

5 RESULTADOS

5.1 Geologia de Campo

Os mapas geológicos disponíveis para a área de estudo foram produzidos em escala de 1:400.000 (SILVA e CUNHA 2001b) e 1:100.000 (ALMEIDA *et al.*, 2012b). Com base nesses mapas foram realizadas duas campanhas de reconhecimento geológico.

A primeira campanha de reconhecimento da área foi realizada em agosto de 2012 com duração de dois dias. Embora tenha havido curto espaço de tempo e a dificuldade de encontrar pontos de afloramento, mesmo assim foram marcados cinco pontos e foi feita coleta de amostras de rochas em três pontos (Tabela 8).

A segunda campanha foi realizada em um período de cinco dias e foi intensificada a procura por pontos com afloramento. Nesta etapa foram identificados 26 pontos distribuídos ao longo de rodovias e estradas vicinais na região, onde foram feitas medidas de foliação e mergulho e foi medida, “*in situ*”, a susceptibilidade magnética de rochas com o susceptímetro KT-10 S/C Plus da TerraPlus. As informações dos pontos estão apresentadas nas tabelas 9 e 10 (susceptibilidade).

As informações coletadas de direção e mergulho foram utilizadas para confecção das seções geológicas dos três perfis; as medidas de susceptibilidade magnética foram utilizadas na modelagem 2D magnetométrica; e as amostras coletadas foram utilizadas para medidas de densidade das rochas (Tabela 8) que foram aplicadas na modelagem 2.5 D gravimétrica.

O volume das amostras coletadas foi medido no Laboratório de Petrofísica do Observatório Nacional – LabPetrON utilizando porosímetro Corelab, modelo UltraPore-300 com câmara para medição de volume de sólidos Matrix Cup (pressão atm) e câmara para medição de volume de poros Core Holder (Até 10.000psi). A medição de massa foi feita no mesmo laboratório com balança para até 1Kg e precisão de 0,001g da marca Sartorius, modelo CPA 10035.

A susceptibilidade magnética dos gnaisses do Complexo Região dos Lagos (Tabela 10) é cerca de 10^4 vezes maior que a mesma propriedade medida em gnaisses do Grupo São Fidélis. Os valores de k são elevados mesmo para rochas intensamente alteradas por intemperismo. A variação de densidade também é significativa (Tabela 8). As duas amostras mais representativas da unidade têm

densidade $2,8 \text{ g/cm}^3$, equivalente à densidade de rochas ígneas básicas. O kinzigito do Grupo São Fidélis tem densidade comum de gnaisses de alto grau ($2,67 \text{ g/cm}^3$). Há, portanto, um contraste de densidade e susceptibilidade magnética entre as rochas do Complexo Região dos Lagos (CRL) e os gnaisses do Grupo São Fidélis (GSF).

Tabela 8 – Tabela de localização dos pontos das amostras e valores de densidade calculados.

Ponto	Litologia	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Média (g/cm ³)
Pedreira no trevo da entrada da cidade de Macaé (MC/JM 05)	Complexo Região dos Lagos - Gnaisses Long: 198658.00 Lat: 7525032.00	15.628	5.55	2.81	
		20.46	7.35	2.78	
		18.385	6.55	2.80	
		19.850	7.03	2.82	
		13.423	4.81	2.79	
		17.387	6.20	2.80	
		12.482	4.42	2.82	
		18.307	6.69	2.79	
		20.666	7.62	2.81	2.80
Antiga Pedreira dentro da cidade de Macaé (MC/JL 03)	Complexo Região dos Lagos. - Gnaisses Long: 212895.00 Lat: 7523131.00	10.183	3.71	2.78	
		12.203	4.43	2.85	
		8.091	2.90	2.79	
		2.465	3.49	2.72	
		13.072	4.79	2.74	
		12.929	4.72	2.75	
		8.017	2.95	2.73	2.76
Antiga Pedreira Empresa Tiger na Entrada de Macaé (MD 26)	Complexo Região dos Lagos. - Gnaisses Long: 208284.00 Lat: 7526556.00	7.375	2.61	2.82	
		6.951	2.49	2.79	
		9.231	3.31	2.78	
		9.559	3.43	2.81	
		8.783	3.15	2.78	2.79
Amostra na estrada para Glicério próximo a localidade de Córrego do Ouro	Grupo São Fidélis Long: 193254.24 Lat: 7537587.77	16.406	6.063	2.70	
		14.890	5.540	2.69	
		17.957	6.824	2.63	
		27.465	10.310	2.66	
		22.518	8.421	2.67	
		34.577	12.94	2.67	2.67

Fonte: O autor, 2016.

Tabela 9 – Atitudes de foliação de gnaisses medidas na primeira e segunda campanha.

Ponto	Identificação	Unidade Litológica	LONGITUDE	LATITUDE	Caimento	Direção De Mergulho	Altitude
1	MD002	GSF	232468.00	7548807.00	23	240	31
2	MD004	GSF	230674.00	7552811.00	24	78	25
3	MD005	GSF	232722.00	7555882.00	26	154	21
4	MD006	GSF	217162.00	7546227.00	24	122	59
5	MD007	GSF	218134.00	7545422.00	26	133	85
6	MD009	GSF	215357.00	7543221.00	23	59	48
7	MD010	GSF	213777.00	7539364.00	38	80	34
8	MD012	GSF	211117.00	7533966.00	51	29	15
9	MD013	GSF	214082.00	7530806.00	16	89	6
10	MD014	GSF	215904.00	7530370.00	86	25	15
11	MD015	GSF	221195.00	7536592.00	24	153	35
12	MD016	GSF	219056.00	7531097.00	82	160	0
13	MD017	GSF	217981.00	7528977.00	26	69	18
14	MD018	CRL	203048.00	7525096.00	32	200	22
15	MD019	CRL	203700.00	7524581.00	11	80	18
16	MD020	CRL	204237.00	7524625.00	28	213	40
17	MD021	CRL	206884.00	7524121.00	34	220	24
18	MD022	CRL	208373.00	7525042.00	24	171	10
19	MD023	CRL	210530.00	7525135.00	33	330	10
20	MD024	CRL	209542.00	7526118.00	23	350	10
21	MD026	CRL	208284.00	7526556.00	22	154	23
22	JM-03	CRL	212895.00	7523131.00	17	266	8
23	JM-05	CRL	198658.00	7525032.00	Sem	Medida	-

Legenda: GSF – Grupo São Fidélis, CRL – Complexo Região dos Lagos.

Nota: Os pontos de codificação MD são da segunda campanha e JM da primeira campanha.

Fonte: O autor, 2016.

Para elaborar as seções estruturais correspondentes aos três perfis, foram adicionadas as medidas de foliação e mergulho dos pontos levantados no campo, integradas aos dados estruturais disponíveis nos mapas geológicos (SILVA e CUNHA, 2001b; ALMEIDA *et al.*, 2012b). O caimento das camadas foi corrigido de acordo com a posição da medida em relação à direção da seção. Estas seções são apresentadas na Figura 74.

A seção AA' (Seção 01 geofísica) tem 80 km de extensão na direção N45E. Inicia-se a sudeste em Rio das Ostras e termina a nordeste, próximo a Dores de Macabu. O bloco a sudoeste da Falha de Macaé é ocupado por gnaisses do Complexo Região dos Lagos, incluindo um tipo gabrótico. O mergulho da foliação gnáissica passa de 15° para 50° para nordeste no trecho mais próximo à Falha de Macaé. O bloco nordeste da Falha de Macaé é ocupado por um extenso e espesso depósito aluvionar que impede a observação direta da estrutura

subjacente. As atitudes de foliação mais próximas à falha, quando rebatidas no perfil, mantêm o mergulho de 50° obtido nas proximidades da falha pelo bloco sudoeste. Da Falha de Macaé até o final da seção AA', o terreno é ocupado por biotita gnaisse do Grupo São Fidélis, recoberto, na altura de Dores de Macabu, por sedimentos do Grupo Barreiras. Até a altura da estação MT 1035 (entre Quissamã e Dores de Macabu) observa-se um dobramento aberto e suave, com plano axial oblíquo à seção. Deste ponto até o final da seção o mergulho do gnaisse volta a ter baixo ângulo (15°) para nordeste.

A seção BB' (seção 02 geofísica) tem 27 km de extensão na direção N60W, iniciando-se na área urbana de Macaé, a sudeste, e finalizando a noroeste próximo à localidade de Trapiche. Destaca-se na seção, o contato tectônico entre o Complexo Região dos Lagos e o Grupo São Fidélis (biotita gnaisse), projetado com mergulho de 35° para sudeste nas proximidades da rodovia BR-101, entre as estações MT 2009 e 2010. O restante do perfil é dominado por biotita gnaisse e kinzigito do Grupo São Fidélis, em foliação com alto ângulo de mergulho (50 a 70°) para sudeste e noroeste, de acordo com flanco de dobra antiforme vertical cujo plano axial está situado entre as estações MT 2003 e 2004.

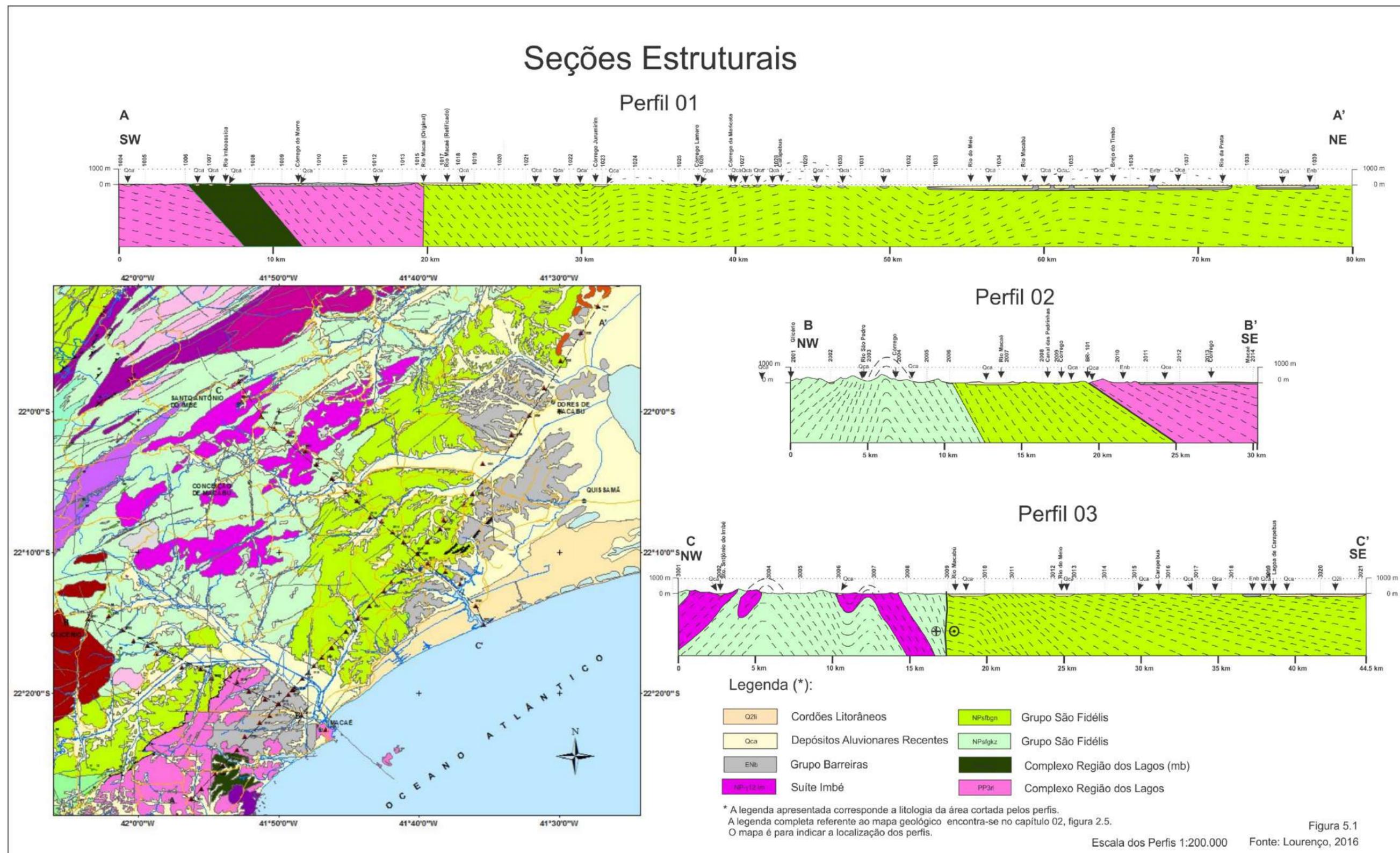
A seção CC' (seção 03 geofísica) tem 42km na direção N45W, iniciando a sudeste no barra da Lagoa de Carapebus e finalizando a noroeste próximo a Santo Antônio do Imbé. Do seu início na linha de costa até cruzar a planície aluvionar do Rio Macabu, a seção é ocupada por biotita gnaisse do Grupo São Fidélis, com suave mergulho (15 a 20°) para sudeste. Nas proximidades da zona de cisalhamento onde se instalou o vale do Rio Macabu, a foliação apresenta dobramento assimétrico, e é truncada pela estrutura dúctil. O restante da seção é ocupado por Kinzigito do Grupo São Fidélis injetado por ortognaisse da Suíte Imbé, e o conjunto está dobrado em anticlinório de plano axial vertical, possivelmente na continuação da dobra observada na seção BB'.

Tabela 10 – Média das Medidas de susceptibilidade magnética obtidas na segunda campanha de campo.

Ponto	Ident.	Unidade Litológica	LONGITUDE	LATITUDE	Susceptibilidade ($\times 10^{-3}$) (SI)	
					Max	Min
1	MD001	Grupo São Fidélis	229537.00	7547415.00	0.080	0.020
2	MD003	Grupo São Fidélis	230638.00	7555519.00	0.068	0.018
3	MD004	Grupo São Fidélis	230674.00	7552811.00	0.038	0.019
4	MD005	Grupo São Fidélis	232722.00	7555882.00	0.020	0.013
5	MD007	Grupo São Fidélis	218134.00	7545422.00	0.051	0.032
6	MD007	Grupo São Fidélis	218134.00	7545422.00	0.054	0.042
7	MD007	Grupo São Fidélis	218134.00	7545422.00	0.038	0.031
8	MD009	Grupo São Fidélis	215357.00	7543221.00	0.069	0.030
9	MD010	Grupo São Fidélis	213777.00	7539364.00	0.057	0.050
10	MD011	Grupo São Fidélis	213009.00	7535728.00	0.063	0.049
11	MD012	Grupo São Fidélis	211117.00	7533966.00	0.076	0.040
12	MD015	Grupo São Fidélis	221195.00	7536592.00	0.070	0.018
13	MD018	Comp. Região dos Lagos	203048.00	7525096.00	14.600	10.800
14	MD019	Comp. Região dos Lagos	203700.00	7524581.00	16.900	5.820
15	MD020	Comp. Região dos Lagos	204237.00	7524625.00	0.232	0.093
16	MD021	Comp. Região dos Lagos	206884.00	7524121.00	47.300	24.300
17	MD022	Comp. Região dos Lagos	208373.00	7525042.00	32.900	4.000
18	MD023	Comp. Região dos Lagos	210530.00	7525135.00	19.400	15.100
19	MD024	Comp. Região dos Lagos	209542.00	7526118.00	9.670	6.926
20	MD025	Comp. Região dos Lagos	208675.00	7526341.00	1.292	1.180
21	MD026	Comp. Região dos Lagos	208284.00	7526556.00	8.081	6.443
22	MD027	Comp. Região dos Lagos	207749.00	7526552.00	0.097	0.046
23	MD028	Comp. Região dos Lagos	207285.00	7526727.00	2.290	0.597
24	MD029	Comp. Região dos Lagos	201423.00	7526127.00	23.700	6.930

Fonte: O autor, 2016.

Figura 74 – Seções geológicas dos perfis.



Fonte: O autor, 2016.

5.2 Dados Magnetométricos

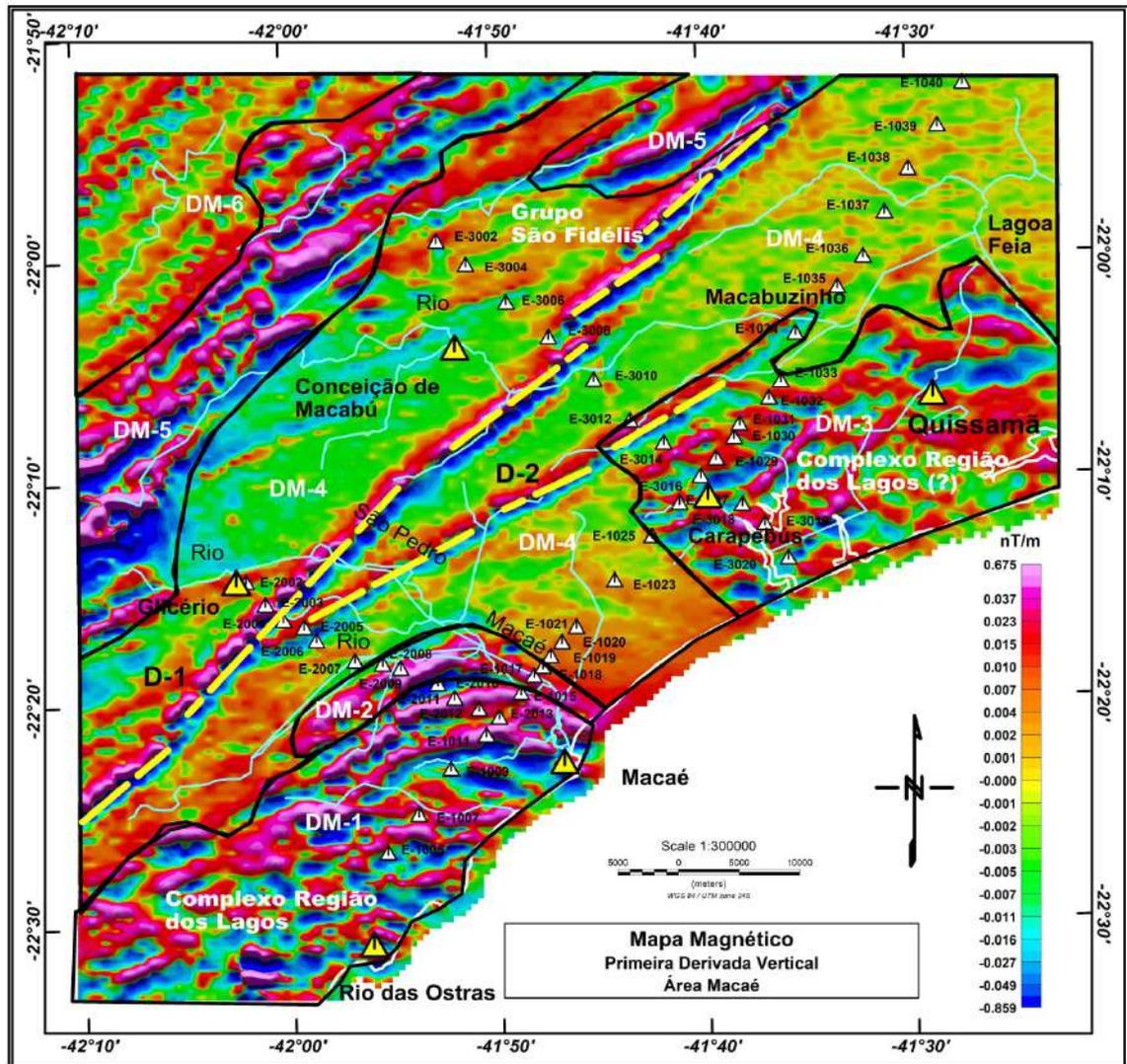
Os mapas temáticos das Figuras 75, 76 e 77 foram gerados com base no mapa do campo magnético anômalo (Figura 31).

Com base na análise de assinaturas magnéticas (relevo magnético) dos mapas da Primeira Derivada Vertical, Amplitude Sinal Analítico e Gradiente Horizontal Total (Figura 75, 76 e 77 respectivamente) a área estudada foi dividida em seis domínios magnéticos (DM) e cartografados os lineamentos dos diques (D1 e D2) em planta.

5.2.1 Domínios Magnéticos

O filtro da primeira derivada vertical foi aplicado nos dados magnéticos com o objetivo de identificar a geometria das fontes magnéticas profundas e rasas, realçando os contatos geológicos e características estruturais da área (Figura 75).

Figura 75 – Mapa Magnético da Primeira Derivada Vertical (Dz) com limites dos domínios magnéticos e diques.



Legenda: Contorno preto: limites dos domínios magnéticos (DM) e diques (D1 e D2) (traçado amarelo).

Nota: Os triângulos brancos representam as estações gravimétricas e magnetotélúricas e os triângulos amarelos as cidades.

Fonte: O autor, 2016.

O filtro da amplitude do sinal analítico foi aplicado para realçar a forma geométrica dos domínios magnéticos em subsuperfície (Figura 76). A amplitude do Sinal analítico é obtido através da combinação dos gradientes horizontal e vertical do campo magnético. A forma geométrica dos corpos anômalos depende, prioritariamente, da localização dos mesmos, e não das suas direções de magnetização.

Nos mapas das Figuras 75 a 78 é possível identificar seis domínios magnéticos (DM-1, DM-2, DM-3, DM-4, DM-5, DM-6). O domínio DM -1 apresenta

anomalias de intensidade magnética alta com valores acima de 100 nT no mapa do campo magnético anômalo (CMA) (Figura 31). No limite com o domínio DM-2 as anomalias apresentam uma inflexão, mudando da direção NE para NW em direção à Falha de Macaé (ALMEIDA *et al.*, 2012a).

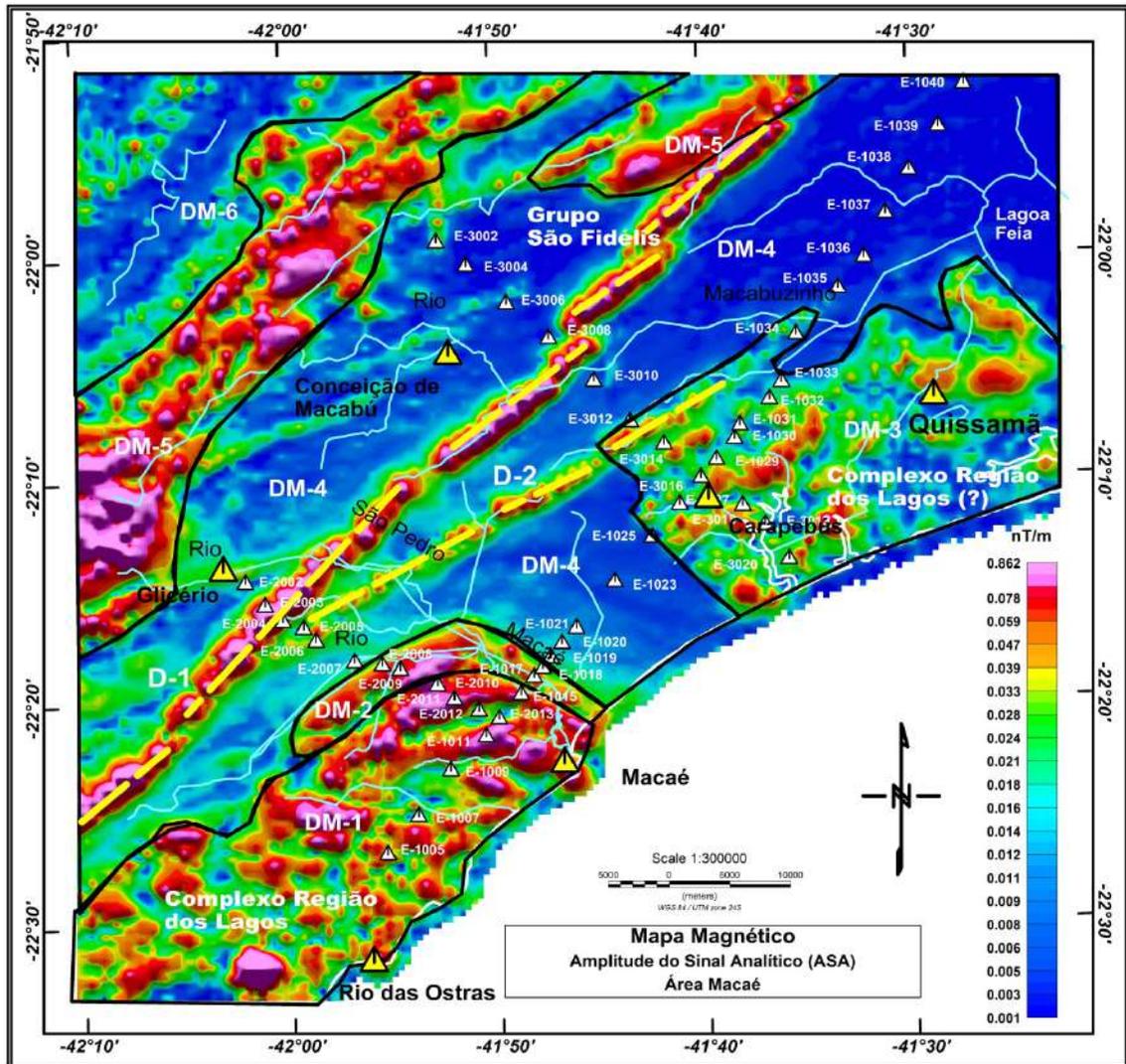
O domínio DM-2 está situado entre o contato tectônico do Complexo Região dos Lagos com o Grupo São Fidélis e a Falha de Macaé (ALMEIDA *et al.*, 2012a), ao longo do rio Macaé e coincide com um conjunto de falhas de transferência mapeado por Lourenço *et al.* (2014).

O domínio DM-3 apresenta assinatura magnética semelhantes ao DM-1, só que um pouco menos intensa com valores entre 50 e 100 nT no mapa do campo magnético anômalo (CMA) (Figura 31). Esse domínio teria seus limites a SW e NE, coincidindo com duas falhas de transferência mapeadas por Lourenço *et al.* (2014), aqui denominadas de Falha de Carapebus (FC) e Falha da Lagoa Feia (FLF) (Figura 79).

No mapa integrado da parte *onshore* com a parte *offshore* da Bacia de Campos de Lourenço *et al.* (2014), observa-se que o domínio DM-3 estende-se mar adentro até o Baixo de São Tomé. De maneira semelhante, o domínio DM-1, também prolonga-se mar adentro até o Graben de Barra de São João. Segundo Mohriak e Barros (1990), essas duas estruturas estariam separadas por um alto estrutural. Notamos que as bordas deste alto estrutural corresponderiam às falhas de Macaé (FM) e Carapebus (FC).

Os domínios DM-1 e DM-2 correspondem ao Complexo Região dos Lagos (CRL) e, por sua semelhança de assinatura magnética, o DM-3 também poderia ser uma parte deste complexo. Segundo o mapa geológico de Silva e Cunha, 2001b esta porção também pertenceriam ao CRL.

Figura 76 – Mapa da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) com limites dos domínios magnéticos e diques.



Legenda: Contorno preto: limites dos domínios magnéticos (DM) e diques (D1 e D2) (tracejado amarelo).

Nota: Os triângulos brancos representam as estações gravimétricas e magnetotélúricas e os triângulos amarelos as cidades.

Fonte: O autor, 2016.

O Domínio DM-4 é caracterizado por uma região dominada por anomalias de longos comprimento de onda nos três mapas (Figuras 76, 77 e 78). Em relação à litologia este domínio representa o Grupo São Fidélis e, nos mapas magnéticos temáticos, fica evidente a diferença da assinatura magnética em relação ao Complexo Região dos Lagos. O relevo magnético observado nos mapas é bem suave, visto que o valor da intensidade magnética no mapa residual é baixo em torno de -150 nT.

Os domínios DM-5 e DM-6 pertenceriam ao Grupo São Fidélis e estão fora da região coberta pelos perfis gravimétricos e magnetotélúricos.

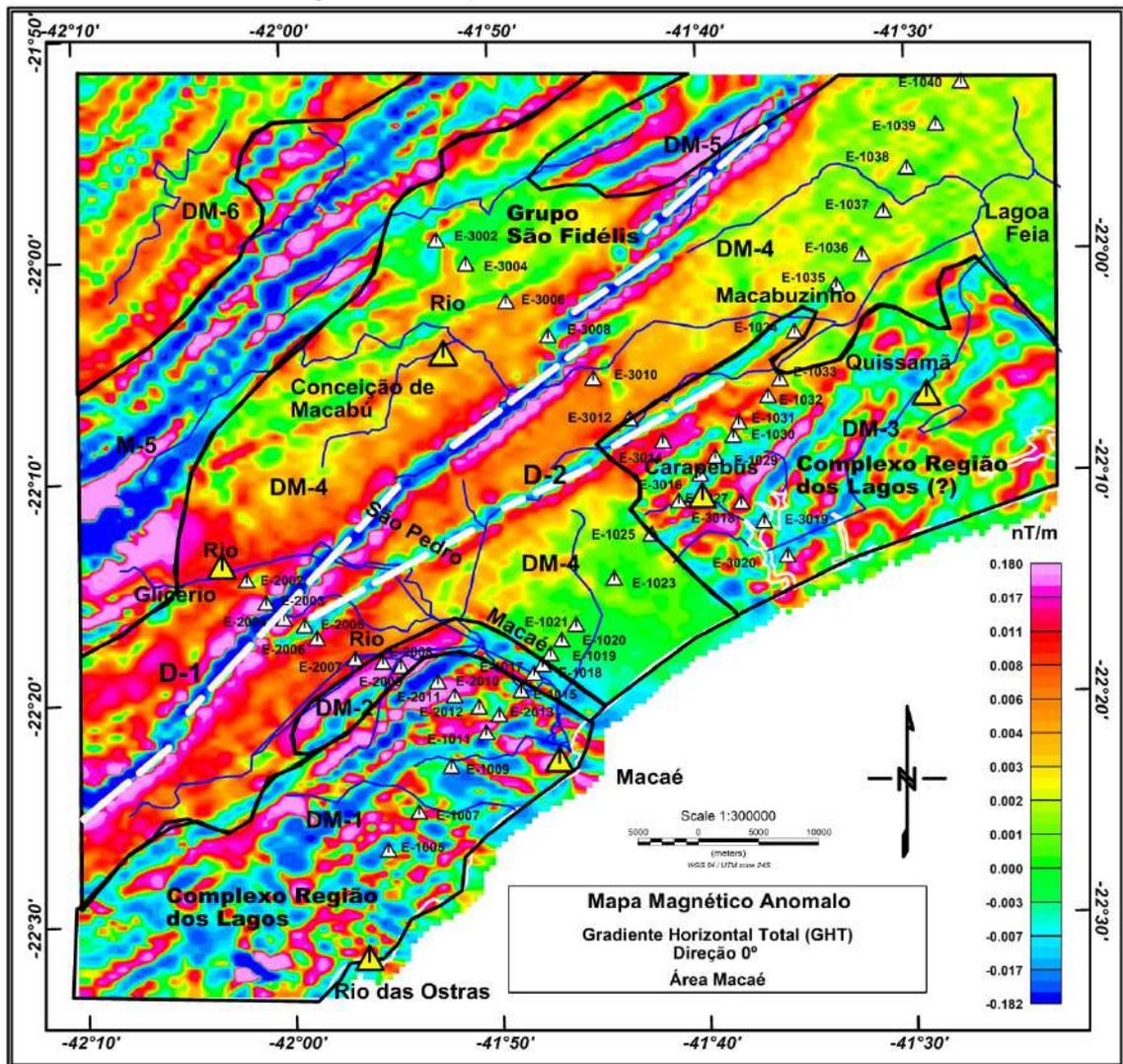
O domínio DM-5 apresenta um conjunto de estruturas magnéticas paralelas, alongadas na direção NE, com grande amplitude. Estas estruturas formam um sistema de um possível conjunto de diques com altos valores de intensidade magnética, que podem ser observados nos mapas (Figura 75, 76, 77 e 78). A localização desse domínio corresponde no mapa geológico às suítes Trajano de Moraes e Bela Joana (Figura 7).

O domínio DM-6 também apresenta uma característica de estruturas paralelas alongadas, no entanto a sua intensidade magnética é bem menor que o DM-5. A faixa de intensidade magnética parece ser semelhante à apresentada no domínio DM-4 também com longos comprimentos de onda. A localização desse domínio corresponde, no mapa geológico, às suítes Cordeiro e Desengano (Figura 7).

O mapa de gradiente horizontal total (Figura 77) foi gerado a partir do grid de valores da anomalia magnética. Esta técnica é utilizada para realçar, através de máximos e mínimos, as bordas e os centros das fontes magnéticas. Assim aplicou-se este filtro para delimitar as bordas dos corpos e estruturas causadoras das principais anomalias magnéticas nos diferentes domínios magnéticos. Foram gerados quatro mapas nas direções 0° , 45° , 90° e 135° com o intuito de realçar as bordas dos corpos e definir os limites dos domínios magnéticos. O filtro do gradiente horizontal total tende a realçar as estruturas em direções perpendiculares a direção do filtro.

O filtro da direção 0° realçou estruturas com direção maiores que 45° , demarcando bem a semelhança dos domínios DM-1 e DM-3. Já o filtro na direção 90° mostrou estruturas na direção $\leq 45^\circ$ e caracterizou bem as estruturas existentes nos domínios DM-1 e DM-3, assim como o domínio DM-5.

Figura 77 – Mapa Magnético do Gradiente horizontal Total (GHT) direção 0°, com limites dos domínios magnéticos e diques.



Legenda: Contorno preto: limites dos domínios magnéticos (DM) e diques (D1 e D2) (tracejado branco).

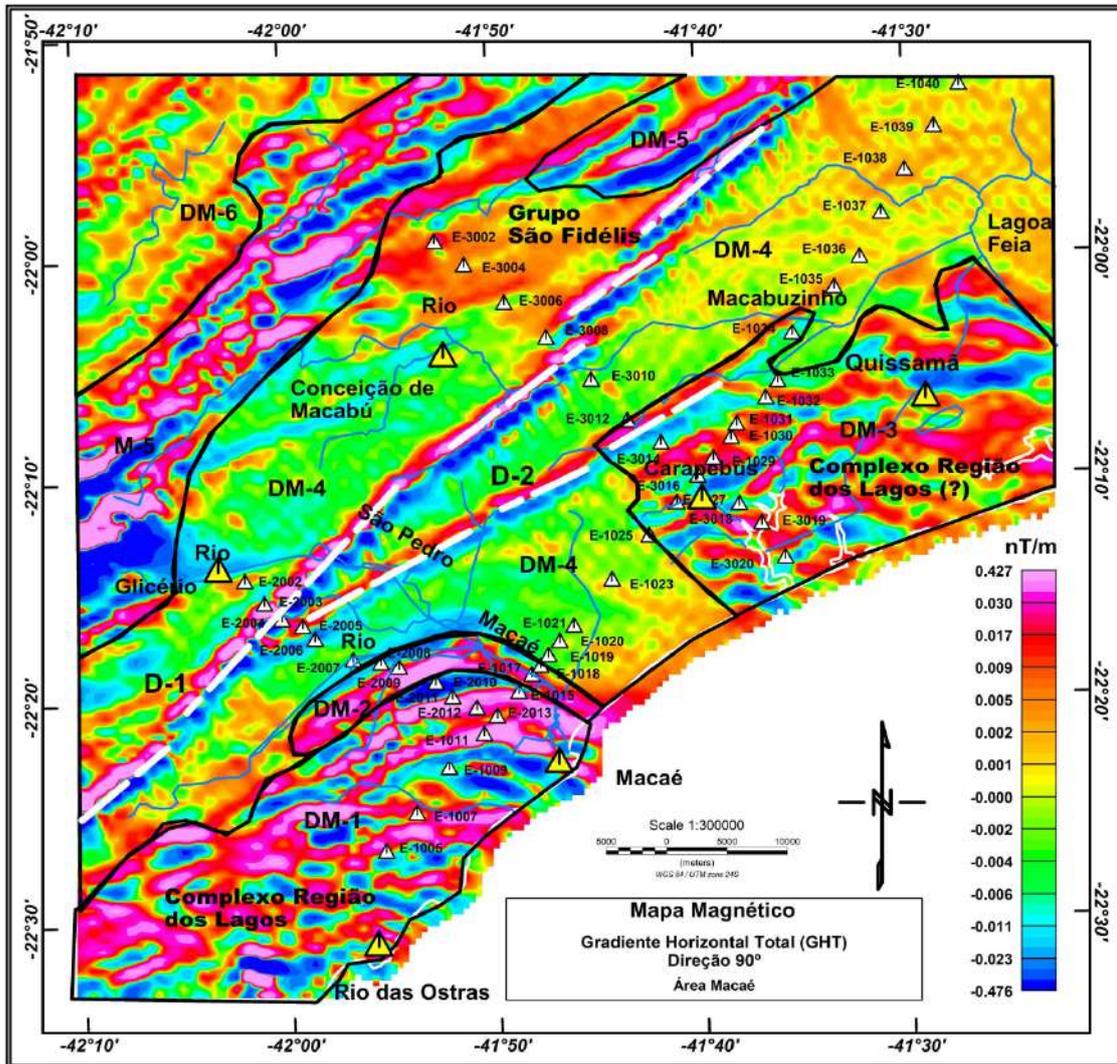
Nota: Os triângulos brancos representam as estações gravimétricas e magnetotélúricas e os triângulos amarelos as cidades.

Fonte: O autor, 2016.

O propósito é evidenciar o contato dos domínios correspondentes ao Complexo Região dos Lagos e Grupo São Fidélis e outras estruturas existentes.

Na Figura 77 e 78 ficaram evidentes os limites dos domínios DM-1 e DM-3 anteriormente demarcados no mapa do sinal analítico e da primeira derivada vertical. Nestes mapas também foi realçada a existência de estruturas paralelas de direção SW-NE, e uma grande estrutura em forma de bumerangue no limite dos domínios DM-1 e DM-2 com o DM-4.

Figura 78 – Mapa Magnético do Gradiente horizontal Total (GHT) direção 90°, com limites dos domínios magnéticos e diques.



Legenda: Contorno preto: limites dos domínios magnéticos (DM) e diques (D1 e D2) (tracejado branco).

Nota: Os triângulos brancos representam as estações gravimétricas e magnetotélúricas e os triângulos amarelos as cidades.

Fonte: O autor, 2016

5.2.2 Lineamentos Magnéticos

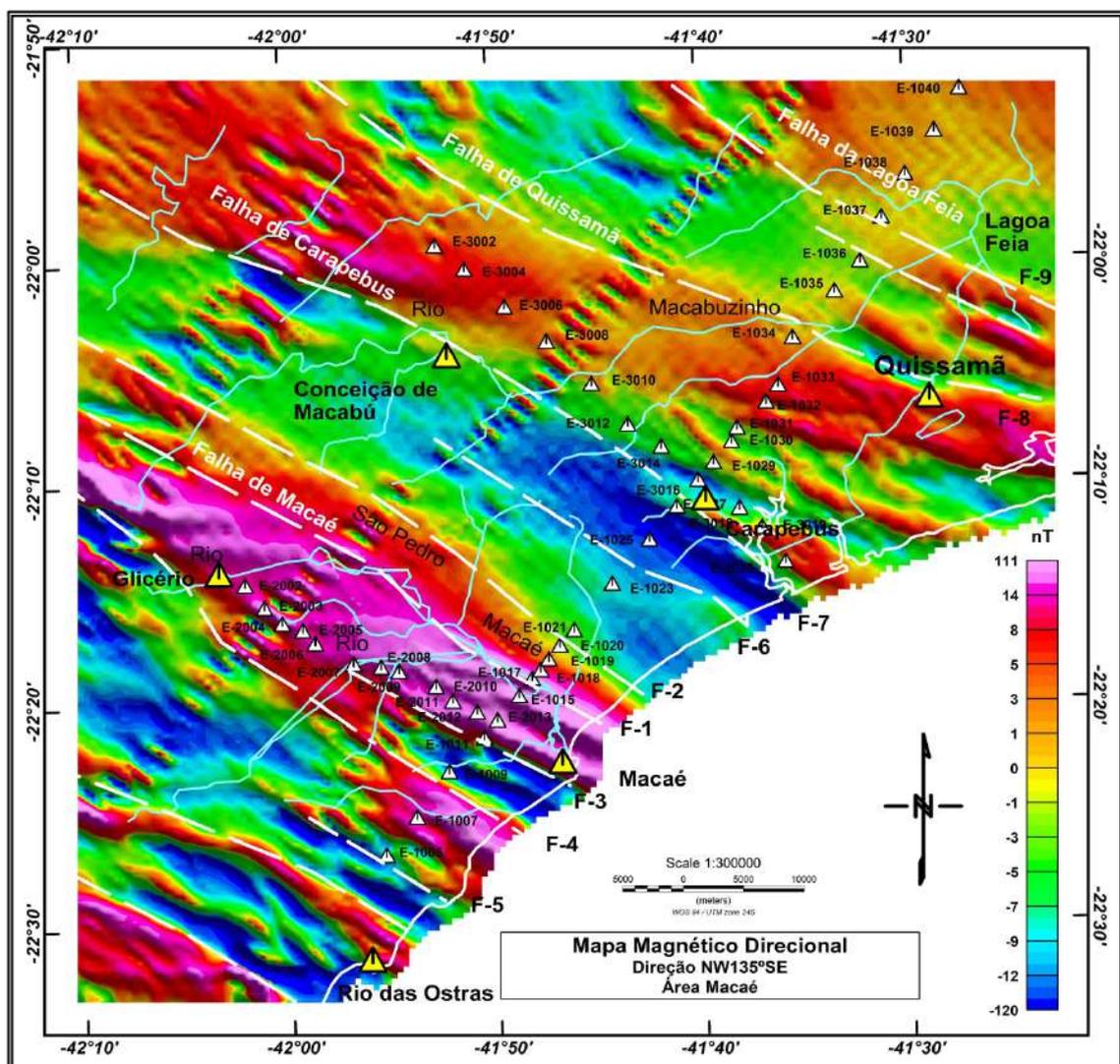
5.2.2.1 Falhas e Fraturas de direção NW

Os filtros direcionais são aplicados com o objetivo de realçar as feições com tendências lineares em determinadas direções. Aplicou-se o filtro direcional de

azimute 135° para realçar lineamentos de direção NW-SE que correspondem a estruturas que cortam o perfil 01 (Figura 79).

Os lineamentos observados correspondem a falhas de transferência na região de direção NW-SE citadas na literatura (MEISLING *et al.*, 2001) e mapeadas por Lourenço *et al.* (2014), sendo as principais: falha de Macaé (F-1 e F-2), falha de Carapebus (F-7), falha de Quissamã (F-8) e falha da Lagoa Feia (F-9). A região entre as falhas F-1 e F-7 apresenta uma baixa intensidade magnética nos mapas e poderia ser um graben preenchido por rochas com baixa susceptibilidade magnética. A falha (F-9) é uma falha que limita a margem da Lagoa Feia.

Figura 79 – Mapa Magnético Direcional NW-SE (filtro direcional de 135°) com possíveis falhamentos.

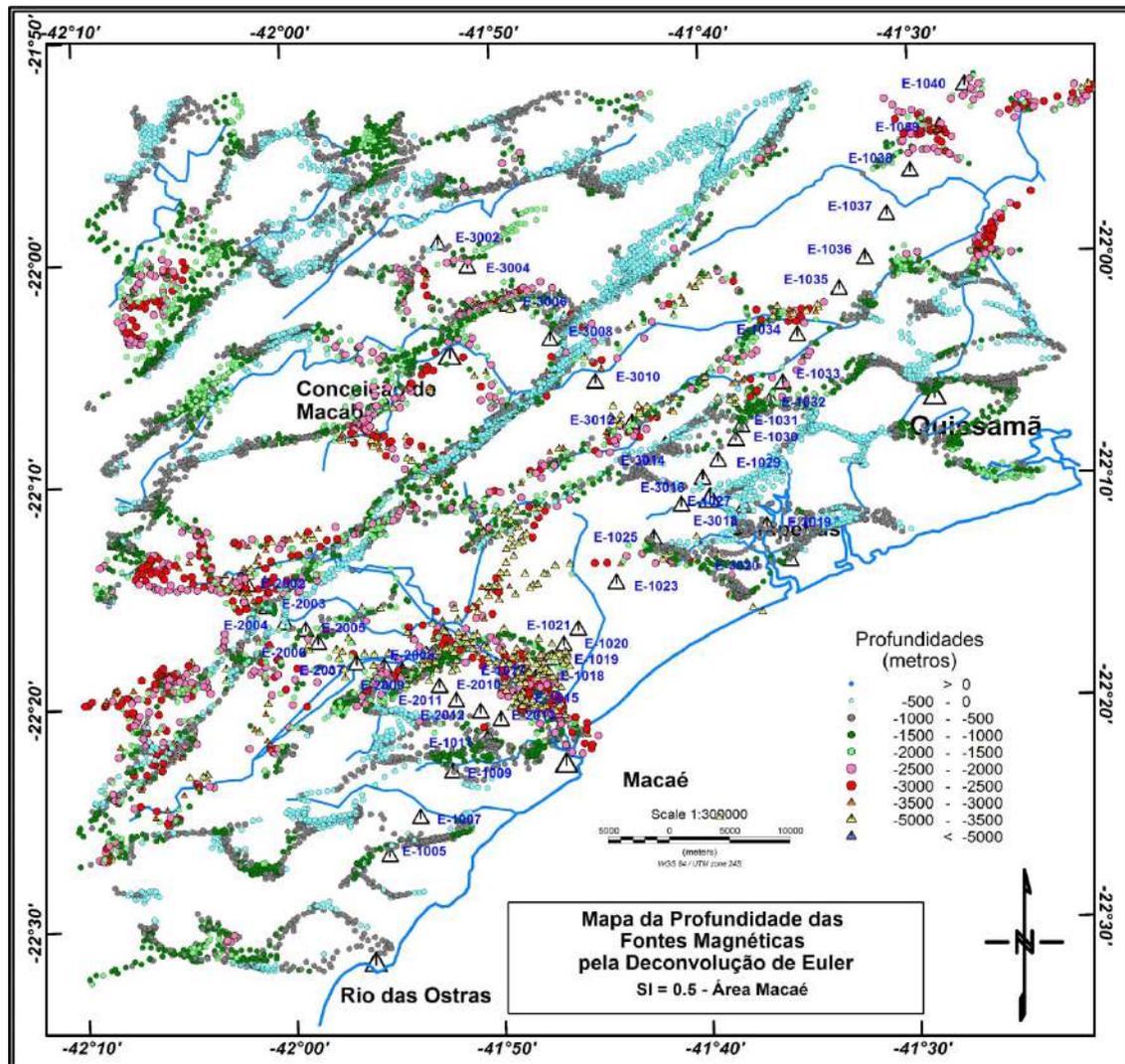


Nota: Os possíveis falhamentos estão tracejado em branco. São eles: falhas de Macaé (F1 e F-2), falha de Carapebus (F-7), falha de Quissamã (F-8) e falha da Lagoa Feia (F-9).
Fonte: O autor, 2016.

5.2.2.2 Diques de diabásio de direção NE

A deconvolução de Euler foi introduzida na exploração do campo potencial por Reid *et al.* (1990). Este método de inversão vem sendo aplicado em perfil 2D ou grid 3D de dados de campo potencial. O seu princípio é baseado no conteúdo espectral dos dados do campo potencial, e permite que tais parâmetros como posição, profundidade e natureza da fonte magnética geradora, sejam estimados semiautomaticamente a partir dos dados observados. Nesse trabalho utilizou-se o grid e a rotina Euler 3D do Oasis Montaj para cálculo das profundidades.

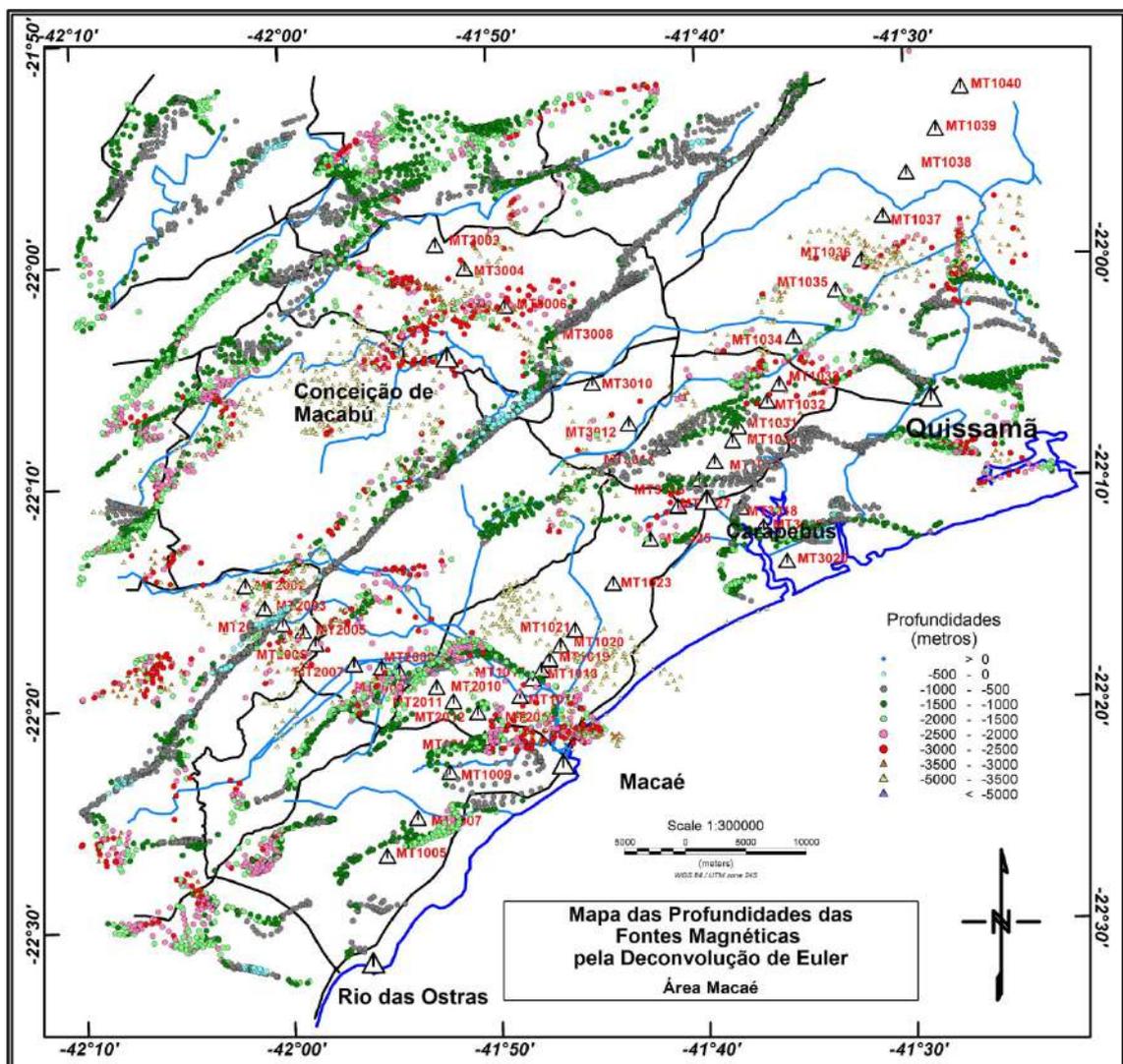
Figura 80 – Mapa das profundidades das fontes magnéticas pela Deconvolução de Euler, com índice estrutural SI = 0.5.



A técnica foi aplicada nos dados magnéticos com intuito de identificar possíveis contatos, lineamentos e outras estruturas existentes. Foram utilizados os índices estruturais $SI = 0, 0.5, 1.0, 1.5$ e 2.0 ; que correspondem a contatos, falhas, diques e soleiras respectivamente (THOMPSON, 1982; REID *et al.*, 1990; REID *et al.*, 2003).

Os resultados obtidos com índices estruturais (SI) 0.5 e 1.0 foram os que apresentaram soluções mais agrupadas e definem melhor as direções dos lineamentos, conforme observados nas figuras 80 e 81.

Figura 81 – Mapa das profundidades das fontes magnéticas pela Deconvolução de Euler, com índice estrutural $SI = 1.0$.



Nota: Mapa obtido a partir do mapa do campo magnético anômalo.
Fonte: O autor, 2016.

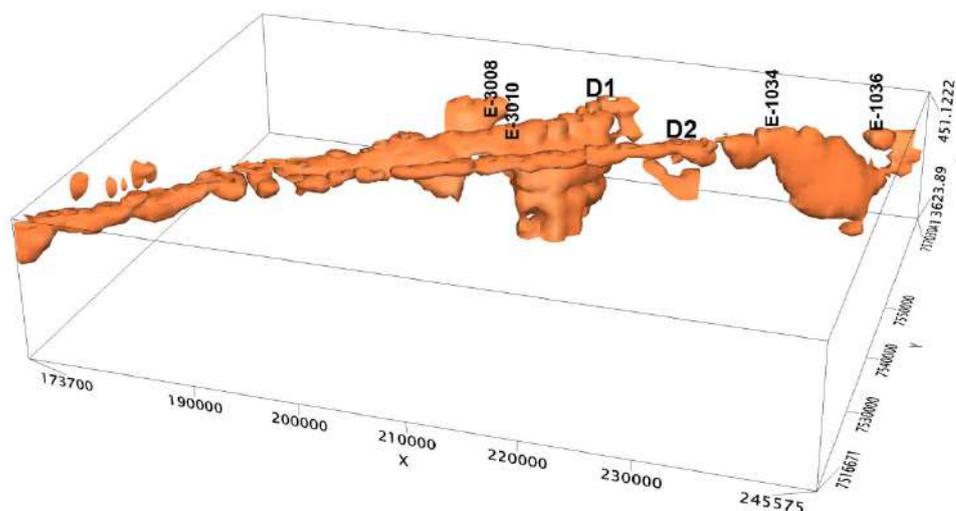
A magnetometria permitiu cartografar na área de tese uma estrutura linear com 70 km na direção N50E, em diversos mapas magnéticos: primeira derivada (Figura 75), Anomalia de Sinal Analítico (Figura 76), Gradiente Horizontal Grau Zero (Figura 77). A estrutura foi correlacionada ao Dique de diabásio Saquarema-Campos - DSC (v. item 2.2.1). Na porção central da área da tese o DSC se desmembra em dique subsidiário de direção N60E (Figura 82).

Na altura da seção 02, o corpo principal do DSC tem sua fonte do sinal magnético aflorante, apresentando forte intensidade magnética com até 1 km de profundidade. O corpo subsidiário está coberto por espessa capa de material diamagnético, situando-se entre 2 a 3,5 km de profundidade. Nos mapas de deconvolução de Euler, as profundidades aumentam ao longo da mesma linha, o que indica que o mergulho da estrutura é vertical, tratando-se de dois diques. Segundo Schmitt *et al.* (2004) e Thomaz-Filho *et al.* (2000, 2008) na região ocorreu um intenso magmatismo, relacionado aos eventos desde o Mesozoico.

As direções dos lineamentos observados nos mapas temáticos e das Figuras 80 e 81 podem ser explicadas, pois segundo Fonseca *et al.* (1984) as estruturas da Faixa Ribeira têm a sua orientação predominante NE-SW, mas o complexo Região dos Lagos apresenta uma estruturação orientada ortogonalmente de direção NW-SE.

Schmitt *et al.* (2008) citam a ocorrência a de um tectonismo intenso na região justificando, assim, a concentração das fontes magnéticas neste intervalo mostrar uma crosta superior muito falhada. Além do processo de convergência litosférica ocorrido na região na formação do Gondwana, durante o processo de quebra deste continente, ocorreram movimentos distensivos e extensivos, que podem ter ocasionado falhamentos na crosta.

Figura 82 – Imagem 3D dos diques de diabásio provavelmente do Mesozoico (DSC) D1 e D2.



Fonte: O autor, 2016.

Na Figura 82 observa-se que o dique D1 parece ter seu ponto de extrusão entre as estações E-3008 e E-3010, pois o corpo na imagem 3D gerada na rotina VOXI vai a uma profundidade acima de 13 km. Esta estrutura é oriunda dos processos magmáticos em diferentes períodos ocorridos na região.

5.3 Dados Gravimétricos

Os mapas gravimétricos expressam as informações sobre os contrastes laterais de densidade. Na geração dos mapas, foi utilizado o valor médio de $2,67 \text{ g/cm}^3$ para densidade da crosta superior. O grid foi gerado com células de 500m de separação, utilizando a rotina Grid do Oasis Montaj.

O maior problema na interpretação gravimétrica é separar as anomalias de interesse daquelas provenientes de efeitos sobrepostos de outras feições. A distinção das anomalias pode ser realizada através de técnicas de separação regional-residual que visam remover o campo regional de modo a destacar o campo residual (TELFORD *et. al.*, 1990).

5.3.1 Altos e Baixos gravimétricos relacionados à unidades litológicas

O mapa Bouguer da área de tese (Figura 84) mostra as variações do campo gravimétrico, com variações entre +2,5 mGal e -3,9 mGal. A superposição entre o mapa Bouguer e os mapas geológicos disponíveis (Figuras 6 e 7) permite estabelecer as seguintes correlações:

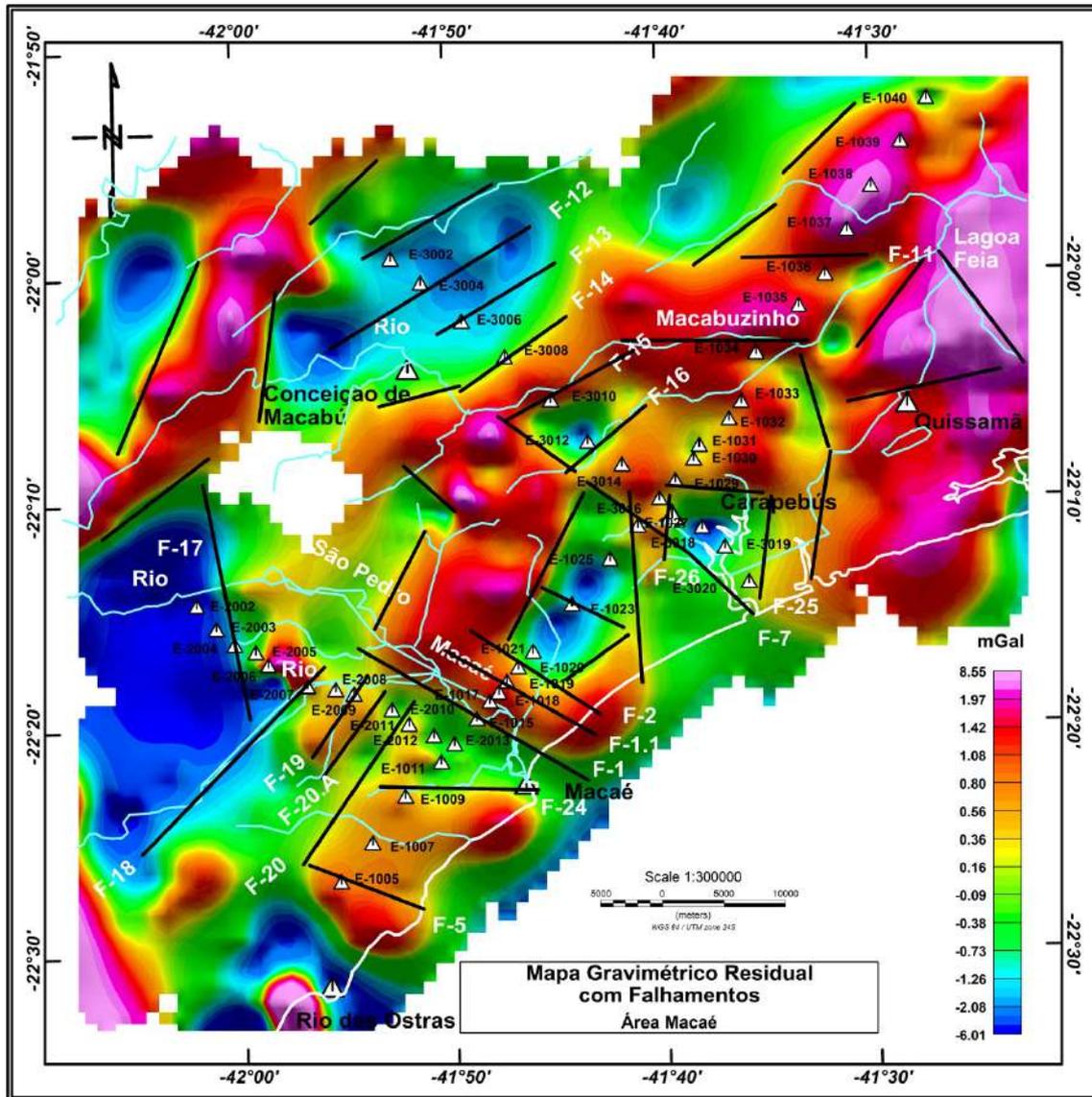
1 - Nos baixos gravimétricos ($-2,0 > x > -3,0$ mgal) da área estão localizados: Granito Sana, intrusão circular a norte de Rio das Ostras com excelente ajuste com o maior baixo gravimétrico da área; faixa de gnaiss homogêneo do Grupo São Fidélis no baixo no vértice NW da área; corpos intrusivos da Suíte Imbé no baixo a norte de Conceição de Macabu. As rochas destas unidades têm em comum a predominância de composição granítica.

2 - O alto gravimétrico ($1,4 < x < 2,3$ mgal) a oeste de Conceição de Macabu ocupa a área de afloramento Complexo Trajano de Morais, com bom ajuste.

3 - O dique Saquarema-Campos (DSC) (Figura 82) que foi claramente cartografado pela magnetometria, não tem expressão significativa no mapa Bouguer.

O restante da área da tese é ocupado por rochas do Grupo São Fidélis e do Complexo Região dos Lagos. Apesar do contraste de densidade entre as rochas destas duas unidades (Tabela 8) não há correlação significativa entre o mapa Bouguer e os mapas geológicos que forneça uma assinatura gravimétrica distintiva.

Figura 83 – Mapa Gravimétrico Residual com lineamentos.



Nota: Os traços pretos representam possíveis lineamentos.

Fonte: O autor, 2016.

5.3.2 Lineamentos Gravimétricos

No mapa de anomalia Bouguer (Figura 83), em linhas gerais, nota-se que existem estruturas de direção SW-NE, direção NW-SE e E-W, assim como já observado no mapa magnético. O lineamento F-1 representa o contato do Complexo Região dos Lagos com o Grupo São Fidélis, na Figura 83 observa-se que este contato apresenta um gradiente gravimétrico alto, variando de -0,4 à 1,7 mgal em uma distância de 500 m.

O lineamento F-16 seria o contato do Grupo São Fidélis Kinzigítico com o São Fidélis biotita gnaiss. O Lineamento F-18 corresponde à falha de empurrão do Complexo Região dos Lagos com o Grupo São Fidélis (SCHMITT *et al.*, 2004).

Os lineamentos F-1, F-2, F-5, F-7 e F-11 são coincidentes com os encontrados nos mapas magnéticos (Figura 79, 80 e 81) e geológico (Figura 7). No mapa gravimétrico residual estão três grandes baixos gravimétricos, o primeiro na seção 01 entre as estações E-1019 e E-1027, atingindo um valor de -1.5 mgal, com uma extensão de 20 km. Essa região corresponde a um baixo magnético observado nos mapas da Primeira Derivada e do Sinal Analítico o que poderia ser indício de um sistema distensivo (divergente). No mapa geológico de Silva e Cunha (2001b) esta região corresponde ao Grupo Búzios e para Almeida *et al.* (2012b) representa o Grupo São Fidélis. O segundo baixo estaria próximo à cidade de Glicério no início da seção 02, e apresenta um valor de -4 mgal, com 8 km de extensão no Grupo São Fidélis. O terceiro próximo de Conceição de Macabu, no início da seção 03, apresenta um valor de -1.5 mgal e seria uma grande estrutura de direção SW-NE com aproximadamente 45 km de extensão.

No mapa gravimétrico residual, foi observado a existência de contatos lineares entre domínios gravimétricos, aplicou-se filtros para geração de mapas direcionais com o objetivo de separar e realçar as estruturas nas direções predominantes. A técnica surtiu efeito realçando as estruturas nas duas direções predominantes SW-NE e NW-SE (Figura 84 e 85).

Na Figura 84 estão caracterizados lineamentos que definem grandes estruturas na direção SW-NE coincidentes com rios da região. Na parte SWS do mapa próximo à cidade de Rio das Ostras há um baixo gravimétrico que se alinha com o baixo gravimétrico G-1. O baixo gravimétrico G-2 poderia ser parte do baixo G-1, mas estaria deslocado como se tivesse ocorrido falhamentos de rejeito direcional com movimento dextral. Este processo tectônico parece ter ocorrido também na região norte da área nos baixos G-3, G-4 e G-5, onde se observa outro conjunto de baixos deslocados com falhamentos com um possível movimento dextral.

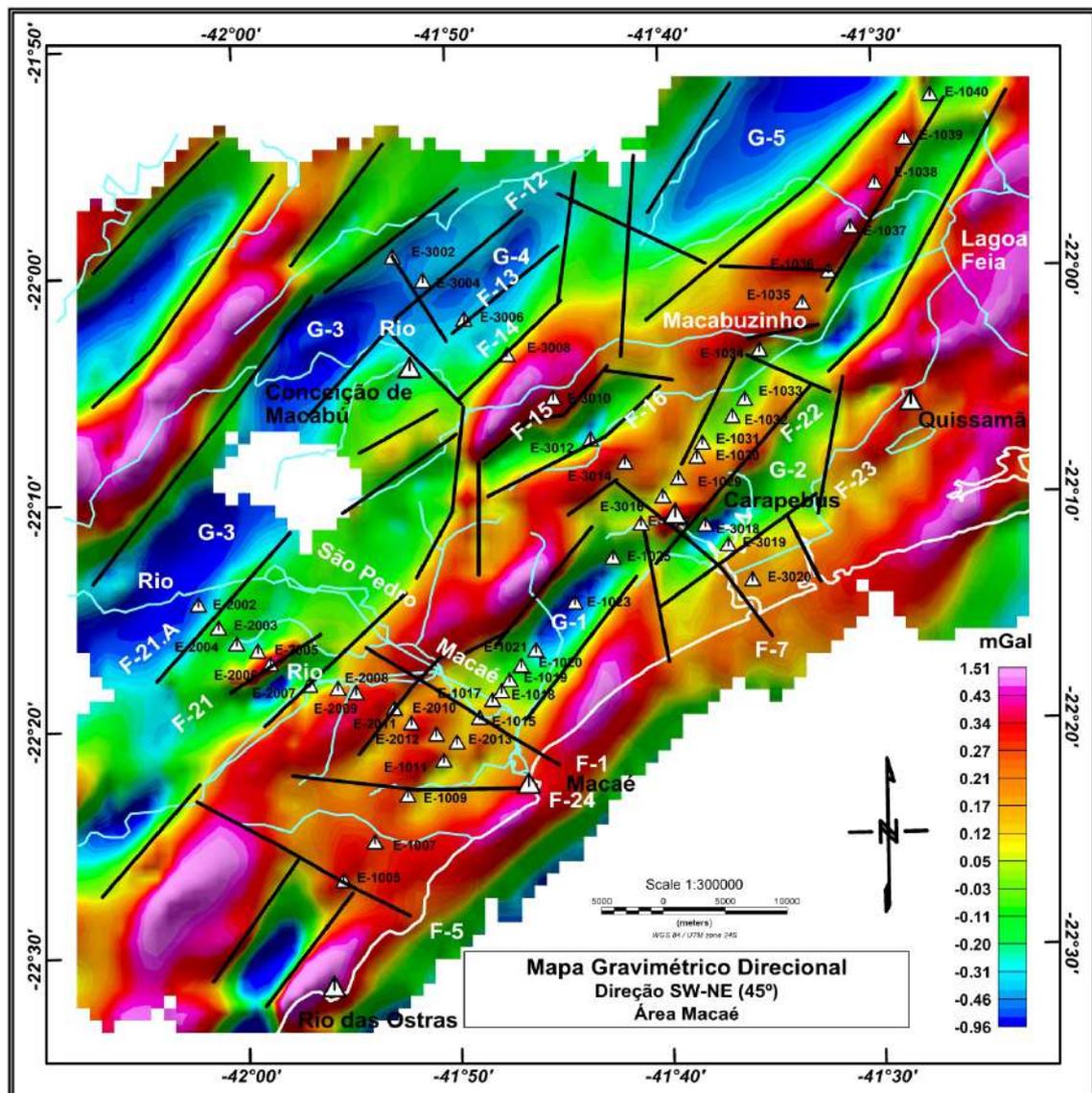
Ao se sobrepor a Figura 84 ao mapa de Zalán e Oliveira (2005), pode-se observar que os lineamentos e os baixos gravimétricos coincidem com lineamentos marcados por esses autores. Assim, poderiam ser incluídos na categoria de rifte

Litorâneo associado ao Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil (SRCSB).

A região norte do mapa, em termos litológicos, é caracterizada por intrusões da Suíte Imbé sobre o Grupo São Fidélis mapeada por Almeida *et al.* (2012a).

Na estação E-2006 e entre as estações E-3008 e E-3010 existem duas anomalias isoladas que podem ser relacionadas à estrutura de um dique observado nos mapas magnéticos.

Figura 84 – Mapa Gravimétrico Direcional SW-NE com lineamentos.



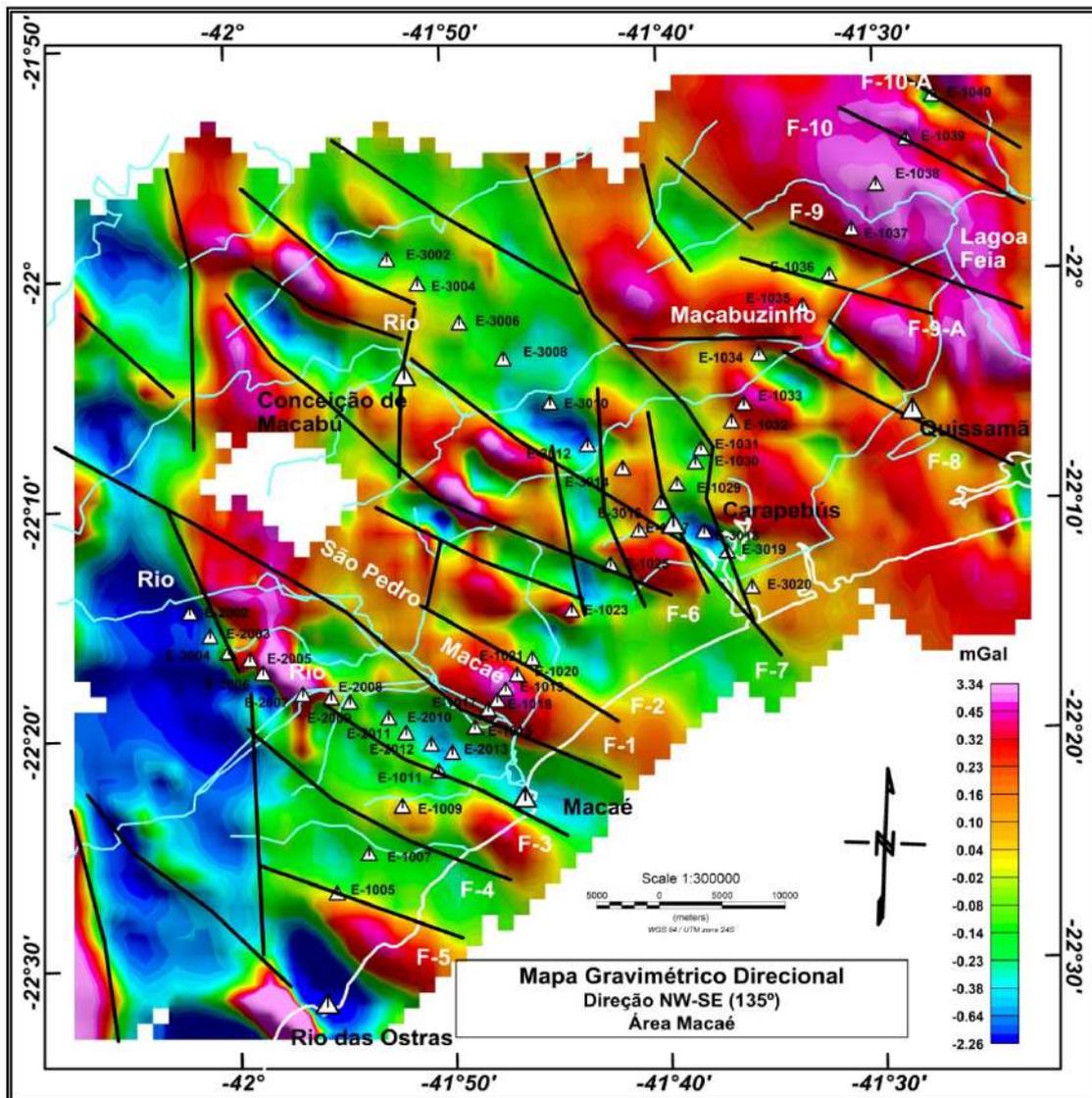
Nota: Os traços pretos representam possíveis lineamentos.

Fonte: O autor, 2016.

No mapa direcional da Figura 84 estão presentes os lineamentos F-1, F-5 e F-7 que correspondem a bordas de baixos gravimétricos de direção NW-SE. Estes lineamentos são observados também nos mapas gravimétricos e magnéticos.

No mapa gravimétrico direcional NW-SE (Figura 85), foi possível caracterizar lineamentos que definem grandes estruturas nessa direção. Após análise e superposição deste mapa com o mapa direcional magnético NW-SE (Figura 79), verificou-se que são coincidentes com os anteriormente identificados como F-1 e F-2 (falha de Macaé), F-3, F-5, F-7 (falha de Carapebus), F-8 (falha de Quissamã) e F-9 (falha da Lagoa Feia). Observa-se também que há grandes lineamentos de direção N-S na área.

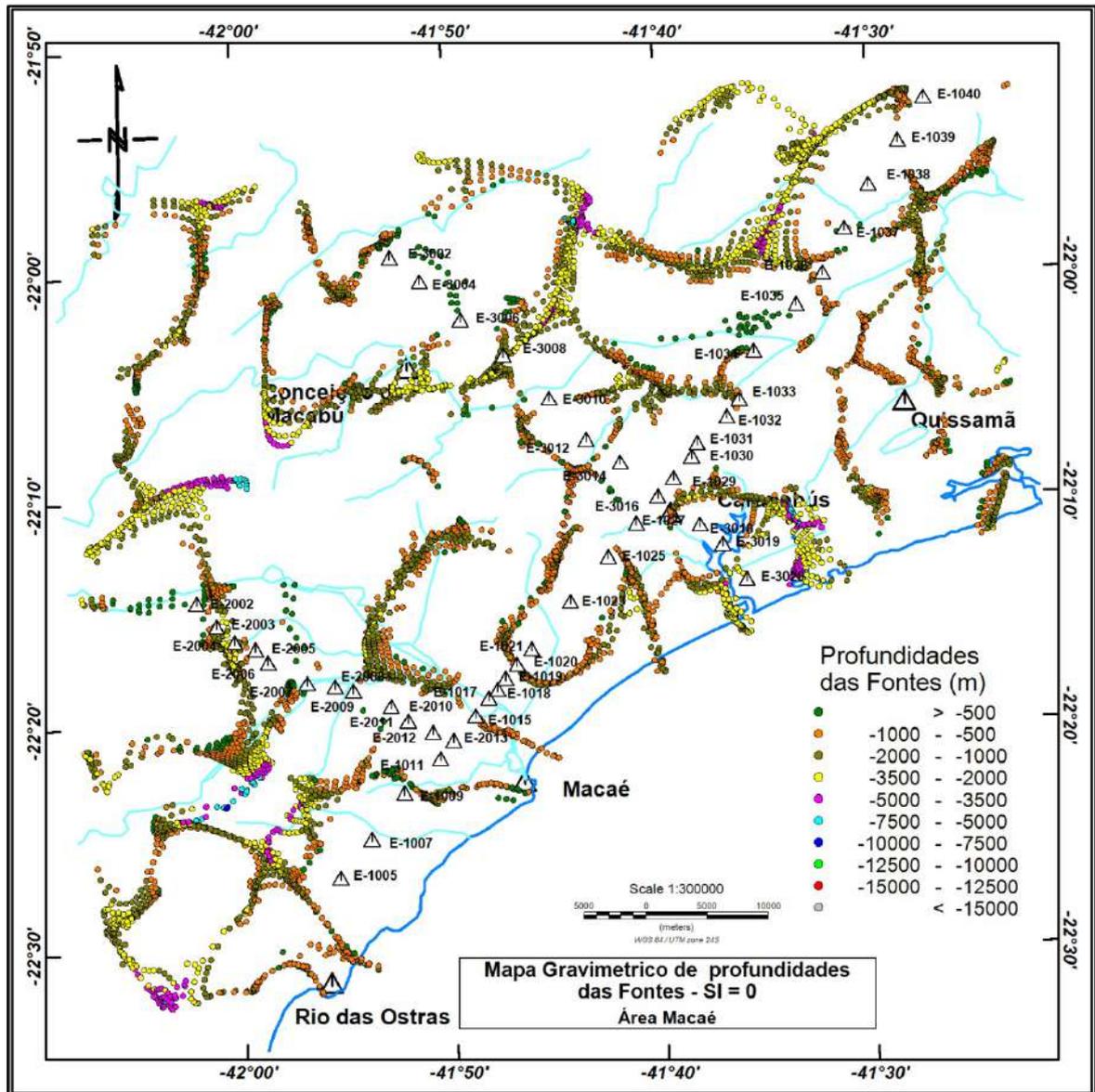
Figura 85 – Mapa Gravimétrico Direcional NW-SE com lineamentos.



Nota: Os traços pretos representam possíveis lineamentos.

Fonte: O autor, 2016.

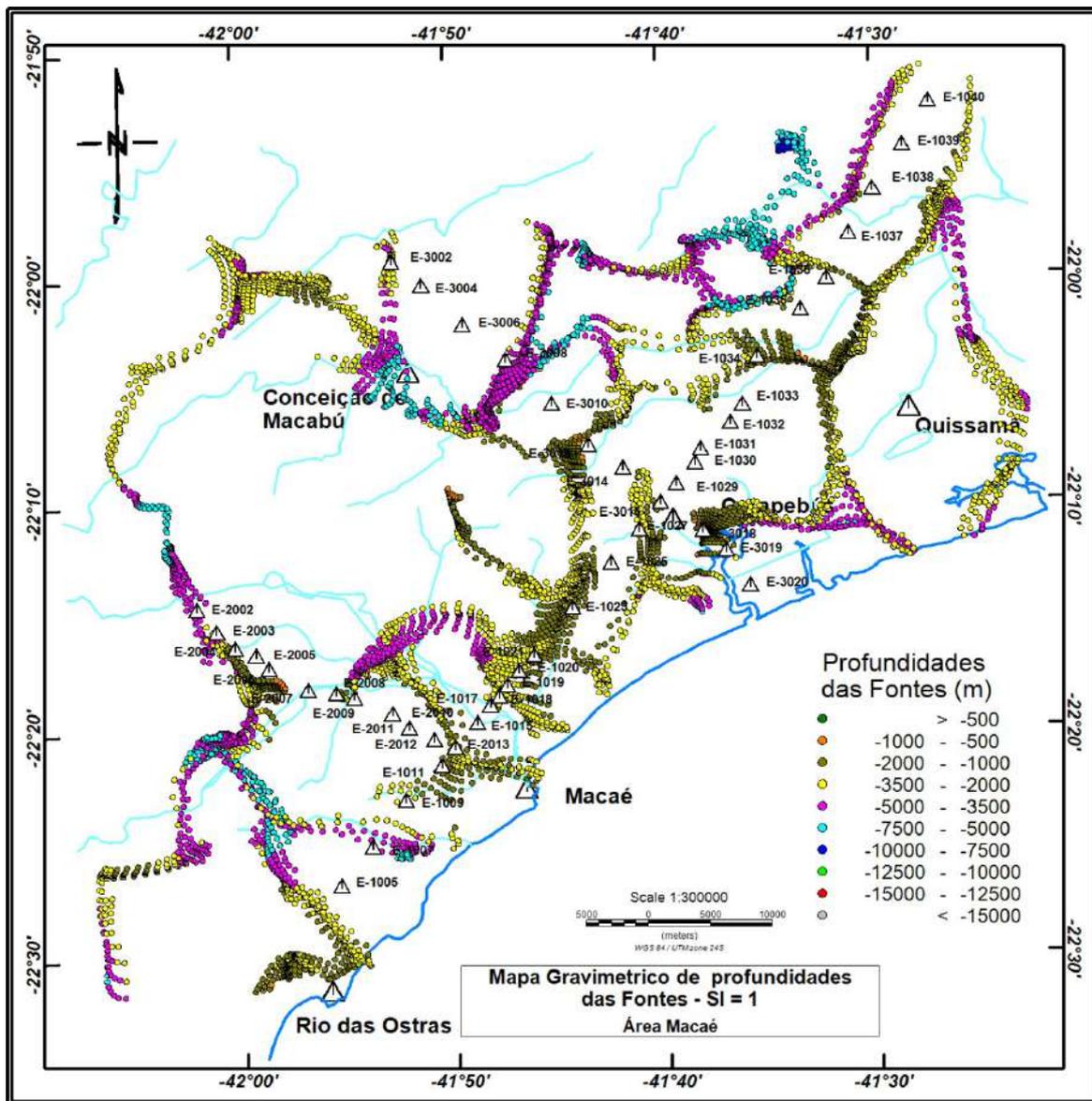
Figura 86 – Mapa das profundidades das fontes gravimétricas pela Deconvolução de Euler, com índice estrutural $SI = 0$



Fonte: O autor, 2016.

O mapa de Deconvolução de Euler com $SI = 0$ (Figura 86) mostra que a maior parte das fontes estão situadas entre as profundidades de 500 e 3500 m. E o mapa com $SI = 1$ (Figura 87) apresenta profundidades entre 1000 e 7500 m. Essas indicações de contatos e/ou falhas mapeados pelo método de deconvolução de Euler corroboraram com alguns lineamentos traçados por imagens, cartas topográficas e pela geologia de superfície.

Figura 87 – Mapa das profundidades das fontes gravimétricas pela Deconvolução de Euler, com índice estrutural SI = 1.0.



Fonte: O autor, 2016.

De modo geral a junção dos métodos foi importante para definir os lineamentos observados. As estimativas das profundidades servem de base para interpretação, pois possibilitam fazer a associação das anomalias gravimétricas com as estruturas geológicas.

5.4 Modelagem 2D - Seções Magnetotelúricas

Para geração da inversão 2D das seções MT foi utilizada a licença do software Winglink da Geosystem de propriedade do Observatório Nacional. Devido à proximidade dos perfis com a linha de costa, adotou-se o procedimento de inserir uma camada com resistividade de $0.3 \Omega.m$ na respectiva posição em relação aos perfis. Este procedimento faz-se necessário devido à água salgada apresentar alta condutividade (CHAVE *et al.*, 1991; EIDESMO *et al.*, 2002; CONSTABLE e WEISS, 2006).

Nos resultados obtidos da inversão nas três seções MT, identificou-se que na região ocorre uma divisão da crosta em três camadas. Estas características são compatíveis com definição de Gough (1986), propondo a crosta dividida em três camadas (superior, média e inferior) com diferenciação nas suas propriedades geofísicas.

Nas três seções observam-se blocos resistivos separados por condutores verticais que se conectam à camada média condutiva. As camadas superior e média apresentam valores de resistividade e espessura variadas.

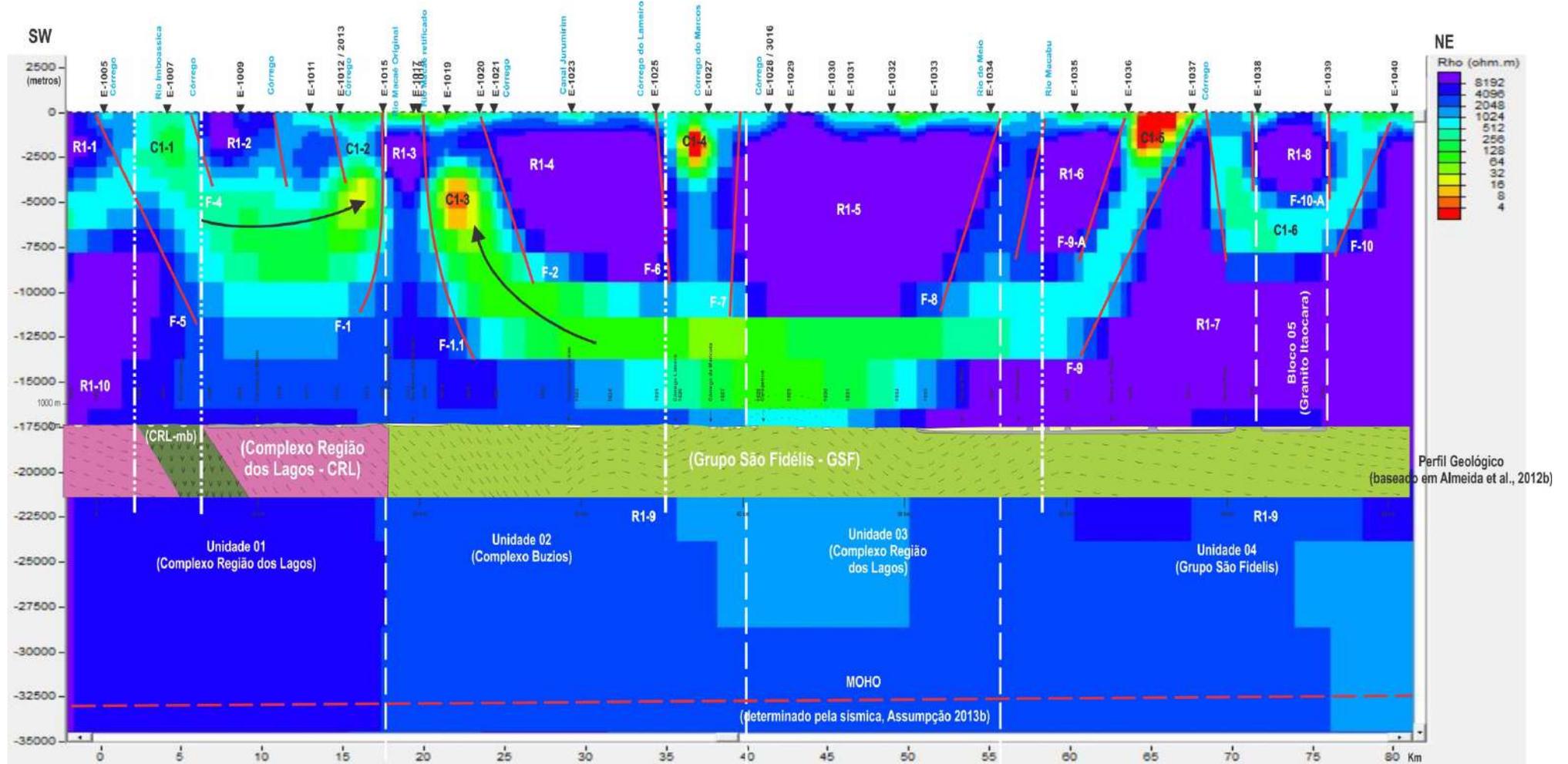
A resistividade observada na modelagem é aproximadamente igual para as rochas pré-cambrianas encontradas na área de tese, com valores acima de $1000 \Omega.m$, típicos para rochas metamórficas de alto grau (Figura 23).

Foram aqui denominados condutores verticais, aqueles que possuem largura reduzida e percorrem grande profundidade, com mergulhos (ângulo com o plano horizontal) entre 60° e 90° . Os condutores verticais são representados, em mapa, por estruturas lineares com direção (*strike*) oblíqua a ortogonal em relação à direção da seção MT onde foram caracterizados. Excluindo os contatos geológicos, os condutores verticais podem representar zonas de fraturamento ou de falha de grande extensão vertical, associados ou não a diques de diabásio. Neste sentido, a seção 01 MT interceptaria condutores verticais de direção NW e as seções 2 e 3 MT condutores verticais de direção NE. Nas seções anteriores deste capítulo estruturas com tais direções foram descritas na área de tese através da geologia e da geofísica.

Condutores profundos foram imageados em todas as seções e sua interpretação geológica é dificultada pela ausência de dados de observação direta, como poços profundos.

5.4.1 Seção Magnetotelúrica – Perfil 01

Figura 88 – Perfil 01 - Seção Magnetotelúrica com interpretação.



Nota: Nela estão marcadas as falhas (traços vermelhos), os limites das unidades (tracejado branco), os blocos resistivos (R1-X e C1-X), a MOHO (tracejado vermelho) e também está sobreposto o perfil geológico da seção. As setas pretas indicam o movimento das camadas devido à colagem do CRL e GSF.

Fonte: O autor, 2016.

5.4.1.1 Blocos Resistivos

Na seção 01 MT (Figura 88) está evidenciada a divisão em três camadas. Na camada superior, em toda a seção, observam-se blocos resistivos separados por faixas condutivas verticais. Na base da crosta superior existe uma camada condutiva a cerca de 12 km de profundidade. Abaixo dela, a crosta apresenta resistividade menor que seu terço superior. Para interpretação destas estruturas, a seção foi dividida em quatro unidades de acordo com a geologia de Silva e Cunha (2001b), que são as seguintes:

Na unidade 01 observam-se dois corpos resistivos R1-1 e R1-2 com valor superior a 8000 Ω .m, separados pelo corpo condutivo C1-1. A resistividade apresentada R1-1 e R1-2 é compatível com os valores estabelecidos para gnaisses na tabela de resistividade de Palacky (1987) (Figura 23). Os resistores R1-1 e R1-2 correspondem ao Complexo Região dos Lagos (PP3rl) (SILVA E CUNHA, 2001b e ALMEIDA *et al.*, 2012b). A foliação do gnaisse no bloco R1-1 tem mergulho de baixo ângulo (15°). No bloco R1-2 ocorre uma mudança de atitude das camadas, e o mergulho se eleva para 50° para NE nas proximidades da Falha de Macaé (F-1).

Na unidade 02 estão evidenciadas duas estruturas resistivas R1-3 e R1-4 com valor de resistividade superior a 8000 Ω .m.

O resistor R1-3 tem as suas bordas coincidindo em superfície com duas grandes falhas paralelas F-1 e F-1.1 (Falhas de Macaé). Estas falhas estendem-se até profundidade aproximada de 12 km chegando à terceira camada (R1-9). O resistor R1-3 corresponde a um alto magnético que está evidenciado nos mapas temáticos: sinal analítico, primeira derivada, gradiente horizontal.

O corpo resistivo R1-4 está delimitado por dois corpos verticais (C1-3 e C1-4). A SW tem a falha (F-2) (Falha de Macaé) mergulhando para NE, a outra borda do resistor R1-4 a NE corresponde à falha de Carapebus (F-6). Embora apresente características em termos de resistividade semelhantes aos resistores R1-3, R1-5 e R1-6, nos mapas magnéticos, este corpo corresponde a uma região de baixa intensidade magnética. No mapa gravimétrico (Figura 84), esta região pode ser correlacionada a um grande baixo gravimétrico (G-1) com uma extensão aproximada de 20 km.

Embora o resistor R1-4 apresente valor de resistividade alto semelhante aos outros blocos, as outras propriedades físicas (susceptibilidade e densidade) demonstram tratar-se de uma rocha diferente dos demais blocos. Em relação à susceptibilidade, pode ser um corpo diamagnético e em relação à densidade pode tratar-se de uma rocha com alta porosidade sem presença de fluidos.

Na unidade 03 está evidenciada uma grande estrutura resistiva R1-5 com valor de resistividade superior a 8000 Ω .m. Esta estrutura tem como limites as falhas F1-7 e F1-8, e é bem evidenciada nos mapas magnéticos temáticos, embora com menos intensidade que as estruturas da unidade 01. Devido à semelhança dos padrões das anomalias observadas nos mapas magnéticos sugere-se que poderia ser uma porção do Complexo Região dos Lagos corroborando com o mapa geológico de Silva e Cunha, 2001b.

Na unidade 04 existem três blocos resistivos R1-6, R1-7 e R1-8. Os blocos R1-6 e R1-7 estão separados pelo corpo C1-5. O limite do C1-5 com o R1-7 corresponde a uma falha (F-9) que estende-se desde a superfície até a camada média condutiva. Esta falha estaria associada a uma das bordas da Lagoa Feia e foi mapeada por Lourenço *et al.* (2014) como uma grande falha de transferência.

O resistor R1-6, fazendo um georreferenciamento com a Figura 82, corresponde à região do dique DSC (D2) em subsuperfície, que mergulha em torno de 45° para NE. Este corpo em superfície tem uma cobertura do Grupo Barreiras, intercalada com uma cobertura aluvionar.

A base dos resistores destas unidades chega a atingir uma profundidade aproximada de 8 km (R1-4 e R1-6) e 10 km (R1-5). Existe um grande resistor R1-7 com profundidade de 20 km.

Abaixo da camada resistiva nas três unidades 01, 02 e 03 aparece uma camada condutiva cujo valor de resistividade está entre 512 e 2048 Ω .m

Em relação à geologia de superfície os resistores das unidades 02, 03 e 04 correspondem em superfície ao Grupo São Fidélis (ALMEIDA *et al.* 2012b) (NPsfbgn), sendo que Silva e Cunha (2001b) mapearam a região que recobre o resistor R1-5 como parte do Complexo Região dos Lagos. As suas características físicas (resistividade) correspondem a rochas ígneas.

Na parte estrutural, observa-se que a foliação das camadas inicia-se com um mergulho em torno de 50° para NE e, a partir da estação E-1020, observam-se

dobramentos formando anticlinais e sinclinais até o Rio Macabu (E-1034). A partir desse ponto as camadas passam a ter mergulho de baixo ângulo em torno de 5° para NE até o final do perfil (E-1040) na região próxima à planície Campista.

Segundo Silva e Cunha (2001b) a falha F-2 traçada corresponde à falha que limita uma lente da Suíte Desengano. Assim como as falhas F-6 e F-7.

Na associação com a geologia, o resistor R1-8 seria um corpo intrusivo do granito Itaocara, inserido no condutor C1-6. As duas falhas que limitam o corpo C1-6 podem corresponder às bordas da Lagoa Feia. Essas falhas teriam extensão na parte marinha da bacia de Campos, assim como, prolongamento cruzando o graben de Itaocara (PAVIE, 2004)

A unidade 04, em superfície, corresponde ao Grupo São Fidélis (SILVA e CUNHA, 2001b; ALMEIDA *et al.*, 2012b). De acordo com esses autores, essa região apresenta ainda uma cobertura do grupo Barreiras, mesclada com áreas de cobertura aluvionar em algumas partes.

Os limites dos blocos resistivos observados nessa seção coincidem com falhas mapeadas em superfície e/ou pelos métodos potenciais. Em termos topográficos correspondem a rios e áreas de aluvião da região. Estas estruturas podem estar relacionadas a corpos condutivos verticais.

A terceira camada tem uma resistividade menor que a primeira camada entre 1024 e 8000 Ω .m. No extremo SW e NE observa-se que a resistividade desta camada na parte superior é mais alta. Nessa camada observam-se também formas convexas, possivelmente indicando uma descida de material ou inflexão da crosta.

5.4.1.2 Corpos Condutivos

5.4.1.2.1 Condutores verticais NW

A seção 01 MT é atravessada numerosos condutores verticais. Dois condutores verticais, C1-1 e C1-2 conectam a superfície a nível condutivo profundo a 4 km de profundidade.

Esses corpos C1-1 e C1-2 estão conectados a uma camada condutiva com 7 km de espessura e apresentam nos seus limites falhas profundas (F-1 e F-5) abaixo de 11 km. Esta ligação de C1-1 e C1-2 tem o seu topo abaixo do corpo resistivo R1-2 em torno 4 km e a sua base a aproximadamente 11 km.

O corpo condutivo C1-1 é aflorante na região do Rio Imboassica, tem resistividade entre 32 e 128 Ω .m e está situado abaixo das estações MT 1005 e 1007. Esse corpo corresponde ao metagabro (PP3rlmg), e tem valores de resistividade equivalente a rochas ígneas básicas intemperizadas (Figura 23).

O corpo C1-2 apresenta valores de resistividade entre 16 e 128 Ω .m. A geometria deste corpo é peculiar. O falhamento que delimita o corpo C1-2 com o resistor R1-3 coincide com o contato do Complexo Região dos Lagos com o Grupo Búzios/São Fidélis. Outros falhamentos menores e de menor profundidade dividem e limitam o corpo R1-2 em relação aos corpos C1-1 e C1-2, e também coincidem com córregos da região.

Essa estrutura tem a forma de U, semelhante a geoestruturas observadas em outros estudos em diversas partes do mundo. Nesses estudos os autores identificaram como regiões de suturas.

O condutor vertical C1-3 se desenvolve abaixo do limite nordeste da Falha de Macaé, separando dois blocos resistivos (R1-3 e R1-4) e tem valor de resistividade entre 4 e 128 Ω .m. Esta estrutura mergulha para nordeste e se conecta à camada condutiva horizontal situada a aproximadamente 10 km de profundidade. A outra borda dessa estrutura, assim como as falhas que delimitam o corpo C1-4, apresenta menor profundidade. A NE o corpo C1-4 é limitado por um conjunto de falhas mapeado por Lourenço *et al.* (2014) através de dados aeromagnéticos, sendo a principal a Falha de Carapebus.

Entre as estações E-1035 e 1036 aflora o condutor vertical C1-5, associado à Falha de Quissamã e às falhas E-W que condicionam a calha do Rio Macabu. Diretamente acima da Falha de Quissamã, verifica-se uma estrutura de baixa condutividade. Assim como o condutor C1-5, esta estrutura mergulha para sudoeste até se conectar com nível condutivo profundo a 10 km de profundidade.

No extremo nordeste da seção foram imageados condutores verticais com mergulhos divergentes que conectam um condutor raso (aluvião) ao condutor C1-6 a 5 km de profundidade. Em superfície foram mapeados lineamentos estruturais e

áreas aluvionares saturadas pertencentes à Falha da Lagoa Feia. Na extremidade sudeste da seção 01 MT, encontra-se estrutura similar àquela encontrada associada à Falha da Lagoa Feia, os dois condutores C1-1 e C1-2 estão conectando a superfície à camada condutiva profunda.

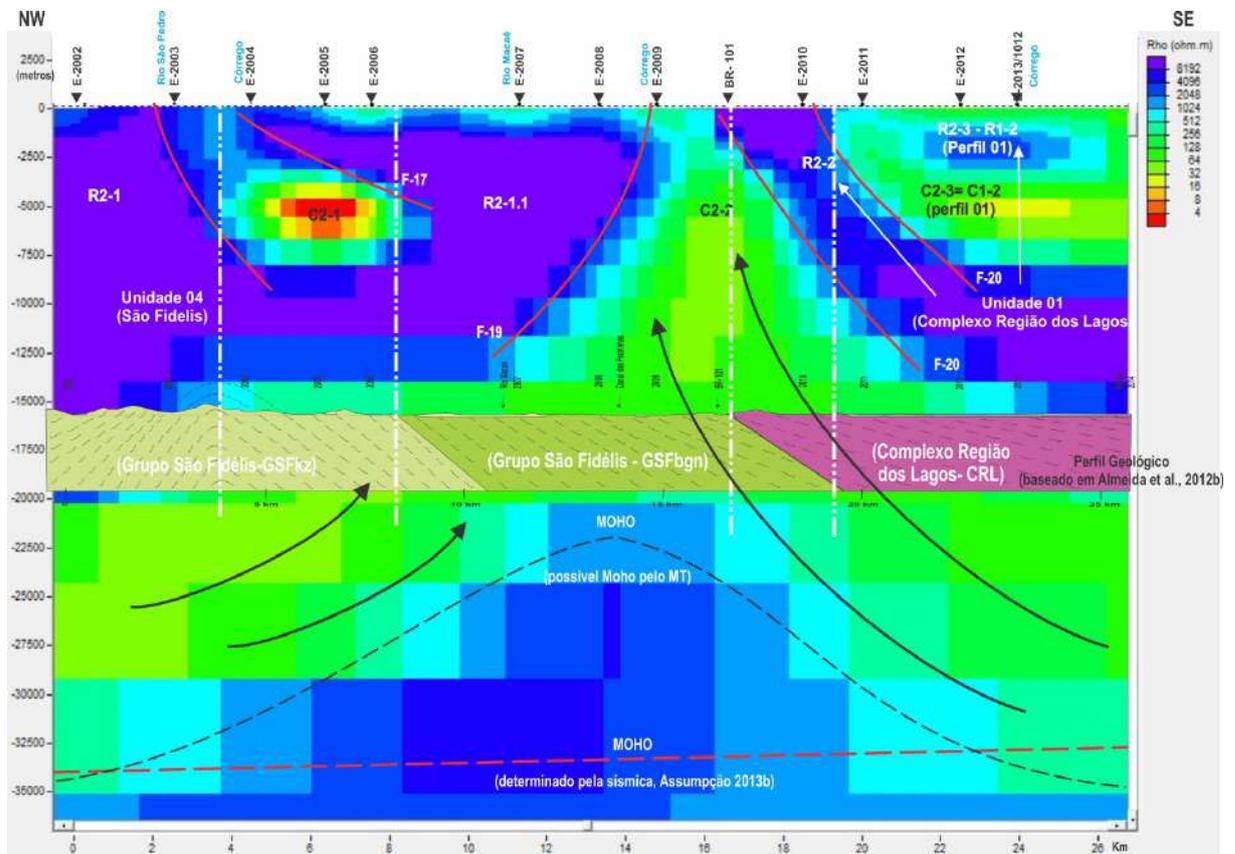
5.4.1.2.2 Condutores Profundos

A seção 01 MT registra um condutor profundo nivelado a 15 km, limitado pelos condutores verticais da Falha de Macaé (C1-3) e da Falha de Quissamã (C1-5) entre as estações E-1018 e E-1035. Esta estrutura domina a seção, com 45 km de amplitude. A nordeste e a sudeste deste condutor apresentam-se estruturas com geometria semelhante, mas com menor porte. A nordeste há o condutor C1-6, nivelado a 5 km de profundidade e com 9 km de amplitude, relacionado à Falha da Lagoa Feia. A sudeste há o condutor C1-1, nivelado a 5 km de profundidade e com 12 km de amplitude.

Todas as estruturas se assemelham a grabens limitados por falhas normais na borda e uma falha de descolamento na base. As falhas de Macaé e da Lagoa Feia compartimentam o graben maior dos grabens menores adjacentes e podem ser entendidas como falhas de transferência (v. cap. 3).

5.4.2 Seção Magnetotelúrica – Perfil 02

Figura 89 – Perfil 02 - Seção Magnetotelúrica com interpretação.



Nota: Na seção estão marcadas as falhas (traços vermelhos), os blocos resistivos (R2-X), a MOHO (tracejado vermelho), a possível subida da Moho pelo MT e também está sobreposto o perfil geológico da seção. As setas pretas indicam o movimento das camadas (cavalgamento) devido à colagem do CRL e GSF.

Fonte: O autor, 2016.

5.4.2.1 Blocos Resistivos

Na seção 02 MT (Figura 89), assim como na seção 01 MT, está evidenciada a divisão de três camadas. Na camada superior observam-se três blocos resistivos (R2-1, R2-2 e R2-3) separados por faixas condutivas. A resistividade dessas estruturas está acima de 8.000 $\Omega.m$.

Ao correlacionar as estruturas com o mapeamento geológico, verificou-se que os resistores R2-1 e R2-1.1 correspondem ao Grupo São Fidélis (NPsfbgn e NPsfkz). Dentro desses resistores observa-se um corpo condutivo C2-1. Os resistores R2-2 e R2-3 correspondem ao Complexo Região dos Lagos.

Em relação ao mergulho das camadas em análise regional, observa-se que no início do perfil (E-2002) as camadas mergulham para NW 68°, após a charneira entre as estações (E-2003 e E-2004), as camadas passam a mergulhar 70° para SE até a estação E-2006 que seria o contato do Grupo São Fidélis (NPsfkz) com o São Fidélis (NPsfbgn).

A partir desse ponto as medidas mostram um mergulho de 45° SE até o contato com o Complexo Região dos Lagos próximo a BR-101, onde ocorre uma nova mudança para 30° SE que vai diminuindo em direção a cidade de Macaé, chegando a 17° para SE.

5.4.2.2 Corpos Condutivos

A seção interceptou condutores verticais oblíquos à seção. Verifica-se, pelo mapa geológico (Figura 7) e pelas seções geológicas (Figura 75) sobrepostas às Seções MT que os condutores verticais não coincidem com importantes contatos geológicos. Ademais, o mergulho da foliação nos contatos ou fora deles não condiz com o mergulho dos condutores verticais.

5.4.2.2.1 Condutores Verticais NE

Na seção 02 MT destaca-se o condutor vertical C2-2, situado abaixo da estação MT-2009. Sua geometria em subsuperfície domina a seção. A zona condutiva, com mergulho de 70° para sudeste, foi registrada da estação MT-2007 à estação MT-2011, até a profundidade de 15 km. Não foram encontradas estruturas magnéticas que pudessem ser associadas a este condutor. Na análise estrutural de

lineamentos e no Mapa gravimétrico Bouguer foi cartografado um sistema de fraturas de direção N a NNE que foi interceptado na estação MT-2009 (Figura 89). Trata-se de uma estrutura de grande persistência, com lineamentos que chegam a 25 km de extensão. A oeste da seção 02 MT há uma anomalia linear Bouguer nesta direção com 64 km de extensão, o que indica se tratar de um sistema de estruturas profundas.

Na seção 02 MT uma estreita zona com menor resistividade no interior do bloco resistivo R2-1 pode estar associada ao Dique Saquarema-Campos (Figura 82). Em superfície a geologia mostra uma estrutura entre as estações E-2003 e E-2004, correspondendo a uma estrutura de um antiforme simétrico desenvolvida no contato do dique. Este corpo seria delimitado por duas falhas (F-17 e F17-A) que estariam nas proximidades do Rio São Pedro, indicando assim uma possível área de recarga. Desse modo justificando seu baixo valor de resistividade pela presença de fluidos.

Esta zona condutiva, com mergulho para sudeste, conecta a superfície com o condutor profundo C2-1. Os limites dessa zona de menor resistividade coincidem com a calha do Rio São Pedro e outro córrego da região. O corpo condutivo C2-1 observado dentro dos resistores R2-1 e R2-1.1 coincidem com o dique (D-1) observado no mapa magnético.

5.4.2.2.2 Condutores Profundos

Na seção 02 MT o condutor profundo C1-2, da seção 01 MT, foi imageado e denominado de C2-3, atingindo 7 km de profundidade. A resistividade acima deste condutor é muito reduzida, sendo observados apenas pequenos blocos resistivos, fenômeno que pode ser observado na seção 01 MT, de modo menos intenso. Em conjunto com o condutor C1-1, os condutores representam as descontinuidades limitadoras de um graben de direção ENE, preenchido por sedimentos do Grupo Barreiras e truncado pela Falha de Macaé e pelo condutor vertical C2-2.

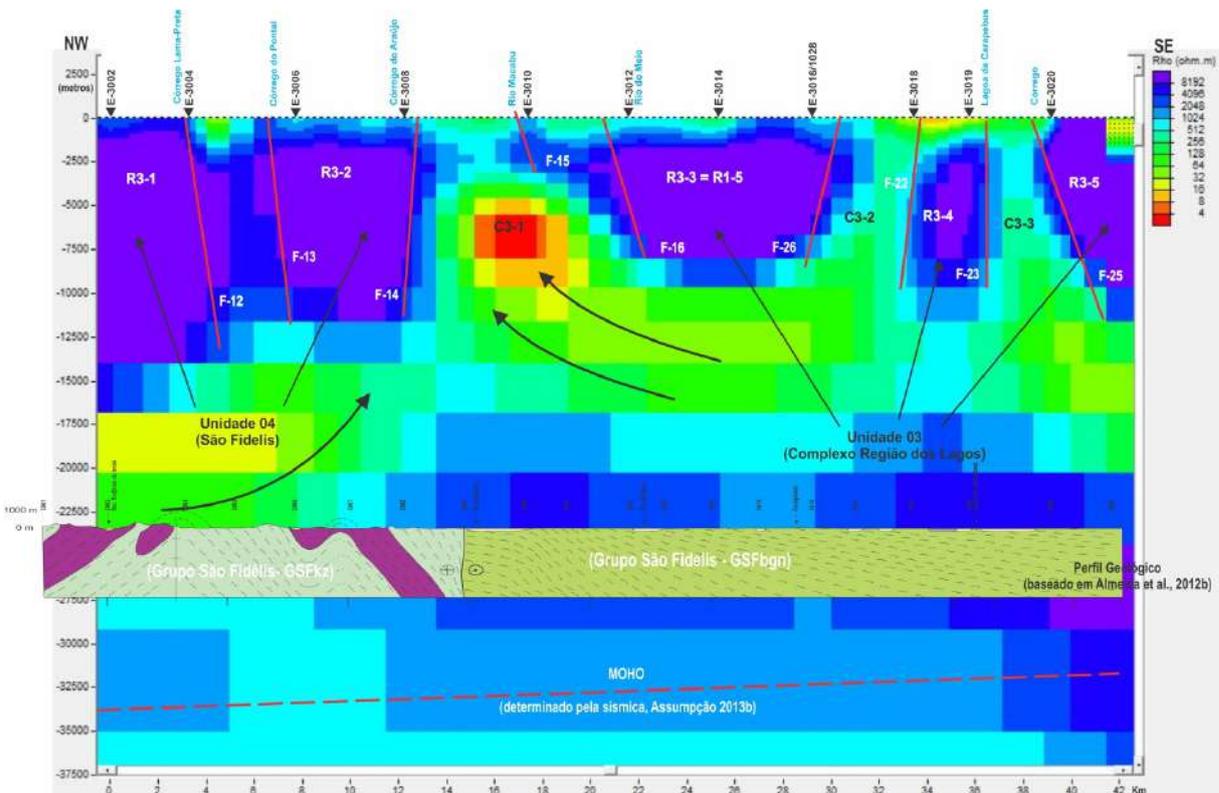
O condutor vertical C2-2 da seção 02 MT conecta a superfície, de modo divergente, ao nível condutivo mais profundo imageado nas seções levantadas. Este nível se localiza na crosta inferior a 25 km de profundidade, próximo à

descontinuidade de Mohorovicic. Sua continuidade para sul não foi detectada na seção 01 MT, o que sugere que os fluidos condutivos da estrutura não sofreram transporte lateral significativo para leste. Na seção 03 MT, a projeção para Norte deste condutor coincide com uma estrutura vertical que limita os blocos resistivos R3-1 e R3-2. A estrutura conecta a superfície com condutor profundo a 20 km de profundidade, que se estende assimetricamente para noroeste.

Esta camada condutiva apresenta uma espessura aproximada de 15 km, com resistividade entre 32 e 128 $\Omega.m$. A camada tem uma concavidade voltada para cima ascendendo até a superfície (C2-2), separando os corpos R2-1 e R2-2.

5.4.3 Seção Magnetotelúrica – Perfil 03

Figura 90 – Perfil 03 - Seção Magnetotelúrica com interpretação.



Nota: Na seção estão marcadas as falhas (traços vermelhos), os blocos resistivos (R3-X), a MOHO (tracejado vermelho) e também está sobreposto o perfil geológico da seção. As setas pretas indicam o movimento das camadas no contato do GSF-kz e GSF-bgn.

Fonte: O autor, 2016.

5.4.3.1 Blocos Resistivos

A seção 03 MT (Figura 90) tem características semelhantes às duas anteriores, com três camadas. A camada superior apresenta cinco blocos resistivos (R3-1, R3-2, R3-3, R3-4 e R3-5) separados por corpos condutores como acontece nas outras seções.

Os resistores R3-1 e R3-2 têm resistividade acima de 8.000 Ω .m, valores compatíveis de rochas cristalinas secas ou rochas típicas da crosta superior. Estes resistores são delimitados pelas falhas F-12, F-13 e F-14 que em superfície estão associadas a córregos e áreas de aluvião. A profundidade da base dos resistores é em torno de 12 km, como na seção 02 MT.

Os resistores R3-3, R3-4 e R3-5 têm características de resistividade iguais aos outros resistores (R3-1 e R3-2). Os blocos resistivos também são delimitados por falhas F-15, F-16, F-26, F-22, F-23 e F-25 que estão associadas a rios, córregos e regiões aluvionares. Estes resistores R3-3, R3-4 e R3-5 apresentam uma profundidade menor em torno de 8.5 km.

Os falhamentos citados acima correspondem a limites de estruturas nos mapas gravimétricos, mostrando assim correlação das estruturas gravimétricas e magnéticas com as estruturas observadas em subsuperfície pelo método magnetotelúrico.

Em relação à geologia de superfície, os resistores R3-1 e R3-2 fariam parte do grupo São Fidélis (NPsfkgz) tendo intrusões da Suíte Imbé. As camadas apresentam dobramentos, com mergulhos maiores que 50°. Na estação E-3004 ocorre uma mudança da direção do mergulho e seria o alto de uma estrutura anticlinal. O mergulho das camadas aumenta na direção SE até a estação E-3006 chegando a 83°, mas depois volta a diminuir para 58° na estação E-3010. Essa estação estaria no contato do grupo São Fidélis (NPsfkgz) com o grupo São Fidélis (NPsfbgn) (ALMEIDA *et al.*, 2012b) e nota-se uma variação do mergulho para baixo ângulo em torno de 25°. O mergulho, a partir deste ponto, vai diminuindo para SE até chegar à costa com o valor de 5° pelas medidas de campo feitas neste trabalho e dos mapas geológicos.

A falha F-14 seria o contato do grupo São Fidélis (NPsfbgn) com a Suíte Imbé. A falha transcorrente mapeada na superfície estaria entre as estações E-3008 e E-3010 e o contato do grupo São Fidélis (NPsfgkz) com o grupo São Fidélis (NPsfbgn) em subsuperfície estaria relacionado com o condutor C3-1. Neste contato ocorreu um truncamento das camadas e, a partir da estação E-3012, o mergulho das camadas passa de um ângulo de 58° para 25°, e diminui chegando a 5° no final do perfil. Os ângulos citados são de medidas realizadas em diversas campanhas de mapeamento geológico na região.

5.4.3.2 Corpos Condutivos

Assim como na seção 02 MT, a seção 03 MT interceptou condutores verticais oblíquos à seção. Verifica-se, pelo mapa geológico (Figura 7) e pelas seções geológicas (Figura 75) sobrepostas às Seções MT, que os condutores verticais não coincidem com importantes contatos geológicos. Ademais, o mergulho da foliação nos contatos ou fora deles não condiz com o mergulho dos condutores verticais.

Na região abaixo dos resistores R3-1 e R3-2, a camada condutiva apresenta uma espessura de 12 km, enquanto na parte dos resistores R3-3 a R3-5 a espessura é de 9 km. Mas observa-se que na interface entre o Grupo São Fidélis com o Complexo Região dos Lagos, a base dessa camada apresenta um desnível de 7 km, podendo indicar ser a região de cisalhamento ou sutura de terrenos.

5.4.3.2.1 Condutores verticais NE

Na seção 03 MT observam-se três corpos condutivos (C3-1, C3-2 e C3-3). O corpo C3-1 delimitado pelos falhamentos F-14 e F-16 apresenta valor resistividade abaixo de 4 Ω .m. Este condutor coincide com a localização do dique DSC que se estende desde Saquarema até Campos dos Goytacazes no mapa magnético, estendendo-se desde a seção 02 MT até a seção 03 MT (Figura 82). Na seção 03

MT o dique está na interface entre o Grupo São Fidélis e o que poderia ser um bloco do Complexo Região dos Lagos.

O condutor C3-1 ocorre abaixo da estação MT-3010 e foi imageado a sudeste na estação MT-3012 até se conectar a um condutor profundo a 12,5 km de profundidade, mergulhando cerca de 70° . Em superfície se encontra a planície aluvionar do Rio Macabu e o Córrego do Araújo, cujos limites estão orientados segundo a direção E-W, com contatos abruptos com as margens, sugerindo recente atividade tectônica.

Entre as estações E-3016 e E-3020 estão os condutores C3-2 e C3-3, de resistividade entre 32 e 128 Ω .m. Esta área está numa grande região aluvionar que compreende a Lagoa de Carapebus até o litoral com várias ramificações e, parte dos Cordões Litorâneos.

Os dois condutores verticais C3-2 e C3-3 estão localizados no extremo sudeste da seção 03 MT e conectam um condutor raso abaixo do Grupo Barreiras com condutor profundo a 12,5 km de profundidade. C3-2 tem mergulho aparente para noroeste, com alto ângulo ($70^\circ < x < 90^\circ$). Em superfície, ambos os condutores coincidem com os limites de afloramento do Grupo Barreiras, interpretados aqui como falhas de borda da bacia relativas à sua implantação ou a uma tectônica modificadora pós-deposicional.

5.4.3.2.2 Condutores Profundos

Na seção 03 MT o condutor C3-1 mergulha em direção à camada condutiva nivelada a 15 km de profundidade. Este nível coincide com a base do graben interpretado na seção 01 MT, também nivelada a 15 km. O condutor C3-1 tem sua origem em superfície, no Dique Saquarema-Campos e na Bacia do Rio Macabu e apresenta zona altamente condutiva em seu conduto. A interpretação conjunta da estrutura indica uma rampa com mergulho para sudeste associada a falhas de transferência (v. Cap. 3).

A seção 03 MT intercepta a seção 01 MT e tem continuidade para sudeste, permitindo imagear estruturas mais próximas à linha de costa. Neste trecho se

observa um *horst* limitado por falhas divergentes, que limita a ocorrência de sedimentos do Grupo Barreiras. Este *horst*, se interpretado conjuntamente com estruturas rúpteis que deslocam os contatos do Grupo Barreiras, estaria associado à tectônica modificadora da bacia, sendo portanto, pós-Miocênica. O deslocamento dos contatos ocorre através da reativação das estruturas anteriores em várias direções.

5.4.4 Condutores Regionais

5.4.4.1 Condutores rasos associados a depósitos aluvionares

Considera-se como condutor raso aquele domínio de baixa resistividade elétrica superposto a um substrato resistivo. A queda da resistividade elétrica é uniforme nestes corpos e estaria entre 250 e 500 Ω .m. A espessura da camada condutiva atinge, no máximo, 500 metros pelo MT. Não se tem estimativa da profundidade dos sedimentos aluvionares nestes depósitos, mas é provável que a redução de resistividade do embasamento dessa camada condutiva superficial esteja relacionada à alteração intempérica causada pelo lençol freático.

É possível correlacionar alguns condutores rasos com depósitos aluvionares encontrados na área, como os aluviões dos rios: a) Macabu (Seções 1 e 3); b) do Meio, Lameiro e Quarentena, na seção 01 MT próximo a Carapebus; c) Macaé, na seção 02 MT, em seu curso de direção nordeste.

5.4.4.2 Nível condutivo associado ao Grupo Barreiras

Foi observado um nível condutivo (250 e 500 Ω .m) associado aos sedimentos do Grupo Barreiras nas três seções MT levantadas (Figura 88, 89 e 90), com base entre 100-200 m de profundidade, podendo atingir 1000 m, o que supera a espessura máxima estimada por Brêda (2012) para o Grupo Barreiras na área. É

provável que a redução da resistividade esteja relacionada a um aquífero profundo alojado em fraturas e falhas geradas durante a implantação do Grupo Barreiras.

Na seção 01 MT o nível condutivo coincide com o trecho aflorante do Grupo Barreiras até a Falha de Macaé. A partir desta falha, o condutor segue por baixo da planície aluvionar do Rio Macaé, sugerindo que os sedimentos do Grupo Barreiras tenham sido abatidos pela Falha da Macaé no bloco nordeste. Na seção 03 MT o nível chega a atingir 1000 m e coincide com a área ocupada pelo Grupo Barreiras a norte de Macaé.

5.4.4.3 Condutor na camada intermediária

Nos resultados obtidos nas três seções, observa-se uma camada superior com blocos resistivos com falhamentos, sendo este espaço entre os blocos preenchido por material condutivo. Este material estaria ligado à camada média que apresenta uma condutividade alta. Estas características têm semelhança com resultados de trabalhos executados no Brasil e em outras partes do mundo.

A existência desse condutor crustal tem sido discutida e várias hipóteses têm sido levantadas sobre a sua causa. A alta condutividade na camada média pode estar relacionada a diversos fatores tais como: ocorrência de fluidos salinos, porosidade da rocha, serpentinização, minerais condutores (sulfetos e óxidos de ferro), grafita e fusão parcial (JONES, 1992; DUBA *et al.*, 1994).

Anomalias de condutividade elétrica na crosta e no manto superior podem ser causadas por diversos fatores, geralmente associados à história tectônica da região. Acréscimos na condutividade verificados em zonas de subducção são atribuídos a fluidos salinos em profundidades inferiores a 40 km (JONES, 1992).

Figueiredo (1997) observou esta camada condutiva em um estudo numa seção transversal (SE-NW) na região sudeste do Brasil, onde o topo desse condutor estava a uma profundidade de 10 km, compatível com a profundidade encontrada nas seções deste trabalho. O autor fez uma pesquisa e apresentou um relato de vários trabalhos no qual são expostas hipóteses das causas desses condutores.

Uma das hipóteses é a associação desses condutores com o fluxo de calor existente na região da crosta inferior e no manto superior (SINGH, 1980 e ÁDAM, 1987). Entretanto Shankland & Ander (1983), Hyndman & Shearer (1989) sugerem que a temperatura, porosidade, salinidade e fluidos na crosta inferior sejam os principais elementos responsáveis pela existência dos condutores.

Já Gough (1986) e Jones (1987) concordam com a proposta de uma crosta de três camadas, que diferem nas propriedades geofísicas. Os autores concordam com a existência de refletores sísmicos na crosta inferior, mas eles discordam na questão dos fluidos. Segundo Gough (1986) as duas crostas (superior e inferior) teriam fluidos salinos, sendo que a parte inferior da crosta inferior seria seca. Já Jones (1987) propõe uma crosta superior seca e a crosta inferior contendo fluidos.

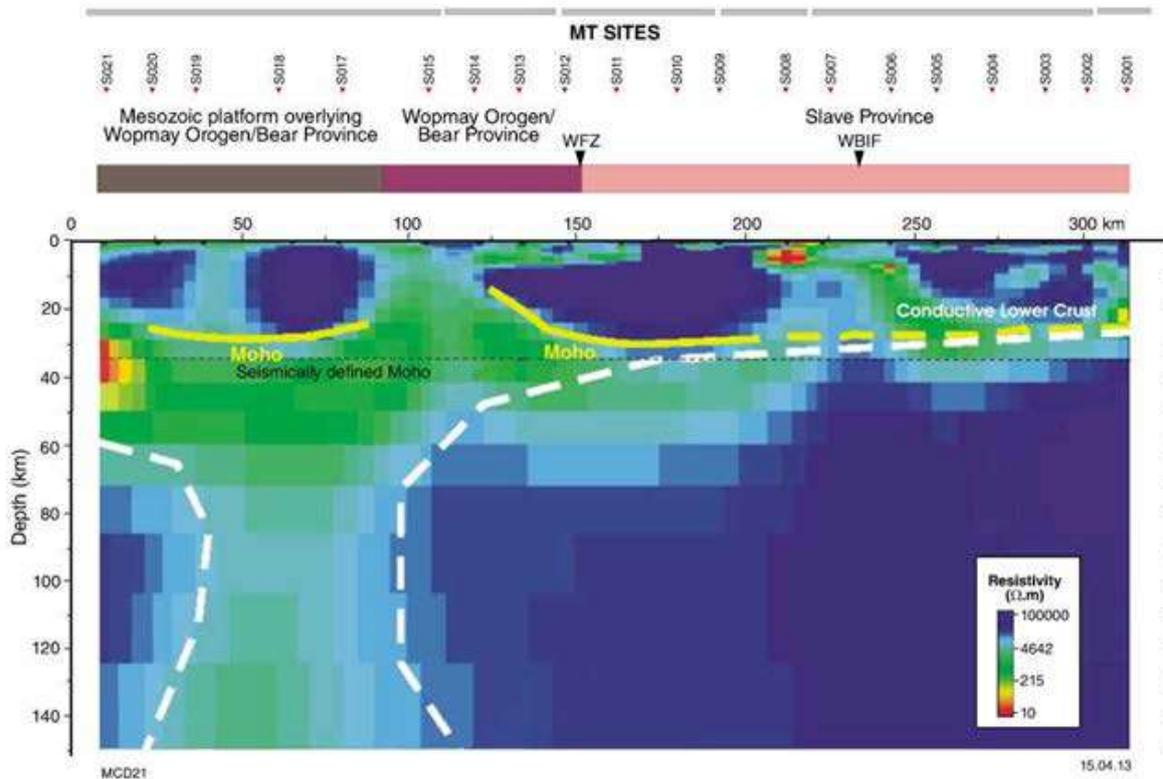
No escudo Canadense em um número considerável de estudos MT realizados, nota-se que a crosta/manto está dividida em três camadas, assim como os obtidos aqui. Ressaltando ainda que os resultados confirmam que a crosta média nestas áreas é comumente condutiva Jones *et al.* (2002).

As características das estruturas (resistivas e condutivas) observadas nas três seções MT desta tese também ocorrem em vários trabalhos MT no escudo Canadense que cruzou as principais estruturas da crosta terrestre. Spratt *et al.* (2009) observaram que nas fronteiras entre o bloco Arqueano e terrenos Proterozoicos adjacentes, ou em estruturas que separam domínios geologicamente distintos dentro dos blocos Arqueanos, pode-se observar a existência de estruturas com essas características nas seções MT 2D em forma de U.

Segundo Spratt *et al.* (2009) um exemplo de zonas de falhas condutivas no Slave Craton, é o West Bay – Indin Fault (WBIF). Os autores descrevem, neste trabalho, a existência de estruturas do Slave Craton e na Província Bear, que foram reunidas durante o orógeno Paleoproterozoico Wopmay (Figura 93) como sendo uma zona de sutura, assim como as zonas de sutura do southern Great Valley, Califórnia, observadas por Park *et al.* (1991).

De acordo com Wu *et al.* (2002) um bom exemplo de estrutura que coincide com zona resistiva intercalada com condutores verticais e horizontais é observada na zona de cisalhamento do Grand Lake Slave. Esta estrutura muito grande separa terrenos do Proterozoico, no noroeste do Canadá.

Figura 91 – Seção Magnetotelúrica na Província Slave e orógenos Proterozoico adjacentes no norte do Canadá com interpretação.



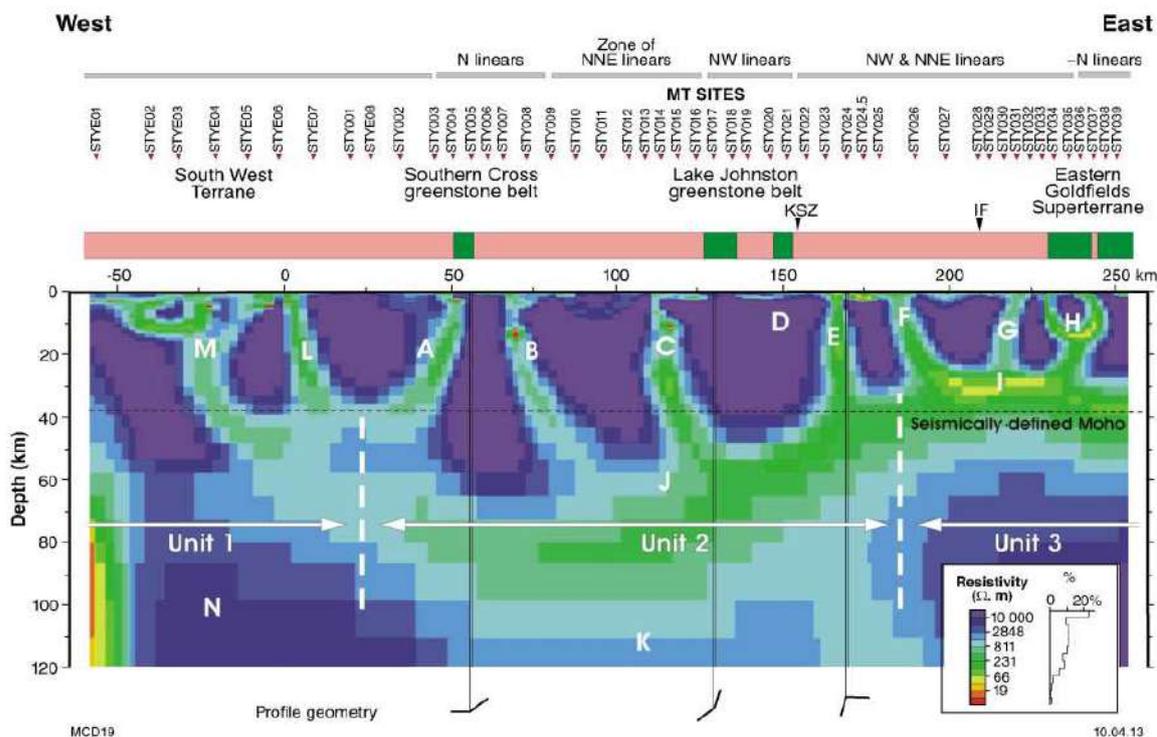
Nota: Na seção estão marcados: WFZ - Wopmay Fault Zone, WBIF - West Bay – Indin. A linha amarela marca o limite crosta/manto e a linha tracejada branca delimita as raízes dos blocos cratônicos da Província Slave e Província Bear.

Fonte: SPRATT *et al.*, 2009.

Dentith *et al.* (2013), em estudo no sul do Yilgarn craton na Austrália, observaram a divisão da crosta/manto em três camadas também (Figura 92). Sendo que a crosta está dividida numa parte superior muito resistiva intercalada com condutores verticais e uma parte inferior menos resistiva e ambos apresentam um manto superior ligeiramente resistivo. Os autores ainda relatam que a camada superior (crosta superior) apresenta uma resistividade muito alta ($\sim 10.000 \Omega.m$ ou superior). Estes valores observados são compatíveis com os valores obtidos em medições realizadas em laboratórios em rochas do cristalino (Spratt *et al.*, 2009).

Nos dois casos (Figura 91 e 92) observa-se que as zonas altamente resistivas são separadas por regiões condutivas verticais, principalmente estreitas e mergulhando de leste para oeste no caso do Yilgarn craton (Dentith *et al.*, 2013). Em ambos os casos estes blocos estão sobre uma camada condutiva horizontal.

Figura 92 – Seção Transversal de resistividade obtida pela inversão 2D dos dados MT da região do Sul do Yilgarn Craton - Austrália.



Nota: Na seção estão plotados: KSZ - zona de cisalhamento de Koolyanobbing, IF – Falha de Ida.

Fonte: DENTITH *et al.*, 2013.

Ao se fazer uma analogia dos resultados obtidos nas seções MT desta tese com os dados do escudo Canadense (Figura 91) e com os dados do Craton Yilgarn, as zonas de alta resistividade podem ser interpretadas como principais zonas de falhas ou de cisalhamento, conforme proposto por Dentith *et al.* (2013).

Sobre a crosta média com alta condutividade, Rao *et al.* (2007), em um estudo na zona de sutura de Iapetus (Irlanda), justificam que seria a ocorrência de sedimentos de grafita com baixo grau de metamorfismo em zonas de sutura Paleozoicas, pois, de acordo com Dewey (1988), o início do Ordoviciano foi único na história tectônica e foi caracterizado pela alta do nível do mar, com criação de plataformas de carbonatos e oceanos, e geração de folhelhos negros.

Vine & Tourtelot (1970) citam que folhelhos negros presentes em cunhas acrescionárias sedimentares em zonas de subducção muitas vezes são ricos em minerais metálicos (como sulfetos de ferro (pirita, pirrotita) em ambiente redutor rico em enxofre). Segundo Ryan & Dewey (1991) as sequências sedimentares sofreram

deformação transpressional durante a convergência NW-SE de Avalonia e Laurentia, o que, assim, justifica a formação do condutor em forma de U, e os movimentos posteriores ao longo das zonas de falhas transportarem os sedimentos para região mais profunda.

Rao *et al.* (2007), ao compararem e fazem testes com amostras, sugerem que presença de folhelhos negros sulfetados (pirita, pirrotita) seriam a fonte de alta condutividade na crosta média, pois, segundo os autores, há ocorrência de sedimentos de grafita com baixo grau de metamorfismo em zonas de sutura Paleozoicas

Em outro estudo MT na Baffin Island, no noroeste do Canadá, Evans *et al.* (2005) indentificaram um condutor com baixa resistividade e o interpretaram como metassedimentos com formação de grafita e sulfetos. Testes laboratoriais e petrológicos com amostras de rochas da superfície da área confirmaram o papel de condução da grafita.

No caso dessa tese, as zonas condutivas verticais observadas nas seções MT podem ser consideradas como áreas preenchidas por fluidos, por estarem coincidentes com os rios e áreas aluvionares. Nota-se que nas três seções os contatos entre os terrenos são marcados por grandes falhamentos associados a esses condutores verticais. A seção 01 MT corresponde a falhas F-1, F-1.1 e F-7, separando o Complexo Região dos Lagos do São Fidélis. Na seção 02 MT as falhas F-19 e F-20 marcam o limite do grupo São Fidélis com o Complexo Região dos Lagos. Estes dois terrenos estão separados por um extenso condutor. Na seção 03 MT a Falha F-14 representa um possível contato do grupo São Fidélis (NPsfkz) com o possível bloco do Complexo Região dos Lagos.

A camada condutora a que estão conectados os corpos condutores verticais, apresenta valores de resistividade característica de rochas ígneas com camadas intemperizadas máficas e félsicas segundo Keller (1982) e Palacky (1987). De acordo com Haak & Hutton (1986), os baixos valores de resistividade observados seriam tipicamente de crosta inferior ou rochas resistivas saturadas de fluidos.

Assim podemos dizer que nessa área de estudo a alta condutividade na crosta média poderia estar relacionada à presença de fluidos e/ou a rochas máficas e félsicas, descartando a presença de sedimentos de grafita e sulfetos pelo valor da condutividade obtido na inversão MT.

5.5 Modelagem 2D - Seções Magnetométricas e Gravimétricas

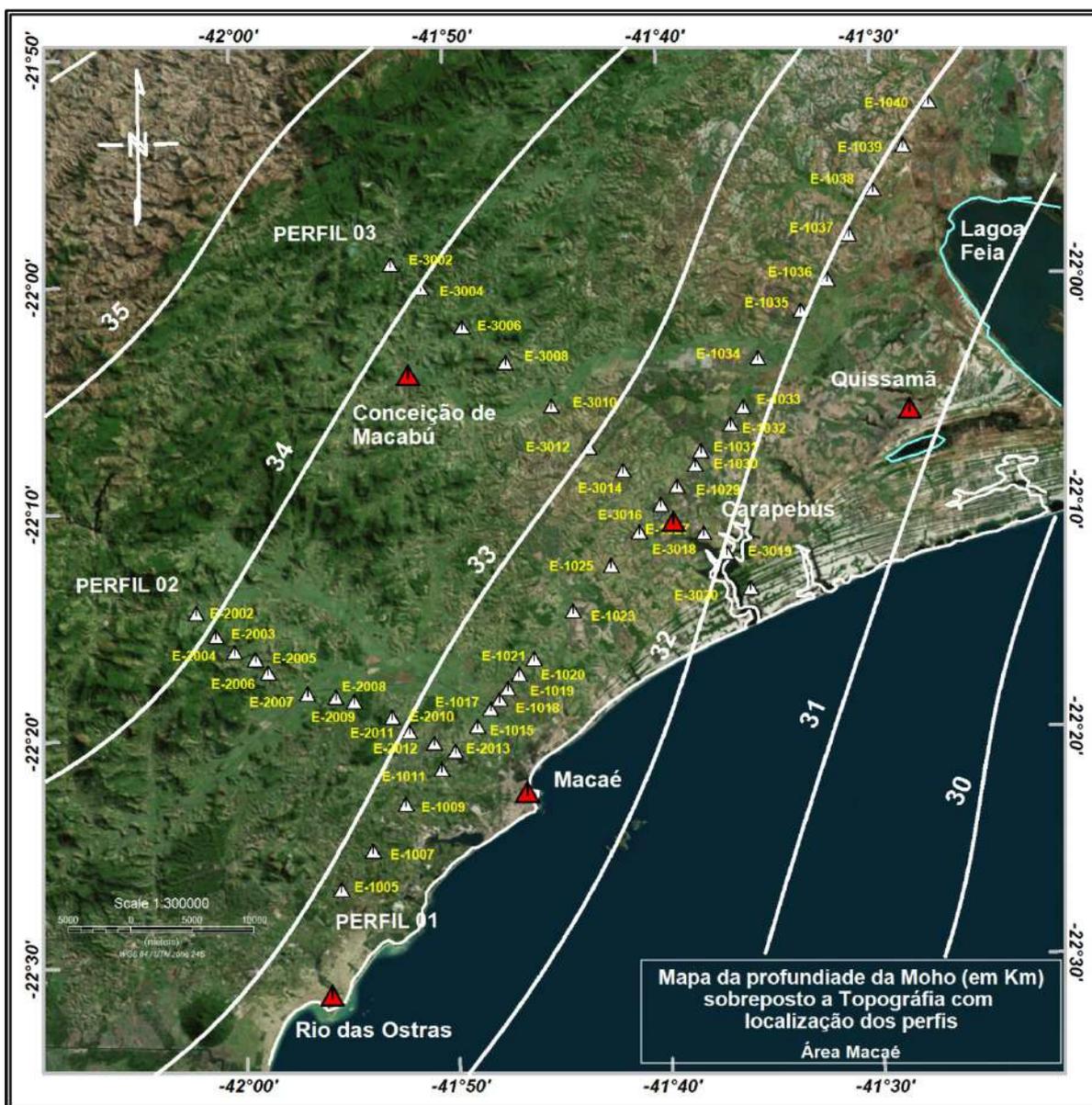
A modelagem magnética/ gravimétrica pode ser feita tanto em perfis (2D ou 2,5D) ou em mapas 3D por meio de métodos interativos de tentativa e erro ou por procedimentos automáticos. O método de modelagem pode ser de dois tipos: modelagem direta ou processo inverso. No caso da modelagem direta, as propriedades físicas (susceptibilidade e densidade) e formas geométricas dos corpos são atribuídas e os valores resultantes (calculados) são comparados aos dados observados. Já no caso da modelagem 2D, como exemplo a gravimetria, as densidades e a forma geométrica dos corpos são desconhecidas e serão determinadas por processo automático através de procedimentos estatísticos.

Para modelagem das seções (perfis) o primeiro passo foi reunir as informações (parâmetros) necessárias para alimentar a construção do modelo, tais como densidades das rochas, profundidade da crosta, valor do campo total magnético, declinação e inclinação magnética, seleção e exportação dos perfis para a rotina de modelagem GMSYS da Geosoft.

O conhecimento da estimativa da profundidade da superfície da descontinuidade de Mohorovicic (Moho) é necessário para se estimar o limite da crosta inferior com o manto superior. A Moho caracteriza-se por uma variação brusca da velocidade da onda sísmica. De uma forma geral, a velocidade da onda P na interface da Moho varia de 6,8 km/s na crosta para 8,2 km/s no manto (Assumpção *et al.* 2002).

Segundo Assumpção *et al.* (2013a) a Moho apresenta uma variação de profundidade dependendo do tipo de litosfera. Em regiões de litosfera oceânica, a Moho varia entre 5 a 10 km, já em regiões de litosfera continental varia entre 30 e 40 km. Em regiões de altas elevações como montanhas altas e cordilheiras podem atingir até 70 km.

Figura 93 – Mapa topográfico da área de estudo com a superposição das curvas de profundidade da MOHO.



Nota: No mapa estão plotados as curvas de profundidade da MOHO em Km e os perfis com as suas respectivas estações.

Fonte: adaptado de Assumpção *et al.* (2013b).

Para geração do mapa da estimativa da profundidade do Moho (Figura 93) foi utilizado um grid de profundidades cedido por um dos autores do trabalho de Assumpção *et al.* (2013b) (Stéphane Drouet), a partir do qual foram geradas as curvas e sobreposto os perfis deste trabalho. Essas curvas são provenientes de dados sismológicos de várias estações distribuídas pela região.

Assim, com base nos trabalhos de Assumpção *et al.* (2002, 2013a,b) e França & Assumpção (2004), obteve-se a estimativa da espessura crustal adotada para modelagem entre 32 e 34 km para área de estudo.

Os dados de densidade das rochas utilizados para modelagem foram obtidos através de amostras coletadas durante as campanhas de mapeamento geológico e comparados com os valores existentes na literatura, como Reynolds (1997), Telford *et al.* (1990), Kearey *et al.* (2009), Milsom (2003).

Na literatura encontram-se menções sobre a densidade do manto superior com variação entre $3,2 \text{ g.cm}^{-3}$ a $3,7 \text{ g.cm}^{-3}$. Segundo Anderson (1989) estas densidades coincidem com as rochas ultramáficas, que são ricas em olivinas magnesianas, piroxênios, peridotito.

Para determinar o valor da densidade do manto foi feita uma pesquisa, com base nas informações encontradas na literatura como, Green and Falloon (1998), O'Reilly *et al.* (2001); Poudjom Djomani *et al.* (2001) dentre outros. Estes últimos autores fizeram um cálculo da estimativa da densidade do manto litosférico subcontinental no Arqueano, Proterozoico e Fanerozoico. Foi, então, adotado o valor de $3,3 \text{ g/cm}^3$ para o manto, que é utilizado e citado em diversos trabalhos. Este valor forneceu um bom ajuste aos dados nas três seções.

Assim, após a obtenção destas informações, procedeu-se o processo da modelagem. Este processo consiste na transformação das anomalias gravimétricas e magnéticas obtidas nas estações em valores de profundidades das fontes.

Nessa etapa utilizou-se a rotina GM-SYS da Geosoft Inc (Geosoft, 2009) (licença do Observatório Nacional) para modelagem gravimétrica. Esta rotina é baseada nos algoritmos de Talwani *et al.* (1959), Talwani (1965), e Won e Bevis (1987) que simplificam a forma das estruturas e corpos, utilizando estruturas lineares. Além disso, a rotina utiliza um algoritmo baseado na inversão de Marquardt que permite a inversão de um número limitado de parâmetros, mantendo os outros fixos (Geosoft, 2009).

A rotina GM-SYS tem o princípio básico de calcular a resposta de gravidade e/ou magnética de um modelo geológico coerente 2D, 2,5D e 3D dos corpos em subsuperfície, compatível com os valores observados. A rotina faz uma divisão da subsuperfície em blocos e/ou camadas de acordo com variação dos valores de densidade/susceptibilidade. O cálculo rápido da resposta de gravidade e/ou

magnética de modelos, acelera o processo de interpretação e permite testar rapidamente soluções alternativas.

O primeiro passo para fazer a modelagem foi a inserção das seções MT georreferenciadas e coincidentes com os perfis extraídos do banco de dados (gravimétrico e magnético) concomitantemente para servir como base na delimitação dos corpos. Assim, com a base pronta, iniciou-se a etapa de modelagem que foi realizada em duas etapas.

Em uma primeira etapa foi feita a modelagem utilizando os dados de densidade obtidos das amostras na campanha de mapeamento geológico em conjunto com os valores da literatura, sem a delimitação da Moho. Foram feitos ajustes dos corpos/camadas e obteve-se um modelo com baixo desvio de erro.

As densidades utilizadas foram $2,80 \text{ g/cm}^3$ para os corpos tidos como gnaisses e $2,75 \text{ g/cm}^3$ para supostos corpos de rochas metamórficas. Para camadas finas na superfície tida como sedimentos adotou-se o valor de $2,55 \text{ g/cm}^3$.

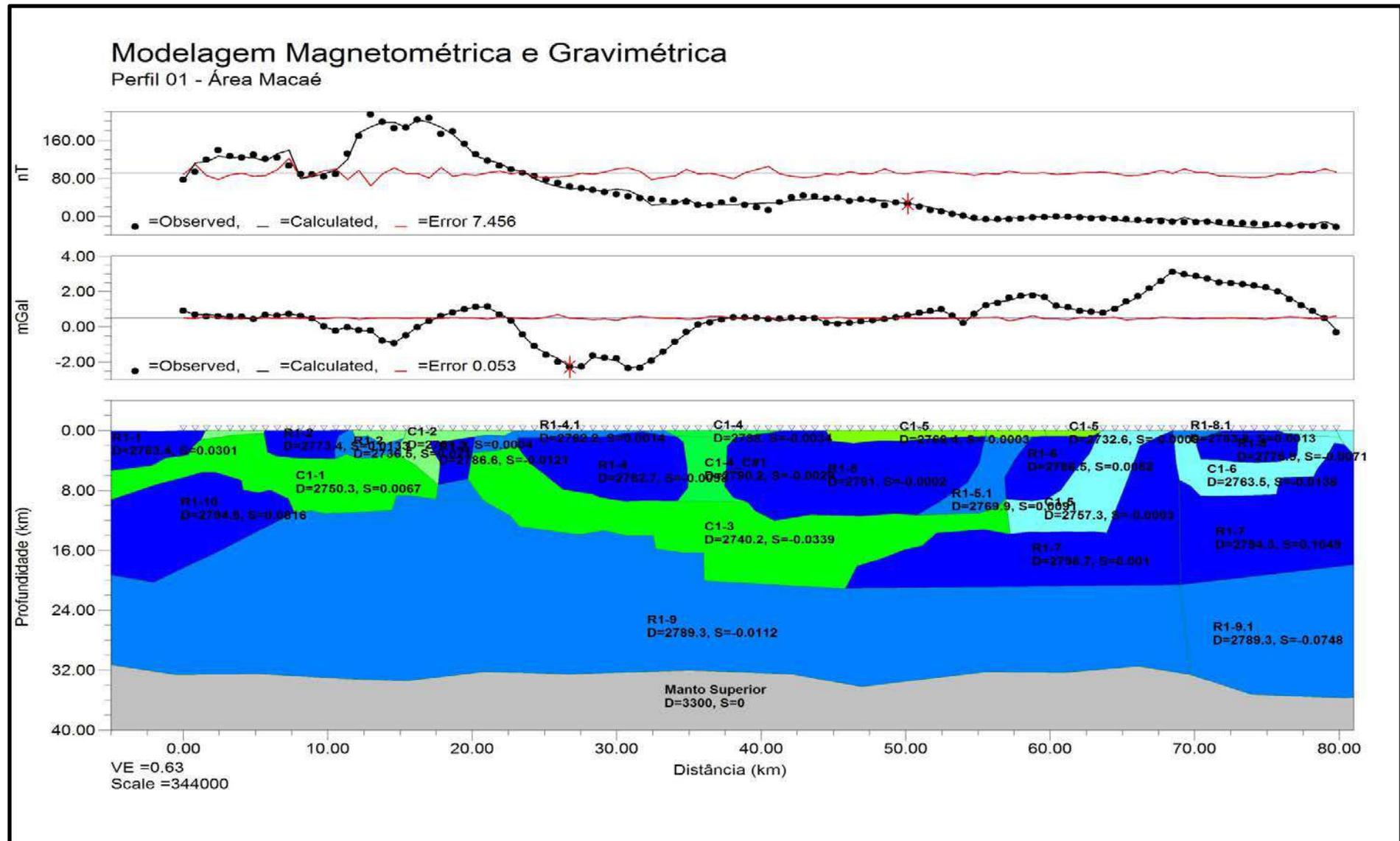
Com os resultados satisfatórios, foi então inserida a camada correspondente ao manto litosférico na profundidade entre 32 e 33 km para o perfil 01 e entre 32 e 34 para os perfis 02 e 03, e sua densidade de $3,3 \text{ g/cm}^3$ (cgs) ou 3300 mg/m^3 (SI).

Nessa etapa também foi feita a modelagem do perfil magnetométrico, pois os valores de susceptibilidade são muito baixos e pequenas variações causam desajustes nas curvas, necessitando de um ajuste fino.

As seções resultantes são mostradas a seguir. Os sinais observados/calculados de gravidade/magnetometria mostram um bom ajuste no geral dos dados gravimétricos e magnetométricos com a base obtida através da inversão dos dados magnetotelúricos.

5.5.1 – Seção Magnetométrica e Gravimétrica – Perfil 01

Figura 94 - Seção geofísica da modelagem Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 01.



Nota: A modelagem foi feita com base na inversão obtida pelo MT. Estão representados os blocos e camadas litosféricas e a interface do contato com o manto superior. - Fonte: O autor, 2016.

Na seção 01 (Figura 94) ficou bem definida a divisão entre os blocos que compõem o Complexo Região dos Lagos (CRL) (densidade entre 2,77 e 2,79 g/cm³) no início da seção que corresponde ao trecho entre 0 e 20 km e a outra parte que representa o Grupo São Fidélis (GSF) (densidade 2,76 g/cm³), com uma ocorrência do Complexo Região dos Lagos entre 35 e 58 km.

Pode-se observar que os resistores principais R1-1, R1-2, R1-10 apresentam valores de densidade altos em torno de 2,78 g/cm³, característicos dos valores estipulados para gnaisses das tabelas encontradas na literatura (Reynolds (1997); Telford *et al.* (1990); Kearey *et al.* (2009); Milsom (2003)) e dos valores médios obtidos nas amostras coletadas na área da tese (item 5.1). Entretanto a corpos C1-1 e C1-2 apresentam valores entre 2,73 a 2,75 g/cm³, mostrando que esta camada tem propriedades físicas e químicas diferentes dos blocos resistivos.

Os pontos de afloramento do C1-1 a 3 km e C1-2 a 16 km do início do perfil representam baixos gravimétricos, mas em relação a magnetometria apresentam valores de susceptibilidade altos (altos magnéticos). Estes corpos estão associados ao metagabro do Complexo Região dos Lagos (PP3rlmg).

O bloco R1-3 estaria no ponto de contato do Complexo Região dos Lagos com o Grupo São Fidélis, correspondendo a um alto gravimétrico apresentado valor de densidade semelhante aos dos corpos R1-1 e R1-2. A resposta magnética deste bloco no mapa de primeira derivada, sinal analítico e gradiente horizontal, evidencia bem a diferença de assinatura magnética entre o CRL e o GSF. Nestes mapas este bloco prolonga-se até curva do rio Macaé mudando a sua direção de NW-SE para SW-NE.

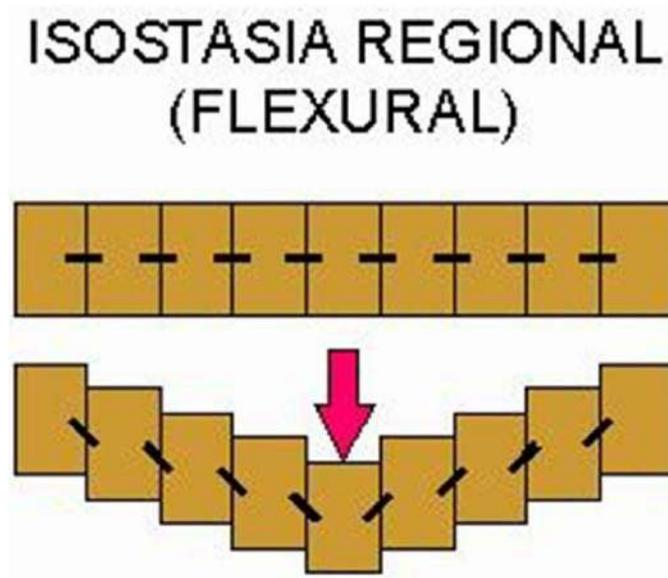
O corpo R1-4 é um baixo gravimétrico delimitado por falhamentos observados em superfície e que também representa um baixo magnético observado nos mapas temáticos (sinal analítico, primeira derivada, gradiente horizontal e anomalia Bouguer residual).

O corpo R1-5 pela sua assinatura geofísica corresponde ao que seria um bloco do Complexo Região dos Lagos, embora a sua assinatura magnética não tenha tanta intensidade como o R1-1, R1-2 e R1-3. Em termos dos valores de densidade apresenta um valor compatível com os encontrados na literatura para gnaisses e na mesma faixa do R1-1, R1-2, R1-3 e R1-10.

Os corpos R1-6, R1-7 e R1-8 apresentam valores de gravidade em torno de $2,78 \text{ g/cm}^3$ e em relação à magnetometria têm valores de susceptibilidade baixos.

Nesta seção observa-se uma camada condutiva profunda separando a camada superior dos blocos resistivos de outra camada menos resistiva (R1-9). A camada condutiva (C1-3) apresenta valores de densidade variando entre $2,74$ a $2,75 \text{ g/cm}^3$, conectada a condutores verticais formando estrutura em forma de U ou abaulada. Este tipo de estrutura também é vista em outros trabalhos de MT realizados em várias partes do mundo, e foi gerada possivelmente por subsidência mecânica flexural regional, como exemplificado na Figura 95.

Figura 95 - Representação esquemática do processo de subsidência mecânica flexural regional

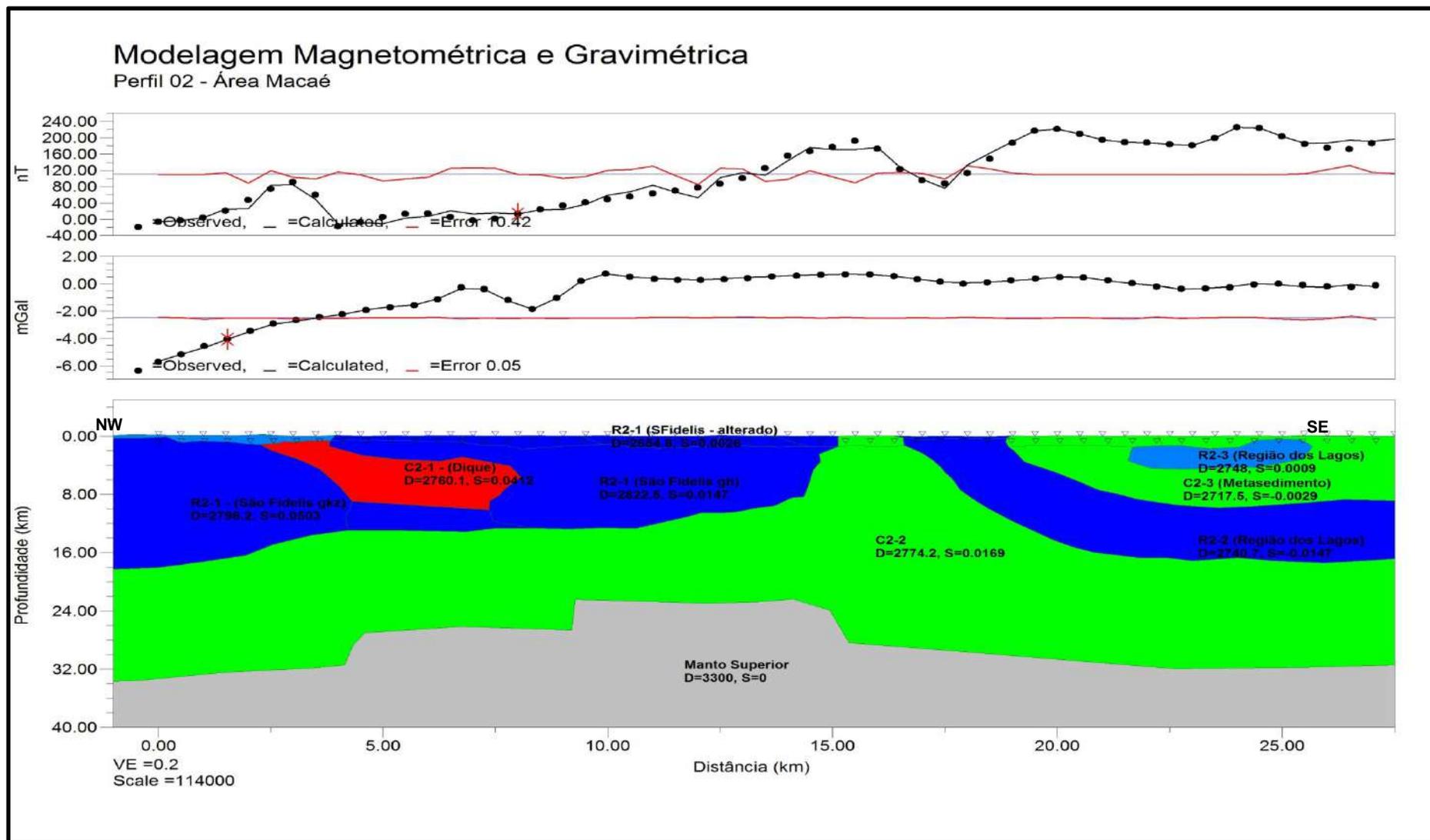


Fonte: modificado de SOUZA-LIMA & HAMSI Jr., 2003.

A camada resistiva R1-9 apresenta uma espessura de 12 km e estende-se sobre o manto superior por todo perfil 01. A interface entre a camada R1-9 e o manto está a uma profundidade aproximada de 32,5 km. A densidade desta camada é de $2,78 \text{ g/cm}^3$.

5.5.2 – Seção Magnetométrica e Gravimétrica – Perfil 02

Figura 96 - Seção geofísica da modelagem Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 02.



Nota: A modelagem foi feita com base na inversão obtida pelo MT. Estão representados os blocos e camadas litosféricas e a interface do contato com o manto superior. - Fonte: O autor, 2016.

A seção 02 (Figura 96) é composta por três partes, sendo o bloco R2-1 que engloba os grupos São Fidélis, o bloco que engloba R2-2 e R2-3 e os corpos C2-1, C2-2 e C2-3. Os valores de densidade estão em torno 2,77 a 2,82 g/cm³ e representam valores típicos de gnaisses.

A modelagem dessa seção teve um bom ajuste e está reproduzindo bem a imagem da seção MT.

Em termos da gravimetria os corpos representativos do grupo São Fidélis estão bem definidos tendo uma espessura inicial de 18 km (em 0 km) e que vão afinando até 8 km na região do contato com o Complexo Região dos Lagos em torno de 16 km do início do perfil.

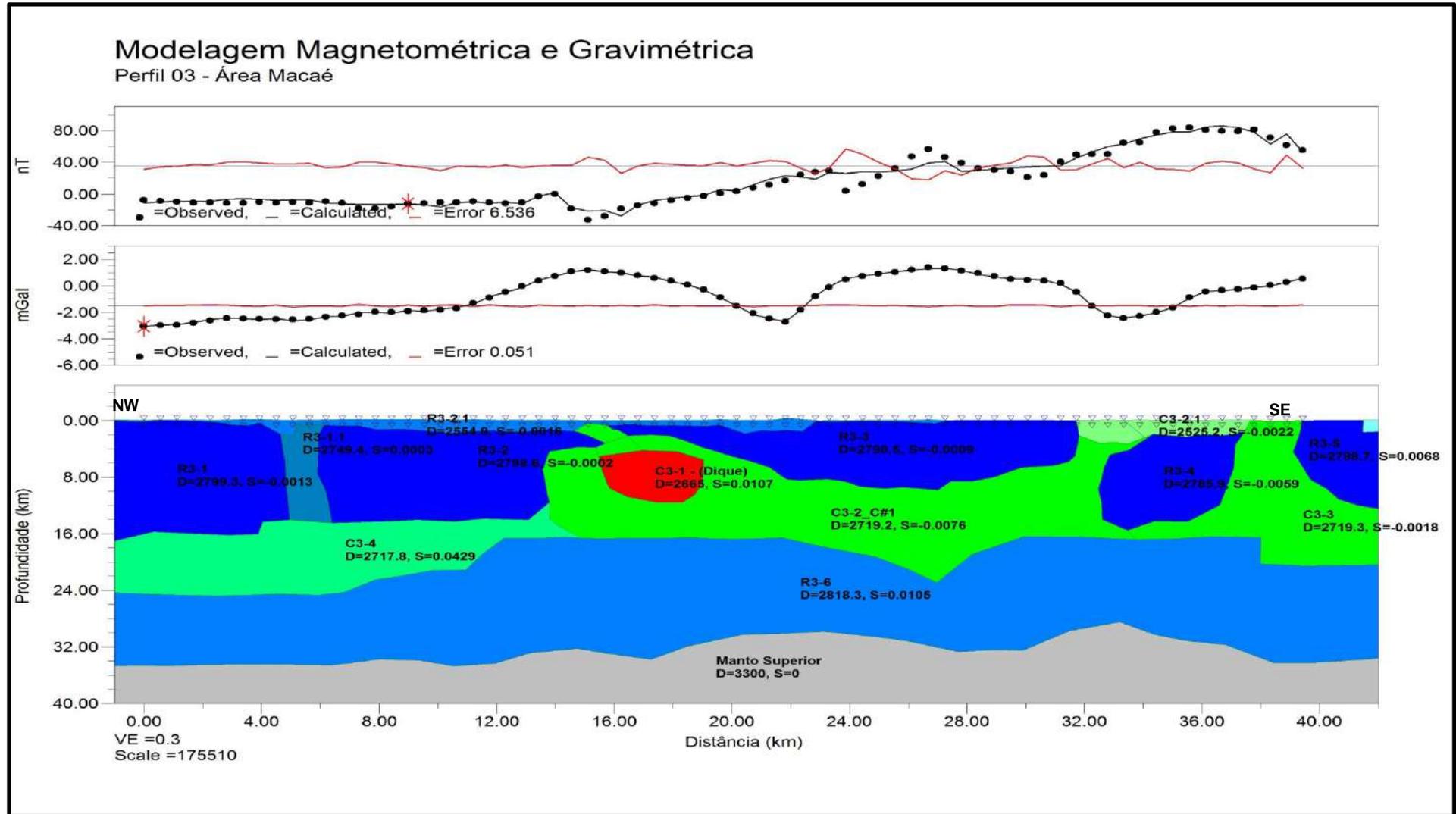
O corpo R2-2 faz parte do Complexo Região do Lagos (CRL), está localizado na região da falha de empurrão sobre Grupo São Fidélis (GSF). Segundo Schmitt *et al.* (2004) o CRL estaria sobre o GSF, mas pela seção MT e pela modelagem gravimétrica e Magnetométrica este cavalgamento tipo rampa teria ocorrido apenas em uma pequena parte na superfície. Esta falha apresenta em superfície mergulho de baixo ângulo, mas a inversão MT mostra que ocorre uma variação do mergulho passando para uma falha de mergulho de médio ângulo.

Na altura da estação E-2007, a 8 km do início da seção 02, nota-se um baixo gravimétrico que ao correlacionar com a geologia de superfície corresponderia ao contato do GSF (NPsfkz) com o GSF (NPsfbgn).

Em relação à magnetometria no perfil observa-se a correlação do corpo R2-1 com um alto magnético e existe um baixo magnético na região do contato do Complexo Região dos Lagos com a camada que o separa do Grupo São Fidélis. A princípio parece existir uma relação dos desníveis no perfil magnético com os observados no contato da crosta inferior com o manto superior.

5.5.3 – Seção Magnetométrica e Gravimétrica – Perfil 03

Figura 97 - Seção geofísica da modelagem Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 03.



Nota: A modelagem foi feita com base na inversão obtida pelo MT. Estão representados os blocos e camadas litosféricas e a interface do contato com o manto superior. - Fonte: O autor, 2016.

A seção 03 (Figura 97), assim como a seção 01 apresenta a crosta dividida em três camadas. Na crosta superior observa-se que os corpos R3-1 e R3-2 apresentam uma espessura de 15 km e a densidade é praticamente a mesma $2,79 \text{ g/cm}^3$. Em superfície corresponde ao GSF, e de acordo com a seção geológica 03 (Figura 74) observa-se uma crosta com dobramentos.

Ainda na crosta superior teriam mais dois corpos R3-3 e R3-4, sendo que o R3-3 está separado do R3-2 por um dique (C3-1), observado nos mapas magnéticos temáticos. No mapa gravimétrico residual, esse dique representa um alto gravimétrico e o corpo R3-3 também. O corpo R3-3 corresponde possivelmente a um pedaço do Complexo Região dos Lagos, devido a sua assinatura magnética.

O corpo R3-4 estaria coberto por uma camada sedimentar de baixa densidade. A região, em sua geomorfologia, corresponde às superfícies aplainadas nas baixadas litorâneas, não tendo pontos de afloramento para fazer medidas e em que se possa observar a parte estrutural.

A crosta média seria composta pelo corpo C3-2 com uma espessura aproximada de 9,0 km e pelo corpo C3-4, com espessura de 8 km. Os valores de densidade são da ordem de $2,71 \text{ g/cm}^3$, e representam um corpo de baixa resistividade na seção MT. Esta camada se estende por toda seção com uma densidade homogênea e aflorando na região das estações E-3018 a E-3020.

A crosta inferior tem uma densidade de $2,81 \text{ g/cm}^3$, apresentando uma espessura entre a estação E-3002 a E-3008 de 10 km, e entre as estações E-3008 e E-3020, a sua espessura é de 16 km. A sua base, que corresponde a Moho, estaria entre 32 a 34 km de profundidade.

No perfil magnetométrico observa-se uma constância da susceptibilidade magnética dos corpos do início até a estação E-3008. A partir desse ponto o valor de susceptibilidade aumenta e apresenta descontinuidades que correspondem a alguns limites de corpos modelados.

5.6 Modelagem 3D

Em geral os problemas físicos são formulados para calcular a resposta a partir das propriedades físicas das rochas no interior da Terra. Este seria o problema direto. No caso do problema inverso nós calculamos os parâmetros físicos a partir dos dados observados.

O processo de inversão em geral procura reproduzir a distribuição mais provável dos parâmetros físicos das rochas que expliquem o que tínhamos observado nas medições.

A tecnologia desenvolvida pela Geosoft para modelagem 3D com dados magnéticos / gravimétricos é o VOXI Earth Modelling. Segundo Geosoft (2013) trata-se de uma rotina de geofísica baseada na nuvem, que gera modelos 3D VOXI da Terra.

O processo de inversão 3D do VOXI descreve a Terra como um conjunto de células retangulares pequenas (normalmente de 5 a 50 metros de tamanho), cada uma com um parâmetro físico diferente (densidade, susceptibilidade, vetor de magnetização, etc.), denominado modelo Voxel da Terra.

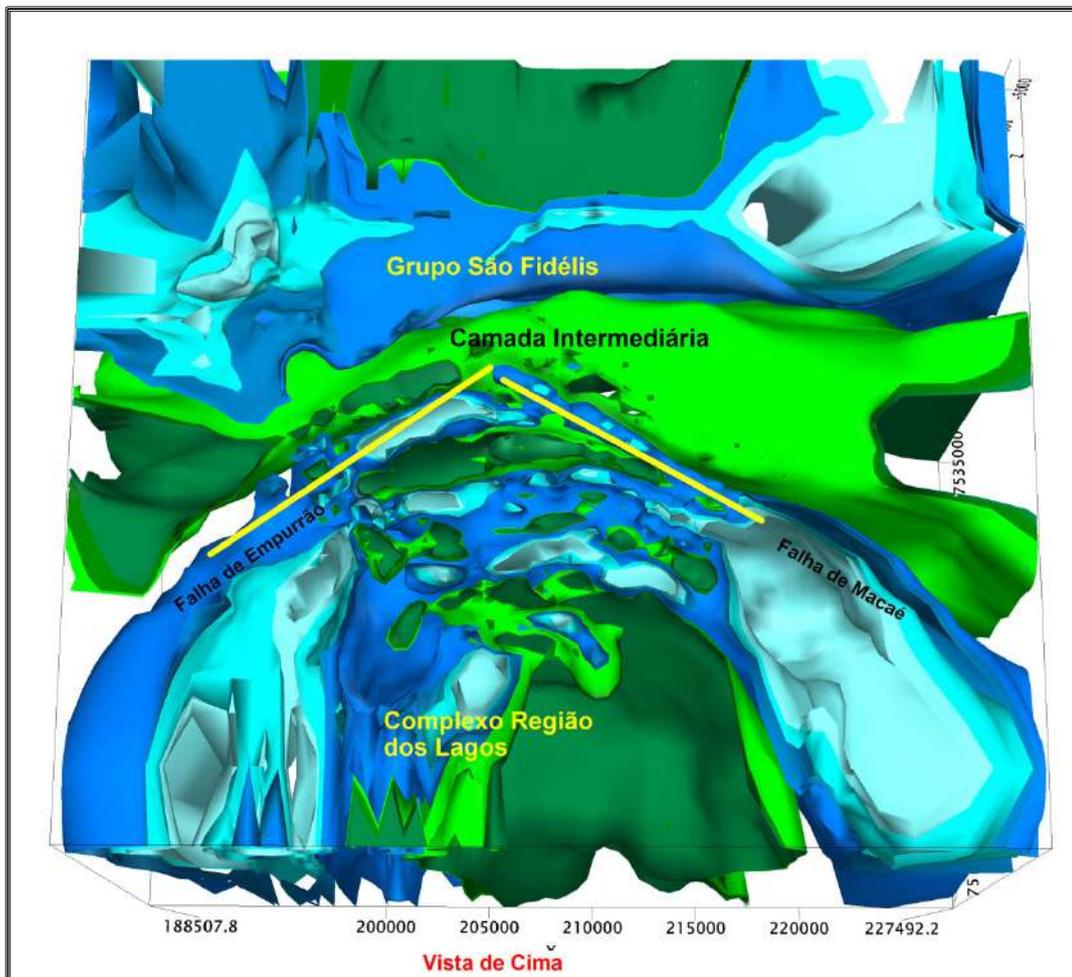
De acordo com Ian MacLeod, um dos responsáveis pelo “VOXI”, trata-se de uma tecnologia amigável que produz um modelo baseado na diferença de contraste das propriedades das rochas. Este é um modelo comum com possibilidade de integração direta com outra superfície e com outras informações geológicas e processos interpretativos. A empresa não divulga o seu algoritmo por motivos comerciais (informação da responsável técnica Monia Rech, da Geosoft - Brasil).

A inversão geofísica VOXI foi utilizada em dados magnéticos, com o intuito de se obter uma representação em três dimensões da diferença de susceptibilidade magnética. A área total foi dividida em blocos menores para inversão. A tendência de cada bloco foi removida antes da inversão. Os Voxis foram gerados utilizando células de 750m, 750m, 100m para X, Y, Z respectivamente. Os blocos de detalhes dos Voxis apresentam superfícies variadas e as profundidades estipuladas para inversão giram em torno de 18 quilômetros.

Para geração dos modelos foi necessário informar o valor do campo magnético total (23849 nT), inclinação (-27,98°) e declinação (-19,67°). O processo rodou na nuvem e fechou com 36 interações, ressaltando a diferença de

susceptibilidade entre o Complexo Região dos Lagos (CRL) e o Grupo São Fidélis (GSF), na região da falha de Macaé e da falha de empurrão.

Figura 98 - Imagem da modelagem 3D obtida através do VOXI, com dados magnetométricos.



Nota: Estão cartografadas a falha de empurrão do Complexo Região dos Lagos com o Grupo São Fidélis, e falha de Macaé. Aparece ainda uma camada intermediária contornando CRL coincidente com a modelagem 2D do MT.

Fonte: O autor, 2016.

O resultado da Figura 98 representa o contraste de susceptibilidade magnética entre as rochas que compõem a região em subsuperfície. O processo de inversão foi bem satisfatório, evidenciando os contatos e falhamentos traçados através dos mapas gravimétricos, magnetométricos e a deconvolução de Euler.

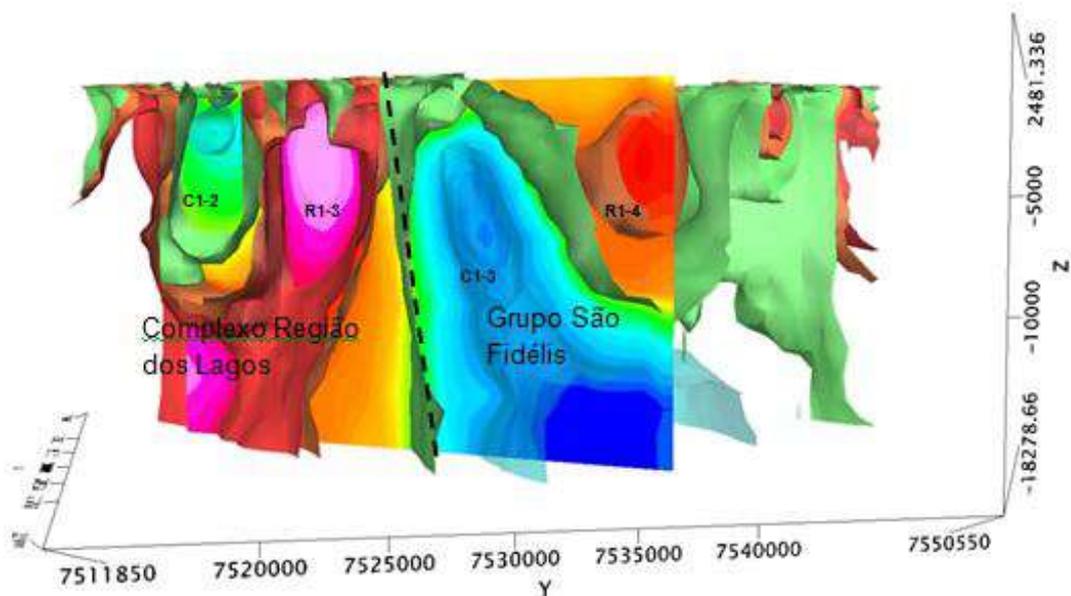
5.6.1 Falha de Macaé

A falha de Macaé (Almeida *et al.*, (2012a) limita os dois terrenos CRL e GSF abordados neste estudo e faz parte de um conjunto de falhas de direção NW-SE.

O Voxi resultante mostrado na Figura 99, foi utilizado para ajudar a caracterizar o contato do CRL com o GSF, mostrando a correlação dos corpos C1-2, R1-3, C1-3 e R1-4 apresentado na seção 01 MT (Figura 88) e o perfil modelado 2D (Figura 94)

Analizando-se a Figura 99 observa-se que na direção SW-NE parece não ter ocorrido deformação, mas em superfície ocorre um imbricamento para baixo do bloco CRL e um princípio de calvagem do GSF. Do ponto de contato na estação E-1015 até a estação E-1034, ocorre uma deformação das camadas em superfície com formação de dobras de acordo com a seção geológica 01 (Figura 74).

Figura 99 - Inversão 3D dos dados Magnetométricos do perfil 01 da falha de Macaé.



Nota: A imagem caracteriza o contato (linha tracejada) do Complexo Região dos Lagos com o Grupo São Fidélis entre os corpos C1-2 e R1-3 (Figura 97), coincidente com o observado na inversão 2D do MT.

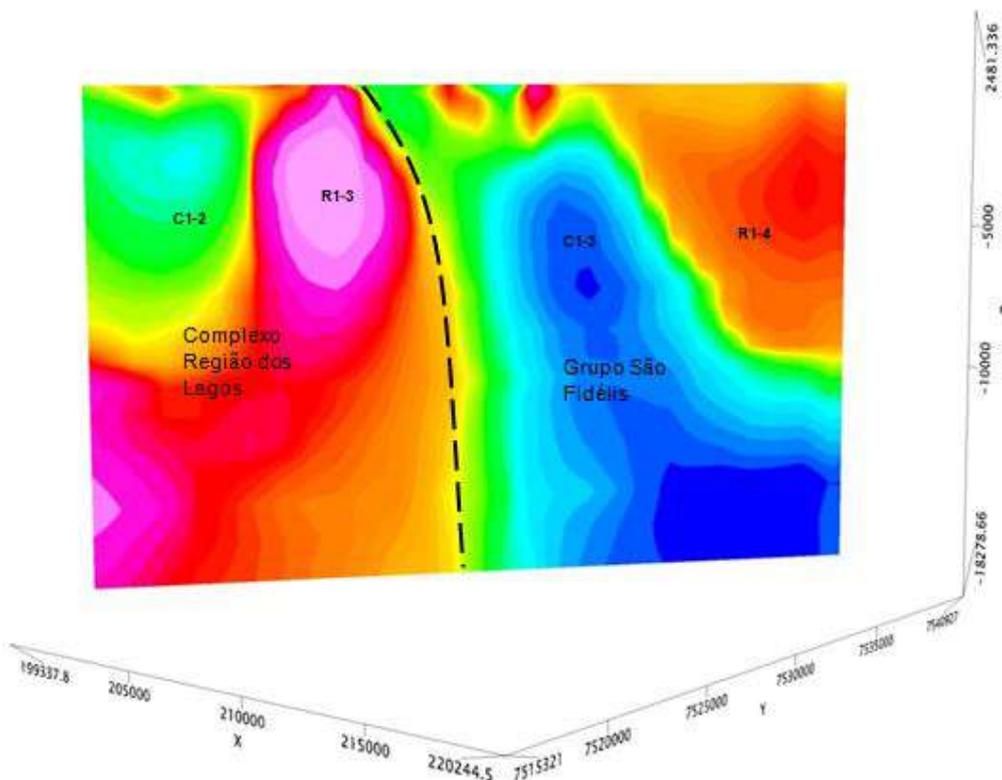
Fonte: O autor, 2016.

Em uma análise das estruturas, observa-se que o corpo R1-4 apresenta uma forma triangular e corresponde a um corpo resistivo na seção MT. As características

deste corpo em relação à gravimetria e a magnetometria mostra um corpo com baixos valores de densidade e susceptibilidade magnética, mostrando tratar-se de uma rocha com composição alterada em relação aos outros corpos. Tal fato se justifica visto que não apresenta propriedades geofísicas que se assemelham aos corpos do CRL nem aos que compõem o GSF.

Os corpos C1-2 e R1-4 (Figura 100) apresentam uma profundidade da base em torno de 8 km e 10 km respectivamente, profundidades também vistas na seção MT (Figura 88). A individualização dos corpos é feita nesta rotina através do constraste da susceptibilidade magnética, o valor calculado para C1-2 e C1-3 é de -0,00033 e o valor do R1-3 e R1-4 seria de 0,0009.

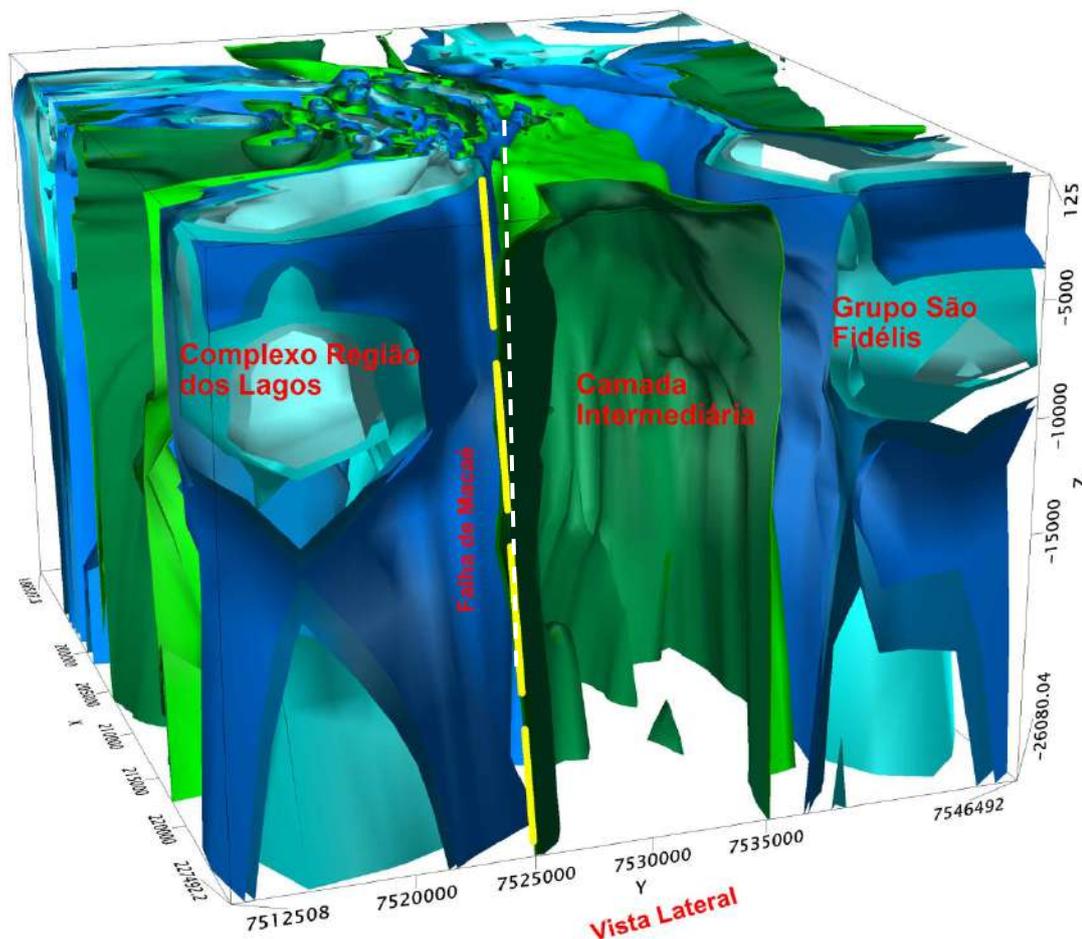
Figura 100 - Seção transversal obtida de dados Magnetométricos do perfil 01 através do VOXI da falha de Macaé.



Nota: Detalhe da Figura 99 da região da falha de Macaé, ponto de contato (linha tracejada) do Complexo Região dos Lagos com Grupo São Fidélis na direção SW-NE.

Fonte: O autor, 2016.

Figura 101 – Imagem 3D apresentando uma vista lateral da região da falha de Macaé.



Nota: A linha amarela tracejada representa o contato do Complexo Região dos Lagos com Grupo São Fidélis na direção SW-NE. Resposta aos dados Magnetométricos do perfil 01 através do VOXI.

Fonte: O autor, 2016.

5.6.2 Falha de Empurrão

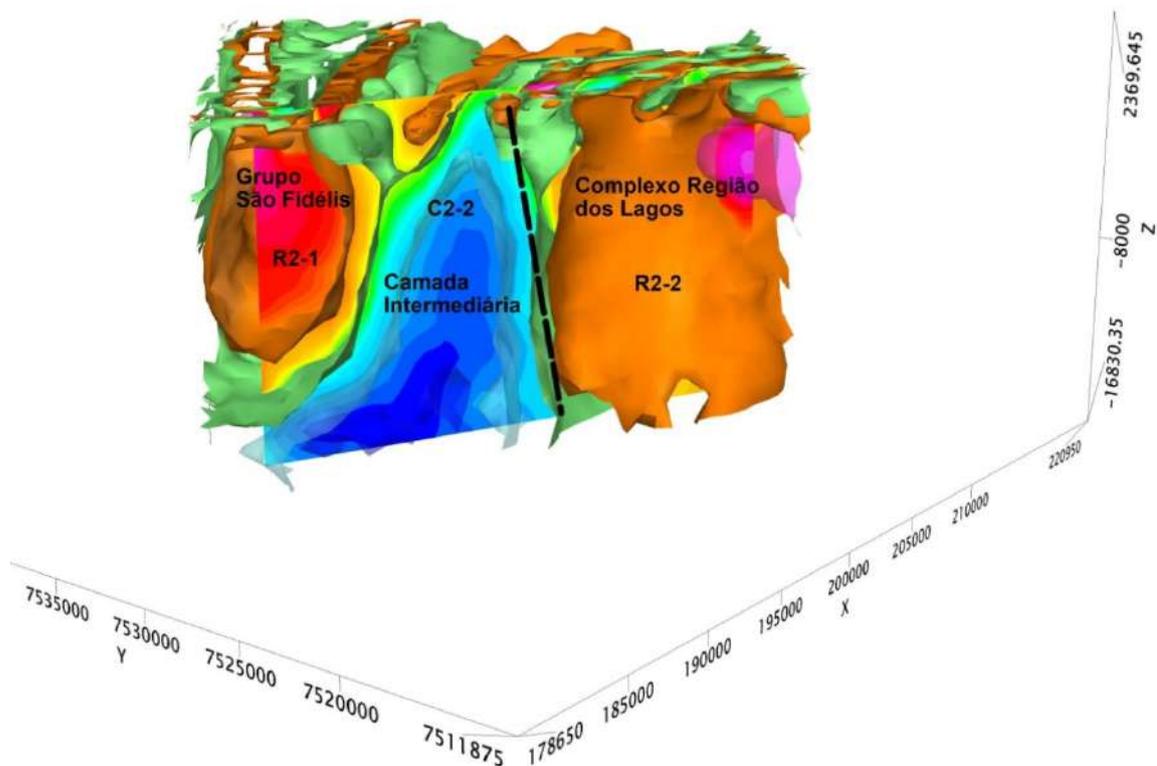
A falha de empurrão ou zona de Cisalhamento Serra do Segredo (Almeida *et al.*, 2012a) (Figuras 98 e 102) foi modelada e apresentou um modelo bem coerente e compatível com os outros resultados geofísicos. Neste modelo foi possível identificar a sutura do Complexo Região dos Lagos com grupo São Fidélis e caracterizar a falha de empurrão.

Na interpretação da figura 98 (vista de cima), nota-se que no processo de sutura ocorreu uma deformação da camada que corresponde a geoestrutura C2-2

na direção SE-NW. E observando os dados de superfície, nota-se que na direção SE-NW ocorrem variações de mergulho das camadas entre um terreno e outro, sem formação de dobras.

Outro fato que pode ser observado na Figura 98 é uma alternância de camadas na região de contato do Complexo Região dos Lagos, que corrobora com o trabalho de Schmitt *et al.* (2004) que define o Terreno Cabo Frio composto por ortognaisses do Paleoproterozoico e por uma sequência supracrustal Neoproterozoica. Deve-se ressaltar também que existem ocorrências de corpos anfíbolíticos intercalados, sem datação, cuja a origem pode elucidar a evolução metamórfica da área. Essa sequência supracrustal seria constituída de anfíbolitos e paragneisses, oriundos de pacotes sedimentares com intercalação de rochas ígneas do Neoproterozoico.

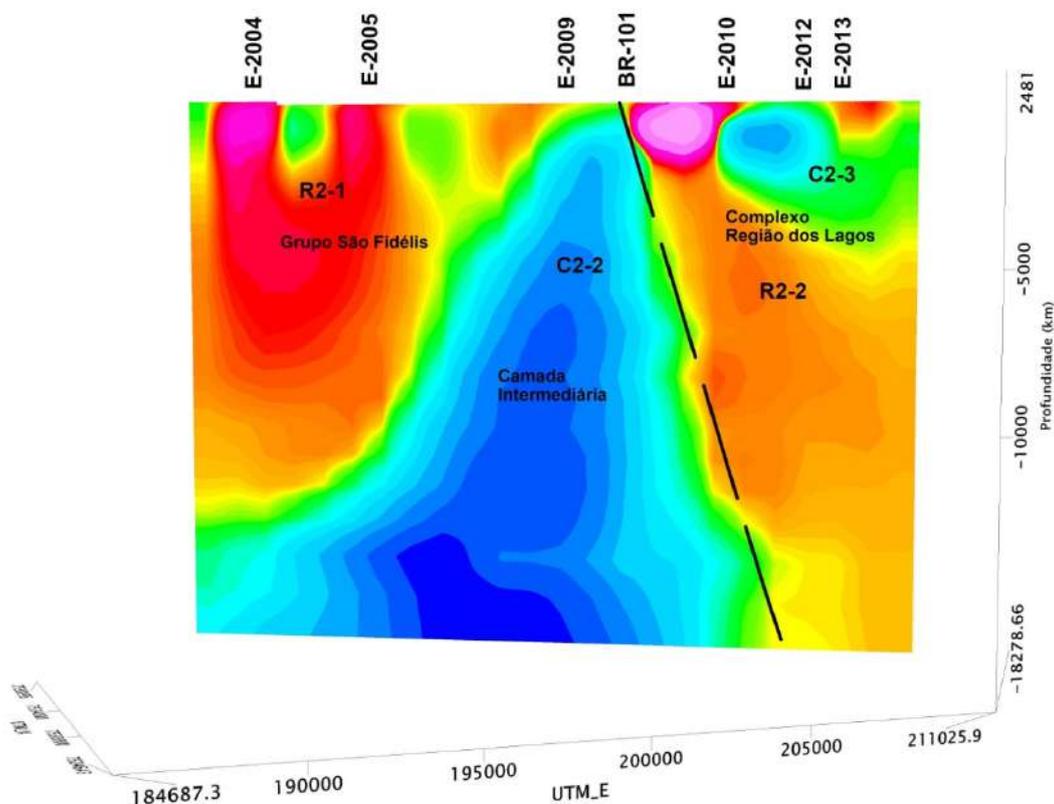
Figura 102 - Inversão 3D dos dados Magnetométricos do perfil 02, na região da falha de Empurrão.



Nota: A imagem caracteriza o contato (linha tracejada) do Complexo Região dos Lagos com o Grupo São Fidélis entre os corpos R2-1 e R2-2.

Fonte: O autor, 2016.

Figura 103 - Seção transversal obtida dos dados Magnetométricos do perfil 02 através do VOXI, na falha de Empurrão.



Nota: Detalhe da figura 98 e 102 da região da falha de Empurrão, ponto do contato (linha preta tracejada) do Complexo Região dos Lagos com o Grupo São Fidélis na direção NW-SE. - Fonte: O autor, 2016.

As imagens das Figuras 98, 102 e 103 mostram bem o contato do Complexo Região dos Lagos com o Grupo São Fidélis. Na imagem está realçada a separação dos dois terrenos pela geoestrutura (C2-2) que foi observada na seção 02 MT assim como nos outros produtos finais.

A ferramenta mostrou-se muito útil e aplicável para regiões de baixa latitude magnética. Os resultados mostram correlação com a geologia local e coincidem com estruturas regionais (com direções preferências NW-SE) e geoestruturas formadas por rochas ígneas e/ou metamórficas encontradas na região.

O processo de identificação dos corpos feita nesta rotina através do constraste da susceptibilidade magnética, individualização das estruturas pelo constraste de susceptibilidade. O valor calculado para C2-1 é de -0,0003 e o valor do R2-1 e R2-2 seria de 0,0009. A inversão 3D materializou as estruturas que compõem a região da falha de empurrão, possibilitando obter-se uma ideia desta estrutura em subsuperfície.