



Contribuição da Geofísica para o Entendimento das Causas do Magmatismo Cenozóico da Província Borborema (NE-Brasil)

Roberto Gusmão de Oliveira* (CPRM-Serv. Geol. do Brasil), Walter Eugênio de Medeiros (UFRN-CCET-DEGEF)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

In this work we propose two alternative models for the origin of Cenozoic volcanism in the Borborema province. One is a mechanism for small-scale convection (Edge Driven Convection-EDC) at the interface between the continental lithosphere and oceanic lithosphere. The other is the possibility that the region of the South American Plate, which corresponds to northeastern Brazil, has passed on a "heat ridge" in the range between 80 and 20 Ma. The mechanism of EDC is favored by the fact that the disturbance capable of generating mantle magmatism follows the movement of the plate. This justifies the maintenance of magmatism over a long period in the same geographical area with a direction parallel to the eastern shore, as is the case of magmatism along the Macau-Queimadas alignment. The model of "heat ridge" is very disadvantaged by the lack of a Cenozoic magmatism spread throughout the Borborema province with the progression of age from northeast to southwest.

Introdução

Apesar de recorrente, o vulcanismo que ocorreu na Província Borborema (**PB**), durante o Cenozóico, ao longo do Alinhamento Macau-Queimadas, não apresenta correlação espacial/temporal. Por isto, é muito difícil atribuir sua origem a uma passagem da Placa Sul-Americana sobre um *hot spot*. No entanto, a investigação das estruturas frágeis e o soerguimento do Planalto da Borborema favorecem um episódio de domeamento da crosta em correlação temporal com o vulcanismo Macau (Jardim de Sá *et al.*, 1999). Entretanto, Sial (1976) considerou que a origem desta suíte de rochas estaria relacionada com reajustamentos internos ou alívio de pressão na placa Sulamericana durante o seu deslocamento. Silveira (2006) descartou a hipótese de uma pluma mantélica e alternativamente propõe que ele pode ser explicado por processos metassomáticos da litosfera inferior, seguidos por fusões ativadas por tectônica de extensão, que também teriam favorecido a subida do magma na crosta. Neste trabalho são propostos dois modelos alternativos para a origem do vulcanismo cenozóico na **PB**. O primeiro é um mecanismo de convecção em pequena escala (*Edge Driven Convection-EDC*), que pode ter se formado devido a instabilidades ocorridas na interface entre a litosfera

continental da Província Borborema e o manto astenosférico adjacente. O segundo é a possibilidade de que a região da Placa Sul-Americana, que corresponde ao nordeste brasileiro, tenha passado sobre uma "crista térmica" no intervalo entre 80 e 20 Ma.

Contexto Geológico

Durante o Cenozóico, na Província Borborema ocorreram dois episódios magmáticos: os vulcanismos Macau e Mecejana (Mizuzaki *et al.*, 2002). Eles são de natureza sub-alcalina a alcalina, apresentam recorrência ao longo do Cenozóico e se distribuem por uma área ampla, incluindo áreas oceânicas (Figura 1).

O vulcanismo Mecejana (Figura 1) é constituído por diversos necks e diques de rochas alcalinas que formam relevo na região a sudoeste da cidade de Fortaleza. A sua ocorrência é atribuída a um evento magmático alinhado, que progrediu de oeste para leste ao longo da Cadeia de Fernando de Noronha. Esta cadeia representaria o trajeto da placa da América do Sul sobre um *hot spot* (Almeida *et al.*, 1988; Mizuzaki *et al.*, 2002).

O vulcanismo Macau (Figura 1) ocorre como plugs, necks, derrames e diques de olivina-basaltos, basanitos e ankaratritos, que afloram ao longo de uma faixa de direção aproximadamente N-S, e possuem idades entre 68,4 e 6,8 Ma (Almeida *et al.*, 1988, Silveira, 2006). Segundo Sial (1976), o magma álcali-basáltico formou-se por uma fusão parcial de um espinélio-lherzolito no manto, sob pressão de 20 kb. Nos necks e plugs são encontrados xenocristais de olivina, espinélio e nódulos de espinélio - lherzolitos e hazburgitos derivados de uma profundidade de aproximadamente 64 km. Por causa da direção de sua ocorrência, em relação ao deslocamento da placa e da ausência de arranjo geocronológico, Almeida *et al.* [1988] descartaram a sua origem por pluma mantélica. Segundo Silveira (2006), para o vulcanismo Macau que ocorreu no continente, os dados geoquímicos sugerem que: (i) a fonte de calor e a quantidade de fusão parcial do magmatismo basáltico diminuíram com tempo, (ii) ele foi inicialmente dominado por basaltos moderados a subalcalinos, tornando-se progressivamente mais rico em álcalis, (iii) os magmas subalcalinos foram derivados de 10% a 20% de fusão parcial de uma fonte granada - peridotito, em profundidades menores que 92 km; (iv) o grupo fortemente alcalino foi gerado por grau de fusão de 1% a 10% e em profundidades maiores que 92 km, (v) a existência de uma pluma do manto e de um fluxo alto de calor não são necessários para explicar esse magmatismo. Alternativamente, ele pode ser explicado por processos metassomáticos da litosfera inferior, ativados por tectônica de extensão.

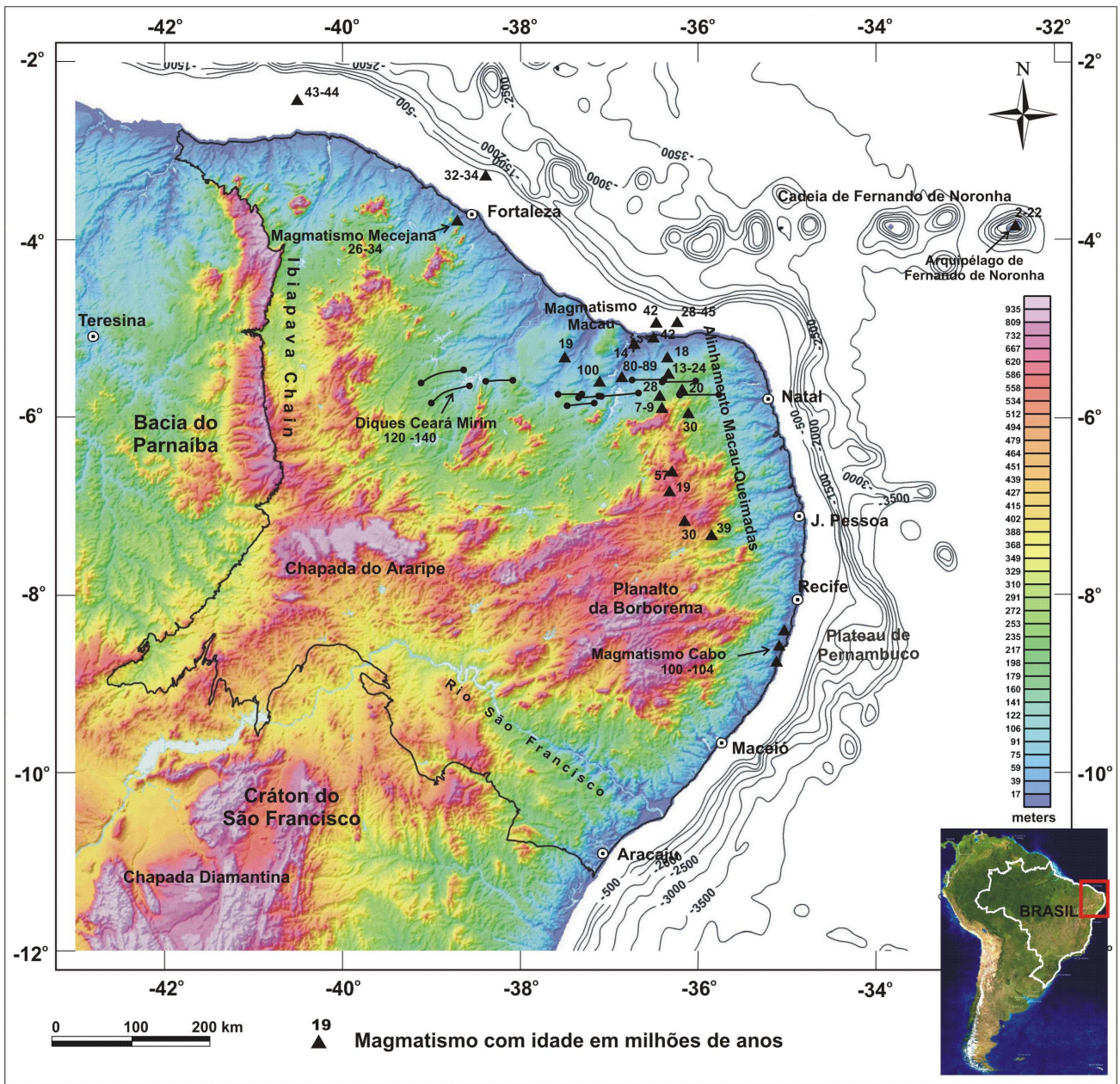


Figura 1: Episódios magmáticos da Província Borborema e de sua margem continental no período Cretáceo-Cenozóico sobrepostos à superfície digital do terreno. A posição e a geocronologia dos corpos vulcânicos estão baseadas na tabela publicada por Mizusaki *et al.* (2002). A localização do Alinhamento Macaú Queimadas está indicada. O limite da Província Borborema é o traço preto contínuo.

Dados Geofísicos

Tomografia de Ondas Superficiais: as imagens de tomografia de ondas superficiais foram obtidas em <http://ciei.colorado.edu/~nshapiro/MODEL/>. Os autores empregaram um grande conjunto de dados de ondas superficiais, com medidas de velocidade de fase e de grupo, para criar um modelo de velocidade de onda cisalhamento (onda S) da litosfera, denominado CUB.

Foram usadas formas de onda, em banda larga, mediante o registro de terremotos ocorridos entre 1977 e 1999 em estações pertencentes às redes globais GDSN, GSN e GEOSCOPE, bem como arranjos temporários regionais (Shapiro & Ritzwoller, 2002). Os dados de velocidade de fase pertencem às universidades de Harvard e Utrecht. Os dados da velocidade de grupo foram levantados pelo Center for Imaging the Earth's Interior da Universidade do Colorado em Boulder.

Anomalia de Geóide: no continente foram empregados dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (<http://www.ibge.gov.br>). Na área oceânica foram empregados dados processados por Sandwell & Smith (1997), a partir de dados altimétricos dos satélites GEOSAT e ERS 1 (http://topex.ucsd.edu/marine_topo/).

Modelo de Convecção em Pequena Escala

Este modelo de geração de magmatismo intraplaca é denominado “*Edge Driven Convection - EDC*”. Ele foi desenvolvido por King & Anderson (1995) para explicar o vulcanismo intraplaca cenozóico da África e da América do Sul (King & Ritsema, 2000), e a formação de derrames de basaltos intracontinentais, em alternativa ao modelo de pluma mantélica King & Anderson (1998). Segundo Scott D. King, *EDC* é uma instabilidade que ocorre na interface entre uma litosfera estável e espessa e uma litosfera fina (*Understanding the Edge-Driven Hypothesis*, <http://www.mantleplumes.org/EDGE.html>). Este modelo de formação de convecção em pequena escala, em margens continentais estáveis, sobretudo em regiões continentais cratonizadas (Figura 2), é baseado no fato de que a mudança de espessura da litosfera, no limite entre a litosfera oceânica e a litosfera continental, produz um grande contraste lateral de temperatura e viscosidade. Esse contraste induz um fluxo convectivo em pequena escala no manto localizado abaixo das margens continentais. O fluxo convectivo pode provocar um arrasto do manto litosférico frio para baixo, até profundidades em torno de 660 km no interior do manto.

Observa-se na Figura 3 que na região da Província Borborema (**PB**) a anomalia positiva de geóide (**A**) tem correlação com um aumento da velocidade das ondas S na astenosfera (tons esverdeados, perturbação de +2%). Nesta fatia vertical, a forma dessa feição (**B**) sugere um arrasto do manto litosférico mais frio (ou mais seco) para dentro da astenosfera mais quente (ou menos seca). Os limites da litosfera, interpretados a partir dos dados de tomografia, demonstram que a província tem uma litosfera com espessura em torno de 160 km, enquanto a espessura da litosfera oceânica é aproximadamente de 50 km. Um ponto importante é o aspecto da transição entre o manto litosférico continental e o manto da região oceânica. Observa-se que não existe um limite bem definido em **C**. Outro aspecto importante é o fato de não existir, pelo menos em profundidades mais rasas do que 300 km, nenhuma anomalia de velocidade que justifique a expectativa da existência atual de um *hot spot* (ou pluma) abaixo da Província Borborema.

Na cadeia meso-oceânica, a anomalia residual positiva do geóide ocorre sobre uma perturbação negativa da velocidade (-3 a -5%) (**E**), a partir da qual se forma um semi-arco (**F**), que parece uma corrente de convecção descendente. Também se observa uma apófise (**D**), estirada entre o referido semi-arco e a margem da **PB**. O corte dessa apófise pela fatia horizontal localizada na profundidade de 40 km (Figura 9.17), apresenta uma

área anômala elíptica com uma perturbação negativa da velocidade (-3%, **G**), localizada na região oceânica frontal ao nordeste da província e ao sul da Cadeia de Fernando de Noronha.

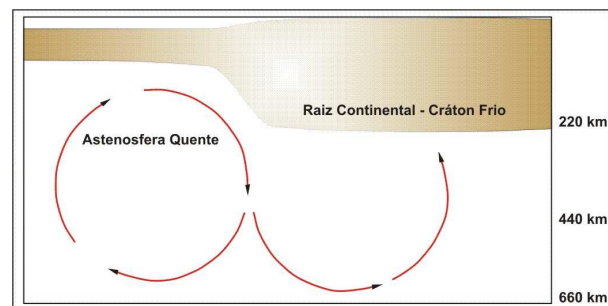


Figura 2: Ilustração do fluxo convectivo em pequena escala gerado por instabilidade no limite da litosfera de uma crosta continental espessa e estável (*EDC*). A *EDC* é produzida pelo contraste de temperatura e viscosidade entre a raiz da litosférica continental fria e o manto astenosférico quente.

Modelo de Crista Térmica

Uma das primeiras hipóteses para o magmatismo ao longo do Alinhamento Macau-Queimadas foi sua origem a partir de uma “crista térmica” surgida no manto, principalmente por causa da forma alongada da área de ocorrência das rochas vulcânicas (Almeida et al. 1988). A observação de um corte horizontal na profundidade de 250 km nos dados de tomografia de ondas superficiais (Figura 4) sugere a possibilidade que a Placa Sul-Americana na região da Província Borborema tenha passado sobre uma “crista térmica” ao longo do Cenozóico. Na hipótese de que a velocidade de espalhamento do Oceano Atlântico tenha se mantida aproximadamente constante nos últimos 80 Ma, e de que não ocorreu modificação significativa no percurso da Placa Sul-Americana entre 80 Ma e o presente, os aspectos dos dados que sustentam este modelo são:

I) a anomalia da perturbação negativa da velocidade sísmica na fatia de horizontal de 250 km, posicionada na região oceânica em frente da margem continental do nordeste brasileiro, que tem forma alongada e está orientada na direção NW-SE (**A** na Figura 4). Na sua extremidade NW está localizada a Ilha de Fernando de Noronha; e

II) supondo-se que essa perturbação da velocidade seja também uma perturbação térmica, que exista desde 80 Ma, e ainda, que permaneceu fixa no manto; então, o movimento aparente da Placa Sul-Americana sobre ela foi de sudoeste para nordeste. Assim, há 80 Ma atrás ela estaria sobre a Bacia do Parnaíba. Há 40 Ma ocuparia a região centro-nordeste da Província Borborema, e em 20 Ma seu eixo central já estaria localizado na área oceânica (Figura 4).

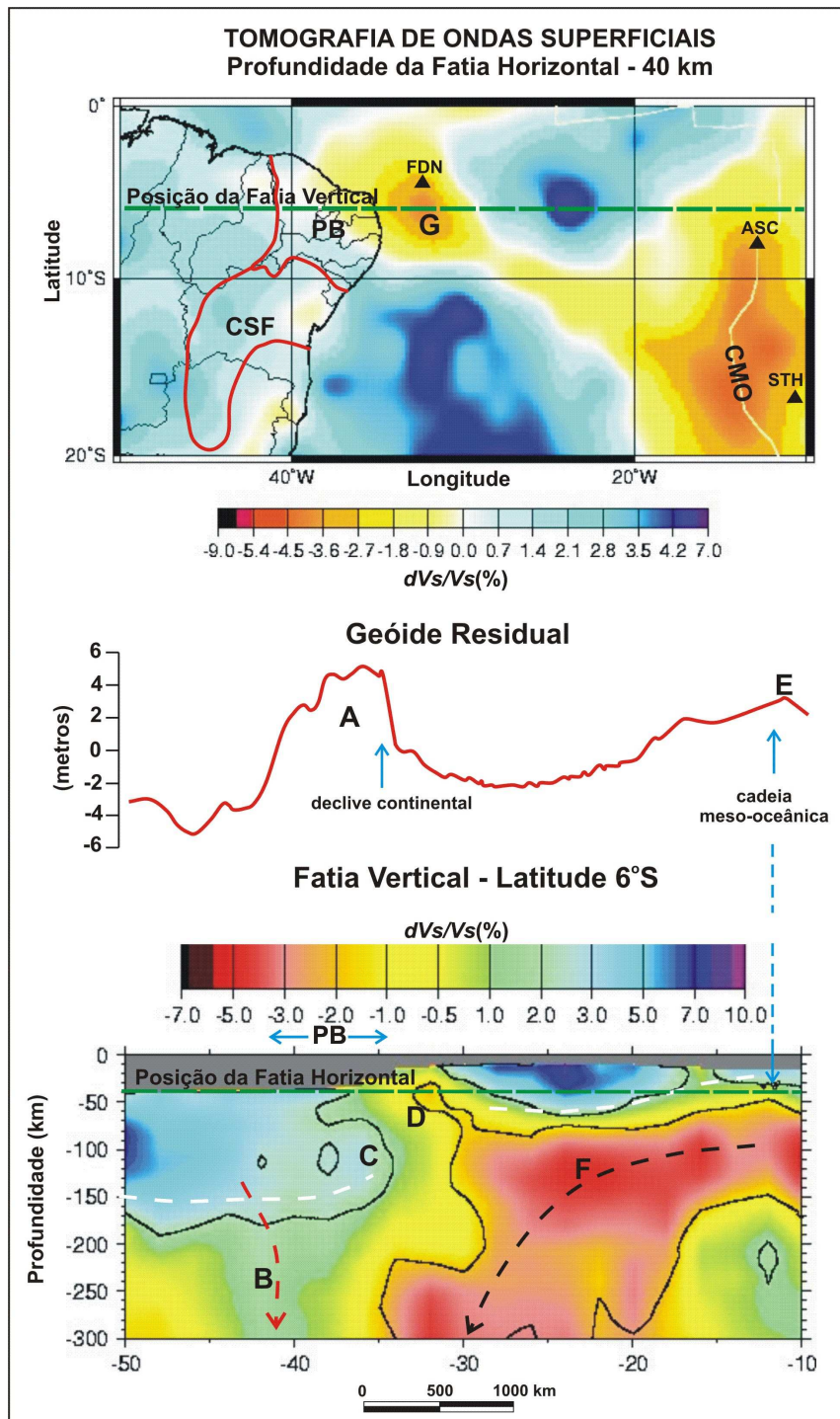


Figura 3: Correlação dos dados de tomografia de ondas superficiais com anomalias do geóide residual. Fatia Vertical localizada na Latitude 6°S e a Fatia Horizontal na profundidade de 40 km. **CMO** - Cadeia Meso-oceânica; **PB** - Província Borborema; **CSF** - Cráton do São Francisco. O traço branco descontínuo é uma tentativa de delimitar a base da litosfera. O traço preto descontínuo sugere uma corrente de convecção descendente. O traço vermelho descontínuo sugere uma intrusão da litosfera continental fria no manto astenosférico mais quente. *Hot spots*: **FDN** - Fernando de Noronha; **ASC** - Ascensão; **STH** - Santa Helena.

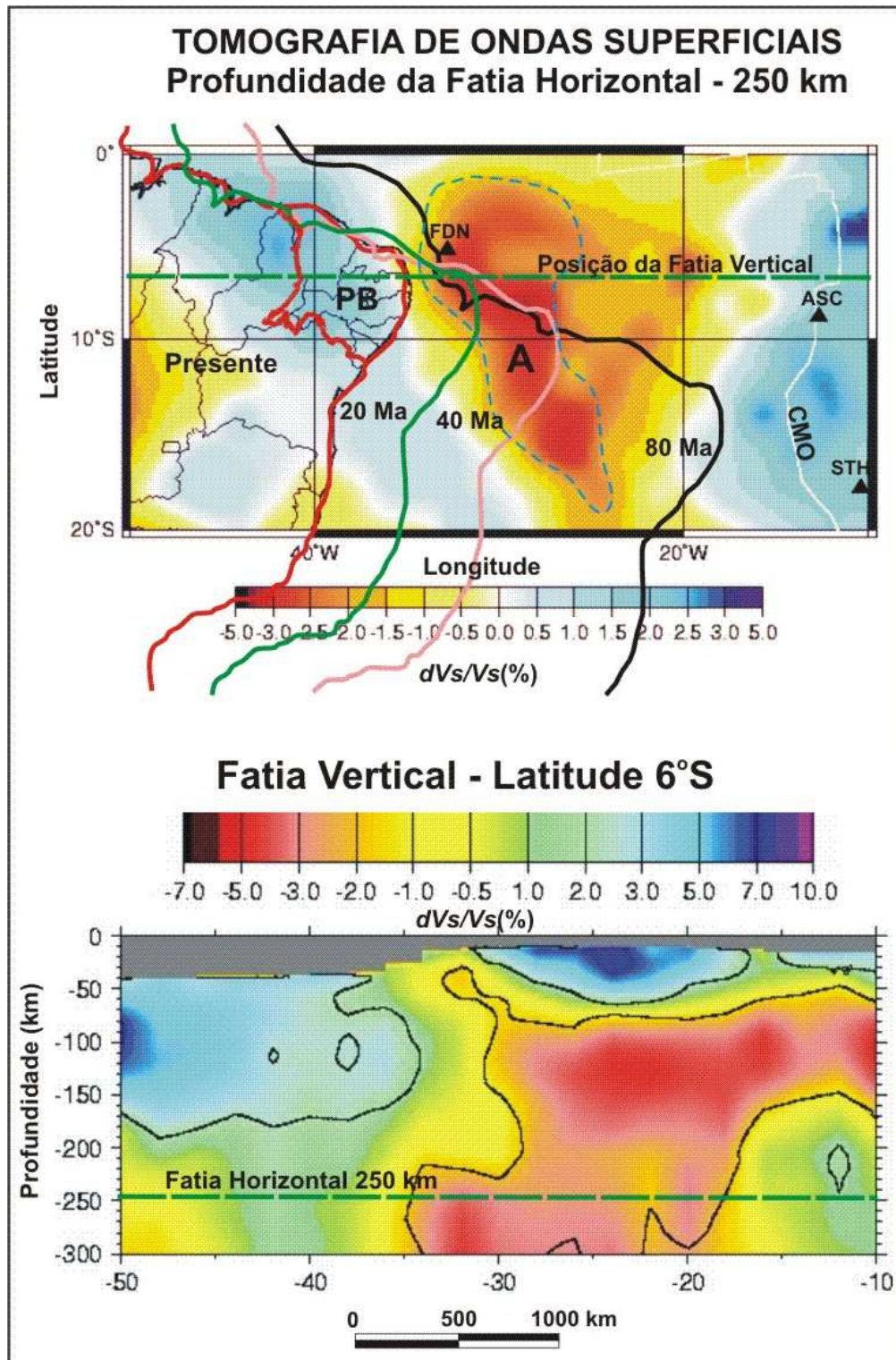


Figura 4: Tomografia de ondas superficiais com superposição da variação de posição da linha de costa da América do Sul no intervalo entre 80 Ma e o presente. A linha tracejada de cor azul é uma tentativa de delimitar uma possível “crista térmica” na profundidade de 250 km. Explicações no texto. **PB** - Provincia Borborema; **CMO** - Cadeia Meso-oceânica. Ilhas Vulcânicas (*hot spots*): **FDN** - Fernando de Noronha, **ASC** - Ascensão; **STH** - Santa Helena.

Conclusões

O mecanismo de *EDC*, em contraposição à hipótese de um *hot spot* (ou de pluma do manto), é favorecido pelo fato de que a perturbação do manto capaz de gerar magmatismo acompanha o movimento da placa. Isso justifica a manutenção do magmatismo durante um longo período, no mesmo espaço geográfico, e com uma direção paralela à da Margem Leste, como é caso do magmatismo ao longo do Alinhamento Macau-Queimadas. Apesar da história da estabilidade da litosfera da Província Borborema não favorecer plenamente um mecanismo de *EDC*, por causa da Orogênese Brasileira ainda não muito distante no tempo, a particular posição da província, próxima do limite entre as duas grandes zonas de fratura do Atlântico Sul e do Atlântico Central, pode ter sido um ingrediente a mais na instalação de instabilidades entre a litosfera continental e o manto astenosférico. A correlação entre os dados de tomografia de ondas superficiais e a anomalia residual do geóide sugere que a fonte principal para a anomalia positiva do geóide que ocorre na Província Borborema é o contraste de densidade positivo causado pela justaposição entre o manto litosférico frio (mais denso), que foi arrastado para dentro do manto astenosférico quente (menos denso) pela convecção em pequena escala produzida pelo mecanismo de *EDC*.

O modelo de "crista térmica" é muito desfavorecido pela ausência de um magmatismo cenozóico espalhado por toda a província com progressão de idade de nordeste para sudoeste. Além do mais, não explica a posição espacial do Alinhamento Macau-Queimadas que possui direção aproximadamente N-S e não favorece uma explicação clara para a existência da anomalia de geóide. Contudo, favorece a existência do longo alinhamento de montes submarinos (possíveis centros vulcânicos) de direção NW-SE que ocorre na área oceânica e é paralelo a Falha de Afonso Bezerra no continente (Oliveira, 2008).

Agradecimentos

CPRM - Serviço Geológico do Brasil; Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN e CNPQ-CTPETRO.

Referências

- Almeida F.F.M., Carneiro C.D.R., Machado Jr. D.L. & Dehira L.K. 1988. Magmatismo Pós-Paleozóico no Nordeste Oriental do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **18**(4):451-462.
- Jardim de Sá E.F., Matos R.M.D., Morais Neto J.M. & Saadi A. 1999. Epirogenia cenozóica na Província Borborema: síntese e discussão sobre os modelos de deformação associados. *In: SBG/Núcleo Bahia-Sergipe, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 7^a, Lençóis, Boletim de Resumos Expandidos*, p.58-61.
- King S.D. & Anderson D.L. 1995. An alternative mechanism of flood basalt formation. *Earth and Planetary Science Letters*, **136**:269-279.
- King S.D. & Anderson D.L. 1998. Edge-driven convection. *Earth and Planetary Science Letters*, **160**:289-296.

King S.D. & Ritsema J. 2000. African Hot Spot Volcanism: Small-Scale Convection in the Upper Mantle Beneath Cratons. *Science*, **290**:1137-1139.

Mizusaki A.M.P., Thomaz-Filho A., Milani P. & Césero P. 2002. Mesozoic and Cenozoic igneous activity and its tectonic control in Northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. **15**:183-198.

Oliveira R.G. 2008. *Arcabouço Geofísico, Isostasia e Causas do Magmatismo Cenozóico da Província Borborema e de Sua Margem Continental (Nordeste do Brasil)*. Tese de Doutorado, PPGG/CCET/UFRN, Natal, 411p.

Sandwell D.T. & Smith W.H.F. 1997. Marine Gravity from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry. *Journal of Geophysical Research*, **102**(B5):10,039-10,054.

Shapiro N.M. & Ritzwoller M.H. 2002. Monte-Carlo inversion for a global shear velocity model of the crust and upper mantle. *Geophysical Journal International*, **151**:88-105.

Sial A.N. 1976. The post-paleozoic volcanism of northeast Brazil and its tectonic significance. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **48**:299-311.

Silveira F.V. 2006. *Magmatismo Cenozóico da Porção Central do Rio Grande do Norte, NE do Brasil*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 195p.