

Geociências

Taxa de soerguimento atual do arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial

(Present-day uplift rate of the Saint Peter and Saint Paul Islets, Equatorial Atlantic Ocean)

Resumo

O arquipélago de São Pedro e São Paulo situa-se no Oceano Atlântico Equatorial, no topo de uma elevação morfológica submarina de 90 km de comprimento, 25 km de largura e 3.800 m de altura, composta de rochas peridotíticas do manto, denominada Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo. A morfologia submarina é altamente acidentada com escarpas subverticais de centenas de metros de altura, sugerindo ocorrência de tectonismo recente, provavelmente ativo. O mapa de seppômen do arquipélago mostra duas plataformas de abrasão marinha, com altitude respectiva de 4~5 m e de 7~9 m. As plataformas são observadas nas três ilhas maiores nas mesmas faixas de altitude, indicando que não houve basculamento ou soerguimento diferencial entre as ilhas. Considerando a plataforma superior formada durante a Transgressão Flandriana e a plataforma inferior desenvolvida por erosão recente, a taxa média de soerguimento nos últimos 6 mil anos é calculada como 1.2~1.5 mm/ano. As datações ¹⁴C para os fósseis coralígenos da ilha Belmonte indicam a taxa de soerguimento nos últimos 6.600 anos como 1.5~1.8 mm/ano. Portanto uma taxa de 1.5 mm/ano é razoável para o soerguimento atual. Interpretando a cadeia peridotítica como um megamullion tectonicamente deformado, o soerguimento total seria 1500~3000 m e o início do tectonismo seria 1~2 Ma. Se a cadeia peridotítica é originada do manto oceânico subcrustal, o soerguimento total seria, aproximadamente, 9000 m e o início do tectonismo seria cerca de 6 Ma.

Palavras-chave: Arquipélago de São Pedro e São Paulo, soerguimento tectônico, plataforma de abrasão marinha, seppômen, paleogeomorfologia.

Abstract

The Saint Peter and Saint Paul Islets are situated in the Equatorial Atlantic Ocean at the top of a submarine ridge made up of mantle peridotite. It is 90 km long, 25 km wide, and 3,800 m high, and is called the Saint Peter Saint Paul Peridotite Ridge. The submarine morphology is highly rugged with hundreds-of-meters-high scarps, suggesting the occurrence of probably recent active tectonism. The summit level map shows two surfaces of wave-cut benches with respective altitudes of 4~5 m and 7~9 m. The wave-cut benches are observed on three major islets in the same altitude ranges, indicating that no tilting or differential uplifting

Akihisa Motoki

*Departamento de Mineralogia e
Petrologia Ígnea, Universidade do
Estado do Rio de Janeiro
E-mail:
rochasornamentais@yahoo.com.br*

Susanna Eleonora Sichel

*Departamento de Geologia,
Universidade Federal Fluminense
E-mail: susanna@igeo.uff.br*

Thomas Ferreira da Costa Campos

*Departamento de Geologia, Univ.
Federal do Rio Grande do Norte
E-mail: tcampos@geologia.ufrn.br*

Narendra Kumar Srivastava

*Departamento de Geologia, Univ.
Federal do Rio Grande do Norte
E-mail: narendra@geologia.ufrn.br*

Rodrigo Soares

*Departamento de Mineralogia e
Petrologia Ígnea, Universidade do
Estado do Rio de Janeiro
E-mail: rodrigooss@yahoo.com.br*

between the islets has occurred. Considering the upper platform to be formed during the Flandrian Transgression and the lower one developed by a recent erosive process, the mean uplift rate in the last 6.000 years is calculated to be 1.2~1.5 mm/year. The ^{14}C datings for the coral fossils collected from the Belmont Island indicate the uplift rate in the last 6600 years to be 1.5~1.8 mm/year. Therefore, a rate of 1.5 mm/year should be reasonable for the present-day uplifting. Interpreting the peridotite ridge as a tectonically deformed megamullion, the total uplift would be 1500~3000 m and the tectonism should have started at 1~2 Ma. If the Peridotite Ridge is originated from the subcrustal oceanic mantle, the total uplift would be approximately 9000 m and the tectonism would have started close to 6 Ma.

Keywords: Saint Peter Saint Paul Islets, tectonic uplift, wave-cut bench, summit level map, palaeogeomorphology.

1. Introdução

O arquipélago de São Pedro e São Paulo situa-se na região equatorial do Oceano Atlântico, na coordenada de N00°55.1', W29°20.7', aproximadamente 1010 km ao nordeste da cidade de Natal, RN (Figuras 1 e 2). A área total emergida é cerca de 13 mil m² e a altitude máxima é de 18 m.

O arquipélago ocorre na zona de falha transformante de São Paulo, que tem direção E-W, comprimento total de 630 km e movimento transcorrente dextral. Na zona de falhas, observam-se três segmentos intratransformantes. A taxa de expansão da cadeia meso-oceânica dessa região é em torno de 1.5 cm/ano para cada lado e, portanto, a velocidade de deslocamento da falha transformante é cerca de 3 cm/ano. Nessa área, ocorre o manto superior de baixa temperatura, denominado ponto frio (*cold-spot*, *cold-zone*; e.g. Gurnis et al., 1998; Ritzwoller et al., 2003; Sichel et al., 2008a).

Sendo diferente da ilha de Fernando de Noronha (Weave, 1990; Ulbrich, 1994), arquipélago de Abrolhos

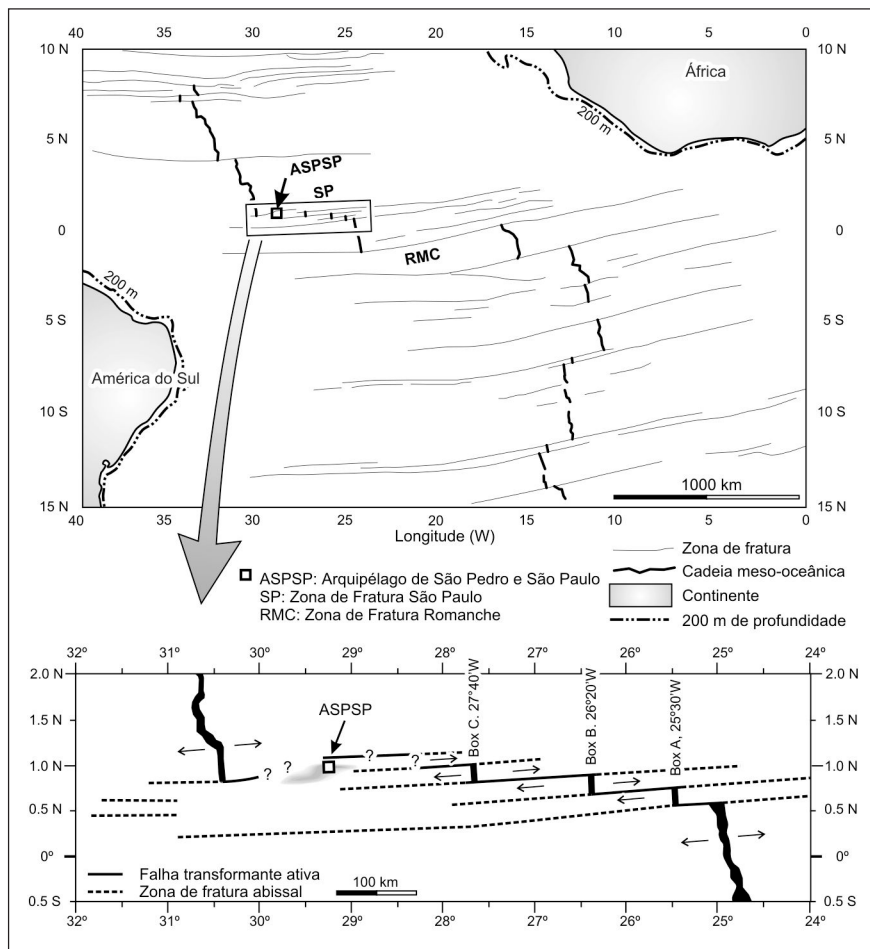


Figura 1 - Mapa de localização do arquipélago de São Pedro e São Paulo situado no Oceano Atlântico Equatorial e o seu ambiente tectônico na zona de falha transformante São Paulo.

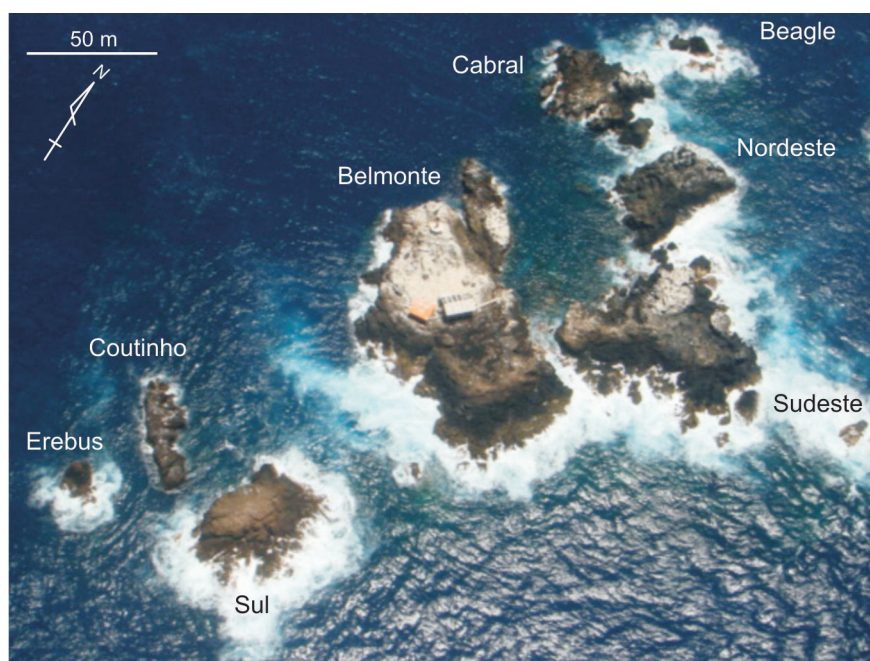


Figura 2 - Vista aérea do arquipélago de São Pedro e São Paulo. A imagem foi obtida por Thomas Ferreira da Costa Campos, um dos autores do presente trabalho.

(Mohriak, 1989), ilha de Trindade (Marques et al., 1999; Siebel et al., 2000) e ilha de Cabo Frio (Motoki & Sichel, 2008; Sichel et al., 2008b; Motoki et al. 2008a), o arquipélago de São Pedro e São Paulo não é constituído por rochas de origem magmática, tais como rochas vulcânicas e plutônicas. As rochas constituintes são peridotitos serpentinizados do manto abissal (e.g. Tilley, 1947; Campos et al., 2003; Sichel et al., 2008a). O manto oceânico está exposto diretamente na superfície da Terra, sem cobertura da crosta oceânica de composição basáltica. O arquipélago de São Pedro e São Paulo é a única localidade oceânica até hoje conhecida em que ocorre a exposição *in-situ* do manto abissal acima do nível do mar. As rochas ultramáficas intensamente fraturadas sugerem a existência de um intenso movimento tectônico. Esse tectonismo está em continuação até o presente.

Os autores apresentam características geomorfológicas do arquipélago de São Pedro e São Paulo, com atenção especial para a morfologia submarina, para as plataformas de abrasão marinha e para as datações de ^{14}C para os fósseis coralígenos da ilha Belmonte. A aplicação da técnica de seppômen (*summit level map*) é um destaque metodológico. Com base nesses dados, os autores estimam a taxa de soerguimento tectônico atual.

2. Metodologia

Para estudar o soerguimento tectônico do arquipélago de São Pedro e São Paulo, utilizaram-se as seguintes ferramentas: 1) batimetria predita para observação da morfologia submarina; 2) técnica de seppômen para determinar plataforma de abrasão marinha; 3) datações ^{14}C para fósseis coralígenos para determinar o nível relativo do mar nos últimos seis mil anos. Entre essas metodologias, a batimetria predita e a técnica de seppômen são relativamente pouco conhecidas nas comunidades de geólogos, portanto os autores apresentam breves explicações.

3. Batimetria predita

Nas regiões oceânicas, a órbita de satélite varia em função de anomalia gravimétrica *free-air* de cada localidade. Considerando a anomalia gravimétrica como devida à diferença de espessura da lâmina de água, pode-se estimar a profundidade do mar. Com base nesse princípio, Smith e Sandwell (1997) elaboraram o mapa mundial de profundidade estimada, denominado mapa de batimetria predita (*predicted bathymetry*). A resolução nivelada do mapa da primeira versão foi 2.0° , correspondendo a 3.7 km na região equatorial. Entretanto, a resolução verdadeira dos dados de batimetria predita tem heterogeneidades regionais, portanto a resolução anteriormente citada nem sempre representa a exatidão topográfica.

Em comparação com o método convencional da batimetria sonora, a batimetria predita tem baixa resolução, entretanto o mapa cobre todas as regiões oceânicas entre as latitudes 72°N e 72°S . Conforme o acúmulo dos dados de satélite, a exatidão topográfica dos dados batimétricos é aprimorada dia por dia. A versão mais nova está distribuída na homepage do *Scripps Institute of Oceanography, University of Califórnia - San Diego* (UCSD-SIO, 2009). O presente trabalho adota a *Topography v.11.1*, lançado no dia 16 de setembro de 2008. Esse mapa tem resolução nivelada de $1.0'$, que corresponde a 1.85 km na região equatorial. A visão tridimensional foi confeccionada com o auxílio de *Surfer™ v. 8.0*, utilizando-se a interpolação por *Radial Basis Function*.

4. Mapa de seppômen

O seppômen é um método para análises geomorfológicas desenvolvido no Japão com objetivo de reconstituir, virtualmente, a paleogeomorfologia, ou seja, a morfologia original sem efeitos de erosão recente, tais como ravinas, voçorocas e drenagens. Essa técnica é eficiente para reconstituição de paleossuperfícies,

tal como peneplanície elevada (e.g. Huzita & Kasama, 1977), portanto vem sendo utilizada para estudar movimentos de falhas ativas (e.g. Sato & Raim, 2004).

A partir do mapa topográfico, o relevo original é reconstituído através de preenchimento de drenagens (e.g. Nakayama & Kumamoto, 2002). O preenchimento dos relevos negativos, ou seja, a confecção do mapa de seppômen, é realizada através das seguintes etapas: 1) dividir o mapa topográfico em pequenas áreas quadradas por uma malha de intervalo definido; 2) marcar o ponto culminante de cada área quadrada; 3) confeccionar um novo mapa topográfico utilizando-se somente os pontos culminantes.

Em relação ao mapa topográfico original, o mapa de seppômen apresenta uma morfologia bem simplificada (Figura 3). O seppômen, com base em uma malha fina, preenche, seletivamente, as drenagens de pequena largura, portanto reproduz a paleogeomorfologia detalhada de passado relativamente recente. Por outro lado, o seppômen, com base em uma malha grossa, simula a paleogeomorfologia de passado relativamente remoto, porém de forma mais ambígua. Como, por exemplo, o seppômen S1 da Figura 4, que é elaborado com base em uma malha grossa de 2 km e reproduz bem a peneplanície elevada semi-erodida. Entretanto, ele não consegue distinguir os movimentos individuais das falhas ativas F1 e F2. Por outro lado, o seppômen S2, da malha fina de 500 m , determina os movimentos individuais da falha F1 e falha F2, bem como o *knickpoint* relativo à falha F1. Entretanto a reprodução da peneplanície elevada é muito imperfeita.

Para uma região com relativamente baixo efeito de erosão, o mapa de seppômen apresenta uma morfologia virtual similar ao estado original, antes da erosão (Figura 4A). Por outro lado, para uma região com profundo efeito de erosão, o mapa de seppômen detecta os fatores geológicos refletidos na morfologia atu-

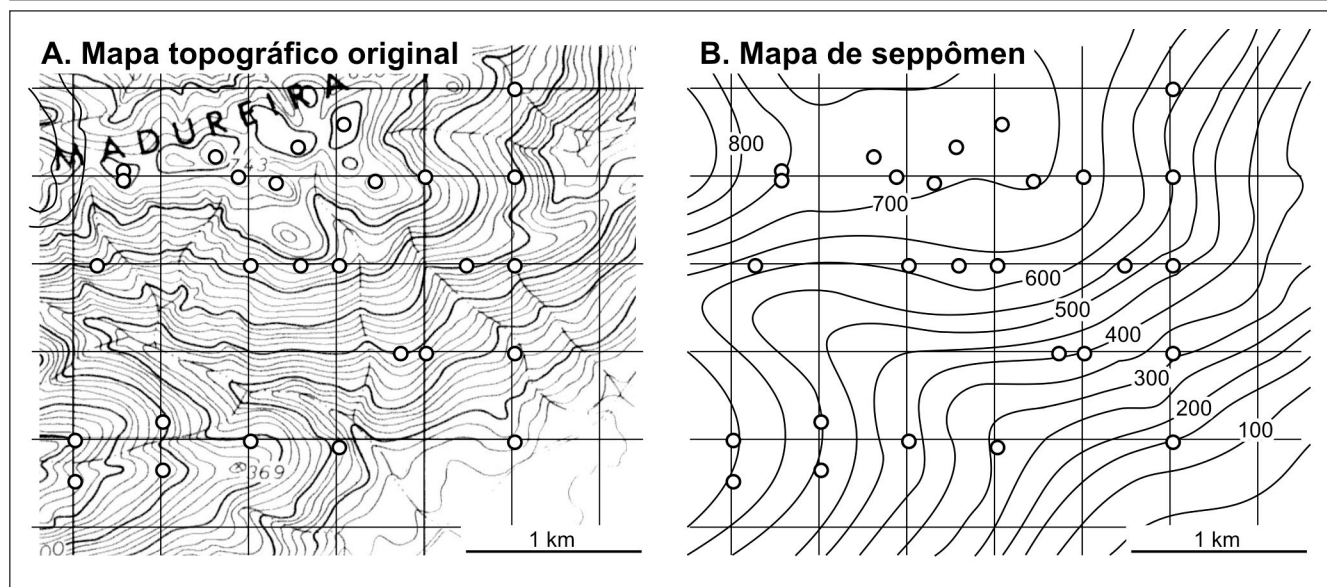


Figura 3 - Método para confecção de mapa de seppômen, segundo Motoki et al. (2008b): A) dividir o mapa topográfico em áreas quadradas por uma malha de intervalo definido e marcar os pontos culminantes de cada área; B) confeccionar um novo mapa topográfico utilizando somente os pontos culminantes (círculos abertos).

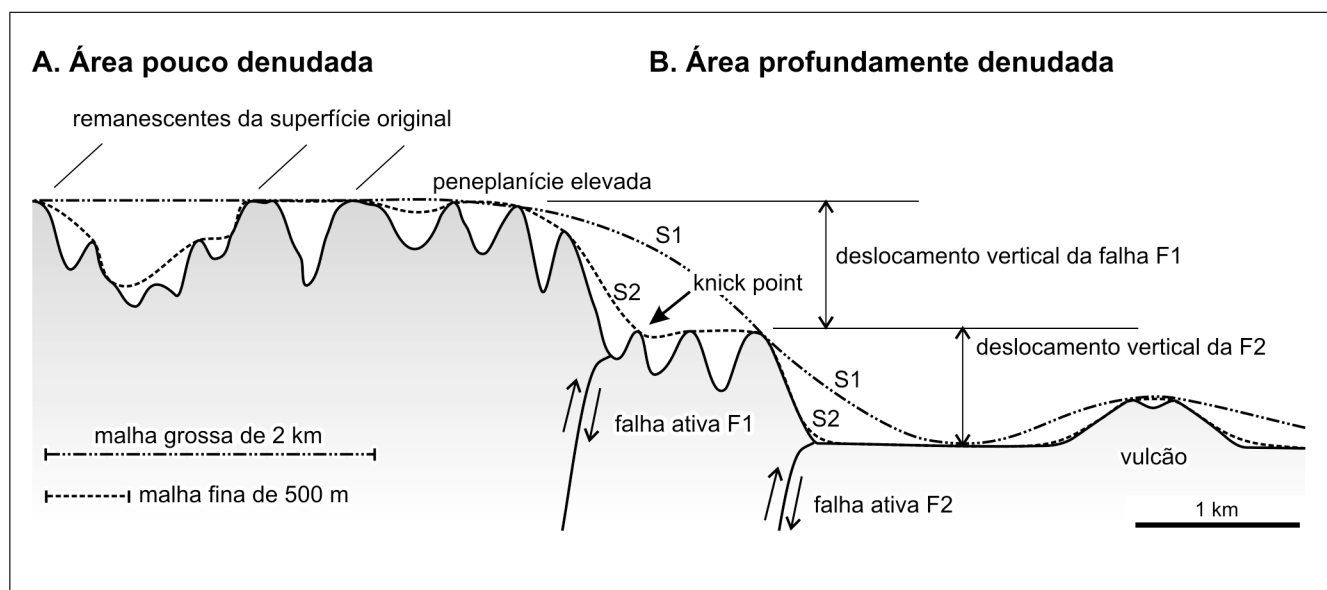


Figura 4 - Significado das paleogeomorfologias reconstituídas pela técnica de seppômen, simplificado de Motoki et al. (2008b). Os seppômens S1 e S2 são confeccionados com base nas malhas com intervalo respectivo de 2 km e 500 m.

al (Motoki et al., 2008b). Por exemplo, em uma área com características geológicas homogêneas, o seppômen apresenta relevos suaves. Ao contrário, em uma área onde ocorrem descontinuidade na distribuição de rochas, movimento vertical de falhas, edifício vulcânico ou cratera de meteorito, essas estruturas podem aparecer no seppômen na forma de relevos característicos (Figura 4B).

Os autores confeccionaram o mapa de seppômen para as ilhas Belmonte, Sudeste e Nordeste, com base no mapa topográfico de escala de 1:500 elaborado pelo CPRM (Moraes et al., 1997), utilizando-se a malha de 10 m de intervalo. Através do preenchimento de ravinas e fendas com largura menor do que 10 m, as plataformas de abrasão marinha foram destacadas.

5. Morfologia submarina

O arquipélago de São Pedro e São Paulo ocorre em uma região profunda no Oceano Atlântico. Nas interseções entre falha transformante e cadeia meso-oceânica (*ridge-transform interaction*), a profundidade alcança mais de 5000 m (Hekinian et al., 2000). Esse fenômeno é

devido à baixa temperatura do manto superior dessa região (Sichel et al., 2008a).

A Figura 5 apresenta a visão tri-dimensional da morfologia abissal baseada na batimetria prevista da Ver. 11.1 (UCSD-SIO, 2009). Essa figura mostra que o arquipélago está no topo de uma saliência morfológica tabular, com 90 km de comprimento, 25 km de largura e 3800 m de altura relativa, saliência denominada de Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo (*Saint Peter Saint Paul Peridotite Ridge*). Essa cadeia foi interpretada como um *megamullion*, que foi deformado, posteriormente, por tectonismo recente (Soares et al., 2008; Sichel et al., 2009).

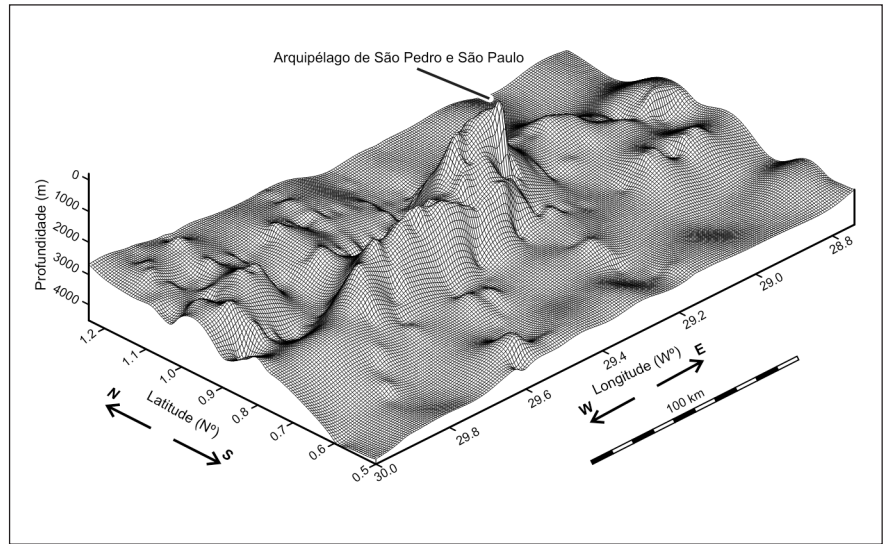


Figura 5 - Visualização da morfologia abissal em torno do arquipélago de São Pedro e São Paulo, confeccionada com base na batimetria prevista (UCSD-SIO, 2009). A escala vertical é exagerada em 12 vezes da escala horizontal.

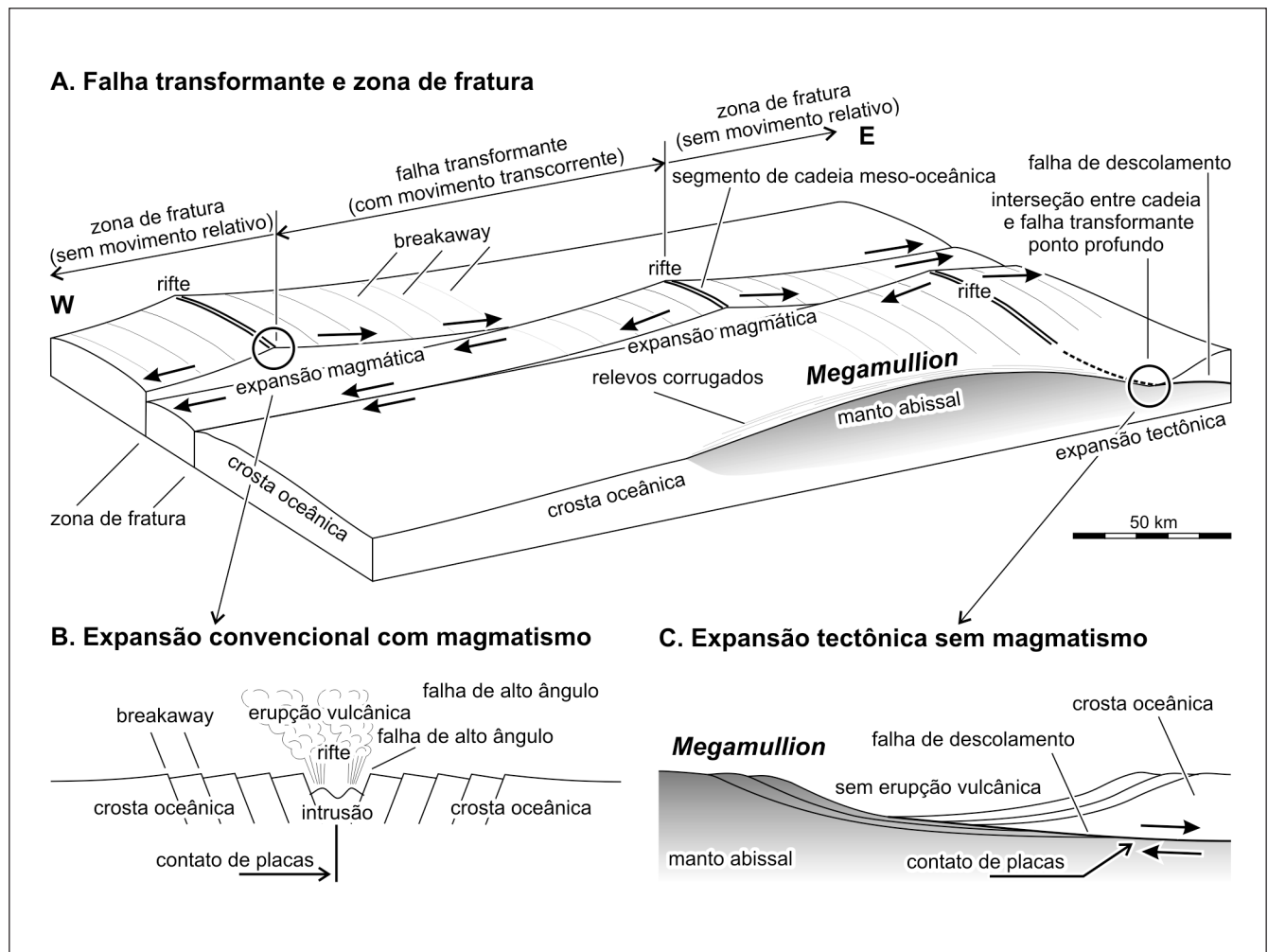


Figura 6 - Ilustração esquemática de: A) relação entre cadeia meso-oceânica e falha transformante; B) expansão magmática convencional com geração de crosta oceânica nova; C) expansão amagmática com formação de *megamullion*. A escala vertical está exagerada em cerca de 10 vezes.

O *megamullion*, chamado também de *mantle core complex*, é a saliência morfológica abissal na forma de carapaça de tartaruga constituída por rochas ultramáficas do manto abissal (Figura 6A; Tucholke et al., 2001). Além das rochas ultramáficas, ocorre uma quantidade significativa de gabro. Na superfície de *megamullion*, expõe-se o manto abissal sem cobertura da crosta oceânica. A saliência morfológica é posicionada em direção perpendicular ao eixo da cadeia mesoocênica. O *megamullion* é formado através da expansão amagmática de placas oceânicas.

Nas cadeias mesoocênicas comuns, ocorre a expansão de placas com intenso vulcanismo, gerando crosta oceânica nova (Figura 6B). Entretanto, nos eixos de expansão de baixa velocidade e/ou nas regiões de baixa temperatura do manto, a geração do magma é pouco expressiva e a erupção vulcânica é escassa. No eixo de expansão, não se observa *rift valley*. A expansão ocorre por meio do movimento de uma falha subhorizontal, denominada falha de descolamento (*detachment fault*), o que delimita as duas placas oceânicas. A expansão de placas dessa maneira é chamada de expansão amagmática (*amagmatic spreading*) ou expansão tectônica (Figura 6C).

Os flancos do arquipélago de São Pedro e São Paulo apresentam rampas laterais de ângulos elevados. O perfil morfológico ao longo da latitude 29°20'W, baseado na batimetria predita, demonstra no flanco sul da cadeia peridotítica a rampa de 50° de declividade média com altura relativa de 2000 m (Figura 7A). No flanco norte, observa-se a rampa de 20° de declividade média com altura relativa de 1600 m.

Os seis mergulhos profundos por submersível científico *Nautila* em torno do arquipélago de São Pedro e São Paulo, que foram realizados durante 1997 a 1998 (Hekinian et al., 2000), revelaram que a morfologia submarina é, de fato, ainda mais acidentada (Figura 7B). Os flancos norte e sul, na proximidade do arquipélago, têm declividade de 50°. No flanco sul, ocorre uma escarpa subvertical de 1500 m de altura e um graben paralelo à escarpa. Observam-se várias escarpas com altura maior do que 100 m. A batimetria local por um barco mostrou que a morfologia acidentada ocorre também em localidades rasas. Não se observa planície submarina rasa coberta por grandes recifes de coral.

A morfologia caracterizada por várias escarpas de grande altura é instá-

vel. Esse fato sugere que a Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo foi formada recentemente, talvez nos últimos milhões de anos. Considera-se que o tectonismo de soerguimento continua até o presente.

6. Plataforma de abrasão marinha

As ilhas e os penedos do arquipélago de São Pedro e São Paulo estão espalhados em uma área de 400 x 200 m, com altitude relativamente nivelada. Observam-se patamares em torno de 4 a 10 m acima do nível do mar (Figura 2), que ocupam 27% da área emersa total. Como o arquipélago não possui praias, o patamar é considerado como plataforma de abrasão marinha (*wave-cut bench*).

O mapa de seppômen com base na malha de 10 m de intervalo ilustra a existência de duas plataformas nas ilhas de Belmonte, Sudeste e Nordeste (Figura 8). O histograma de distribuição altimétrica mostra dois níveis de maior extensão, nas altitudes de 4 a 5 m e de 7 a 9 m, denominados, respectivamente, de plataforma inferior e de plataforma superior (Figura 9). As plataformas estão distri-

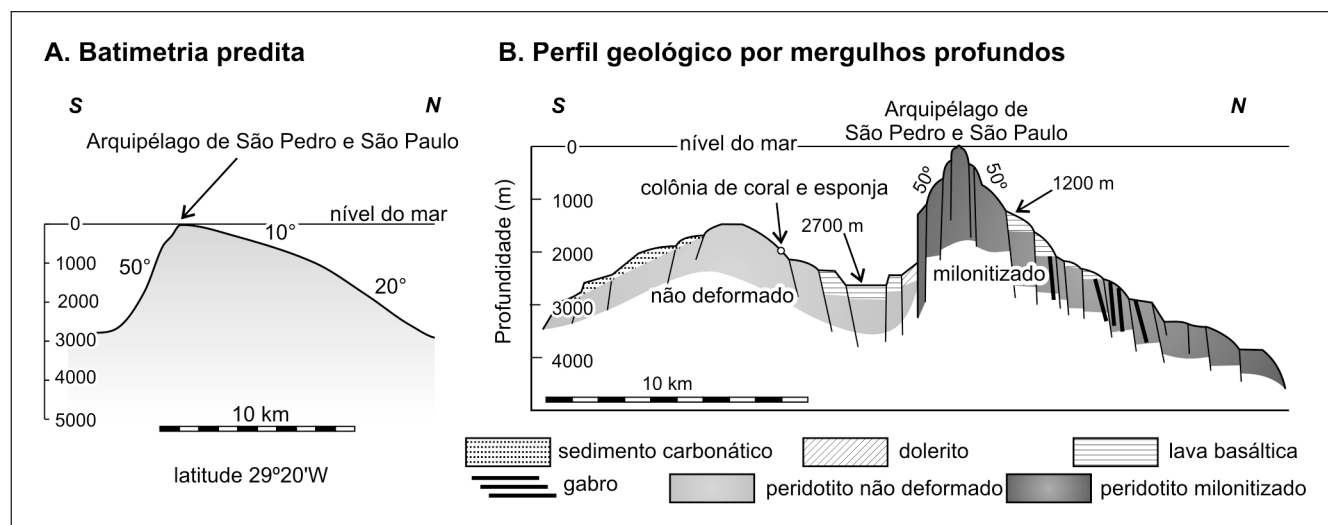


Figura 7 - Perfis da morfologia submarina em direção norte-sul em torno do arquipélago de São Pedro e São Paulo: A) batimetria predita ao longo da latitude 29°20'W; B) compilação dos 6 mergulhos profundos pelo submersível *Nautila*, segundo Hekinian et al. (2000). A escala vertical é exagerada em 2 vezes da horizontal.

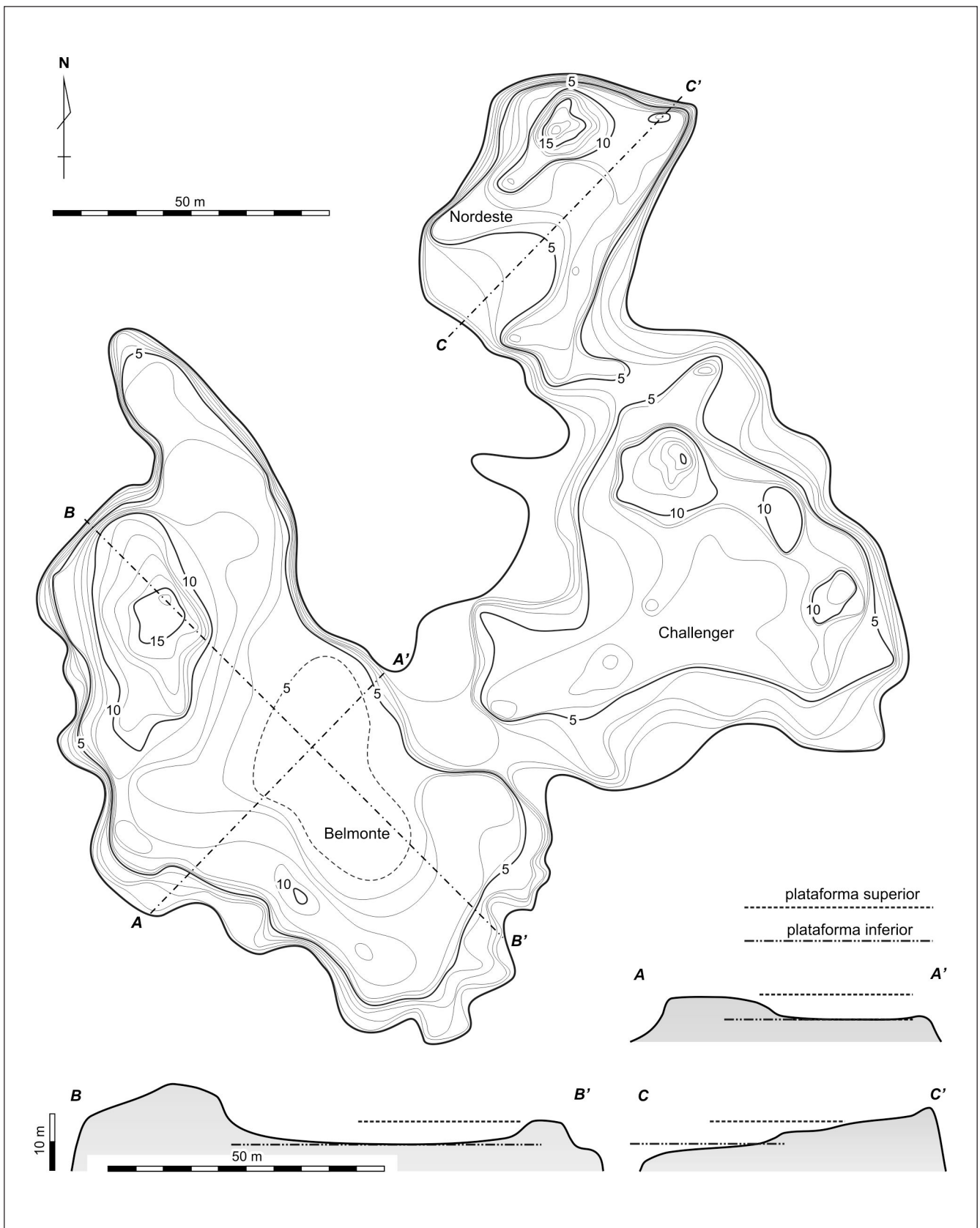


Figura 8 - Mapa de seppômen das ilhas Belmonte, Sudeste (Challenger) e Nordeste com base na malha de 10 m, confeccionado a partir do mapa topográfico de 1:500 (Moraes et al., 1997).

buídas nas três ilhas anteriormente citadas nas mesmas faixas de altitude. Esse fato indica que o soerguimento tectônico ocorreu de maneira uniforme, sem basculamento ou soerguimento diferenciado entre as ilhas, pelo menos após a formação das plataformas.

A superfície das plataformas apresenta forte efeito intempérico sobre as rochas ultramáficas. A plataforma inferior é relativamente lisa e apresenta uma boa convergência na distribuição altimétrica na faixa de 4 a 5 m de altitude, com possível extensão até 6 m. Essas observações sugerem que a idade da sua formação é jovem.

A plataforma superior ocorre na faixa de altitude de 7 a 9 m, podendo ser estendida até 10 m. A superfície é mais acidentada e a dispersão altimétrica é maior, sugerindo que sua formação foi mais antiga do que a plataforma inferior. Campos et al. (2005; 2009) demonstraram a existência de depósitos sedimentares biogênicos na plataforma superior que contém fósseis coralígenos indicativos de ambiente de paleoenseada.

7. Datação ^{14}C para fósseis coralígenos

Foram realizadas dez datações pelo método ^{14}C para os fósseis coralígenos

coletados a partir da ilha Belmonte. Entre elas, seis são as amostras originadas da plataforma superior. Os fósseis de idades antigas tendem a ocorrer em pontos mais altos (Figura 10). A relação entre as idades e as altitudes indica a taxa de soerguimento nos últimos 6.600 anos como 1.5 a 1.8 mm/ano.

8. Estimativas das taxas de soerguimento tectônico

Plataforma de abrasão marinha é formada em um período em que o nível do mar era alto e estável. Tal condição ocorre em transgressões marinhas durante períodos interglaciais. Os últimos eventos mundiais de transgressões interglaciais ocorrerem em 6 mil anos e 125 mil anos atrás (e.g. Shackelton, 1987), denominados, respectivamente, de Flandriana e de Sangamoniana. Em ambos os períodos, o nível do mar era cerca de 5 m acima do nível atual (Figura 11). Desta forma, as plataformas, inferior e superior, podem ser correlacionadas, respectivamente, aos eventos Flandriano e Sangamoniano.

A partir da diferença cronológica das duas transgressões e do desnível entre as duas plataformas, calcula-se a

taxa de soerguimento do arquipélago de São Pedro e São Paulo nos últimos 125 mil anos como de 0.03 a 0.04 mm/ano. Conforme essa idéia, no período glacial Mindel, há cerca de 140 mil anos, a plataforma superior já estava acima do nível do mar e tem sido emersa até o presente. No Período Glacial Würm, 20 mil anos atrás, a plataforma formava um platô de 140 m de altitude (Figura 12, modelo A).

De acordo com essa taxa de soerguimento, são necessários 126 milhões de anos para que ocorra um soerguimento tectônico de 3800 m e, conseqüentemente, o surgimento do arquipélago. Entretanto a abertura do Oceano Atlântico Equatorial ocorreu em cerca de 80 Ma e a falha transformante de São Paulo, em torno de 40 Ma. Portanto o tectonismo de 126 milhões de anos é uma duração longa demais. Conseqüentemente, a taxa de soerguimento de 0.03 a 0.04 mm/ano parece muito insuficiente para explicar o surgimento do arquipélago.

Uma alternativa possível é que a plataforma superior seja correlacionada à Transgressão Flandriana e a plataforma inferior à erosão posterior por onda de ressaca (Figura 13). Com base na idade da Transgressão Flandriana e do desnível entre a plataforma superior e o nível do mar daquele tempo, estima-se a velocidade de soerguimento tectônico nos últimos 6 mil anos, como de 1.2 a 1.5

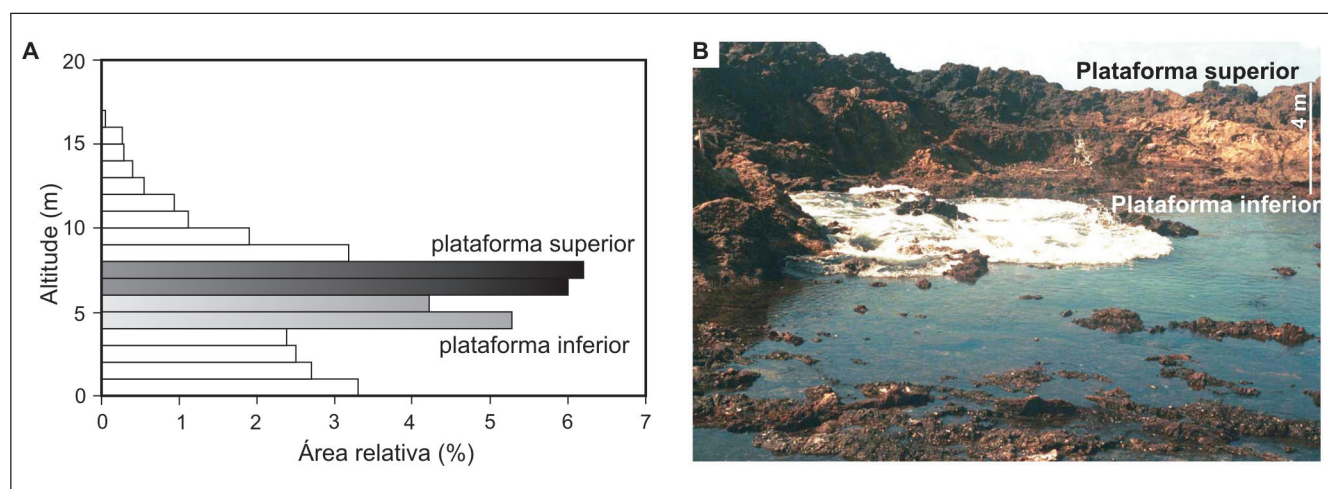


Figura 9 - Histograma de distribuição altimétrica dos níveis de seppômen (A), indicando presença da plataforma superior, com altitude de 5 m, e plataforma inferior, com altitude de 8 m (B). As áreas de faixas altimétricas foram calculadas com o auxílio de software Wilbur (Motoki et al., 2006; 2007).

mm/ano. Essa taxa é próxima àquela estimada com base nas datações ^{14}C para fósseis coralígenos, de 1.5 a 1.8 mm/ano. A redução gradativa de altitude dos fósseis nos últimos 6 mil anos conforme suas idades é consistente com o abaixamento do nível do mar relativo ao arquipélago após o referido evento de transgressão. A escassez de fósseis co-

ralígenos na plataforma inferior apóia a opinião de que essa plataforma foi formada pela erosão recente.

Conseqüentemente, os dados anteriormente citados em conjunto indicam que a taxa razoável para o soerguimento tectônico atual do arquipélago de São Pedro e São Paulo é em torno de 1.5 mm/

ano. Esse rápido soerguimento justifica a morfologia submarina altamente acidentada e a ausência de grande recife de coral em torno do arquipélago. Conforme essa taxa de soerguimento, o ponto culminante do arquipélago apareceu no nível do mar em um período entre 50 a 70 mil anos atrás. Durante o período glacial Würm, o arquipélago formava um morro agudo de

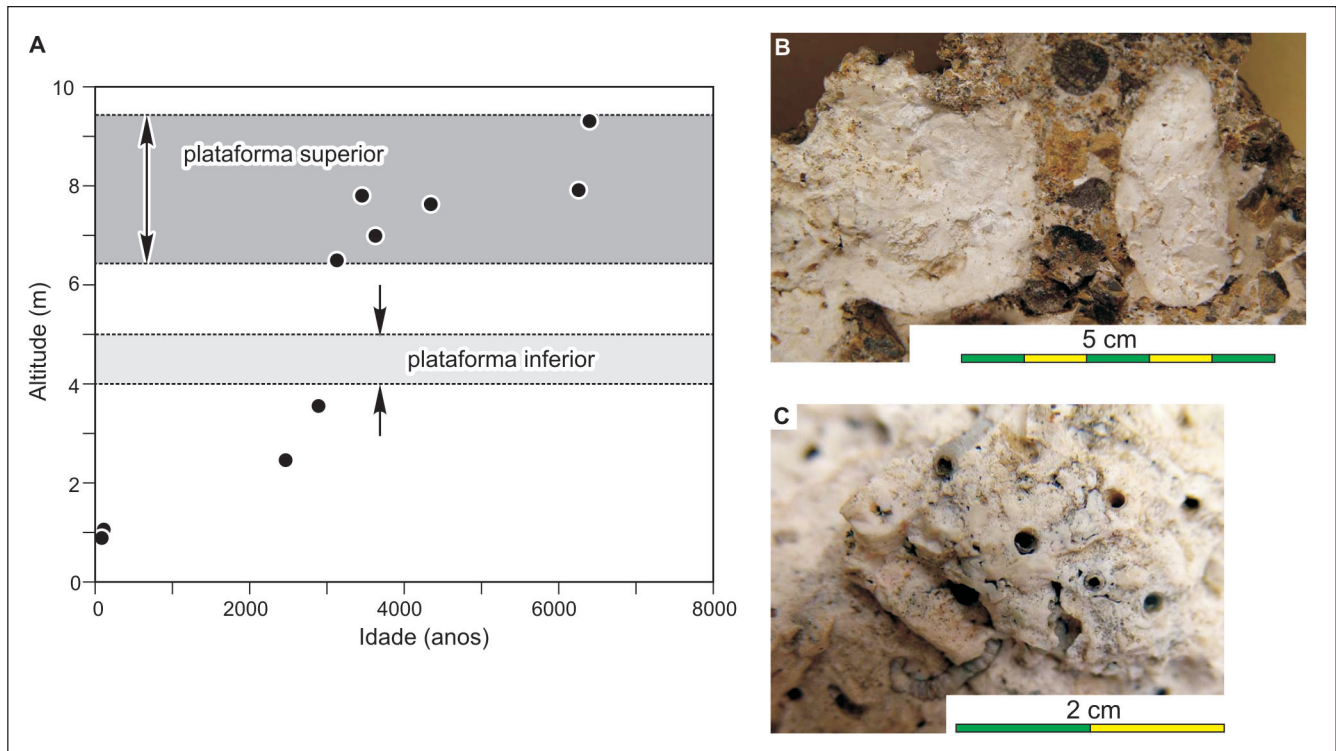


Figura 10 - Correlação entre as idades ^{14}C dos fósseis coralígenos coletados da ilha Belmonte e sua altura de ocorrência em relação às plataformas de abrasão marinha (A). Os fósseis são: B) Melobésia; C) Melobésia e vermitídeos.

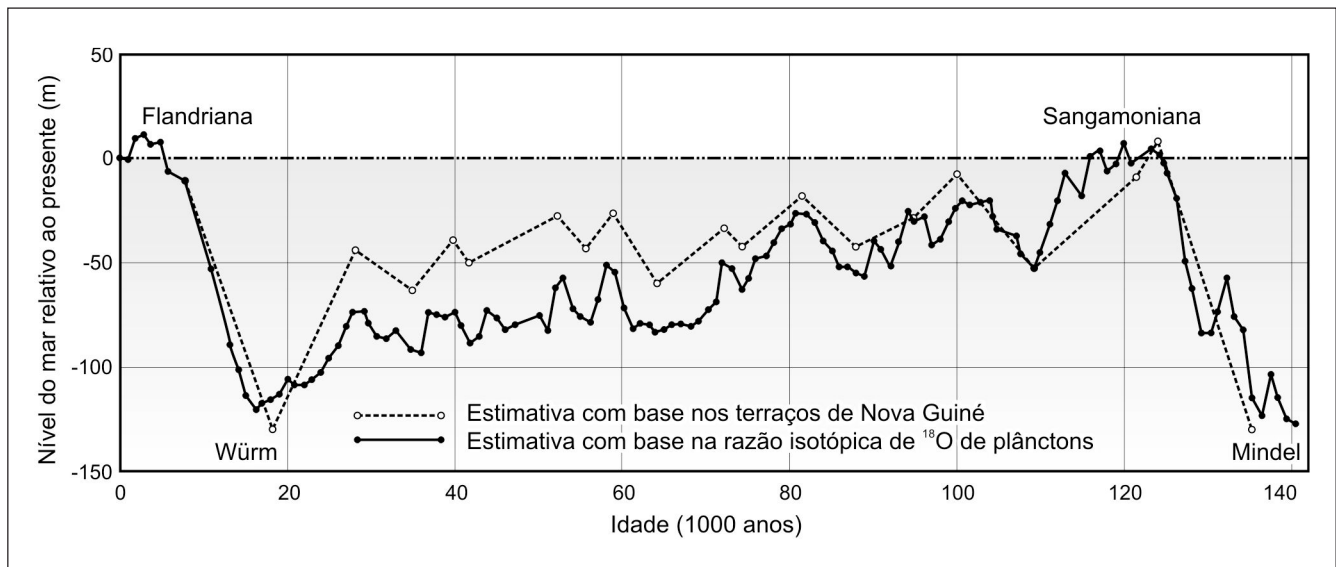


Figura 11 - Variação do nível do mar nos últimos 140 mil anos conforme Shackleton (1987).

110 a 120 m de altitude (Figura 12, modelo B).

Interpretando a Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo como um *megamullion* tectonicamente deformando, o soerguimento total seria de 1500 a 3000 m e o início do tectonismo seria 1~2 Ma. Entretanto a Cadeia Peridotítica pode não ser um *megamullion*.

Os *megamullions* de outras regiões acompanham uma razoável quantidade de gabro (e.g. Blackman et al., 2002). Entretanto, conforme os mergulhos profundos por *Nautila* em torno do arquipélago de São Pedro e São Paulo (Hekinian et al., 2000), a Cadeia Peridotítica é composta, predominantemente, de peridotito e não há ocorrência de corpos de gabro. Devido à sua composição, as rochas peridotíticas podem ser originadas do manto oceânico subcrustal e foram esprimidas pelo tectonismo. Neste caso, o soerguimento total é, aproximadamente, de 9000 m e o tectonismo se iniciou cerca de 6 Ma.

As observações anteriormente citadas sugerem que o tectonismo de soerguimento do arquipélago de São Pedro e São Paulo está ativo. Devido ao soerguimento muito rápido, a erosão de ondas não eliminará o arquipélago de São Pedro e São Paulo. Ao longo de poucos milhões de anos, as ilhas continuarão aumentando a sua altura e extensão superficial emersa.

9. Conclusões

Através das análises geomorfológicas do fundo do oceano e da plataforma de abrasão marinha do arquipélago de São Pedro e São Paulo pode-se chegar às seguintes conclusões:

1. A morfologia submarina ao redor do Arquipélago apresenta relevos acidentados, com presença de escarpas subverticais. Não há plataforma rasa coberta por grandes recifes de coral.
2. O mapa de seppômen revela a existência de duas plataformas de abrasão marinha, com altitudes respectivas de 4 a 5 m e de 7 a 9 m.

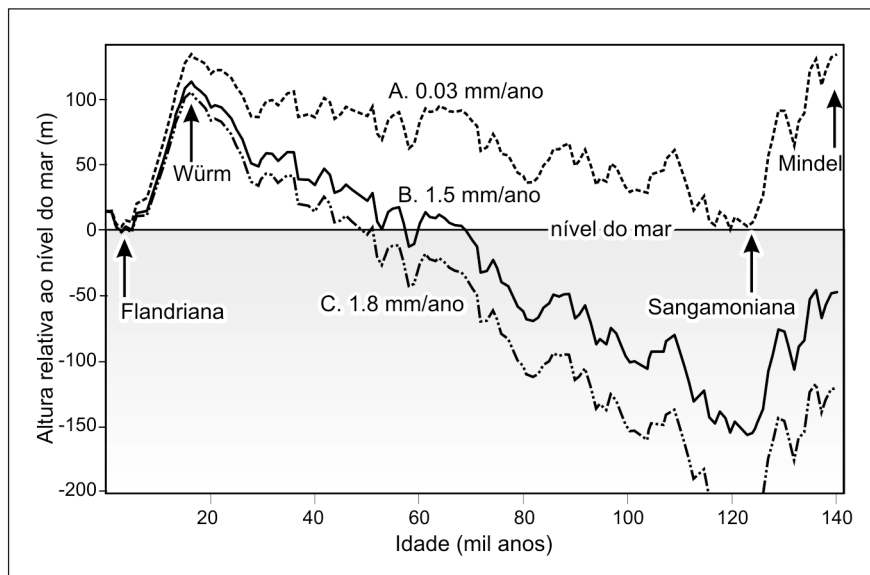


Figura 12 - Variação da altura da plataforma superior do arquipélago de São Pedro e São Paulo relativo ao nível do mar, conforme os modelos com a taxa de soerguimento de: A) 0.03 a 0.04 mm/ano; B) 1.5 mm/ano; C) 1.8 mm/ano.

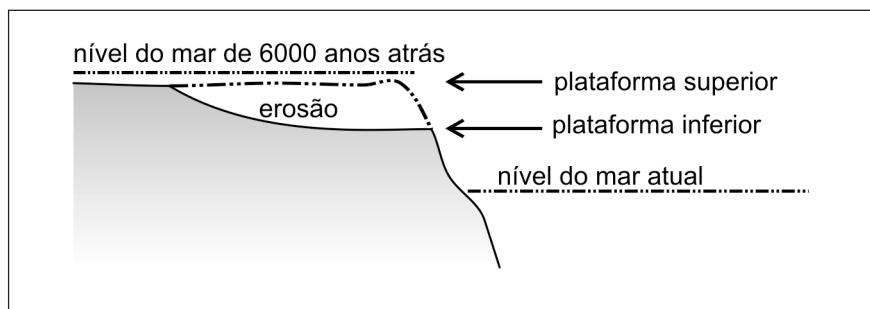


Figura 13 - Ilustração esquemática de processo de formação da plataforma inferior por erosão após a transgressão Flandriana.

3. Há uniformidade nos níveis altimétricos das plataformas de abrasão marinha entre as ilhotas, o que indica não haver basculamento tectônico ou soerguimento diferenciado entre as ilhas.
4. Interpretando as plataformas, inferior e superior, sendo formadas, respectivamente, durante as Transgressões Flandriana e Sangamoniana, a taxa média de soerguimento estimada seria de 0.03 a 0.04 mm/ano nos últimos 125 mil anos. Essa taxa parece ser baixa demais e não é compatível com a idade jovem da falha transformante.
5. Considerando a plataforma superior como originada da Transgressão Flandriana e a plataforma inferior como de erosão posterior, calculou-se a taxa de soerguimento de 1.2 a 1.5 mm/ano nos últimos 6 mil anos.
6. As datações ¹⁴C para os fósseis coralígenos coletados da plataforma superior da ilha Belmonte indicam uma taxa de soerguimento de 1.5 a 1.8 mm/ano nos últimos 6600 anos.
7. Os dados em conjunto sugerem que a taxa em torno de 1.5 mm/ano é um valor razoável para o soerguimento tectônico do arquipélago de São Pedro e São Paulo. Considera-se que o tectonismo continua até o presente. Interpretando a cadeia peridotítica como um *megamullion* deformado, o soerguimento tectônico total seria

de 1500 a 3000 m e o início do tectonismo seria de 1 a 2 Ma. Se a cadeia peridotítica é originada do manto oceânico subcrustal, o soerguimento total é de, aproximadamente, 9000 m e o tectonismo começou em cerca de 6 Ma.

10. Agradecimentos

Os autores agradecem a SECIRM e ao CNPq pelo apoio financeiro e logístico do Programa PROARQUIPELAGO, conforme o projeto n.º 557309/2005-0, intitulado “Integração dos processos tectônicos, geoquímicos e geomicrobiológicos atuantes nas rochas mantélicas do arquipélago São Pedro São Paulo, Atlântico Equatorial”, bem como ao PETROBRAS, de acordo com o termo de cooperação 0050.0042411.08.4, intitulado “Origem e evolução das rochas mantélicas do arquipélago de São Pedro e São Paulo”, à realização dos trabalhos de campo através das expedições.

11. Referências bibliográficas

- BLACKMAN, D.K., KARSON, J.A., KELLEY, D.S., CANN, J.R., FRÜH-GREEN, G.L., GEE, J.S., HURST, S.D., JOHN, B.E., MORGAN, J., NOONER, S.L., ROSS, D.K., SCHROEDER, T.J., WILLIAMS, E.A. Geology of the Atlantis Massif (Mid-Atlantic Ridge, 30° N): implications for the evolution of an ultramafic oceanic core complex. *Marine Geophysical Researches*, v. 23, p. 443-469, 2002.
- CAMPOS, F.C.C., PETTA, R.A., THEYE, T., SICHEL, S.E., SIMÕES, L.S.A., SRIVASTAVA, N.K., MOTOKI, A., VIRGENS NETO, J., ANDRADE, F.G.G. *O arquipélago de São Pedro e São Paulo e sua posição ímpar na diversidade geológica da Terra*. Os dez anos da Estação Científica do Arquipélago de São Pedro e São Paulo. Brasília: SECIRM, 2009. (in press).
- CAMPOS, T.F.C., VIRGENS NETO, J., AMORIM, V.A., HARTMANN, L.A., PETTA, R.A. Modificações metassomáticas das rochas milonitizadas do complexo ultramáfico do arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Equatorial. *Geochimica Brasiliensis*, v. 17, n. 2, p. 81-90, 2003.
- 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, soerguimento tectônico de rochas infracrustais no Oceano Atlântico. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, SIGEP 002, UNB, 2005. 12p. <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio002/sitio002.pdf>, acesso em 31 de dezembro de 2006.
- GURNIS, M., MUELLER, R.D., MORESI, L. Cretaceous vertical motion of Australia and the Australian-Antarctic Discordance, *Science*, v. 279, p. 1499-1504, 1998.
- 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.
- HUZITA, K., KASAMA, T. *Kôbe oyobi rinsetsu chiiki chisitu-zu, 1/50,000* (Mapa geológica de Kobe e áreas adjacentes, 1/50.000). (3.ed.). Japão: Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de Kobe, 1977.
- 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). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 93, p. 191-216, 1999.
- MOHRIAK, W.U. Interpretação geológica e geofísica da bacia do Espírito Santo e da região de Abrolhos: petrografia, datações radiométricas e visualização sísmica das rochas vulcânicas. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, v. 14, p. 133-142, 1989.
- MORAES, J.F.S., LINDEN, E.M., MORAES, F.A.B. *Planta topográfica do arquipélago de São Pedro e São Paulo, escala 1:500*. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 1997.
- MOTOKI, A., PETRAKIS, G.H., SICHEL, S.E., CARDOSO, C.E., MELO, R.C., SOARES, R.S., MOTOKI, K.F. Landform origin of the Mendanha Syenitic Massif, State of Rio de Janeiro, Brazil, based on the geomorphological analyses by summit level map technique. *Geociências*, Rio Claro, v. 27, n. 1, p. 33-44, 2008b.
- MOTOKI, A., PETRAKIS, G.H., SOARES, R.S., SICHEL, S.E., AIRES, J.R. New method of semi-automatic modal analyses for phenocrysts of porphyritic rocks based on quantitative digital colour specification technique. *REM-Revista Escola de Minas*, v. 60, n. 1, p. 97-113, 2007.
- MOTOKI, A., SICHEL, S.E. Hydraulic fracturing as a possible mechanism of dyke-sill transitions and horizontal discordant intrusions in trachytic tabular bodies of Arraial do Cabo, State of Rio de Janeiro, Brazil. *Geofísica Internacional*, México, v. 47, n. 1, p. 13-25, 2008.
- MOTOKI, A., SICHEL, S.E., SAVI, D.C., AIRES, J.R. Intrusion mechanism of tabular intrusive bodies of subhorizontal discordant emplacement of the Cabo Frio Island and the neighbour areas, State of Rio de Janeiro, Brazil. *Geociências*, Rio Claro, v. 27, n. 2, p. 207-218, 2008a.
- MOTOKI, A., ZUCCO, L.L., SICHEL, S.E., AIRES, J.R., PETRAKIS, G.H. Development of the technique for digital colour specification and the new nomenclatures of ornamental rock base don the measured colours. *Geociências*, Rio Claro, v. 25, n. 4, p. 403-415, 2006.
- NAKAYAMA, D., KUMAMOTO, T. Seimitsu DEM ni kansuru kenkyû jôho (Informações científicas sobre DEM de alta precisão). *Proceedings of Kûkan Kagaku Gijutsu Center Symposium*. p. 31-34, 2002.
- RITZWOLLER, M.H., SHAPIRO, N.M., LEAHY, G.M. A resolved mantle anomaly as the cause of the Australian-Antarctic discordance, *Journal of Geophysical Research*, v. 108-B12, p. 2559, 2003.
- SATO, H., RAIM, R. Landform analysis using summit level and streamline surface in Abukuma mountains. *Transactions of Japanese Geomorphological Union*, v. 23, n. 3, p. 480-481, 2004.
- SHACKELTON, N.J. Oxygen isotope analyses, ice volume, and sea level. *Quaternary Science Review*, v. 6, p. 183-190, 1987.
- SICHEL, S.E., ESPERANÇA, S., MOTOKI, A., MAIA, M., MELLO, S.L.M., HORAN, M.F. Geophysical and geochemical indications for existence of cold upper mantle beneath the Equatorial Atlantic Ocean. *Revista de Sociedade Brasileira de Geofísica*, v. 26, n. 1, p. 69-86, 2008a.
- SICHEL, S.E., MOTOKI, A., SAVI, D.C., SOARES, R. Subvolcanic vent-filling welded tuff breccia of the Cabo Frio Island, State of Rio de Janeiro, Brazil. *REM - Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 61, n. 4, 423-432, 2008b.

- SICHEL, S.E., MOTOKI, A., VARGAS, T., SAVI, D.C., CAMPOS, T.F.C., SIMÕES, L.S.A. *Rocha ultramáfica do manto abissal*. Os dez anos da Estação Científica do arquipélago de São Pedro e São Paulo. Brasília: SECIRM, 2009. (in press).
- SIEBEL, W., BECCHIO, R., VOLKER F., HANSEN, M.A.F., VIRAMONTE, J., TRUMBELL, R.B., HAASE, G., ZIMMER, M. Trindade and Martin Vaz Islands, South Atlantic: isotopic (Sr, Nd, Pb) and trace elements constraints on plume related magmatism. *Journal of South American Earth Sciences*. v. 13, p. 79-103, 2000.
- SMITH, W.H., SANDWELL, D.T. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science Magazine*, v. 277, issue 5334, p. 1957-1962, 1997.
- SOARES, R.S., MOTOKI, A., SICHEL, S.E., AIRES, J.R., MELO, R.C., PETRAKIS, G.H. Velocidade de soerguimento atual do arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, com base nas análises geomorfológicas de plataforma de abrasão marinha. *Anais do 44º Congresso Brasileiro de Geologia*, Curitiba, SBG, p. 569, 2008.
- TILLEY, C.E. Dunite mylonite of St. Paul's rocks (Atlantic). *American Journal of Science*, v. 245, p. 483-491, 1947.
- TUCHOLKE, B.E., FUJIOKA, K., ISHIHARA, T., HIRTH, G., KINOSHITA, M. Submersible study of an oceanic megamullion in the central North Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, v. 106, p. 16145-16161, 2001.
- UCSD-SIO. *Measured and estimated seafloor topography*. Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego. http://topex.ucsd.edu/marine_topo/mar_topo.html. Acesso em 10 de abril de 2009.
- ULBRICH, M.N.C. Petrography of alkaline volcanic-subvolcanic rocks from the Brazilian Fernando de Noronha archipelago, Southern Atlantic Ocean. *Boletim do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Série Científica*, v. 24, p. 77-94, 1994.
- WEAVE, B.L. Geochemistry of highlyundersaturated ocean island basalt suites from the South Atlantic Ocean: Fernando de Noronha and Trindade islands. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, v. 105, p. 502-515, 1990.

Artigo recebido em 14/10/2008 e aprovado em 05/05/2009.

Descubra as muitas informações da: **Geologia, Mineração, Metalurgia & Materiais e Engenharia Civil.**



Assine e publique na Rem

Conheça o nosso site: **www.rem.com.br**