao mínimo em preto.



Fonte: Barbosa (2017).

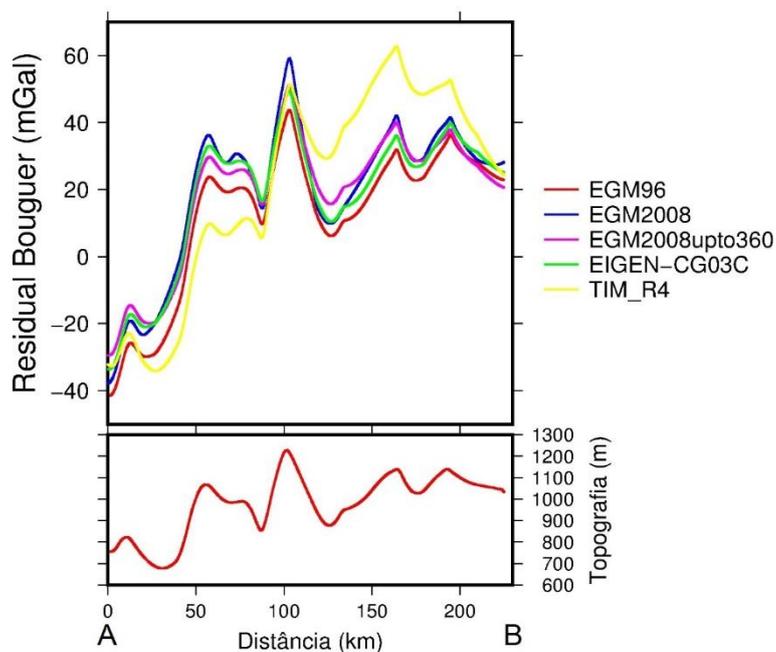
Os perfis residuais A-B (Figura 42) e C-D (Figura 43) apresentam-se mais congruentes entre si, onde apenas o modelo go_cons_gcf_2_tim_r4 destoa dos demais. Vale destacar que, embora em uma área de estudo menor, a província do Quadrilátero foi a que apresenta maior número de anomalias dentre as províncias estudadas, indício de variações laterais de densidade significativas das rochas que a compõem a província.

Os depósitos de ferro na porção central da província seguem afloramentos do Grupo Itabira e circundam o afloramento do Grupo Piracicaba, enquanto que os depósitos de ouro com direção SE-NW seguem uma zona de cavalgamento no Grupo Nova Lima (Figura 18). Nesta zona de cavalgamento é possível observar dois altos residuais que estão relacionados a afloramentos do Grupo Itabira com poucas minas associadas, sendo estas possíveis áreas de interesse a serem investigadas.

A aglomeração das minas na província do Quadrilátero Ferrífero deixa claro um fato: todo afloramento do Grupo Itabira contém ao menos uma mina, seja de ferro, ouro ou ambos. Trata-se, portanto, de um Grupo extremamente rico em termos

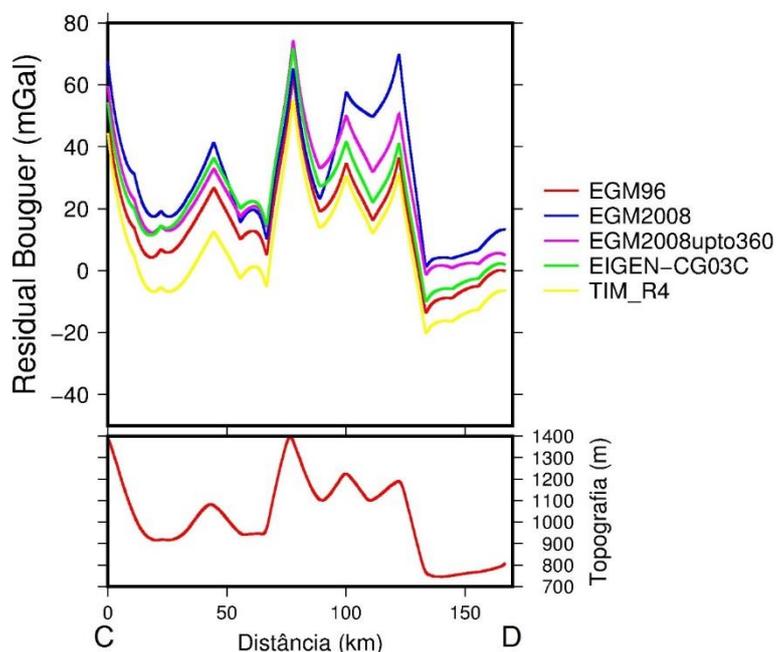
minerais que potencialmente, em subsuperfície, mantém esta característica. A gravimetria por satélite, por sua vez, mostra na Figura 41 uma correlação clara de concentração de minas com os altos residuais – seja circundando-os ou dentro destas regiões – tornando-os, portanto, alvos de interesse no âmbito regional.

Figura 42: Perfis A-B dos mapas de residual da anomalia Bouguer de cada modelo para a província do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Barbosa (2017).

Figura 43: Perfis C-D dos mapas de residual da anomalia Bouguer de cada modelo para a província do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Barbosa (2017).

7.4. Província do Tapajós

A Província do Tapajós está localizada na divisa entre os Estados do Amazonas e do Pará. É produtora de ouro e a localização das minas é representada por pontos pretos nos mapas de anomalia Bouguer (Figura 44) e residual da anomalia Bouguer (Figura 46) para os modelos escolhidos.

À exceção do modelo EGM96, todos os modelos apresentam um alto a oeste da província que se estende na direção sudeste. Trata-se da resposta gravimétrica do Grupo Beneficente (Figura 19). Outra semelhança entre os modelos corresponde à anomalia negativa na região centro-leste da província, resposta das rochas vulcânicas Iriri (Figura 19).

No que tange aos modelos EGM2008 e EGM2008upto360 observa-se que ambos se assemelham, indicando que grau e ordem superiores a 360 pouco influenciam em estudos utilizando estes modelos.

Figura 44: Anomalia Bouguer para a província Tapajós pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores ao mínimo em preto.

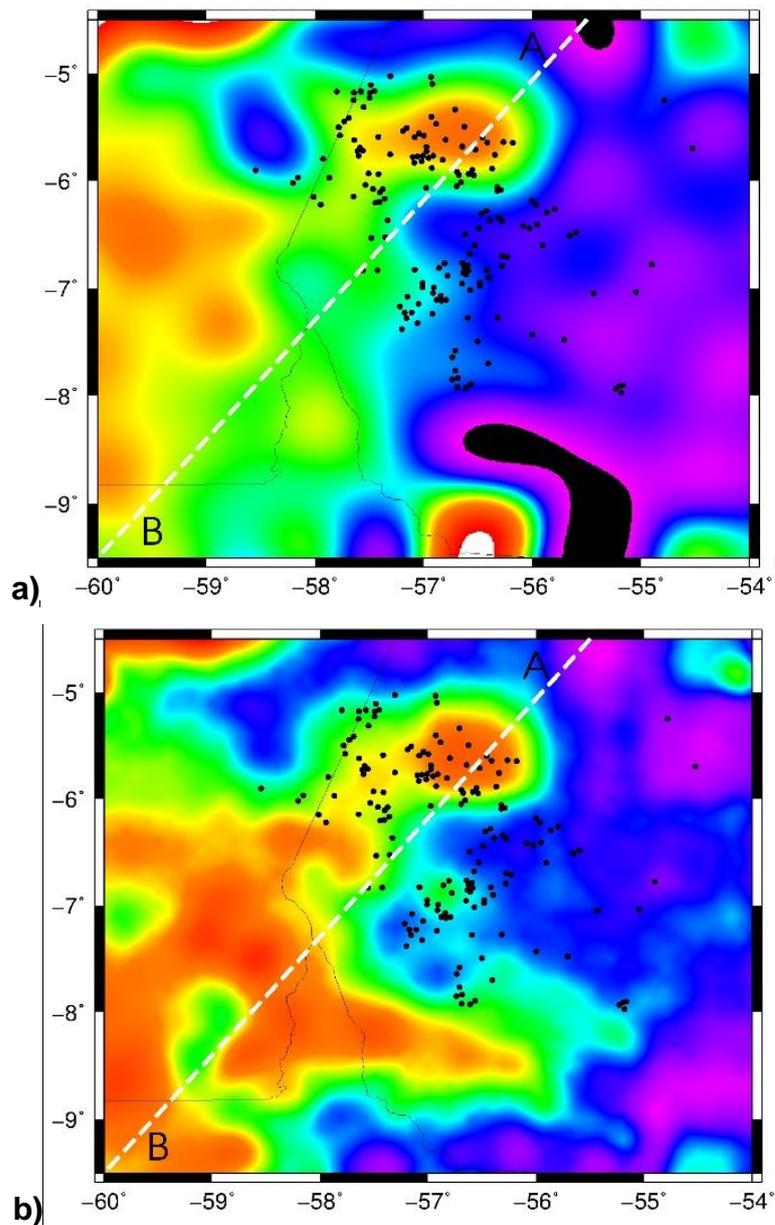


Figura 44 (cont.): Anomalia Bouguer para a província Tapajós pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores ao mínimo em preto.

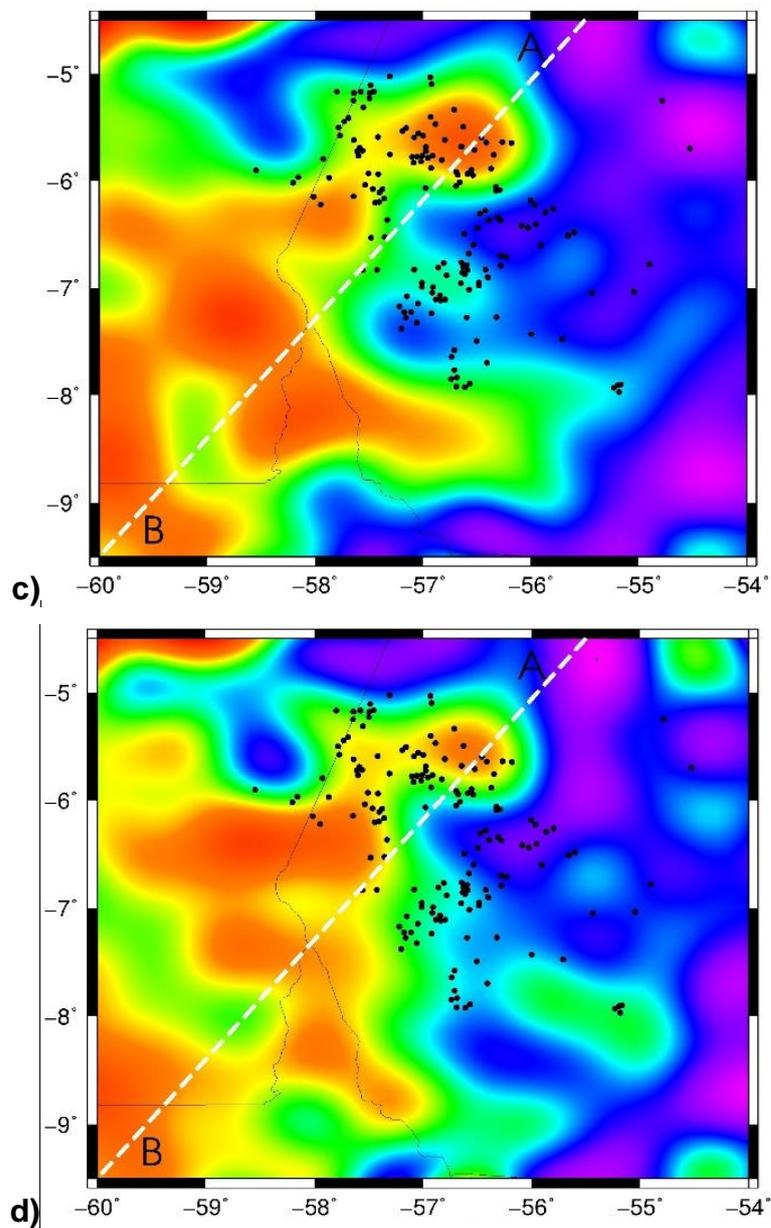
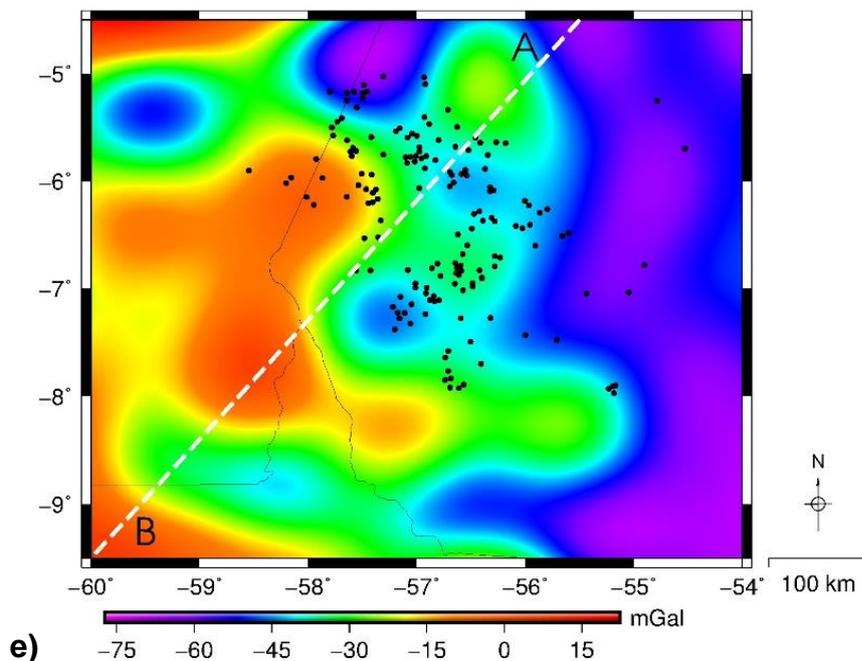


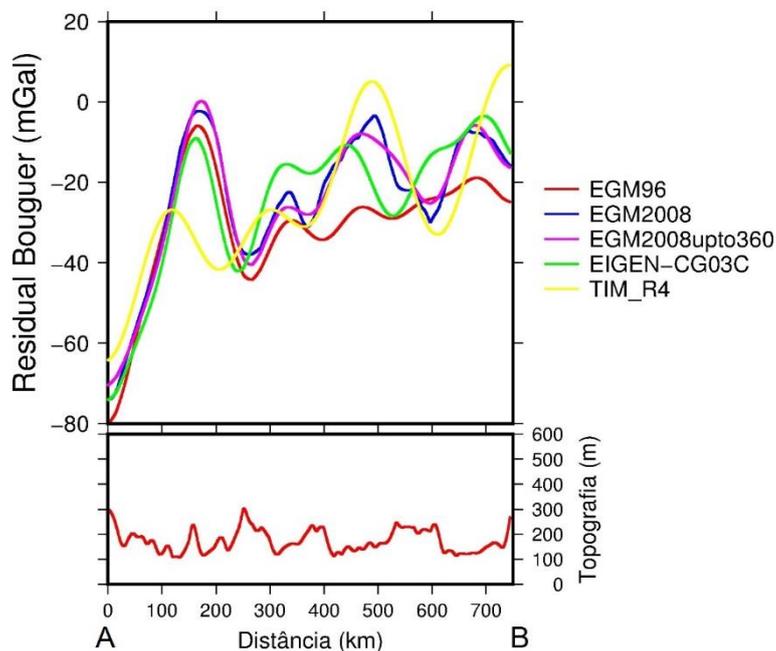
Figura 44 (cont.): Anomalia Bouguer para a província Tapajós pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores ao mínimo em preto.



Fonte: Barbosa (2017).

Os perfis A-B dos mapas de anomalia Bouguer (Figura 45) apresentam grande correlação entre si no que se refere à anomalia positiva ao norte. Após esta anomalia há diferenças significativas, destacando-se: a divergência do modelo go_cons_gcf_2_tim_r4 dos demais, ora reduzindo ora ampliando a amplitude das anomalias; e a baixa amplitude das anomalias vistas no modelo EGM96. Propõe-se como explicação os baixos grau e ordem do modelo (240) em comparação ao restante estudado e a ausência de dados terrestres na região para o modelo EGM96 (Figura 1).

Figura 45: Perfis A-B dos mapas de anomalia Bouguer de cada modelo para a província Tapajós.



Fonte: Barbosa (2017).

A Figura 46 apresenta os mapas de residual da anomalia Bouguer para a província de Tapajós. Poucas são as diferenças em relação aos mapas de anomalia Bouguer (Figura 44), havendo apenas melhor detalhamento e realce nos mapas de residual devido à correção isostática ponto-a-ponto com relação à topografia (equação 30). A ausência de divergências significativas é explicada pela baixa e relativa constância da topografia na região não havendo, portanto, carga isostática significativa a ser compensada.

A anomalia positiva a oeste que se estende a sudeste também se apresenta nos mapas de residual da anomalia Bouguer (Grupo Beneficente), assim como a anomalia negativa à leste (rochas vulcânicas do Grupo Iriri).

Figura 46: Anomalia Bouguer para a província Tapajós pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores à escala de cor são mostrados em branco e inferiores em preto.

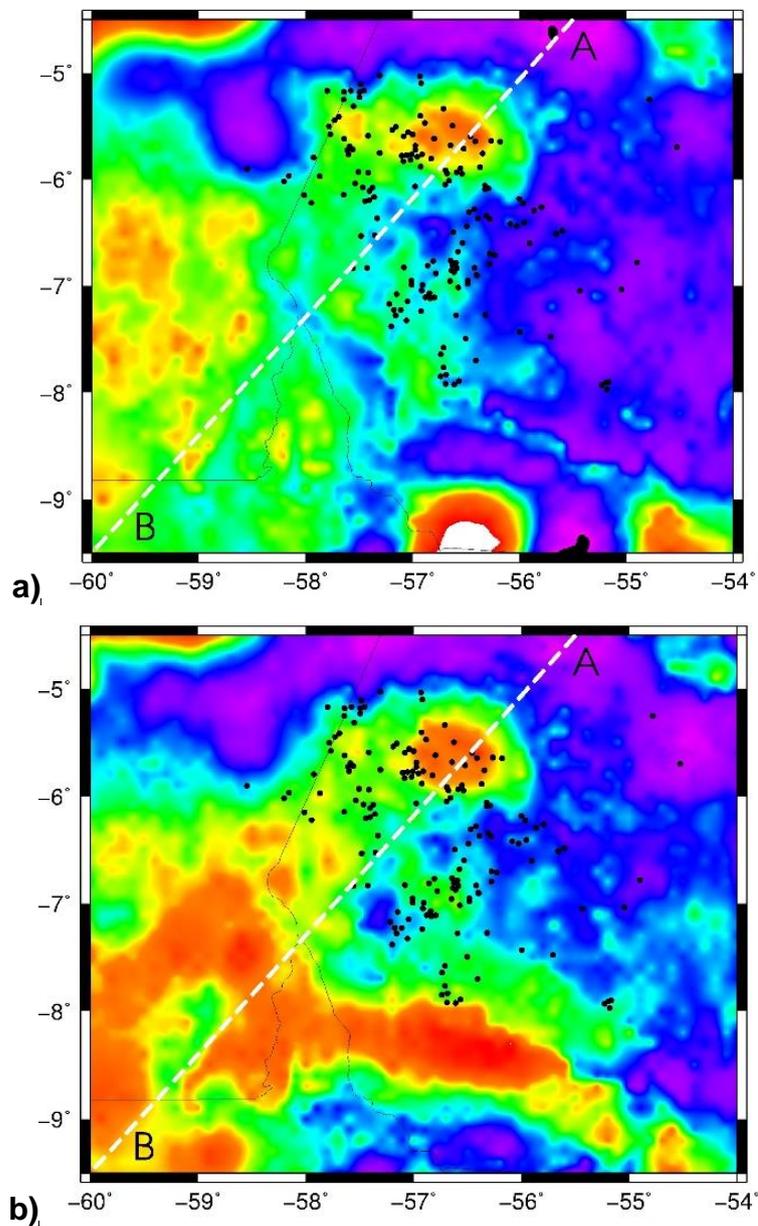


Figura 46 (cont.): Anomalia Bouguer para a província Tapajós pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores ao mínimo em preto.

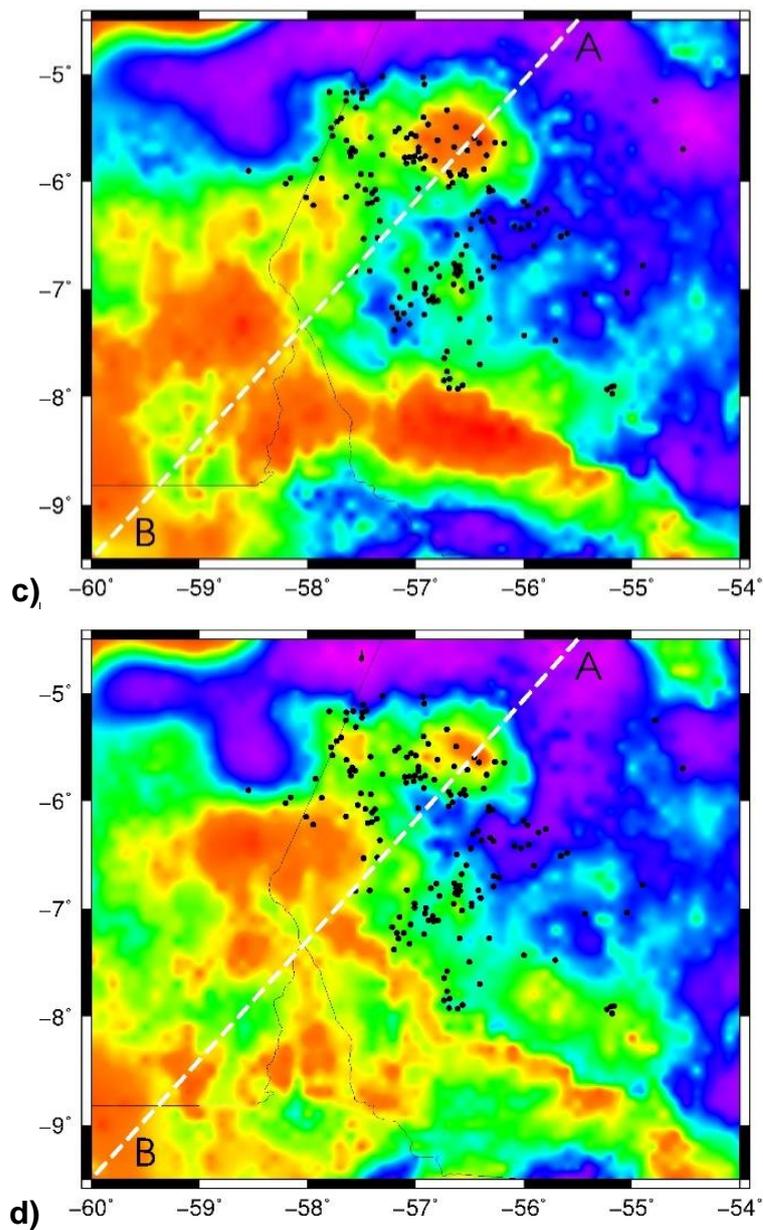
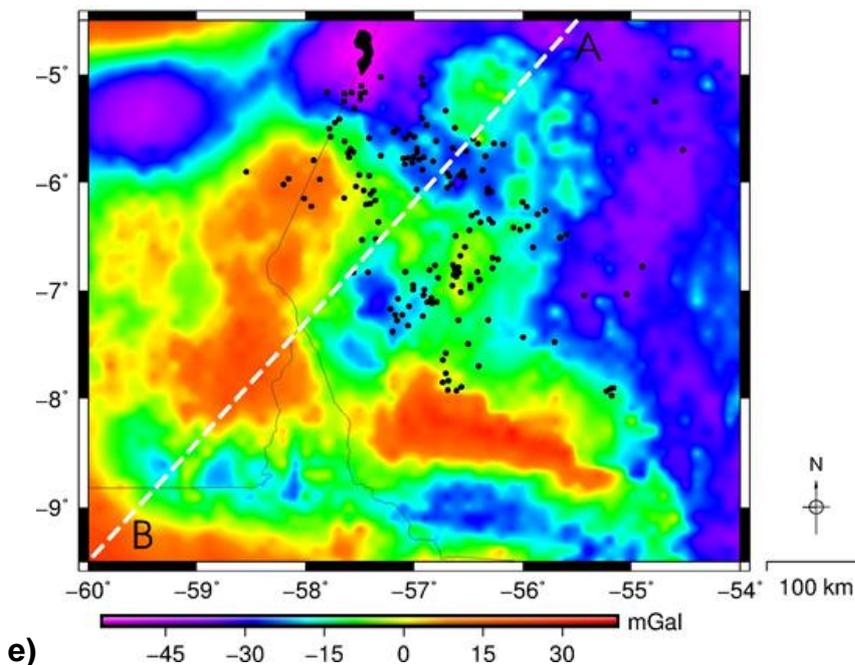


Figura 46 (cont.): Anomalia Bouguer para a província Tapajós pelo modelo **a)** EGM96. **b)** EGM2008. **c)** EGM2008upto360. **d)** EIGEN-CG03C. **e)** go_cons_gcf_2_tim_r4. Pontos pretos na figura representam a localização das minas (ativas ou não) da província. Valores superiores ao máximo da escala de cor são mostrados em branco e inferiores ao mínimo em preto.



Fonte: Barbosa (2017).

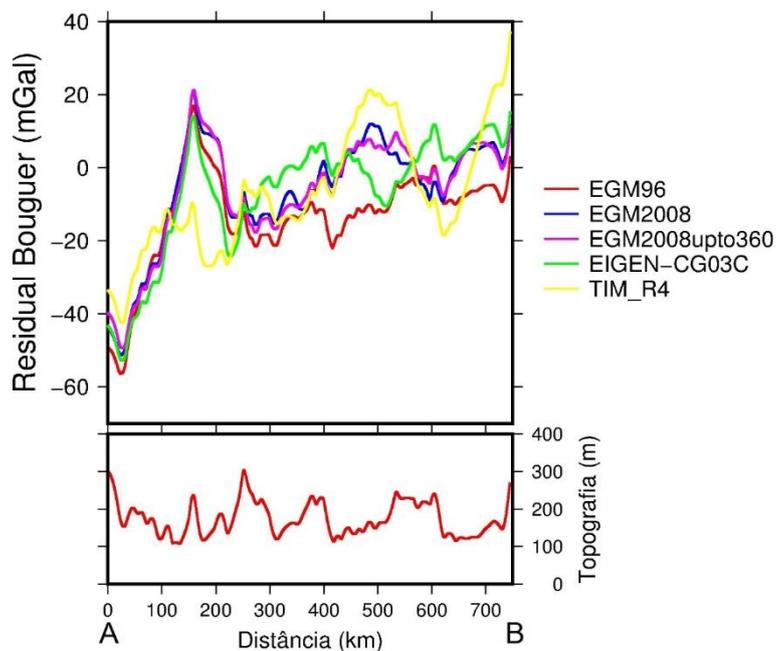
Os perfis A-B dos mapas de residual da anomalia Bouguer (Figura 47) mostram anomalias residuais de médio e longo comprimento de onda são idênticas às dos mapas de anomalia Bouguer (Figura 44), mostrando que a técnica de remoção da componente isostática parece não ser exigida em estudos regionais da província. Já as anomalias de curto comprimento de onda são resultado da correção isostática ponto a ponto (equação 30).

Semelhantemente ao observado na província do Carajás, a província do Tapajós apresenta uma grande dispersão das suas numerosas minas. A dispersão se deve ao fato de predominarem *paleoplaceros* do sistema mineralizador sedimentar, que facilita a dispersão das concentrações de minerais. Além disso, os depósitos também são acumulados em intrusões e em zonas de cisalhamento pouco extensas, dispersas e de diversas direções na província (Figura 19), dificultando o estabelecimento de padrões de concentração de minérios em larga escala.

Os modelos EGM96, EGM2008, EGM2008upto360 e EIGEN-CG03C mostram um alto residual ao norte da província que se apresenta com menor amplitude no modelo *satellite-only*. Este alto não tem uma relação clara com a geologia nem com a

distribuição das minas da província (Figura 19), podendo ser um reflexo de corpos em subsuperfície com possível relação com a mineralização primária da região e merecendo estudos em detalhe por meio de outros métodos geofísicos.

Figura 47: Perfis C-D dos mapas de anomalia Bouguer de cada modelo para a província Tapajós.



Fonte: Barbosa (2017).

8. CONCLUSÕES

Braitenberg (2015) apresentou e aplicou a técnica de remoção do efeito isostático na anomalia Bouguer na África, mais especificamente em Zimbábue, identificando uma clara relação entre altos residuais e a localização das minas. Com base nesse resultado positivo, o presente trabalho aplicou a técnica nas províncias minerais brasileiras de Alta Floresta, Carajás, Quadrilátero Ferrífero e Tapajós e, diferentemente de Braitenberg (op. cit.), utilizou-se mais de um modelo de gravimetria por satélite, a saber: EGM96, EGM2008, EGM2008upto360, EIGEN-CG03C e go_cons_gcf_2_tim_r4 (o mesmo utilizado pela autora citada). A utilização de diversos modelos com distintas fontes de dados (*satellite-only* e integrados) foi realizada com o intuito de identificar semelhanças e diferenças entre estes, de modo a eliminar eventuais artefatos de processamento e corroborar a presença de anomalias, tanto em geometria em mapa quanto em amplitude, visto que diversas regiões aqui estudadas carecem de dados gravimétricos locais.

Na elaboração dos mapas de residual da anomalia Bouguer, a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) aos dados de anomalia Bouguer em função da topografia apresentou coeficientes angulares semelhantes entre si até a quarta casa decimal (Tabela 4) e com coeficientes de determinação R^2 próximos de um, indicativo de um ajuste adequado aos dados.

Os mapas de residual da anomalia Bouguer para a América do Sul, resultado da diferença entre os dados de anomalia Bouguer e o ajuste por MMQ multiplicado pela topografia (equação 30), mostram grande correlação com estruturas geológicas características do continente: anomalia positiva no Escudo das Guianas e anomalias negativas nas bacias sedimentares de Recôncavo, Tucano, Jatobá, Parnaíba e norte da bacia do Paraná, além de identificar as Dorsais Meso-Oceânicas e os Andes.

No que tange às províncias minerais, a técnica de Braitenberg (2015) mostrou-se de extrema eficácia no Quadrilátero Ferrífero, região em que há carga isostática a ser compensada. Nas demais províncias, devido às suas menores e constantes topografias, a aplicação da técnica não traz resultados tão significativos, o que pode ser constatado pela semelhança entre as anomalias Bouguer e residual da anomalia Bouguer para estas áreas.

À exceção da província do Quadrilátero Ferrífero, os modelos EGM2008 e EGM2008upto360 apresentaram grande semelhança nos mapas de anomalia Bouguer e residual da anomalia Bouguer, indicando a baixa relevância de anomalias associadas a grau e ordem superiores a 360 nas regiões estudadas. Na região do Quadrilátero Ferrífero houve divergências significativas entre os modelos, e o EGM2008 identifica um maior número de anomalias provavelmente graças à grade original de dados de 5' x 5' utilizada para seu cálculo e aos maiores grau e ordem alcançados pelo modelo.

Na província Alta Floresta destaca-se uma anomalia positiva no centro da área, sem qualquer relação com a geologia aflorante. Frasca e Borges (2005) também a identificaram em dados gravimétricos terrestres (Figura 30) e interpretaram-na como possível “ [...] indicativa de espessamento crustal e de uma provável zona de sutura” (FRASCA; BORGES, op. cit. p. 97). A identificação desta anomalia regional por gravimetria terrestre e por satélite exemplifica a aplicabilidade de dados de satélite em estudos regionais. Novos trabalhos que apliquem outras técnicas geofísicas a fim de corroborar a teoria de Frasca e Borges (2005) são necessários, havendo a possibilidade de a anomalia estar relacionada com a metalogênese da província, haja visto que as minas circundam-na sistematicamente.

Os modelos apresentaram a maior distinção entre si na província do Carajás, em especial o modelo EGM96 (Figuras 43 e 46). Não obstante, três anomalias são características dos demais modelos: uma anomalia positiva ao norte da província; uma negativa a sudeste e outra negativa ao sul (Perfis C-D, Figura 43), nenhuma delas com relação clara com a geologia aflorante, indicando anomalias de âmbito regional com potencial relação com a metalogenia primária.

No Quadrilátero Ferrífero observa-se que os dados provenientes de modelos que utilizam gravimetria por satélite correspondem bem aos dados terrestres obtidos pelo IAG-USP (Figura 30, PINTO et al. 2007, p. 25). Constata-se também a importância de aplicar a técnica de Braitenberg (2015) na região: a anomalia Bouguer apresenta-se com longo comprimento de onda enquanto seu residual apresenta anomalias de menor comprimento de onda e de grande correlação com a localização das minas.

As anomalias residuais observadas no Quadrilátero Ferrífero correlacionam-se bem com a geologia local: os Complexos Bação e Bonfim têm assinaturas

características, além de anomalias positivas apresentarem-se associadas ao afloramento do Grupo Itabira, um dos grupos mais explorados da província.

Para a província de Tapajós os mapas de anomalia Bouguer (Figura 44) e residual da anomalia Bouguer (Figura 46) apresentaram anomalias semelhantes entre si, a saber: alto ao norte da província, baixo a leste e alto a oeste estendendo-se a sudeste. O baixo a leste corresponde às rochas vulcânicas do Grupo Iriri e o alto a oeste estendendo-se a sudeste corresponde ao Grupo Beneficente. Apenas o alto ao norte não tem relação com a geologia aflorante e, portanto, deve ser melhor estudado por métodos geofísicos distintos a fim de averiguar sua possível relação com a metalogenia da província.

De modo geral, os modelos EGM96 e *go_cons_gcf_2_tim_r4* mostraram-se os menos adequados às regiões de estudo: o primeiro provavelmente por não conter dados de gravimetria terrestre nas regiões estudadas e o segundo por ser *satellite-only* e apresentar apenas grau e ordem máximos iguais a 240.

A semelhança entre os mapas dos modelos EGM2008 e EGM2008upto360 é notável, porém na análise dos perfis escolhidos observa-se que o primeiro é capaz de identificar anomalias de menor comprimento de onda graças à grade de dados de 5' x 5' utilizada em seu cálculo – valor cinco sextos menor do que os demais – e grau e ordem máximos superiores alcançados, tornando-o o modelo de gravimetria por satélite mais adequado para estudos regionais das províncias escolhidas e sugerido para estudo em outras províncias.

A técnica aplicada por Braitenberg (2015) para a África mostrou resultados relevantes, em especial para a província do Quadrilátero Ferrífero que, por ter topografia média de 1000 m, apresenta cargas isostáticas relevantes a serem compensadas. Relações claras entre altos anômalos e a localização das minas são identificadas no Quadrilátero e em Alta Floresta, tornando possível identificar potenciais regiões de pesquisa e exploração de interesse em escala local. Trata-se, portanto, de uma técnica que pode auxiliar no aumento da eficácia e eficiência dos recursos financeiros aplicados em pesquisa mineral de outras províncias brasileiras.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. The Transamazonian orogeny in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: Paleoproterozoic collision and collapse in the Southern São Francisco Craton region. **Precambrian Research**, v. 90, p. 29-58, 1998.

ALMEIDA M. E., FERREIRA A. L., BRITO M. F. L., MONTEIRO M. A. S. Evolução tectono-estrutural da Província Tapajós com base na geologia das Folhas Vila Mamãe Anã e Jacareacanga (1:250.000), região limítrofe dos Estados do Amazonas e Pará. In: REIS, N. J.; MONTEIRO M. A. S. (Coord.). **Contribuições à geologia da Amazônia**. Manaus, SBG-Núcleo Norte, v. 2, p. 57-114., 2001.

ASSIS, L. M. **Geração de Modelo Exploratório para o Minério de Ferro da Província Mineral de Carajás Através da Integração de Dados Multifonte**. 2013. 154 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

BALTAZAR, O.F.; ZUCCHETTI, M., Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. **Ore Geology Reviews**, v. 32, p. 471–499, 2007.

BIONDI, J. C. **Processo metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 528 p.

BIZZI, L. A., SCHOBENHAUS C., VIDOTTI, R. M., GONÇALVES, J. H. (Eds.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas & SIG**. Brasília: CPRM, 2003. 692 p.

BOMFIM, E.; BRAITENBERG, C.; MOLINA, E. Mutual Evaluation of global gravity models (EGM2008 and GOCE) and terrestrial data in Amazon Basin, Brazil. **Geophysical Journal International**, v. 195, n. 2, p. 870-882, 2013.

BRAITENBERG, C.; MARIANI, P.; DE MIN, A.; The European Alps and nearby orogenic belts sensed by GOCE. **Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata**. v. 54, n. 4, p. 321-334, 2013.

BRAITENBERG, C. Exploration of tectonic structures with GOCE in Africa and across-continent. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. V. 35, parte A, p. 88-95, 2015.

CARRINO, A. C. **Geotecnologias aplicadas ao reconhecimento de áreas-chaves à exploração aurífera na província mineral de Tapajós**. 2010. 205 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) – Projeto de Áreas de Relevante Interesse Mineral no Brasil (ARIM). Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapa_arim.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2016.

COUTINHO, M. G. N (Org.). **Província Mineral do Tapajós: geologia, metalogenia e mapa previsional para ouro em SIG**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 420 p.

DARDENNE, M. A., SCHOBENHAUS, C. **Metalogênese do Brasil**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2001. 392 p.

FARACO M. T. L.; CARVALHO J. M. A.; KLEIN E. L. Carta metalogenética da Província Aurífera do Tapajós. In: COSTA, M. L.; ANGÉLICA, R. S. (Coord.) **Contribuições à geologia da Amazônia**. Belém, SBG-Núcleo Norte, v. 1. p. 423-437, 1997.

FRASCA, A. A. S.; BORGES, F. R. (Orgs.). **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB**. Geologia e recursos minerais da Folha Ilha 24 de Maio – Folha SC.21-Z-A. Estado de Mato Grosso. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM-Serviço Geológico do Brasil/ DEPAT/DICART/DIEDIG, 2004. 143 p.

GEOBANK – CPRM. Disponível em: <http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/geobankdownload.downloadKML?p_webmap=N&p_usuario=1>. Acesso em: 20 nov. 2016.

Instituto Brasileiro de Mineração: Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00004430.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2016.

International Centre for Global Earth Models (ICGEM). Disponível em: <<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>>. Acesso em: 05 mar. 2015.

JACOBY, W.; SMILDE, P. L., **Gravity Interpretation** – Fundamentals and application of gravity inversion and geological interpretation. 1st ed. Berlin: Springer, 2009, 395 p.

KLEIN E. L.; ALMEIDA M. E.; VASQUEZ M. L.; BAHIA, R. B. C.; SANTOS M. L. E.; FERREIRA A. L. **Geologia e recursos minerais da província mineral do Tapajós. Folhas Vila Mamães Anã (SB.21-V-D), Jacareacanga (SB.21-Y-B), Caracol (SB.21-X-X), Vila Riozinho (SB.21-Z-A) e Rio Novo (SB.21-Z-C)**. Estados do Pará e Amazonas. Escala 1:500.000. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001. 81 p.

LEÃO-SANTOS, M.H. **Interpretação, inversão 3D de dados magnéticos e modelagem 3D da susceptibilidade magnética medida, aplicadas à prospecção geofísica de depósitos de óxidos de ferro - cobre - ouro (IOCG iron oxide-copper-gold) – Província Mineral de Carajás, Brasil**. 2014. 150 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

LEMOINE F. G.; KENYON S. C.; FACTOR J. K.; TRIMMER R. G.; PAVLIS N. K.; CHINN D. S.; COX C. M.; KLOSKO S. M.; LUTHCKE S. B.; TORRENCE M. H.; WANG Y. M.; WILLIAMSON R. G.; PAVLIS E. C.; RAPP R. H.; OLSON T. R. 1998: **The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96**. NASA Technical Publication TP-1998-206861, Greenbelt, Maryland, USA, 575 p. Disponível em: http://bowie.gsfc.nasa.gov/697/staff/lemoine/EGM96_NASA-TP-1998-206861.pdf. Acesso em: 26 out. 2015.

LUNDQUIST C. A., VEIS G. Geodetic Parameters for a 1966 Smithsonian Institution Standard Earth; **Special Report No. 200**, Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge/Mass. 1966.

MARTINI, S. L. An overview of main auriferous regions of Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, p. 307-314, 1998.

MATOS, G. M. M.; MELLO, I. S. C.; GONÇALVES, J. H. (Coords.). **Áreas de relevante interesse mineral no Brasil – ARIM**. Belo Horizonte: CPRM, 2009, p. 61.

OLIVEIRA, D. S. **Interpretação de dados aerogeofísicos para exploração aurífera na área do Projeto Córrego do Sítio, NE do Quadrilátero Ferrífero**. 2014. 151 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

PAIL R.; BRUINSMA S.; MIGLIACCIO F.; FÖRSTE C.; GOIGINGER H.; SCHUH W. D.; HÖCK E.; REGUZZONI M.; BROCKMANN J. M.; ABRIKOSOV O.; VEICHERTS M.; FECHER T.; MAYRHOFER R.; KRASBUTTER I.; SANSONO F.; TSCHERNING C. C. First GOCE gravity field models derived by three different approaches. **Journal of Geodesy**, v. 85, n. 11, p. 819–843, 2011.

PASTANA, J. M. N. (Org.). **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB**: Turiaçu, Folha SA.23-V-D e Pinheiro, Folha SA.23-Y-B. Estados do Pará e Maranhão. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001. 178 p.

PAVLIS N.; HOLMES S.; KENYON S.; FACTOR J. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). **Journal of Geophysical Research**, v. 117, p. 1-38, 2012.

PEREGOCICH B., MATHIS A., GOMES, R. S. S. Transition from small-scale artisanal gold mining to large-scale corporate mining in the Tapajós Mineral Province. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44., 2008, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBG, 2008, p. 188.

PINTO, L. G. R., USSAMI, N. SÁ, N. C. Aquisição e interpretação de anomalias gravimétricas do Quadrilátero Ferrífero, SE do cráton São Francisco. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 1, p. 21-30, 2007.

REIGBER C.; SCHWINTZER P.; STUBENVOLL R.; SCHMIDT R.; FLECHTNER F.; MEYER U.; KÖNIG R.; NEUMAYER K. H.; FÖRSTE C.; BARTHELMES F.; ZHU S. Y.; BALMINO G.; BIANCALE R.; LEMOINE. J. M.; MEIXNER H.; RAIMONDO, J. C. A high resolution global gravity field model combining CHAMP and GRACE satellite mission and surface Data: EIGEN-CG01C. Scientific Technical Report STR06/07, GeoForschungs-Zentrum Potsdam, p. 13, 2006. Disponível em: <<http://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:8704:7/component/escidoc:8703/0607.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

SANTOS J. O. S., GROVES D. I., HARTMANN L. A., MOURA M. A., MCNAUGHTON N. J. Gold deposits of the Tapajós and Alta Floresta domains, Tapajós-Parima orogenic belt, Amazon Craton, Brazil. **Mineralium Deposita**, v. 36. p. 278-299, 2001.

SILVA, A. M.; MCCAFFERTY, A.; PIRES, A. C. B.; RODRIGUES, L. C. R. Predictive geophysical model for gold mineralization in the Quadrilátero Ferrífero, Brazil: the case of Cuiabá mine. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, p. 543-546, 2000.

Silva, S. L. (Org.), Monteiro, E. A., Baltazar, O. F. Zucchetti, M. **Projeto APA Sul RMBH: Estudos do Meio Físico**. Escala 1:50.000. Belo Horizonte: SEMAD/CPRM, 2005. 1 v.

TURCOTTE, D. L.; SCHUBERT, G. **Geodynamics**. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2010. 456 p.

VASQUEZ, M. L. E KLEIN E. L. (Orgs.) **Projeto Especial Província Mineral do Tapajós (PROMIN-TAPAJÓS)**. Geologia e recursos minerais da Folha Rion Novo (SB.21-Z-C), Estado do Amazonas e Pará. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 2000. 45 p.

VENEZIANI, P.; SANTOS, A. R.; PARADELLA, W. R. A evolução tectono-estratigráfica da província mineral de Carajás: um modelo com base em dados de sensores remotos orbitais (SAR-C RADARSAT-1, TM LANDSAT-5), aerogeofísica e dados de campo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n.1, p. 67-77, 2004.

WATTS, A. B. **Isostasy and flexure of the lithosphere**. 1st ed. New York: Cambridge University Press, 2001. 480 p.

ZUCCHETTI, M. **Rochas máficas do Supergrupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 e N5, Carajás, PA**. 2007, 166 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.