

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

DIEGO PRADO BARROSO

**Processamento e interpretação de dados aeromagnéticos do  
Maciço Alcalino Ponte Nova (SP-MG)**

v.1

São Paulo

2018

DIEGO PRADO BARROSO

**Processamento e interpretação de dados aeromagnéticos do  
Maciço Alcalino Ponte Nova (SP-MG)**

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

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Yara Regina Marangoni.

v.1

São Paulo

2018

Barroso, Diego Prado,

Processamento e interpretação de dados aeromagnéticos do Maciço Alcalino Ponte Nova (SP-MG). / Diego Prado Barroso; orientadora Yara Regina Marangoni. – São Paulo, 2018.

77 f.: fig.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

Aerolevanteamento, Magnetometria, Modelagem Direta e Maciço Alcalino.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Diego Prado Barroso

Processamento e interpretação de dados aeromagnéticos do Maciço Alcalino Ponte Nova (SP-MG).

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

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Yara Regina Marangoni.

Aprovado em:

## Banca Examinadora

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_



À minha mãe e ao meu pai, minhas inspirações.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Yara Regina Marangoni por todo apoio, paciência, compreensão e colaboração ao longo do período de orientação acadêmica deste trabalho. Agradeço também a todo o corpo docente do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo que estiveram presentes ao longo de minha graduação e mestrado.

Sou muito grato aos meus colegas de curso e amigos que me acompanharam e me incentivaram em todos esses anos. As épocas passam, o carinho permanece.

À Capes, pelo seu comprometimento com a ciência e concessão da bolsa de mestrado e à CPRM, pelo fornecimento dos dados utilizados nessa pesquisa, deixo minha profunda gratidão.

Finalmente, explico meus agradecimentos aos meus familiares, próximos e distantes, que, independente da situação, sempre estiveram aqui presentes em meus pensamentos. Aos meus amados, Jeff, Vivi, Vany e Nanny, obrigado por me ensinarem tanto.

*“E crescemos neste planeta, aprisionados nele, em certo sentido, sem saber da existência de nada que não seja nosso ambiente imediato, tendo que entender o mundo sozinhos. Que corajosa e difícil empreitada(...)”.*  
- Carl Sagan

# RESUMO

O Maciço Alcalino máfico-ultramáfico Ponte Nova localiza-se no setor norte da Província Serra do Mar, junto à porção oriental da Serra da Mantiqueira, na fronteira dos Estados de São Paulo e Minas Gerais. Caracteriza-se por dois afloramentos de áreas 5 km<sup>2</sup> e 1 km<sup>2</sup>. Dados magnéticos obtidos dos aerolevantamentos realizados para a CPRM pela Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica Ltda evidenciaram a presença de uma anomalia magnética extensa e de grande amplitude sobre os afloramentos. Este trabalho apresenta os resultados da interpretação geofísica e de modelagem direta integrando os dados aeromagnéticos com dados geológicos e gravimétricos do maciço visando uma caracterização do maciço em subsuperfície.

Para uma determinação mais eficaz da localização e das dimensões da fonte da anomalia magnética, foram utilizadas técnicas de redução ao polo, amplitude do sinal analítico da anomalia magnética de campo total e aplicação de derivadas direcionais.

Em laboratório, foram medidas as susceptibilidades magnéticas e intensidade da magnetização remanente natural de 14 amostras retiradas da região. Os resultados confirmaram a presença de magnetização remanescente em algumas das amostras, e susceptibilidade magnética média da ordem de 10<sup>-2</sup> SI.

A partir da conjunção dos dados do aerolevantamento e de dados geológicos, foi feita a modelagem direta 3-D com as propriedades magnéticas parametrizadas pelas medidas em laboratório. Os modelos consideraram a discriminação das fácies petrográficas do maciço, com susceptibilidades magnéticas variando de 0,1 a 0,9 SI. Os corpos modelados atingiram profundidades da base de pelo menos 3 km e seus volumes foram da ordem de 25 km<sup>3</sup>.

Com base nas dimensões obtidas nos modelos magnéticos diretos, foi realizado um modelo gravimétrico direto com valores de densidade variando entre 2,77 g/cm<sup>3</sup> e 3,30 g/cm<sup>3</sup>. Os resultados obtidos pelos modelos diretos foram discutidos e comparados com o modelo geológico e com outros modelos gravimétricos desenvolvidos. Apesar dos resultados alcançados pelos modelos apresentarem valores compatíveis com os observados nos levantamentos, os modelos não permitiram discriminar entre as duas hipóteses de trabalho sobre a configuração do maciço em subsuperfície: um corpo único que aflora em duas regiões ou dois corpos desconectados em subsuperfície.

**PALAVRAS CHAVE:** Aerolevantamento, Magnetometria, Modelagem Direta, Maciço Alcalino.

# ABSTRACT

The Ponte Nova mafic-ultramafic alkaline massif is located in the northern sector of the Serra do Mar Province, near the eastern portion of the Serra da Mantiqueira, on the border of the states of São Paulo and Minas Gerais. It is characterized by two outcrops measuring 5 km<sup>2</sup> and 1 km<sup>2</sup> of area. Magnetic data obtained from the airborne surveys carried out for the CPRM by Microsurvey Aerogeofísica and Consultoria Científica Ltda. evidenced the presence of an extensive magnetic anomaly with great amplitude on the outcrops. This work presents the results of geophysical interpretation and direct modeling integrating the aeromagnetic data with geological and gravimetric data of the massif, aiming a characterization of the massif in the subsurface.

To determine a better location and shape values of the magnetic anomaly's source, we use pole reduction techniques, amplitude of the analytical signal of the total field magnetic anomaly and directional derivative applications.

Magnetic susceptibilities and natural remanent magnetization intensity of 14 samples from the region were measured in laboratory. The results confirm the presence of remanent magnetization in some samples, and the average magnetic susceptibility about 10<sup>-2</sup> SI.

From the conjunction of the aero-survey data and the geological data, two direct 3-D model were developed with the magnetic properties parameterized by the laboratory measurements. These models considered different petrographic facies, with magnetic susceptibilities ranging from 0.1 to 0.9 SI. The modeled bodies reached depths of the base of at least 3 km and their volumes were about 25 km<sup>3</sup>.

Based on the dimensions obtained from direct magnetic models, a direct gravimetric model was performed, with density values ranging from 2.77 g / cm<sup>3</sup> and 3.30 g / cm<sup>3</sup>. The results obtained by the direct models were discussed and compared with the geological model and with other existing gravimetric models. Although the direct models yielded results compatible with those observed in the surveys, the results do not allow for discrimination of the following working hypotheses on the configuration of the subsurface massif: a single body outcropping in two regions or two bodies disconnected in the subsurface.

**KEY-WORDS:** Airborne survey, Magnetometry, Direct Modeling, Alkaline Massif.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
<b>1.1 Contexto Geológico.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2 Dados aeromagnéticos.....</b>	<b>22</b>
<b>1.3 Dados de densidade.....</b>	<b>24</b>
<b>1.4 Sequência dos métodos e processos.....</b>	<b>26</b>
<b>2. MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1 Magnetometria.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2 Magnetização Natural Remanescente.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3 Redução ao Polo Magnético (RTP) de Baranov (1957).....</b>	<b>30</b>
<b>2.4 Redução ao Polo Magnético (RTP) de Fedi et al. (1994).....</b>	<b>31</b>
<b>2.5 Derivadas direcionais.....</b>	<b>32</b>
<b>2.6 Amplitude do Sinal Analítico.....</b>	<b>32</b>
<b>2.7 Medidas de propriedades magnéticas.....</b>	<b>33</b>
<b>2.8 Modelagem direta.....</b>	<b>34</b>
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 Mapas aeromagnéticos interpretativos.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Medições das propriedades magnéticas das amostras.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3 Modelagem direta.....</b>	<b>52</b>
<b>4. COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS.....</b>	<b>64</b>
<b>4.1 Modelos magnéticos e modelo gravimétrico de Cotis (2015).....</b>	<b>64</b>
<b>4.2 Modelos magnéticos e modelo geológico de Azzone (2008).....</b>	<b>67</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>73</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>75</b>



# ÍNDICE DE TABELAS

**TABELA 1.3.1: Tabela com valores de densidade média (média de todas as medidas) para cada afloramento e para um corpo único. Adaptado de Cotis (2015).....25**

**TABELA 1.3.2: Tabela com valores de densidade média para cada amostra. Valores obtidos em laboratório por Cotis (2015).....26**

**TABELA 3.2.1: Valores médios e desvio padrão das medições de magnetização remanente natural (NRM) e susceptibilidade magnética (K) das 14 amostras do Maciço Ponta Nova obtidas em laboratório, e os valores de densidade média (DensMéd) e respectivo desvio padrão obtidos por Cotis (2015). As cores indicam fácies petrográficas semelhantes para melhor visualização.....49**

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.1.1: Mapa geológico do Maciço Máfico-Ultramáfico Ponte Nova (Azzone et al., 2009).....</b>	<b>21</b>
<b>FIGURA 1.1.2: Seções estratigráficas do modelo geológico do Maciço Máfico-Ultramáfico Ponte Nova (Adaptado de Azzone et al., 2009).....</b>	<b>22</b>
<b>FIGURA 1.2.1: Mapa de localização da área do levantamento aerogeofísico sobre modelo digital do terreno (SRTM). A área está sobre os municípios de Sapucaí Mirim, Santo Antônio do Pinhal e São Bento do Sapucaí, fronteira entre SP e MG.....</b>	<b>23</b>
<b>FIGURA 1.2.2: Mapa das linhas de aquisição e de controle do aerolevanteamento sobre imagem SRTM (Geosoft DAP Web Client, 2016). As linhas de aquisição têm direção N-S (vermelhas) e espaçamento de 500 metros, já as linhas de controle possuem direção E-W (azuis), com espaçamento de 10.000 metros.....</b>	<b>24</b>
<b>FIGURA 1.3.1: Localização da distribuição das amostras sobre o mapa geológico de Azzone et al. (2009) e das estações gravimétricas, adaptado de Cotis (2015).....</b>	<b>25</b>
<b>FIGURA 1.4.1: Fluxograma dos métodos aplicados neste trabalho. Os dados iniciais estão representados em laranja, os processos em azul e as interpretações em ciano. Os produtos apresentados neste trabalho, tabelas, mapas e modelos diretos 3-D, estão representados nas cores verde, vermelho e roxo, respectivamente.....</b>	<b>27</b>
<b>FIGURA 2.7.1: Amostras preparadas para medições de susceptibilidade magnética e magnetização natural remanescente (NRM).....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 2.8.1: Exemplo de criação de corpo 3-D no software pbEncom ModelVision. Características espaciais e físicas compõem a parametrização do corpo.....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 2.8.2: Exemplo de ajuste do sinal sintético calculado para os 11 perfis magnéticos obtidos no aerolevanteamento.....</b>	<b>36</b>

**FIGURA 2.8.3: Destaque em vermelho, sobre o contorno geológico de Azzone (2008), dos 11 perfis magnéticos utilizados na modelagem direta, referentes às linhas de vôo L12030, L12040, L12050, L12060, L12070, L12080, L12090, L12100, L12110, L12120 e L12130.....37**

**FIGURA 2.8.4: Exemplo de um perfil magnético (L12070) no desenvolvimento do modelo direto. A linha preta indica o sinal magnético obtido pelo aerolevanteamento e o sinal vermelho indica a resposta magnética sintética gerada pelos corpos modelados, estes representados por polígonos coloridos.....38**

**FIGURA 3.1.1: Mapas de relevo e da anomalia magnética de campo total (AMCT), respectivamente. Em ambos está representado, também, os limites do Maciço Alcalino Ponte Nova definido por Azzone et al. (2009). Com base na imagem da anomalia magnética de campo total foi feito um recorte dos dados para melhor análise da anomalia magnética encontrada ao centro.....39**

**FIGURA 3.1.2: Mapa Geológico da região de Santo Antônio do Pinhal, retirado de Cavalcante et al. (1979).....41**

**FIGURA 3.1.3: Sobreposição do mapa geológico de Cavalcanti et al. (1979) para a região de Santo Antônio do Pinhal com o mapa de anomalia magnética de campo total. As extensões das estruturas geológicas de falhas são inferidas por linhas tracejadas.....42**

**FIGURA 3.1.4: Recorte da Janela Central da imagem do modelo de relevo digital (SRTM) sob os limites geológicos de Azzone et al. (2009).....43**

**FIGURA 3.1.5: Recorte da Janela Central da imagem da anomalia magnética de campo total sob os limites geológicos de Azzone et al. (2009).....43**

**FIGURA 3.1.6: Imagem da RTP pelo método de Baranov (1957) e pelo método de Fedi et al. (1994) com sobreposição dos contornos geológicos de Azzone et al. (2009).....44**

**FIGURA 3.1.7: Diferença do sinal magnético da RTP\_B subtraída da RTP\_F.....45**

**FIGURA 3.1.8: Imagem da amplitude sinal analítico da anomalia magnética de campo total com sobreposição dos contornos geológicos de Azzone et al. (2009).....46**

<b>FIGURA 3.1.9: Análise das derivadas direcionais da Anomalia Magnética de Campo Total nas direções X, Y e Z, respectivamente. Foram destacados contornos para cada direção (amarelo para X, vermelho para Y) sobre a região da Janela Central.....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 3.1.10: Imagem dos limites obtidos pelas derivadas direcionais sobrepondo o RTP_F.....</b>	<b>48</b>
<b>FIGURA 3.2.1: Localização aproximada da coleta das 14 amostras, indicada pelos pontos de cores respectivas às fácies apresentadas na Tabela 3.2.1, sobre o mapa geológico de Azzone et al. (2009).....</b>	<b>50</b>
<b>FIGURA 3.2.2: Correlação dos maiores valores do sinal magnético no RTP_F com regiões cujas amostras apresentaram os maiores valores de magnetização remanente natural (NRM). No afloramento Norte, a região destacada pelo círculo vermelho é atribuída aos magnetititos. No afloramento Sul, a região destacada pelo círculo em vermelho é atribuída aos melamonzonitos com nefelina.....</b>	<b>51</b>
<b>FIGURA 3.3.1: Modelo 3D de corpo único sob imagem da anomalia magnética de campo total. Algumas regiões internas ao maciço foram diferenciadas por sua susceptibilidade magnética e NRM.....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURA 3.3.2: Modelo em 3D de dois corpos sob imagem da anomalia magnética de campo total. Algumas regiões internas ao maciço foram diferenciadas por sua susceptibilidade magnética e NRM.....</b>	<b>54</b>
<b>FIGURA 3.3.3: Detalhe da fácies internas dos corpos modelados nos Modelos 1 e 2. As cores indicam diferentes características magnéticas atribuídas às fácies.....</b>	<b>55</b>
<b>FIGURA 3.3.4: Mapas da anomalia magnética de corpo total (acima) e as anomalias sintéticas geradas pelos Modelos 1 (centro) e 2 (abaixo).....</b>	<b>56</b>
<b>FIGURA 3.3.5: Mapas da amplitude do sinal analítico da anomalia magnéticas de corpo total (acima) e das amplitudes do sinal analítico das anomalias sintéticas geradas pelos Modelos 1 (centro) e 2 (abaixo).....</b>	<b>57</b>
<b>FIGURA 3.3.6: Comparação dos limites laterais dos Modelos 1 e 2 sobre sinal magnético sintético gerados respectivamente por eles. Os limites inferidos para o alvo pelas</b>	

Derivadas da AMCT em X e em Y estão representados em amarelo e vermelho, respectivamente.....58

FIGURA 3.3.7: Comparação das derivadas de segunda ordem em X da anomalia magnética de campo total (acima) e dos sinais magnéticos sintéticos dos Modelos 1 (centro) e 2 (abaixo).....59

FIGURA 3.3.8: Comparação das derivadas de segunda ordem em Y da anomalia magnética de campo total (acima) e dos sinais magnéticos sintéticos dos Modelos 1 (centro) e 2 (abaixo).....60

FIGURA 3.3.9: Diferença entre o sinal da Anomalia Magnética de Campo Total e sinais magnéticos gerados pelos Modelos 1 (esquerda) e 2 (direita).....61

FIGURA 3.3.10: Perfil magnético da linha de vôo L12060 utilizado para modelagem direta do Modelo 1.....62

FIGURA 3.3.11: Perfil magnético da linha de vôo L12060 utilizado para modelagem direta do Modelo 2.....62

FIGURA 3.3.12: Perfil magnético da linha de vôo L12070 utilizado para modelagem direta do Modelo 1.....62

FIGURA 3.3.13: Perfil magnético da linha de vôo L12070 utilizado para modelagem direta do Modelo 2.....63

FIGURA 4.1.1: Distribuição das densidades no maciço Ponte Nova sobre o mapa Bouguer residual (Cotis, 2015).....64

FIGURA 4.1.2: Respostas do sinal gravimétrico sintético dos Modelos 1 (esquerda) e 2 (direita). A reta em cinza é uma aproximação do perfil AA' utilizado por Cotis (2015) em seu desenvolvimento do modelo gravimétrico.....65

FIGURA 4.1.3: Perfis gravimétricos AA' gerados pelos Modelos 1 (vermelho) e 2 (verde). As linhas verticais indicam os limites dos dois afloramentos: ASS – Limite do Afloramento Secundário ao Sul. ASN – Limite do Afloramento Secundário ao Norte. APS – Limite do Afloramento Principal ao Sul. APN – Limite do Afloramento Principal ao Norte.....66

**FIGURA 4.1.4: Perfil AA' Bouguer Residual adaptado de Cotis (2015). As linhas verticais indicam os limites dos dois afloramentos: ASS – Limite do Afloramento Secundário ao Sul. ASN – Limite do Afloramento Secundário ao Norte. APS – Limite do Afloramento Principal ao Sul. APN – Limite do Afloramento Principal ao Norte.....67**

**FIGURA 4.2.1: Mapa geológico adaptado de Azzone (2008) com a posição do contorno da face superior das fácies modeladas e localização das amostras com seus respectivos valores médios de susceptibilidade magnética e NRM medidos em laboratório.....68**

**FIGURA 4.2.2: Mapa geológico adaptado de Azzone (2008) com os limites dos Modelos 1 (preto) e 2 (vermelho) em subsuperfície.....69**

# 1. INTRODUÇÃO

A caracterização espacial de complexos alcalinos é de extrema importância para a ciência e para o setor de mineração. A determinação do volume da intrusão, sua configuração em subsuperfície e suas características físicas fornecem elementos cruciais para a compreensão geológica de sua formação, mapeamento, exploração e planejamento exploratório de longo prazo.

O uso da geofísica em estudos sobre complexos alcalinos tem se mostrado eficaz na caracterização espacial dos alvos em subsuperfície. Mais especificamente, a magnetometria e a gravimetria são métodos que possibilitam uma fiel delimitação lateral de uma fonte de campo anômalo. Rochas alcalinas costumam apresentar sinais magnéticos e gravimétricos evidentes devido à alta densidade e à alta susceptibilidade magnética de suas rochas quando comparada às rochas encaixantes.

A distribuição de ocorrências de intrusões alcalinas no Brasil tem grande destaque na borda da Bacia do Paraná. Podem-se citar como exemplo as províncias de Poxoréu, Goiás, Alto do Paranaíba, Ponta Grossa e Serra do Mar.

De acordo com Azzone et al. (2009), o maciço Alcalino Máfico-Ultramáfico Ponte Nova é parte do extenso magmatismo alcalino-carbonatítico continental Meso-Cenozóico que ocorre nas regiões central e sudeste da Plataforma Sul-Americana. O maciço situa-se na zona fronteira entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais, na região das cidades de Sapucaí-Mirim (MG) e São Bento do Sapucaí (SP), no setor norte da Província Serra do Mar, junto à porção oriental da Serra da Mantiqueira.

Entre outubro de 2011 e agosto de 2013, a Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica Ltda. realizou um aerolevantamento magnético-gamaespectométrico sobre tal região. Detectou-se uma anomalia magnética de grande área e amplitude, caracterizada como um dipolo normal situado sobre o Maciço Alcalino Máfico Ultramáfico Ponte Nova. Selli (2014) e Cotis et al. (2015) realizaram levantamentos gravimétricos sobre este mesmo alvo, que detectou um alto gravimétrico. Cotis (2015) apresentou um modelo gravimétrico inicial para o alvo.

O objetivo proposto neste trabalho foi a criação de modelos magnéticos 3-D diretos para a fonte da anomalia que integrasse as informações magnéticas, geológicas e os resultados das medições de laboratório. Posteriormente, utilizou-se o modelo

magnético em conjunto com as informações gravimétricas e de densidade de Cotis et al. (2015) e com dados de geologia de Azzone et al. (2009) para propor um modelo interpretativo que correspondesse aos dados geofísicos da área de estudo.

Para alcançar os objetivos propostos utilizamos os dados aeromagnéticos coletados pela Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica Ltda. (2013) para realizar uma interpretação geofísica sobre a anomalia magnética detectada. Também foram realizadas medições em laboratório dos valores de susceptibilidade magnética e magnetização remanescente natural (NRM) de 14 amostras retiradas dos afloramentos do maciço.

## 1.1 Contexto Geológico

O Maciço Alcalino Ponte Nova está localizado no setor norte da Província Serra do Mar, junto à porção oriental da Serra da Mantiqueira. A Província Serra do Mar possui ocorrências alcalinas do Cretáceo Superior ao Paleoceno Inferior, distribuídas pelo litoral do Estado de São Paulo e Rio de Janeiro, se estendendo ao interior do continente até a Serra da Mantiqueira (Ulbrich e Gomes, 1981; Almeida, 1983).

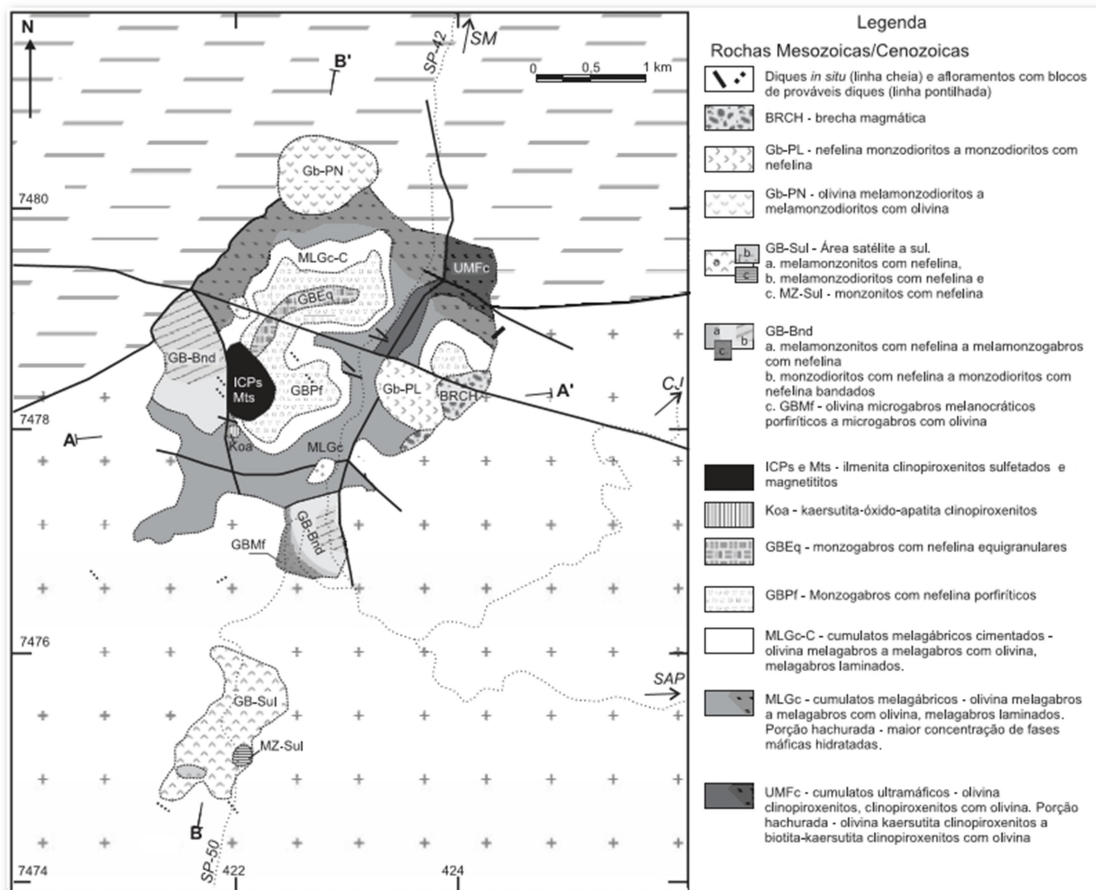
A Província Serra do Mar é dividida em três setores: norte, central e sul (Almeida, 1983), que correspondem a áreas de importantes soerguimentos cenozóicos ao longo da região costeira do sudeste do Brasil. O Maciço Alcalino Ponte Nova trata-se de uma das intrusões alcalinas do setor norte, somando-se a outras intrusões do mesmo tipo das ilhas costeiras (São Sebastião, Monte de Trigo, Vitória e Búzios). Esta região também conta com diques alcalinos máficos e félsicos. O mapa geológico adaptado do Maciço Alcalino de Ponte Nova (Azzone et al., 2009) está na Figura 1.1.1.

De acordo com o modelo geológico de Azzone (2008) o Maciço Máfico-Ultramáfico Ponte Nova teve uma evolução complexa dos litotipos. Primeiro houve um pulso central consistindo em uma sequência inferior, caracterizada pela presença de cumulos ultramáficos e melagábricos ( fácies UMFc, MLGc e MLCc-C indicadas na Figura 1.1.1), e uma sequência superior com rochas gábricas e monzogábricas relacionadas pelas fácies GBPf e GBEq (Figura 1.1.1). Ambas as sequências são associadas ao mesmo pulso central.

Posteriormente ao pulso central é inferido um segundo pulso, associado às fácies das regiões Oeste e Sul, com sequência superior caracterizada principalmente pela ocorrência de rochas bandadas e matriz fina (Gb-Bnd e GB-MF, respectivamente). Com



relação à área “satélite sul”, que se refere ao corpo menor separado pelo embasamento, existe uma correlação de suas rochas com as rochas da sequência superior do pulso central, porém, devido à distribuição dos elementos traços, à presença de litotipos mais evoluídos (MZ-Sul) e características isotópicas, Azzone et al. (2009) o individualiza como um pulso separado.

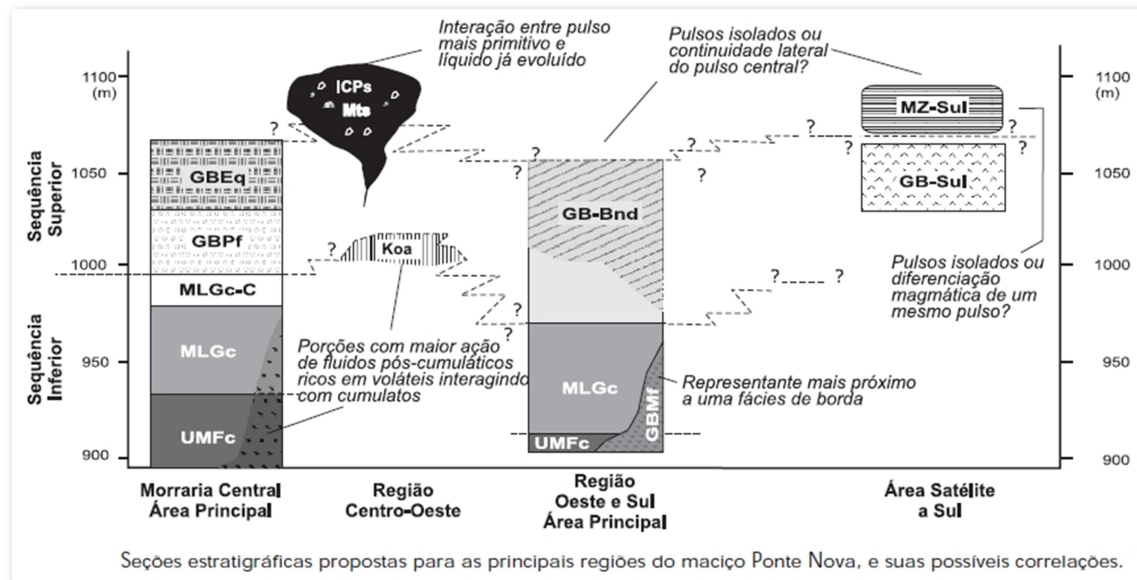


**FIGURA 1.1.1: Mapa geológico do Maciço Máfico-Ultramáfico Ponte Nova (Azzone et al., 2009)**

As fácies de ilmenita clinopiroxenito sulfetados (ICPs) e magnetititos (MTs) são atribuídas a um posterior influxo magmático, resultando na interação entre magmas com o magma residual fracionado da câmara. As fácies ao norte e a leste (Gb-PN e Gb-PL), com formas subcirculares bem definidas, são associadas a pulsos satélite, seguidos por pulsos geradores da brecha magmática (BRCH), confinada a leste.

Ainda de acordo com Azzone (2008) o caráter cumulático, os altos índices de máficos, os baixos conteúdos de Na e K e o caráter ultrabásico apontam a cristalização

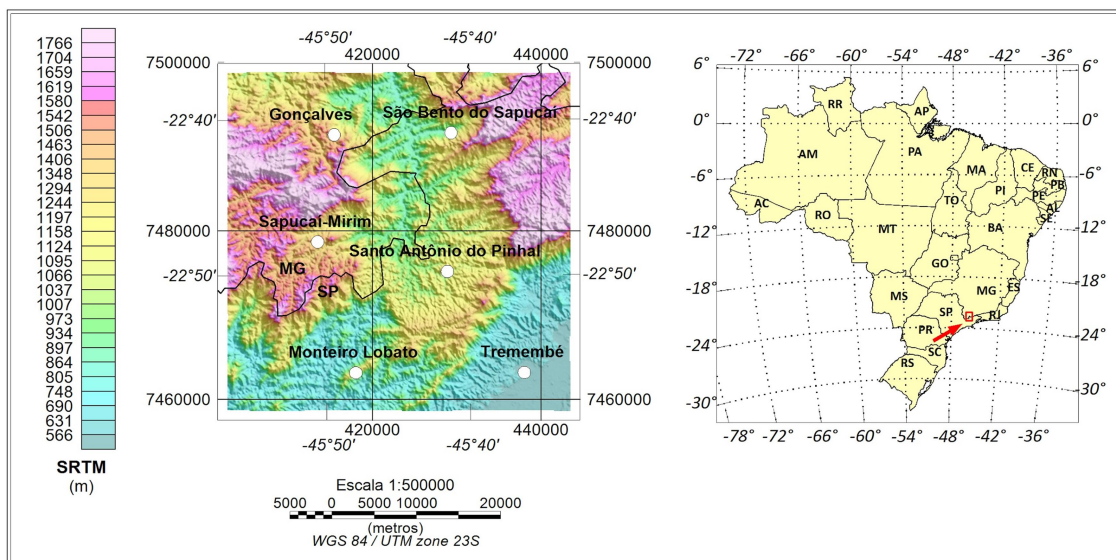
fracionada como principal mecanismo atuante na evolução do maciço. As estruturas bandadas, as quais alternam bandas máficas e félsicas, localizadas próximas ao contato com embasamento, apontam para uma possível ação mais efetiva de correntes de convecção. O modelo geológico evolutivo proposto por Azzone et al. (2009) é apresentado na Figura 1.1.2.



**FIGURA 1.1.2: Seções estratigráficas do modelo geológico do Maciço Máfico-Ultramáfico Ponte Nova (Adaptado de Azzone et al., 2009)**

## 1.2 Dados aeromagnéticos

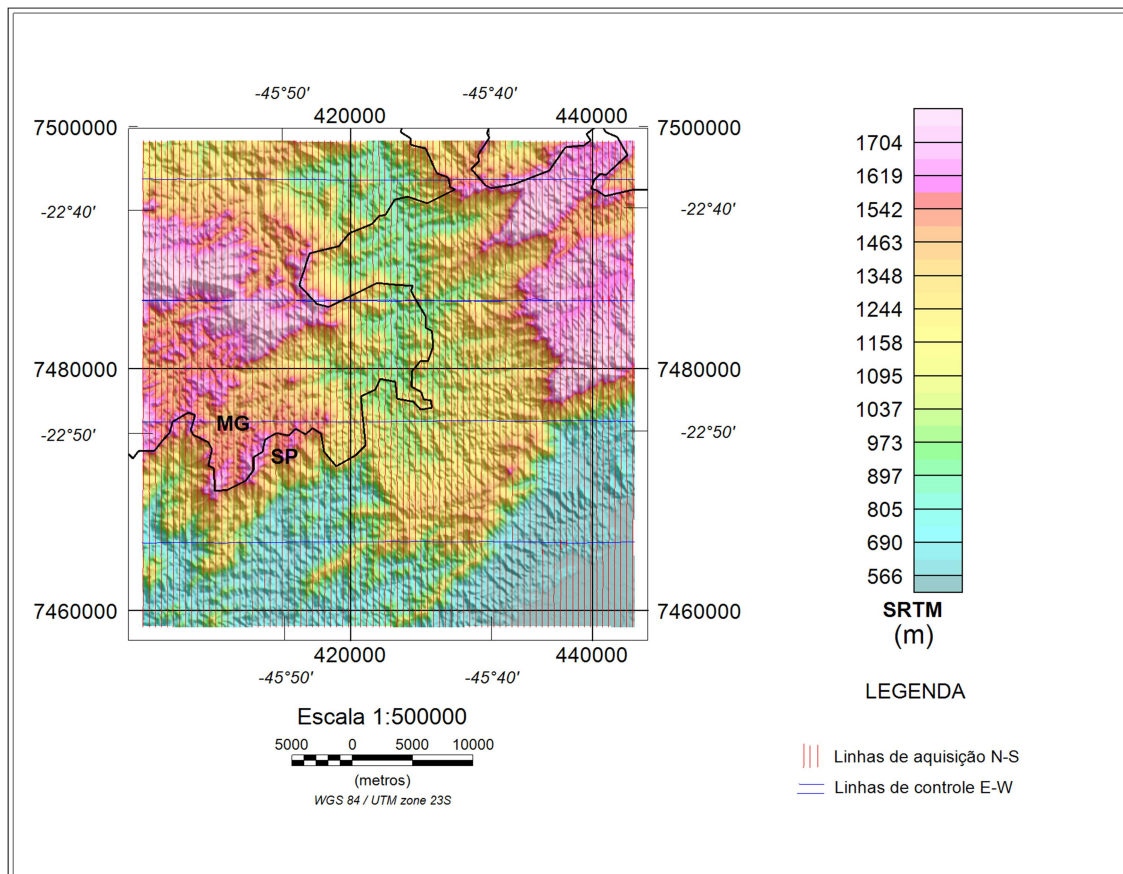
A região estudada localiza-se entre as latitudes  $-22^{\circ}36'51''$  e  $-22^{\circ}58'48''$  e longitudes  $-45^{\circ}32'59''$  e  $-45^{\circ}56'54''$  como indicado na Figura 1.2.1. Nesta figura, o modelo digital do terreno é o Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, disponível em Geosoft DAP Web Client, 2016) e as altitudes estão em metros.



**FIGURA 1.2.1: Mapa de localização da área do levantamento aerogeofísico sobre modelo digital do terreno (SRTM). A área está sobre os municípios de Sapucaí Mirim, Santo Antônio do Pinhal e São Bento do Sapucaí, fronteira entre SP e MG.**

As linhas de aquisição dos dados aerolevantados possuem orientação N-S, com espaçamento de 500 metros, e as linhas de controle são orientadas na direção E-W e espaçadas por 10.000 metros, como indicadas na Figura 1.2.2. Ao todo, o trecho sobrevoado soma aproximadamente 3.523 km lineares, a uma altura média de 200 metros (Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica Ltda, 2013).

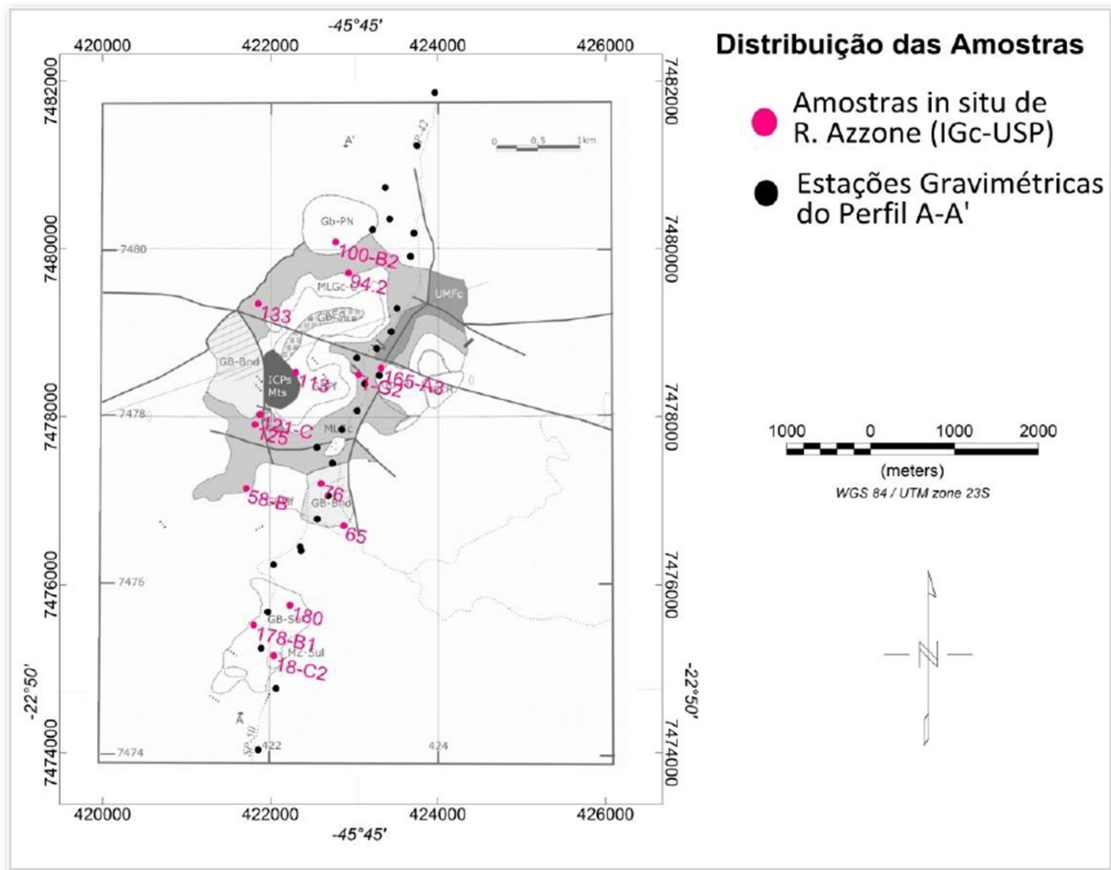
As etapas de processamento dos dados aeromagnéticos brutos foram realizadas pela Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica Ltda (2013) e constituíram-se na remoção da variação diurna, correção de paralaxe, nivelamento dos perfis, remoção do IGRF e micronivelamento. Os dados processados evidenciaram a existência de uma grande anomalia magnética de orientação normal sobre o corpo de interesse.



**FIGURA 1.2.2:** Mapa das linhas de aquisição e de controle do aerolevanteamento sobre imagem SRTM (*Geosoft DAP Web Client, 2016*). As linhas de aquisição têm direção N-S (vermelhas) e espaçamento de 500 metros, já as linhas de controle possuem direção E-W (azuis), com espaçamento de 10.000 metros.

### 1.3 Dados de densidade

Foram retiradas 14 amostras dos afloramentos do maciço. Cotis (2015) obteve, por medições realizadas em laboratório, valores médios de densidade para cada amostra. Esses valores foram utilizados no modelo gravimétrico direto produzido neste trabalho e seu sinal gravimétrico comparado com o sinal obtido pela autora (op. cit.). A Figura 1.3.1, adaptada de Cotis (2015), apresenta a localização das 14 amostras e das estações gravimétricas utilizadas em seu trabalho sobre o mapa geológico de Azzone et al. (2009). Como evidenciado, as estações gravimétricas do Perfil A-A' cobrem uma parcela pequena da área do afloramento, limitando as informações adquiridas para apenas uma parte do maciço. O modelo gravimétrico de Cotis (2015) trata-se de um modelo 2-D ao longo do perfil A-A'.



**FIGURA 1.3.1: Localização da distribuição das amostras sobre o mapa geológico de Azzone et al. (2009) e das estações gravimétricas, adaptado de Cotis (2015)**

Os valores de densidade média obtidos por Cotis (2015) e utilizados em seus modelos gravimétricos estão nas tabelas Tabela 1.3.1, adaptada de Cotis (2015). Tais valores também foram utilizados nos modelos gravimétricos diretos produzidos neste trabalho.

**TABELA 1.3.1 Tabela com valores de densidade média (média de todas as medidas) para cada afloramento e para um corpo único. Adaptado de Cotis (2015).**

Afloramentos	Densidade Média [g/cm <sup>3</sup> ]	Desvio Padrão
Principal	3,21	0,12
Secundário	2,95	0,1
Corpo Único	3,15	0,16



Em detalhe, a Tabela 1.3.2 discrimina os valores de densidade média obtidos para cada amostra. Esses valores também foram considerados na diferenciação das fácies petrográficas dos modelos gravimétricos diretos produzidos neste trabalho.

**TABELA 1.3.2. Tabela com valores de densidade média para cada amostra. Valores obtidos em laboratório por Cotis (2015).**

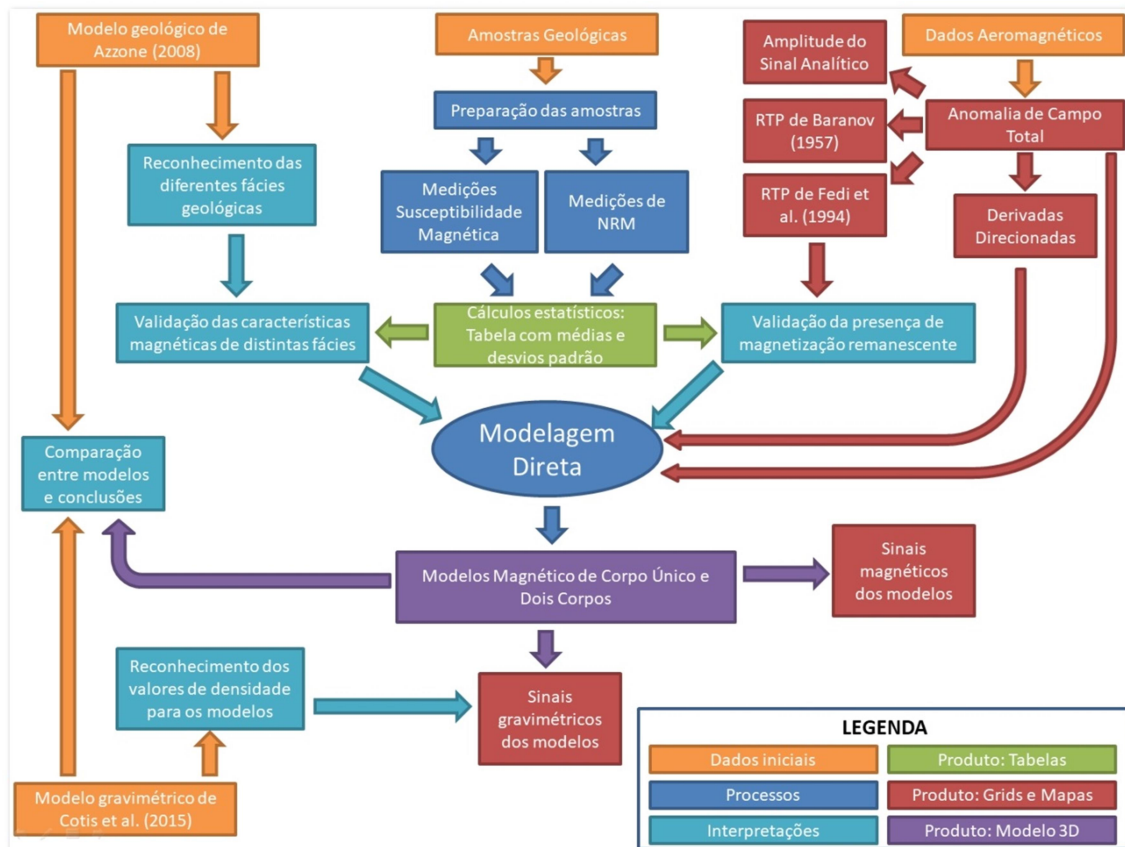
Nome da amostra	Fácies petrográficas	Sigla	DensMéd [g/cm <sup>3</sup> ]	Dens. Méd. Desv.Pad.
RGA_113	Monzogabros com nefelina porfiríticos	GBPf	3,10	0,019
RGA_65	Melamonzonitos com nefelina a melamonzogabros com nefelina	GB_Bnd	3,21	0,016
RGA_76	Melamonzonitos com nefelina a melamonzogabros com nefelina	GB_Bnd	3,28	0,004
RGA_180	Melamonzonitos com nefelina	GB_Sul	3,05	0,039
RGA_178B1	Melamonzonitos com nefelina	GB_Sul	2,94	0,009
RGA_18C2	Monzonitos com nefelina	MZ_Sul	2,84	0,015
RGA_165A3	Nefelina monzodioritos	GB_Pl	3,05	0,007
RGA_100B2	Olivina melamonzodioritos	Gb-PN	3,15	0,011
RGA_0162	Cumulatos melagábricos	MLGc	3,31	0,014
RGA_121C	Cumulatos melagábricos	MLGc	3,42	0,02
RGA_1251	Cumulatos melagábricos	MLGc	3,20	0,011
RGA_58B	Cumulatos melagábricos	MLGc	3,22	0,009
RGA_133	Cumulatos melagábricos com maior concentração de fases máficas hidratadas	MLGc	3,25	0,011
RGA_942	Cumulatos melagábricos cimentados	MLGc-C	3,12	0,012

#### 1.4 Sequência dos métodos e processos

O trabalho contou inicialmente com três principais frentes de pesquisa, como indicado no fluxograma da Figura 1.4.1: no ramo à esquerda, o reconhecimento das fácies petrográficas e contexto geológico do modelo geológico de Azzone et al.(2009); no ramo central, as medições das características magnéticas das amostras geológicas, resultando em uma tabela com valores estatísticos e, no terceiro ramo à direita, a aplicação de filtros, processamento e interpretação geofísica dos dados aeromagnéticos na forma de grids e mapas.

Essas três frentes convergiram para o desenvolvimento do modelo direto 3-D, resultando em duas hipóteses de trabalho sobre a configuração do maciço em subsuperfície: um corpo único que aflora em duas regiões e dois corpos desconectados em subsuperfície. Para cada uma das hipóteses foram gerados mapas dos sinais

magnéticos dos modelos e, utilizando os valores de densidade do modelo gravimétrico de Cotis et al. (2015), gerados mapas com suas respectivas respostas gravimétricas.



**FIGURA 1.4.1: Fluxograma dos métodos aplicados neste trabalho. Os dados iniciais estão representados em laranja, os processos em azul e as interpretações em ciano. Os produtos apresentados neste trabalho, tabelas, mapas e modelos diretos 3-D, estão representados nas cores verde, vermelho e roxo, respectivamente.**

Como indicado no fluxograma, algumas interpretações e processos foram resultantes da integração de informações. O reconhecimento das características dos litotipos e evolução do maciço foram adquiridos do trabalho de Azzone et al. (2009), bem como o reconhecimento dos valores de densidade para as amostras foram adquiridos do trabalho de Cotis et al. (2015). A constatação da presença de magnetização remanescente no maciço foi indicada tanto pelas medições de NRM das amostras como, também, na Redução ao Polo de Fedi et al. (1994). Já a constatação de características magnéticas diferentes para as distintas fácies também foi indicado pelas

medições em laboratório e suas respectivas composições indicadas por Azzone et al. (2009).

A modelagem direta integrou informações de ambas as constatações citadas para constituir um modelo heterogêneo em sua magnetização. As derivadas direcionais, obtidas pelo processamento dos dados aeromagnéticos, forneceram informações sobre os limites laterais do corpo em subsuperfície e, por fim, o sinal da anomalia magnética de campo total foi utilizado como o sinal de referência para reprodução do modelo.

Finalmente, como etapa final do trabalho, há discussão e comparação entre os modelos diretos gerados, o modelo gravimétrico de Cotis et al. (2015) e o modelo geológico de Azzone et al. (2009).



## 2. MÉTODOS

### 2.1 Magnetometria

A magnetometria tem sido utilizada em diversos campos de estudos de geomagnetismo, magnetismo das rochas, paleomagnetismo e prospecção mineral (Blakely, 1996). Trata-se da técnica mais versátil em prospecções geofísicas, e suas medições são feitas de maneira mais simples e menos custosa quando comparada à outras técnicas geofísicas (Telford et al., 1990). Variações no campo magnético são comumente diagnosticadas como depósitos associados à minerais magnéticos e estruturas regionais. O campo magnético terrestre apresenta variações lentas ao longo do tempo (Telford et al., 1990). Tal variação é prevista pelo IGRF (International Geomagnetic Reference Field), obtido a partir de modelos quinquenais.

Por se tratar de um método potencial, a magnetometria dificilmente encontra uma interpretação única para os dados observados (Telford et al., 1990) e, diferentemente do outro método potencial geofísico - a gravimetria -, o caráter dipolar dos campos magnéticos gera mais dificuldades na determinação da posição da fonte, visto que os extremos das anomalias não necessariamente estão na linha do ponto epicentral da fonte (Gerovska e Stavrev, 2006). Se comparados ambos os métodos potenciais, o método magnético lida com maior complexidade devido às variações mais erráticas e localizadas do campo magnético (Telford et al., 1990).

Segundo Blakely (1996), um corpo magnetizável, quando sujeito a um campo magnético externo  $\mathbf{H}$ , adquire uma nova magnetização que se torna nula quando  $\mathbf{H}$  é retirado. Esta magnetização é chamada de magnetização induzida  $\mathbf{J}_i$ , e pode ser definida por:

$$\mathbf{J}_i = k \mathbf{H} \quad (1),$$

onde  $k$  é denominada susceptibilidade magnética e trata-se de uma propriedade física do material magnetizável.

## 2.2 Magnetização Natural Remanescente

Outro tipo de magnetização nas rochas é denominada magnetização natural remanescente. Esta magnetização está presente em materiais ferromagnéticos que conseguem reter uma magnetização mesmo na ausência de um campo magnético externo (Blakely, 1996).

A soma vetorial das magnetizações, induzida ( $\mathbf{J}_i$ ) e remanescente ( $\mathbf{J}_r$ ), compõe a magnetização total da rocha ( $\mathbf{J}$ ), explicitada na equação 2, a seguir:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_i + \mathbf{J}_r \quad (2).$$

De acordo com Fedi et al. (1994), a inferência da direção da magnetização remanescente é essencial para análise, elaboração e interpretação corretas do campo magnético estudado. Desta forma, a magnetometria deve trabalhar com duas propriedades físicas, a susceptibilidade magnética e a magnetização remanescente (Cordani e Shukowsky, 2009).

A intensidade da magnetização remanescente  $\mathbf{J}_r$  é particularmente alta em rochas ígneas e termo-metamórficas, muitas vezes excedendo os valores da magnetização induzida  $\mathbf{J}_i$  (Blakely, 1996). A razão entre  $\mathbf{J}_r$  e  $\mathbf{J}_i$  é denominada de coeficiente de Königsberger, definida na equação 3:

$$Q = |\mathbf{J}_r| / |\mathbf{J}_i| \quad (3).$$

## 2.3 Redução ao Polo Magnético (RTP) de Baranov (1957)

A RTP foi proposta por Baranov (1957) e desde então tem sido uma técnica muito utilizada para definir a localização de corpos magnéticos em levantamentos magnetométricos devido a sua alta centricidade. Essa técnica remove um nível de complexidade no processo interpretativo, pois, com ela, ocorre o deslocamento lateral da anomalia para a linha sobre sua respectiva fonte. Trata-se da anomalia magnética, proveniente da mesma fonte, medida no polo magnético, local aonde a magnetização e o campo magnético ambiente estão direcionados verticalmente (Blakely, 1996).

O software utilizado neste trabalho utiliza a formulação proposta por Baranov (1957) calculada pela técnica de transformada rápida de Fourier (FFT). A fórmula utilizada pelo programa para o cálculo do RTP é dada por

$$L(\theta) = \frac{[\sin(I) - i \cdot \cos(I) \cdot \cos(D - \theta)]^2}{[\sin^2(Ia) + \cos^2(Ia) \cdot \cos^2(D - \theta)] [\sin^2(I) + \cos^2(I) \cdot \cos^2(D - \theta)]} \quad (4)$$

onde  $I$  é a inclinação magnética,  $Ia$  é a inclinação da correção de amplitude, com a condição de que se  $|Ia| < |I|$  então  $Ia = I$ ,  $D$  é a declinação magnética e  $\theta$  é a direção do número de onda.

As limitações deste método estão relacionadas à sua instabilidade em baixas latitudes, podendo dar valores incorretos na utilização de coeficientes de altos valores, resultantes da divisão por números próximos de zero (Equação 4), aumentando o domínio de integração e, portanto, absorvendo uma maior quantidade de ruídos (Silva, 1986). Outra limitação refere-se aos resultados incorretos na presença de magnetização remanescente desconhecida no corpo magnético (Cooper e Cowan, 2005).

#### 2.4 Redução ao Polo Magnético (RTP) de Fedi et al. (1994)

A fim de se contornar possíveis maus resultados na presença de uma componente de magnetização remanescente desconhecida nas anomalias magnéticas, este trabalho utilizou o método desenvolvido por Fedi et al. (1994).

Neste método, foi proposta uma nova técnica para se estimar a direção do vetor de magnetização total nas anomalias geradas por rochas magnéticas. A inclinação e declinação desconhecidas ( $D_{T^*}$  e  $I_{T^*}$ ) podem ser determinadas pela aplicação de um operador de RTP, em anomalias calculadas, com diferentes combinações de inclinação e declinação ( $I_T$  e  $D_T$ ) e da observação da variação das novas anomalias definidas pelos novos parâmetros. Os valores definidos para  $D_{T^*}$  e  $I_{T^*}$  são determinados como sendo os índices que maximizam o mínimo da anomalia magnética reduzida ao polo. A aplicação do método resulta numa estimativa para magnetização total da anomalia, resultante da soma vetorial das magnetizações remanescente e induzida.

## 2.5 Derivadas direcionais

As derivadas direcionais de ordem N do campo magnético podem ser calculadas em relação ao eixo x, y ou z para inferir os limites de corpos e estruturas fontes de anomalias magnéticas. Sendo  $\Phi(x,y)$  a quantidade escalar do campo magnético medido horizontalmente na superfície, as derivadas horizontais podem ser estimadas usando-se diferenças finitas e medidas discretas de  $\Phi(x,y)$ ,  $\Phi_{i,j}$ , equiespaçadas de  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  (Blakely, 1995), explicitadas na Equação 5:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi(x, y)}{dx} &\approx \frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i-1,j}}{2\Delta x} \\ \frac{d\phi(x, y)}{dy} &\approx \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j-1}}{2\Delta y} \end{aligned} \quad (5)$$

Por se tratar de um potencial, pode-se, também, calcular a segunda derivada do campo magnético  $\Phi$  pela equação de Laplace, indicada na Equação 6:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi = 0 \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = - \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (6)$$

## 2.6 Amplitude do Sinal Analítico

O sinal analítico é dado pela combinação dos gradientes verticais e horizontais da anomalia magnética, inicialmente apresentado por MacLeod et al. (1993), dependendo, portanto, unicamente da intensidade da magnetização da fonte. A amplitude A do sinal analítico do campo magnético total F observado em (x,y) é calculada como a raiz da soma dos quadrados da derivada do campo F nas direções ortogonais x, y e z, como indicado na fórmula:

$$|A(x, y)| = \left[ \left( \frac{\delta F(x, y)}{\delta x} \right)^2 + \left( \frac{\delta F(x, y)}{\delta y} \right)^2 + \left( \frac{\delta F(x, y)}{\delta z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

Por ser obtida apenas pelas três derivadas ortogonais do campo magnético total, sua forma não depende da direção da magnetização, mas apenas da localização da fonte do sinal magnético, obtendo-se, com ele, boa centricidade com a fonte. Os resultados também não são afetados pela presença de magnetização remanescente.

## 2.7 Medidas de propriedades magnéticas

Para diminuir a ambiguidade do modelo de distribuição de propriedades magnéticas em subsuperfície, foram determinadas a susceptibilidade magnética e a magnetização remanescente para as diferentes fácies do maciço e utilizá-las como propriedades do modelo. Foram analisadas 14 amostras utilizadas anteriormente nos trabalhos de Azzone (2008) e Cotis (2015).

As amostras foram preparadas para as medições em formatos de paralelepípedos, como indicado na Figura 2.7.1, para melhor encaixe nos instrumentos do laboratório. Para as medições de susceptibilidade magnética foi utilizado o aparelho *Modular system for measuring magnetic susceptibility MFK1* da *Agico (Advanced Geoscience Instruments Company)*. Foram realizadas no mínimo três medições para cada amostra.

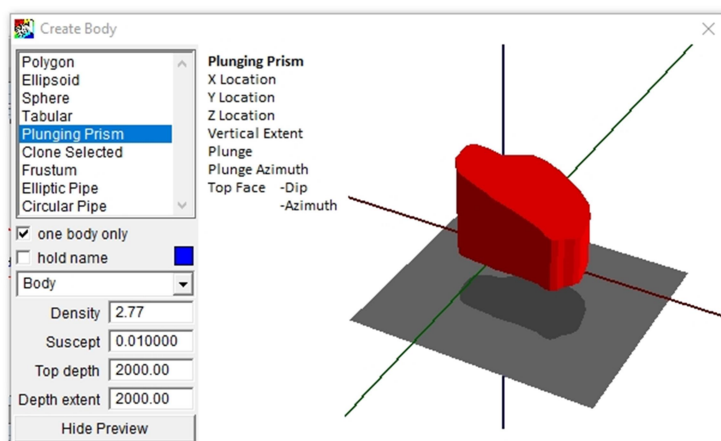
A magnetização remanescente natural foi medida para cada amostra utilizando-se o aparelho *Dual Speed Spinner Magnetometer JR-64* da *Agico*. Foram realizadas no mínimo três medições para cada amostra. Excepcionalmente para duas amostras (RGA\_180 e RGA\_113) foram realizadas 9 e 16 medições devido à disparidade obtida nos valores, que resultaram em desvios padrões de 8,45 A/m e 137,58 A/m, respectivamente.



**FIGURA 2.7.1: Amostras preparadas para medições de susceptibilidade magnética e magnetização natural remanescente (NRM).**

## 2.8 Modelagem direta

O desenvolvimento dos modelos diretos neste trabalho foi feito com o uso do software pb Encom ModelVision v.12. Este programa permite o desenvolvimento de modelos 3-D pela modelagem customizada de corpos com parâmetros espaciais, como localização georreferenciada, profundidade, extensão e mergulho, e parâmetros geofísicos, como susceptibilidade magnética, densidade e NRM. A Figura 2.8.1 mostra um exemplo de criação de um prisma simples como corpo modelado, evidenciando algumas informações contidas nele.



**FIGURA 2.8.1: Exemplo de criação de corpo 3-D no software pbEncom ModelVision. Características espaciais e físicas compõem a parametrização do corpo.**

Os corpos criados são posicionados em um semi-espaço georreferenciado e representado por perfis, onde dados gravimétricos e magnéticos obtidos em levantamentos podem compor a área estudada. O programa permite a modelagem direta comparando o resultado teórico com os dados obtidos em levantamentos (processo realizado neste trabalho na criação do modelo magnético), ou criar apenas um resultado teórico e reproduzir uma resposta sintética do modelo criado (processo realizado neste trabalho na criação do modelo gravimétrico).

A visualização da modelagem é feita através de cortes no espaço onde o corpo se insere, como mostrado na Figura 2.8.2. A posição dos cortes, no caso da aeromagnetometria, foi vinculada à posição das linhas de vôo e os dados ajustados baseiam-se na anomalia de campo total. A customização dos formatos dos blocos, inserção de valores de susceptibilidade magnética e de intensidade da magnetização remanente permitiram um modelo em subsuperfície da área magnetizada que discriminou diferentes fácies petrográficas.

Neste trabalho, todas as informações obtidas em laboratório, no aerolevanteamento e no modelo geológico foram consideradas na parametrização dos corpos modelados, determinando suas extensões laterais, localizações e propriedades magnéticas (susceptibilidade magnética e magnetização remanescente). Ao todos foram utilizados, majoritariamente, 11 perfis magnéticos para a modelagem, referentes às linhas de vôo L12030, L12040, L12050, L12060, L12070, L12080, L12090, L12100, L12110, L12120 e L12130, destacadas na Figura 2.8.3. O modelo foi criado com o parâmetro de IGRF de valor 23.080 nT, com inclinação de  $-35.5^\circ$  e declinação de  $-21.1^\circ$ , dados adequados ao campo magnético na região e período da coleta dos dados aeromagnéticos.

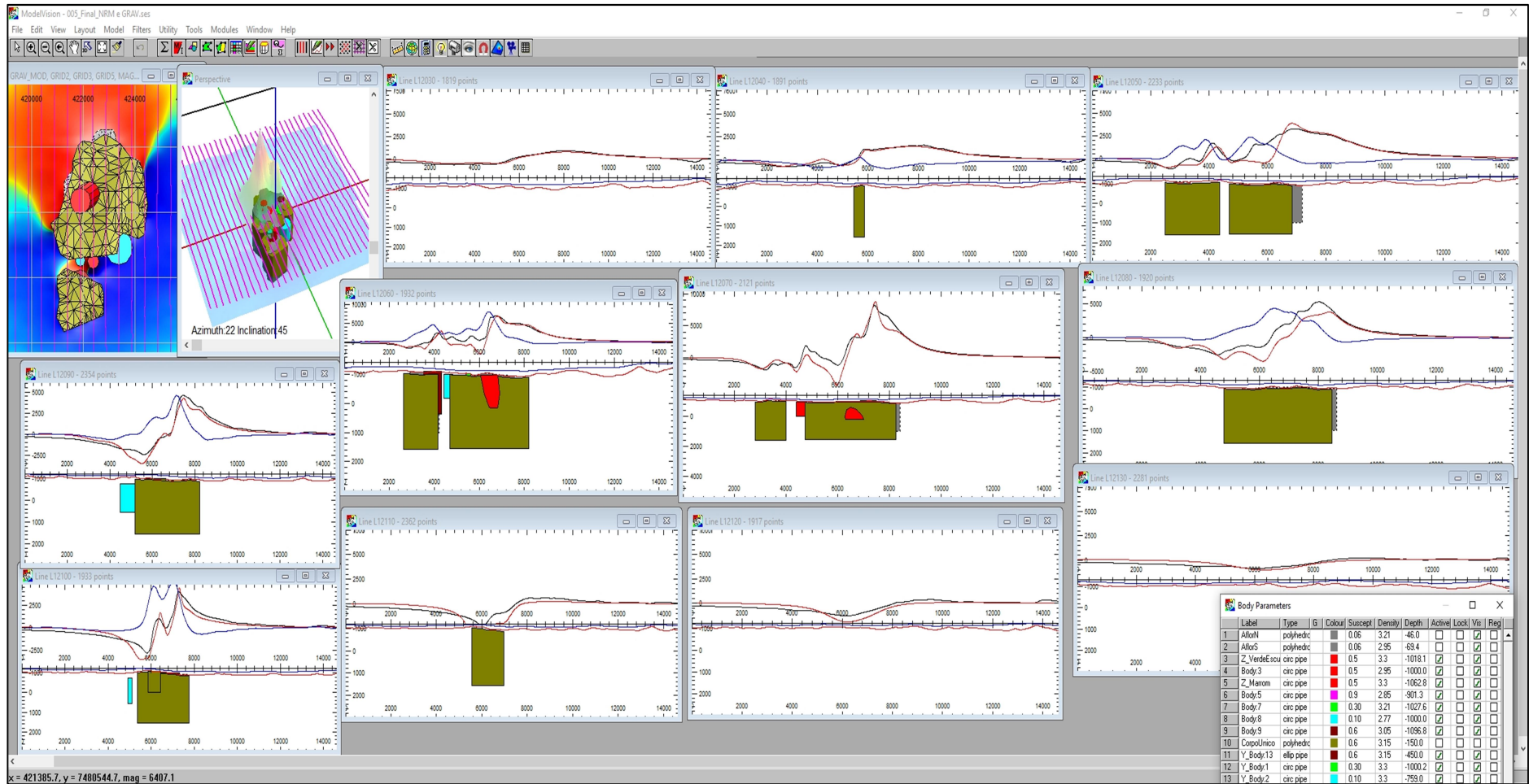
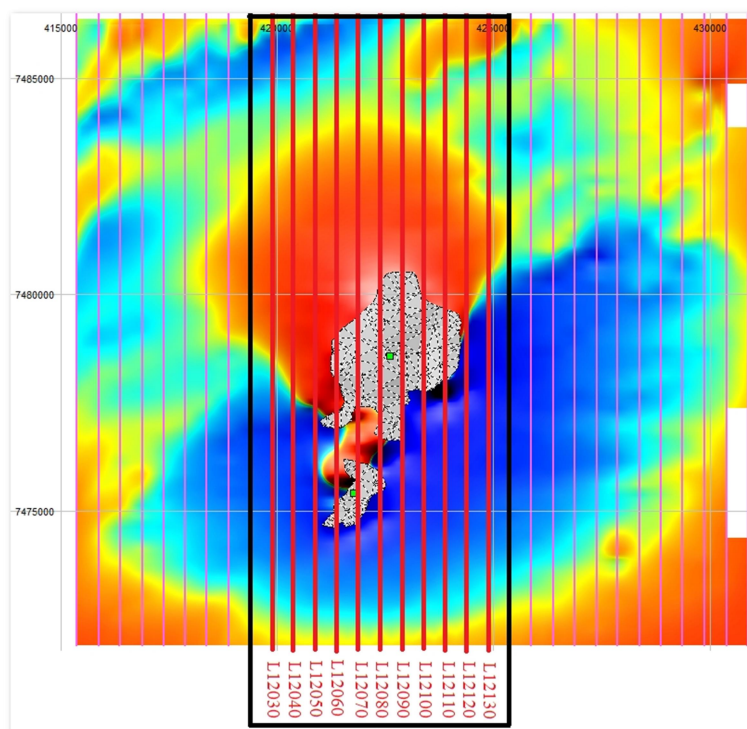


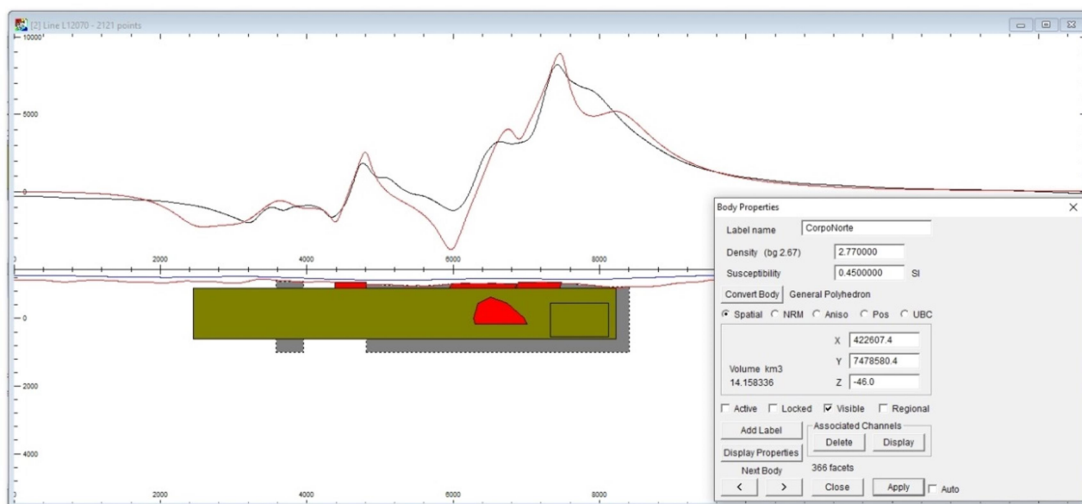
FIGURA 2.8.2: Exemplo de ajuste do sinal sintético calculado para os 11 perfis magnéticos obtidos no aerolevamento.





**FIGURA 2.8.3: Destaque em vermelho, sobre o contorno geológico de Azzone (2008), dos 11 perfis magnéticos utilizados na modelagem direta, referentes às linhas de voo L12030, L12040, L12050, L12060, L12070, L12080, L12090, L12100, L12110, L12120 e L12130.**

Como o modelo geológico de Azzone (2008) indicou diferentes fácies petrográficas e as medições das 14 amostras apresentaram características magnéticas distintas entre elas, foram consideradas na modelagem direta regiões com características magnéticas próprias, diferentes entre si, a fim de se ajustar a resposta magnética sintética ao sinal magnético medido no aerolevanteamento. A Figura 2.8.4 trata-se de um exemplo de um perfil do modelo direto, no qual a curva preta indica o sinal obtido pelo aerolevanteamento, a curva vermelha indica a resposta sintética do sinal magnético gerado pelos corpos modelados, estes representados por polígonos coloridos indicando diferentes características magnéticas e extensões. Um melhor ajuste do sinal magnético sintético foi procurado considerando todas as curvas sintéticas dos 11 perfis magnéticos ao mesmo tempo, exemplificado na Figura 2.8.2, limitando-se apenas pela eficiência e tempo de processamento dos computadores envolvidos.

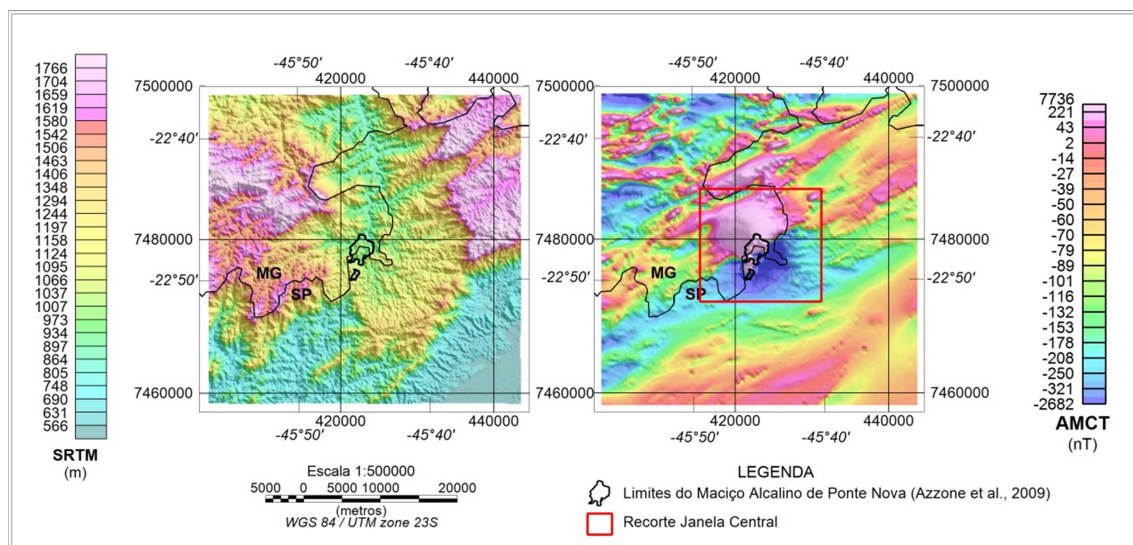


**FIGURA 2.8.4: Exemplo de um perfil magnético (L12070) no desenvolvimento do modelo direto. A linha preta indica o sinal magnético obtido pelo aerolevanteamento e o sinal vermelho indica a resposta magnética sintética gerada pelos corpos modelados, estes representados por polígonos coloridos.**

## 3.RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Mapas aeromagnéticos interpretativos

Os dados magnéticos foram interpolados pelo método de mínima curvatura, com espaçamentos das células de interpolação igual a 125 metros, correspondentes a  $\frac{1}{4}$  do espaçamento das linhas de aquisição N-S. Na imagem de anomalia magnética de campo total (Figura 3.1.1) fez-se a remoção de um valor médio do IGRF para a região de estudo. Removeu-se o valor de 23.060,4 nT, referente ao IGRF calculado no dia 02 de novembro de 2011 (dia dentro do período de maior quantidade de aquisição dos dados).

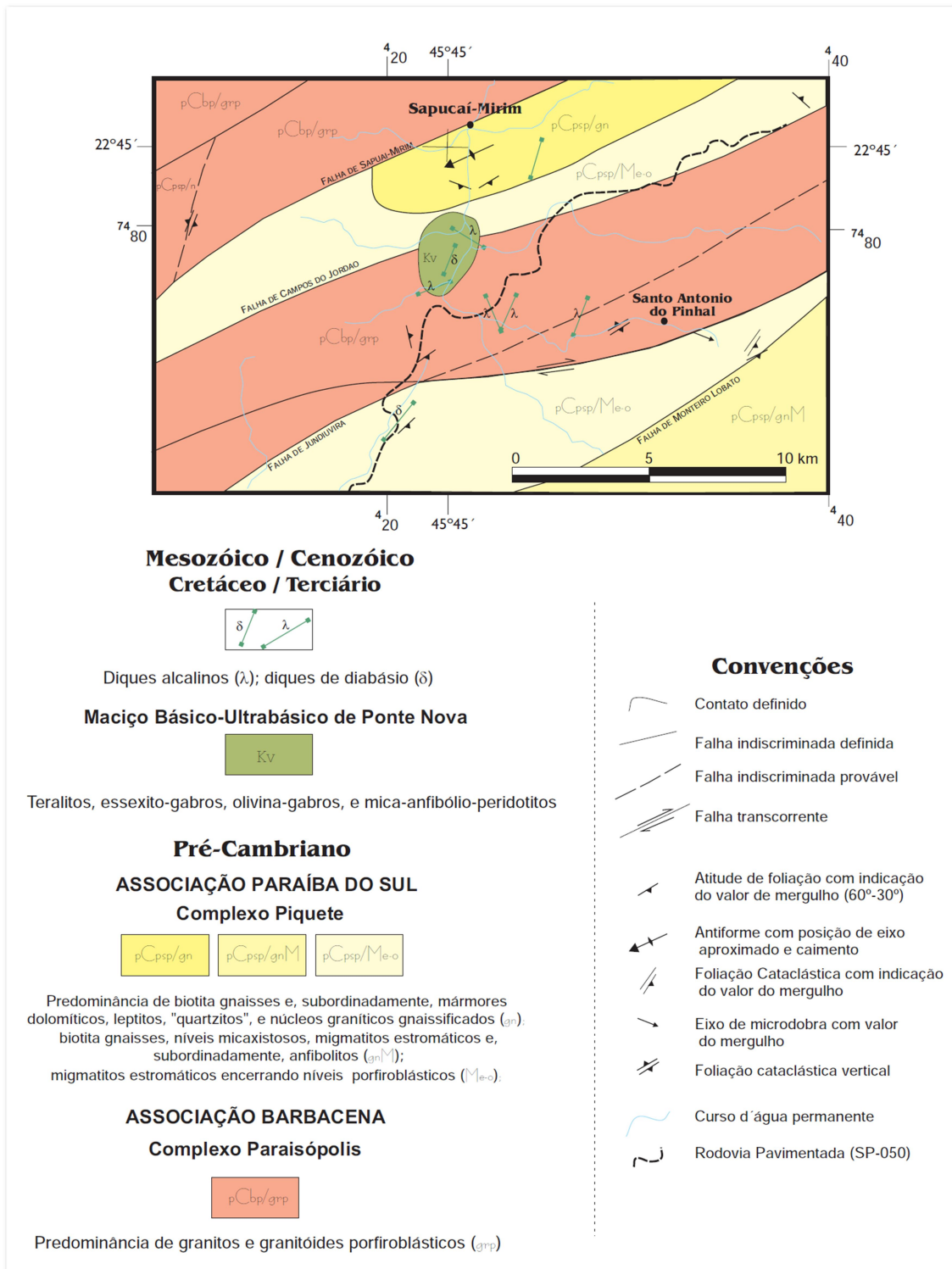


**FIGURA 3.1.1: Mapas de relevo e da anomalia magnética de campo total (AMCT), respectivamente. Em ambos está representado, também, os limites do Maciço Alcalino Ponte Nova definido por Azzone et al. (2009). Com base na imagem da anomalia magnética de campo total foi feito um recorte dos dados para melhor análise da anomalia magnética encontrada ao centro.**

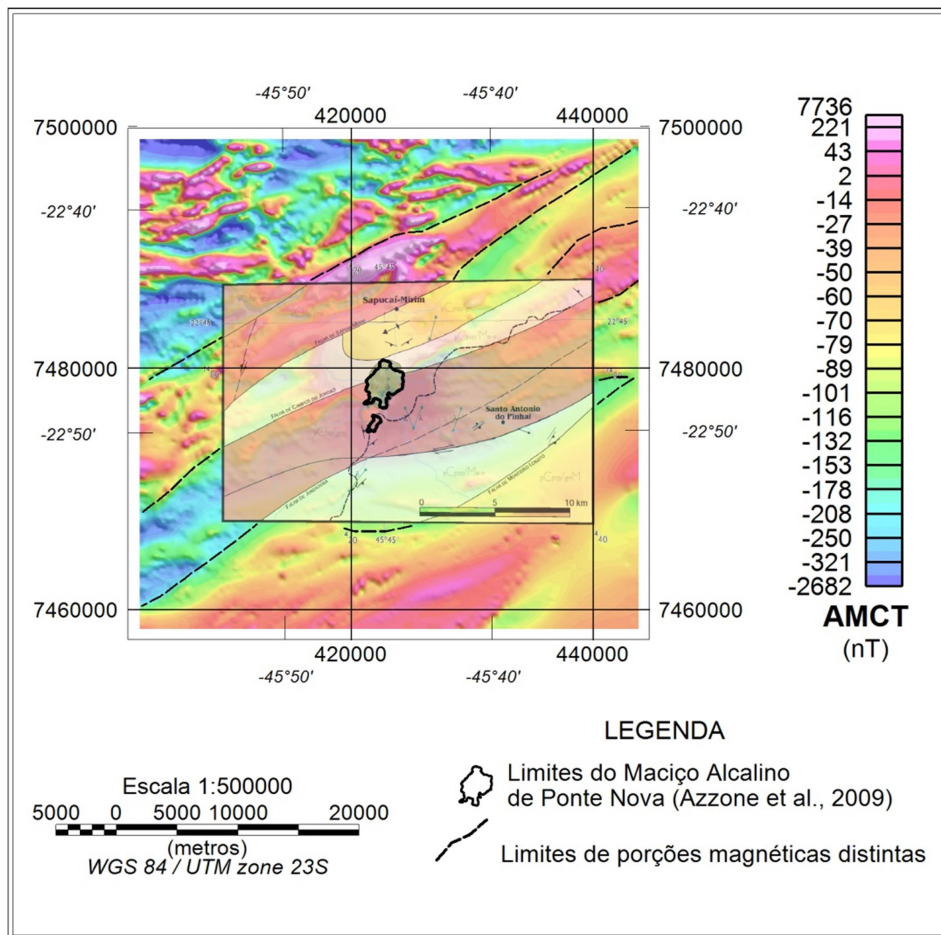
A imagem de anomalia magnética de campo total (Figura 3.1.1) evidencia duas regiões com comportamento magnético diferente. A porção sudeste apresenta altos magnéticos de grandes extensões, alongados na direção NE-SW, que aumentam suas dimensões à medida que se aproximam da Bacia de Taubaté, no extremo sudeste do mapa, provavelmente indicando a existência de estruturas magnéticas profundas sob os

sedimentos da região. Na porção noroeste, adentrando a Serra da Mantiqueira, anomalias de dimensões menores se estendem ligadas na forma de cadeias, muitas vezes concordantes com altos topográficos da região.

De acordo com o mapa geológico da região de Santo Antônio do Pinhal de Cavalcante et al. (1979), indicado na Figura 3.1.2, a região possui falhas de orientação NE-SW entre as associações Paraíba do Sul (Complexo Piquete) com as associações Barbacena (Complexo Paraisópolis). A Figura 3.1.3 trata-se de uma sobreposição do mapa geológico de Cavalcante et al. (1979) sobre o mapa de anomalia magnética de campo total. Percebe-se que as falhas de Monteiro Lobato, Jundiuvira e Sapucaí-Mirim coincidem com os limites de regiões de comportamento magnético distintos, inferidos pelas linhas tracejadas em preto.



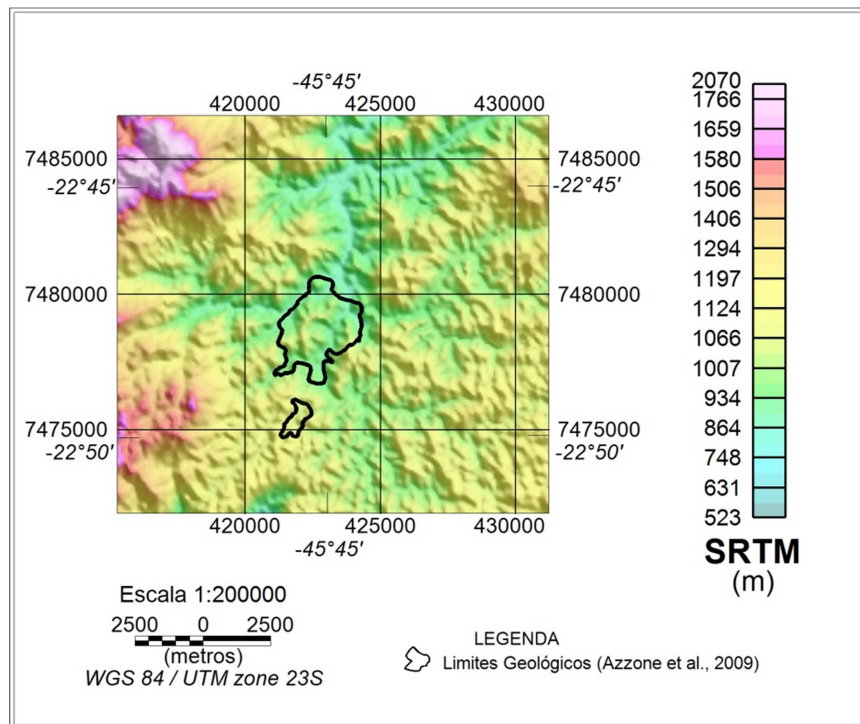
**FIGURA 3.1.2: Mapa Geológico da região de Santo Antônio do Pinhal, retirado de Cavalcante et al. (1979).**



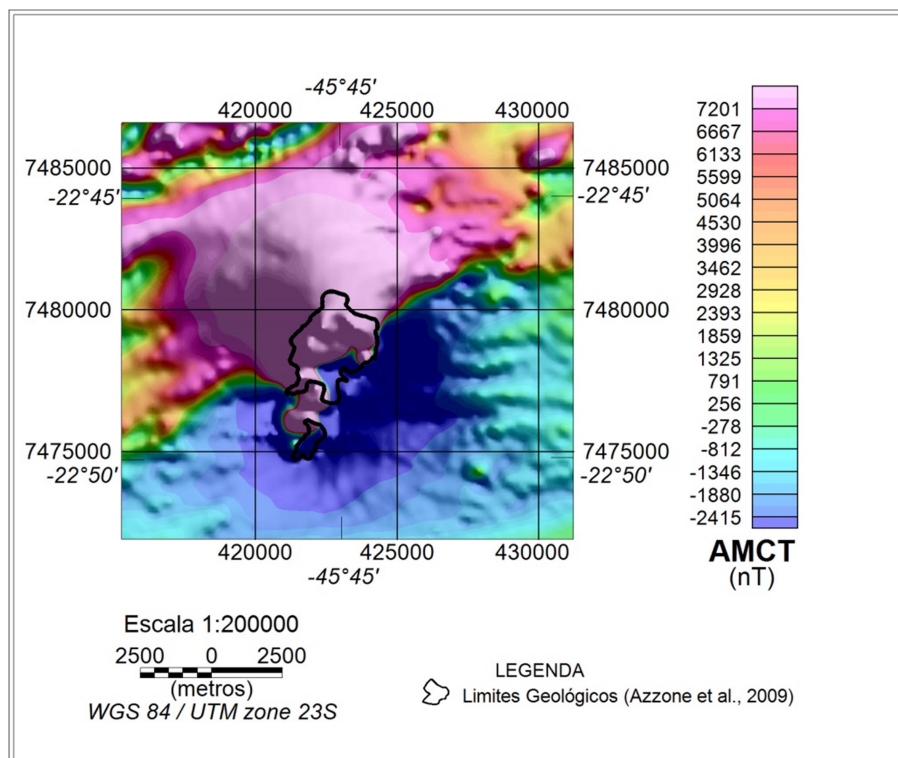
**FIGURA 3.1.3: Sobreposição do mapa geológico de Cavalcanti et al. (1979) para a região de Santo Antônio do Pinhal com o mapa de anomalia magnética de campo total. As extensões das estruturas geológicas de falhas são inferidas por linhas tracejadas.**

No centro da imagem de anomalia magnética de campo total nota-se a presença de uma grande anomalia magnética circular, diferente das anomalias citadas nas porções noroeste e sudeste, com o caráter de um dipolo magnético de orientação normal. Foi feito um recorte (Janela Central) para melhor análise da anomalia, indicado como um quadrado vermelho na Figura 3.1.1 e explicitado na Figura 3.1.4 e Figura 3.1.5, respectivamente para as imagens do modelo de relevo digital (SRTM) e anomalia magnética de campo total. Os processamentos subsequentes foram feitos sobre o recorte denominado Janela Central. De acordo com as imagens das Figuras 3.1.3 e 3.1.5, nota-se a presença de uma anomalia magnética concordante com uma intrusão magmática e seu afloramento.



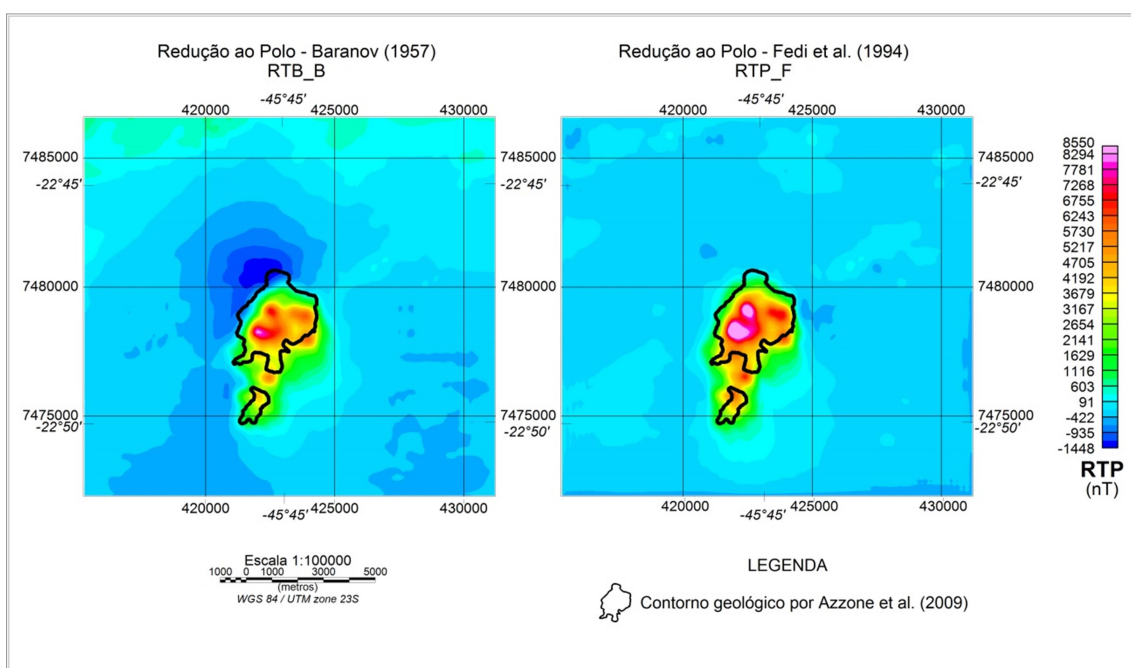


**FIGURA 3.1.4: Recorte da Janela Central da imagem do modelo de relevo digital (SRTM) sob os limites geológicos de Azzone et al. (2009).**



**FIGURA 3.1.5: Recorte da Janela Central da imagem da anomalia magnética de campo total sob os limites geológicos de Azzone et al. (2009).**

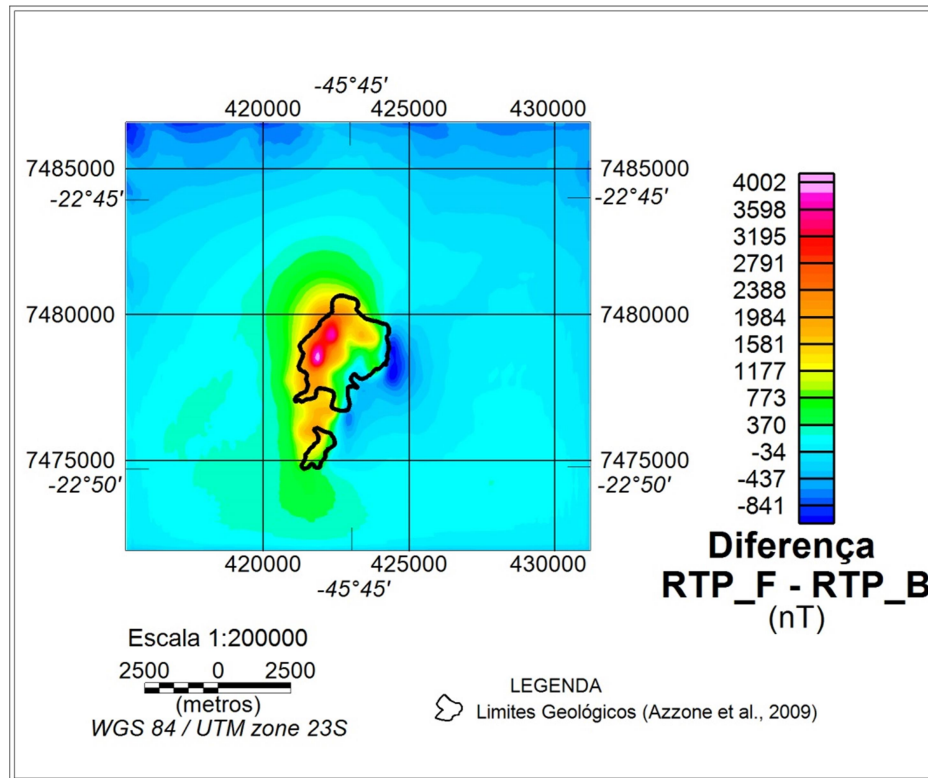
Para localizar as fontes magnéticas, foi aplicada a RTP desenvolvida por Baranov (1957), utilizada na rotina do software *Geosoft Oasis Montaj*, e a RTP de Fedi et al. (1994), cujo algoritmo foi desenvolvido por Cordani e Shukowsky (2009) no software *Mathworks Matlab*, resultando na Figura 3.1.6, respectivamente denominadas RTP\_B e RTP\_F. Nota-se maior centricidade do sinal magnético sobre o contorno geológico determinado por Azzone et al. (2009), evidenciado na Figura 3.1.6, na RTP\_F, e um sinal ligeiramente deslocado à sudeste na RTP\_B, provavelmente indicando a presença de magnetização remanescente a ser considerada na fonte da anomalia.



**FIGURA 3.1.6: Imagem da RTP pelo método de Baranov (1957) e pelo método de Fedi et al. (1994) com sobreposição dos contornos geológicos de Azzone et al. (2009).**

Percebe-se pela comparação (e diferença) das imagens de RTP\_B e RTP\_F (Figura 3.1.6 e 3.1.7) a presença de uma magnetização remanescente influente, que foi considerada nas etapas de modelagem. Na Figura 3.1.7 é apresentada a diferença de magnetização obtida entre os dois métodos de RTP, obtida pela RTP\_B subtraída da RTP\_F.

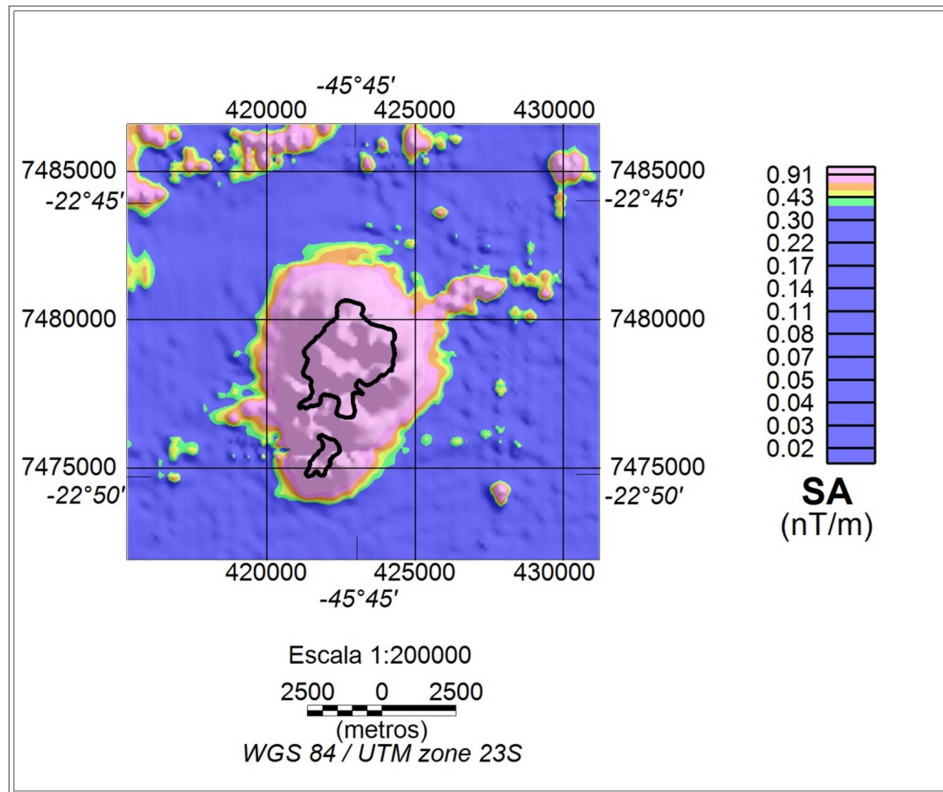




**FIGURA 3.1.7: Diferença do sinal magnético da RTP\_B subtraída da RTP\_F.**

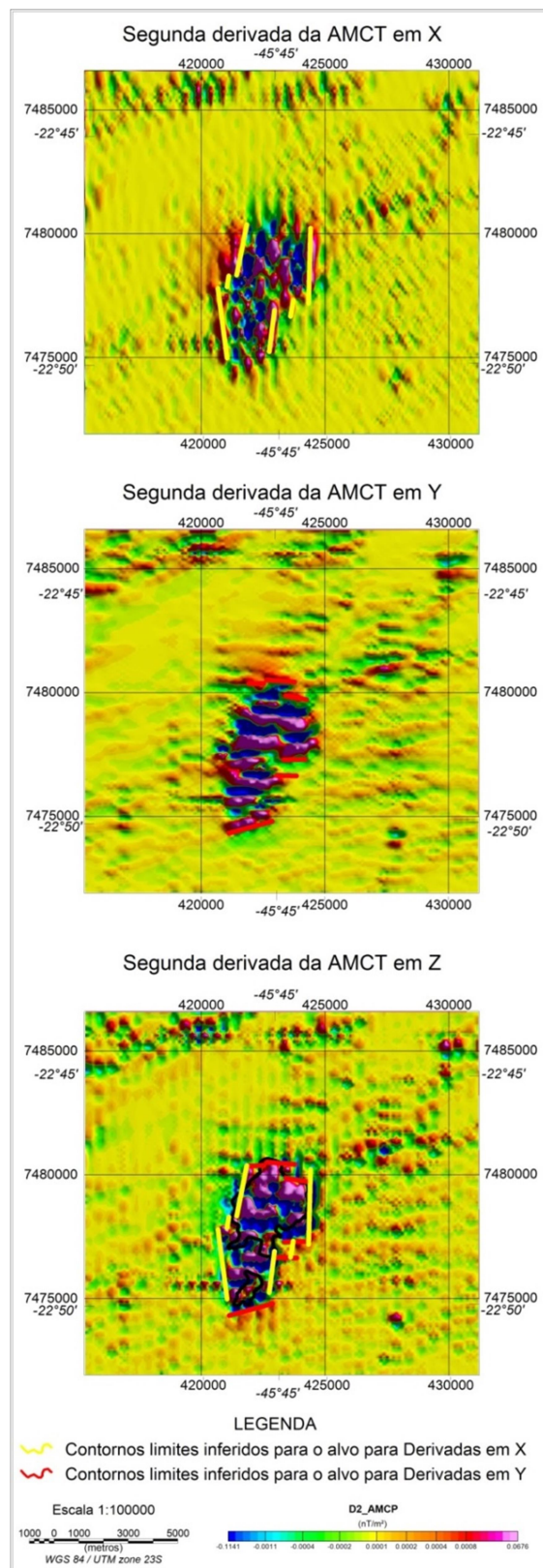
Nota-se, na Figura 3.1.7, que a RTP\_F define maiores amplitudes do sinal magnético sobre o contorno geológico quando comparada à RTP\_B, evidenciadas pelos valores de cores quentes na imagem. A região de sinal negativo (cores frias) ressalta como a RTP\_B deslocou o sinal para Sudeste do contorno geológico.

A amplitude do sinal analítico da anomalia de campo total está representada na Figura 3.1.8. Esta demonstra uma anomalia com caráter mais arredondado, característico de intrusões, de área consideravelmente maior que as obtidas por ambos os métodos de RTP e notavelmente maior que o mesmo contorno geológico. Tal fato pode indicar que a observação em superfície reflete apenas uma fração do corpo e que, em subsuperfície, suas extensões laterais superam os limites geológicos do afloramento.



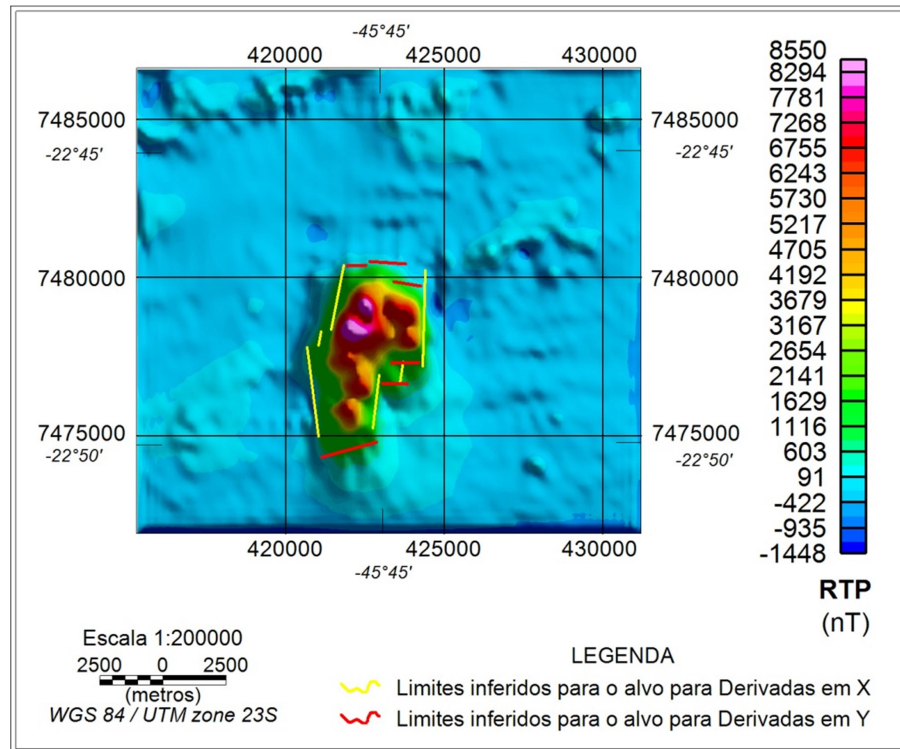
**FIGURA 3.1.8: Imagem da amplitude sinal analítico da anomalia magnética de campo total com sobreposição dos contornos geológicos de Azzone et al. (2009).**

Foram gerados mapas de derivadas de segunda ordem da AMCP para estimar os limites laterais do corpo em subsuperfície (Sharma, 1997). O resultado das derivadas de segunda ordem da AMCP nas três direções ortogonais é mostrado na Figura 3.1.9.



**FIGURA 3.1.9: Análise das derivadas direcionais da Anomalia Magnética de Campo Total nas direções X, Y e Z, respectivamente. Foram destacados contornos para cada direção (amarelo para X, vermelho para Y) sobre a região da Janela Central.**

Com a definição dos limites laterais pela análise do gradiente horizontal em X e Y (Figura 3.1.9) puderam-se inferir os limites do modelo direto, explicitado na Figura 3.1.10. Percebe-se a compatibilidade dos limites com o RTP\_F.



**FIGURA 3.1.10: Imagem dos limites obtidos pelas derivadas direcionais sobrepondo o RTP\_F.**

### 3.2 Medições das propriedades magnéticas das amostras

As 14 amostras foram retiradas dos afloramentos do maciço. De acordo com Azzone et al. (2009), rochas cumuláticas melanocráticas e ultramáficas são predominantes no maciço. Nota-se, também, uma tendência geral das rochas se mostrarem mais félsicas com a elevação da topografia.

As amostras são provenientes de diversas fácies. As rochas mais abundantes do maciço são cumulos melagábricos, representados pela sigla MLGc. Suas ocorrências são atribuídas às regiões centrais do maciço. Melamonzonitos, melamonzogabros, monzogabros e monzonitos são litotipos característicos das demais fácies.

Após o preparo das amostras, foram feitas em laboratório as medições da susceptibilidade magnética e magnetização remanescente. Para se ter um valor

representativo de cada amostra, calculou-se a média e o desvio padrão para cada grandeza, obtendo-se, assim, a relação indicada na Tabela 3.2.1. Nesta tabela foram acrescentados os valores de densidade média obtidos por Cotis (2015) e utilizados em seu modelo gravimétrico (Cotis et al., 2015). Os valores de densidade média mostram-se apropriados para complexos alcalinos, mais densos que um embasamento cuja densidade se aproxima de  $2,66 \text{ g/cm}^3$ , valor equivalente ao valor teórico usado na correção Bouguer em estudos gravimétricos. Valores de densidade média semelhantes também foram obtidos em outros estudos de complexos alcalinos brasileiros (Rugenski, 2001; Ribeiro, 2011)

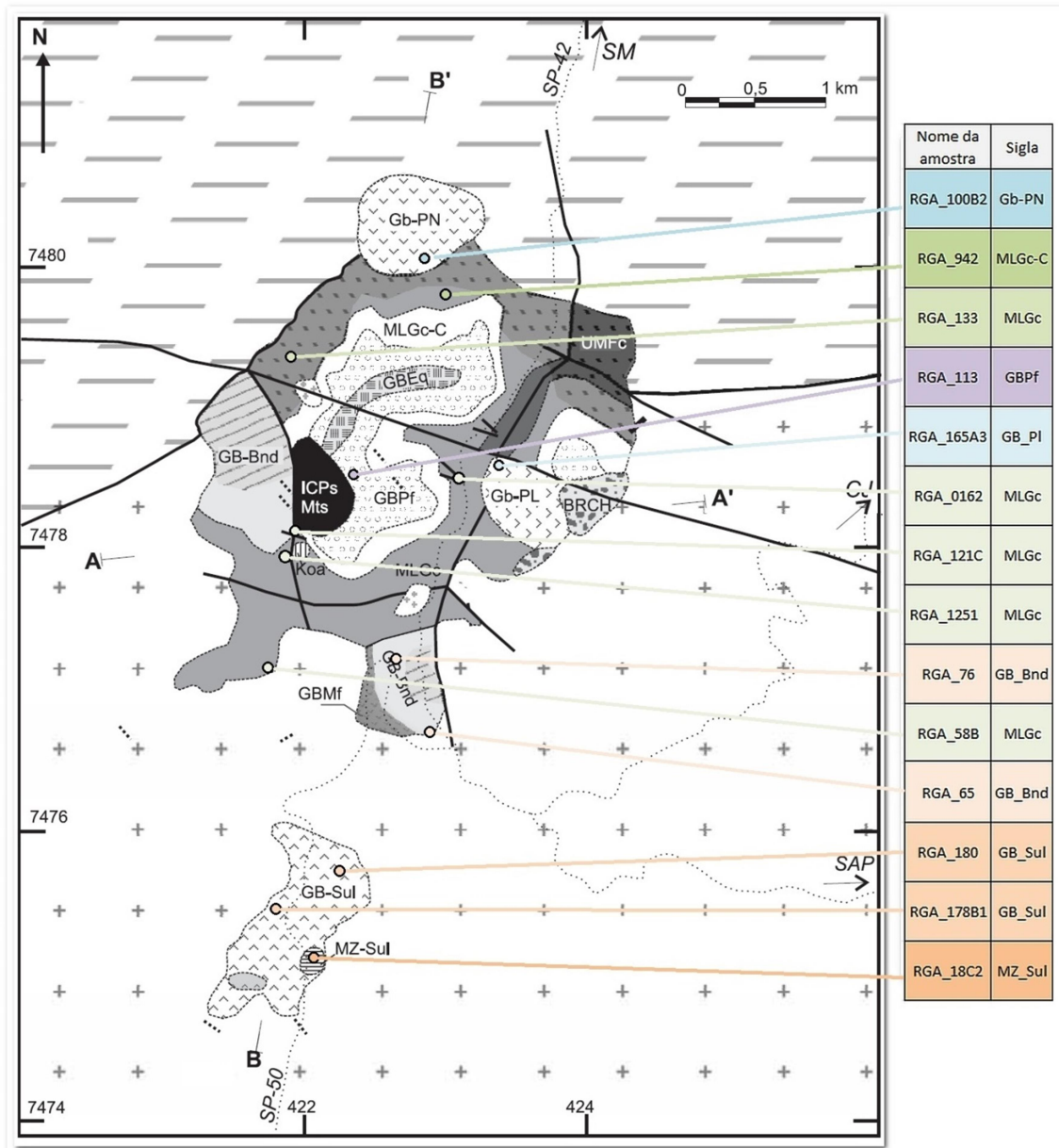
**TABELA 3.2.1 Valores médios e desvio padrão das medições de magnetização remanente natural (NRM) e susceptibilidade magnética (K) das 14 amostras do Maciço Ponta Nova obtidas em laboratório, e os valores de densidade média (DensMéd) e respectivo desvio padrão obtidos por Cotis (2015). As cores indicam fácies petrográficas semelhantes para melhor visualização.**

Nome da amostra	Fácies petrográficas	Sigla	NRM méd[A/M]	NRM Desv. Pad.	K [SI]	K Desv. Pad.	DensMéd [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidade Desv.Pad.
RGA_113	Monzogabros com nefelina porfíricos	GBPf	261,28	137,58	0,0101	0,0002	3,10	0,019
RGA_65	Melamonzonitos com nefelina a melamonzogabros com nefelina	GB_Bnd	12,11	1,38	0,0367	0,0168	3,21	0,016
RGA_76	Melamonzonitos com nefelina a melamonzogabros com nefelina	GB_Bnd	15,25	2,01	0,0080	0,0000	3,28	0,004
RGA_180	Melamonzonitos com nefelina	GB_Sul	68,72	8,45	0,0093	0,0093	3,05	0,039
RGA_178B1	Melamonzonitos com nefelina	GB_Sul	8,25	0,00	0,0059	0,0000	2,94	0,009
RGA_18C2	Monzonitos com nefelina	MZ_Sul	0,77	0,10	0,0236	0,0000	2,84	0,015
RGA_165A3	Nefelina monzodioritos	GB_Pl	9,15	1,41	0,0110	0,0000	3,05	0,007
RGA_100B2	Olivina melamonzodioritos	Gb-PN	6,02	0,02	0,0055	0,0000	3,15	0,011
RGA_0162	Cumulatos melagábricos	MLGc	3,03	0,01	0,0105	0,0003	3,31	0,014
RGA_121C	Cumulatos melagábricos	MLGc	8,83	2,93	0,0306	0,0035	3,42	0,02
RGA_1251	Cumulatos melagábricos	MLGc	7,33	1,02	0,0118	0,0028	3,20	0,011
RGA_58B	Cumulatos melagábricos	MLGc	3,61	0,00	0,0034	0,0000	3,22	0,009
RGA_133	Cumulatos melagábricos com maior concentração de fases máficas hidratadas	MLGc	3,53	0,16	0,0432	0,0216	3,25	0,011
RGA_942	Cumulatos melagábricos cimentados	MLGc-C	4,83	0,19	0,0079	0,0001	3,12	0,012
TODAS AS AMOSTRAS			31,37	71,25	0,0161	0,0127	3,16	0,15

As amostras apresentam valores de susceptibilidade magnética ( $k$ ) que variam de 0,0034 SI, valor mais baixo, e 0,0432 SI, valor mais alto, ambos em cumulatos melagábricos, das amostras RGA\_58B e RGA\_133. Tais valores estão de acordo com valores de susceptibilidade indicados em estudos para rochas alcalinas (Telford et al., 1990; Dutra et al., 2014). A média de todos os valores de  $k$  amostrados resultou em 0,0161 SI com desvio padrão de 0,0127 SI.



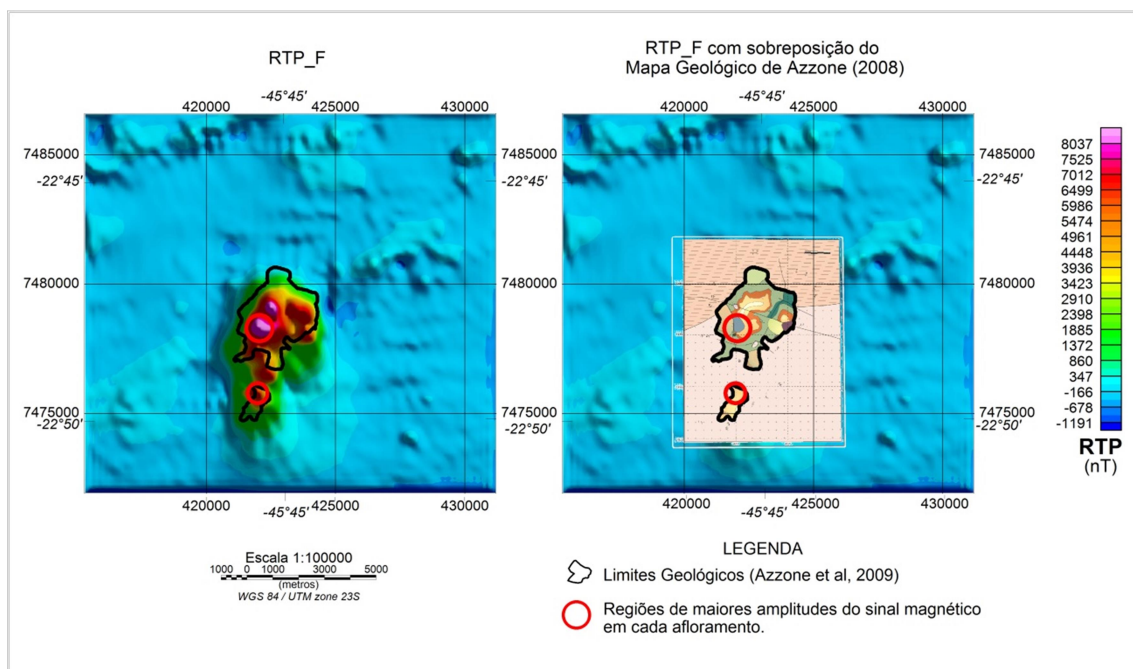
Com relação aos resultados obtidos para NRM, o valor mínimo de 0,77 A/m é atribuído à amostra RGA\_18C2 (monzonito com nefelina), enquanto que o valor máximo, 340 vezes maior, é de 261 A/m, atribuído à amostra RGA\_113 (monzogabros com nefelina porfiríticos). A média de todos os valores de NRM amostrados resultou em 31,37 A/m, com desvio padrão de 71,25 A/m. Tal variação indica uma grande heterogeneidade na magnetização remanente entre as fácies.



**FIGURA 3.2.1:** Localização aproximada da coleta das 14 amostras, indicada pelos pontos de cores respectivas às fácies apresentadas na Tabela 3.2.1, sobre o mapa geológico de Azzone et al. (2009).

Nota-se que os valores mais altos de NRM foram obtidos na amostra RGA\_113 que, como indicado na Figura 3.2.1, trata-se de uma amostra retirada da região próxima às fácies de ilmenita clinopiroxenitos sulfetados e magnetititos (ICPs e Mts). O alto valor da NRM possivelmente está associado ao alto grau de magnetização que tais rochas possuem. Da mesma forma, a amostra RGA\_121C, que apresenta o maior valor de  $k$ , também está próxima à formação de magnetititos.

A região atribuída à formação de magnetititos e próxima das amostras com maior  $k$  e NRM também coincide com os maiores valores do sinal magnético obtido em ambos os RTP. A Figura 3.2.2 evidencia que os valores de maior amplitude do sinal magnético do RTP\_F, destacados pelo círculo vermelho no afloramento Norte, sobrepõem-se à região dos magnetititos e das amostras RGA\_113 e RGA\_121C, reforçando a correlação de altas amplitudes magnéticas com o litotipo e os valores medidos nas amostras.



**FIGURA 3.2.2: Correlação dos maiores valores do sinal magnético no RTP\_F com regiões cujas amostras apresentaram os maiores valores de magnetização remanente natural (NRM). No afloramento Norte, a região destacada pelo círculo vermelho é atribuída aos magnetititos. No afloramento Sul, a região destacada pelo círculo em vermelho é atribuída aos melamonzonitos com nefelina.**

Com relação ao afloramento Sul, a região com os maiores valores do sinal magnético obtido em ambos os RTP, destacada pelo círculo vermelho no afloramento Sul, coincide com a região da amostra de melamonzonitos com nefelina, RGA\_180 (Figura 3.2.2), cuja magnetização remanescente média é o segundo maior valor obtido dentre todas as amostras.

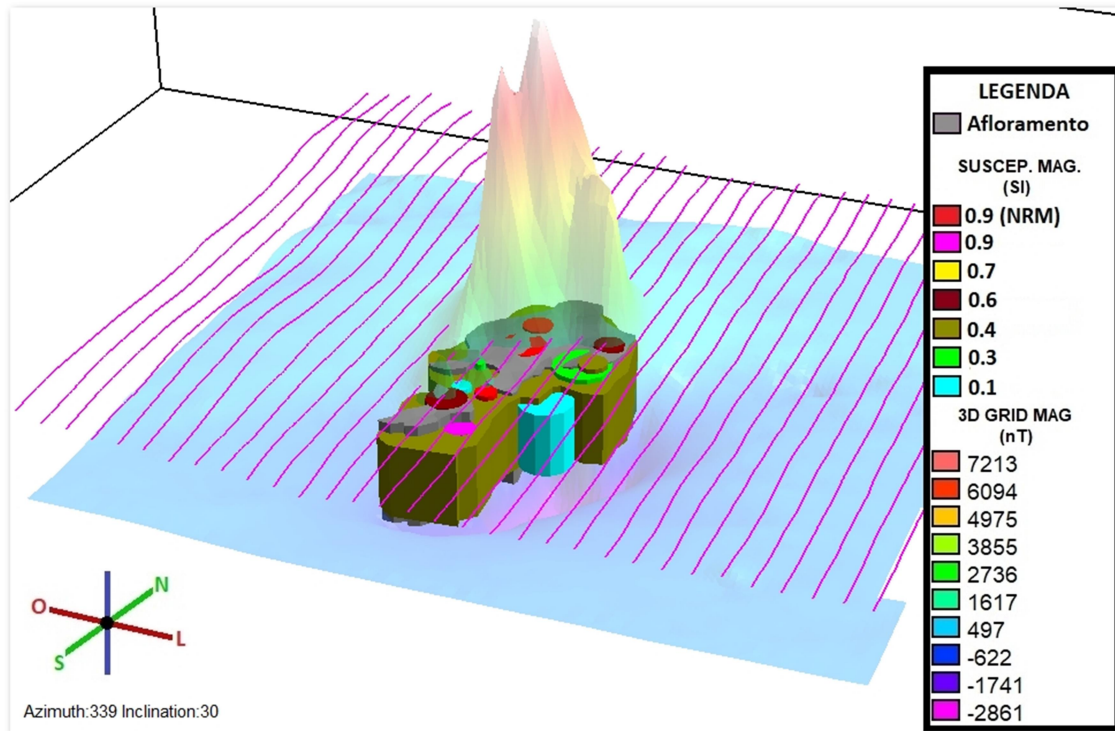
Ao se desconsiderar os valores de maior disparidade, obtidos nas amostras RGA\_113, RGA\_180 e RGA\_18C2, a média de NRM passa a ter o valor de 6,42 A/m, com desvio padrão de 3,83 A/m. Já o valor de susceptibilidade magnética média obtido, eliminando as três amostras, é de 0,0159 SI, com desvio padrão de 0,0140 SI.

### 3.3 Modelagem Direta

O modelo obtido a partir dos processamentos considerou a diferenciação de fácies petrográficas com distintas características físicas e, portanto, regiões com susceptibilidades magnéticas e NRM diferentes dentro do maciço. Devido à separação dos afloramentos, foram trabalhadas duas hipóteses sobre a configuração do maciço em subsuperfície: um corpo único que aflora em duas regiões (Modelo 1) ou dois corpos desconectados em subsuperfície (Modelo 2).

O primeiro modelo 3D (Modelo 1), indicado na Figura 3.3.1, considera os dois afloramentos do maciço pertencentes a um corpo único com susceptibilidade magnética mais representativa de 0,4 SI (marrom). Em alguns pontos, para melhor ajuste do modelo e representando fácies com diferente magnetização, foram consideradas susceptibilidades magnéticas variando de valores mais baixos, menores que 0,1 SI (ciano), até valores de 0,9 SI, em vermelho. A estas regiões, e somente nelas, foi atribuída uma componente de magnetização remanescente.

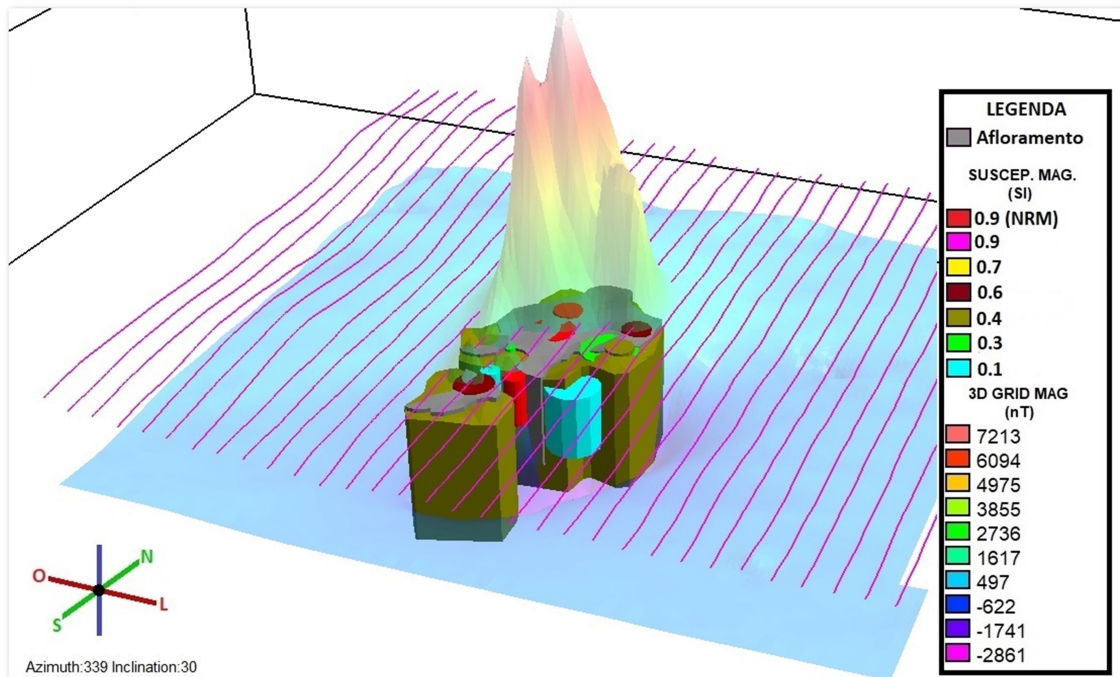




**FIGURA 3.3.1: Modelo 3D de corpo único sob imagem da anomalia magnética de campo total. Algumas regiões internas ao maciço foram diferenciadas por sua susceptibilidade magnética e NRM.**

O volume aproximado do Modelo 1 é da ordem de  $22 \text{ km}^3$ , com profundidade mínima da base de aproximadamente 3 km. Foram caracterizadas 15 fácies distintas.

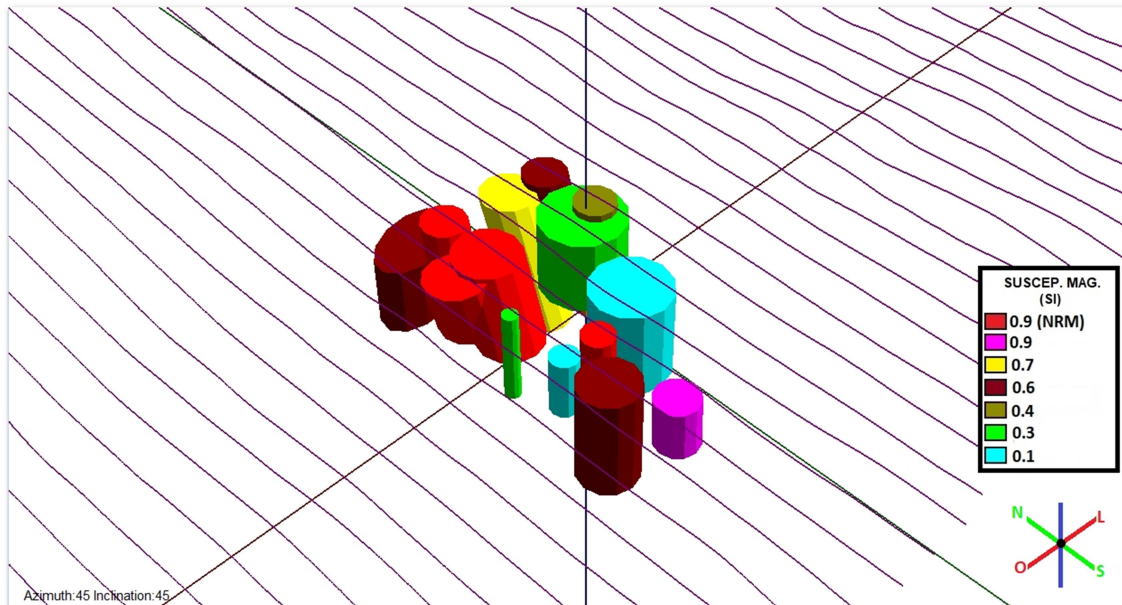
O segundo modelo 3D (Modelo 2), indicado na Figura 3.3.2, considera uma configuração de dois corpos separados em subsuperfície. Ambos teriam susceptibilidade magnética mais representativa de 0,4 SI (marrom). Da mesma forma como no Modelo 1, algumas regiões possuíram valores de susceptibilidade magnética diferentes, representando fácies com diferente magnetização. Os valores estão igualmente representados pelas cores do Modelo 1. Para valores de susceptibilidade magnética menores que 0,1 SI foi atribuída a cor ciano, e valores de 0,9 SI, a cor vermelha. Novamente, apenas nas regiões em vermelho foi considerada uma componente de magnetização remanescente.



**FIGURA 3.3.2: Modelo em 3D de dois corpos sob imagem da anomalia magnética de campo total. Algumas regiões internas ao maciço foram diferenciadas por sua susceptibilidade magnética e NRM.**

Os volumes aproximados dos corpos do Modelo 2 são da ordem de 25 km<sup>3</sup> para o corpo situado ao norte e de 6 km<sup>3</sup> para o corpo situado ao sul, ambos com profundidade mínima da base de aproximadamente 3 km. Neste modelo, foram caracterizadas 16 fácies distintas.

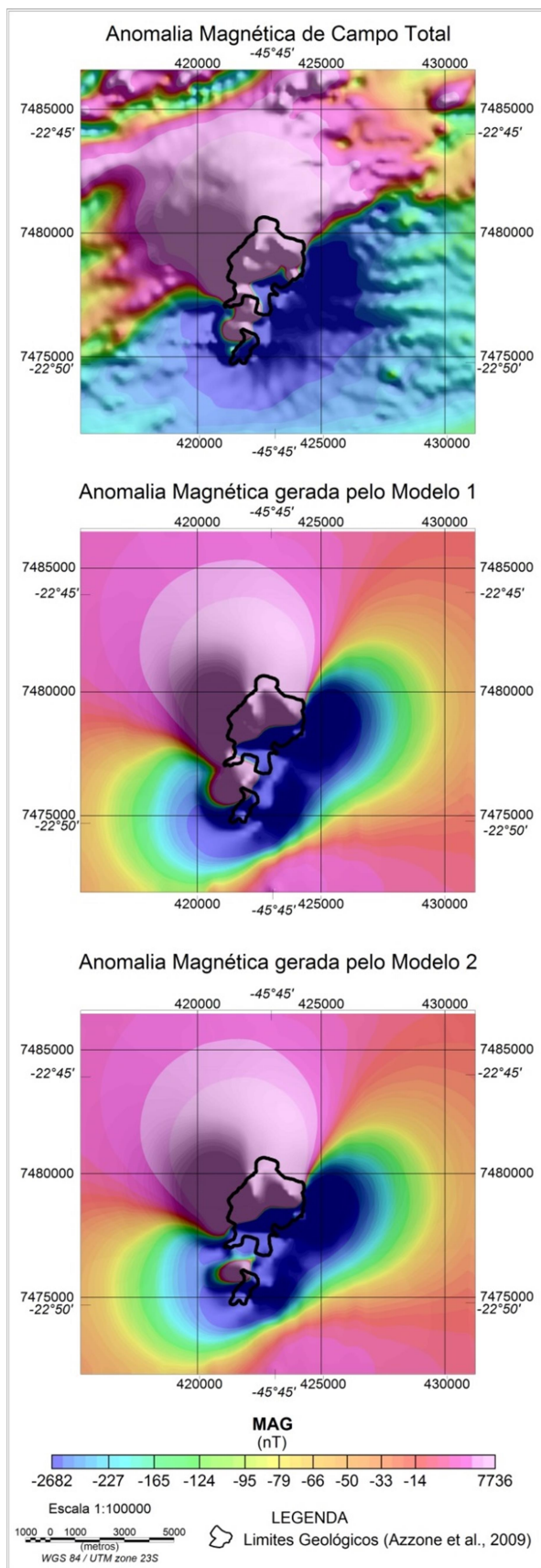
As fácies internas dos corpos de ambos os modelos podem ser visualizadas na Figura 3.3.3. Suas posições e dimensões foram determinadas de acordo com um melhor ajuste da curva de magnetização sintética ao sinal observado e, paralelamente, às posições das distintas fácies petrográficas citadas por Azzone et al. (2009). As fácies de coloração vermelha, únicas com componente de magnetização remanescente, estão distribuídas em regiões próximas às amostras que apresentaram valores altos de NRM medidas em laboratório.



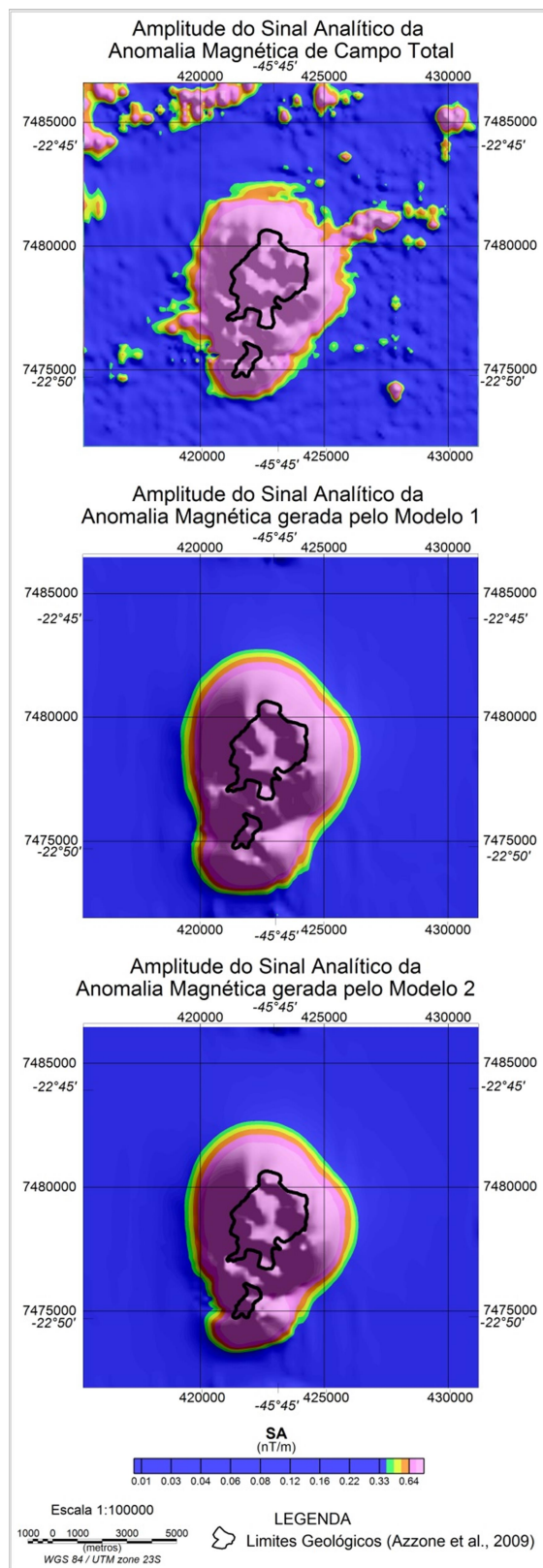
**FIGURA 3.3.3: Detalhe da fácies internas dos corpos modelados nos Modelos 1 e 2. As cores indicam diferentes características magnéticas atribuídas às fácies.**

Tanto no modelo de corpo único quanto no modelo de dois corpos, as respostas do sinal sintético mostram-se próximas das medidas no aerolevantamento. A Figura 3.3.4 mostra na sequência, sob o contorno do modelo geológico, o sinal magnético da AMCT, o sinal sintético gerado pelo Modelo 1 e o sinal sintético gerado pelo Modelo 2. Nesta figura, as imagens do sinal sintético de ambos os modelos diferem apenas por uma descontinuidade do alto magnético na região sudoeste do corpo Norte do Modelo 2. Tal descontinuidade é resultado da interferência do sinal magnético do corpo Sul, dada a proximidade de suas fontes, da ordem de 500 metros.

A proximidade das fontes magnéticas também fica evidente na comparação da amplitude do sinal analítico dos sinais sintéticos, como indicado na Figura 3.3.5. Ambas as amplitudes do sinal analítico apresentaram extensões em área semelhantes à amplitude do sinal analítico da anomalia de campo total, reforçando a hipótese de que os limites laterais do corpo em subsuperfície superam os contornos do afloramento.



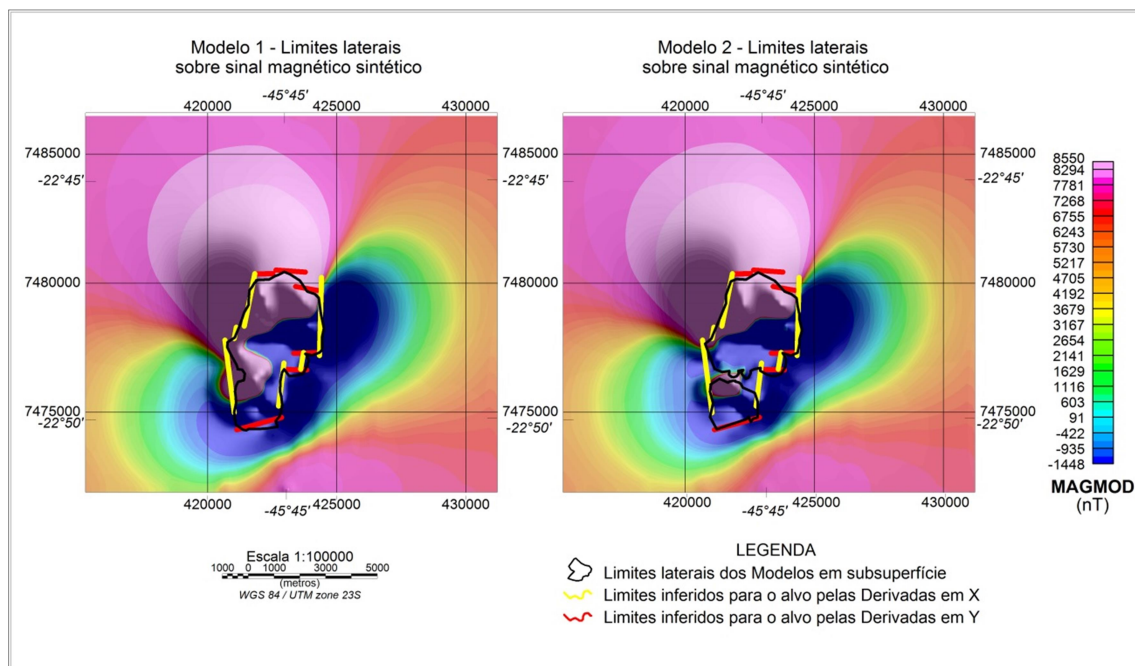
**FIGURA 3.3.4: Mapas da anomalia magnética de corpo total (acima) e as anomalias sintéticas geradas pelos Modelos 1 (centro) e 2 (abaixo).**



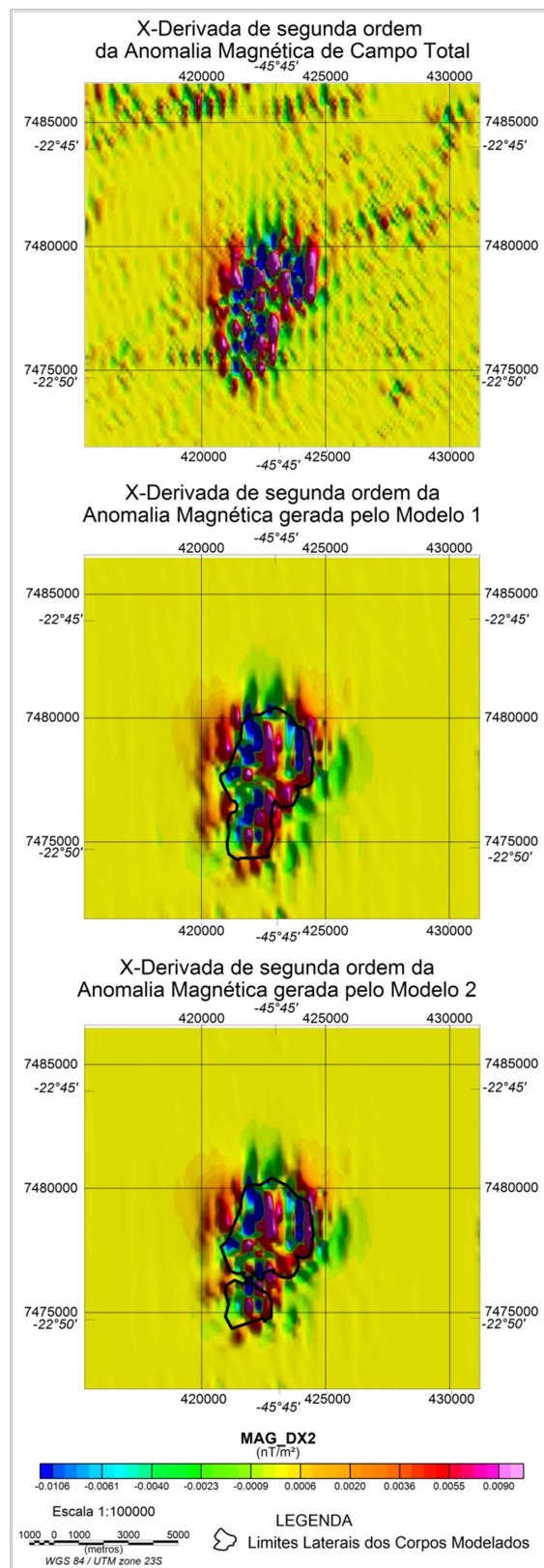
**FIGURA 3.3.5: Mapas da amplitude do sinal analítico da anomalia magnéticas de corpo total (acima) e das amplitudes do sinal analítico das anomalias sintéticas geradas pelos Modelos 1 (centro) e 2 (abaixo).**



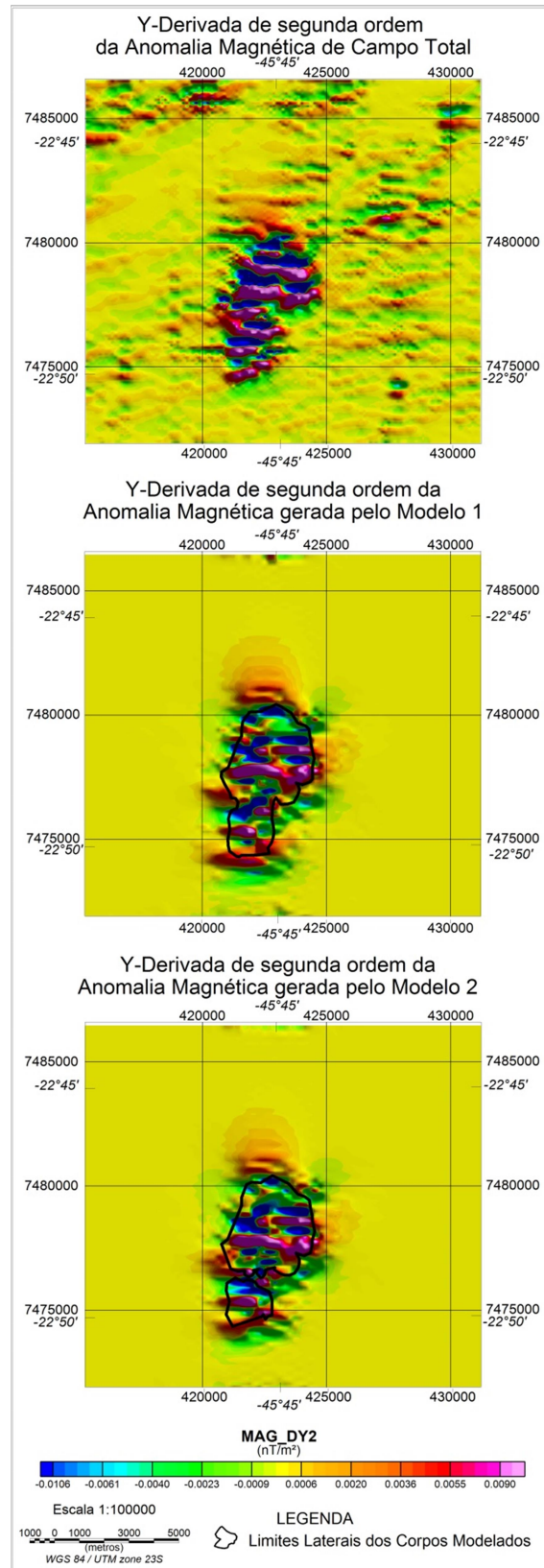
No processo de modelagem para ambas as hipóteses foi respeitado o limite de afloramento do maciço. Em subsuperfície, tais limites são claramente excedidos (Figuras 3.3.1 e 3.3.2) devido à magnitude e extensão em área do sinal magnético obtido pelo aerolevantamento. Assume-se, portanto, um volume de maiores extensões laterais abaixo do plano aflorante. Tais limites laterais, quando comparados aos limites inferidos pelas derivadas direcionais da AMCP (Figura 3.1.9), possuem boa correlação, tanto para o Modelo 1 quanto para o Modelo 2, como evidenciado na Figura 3.3.6. Ainda assim, considerando a hipótese de dois corpos separados em subperfície, não é possível determinar, pelas derivadas direcionais da AMCP, os limites que os separam, devido à proximidade de ambos e à interferência magnética que uma fonte causaria na outra. As Figuras 3.3.7 e 3.3.8 comparam as derivadas de segunda ordem dos sinais sintéticos dos modelos nos eixos X e Y, respectivamente, com as derivadas de segunda ordem da AMCT. Percebe-se uma semelhança entre os sinais, com ligeiras diferenças concentradas principalmente na região entre os afloramentos Norte e Sul.



**FIGURA 3.3.6: Comparação dos limites laterais dos Modelos 1 e 2 sobre sinal magnético sintético gerados respectivamente por eles. Os limites inferidos para o alvo pelas Derivadas da AMCT em X e em Y estão representados em amarelo e vermelho, respectivamente.**



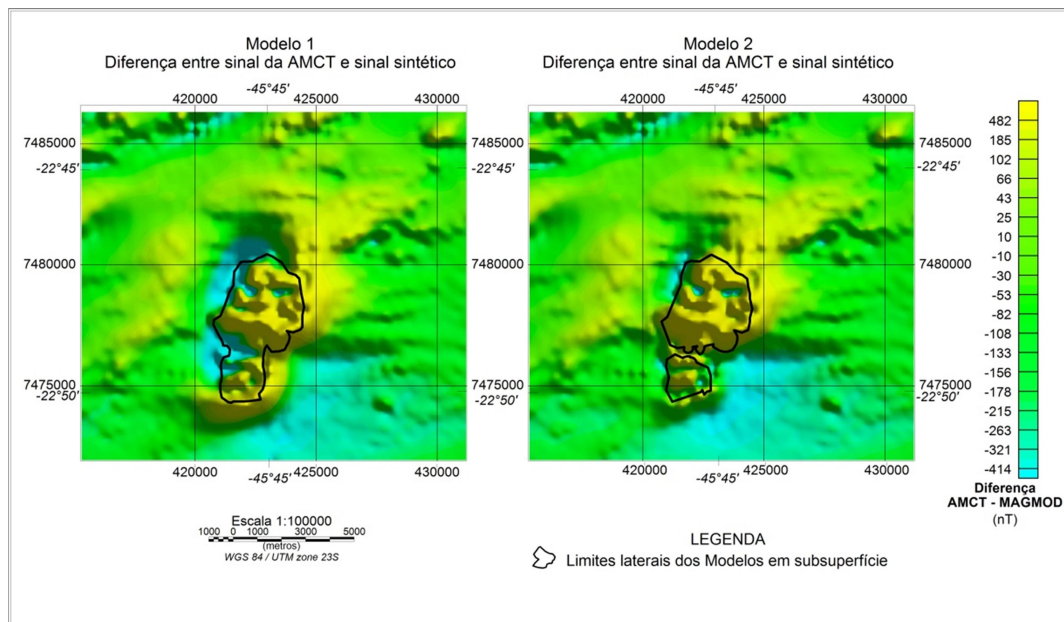
**FIGURA 3.3.7: Comparação das derivadas de segunda ordem em X da anomalia magnética de campo total (acima) e dos sinais magnéticos sintéticos dos Modelos 1 (centro) e 2 (abaixo).**



**FIGURA 3.3.8: Comparação das derivadas de segunda ordem em Y da anomalia magnética de campo total (acima) e dos sinais magnéticos sintéticos dos Modelos 1 (centro) e 2 (abaixo).**

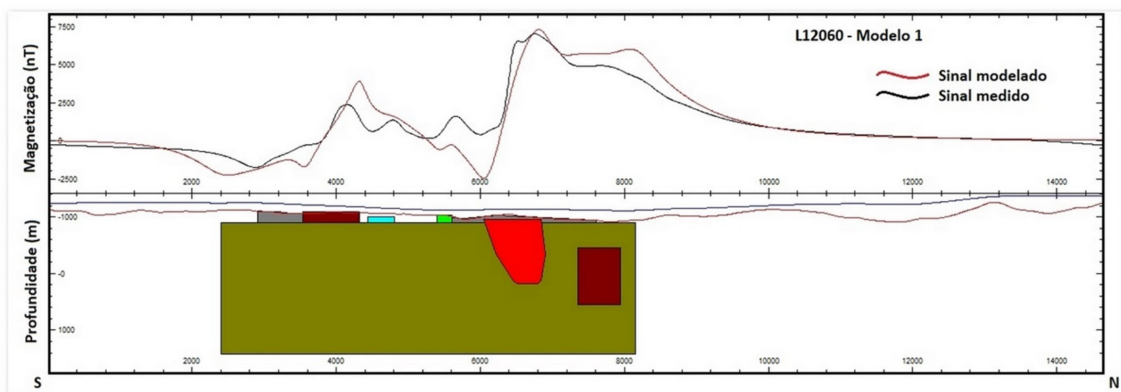


A diferença do sinal magnético gerado pelos modelos com a anomalia magnética de campo total, utilizada como na modelagem direta, pode ser conferida na Figura 3.3.9. A diferença entre os dois *grids* (anomalia magnética de campo total menos a anomalia gerada pelo modelo), indicada na Figura 3.3.9, evidencia que somente em alguns pontos, a maioria deles situados dentro dos limites dos corpos, possuem valores da ordem de centenas de nanoteslas de incompatibilidade, indicando, de maneira geral, uma boa aproximação do sinal do modelo com o sinal obtido ao longo de toda a área da Janela Central. Percebe-se, também, uma maior tendência da diferença ter valores positivos no Modelo 2, significando, portanto, que as amplitudes do sinal sintético deste modelo são menores que o sinal da AMCT.

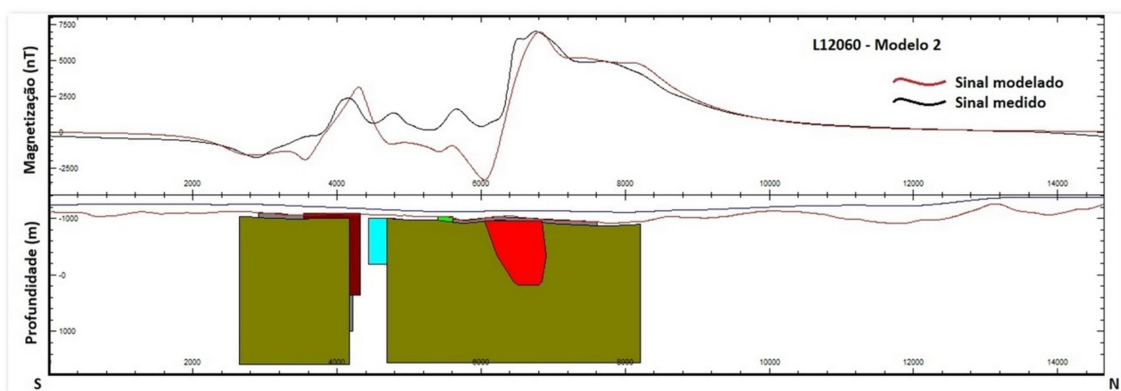


**FIGURA 3.3.9: Diferença entre o sinal da Anomalia Magnética de Campo Total e sinais magnéticos gerados pelos Modelos 1 (esquerda) e 2 (direita).**

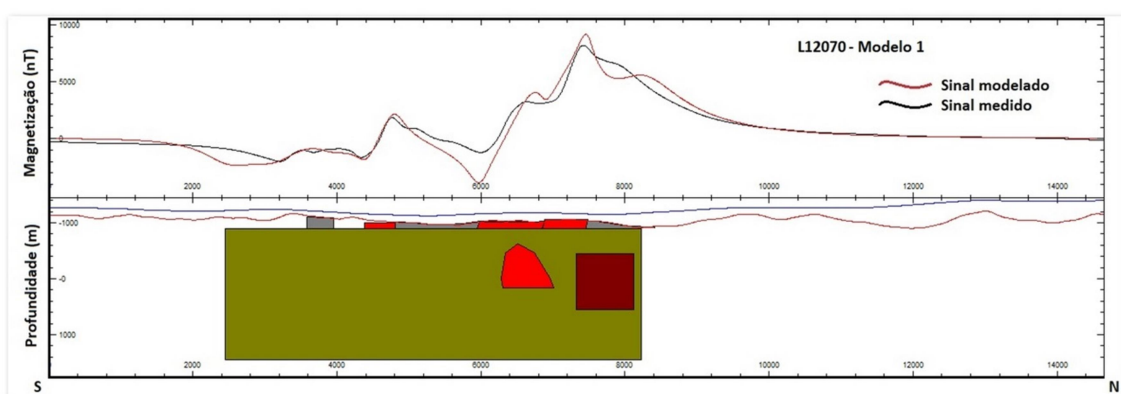
Os perfis magnéticos de maiores amplitudes do sinal magnético são das linhas de vôo L12060 e L12070. As duas linhas também passam por cima dos dois afloramentos e tiveram destaque na modelagem direta de ambos os modelos. A seguir são representados os dois perfis para cada modelo.



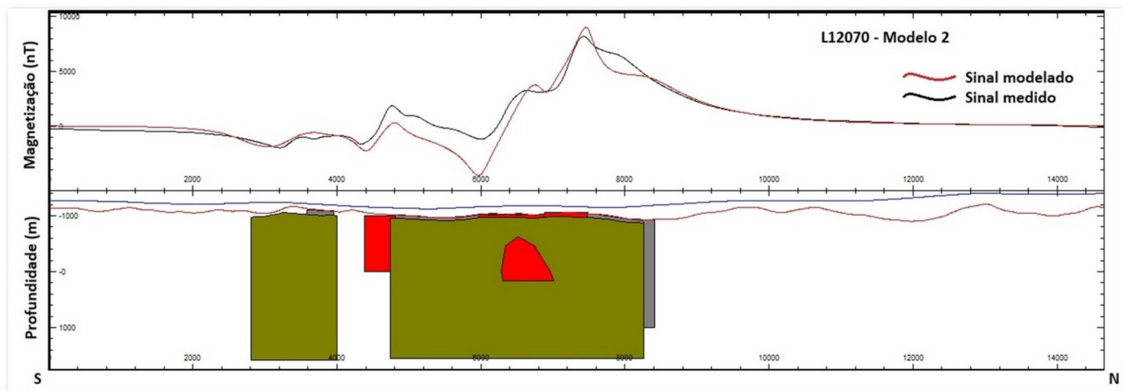
**FIGURA 3.3.10: Perfil magnético da linha de vôo L12060 utilizado para modelagem direta do Modelo 1.**



**FIGURA 3.3.11: Perfil magnético da linha de vôo L12060 utilizado para modelagem direta do Modelo 2.**



**FIGURA 3.3.12: Perfil magnético da linha de vôo L12070 utilizado para modelagem direta do Modelo 1.**



**FIGURA 3.3.13: Perfil magnético da linha de vôo L12070 utilizado para modelagem direta do Modelo 2.**

Os perfis indicam, para ambos os modelos, uma boa aproximação dos sinais magnéticos para as regiões centrais do afloramento Norte, compreendidos entre 6.000 e 8.000 metros do eixo horizontal. Entretanto, a porção de transição para ambos os afloramentos, compreendida entre 4.000 e 6.000 metros do eixo horizontal, os sinais divergem na ordem de 1.000 nT nos dois modelos. Tal dificuldade na modelagem ocorre devido à interferência dos sinais magnéticos de corpos tão próximos.

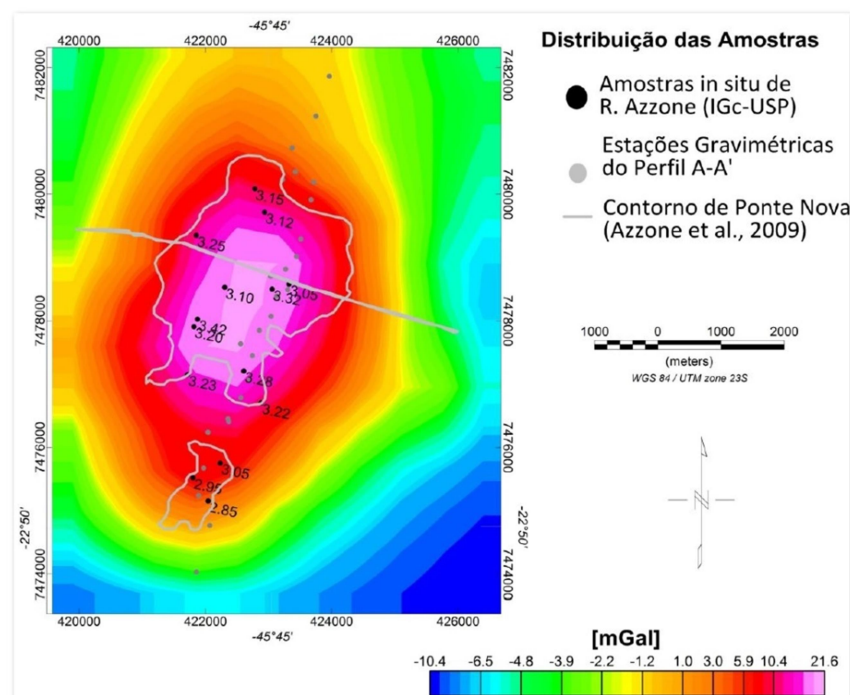
Pela qualidade atingida em ambos os modelos, dados os critérios de modelagem, e analisando seus respectivos sinais magnéticos sintéticos, é impossível tomar qualquer uma das duas hipóteses como definitiva com base na magnetometria. Ambos os sinais magnéticos assemelham-se em área e amplitude ao sinal magnético medido. Uma possível separação dos corpos não é detectável.

## 4. COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS

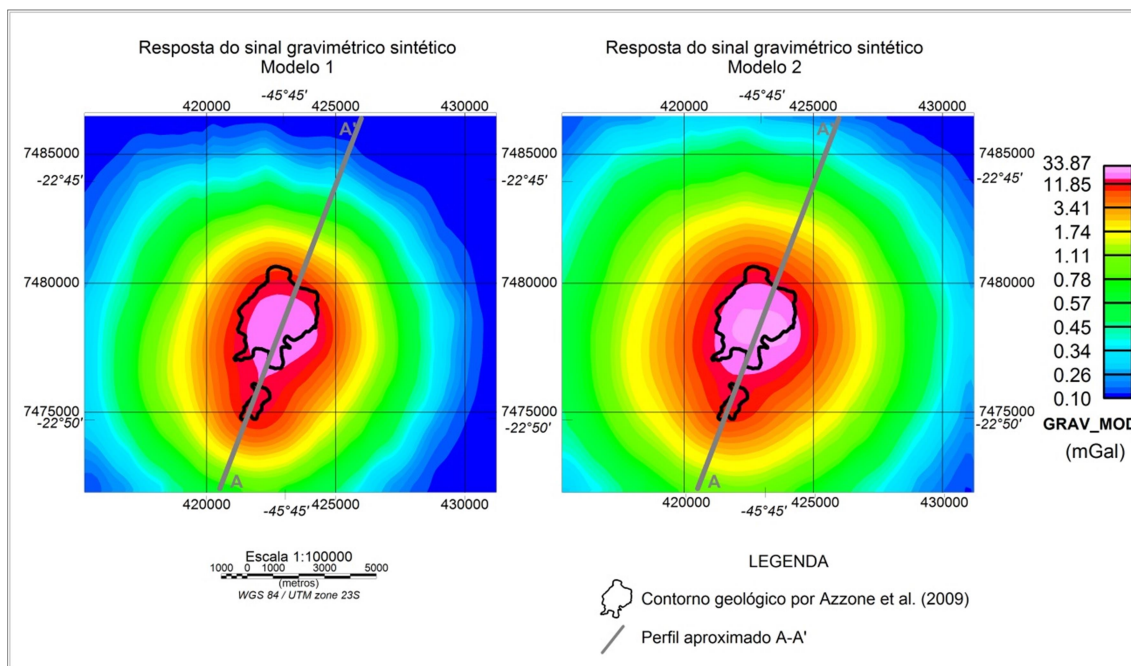
### 4.1 Modelos magnéticos e modelo gravimétrico de Cotis (2015)

Os modelos diretos foram obtidos utilizando os dados aeromagnéticos em duas possibilidades da configuração do maciço em subsuperfície e nenhuma delas pode ser descartada. Cotis (2015) considera também essas duas hipóteses e atribui valores médios de densidades em seus modelos gravimétricos. A Figura 4.1.1, retirada da monografia de Cotis (2015), mostra a distribuição das mesmas amostras utilizadas neste trabalho e suas respectivas densidades sobre o mapa Bouguer residual.

A distribuição irregular e em pequeno número de estações gravimétricas (Figura 1.3.1) impede uma modelagem gravimétrica detalhada comparada ao o que foi feito na modelagem magnetométrica. Assim, optou-se por usar as extensões dos corpos obtidos nos Modelos 1 e 2 deste trabalho como base no modelo gravimétrico direto. As densidades utilizadas foram os valores de densidades médios obtidos por Cotis (2015).



**FIGURA 4.1.1: Distribuição das densidades no maciço Ponte Nova sobre o mapa Bouguer residual (Cotis, 2015)**

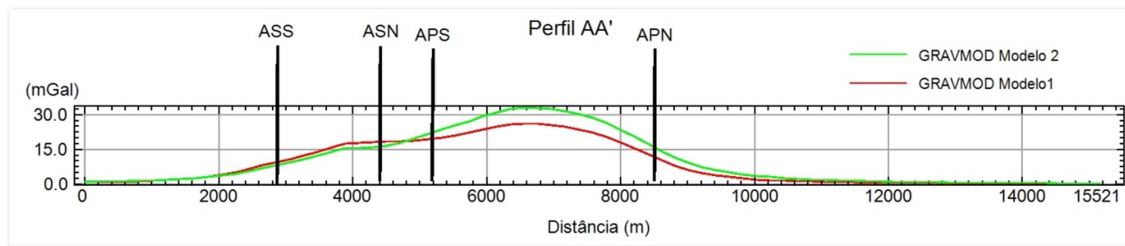


**FIGURA 4.1.2: Respostas do sinal gravimétrico sintético dos Modelos 1 (esquerda) e 2 (direita). A reta em cinza é uma aproximação do perfil AA' utilizado por Cotis (2015) em seu desenvolvimento do modelo gravimétrico.**

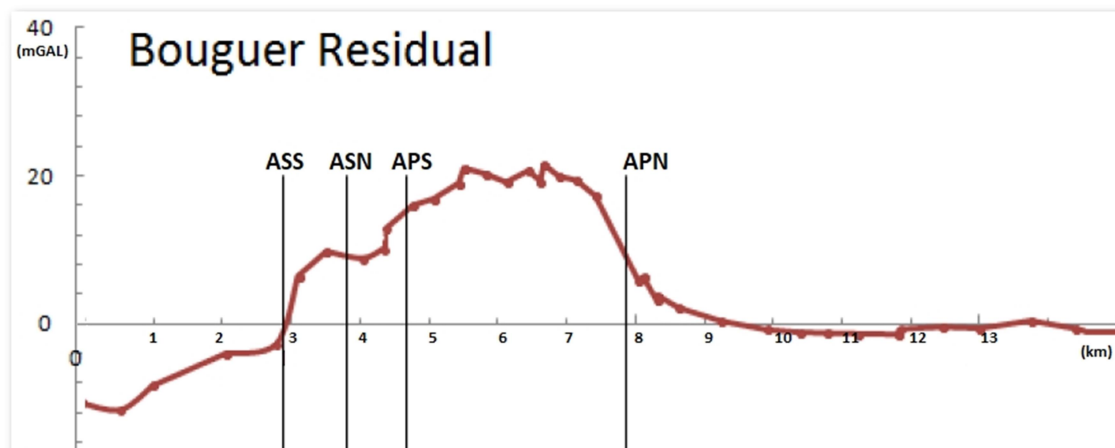
A Figura 4.1.2 ilustra a resposta gravimétrica sintética dos corpos modelados com as densidades atribuídas por Cotis (2015) para um corpo único ( $3,15 \text{ g/cm}^3$ ) e para dois corpos separados ( $2,95 \text{ g/cm}^3$  para o corpo ao Sul e  $3,21 \text{ g/cm}^3$  para o corpo ao Norte). Nela também está representado o perfil aproximado A-A', utilizado por ela no desenvolvimento de seu modelo gravimétrico. Nota-se uma amplitude do sinal de ambos os Modelos da ordem de 30 mGal, amplitude compatível com o mapa Bouguer residual da Figura 4.1.1. Entretanto, os altos gravimétricos modelados mostram-se mais extensos em área que o alto gravimétrico medido. O altos gravimétricos do Modelo 1 apresentam extensão ligeiramente mais estreita que o do Modelo 2. O valor atribuído para a densidade das rochas encaixantes nos modelos diretos é de  $2,67 \text{ g/cm}^3$ .

Analisando o perfil gravimétrico AA' dos modelos diretos, indicado na Figura 4.1.3, percebem-se dois máximos locais entre os limites dos afloramentos. O afloramento Sul, denominado também como afloramento secundário, está delimitado pelas linhas verticais ASS (Anomalia Secundária Sul) e ASN (Anomalia Secundária Norte). Os altos gravimétricos deste trecho são da ordem de 17 mGal para o Modelo 1 e de 15 mGal para o Modelo 2. Já o afloramento Norte, também denominado como afloramento primário, está delimitado pelas linhas verticais APS (Afloramento Principal

Sul) e APN (Afloramento Principal Norte). Os altos gravimétricos deste trecho são da ordem de 25 mGal para o Modelo 1 e de 32 mGal para o Modelo 2.



**FIGURA 4.1.3: Perfis gravimétricos AA' gerados pelos Modelos 1 (vermelho) e 2 (verde). As linhas verticais indicam os limites dos dois afloramentos: ASS – Limite do Afloramento Secundário ao Sul. ASN – Limite do Afloramento Secundário ao Norte. APS – Limite do Afloramento Principal ao Sul. APN – Limite do Afloramento Principal ao Norte.**



**FIGURA 4.1.4: Perfil AA' Bouguer Residual adaptado de Cotis (2015). As linhas verticais indicam os limites dos dois afloramentos: ASS – Limite do Afloramento Secundário ao Sul. ASN – Limite do Afloramento Secundário ao Norte. APS – Limite do Afloramento Principal ao Sul. APN – Limite do Afloramento Principal ao Norte.**

Ao se comparar ambos os perfis com o perfil gravimétrico de Bouguer Residual obtido por Cotis (2015), adaptado na Figura 4.1.4, percebe-se uma situação semelhante de dois máximos locais presentes entre os limites de cada afloramento, separados por um visível mínimo local, entre ASN e APS. Tal mínimo local é imperceptível, se não inexistente, nos perfis dos Modelos 1 e 2 indicando que o material magnético em subsuperfície possivelmente está distribuído de maneira mais próxima entre os corpos

(Modelo 2) ou, de outra forma, em porções mais rasas que o material mais denso (Modelo 1).

A magnitude do sinal gravimétrico para o corpo Sul, situado entre as linhas ASS e ASN, é da ordem de 15 mGal, valor compatível com o obtido em ambos os modelos para a região. Porém, os dois modelos superam o alto gravimétrico obtido por Cotis (2015) referente ao corpo Norte, situado entre APS e APN, da ordem de 20 mGal. Tal diferença indica que a modelagem das fácies magnéticas, em suas dimensões, difere da distribuição das densidades do maciço, sugerindo que o material com alto potencial magnetizante ocupa localmente dimensões maiores que regiões de maior densidade.

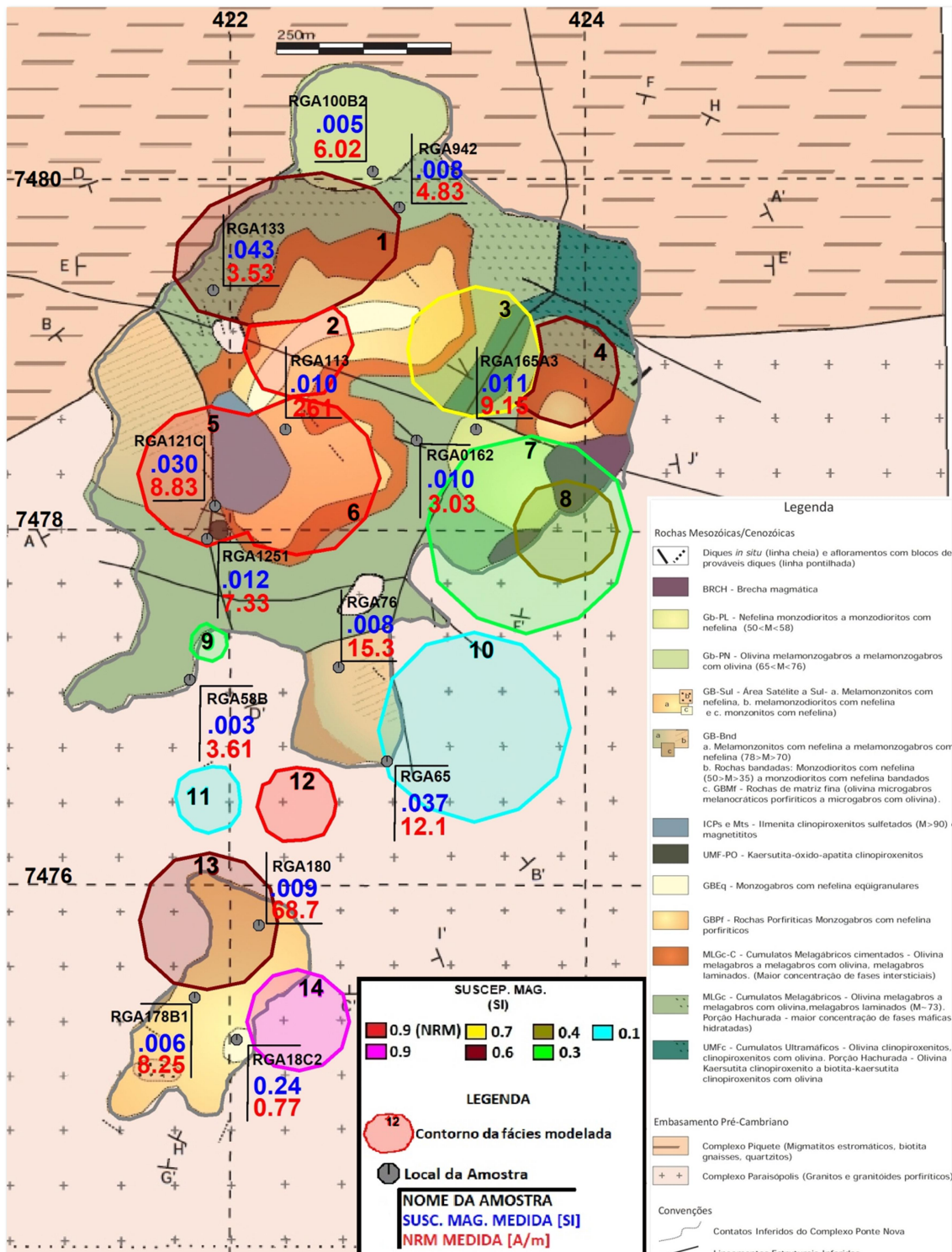
#### **4.2 Modelos magnéticos e modelo geológico de Azzone (2008)**

De acordo com a discriminação das fácies petrográficas e suas características magnéticas, os dois modelos contaram com 14 regiões representativas dos distintos litotipos que compõem o maciço aflorante e em subsuperfície. Essas regiões estão presentes tanto no Modelo 1, para um corpo único, como no Modelo 2, para dois corpos separados em subsuperfície. A Figura 4.2.1 apresenta as posições dos contornos da face superior das fácies modeladas ao longo do mapa geológico adaptado de Azzone (2008).

As cores determinam as características magnéticas atribuídas às fácies modeladas. O vermelho indica exclusivamente a presença de NRM, e sua susceptibilidade magnética é de 0,9 SI. O magenta, amarelo, vinho, marrom, verde e ciano correspondem aos valores de 0,90, 0,70, 0,60, 0,40, 0,30 e 0,10 SI, respectivamente, e todos estes não possuem componente de magnetização remanescente.

Na Figura 4.2.1 também estão representadas, em círculos cinzas, as posições das amostras coletadas, juntamente com seus valores médios obtidos em laboratório de susceptibilidade magnética (em azul) e NRM (em vermelho). As posições das fácies modeladas foram determinadas de modo a reproduzir o sinal magnético observado considerando, também, as informações obtidas em laboratório e as fácies petrográficas mapeadas pelo modelo geológico.





**FIGURA 4.2.1: Mapa geológico adaptado de Azzone (2008) com a posição do contorno da face superior das fácies modeladas e localização das amostras com seus respectivos valores médios de susceptibilidade magnética e NRM medidos em laboratório.**

A fácies modelada de número 1, situada mais ao norte, possui susceptibilidade magnética intermediária, de 0,6 SI, e representa a região de transição de valores de



susceptibilidade baixos (obtidos pelas amostras RGA\_100B2 e RGA\_942) para altos (RGA\_133 e RGA\_113). Pode-se atribuir a ela a representação das fácies Gb-PN (olivina melamonzogabros a melamonzogabros com olivina) e a porção norte da MLGc (cumulatos melagábricos com maior concentração de fases máficas hidratadas).

A fácies modelada de número 2, situada logo ao sul da fácies 1, possui susceptibilidade magnética alta, de 0,9 SI, bem como contém NRM. Essa fácies representa o início da região mais magnetizante, baseada no alto valor de susceptibilidade magnética da amostra RGA\_133 e no alto valor de NRM da amostra RGA\_113. Tal região representa as fácies GBEq (monzogabros com nefelina equigranulares) e GBPf (rochas porfíricas monzogabros com nefelina porfíricas).

As fácies modeladas de número 3, 4, 7 e 8 representam fácies de magnetização intermediária da porção oriental do maciço. Suas susceptibilidades vão de 0,3 SI (fácies 7) a 0,7 SI (fácies 3), baseadas nos valores discretos das amostras RGA\_165A3 e RGA\_0162. A fácies 3 representa os cumulatos ultramáficos (UMFc), de maior susceptibilidade; já a fácies 4 é atribuída aos cumulatos melagábricos cimentados (MLGC-c), de susceptibilidade intermediária, porém menor do que a fácies 3. As fácies de menores valores de susceptibilidade, fácies 7 e 8, representam, nesta ordem, nefelina monzodioritos a monzodioritos com nefelina (Gb-PN) e brecha magmática (BRCH).

As maiores amplitudes de todo o modelo magnético são atribuídas às fácies 5 e 6, que estão na região central do afloramento Norte. A susceptibilidade dessas duas fácies é de 0,9 SI, e ambas possuem componente de magnetização remanescente, dados os valores de susceptibilidade das amostras RGA\_121C e RGA\_1251 e de NRM da amostra RGA\_113. Ambas as fácies representam as fácies de ilmenita clinopiroxenitos sulfetados e magnetititos (ICPs e Mts) e rochas porfíricas monzogabros com nefelina porfíricas (GBPf).

No extremo sul ocidental do afloramento Norte está a fácies 9 com uma susceptibilidade baixa, de 0,3 SI, baseada na amostra RGA\_58B. Ela representa a porção sul da fácies MLGc (cumulatos melagábricos). Ainda no extremo sul do afloramento, mas na porção oriental, está representada a fácies 10, com susceptibilidade de 0,1 SI. Esta região apresentou uma magnetização fraca no sinal de AMCT e, apesar da amostra mais próxima, a RGA\_76, ter susceptibilidade intermediária, a fácies modelada infere uma menor susceptibilidade para a região. A amostra RGA\_76 trata-se de uma amostra de melamonzonitos com nefelina a melamonzogabros com nefelina

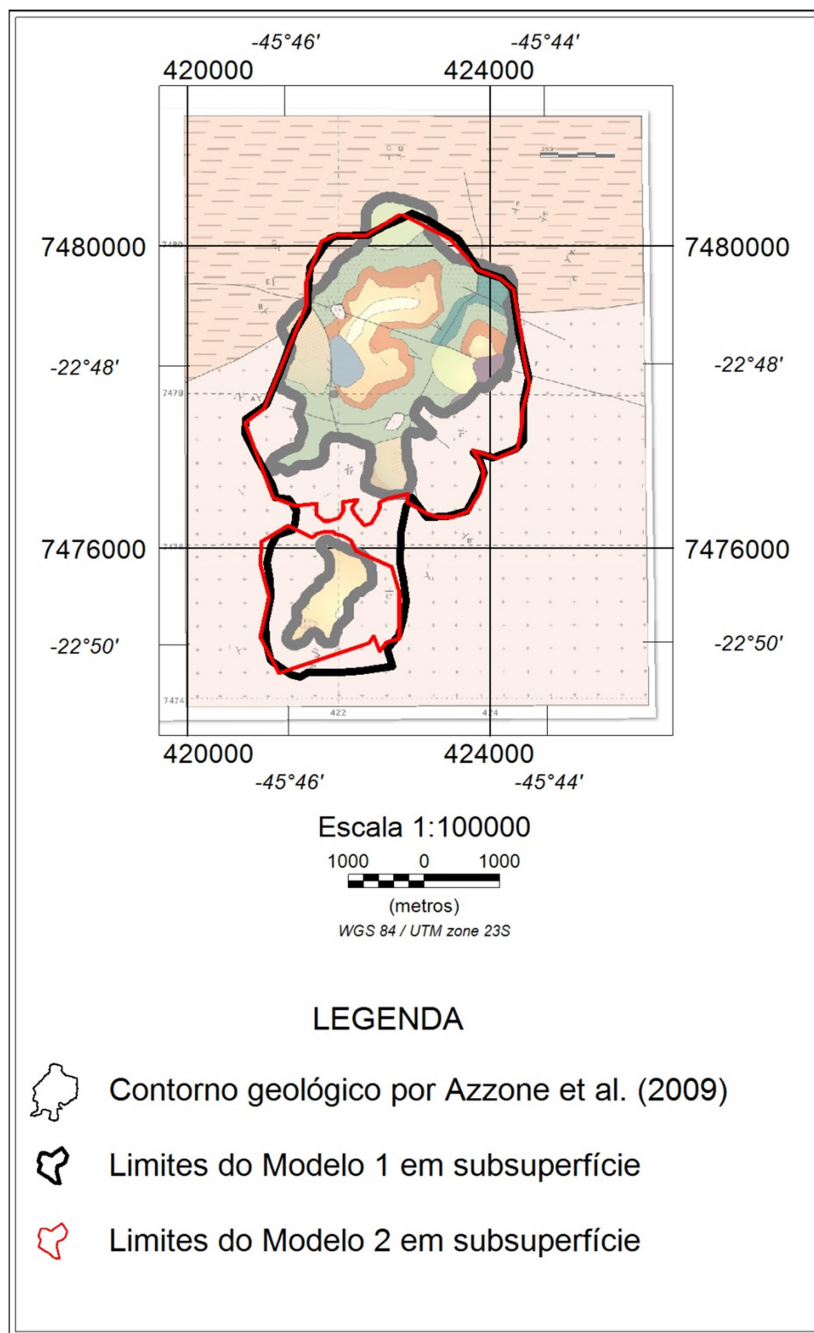
(GB-Bnd-a), e a fácies 10 representa rochas bandadas: monzonitos com nefelina (GB-Bnd-b).

As fácies 11 e 12 situam-se na parte não aflorante do maciço. E ambas são extremos opostos em suas características magnéticas. A fácies 11 apresenta-se de forma a adequar as amplitudes do sinal magnético nesta região, indicando uma magnetização existente, ainda que fraca, entre as fácies 9 e 13, visível no perfil L12060 (indicado na Figura 3.3.10 e Figura 3.3.11). Já a fácies 12 representa um alto magnético detectado nessa região, possui susceptibilidade magnética de 0,9 SI, atribuída pela amostra RGA\_65, e possui componente de NRM, atribuída pela amostra RGA\_180. Por estar numa região não aflorante, não há fácies petrográficas representadas por essa fácies modelada.

O afloramento Sul, composto em quase sua totalidade por melamonzonitos com nefelina (GB-Sul-a) tem magnetização representada pela fácies 13, com valor intermediário de susceptibilidade magnética 0,6 SI, atribuída pelos valores das amostras RGA\_180 e RGA\_178B1. A fácies 14, também pertencente a esta região, possui susceptibilidade mais alta, de 0,9 SI, adequando-se a um alto magnético detectado na região e baseado no valor susceptibilidade magnética da amostra RGA\_18C2. Esta fácies representa os monzonitos com nefelina (MZ-Sul ou GB-Sul-c).

Ao todo, as 14 fácies modeladas representaram 11 fácies petrográficas descritas por Azzone (2008). Apenas a fácies UMF-PO (Kaersutita-óxido-apatita clinopirozenitos) não foi caracterizada devido a sua reduzida extensão. Considera-se, também, que as fácies modeladas indicam propriedades magnéticas de setores aflorantes e não aflorantes do maciço. São representações simplificadas da distribuição do potencial magnetizante das rochas e, portanto, não representam espacialmente as fácies petrográficas e nem determinam seus limites.

Considerando o restante do corpo dos Modelos, além das fácies, ainda há uma distribuição de material magnetizante com susceptibilidade magnética de 0,4 SI. Para o Modelo 1, esse material soma-se às outras fácies citadas, formando um único corpo em subsuperfície. No caso do Modelo 2, o material magnetizante se divide em dois, somando-se às fácies 13 e 14 para formar o corpo responsável pelo afloramento Sul, e somando-se às demais faces para formar o corpo do afloramento Norte. Os limites máximos de ambos os modelos superam os limites do plano aflorante mapeado por Azzone (2008), como indicado na Figura 4.2.2.



**FIGURA 4.2.2: Mapa geológico adaptado de Azzone (2008) com os limites dos Modelos 1 (preto) e 2 (vermelho) em subsuperfície.**

No extremo norte do maciço, ambos os modelos possuem limites aquém da formação Gb-PN, indicando uma baixa contribuição desta fácies para os sinais magnéticos medidos. A amostra RGA\_100B2 também aponta essa baixa contribuição desta fácies de acordo com seus valores de susceptibilidade magnética e NRM medidos, ambos de valores baixos quando comparados ao restante das amostras.

Nota-se, porém, em ambos os modelos, uma grande extensão não aflorante ao sudeste do afloramento Norte. Essa região possui sinais magnéticos de baixa amplitude, provavelmente indicando a presença de material magnetizante em profundidade. Tal característica também é reconhecida ao redor de todo afloramento Sul.

Justamente, por essas condições, não se pode concluir se o maciço Ponte Nova trata-se apenas de um corpo ou se há uma separação, mesmo que pequena, como indicada pelos limites do Modelo 2, entre dois corpos magnéticos. As distâncias entre os limites dos dois corpos modelados do Modelo 2 variam entre 200 metros, nos pontos centrais mais próximos, a 800 metros nos pontos mais distantes, à leste.

## 5. CONCLUSÃO

Todos os valores de NRM e susceptibilidade magnética medidos em laboratório foram apropriados para rochas ígneas (Telford et al., 1990; Dutra et al., 2014). No entanto, demonstraram uma heterogeneidade considerável nas características magnéticas das fácies petrográficas. Tal heterogeneidade foi aliada às informações geológicas do maciço Ponte Nova para reconhecer dimensões e localizações de regiões mais e menos magnetizantes do maciço.

Os valores de susceptibilidade magnética utilizados nas diferentes fácies modeladas superaram os valores encontrados em laboratório porque a resposta do sinal magnético sintético não atingiu a amplitude de aproximadamente 8.000 nT como a encontrada no sinal da anomalia magnética de campo total. Podemos concluir que as 14 amostras que foram analisadas podem não ser representativas para todo o maciço e que, portanto, podem existir fácies petrográficas não amostradas com características mais magnetizantes do que as encontradas em laboratório.

Assumiu-se, no processo de modelagem, fácies petrográficas com características físicas próprias e distintas umas das outras. Aliar esse método às informações obtidas em laboratório contribuiu para um bom desenvolvimento do modelo. Apesar dos resultados obtidos em laboratório para a susceptibilidade magnética serem consideravelmente menores que os utilizados na modelagem direta, estes foram importantes na caracterização do potencial de magnetização das distintas fácies, nas suas posições ao longo do modelo e suas dimensões.

Os Modelos 1 e 2 apresentaram sinais magnéticos semelhantes, ambos com boa aproximação do sinal magnético medido, impossibilitando qualquer tipo de conclusão a partir dos dados magnetométricos. A semelhança entre a amplitude do sinal analítico da anomalia magnética de campo total e do sinal analítico dos sinais magnéticos sintéticos gerados pelos modelos também impossibilitam qualquer conclusão sobre a configuração do maciço em subsuperfície. Entretanto, ambos indicam que os modelos 3-D reproduzem respostas teóricas muito compatíveis com os dados magnéticos levantados.

Ao se aplicar parâmetros de densidade para ambos, foi reproduzido um modelo gravimétrico de acordo com as dimensões de cada modelo magnético, e ambos foram comparados aos modelos gravimétricos sugeridos por Cotis (2015). As amplitudes dos

sinais gravimétricos dos Modelos 1 e 2 superaram os valores de Cotis (2015), demonstrando que a distribuição de material magnetizante não necessariamente está vinculado com a distribuição de densidades em subsuperfície. Ambos os sinais apresentaram dois máximos gravimétricos locais discretos, respectivos às regiões dos afloramentos Norte e Sul, indicando que as duas hipóteses de trabalho ainda são consideráveis.

A magnetometria trata-se de uma das técnicas mais versáteis para prospecção geofísica, porém, por se tratar de um método potencial, dificilmente encontra uma interpretação única para os dados observados (Telford et al., 1990). Este trabalho soma-se a mais um caso no qual duas hipóteses de trabalho foram modeladas e cujos resultados foram inconclusivos. O sinal magnético sintético gerado por ambos os modelos assemelha-se em área e amplitude ao sinal magnético medido. Portanto, ambos os resultados não permitem identificar qual hipótese é a mais apropriada para a constituição do maciço em subsuperfície. Não é possível afirmar se os dois afloramentos são derivados de um mesmo corpo ou de dois corpos devido à proximidade de ambos, e conseqüente interferência de seus respectivos sinais magnéticos. No modelo de dois corpos, essa separação varia entre 200 e 800 metros.

Em função da geologia e das medidas em laboratório, as características magnéticas consideradas em ambos os modelos são semelhantes, com fácies petrográficas de susceptibilidade magnética variando entre 0,1 e 0,9 SI, valores aceitos para rochas alcalinas intrusivas.

A presença de magnetização remanescente natural, evidente na Redução ao Polo de Fedi et al. (1994) e nas medições das amostras em laboratório, quando consideradas na modelagem direta, resultou em um sinal magnético sintético mais compatível com o observado nas fácies mais magnetizantes das regiões centrais do afloramento (ilmenita clinopirozenitos sulfetados e magnetititos), indicando a importância desta componente no processo de interpretação e modelagem.

Finalmente, a conjunção dos dados do modelo geológico, do modelo gravimétrico, das medições em laboratório e das reduções do sinal magnético provenientes do processo de interpretação geofísica se mostra eficaz na construção de modelos diretos devido à riqueza e diversidade de informação que se complementam.

## 6. REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M., 1983. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da plataforma sul-americana. *Revista Brasileira de Geociências*, 13: 139-158
- Azzone, R.G., 2008. Petrogênese do Maciço Alcalino Máfico-Ultramáfico Ponte Nova (SP-MG). Tese de Doutorado pelo Programa de Pós Graduação em Mineralogia e Petrologia do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- Azzone, R.G., Ruberti, E., Rojas, G.E.E., Gomes, C.B., 2009. Geologia e Geocronologia do Maciço Alcalino Máfico-Ultramáfico Ponte Nova (SP-MG). *Revista do Instituto de Ciências - USP, Geol. USP, Sér. cient.*, 9(2): 23-46.
- Baranov, V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, 22: 359-383.
- Blakely, R.J., 1996. *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Cavalcante, J. C., Cunha, H. C. S., Chieragati, A., Kaefer, L. Q., Rocha, J. M., Daitx, E. C., Coutinho, M. G. N., Yamamoto, K., Drumond, J. B., Rosa, D. B., Ramalho, R., 1979. Projeto Sapucaí: relatório final de Geologia. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Vol. 2, Brasília.
- Cooper, G.R.J., Cowan, D.R., 2005. Differential reduction to the pole. *Computers & Geosciences*, 31: 989-999.
- Cordani, R. Shukowsky W., 2009. Magnetização remanescente: um parâmetro crucial para a interpretação e modelamento de anomalias magnéticas em território brasileiro. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27(4): 659-667.

Cotis, R.G., 2015. Caracterização Gravimétrica do Maciço Ponte Nova (SP-MG). Monografia apresentada pelo Programa de Graduação em Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

Cotis, D. S., Marangoni, Y. R., Ferreira, H., 2015. Gravimetric characterization of Ponte Nova mafic-ultramafic massif (SP-MG). Sociedade Brasileira de Geofísica. Fourteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society.

Dutra, A. C., Marangoni, Y. R., Trindade, R. I., 2014. Aeromagnetic and physical-chemical properties of some complexes from Goiás Alkaline Province. *Brazilian Journal of Geology*, 44(3): 361-373.

Fedi, M., Giovanni, F., Rapolla, A., 1994. A method to estimate the total magnetization direction from a distortion analysis of magnetic-anomalies. *Geophysics. Prospect*, 42: 261-274.

Geosoft DAP Web Client. Disponível em: <<http://dap.geosoft.com/Flamingo/>>. Acesso em 03 de outubro de 2016.

Gerovska, D., Stavrev, P., 2006. Magnetic data analysis at low latitudes using magnitude transforms. *Geophysical Prospecting*, 54 (1): 89-98.

MacLeod, I. N., Jones, K., Dai, T. F., 1993a. 3-D Analytic Signal in the interpretation of Total Magnetic Field Data at Low Magnetic Latitudes. *Exploration Geophysics*, 24: 679-688.

MacLeod, I. N., Vieira, S., Chaves, A. C., 1993b. Analytic Signal and Reduction-to-the-Pole in the interpretation of Total Magnetic Field Data at Low Magnetic Latitudes. In: SBGf, Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 3º, Rio de Janeiro, *Resumos Expandidos*, 2: 830-835.

Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica Ltda, 2013. Projeto Aerogeofísico São José dos Campos Resende - *Relatório Final do Levantamento e Processamento dos*



*Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos*. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Relatório Final, 15 vol, Texto e Anexos (Mapas), Rio de Janeiro.

Ribeiro, V. B., 2011. Modelagem Geofísica do Complexo Alcalino de Tapira. Dissertação de Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

Rugenski, A., 2001. Investigação geofísica do complexo alcalino de Pariqueira-Açu com ênfase em gravimetria. Dissertação de Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

Selli, A. W. M., 2014. Estudo Gravimétrico do Maciço Máfico-Ultramáfico Ponte Nova. SIICUSP 2014 – 22º Simpósio Internacional de Iniciação Científica e Tecnológica da USP, p. 4.

Sharma, V. R., 1997. *Environmental and Engineering Geophysics*. 1<sup>st</sup> Ed. Cambridge University Press. UK.

Silva, J. B. C., 1986. Reduction to the pole as an inverse problem and its application to low-latitude anomalies. *Geophysics*, 51(2): 369-382.

Telford, W. M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. *Applied geophysics*. 2<sup>st</sup> Ed. Cambridge University Press, Cambridge (UK).

Ulbrich, H. H. G. J., Gomes, C. B., 1981. Alkaline rocks from Brazil. *Earth Science Reviews*, 17: 135-154.