

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA, LAGEMAR.

PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA
PROJETO FINAL II

KENJI FREIRE MOTOKI

GRAVIMETRIA DA CADEIA PERIDOTÍTICA DE SÃO PEDRO E SÃO PAULO,
OCEANO ATLANTICO EQUATORIAL COM BASE NOS DADOS DE SATÉLITES.

NITERÓI
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA, LAGEMAR.

KENJI FREIRE MOTOKI

GRAVIMETRIA DA CADEIA PERIDOTÍTICA DE SÃO PEDRO E SÃO PAULO,
OCEANO ATLANTICO EQUATORIAL COM BASE NOS DADOS DE SATÉLITES.

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado à
Universidade Federal
Fluminense como requisito
para a obtenção do grau
Bacharel em Geofísica.

ORIENTADOR: Dra. SUSANNA ELEONORA SICHEL

NITERÓI
2013

KENJI FREIRE MOTOKI

GRAVIMETRIA DA CADEIA PERIDOTÍTICA DE SÃO PEDRO E SÃO PAULO,
OCEANO ATLANTICO EQUATORIAL COM BASE NOS DADOS DE SATÉLITES.

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado à
Universidade Federal
Fluminense como requisito
para a obtenção do grau
Bacharel em Geofísica.

Aprovada em 26 de março de 2013

Banca Examinadora:

Susanna Eleonora Sichel
(Orientador)

Isa Brehme, D.Sc.
(membro)

Jose Antonio Baptista Neto, D.Sc.
(membro)

NITERÓI
2013

Agradecimentos

Aos meus amigos por sempre me apoiarem nesse longo percurso que foi a graduação do curso de geofísica, em especial aqueles que estiveram mais próximos.

A MAG, onde conheci pessoas que contribuíram muito para meu desenvolvimento pessoal e aprendizado, onde pude desenvolver minhas capacidades técnicas e científicas.

A Petrobras por financiar o projeto de pesquisa “Origem e evolução das rochas mantélicas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo” que despertou meu interesse na área e resultou neste trabalho.

A Marcelle Rocha por não permitir que eu desistisse na última hora e contribuído em cada etapa no meu final de faculdade com seu jeito divertido e engraçado de ser.

A Marcos Santos e Rafael Leão pelo treinamento de uso de softwares utilizados para confecção dessa monografia em geral.

A Giovanni Sophia, Victor Couto e Thonia Senna por auxiliar na revisão deste documento.

Aos meus pais por investirem no meu futuro.

Sumário

1. Introdução.....	10
2. Objetivo.....	13
3. Revisão Teórica.....	13
3.1 Gravimetria.....	13
3.2 Anomalia Bouguer.....	14
3.3 Interpretação gravimétrica.....	15
4. Geologia Regional	18
5. Metodologia	20
6. Resultados.....	23
7. Conclusões	32
8. Bibliografia.....	34

Lista de Figuras

Fig. 1 - Mapa de localização da área de estudo.

Fig. 2 - Processo de evolução de um *megammulion*.

Fig. 3 - Modelos para a relação entre a estrutura geológica e a gravimetria da superfície da Terra.

Fig. 4 - Modelos para a relação entre o nível do Moho e as anomalias gravimétricas da superfície da Terra sem compensação isostática.

Fig. 5 - Mapa de batimetria por multifeixes para a área da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo

Fig. 6 - Figura Ilustrativa da batimetria predita.

Fig. 7 - Morfologia submarina da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo.

Fig. 8 - Mapa batimétrico da área de estudo.

Fig. 9 - Mapa de anomalia ar-livre predita da área de pesquisa.

Fig. 10 - Mapa de anomalia Bouguer da área de estudo.

Fig. 11a - Representação 3D do mapa de batimétrico.

Fig. 11b - Representação 3D do mapa de anomalia ar-livre.

Fig. 11c - Representação 3D do mapa de anomalia Bouguer.

Fig. 11d - Seleção das áreas para gerar os diagramas de interpretação gravimétrica.

Fig. 13a - Diagrama de interpretação gravimétrica para área 1

Fig. 13b - Diagrama de interpretação gravimétrica para área 2.

Fig. 13c - Diagrama de interpretação gravimétrica para área 3

Fig. 13d - Diagrama de interpretação gravimétrica para área 4.

Fig. 14 - Diagrama de interpretação gravimétrica para a área de estudo.

Resumo

Foram realizadas análises gravimétricas na área em torno do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, com base nos dados de satélite de TOPEX ver. 20. O bloco ao norte da falha transformante de São Paulo, pertencente à Placa Africana, possui anomalias gravimétricas mais altas e profundidade mais rasa em relação ao bloco sul, a Placa Sul-Americana. Estas observações sugerem que o manto oceânico do bloco sul é mais denso e mais frio do que o bloco norte, corroborando a idéia de que a zona de falhas transformantes de São Paulo é um ponto frio (cold-spot). As anomalias ar-livre e Bouguer demonstram que a saliência morfológica da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo, com 3500 m de altura relativa, não é suportada por compensação isostática, mas por firmeza mecânica do embasamento e processo dinâmico de soerguimento ativo. Esta observação indica que a cadeia peridotítica não é um *megamullion*, o que justifica a ausência de gabro e presença de peridotito milonítico na cadeia peridotítica. Por outro lado, a grande profundidade ao longo dos segmentos da cadeia meso-oceânica desta área é suportada pela compensação isostática, o que sugere possível ocorrência de expansão tectônica.

Palavra-chave: Cadeira Peridotítica, São Pedro e São Paulo, megamullion, gravimetria.

Abstract

Gravimetric analysis were done in the area around the Saint Peter Saint Paul Archipelago, Equatorial Atlantic Ocean, based on satellite data from TOPEX ver. 20. The north block of the transform fault of Saint Paul, that belongs to the African Plate, has higher gravity anomalies and shallower depth relation to the southern block, the South American Plate. These observations suggest that the oceanic mantle south block is denser and cooler than the north block, supporting the idea that the area of Saint Paul transform fault is a cold spot. The free-air anomaly and Bouguer demonstrate that the morphological protrusion of peridotite ridge of St. Peter and St. Paul, with 3500 m of relative height, is not supported by isostatic compensation, but the basement mechanical strength and dynamic process of active uplift. This observation shows that the peridotite ridge is not a megamullion, which explains the absence of presence of gabbro and mylonitic peridotite on the peridotite ridge. On the other hand, the great depth along mid-ocen ridge segments of this area is supported by isostatic compensation, suggesting the possible occurrence of tectonic expansion.

Key words: Peridotite Ridge, Saint Peter Saint Paul Archipelago, gravimetry, megamullion

1.

Introdução

No Oceano Atlântico Equatorial existe um afloramento rochoso composto de cinco pequenas ilhas, que não chegam a 0,02 km². Sua parte submersa é extensa e profunda possuindo 100 km de comprimento e 20 de largura. Essa morfologia é conhecida como Cadeia Peridotítica de São Pedro São Paulo. A cadeia é dividida em parte norte e parte sul e diferem no tipo rocha encontradas em cada parte (Motoki et al, 2009).

A cadeia peridotítica de São Pedro São Paulo cujo topo está exposto acima do nível do mar formando o Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) situado no entorno das coordenadas de 0°56'N e 29°21'W (Ilha Belmonte) a 990 km a nordeste da cidade de Natal, RN. A área total emersa é de 13.000 m² como seu ponto culminante em 21 m de altitude (Fig 1.).

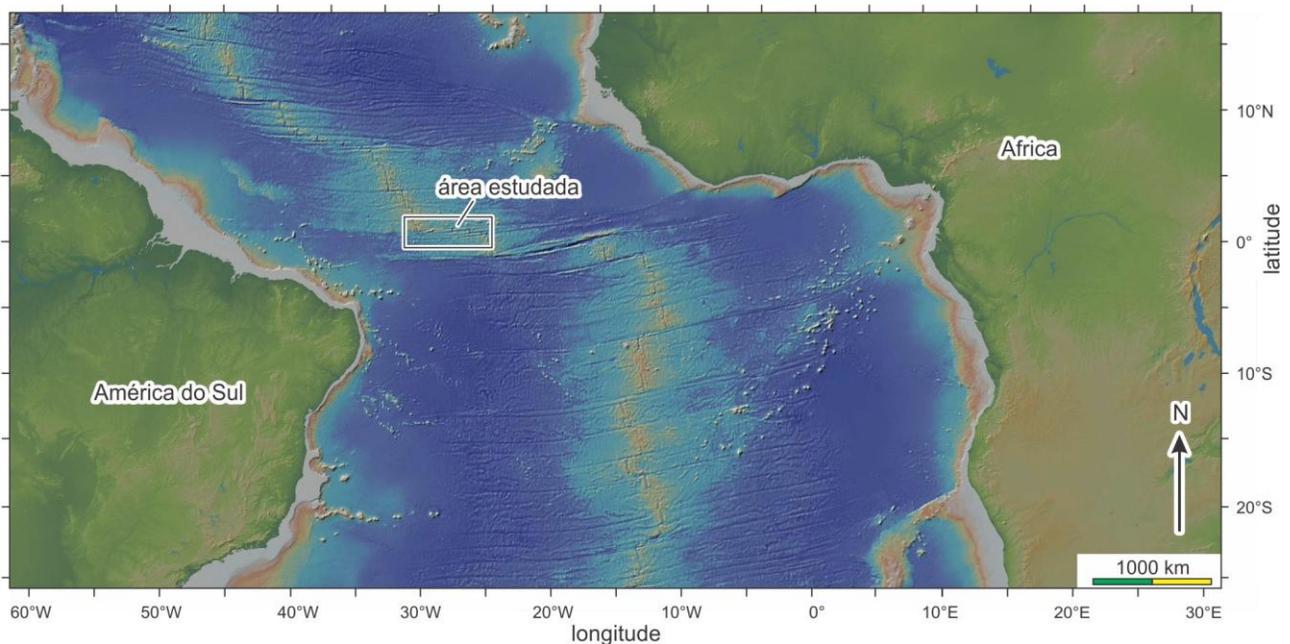


Fig. 1 - Mapa de localização da área de estudo, a Zona de Falhas Transformantes de São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial.

O arquipélago corresponde ao único afloramento de rochas ultramáficas do manto abissal acima do nível do mar no Oceano Atlântico. As exposições do manto abissal no fundo oceânico são encontradas, porém raramente, ao longo de falhas transformantes, como também em certos segmentos de cadeia meso-oceânica e em *megamullions*.

Megamullions (Fig 2.) são as saliências lineares com altura relativa de 100 m a 200 m, compostas de rochas gabroicas e peridotíticas. As rochas peridotíticas representam as exposições do manto abissal exposto diretamente no assoalho oceânico por processos amagmáticos. A direção do alongamento de saliências morfológicas lineares em forma de estrias aparecem geralmente perpendicular à cadeia meso-oceânica adjacente. Na área de estudo ocorrem essas estruturas tal como no ponto de mergulho SP03 (Hekinian et al., 2000).

A Zona de Fratura Kane (Kane Fracture Zone; Rabinowitz&Purdy,1976) e o Maciço Atlantis do Oceano Atlântico Norte (Atlantis Massif; Blackman et al, 1998) são exemplos onde rochas mantélicas estão expostas no fundo do oceano representando *megamullions*.

As rochas que afloram no ASPSP são peridotitos miloníticos serpentinizados, não serpentinizados e milonito kaersutítico (Campos et al., 2005; 2010).

O ASPSP ocorre na parte norte da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo. As observações pelo submersível científico Nautilo revelaram que a parte norte da Cadeia, denominada Elevação Norte, é constituída por peridotitos miloníticos intensamente deformados. Na parte sul da Cadeia, a Elevação Sul, é composta de peridotitos não deformados (Hekinian et al., 2000).

Sob ponto de vista da neotectônica, no Arquipélago ocorre o soerguimento tectônico com a taxa mais alta no Brasil, sendo de 1,5 mm por ano (Motoki et al., 2009; Campos et al., 2010). O tectonismo do Arquipélago pode esclarecer o processo da abertura do Oceano Atlântico Equatorial e dos movimentos tectônicos atuais da Zona de Falhas Transformantes de São Paulo.

A presente monografia mostra os resultados dos estudos de gravimetria e geomorfologia para a Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo com base nos dados preditos de satélites TOPEX versão 15.1 e *Gravity Anomaly* versão 20

disponibilizados pelo Instituto de Oceanografia, Universidade da Califórnia, San Diego, Estados Unidos da América. Com base nos resultados, será discutido o processo de evolução tectônica da Cadeia Peridotítica.

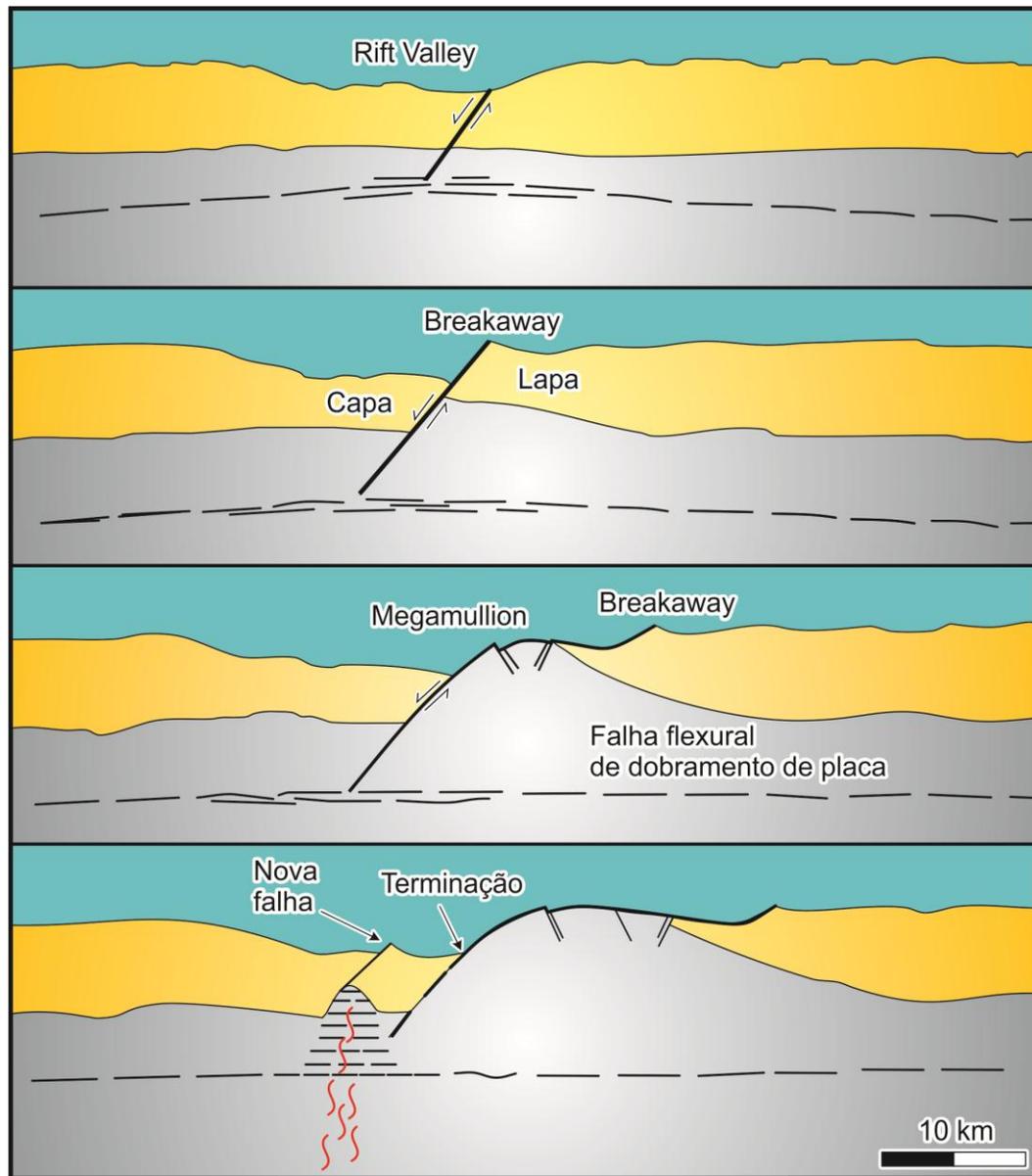


Fig. 2 - Perfil cruzando um rift valley perto do final de uma expansão de segmento, mostrando o processo de evolução de um *Megamullion* (Modificado de Tucholke, 1998)

2. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo colaborar com o debate relativo aos processos tectônicos que se relacionam à expansão das placas no Oceano Atlântico Equatorial e a formação da Zona de Falhas Transformantes de São Paulo e sua relação com o manto frio, chamado de *coldspot*, utilizando para isso, dados gravimétricos e batimétricos de domínio público.

O desenvolvimento das metodologias de interpretações gravimétricas tem por finalidade estimar o mecanismo de sustentação das feições geomorfológicas submarinas esclarecendo a proporção entre a sustentação por firmeza mecânica do embasamento e a compensação isostática por variação da profundidade da descontinuidade de Mohorovicic (Moho). Para este objetivo, neste trabalho o autor introduz novos diagramas: 1) Ar-livre (Free-air) vs Profundidade; 2) Ar-livre vs Bouguer.

3. Revisão Teórica

3.1 Gravimetria

O método gravimétrico consiste em medidas de variações do campo da gravidade terrestre ao longo de um *track*, comparandas com a medida de gravidade de uma estação base com valor gravidade absoluta, denominadas anomalias, que são interpretadas como resultado das variações laterais na densidade dos materiais da subsuperfície provocadas por estruturas geológicas ou corpos rochosos com diferentes densidades (Telford et al., 1990).

Tendo como principio físico a Lei da Gravitação Universal de Newton, que afirma:

$$F = G \frac{M.M'}{R^2}$$

F = força de atração entre duas massas.

R = distancia entre as massas.

G = constante gravitacional.

M e M' = Massa dos corpos que se atraem

Supondo a Terra uma esfera estática, e correlacionando a lei da gravitação universal, com a primeira lei de Newton tem que:

$$F = G \frac{M.M'}{R^2} = M.a$$

$$a = G \frac{M}{R^2}$$

Onde *a* é a aceleração da gravidade, que segundo as condições ideais, seria constante em qualquer ponto na superfície da Terra, contudo sabe-se que essa é um elipsoide de revolução, pode-se observar variações relacionadas às mudanças de latitude, sendo essa uma correção entre outras a serem feitas, como correção ar-livre e Bouguer, além de influências de corpos celestes no campo gravitacional terrestre.

Para este trabalho a correção ar-livre não é necessária, pois os dados obtidos já são dados de ar-livre. Segundo Keary et al. (2009), a correção de ar-livre trata da variação do ponto de observação ao centro da Terra.

3.2 Anomalia Bouguer

A anomalia Bouguer considera tanto a variação da aceleração da gravidade com a altura, quanto a de anomalia ar-livre. Essa leva em conta também as massas

presentes entre o ponto de observação e a superfície de referência. A correção é aplicada para remover o efeito gravitacional das rochas presentes entre o ponto de observação e o *datum*, aproximando a camada de rocha abaixo do ponto de observação a uma placa horizontal infinita (Kearey et al 2009) .

Para esta monografia foi utilizado o conceito de Bouguer simples determinado pela fórmula: $B = 2\pi\rho Gh$, onde ρ é a densidade da rocha, G é a constante gravitacional e h é a altitude do ponto que será medido. O alvo encontra-se abaixo do nível do mar e portanto é necessário remover a influência da densidade da água sobre o valor de gravidade nas rochas para que não ocorram problemas na hora de interpretar os resultados.

3.3 Interpretação gravimétrica

Após adquirir os dados foi utilizada uma nova técnica desenvolvida por Motoki et al (2013) para correlação dos mesmos. Os diagramas de ar-livre (free-air) vs profundidade e ar-livre vs Bouguer podem apresentar um dos casos apresentados nas figuras 3 e 4.

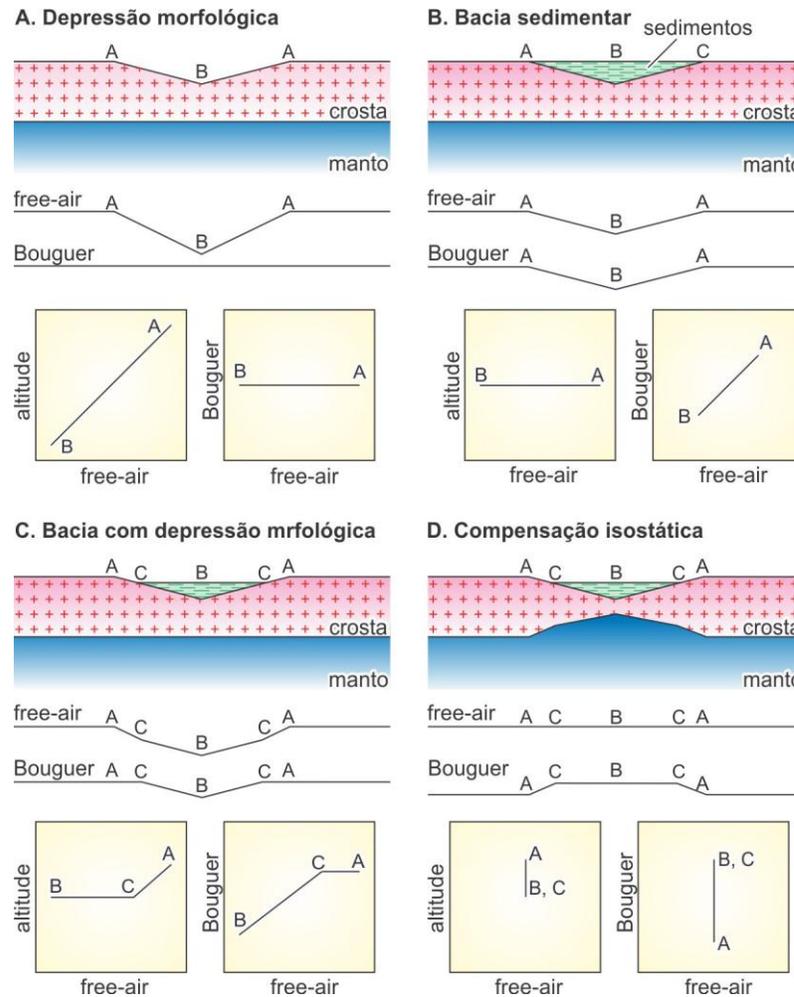


Fig. 3 - Modelos para a relação entre a estrutura geológica e a gravimetria da superfície da Terra: A) Depressão morfológica simples sem compensação isostática; B) Bacia sedimentar sem compensação isostática; C) Bacia sedimentar com depressão morfológica sem compensação isostática; D) Rife continental com compensação isostática completa. (Motoki et al, 2013)

Quando ocorre o caso da depressão morfológica simples sem preenchimento de depósitos sedimentares, a deficiência de massa é representada pela anomalia ar-livre e não apresenta variação na anomalia Bouguer (Fig 3A).

No caso da depressão morfológica preenchida por depósitos sedimentares formando uma bacia sedimentar, a deficiência de massa é representada tanto pela anomalia free-air quanto a Bouguer. Como não ocorre a compensação isostática, a

profundidade da descontinuidade de Mohorovičić é constante. A anomalia Bouguer é definida em função da estrutura geológica e dos materiais constituintes, portanto, nem sempre irá representar a profundidade da Moho (Fig 3B).

A bacia sedimentar com depressão morfológica é um caso composto dos dois exemplos acima citados. As anomalias free-air e Bouguer apresentam suas formas específicas. Os três exemplos anteriores são dos casos em que não acontece compensação isostática (Fig 3C).

Por outro lado, quando houver a compensação isostática completa por meio de variação da profundidade da Moho, a anomalia ar-livre é constante apesar da variação da anomalia Bouguer e do nível da superfície da Terra (Fig 3D).

Desta forma, através da observação dos diagramas ar-livre vs altitude e ar-livre vs Bouguer, pode-se distinguir qual é o modelo que está de acordo com as observações gravimétricas. A estrutura geológica e o estado de compensação isostática podem ser mais complexos. Portanto, através da comparação dos diagramas, pode-se determinar a proporção entre os efeitos da compensação isostática pela variação da espessura crustal e a sustentação da estrutura geológica pela rigidez mecânica da crosta e do manto litosférico subjacente.

Quando há heterogeneidade na profundidade da Moho, as interpretações geológicas dos dados gravimétricos ficam mais complexas. No caso de espessamento e afinamento crustal, a forma de distribuição dos dados gravimétricos nos diagramas da fig 4. é similar a hipótese de uma bacia sedimentar (Fig. 3B) e, portanto é difícil distinguir qual o caso utilizando somente dados gravimétricos.

No caso de afinamento crustal é notável a elevação das anomalias ar-livre e Bouguer, sendo no sentido oposto dos casos de bacia sedimentar não compensada e espessamento crustal.

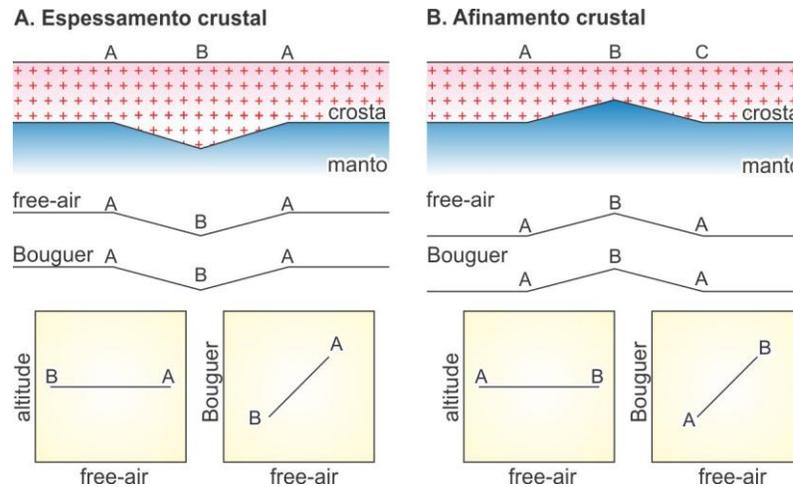


Fig. 4 - Modelos para a relação entre o nível da Moho e as anomalias gravimétricas da superfície da Terra sem compensação isostática: A) Espessamento crustal; B) Afinamento crustal. (Motoki et al, 2013)

4. Geologia Regional

A maioria das ilhas oceânicas existentes no mundo corresponde ao topo de edifícios vulcânicos que expõe rochas vulcânicas na superfície, tal como basalto. Entretanto, sendo diferente das outras ilhas brasileiras, como Fernando de Noronha (e.g. Gerlach et al., 1987; Rivalenti et al., 2007; Kogarko et al., 2007), Trindade e Martim Vaz (e.g. Almeida, 1965; Ulbrich, 1994; Marques et al., 1999), o Arquipélago de São Pedro e São Paulo não é um vulcão, mas sim constituído de rochas mantélicas serpentinizadas.

Em 1832, Charles Darwin passou pelo Arquipélago de São Pedro São Paulo, nomeado na época de Rochedo de São Paulo. Ele considerou que o Arquipélago estaria nas coordenadas $0^{\circ} 58' N$ e $29^{\circ} 15' W$, e a altura máxima foi de 15 pés (cerca de 4 m) acima do nível do mar e área definida dentro de três quartos de milha (cerca de $2,0 \text{ km}^2$) e indicou que as rochas da região não são vulcânicas. Diversos autores contribuíram para as as pesquisas das rochas presentes no Arquipélago. Washington (1930) definiu-as como dunitos que apresentavam evidencias de metamorfismo por pressão, Tilley (1947) descreveu-as como dunitos milonitizados, fazendo a descrição

mineralógica das amostras recolhidas pelo navio Beagle, Melson (1967) as classificou como sendo rochas derivadas do manto e Renard (1979) determinou que as rochas presentes eram peridotitos.

Em 1965, ocorreu o primeiro estudo de geomorfologia marinha no Instituto Oceanográfico de Woods Hole. E posteriormente os dados foram adquiridos na expedição R/V Atlantis II. Foram revelados três segmentos intra-transformantes e, pelo menos, quatro falhas transformantes através das informações morfológicas e petrológicas. Esses segmentos tinham comprimento aproximado de 20 a 25 km de direção norte-sul com falhas de direção leste-oeste com deslocamento dextral total de 580 km em uma faixa de 80 km de largura (Thompson, 1981).

A presença de terremotos rasos com cerca de 4.0 e 6.0 graus na escala Richter corrobora com a existência de movimentos neotectônicos. Gorini (1981) apontou a ocorrência de soerguimento incipiente no Arquipélago São Pedro São Paulo.

Nessa localidade a velocidade de expansão é de 1.5 cm/ano para cada lado e a diferença máxima entre os blocos é de 36 Ma (Bonatti et al., 1993; Schilling et al., 1995). Entre os anos de 1997 e 1998 o submersível Nautilo do IFREMER realizou treze mergulhos profundos de até 4800 m de profundidade. Os estudos revelaram que a região é caracterizada por intensa atividade tectônica e uma limitada atividade magmática. (Hekinian et al., 2000, Sichel et al. 2008)

Motoki et al. (2009) e Campos et al. (2010) comprovaram que o tectonismo de soerguimento está ativo e possui taxa de 1.5 mm/ano, mostrando-se o soerguimento mais intenso do Brasil.

A possível presença de *Megamullions* também é notável na área (Fig. 5). São formados a partir de uma falha de baixo ângulo que delimita as placas oceânicas, denominada falha de deslocamento (detachment fault). Este tipo de falha ocorre na zona de expansão de baixa taxa e/ou baixa temperatura do manto abissal (Sichel et al 2012).

Megamullion, chamado também de *mantle core complex*, corresponde a uma protuberância morfológica abissal em forma de carapaça de tartaruga e é constituída por serpentinito originado de rochas ultrabásicas do manto abissal e pode apresentar quantidade considerável de gabro. A formação dessa estrutura foi dividida em quatro

fases por Tucholke, 1998: Na primeira fase ocorre a expansão amagmática do fundo oceânico onde é gerada uma falha de descolamento que chega até a parte superior da litosfera . A partir desse evento a falha evolui até chegar a grandes profundidades e tocar o limite dúctil-ruptil. O deslizamento contínuo expõe a crosta inferior e o manto superior na lapa, eventualmente formando um *megamullion*. Por fim a fase magmática do espalhamento do fundo oceânico termina de deslizar sobre a falha de descolamento e resulta no crescimento do *megamullion*, após esse evento ocorre a geração de uma nova falha e processo é encerrado.

Para a área de estudo essas condições são satisfatórias, entretanto as características da morfologia submarinas são diferentes das encontradas no Atlântico Norte. Na área de estudo a Cadeia peridotítica foi interpretada como um *megamullion* deformado por tectonismo recente (Motoki et al 2009). Contudo, as rochas constituintes principais desta são peridotitos miloníticos não serpentinizados e serpentinizados, sem a presença de gabro. Desta forma a origem e o mecanismo de exumação das rochas mantélicas da Cadeia Peridotítica podem ser diferentes de um *megamullion*.

5. Metodologia

Para obtenção dos dados, foi utilizado o banco de dados TOPEX do Instituto de Oceanografia, Universidade da Califórnia (UCSD-SIO), San Diego, disponível desde 2011. Foram utilizados dados de batimetria “*Global Topography 1 minute resolution v. 15.1*” e dados preditos de gravimetria ar-livre “*Gravity Anomaly v. 20*”.

Os dados de batimetria e de gravimetria obtidos por navios possuem uma alta resolução, boa precisão e excelente exatidão. Sobretudo levantamentos batimétricos por multifeixes fornecem dados morfológicos muito detalhados do fundo do oceano (Fig. 5), sendo utilizados comumente para gerar modelos tridimensionais. Entretanto, esses dados ficam limitados a uma faixa estreita ao longo do percurso do navio. Desta forma, não cobrem uma grande área.

Por outro lado, as análises de órbitas de satélites artificiais (Fig 6.) fornecem variações gravimétricas locais de cada área, o que permite a confecção do mapa mundial de anomalia ar-livre. A combinação entre a anomalia ar-livre acima citada e os dados conhecidos através de batimetrias convencionais de navios possibilita a

confeção de mapa batimétrico mundial, conhecida como batimetria predita (Smith & Sandwell, 1997).

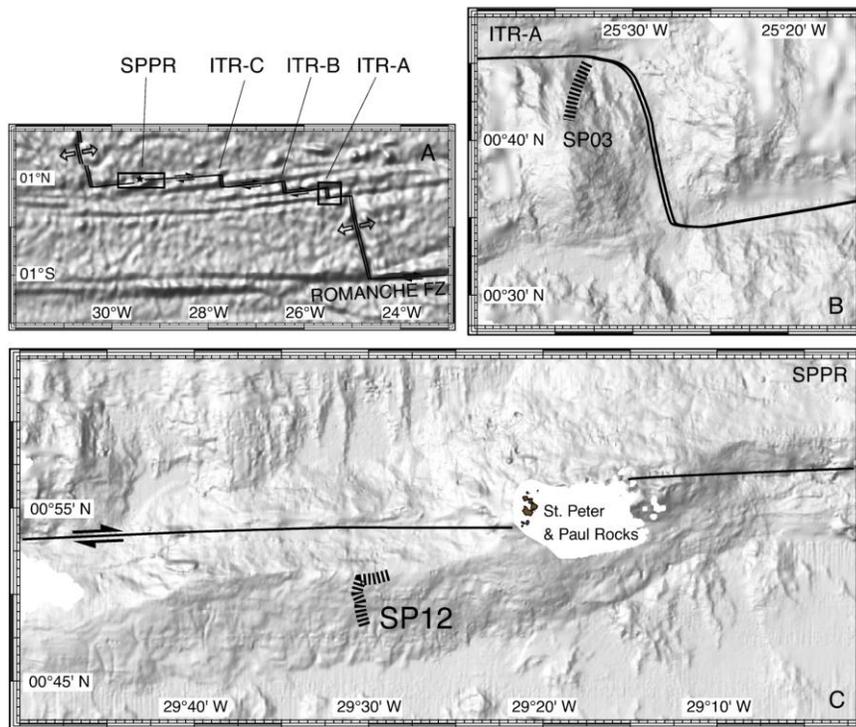


Fig. 5 - Mapa de batimetria por multifeixes para a área da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo (Brunelli & Seyler, 2010). SPPR - Arquipélago de São Pedro e São Paulo; ITR-A, ITR-B, ITR-C - segmentos de cadeia meso-oceánicas; SP03, SP12 - mergulhos profundos.

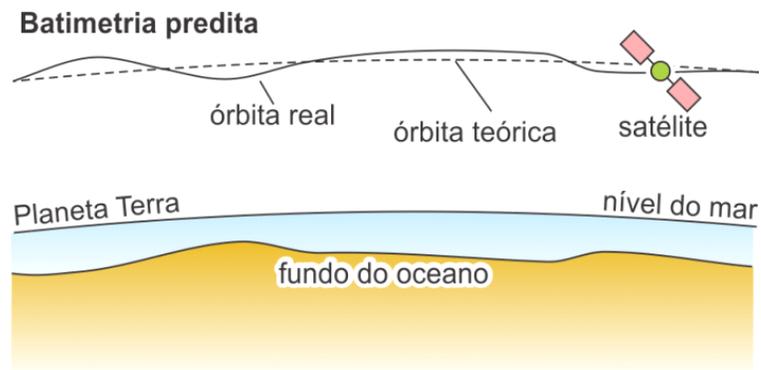


Fig. 6 – Figura Ilustrativa da batimetria predita.

A primeira versão do mapa batimetria predita mundial teve resolução aparente de 3,7 km e cobriu todas as áreas oceânicas entre 72 °N e 72 °S . De fato, tal resolução foi válida apenas ao longo das trajetórias de navios para os dados-base, chamados de *benchmark* com resolução inferior em outras áreas, sendo de 10 a 20 km. De acordo com a acumulação de dados de satélite e de navios, a qualidade dos dados foi melhorada em resolução e precisão. Desde 2002, o GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*) adotou a batimetria predita como o principal instrumento de mapeamento batimétrico mundial.

Recentemente, foram implantados novos dados e novos métodos para a confecção dos mapas gravimétricos e batimétricos de escala mundial, aprimorando a resolução e a exatidão dos dados preditos (Sandwell & Smith, 2009).

A anomalia ar-livre e os dados batimétricos estão com a resolução aparente de 900 m utilizando o banco de dados SRTM30 (*Shuttle Remote Topographic Map*). Desde 2005, um grande número de dados obtidos por navios tem sido incorporados ao TOPEX. Embora tais técnicas não apresentem uma resolução tão satisfatória se comparadas com os dados de navio, elas podem cobrir maior extensão em área, mostrando-se adequadas para estudos regionais..

Para a confecção do mapa de Bouguer são necessários a combinação de dados de anomalia ar-livre e batimetria obtidos através do TOPEX . Foi empregado o software Oasis Montaj para confecção do mapa com o *toolbox* de gravimetria atribuído os valores de densidade da crosta como foi 2,2 g / cm³, a densidade da água de 1,03 g /cm³, e a constante gravitacional $6,67259 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{s}^2\text{kg}$. Diferentemente dos dados navio, os dados de satélite apresentam problemas devido as diferenças entre as resoluções de anomalia ar-livre e topografia, gerando, em alguns casos, falsos picos e vales no mapa de batimetria e conseqüentemente no de anomalia Bouguer (Fig 8, 9, 10). A resolução horizontal topográfica ao longo das trajetórias de referência dos navios é evidentemente superior àquela da anomalia ar-livre.

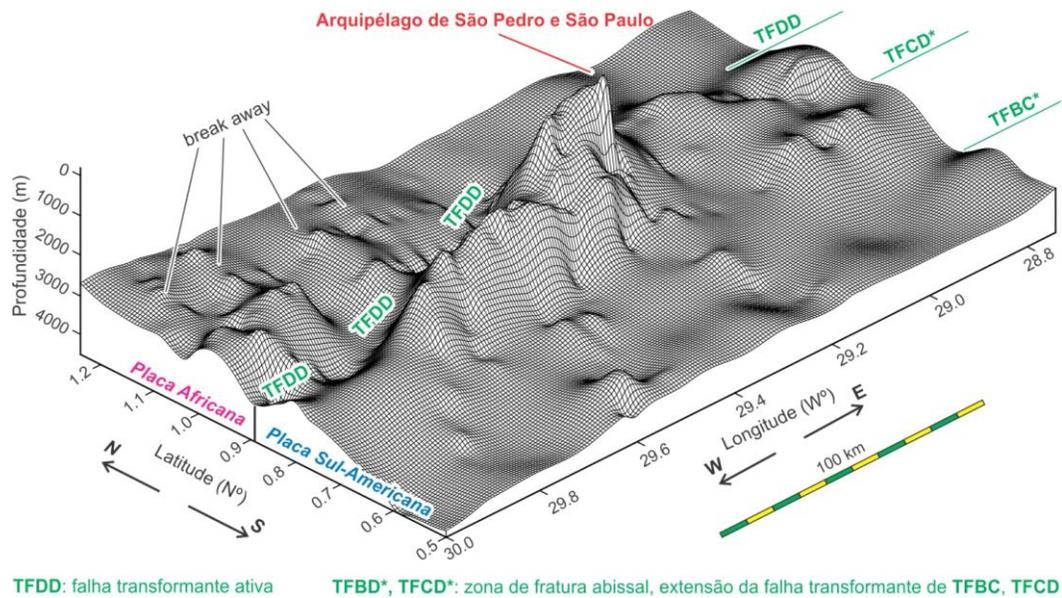


Fig. 7 - Morfologia submarina da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo baseada na batimetria predita, modificado de Motoki et al. (2009). TFDD é uma falha transformante e TFCD*, TFBC* são zonas de fratura abissal referente.

6. Resultados

A partir dos mapas das figuras 8, 9 e 10, foram confeccionadas visualizações tridimensionais (Fig 11a, 11b, 11c) obtendo uma ampla visão da área de estudo.

O mapa de batimetria predita apresenta a morfologia do fundo oceânico dando ênfase a cadeia peridotítica e as estruturas mais altas na parte noroeste do mapa. É notável que a resolução da região é bem heterogênea, apresentando pouca precisão na parte nordeste da cadeia e a sul da mesma, onde ocorreram poucos levantamentos de navio. No caso do mapa de anomalia ar-livre é possível perceber que a cadeia peridotítica atinge valores acima de 100 mGal e que as alturas relativas são bem expressas na figura 9, possibilitando uma noção básica de como é a área de estudo.

Conforme comentado anteriormente fica claro a visualização de alguns picos falsos no mapa de batimetria e consequentemente no mapa anomalia Bouguer.

Os estudos gravimétricos acima citados mostram que cada estrutura geomorfológica desta região tem características gravimétricas específicas.

Foram selecionadas quatro áreas, além da cadeia peridotítica, para avaliar a eficiência do método. A Fig. 12 apresenta as áreas selecionadas para confeccionar os digramas de ar-livre v.s. profundidade, conforme a proposta de Motoki et al. (2013) e Motoki, K. F. et al, (2013).

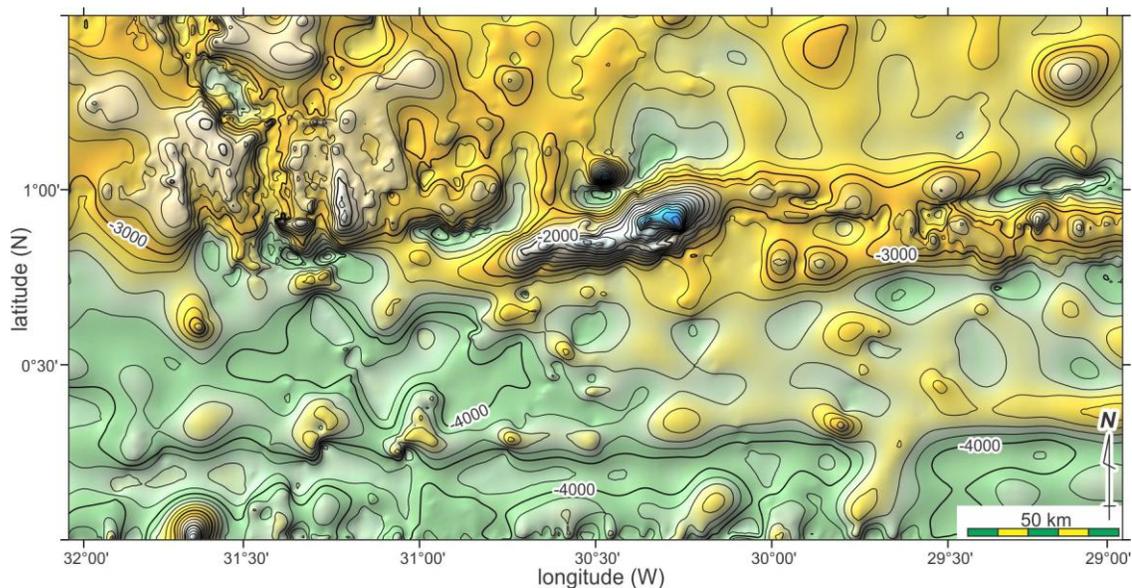


Fig. 8 - Mapa batimétrico da área de estudo.

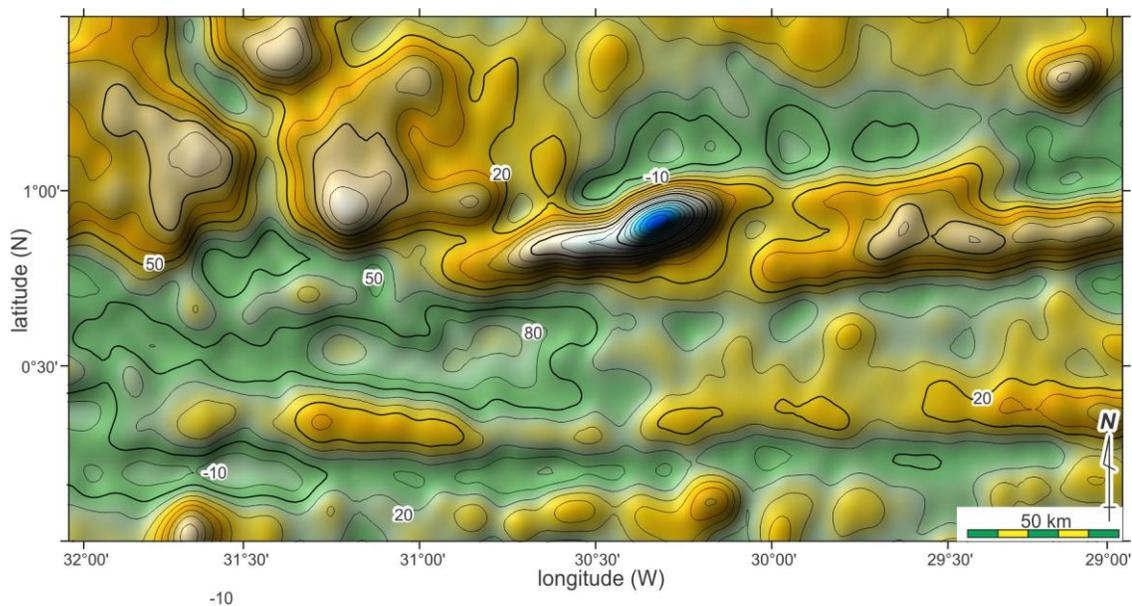
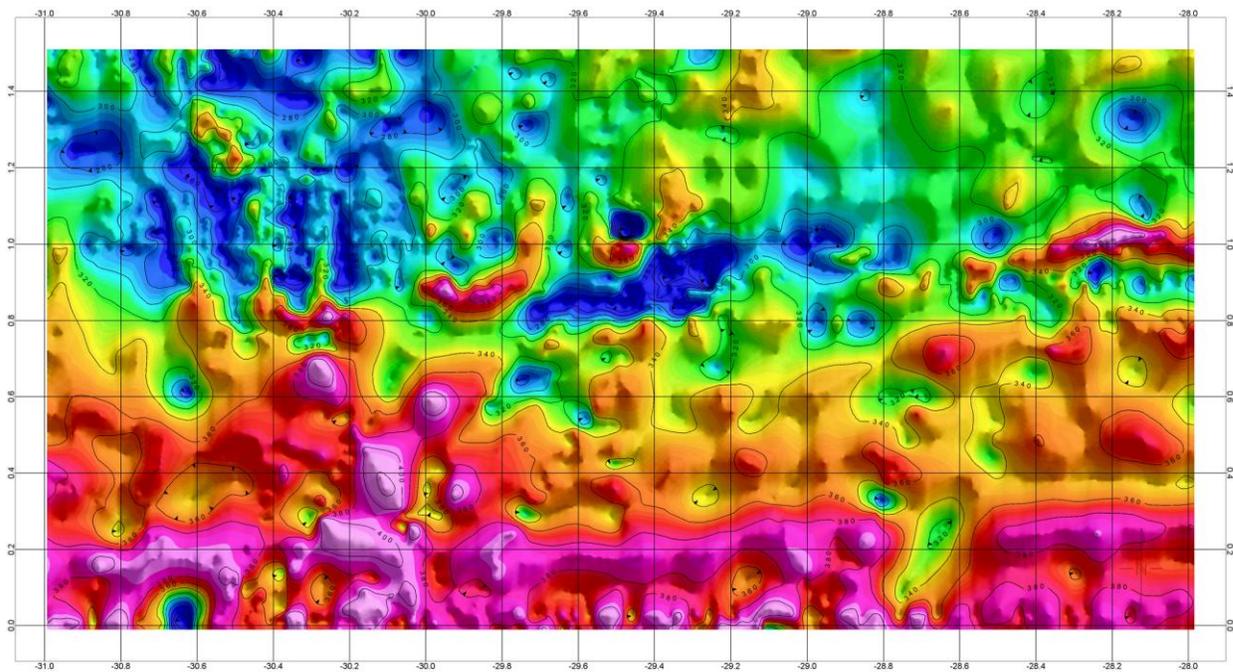


Fig. 9 - Mapa de anomalia ar-livre predita da área de pesquisa.



Mapa de Anomalia Bouguer

Fig. 10 - Mapa de anomalia Bouguer da área de estudo.

Visão 3D do mapa batimétrico

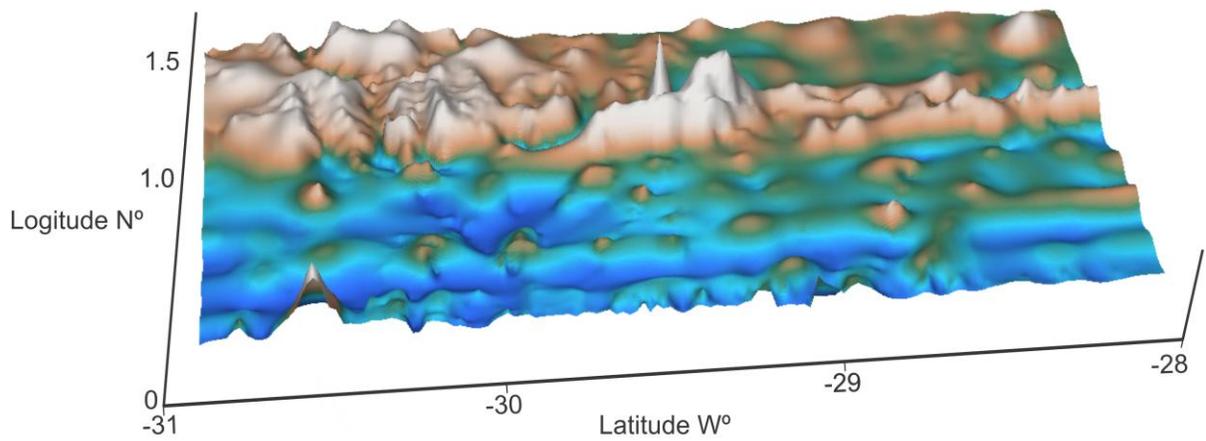


Fig. 11a - Representação 3D do mapa batimétrico da área de estudo.

Visão 3D do mapa de anomalia ar-livre

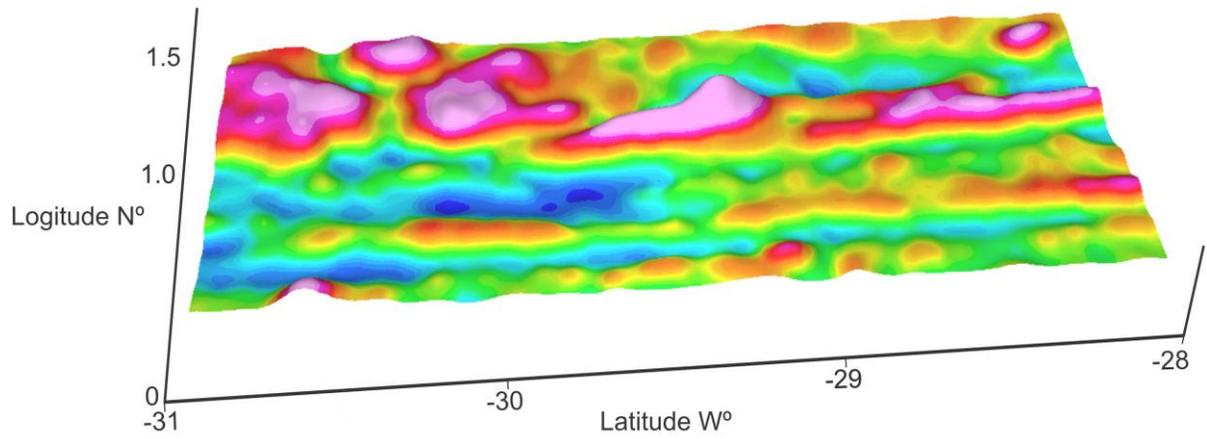


Fig. 11b - Representação 3D do mapa de anomalia ar-livre da área de estudo.

Visão 3D do mapa de anomalia Bouguer

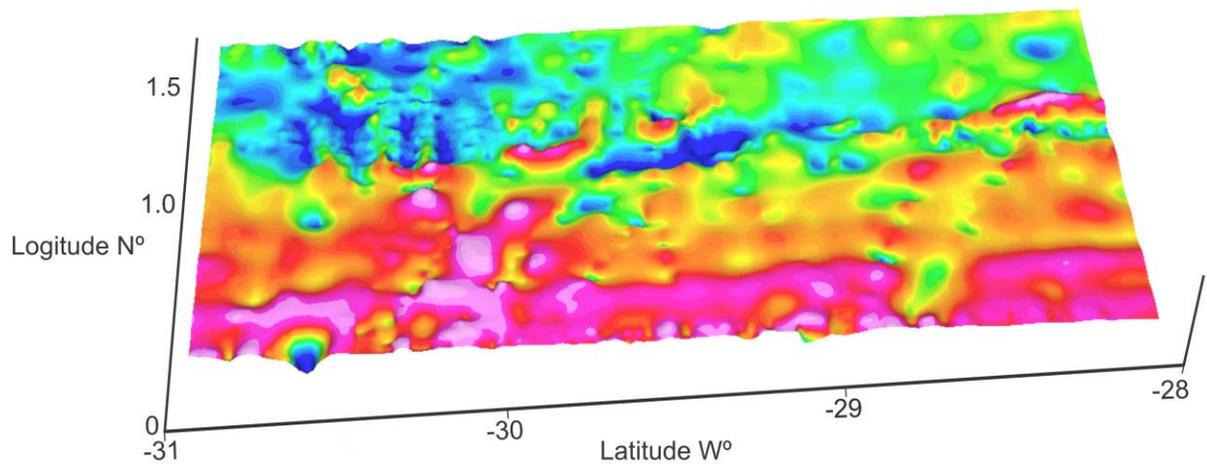


Fig. 11c - Representação 3D do mapa de anomalia Bouguer da área de estudo.

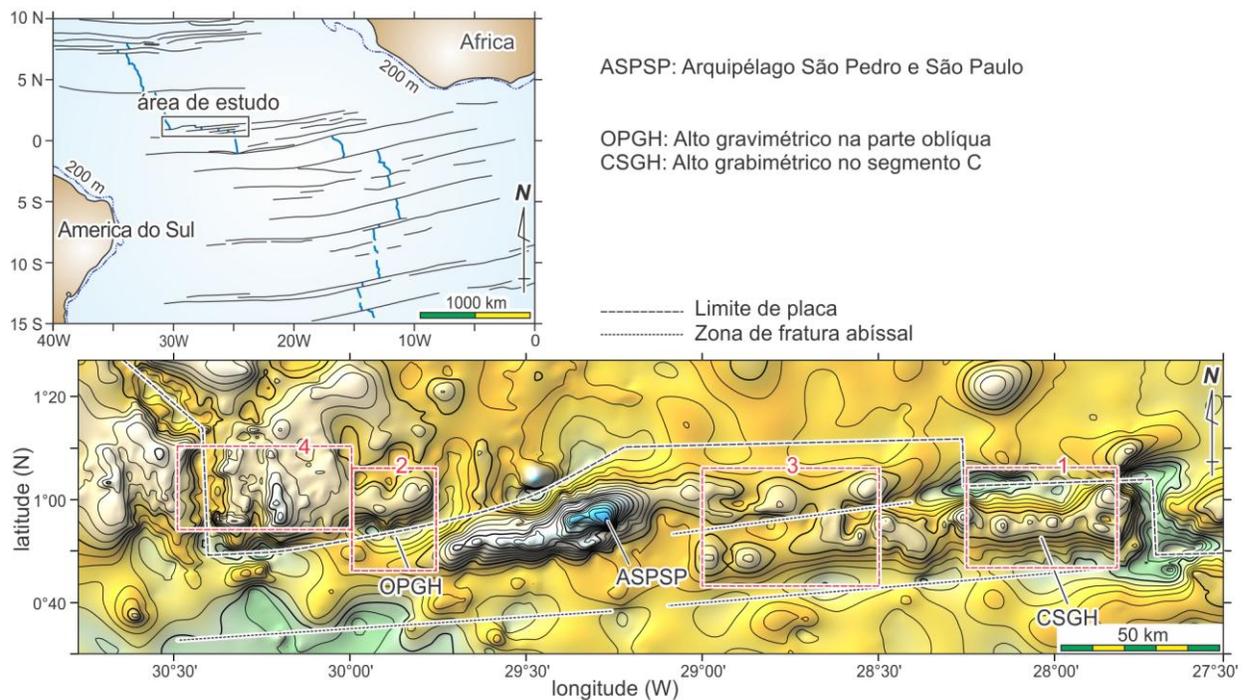


Fig. 12 – O mapa índice para os diagramas de interpretação gravimétrica. ASPSP – Arquipélago de São Pedro São Paulo, OPGH – Alto gravimétrico na parte oblíqua e CSGH – Alto gravimétrico no segmento C.

A área 1 representa a elevação morfológica linear entre a zona de fratura inativa TFBC* e a falha transformante TFCD (Fig. 13A). A altura relativa desta morfologia é relevante, sendo no máximo 1700 m. Esta área inclui o alto gravimétrico CSGH, que esta relacionado possivelmente à exposição das rochas do manto formando um *megamullion* (Motoki et al., 2009).

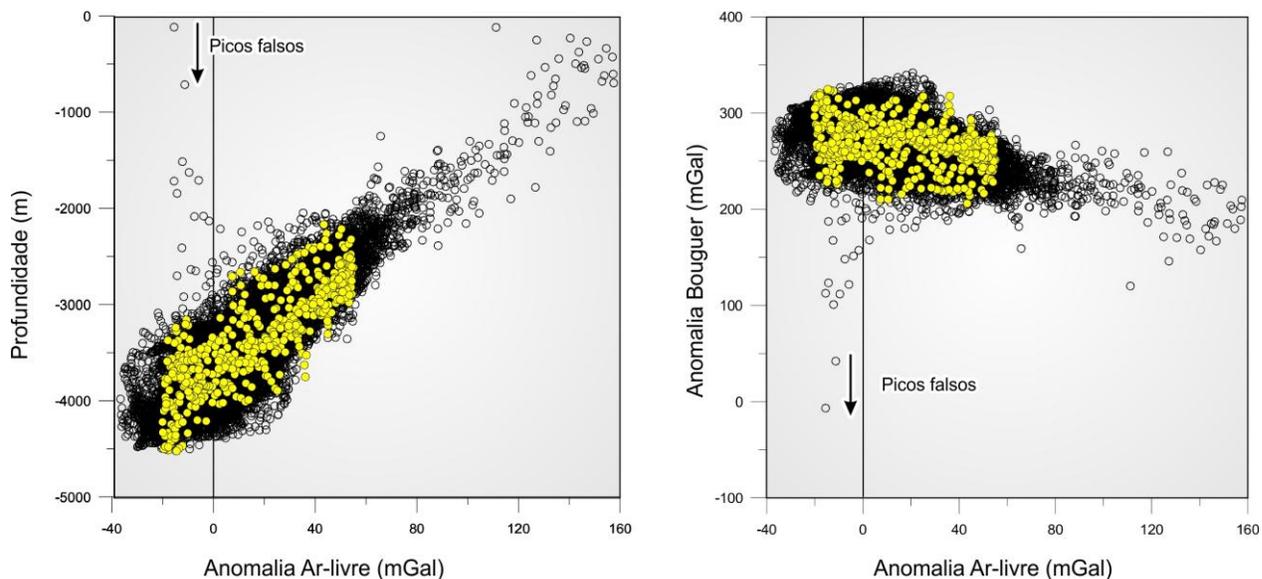


Fig. 13a - Diagrama de interpretação gravimétrica para área 1. Pontos amarelos indicando a área selecionada e os transparentes são a área total. Os dados de profundidade são do banco de dados Topex 15.1 e os de gravimetria proveniente do banco de dados *Gravity Anomaly 20*.

Os pontos projetados (amarelo) estão nas áreas centrais da distribuição dos dados da região inteira (preto). São caracterizados pelos pontos com alta anomalia Bouguer, que é a reflexão do CSGH. O fato indica que a região estudada, em geral, tem estruturas geológicas similares. Os dados de pequena profundidade com alta anomalia ar-livre, que estão no canto superior direito da figura 13a, ocorrem na Cadeia Peridotítica. Por outro lado, os dados de grande profundidade se encontram nos segmentos de cadeia meso-oceânicas. De acordo com a batimetria predita, a profundidade máxima é cerca de 4500 m. Porém a batimetria por navios revelou localidades mais profundas que 5000 m (Hekinian et al., 2000).

A distribuição dos dados da área 2 é similar à da área 1, porém os pontos projetados ocorrem na área mais estreita da parte central (Fig. 13b). Em detalhe, os pontos estão concentrados em maiores profundidades e maiores anomalias gravimétricas tanto em anomalia ar-livre quanto em Bouguer. As altas anomalias gravimétricas são devido à ocorrência do Alto Gravimétrico OPGH. É notável que as localidades com alta anomalia Bouguer (setas), que corresponde ao OPGH, estão nos sítios muito profundos ao longo da falha transformante TFDD. Desta forma, esses sítios

ao longo da falha transformante podem estar expondo o manto abissal sem cobertura da crosta oceânica.

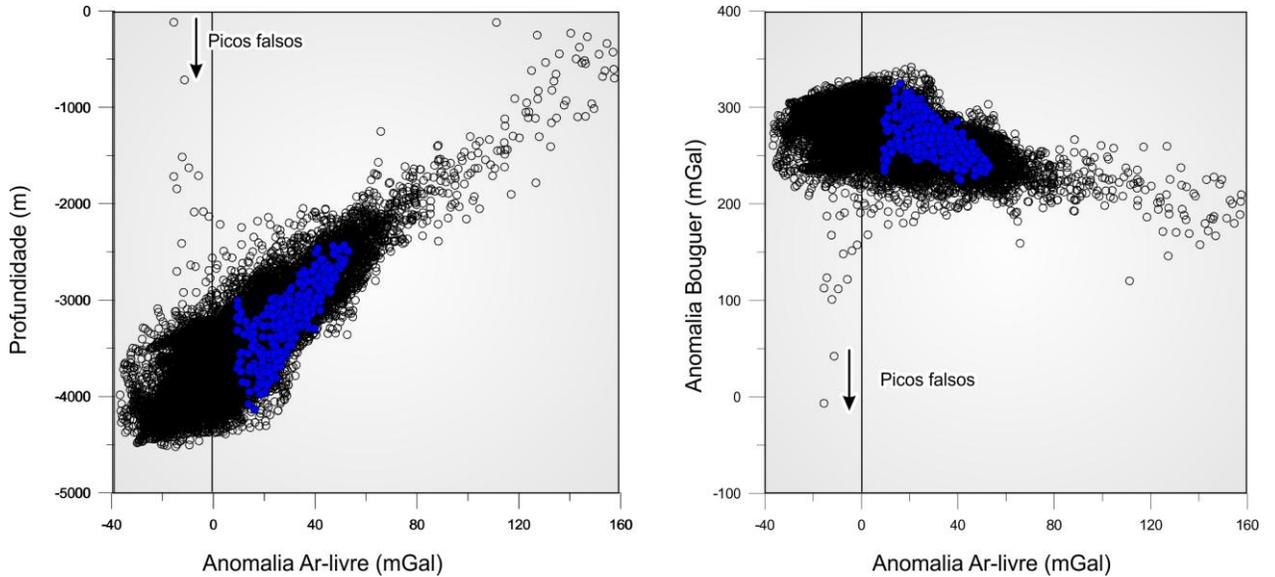


Fig. 13b - Diagrama de interpretação gravimétrica para área 2. Pontos azuis indicando a área selecionada e os transparentes são a área total. Os dados de profundidade são do banco de dados Topex 15.1 e os de gravimetria proveniente do banco de dados *Gravity Anomaly* 20.

A área 3 possui a distribuição dos pontos projetados similar à da área 1 (Fig. 13c). Ambas as áreas são caracterizadas por manto frio com possível ocorrência de expansão amagmática. Em comparação com a área 1, a área 3 possui menor frequência das localidades mais profundos do que 4000 m.

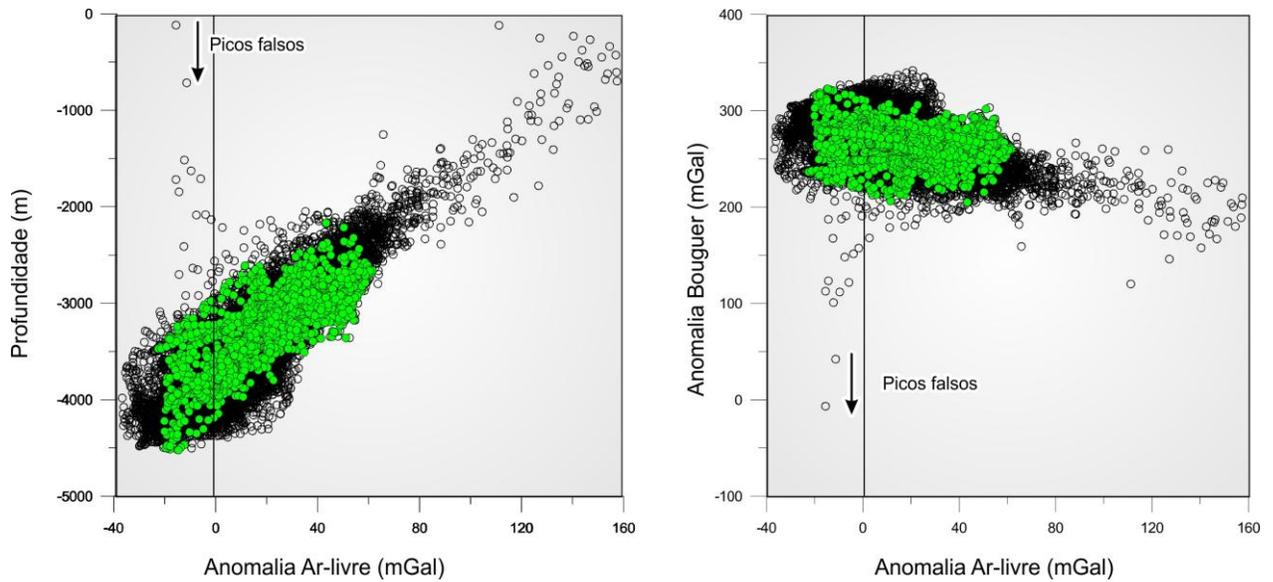


Fig. 13c - Diagrama de interpretação gravimétrica para área 3. Pontos verdes indicando a área selecionada e os transparentes são a área total. Os dados de profundidade são do banco de dados Topex 15.1 e os de gravimetria proveniente do banco de dados *Gravity Anomaly 20*.

A área 4 representa expansão magmática convencional. Esta área está fora da zona de falhas transcorrentes de São Paulo, Desta forma, está fora da zona de manto frio (coldspot). A profundidade em geral é rasa, sendo menor do que 3300 m, e a anomalia Bouguer é baixa. Estas observações são atribuídas ao manto subjacente de temperatura maior do que as áreas 1, 2 e 3.

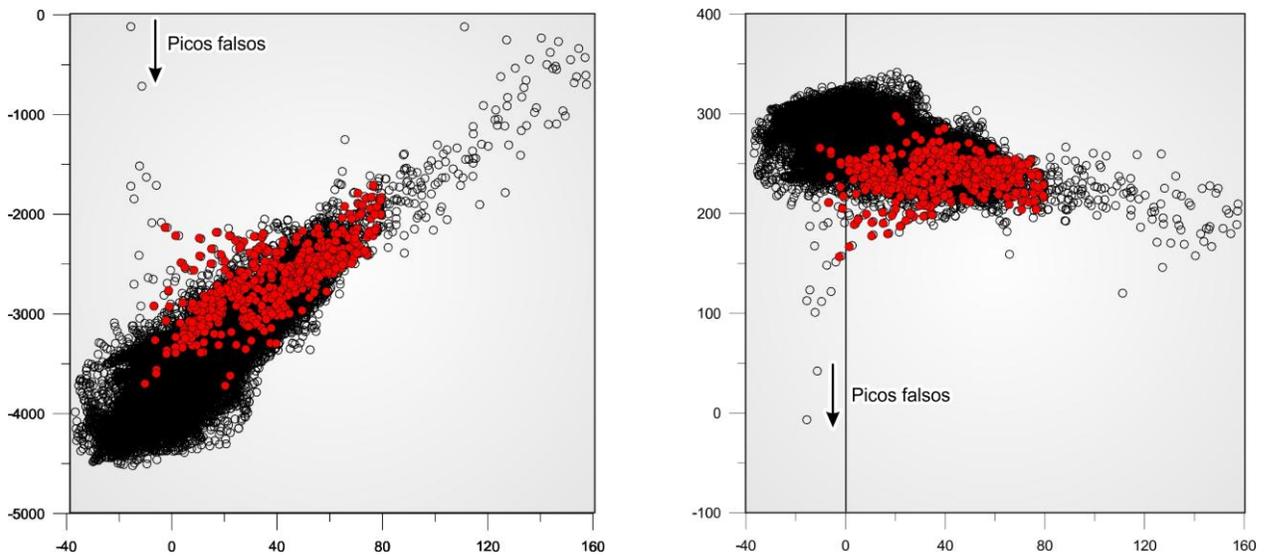


Fig. 13d - Diagrama de interpretação gravimétrica para área 4. Pontos vermelhos indicando a área selecionada e os transparentes são a área total. Os dados de profundidade são do banco de dados Topex 15.1 e os de gravimetria proveniente do banco de dados *Gravity Anomaly 20*.

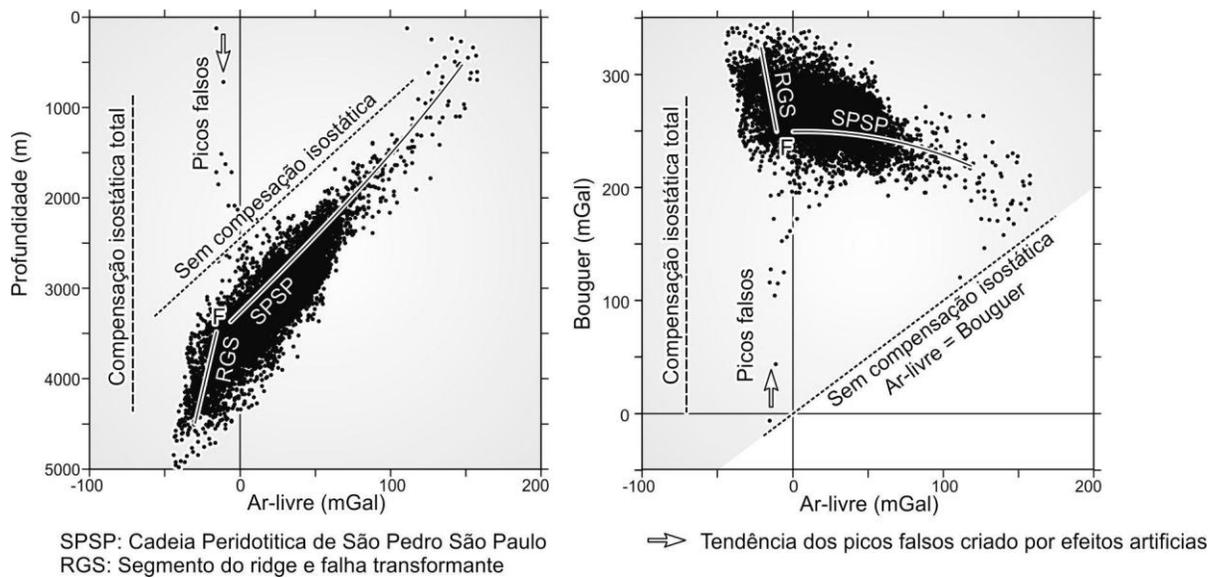


Fig. 14 – Diagrama de interpretação gravimétrica para a área de estudo: A) Ar-livre vs. profundo; B) Ar-livre vs. Bouguer. Os dados de profundidade são do banco de dados Topex 15.1 e os de gravimetria proveniente do banco de dados *Gravity Anomaly 20*.

Os diagramas de Ar-livre vs profundidade e Ar-livre vs Bouguer apresentaram diferentes distribuições de padrões dos casos anteriormente conhecidos no caso da

plataforma continental do Espírito Santo. Esta técnica foi aplicada para vulcões submarinos e para a plataforma continental (Motoki et al 2013).

O diagrama de Ar-livre vs Profundidade mostra que os dados possuem uma tendência subparela e não ocorre compensação isostática conforme apresentado na figura 14. Esses dados representam principalmente os declives da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo que estão localizados acima da linha de 3400 metros. Os diagramas indicam que a Cadeia é sustentada quase totalmente pela firmeza do embasamento ou pelo tectonismo de soerguimento ativo, sendo menos de 5% a influência de compensação isostática.

Em locais mais profundos que 3500 metros estão localizados ao longo de falhas transformantes e zonas de fraturas abissais e cadeias submarinas. Nesses diagramas é possível ver uma tendência subvertical, que sugerem a depressão morfológica das falhas transformantes e dos *rift valleys* que são sustentados principalmente por compensação isostática e parcialmente pela firmeza mecânica do embasamento.

Os dados das áreas adjacentes a Cadeia mostraram-se completamente diferentes do que a aplicada para outras áreas em trabalhos prévios. Apesar de estarem em posições distintas, uma quantidade considerável de pontos caíram sobre uma mesma área na profundidade de 3000 m e 250 mGal na Bouguer.

7. Conclusões

A partir dos resultados o autor concluiu que:

- Os resultados da gravimetria para a Cadeia Peridotítica foi diferente do esperado. A possível explicação seria a ausência da correção de terreno para aquela área.
- O digrama referente à área 1 representa a elevação morfológica linear entre a zona de fratura inativa TFBC (transform fault BC) e a falha transformante TFCD (transform fault CD). Esta área inclui o alto gravimétrico CSGH (C segment gravity

high), que é atribuído possivelmente à exposição das rochas do manto que formam um *megamullion*.

- A distribuição dos dados da área 2 é similar à da área 1, porém os pontos projetados ocorrem na área mais estreita da parte central. Os pontos estão concentrados em maiores profundidades e maiores anomalias gravimétricas tanto em anomalia ar-livre quanto em Bouguer.
- A área 3 e a área 1 são caracterizadas pela presença manto frio com possível ocorrência de expansão amagmático interpretado. A área 3 possui menor frequência de localidades mais profundas que 4000 m.
- A metodologia aplicada para geração de gráficos não mostrou grandes variações para a área de estudo o que aponta que são necessários mais aplicações da mesma em diferentes tipos de morfologias para distinguir as estruturas com maior precisão.
- As rochas constituintes principais desta é peridotito milonítico não serpentizado e serpentizado, sem a presença de gabro. Desta forma a origem e o mecanismo de exumação das rochas mantélicas da Cadeia Peridotítica são diferentes de um *megamullion* tradicional.

8. Bibliografia

ALMEIDA, F. F. M. As Ilhas Oceânicas Brasileiras e Uma Hipótese Sobre a Origem do Atlântico. Anais da Academia Brasileira de Ciências v. 37, p.141-145, 1965.

BLAKELY, R. J. Potential theory in gravity and magnetic applications, (CAMBRIDGE UNIV. PRESS, CAMBRIDGE, U.K.). p. 1-461, 1995.

BLACKMAN, D.K.; CANN, D.J.R.; JANSSEN, B.; SMITH, D.K. Origin of extensional core complexes evidence from the Mid-Atlantic Ridge at Atlantis Fracture Zone. Journal of Geophysical Research, v. 103, p. 21315-21333, 1998.

BONATTI, E.; SEYLER, M.; SUSHEVSKAYA, N. A Cold Suboceanic Mantle Belt at the Earth's Equator. Science, v. 261, n. 5119, p. 315-320, 1993.

BRUNELLI D., SEYLER M., Asthenospheric percolation of alkaline melts beneath the St. Paul region (Central Atlantic Ocean), Earth and Planetary Science Letters, v. 289, p. 393-405, 2010.

CAMPOS, T.F.C.; VIRGENS NETO, J.; SRIVASTAVA, N.K.; PETTA, R.A.; HARMANN,L.A.; MORAES, J.F.S.; MENDES, L.; SILVEIRA, S.R.M. Arquipélago de São Pedro e São Paulo e São Paulo, soerguimento tectônico de rochas infracrustais no Oceano Atlântico. Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil, SIGEP 002, UNB, 12p, 2005. <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio002/sitio002.pdf>, acesso em 31 de dezembro de 2006.

CAMPOS, T.F.C.; BEZERRA, F.H.R.; SRIVASTAVA, N.K.; VIEIRA, M.M.; VITA-FINZI, C. Holocene tectonic uplift of the St Peter and St Paul Rocks (Equatorial Atlantic), consistent with emplacement by extrusion. Marine Geology, v. 271, p. 177-186, 2010.

DARWIN, C. The Voyage of the Beagle, Journal of Remarks, Chapter I. , 1832

GERLASH, SA, THEILEN, F, WERNER F.) Forschungsschiff Poseidon, Reise 119 vom 16. Juli bis 1. August 1985. Forschungsschiff Poseidon, Reise 120 vom 4. August bis 20. August 1985. Forschungsschiff Valdivia, Reise 201-48A vom 17. Juli bis 31. Juli 1986. Forschungsschiff Poseidon, Reise 137 vom 3. Februar bis 20. Februar 1987. Ber SFB 313, Univ Kiel No 5:1-94, 1987

GEOMAPAPP, <<http://www.geomapapp.org>>, Acessado pela ultima vez em 08/07/2012

GORINI, M. A. The tectonic fabric of the equatorial Atlantic and adjoining continental margins: Gulf of Guinea to Northeastern Brazil. In: Asmus, H. E. (ed.). Estruturas e Tectonismo da Margem Continental Brasileira, e suas Implicações nos Processos Sedimentares e na Avaliação do Potencial de Recursos Minerais (Relatório Final). Rio de Janeiro: PETROBRAS/CENPES/DINTEP. Série Projeto REMAC, 9: 11-116, 1981.

HEKINIAN, R.; JUTEAU, T.; GRACIA, E.; UDINTSEV, G.; SICHLER, B.; SICHEL, S.E.; APPRIOUAL, R. Submersible observations of Equatorial Atlantic Mantle: The St. Paul Fracture Zone region. *Marine Geophysical Research*, v. 21, p. 529-560, 2000.

KOGA, M.S. Características da crosta oceânica baseada em imagens submarinas dos segmentos intra-transformantes da Zona de Fratura de São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Departamento de Geologia da Universidade Federal Fluminense. (inédito) Niterói, 140 p. 2001

KOGARKO, L.N., LEBEDEV, V.A., LEVSKII, L.K. Heterogeneity of isotope sources of alkaline magmatism in the hot spot of the southwestern Atlantic: Fernando de Noronha Islands. *Doklady Earth Sciences*, 412, v.1, p.85-87. 2007.

MARQUES L.S., ULBRICH M.N.C., RUBERTI E., TASSINARI C.G. Petrology, geochemistry and Sr-Nd isotopes of Trindade and Martin Vaz volcanic rocks (Southern Atlantic Ocean). *J. Volcan. Geoth. Res.*, v. 93, p.191-216. 1999

MELSON, W.G.; JAROSEWICH, E.; BOWEN, V.T.; THOMPSONM G. St. Peter and St. Paul rocks: a high-temperature mantle-derived intrusion. *Science*, v. 155. p. 1532-1535, 1967.

MOTOKI, A.; SICHEL, S.E.; CAMPOS, T.F.C.; SRIVASTAVA, N.K.; SOARES, R.S. Present-day uplift rate of the Saint Peter and Saint Paul Islets, Equatorial Atlantic Ocean. *Revista Escola de Minas*, v. 62, n. 3. p. 331-342, 2009.

MOTOKI, A.; NOVAIS, L.C.C.; MOTOKI, K.F.; OLIVEIRA, L.S. Gravimetria de satélites para a Plataforma Continental de Abrolhos, ES-BA, e sua relação com gêneses tectônicas das bacias sedimentares. *Revista Brasileira de Geofísica*, 2013. (em avaliação)

MOTOKI, K.; MOTOKI, A.; SICHEL, S.E. Gravimetric structure for the abyssal mantle exhumation massif of Saint Peter and Saint Paul Peridotite Ridge, Equatorial Atlantic Ocean, and its relation to the active uplift driving force. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2013. (em avaliação)

RABINOWITZ P. D., PURDY G.M.. 1976. The Kane fracture zone in the western Central Atlantic Earth and Planetary Science Letters, Volume 33, Issue 1, Pages 21-26

RENARD, A. *Neus Jahrbuchm Min.*, v. 75, n. 4, 390 p. 1879

RIVALENTI G; ZANETTI A; GIRARDI VAV; MAZZUCHELLI M; TASSINARI CCG; BERTOTTO GW. The effect of the Fernando de Noronha plume on the mantle lithosphere in north-eastern Brazil, *LITHOS.* ; 94 (1-4) Pages: 111 – 131, 2007

RYAN, W.B.F., S.M. CARBOTTE, J.O. COPLAN, O'HARA S., MELKONIAN A., ARKO R., WEISSEL R.A., FERRINI V., GOODWILLIE A., NITSCHKE F., BONCZKOWSKI J.,

ZEMSKY R., Global Multi-Resolution Topography synthesis, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2009.

SMITH, W. H. F., SANDWELL, D. T. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, *Science*, v. 277, p. 1957-1962, 1997.

SANDWELL, D. T. and SMITH, W. H. F. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate. *J. Geophys. Res.*, 114, B01411, 18, doi:10.1029/2008JB006008, 2009

SCHILLING, J.G.; RUPPEL, C.; DAVIS, A.N.; McCUIIY, B.; TIGHE, S.A.; KINGSLEY, R.H.; LIN, J. Thermal structure of the mantle beneath the equatorial Mid-Atlantic Ridge: Inferences from the spatial variation of dredged basalt glass compositions. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, n. B6, p. 10057-10076, 1995.

SICHEL, S.E.; ESPERANÇA, S.; MOTOKI, A.; MAIA, M.; HORAN, M.F.; SZATMARI, P.; ALVES, E.C.; MELLO, S.L.M. Geophysical and geochemical evidence for cold upper mantle beneath the Equatorial Atlantic Ocean. *Revista Brasileira de Geofísica*, v, 26, n. 1, p. 69-86, 2008.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E. 1990. *Applied Geophysics*.

TILLEY, C.E. Dunite mylonite of St. Paul's rocks (Atlantic). *American Journal of Science*, v. 245, 483-491, 1947.

TUCHOLKE, B. E.; LIN, J. ; KLEINROCK M. C. *Megamullions* and mullion structure defining oceanic metamorphic core complexes on the mid-Atlantic ridge, *Journal of Geophysical Research*, v. 103, 9857-9866, 1998.

THOMPSON G., St. Peter and St. Paul Rocks (Equatorial Atlantic) and the surrounding sea floor. Technical report for National Science Foundation, Grant OCE 77-26842 and

OCE 80-24930. Wood Hole Oceanographic Institution, Massachusetts, USA. 35pgs, 1981. (inédito)

TOPEX, Satellite Geodesy. <<http://topex.ucsd.edu/>>. Acessado pela última vez em: 25/06/2012

ULBRICH M.N.C., Petrography of alkaline volcanic-subvolcanic rocks, Fernando de Noronha, dikes and flows. Boletim IG-USP 24: 77-94. 1994

WASHINGTON, H.S. Quest Expedition Report, British Museum Publication, 126-144. 1930