

Variabilidade da topografia oceânica superficial no Atlântico Sul Ocidental observada pela altimetria TOPEX/POSEIDON

MAURICIO MAGALHÃES MATA
CARLOS ALBERTO EIRAS GARCIA

FURG - Fundação Universidade do Rio Grande
Laboratório de Oceanografia Física - Departamento de Física
Cx. Postal 474, Rio Grande (RS), 96201-900
{mauricio, garcia}@calvin.ocfis.furg.br

Abstract: Altimetry data from two years (1993/1994) obtained by TOPEX/POSEIDON satellite has been used to determine surface oceanic topography variability on southwestern Atlantic. The Brazil-Malvinas Confluence region has shown the strongest variability on the study area either considering the whole 24 months data set or the seasonal subset, reaching values as high as 0.32 m. Lower values have been found in the regions north of 35°S, dominated by the Brazil Current and the south Atlantic subtropical gyre, and south of 45°S, where the Malvinas Current is present. In the seasonal analysis, autumn has revealed the strongest variability while the lowest values have been found during spring. The high variability region shape reflects the quasi-stationary meander centered at approximately 53° W formed during the Brazil current excursion south of 36° S.

Keywords: Satellite Altimetry, TOPEX/POSEIDON, Oceanic Variability, Brazil-Malvinas Confluence

1. Introdução

Com a evolução dos sensores aerotransportados e em plataformas orbitais, novos e promissores horizontes surgiram na oceanografia através da obtenção de dados precisos, de baixo custo e de caráter quasi-sinóptico. Um dos ramos desta evolução foi dos sensores ativos que emitem radiação eletromagnética e medem o sinal de retorno contendo a informação sobre os alvos na superfície. Dentre estes sensores destaca-se o altímetro que, partindo de princípios físicos relativamente simples, chega a um grande número de informações sobre a dinâmica dos oceanos. A principal função de um altímetro é medir a distância desde o satélite até a superfície do oceano com o objetivo de determinar as elevações e depressões presentes no mesmo. Estas variações de altura caracterizam a topografia dinâmica do oceano a qual, por sua vez, está intimamente relacionada com a circulação oceânica superficial. Além disso, os altímetros podem proporcionar informações sobre altura de ondas, velocidade do vento sobre a superfície do mar e a respeito de superfícies gravimétricas (geopotenciais).

O Experimento de Topografia Oceânica (TOPEX) foi idealizado pela NASA no início da década de 80, com o objetivo de medir a topografia dinâmica superficial do mar utilizando um altímetro altamente avançado. Na mesma época, a agência espacial francesa (CNES) estava estudando a possibilidade de incluir um equipamento altimétrico nos satélites da série SPOT. A

similaridade dos dois objetivos e o interesse de uma cooperação Franco-Americana na área espacial convergiu em um projeto comum, o TOPEX/POSEIDON. Esta missão, iniciada em agosto de 1992 no âmbito do projeto WOCE (*World Ocean Circulation Experiment*), é dedicada exclusivamente à altimetria e tem como objetivo principal estudar os padrões globais de circulação oceânica superficial procurando melhorar o entendimento do papel dos oceanos na manutenção/alteração do clima mundial. O satélite tem o período orbital de 10 dias e está equipado com dois altímetros de última geração: o ALT (TOPEX/NASA), de dupla banda (5.3 e 13.6 GHz), e o SSALT (POSEIDON/CNES), monobanda (13.6 GHz).

A altimetria é particularmente adequada para o estudo de regiões oceânicas energéticas e com grande variabilidade no nível do mar. A região sudoeste do Atlântico Sul é considerada uma das mais energéticas do globo e, assim como grande parte dos sistemas oceânicos do hemisfério Sul, pouco conhecida. A grande dinâmica desta área se deve, principalmente, a região de *Convergência Subtropical* (34° - 46°S/43° - 60°W) ao largo do Rio de La Plata. Nesta região, também denominada de Confluência Brasil-Malvinas (CBM), as águas quentes e halinas de origem tropical trazidas pela Corrente do Brasil encontram as águas subantárticas, frias e mais doces, da Corrente das Malvinas. O encontro destas correntes com características tão distintas determina a formação de

uma intensa frente oceânica e um complexo conjunto de filamentos, meandros e vórtices (Gordon, 1989).

Neste estudo utiliza-se a altimetria TOPEX/POSEIDON para investigar a variabilidade da topografia oceânica superficial do Atlântico Sul Ocidental, entre as latitudes de 15° S e 50° S e as longitudes de 30° W e 65° W. Na costa, a região é limitada por Ilhéus (BA) e Pta. Cascajo (Argentina), abrangendo uma área oceânica total de $7 \times 10^6 \text{ km}^2$ (Figura 1). O trabalho baseia-se no conjunto de dados altimétricos obtidos pelo satélite de 1993 e 1994, onde aspectos gerais e sazonais da variabilidade são abordados.

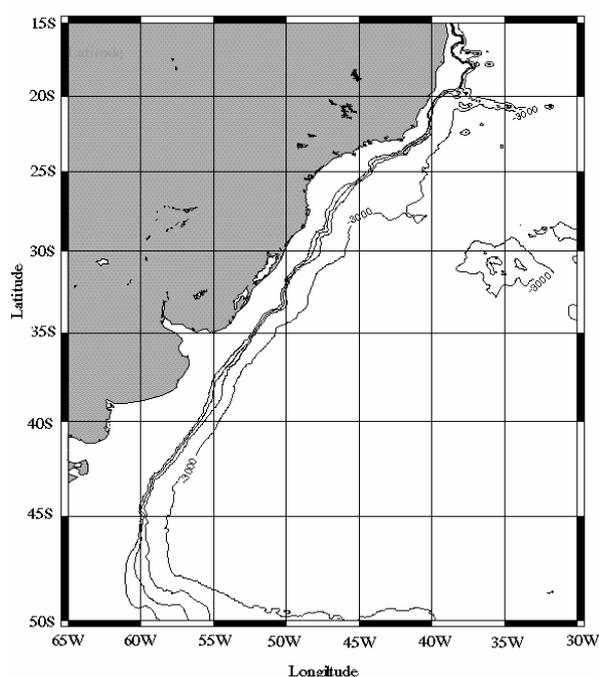


Figura A: Área de estudo. As isobatemétricas apresentadas correspondem as seguintes profundidades: 200, 500, 1000 e 3000 m.

2. Metodologia

O processamento dos dados altimétricos segue o sugerido por Nerem et al. (1990) e Benada (1993). As correções realizadas são basicamente de caráter ambiental, uma vez que a determinação da órbita do satélite está excelente (da ordem de 3 cm) não sendo necessária qualquer correção de caráter orbital (Tapley et al., 1994). A equação seguinte demonstra este passo:

$$h = h_s + h_{wet} + h_{dry} + h_{iono} + h_{baro} + h_{otide} + h_{etide} + h_{EM}$$

onde h é a distância geométrica resultante entre o centro de massa do satélite e a superfície oceânica

situada a *nadir* e h_s a distância instantânea, entre o sensor e a superfície do mar a *nadir*, medida pelo altímetro. Estas medidas são efetuadas, originalmente, com uma frequência de 0.1 Hz e posteriormente reduzidas a 1 Hz, o que determina um espaçamento superficial entre os pontos de amostragem de aproximadamente 6 km.

As correções aplicadas à distância instantânea são as seguintes:

- (h_{iono}) Elétrons livres na Ionosfera;
- ($h_{dry/wet}$) Troposfera seca e úmida (vapor d'água);
- (h_{EM}) Estado do mar (ruído eletromagnético);
- (h_{baro}) Barômetro inverso (pressão atmosférica sobre a superfície do mar);
- (h_{etide}) Maré Polar e Maré Terrestre;
- (h_{otide}) Maré Oceânica (foi utilizado o modelo de Cartwright and Ray (1990));

Se a posição do satélite é conhecida, então h pode ser subtraída da distância do satélite (h_{sat}) em relação a um elipsóide de referência (geocêntrica), resultando na altura geocêntrica da superfície do mar (h_{ssh})

$$h_{ssh} = h_{sat} - h$$

Uma vez conhecida a função espacial de uma superfície geopotencial, o geóide marinho, (h_{geo}) pode-se determinar a altura dinâmica para cada ponto de amostragem

$$\zeta = h_{ssh} - h_{geo}$$

A variável ζ está diretamente relacionada a circulação oceânica superficial de meso e larga escala, no entanto, ainda não pode ser determinada com alta resolução espacial a partir da altimetria devido ao precário conhecimento do geóide marinho (Nerem et al., 1994).

Neste trabalho somente os dados provenientes do altímetro da NASA (TOPEX) foram utilizados devido ao seu maior tempo de operação ($\approx 90\%$) e sua maior confiabilidade. Todos os dados em profundidades menores que 500m foram eliminados devido as grandes incertezas nos modelos do geóide e de maré para as regiões mais rasas. Outros dados indesejados foram retirados seguindo os valores de desvio padrão dos originais (0.1 Hz), de acordo com Stammer & Wunsch (1994): $\sigma(\text{Altura Superficial do Mar}) > 80 \text{ mm}$; $\sigma(\text{Altura Significativa de Onda}) > 2 \text{ m}$; $\sigma(\text{Controle de Ganho Automático}) > 0.25 \text{ dBel}$.

A variabilidade temporal da altura superficial do mar é um dos principais resultados obtidos pela

altimetria, trazendo importantes informações sobre a energia do sistema oceânico, o regime de vórtices, o ciclo sazonal, anual e interanual. A variabilidade da área de estudo foi calculada a partir de uma análise *colinear* das trajetórias do TOPEX, de acordo com Cheney et al. (1983). A técnica assume que o geóide marinho não varia a sua posição ao longo do tempo e, considerando-se que as correções ambientais são suficientemente satisfatórias, a variação da altura superficial do mar se deve exclusivamente à fração variável das correntes oceânicas. É importante observar que no estudo da variabilidade da topografia oceânica superficial a maior fonte de erro para a altimetria, o geóide marinho, é removida. A técnica resume-se em determinar para cada ponto de amostragem do TOPEX, ao longo da trajetória, a média do período considerado (no nosso caso 1993 - 1994), sendo a variabilidade equivalente ao desvio padrão desta média. Apesar da simplicidade da técnica, um grande volume de cálculos foi necessário para a determinação da variabilidade temporal em cada ponto uma vez que, para a região de estudo, em cada ciclo completo (de um total de 67) um conjunto de 16000 pontos foram analisados, considerando todas as trajetórias utilizadas (Figura 2).

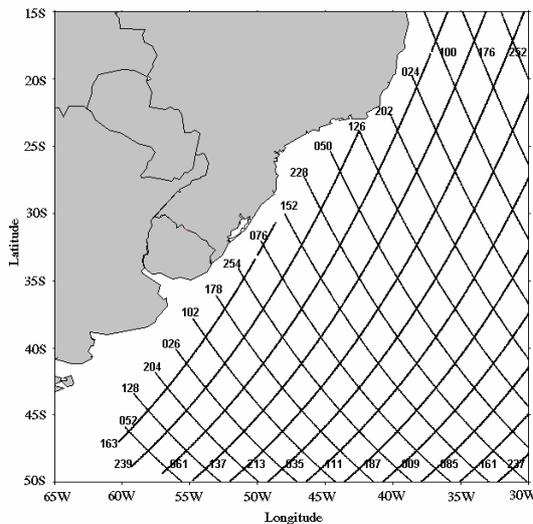


Figura 2: Trajetórias do TOPEX/POSEIDON na área de estudo

Após a determinação da variabilidade de ζ para cada ponto ao longo de cada trajetória procurou-se, com a finalidade de reduzir a quantidade de dados, gerar uma grade regular e ao mesmo tempo proceder uma filtragem para remoção de ruídos indesejados, utilizar uma função de interpolação Gaussiana e isotrópica que, por definição, depende exclusivamente das distâncias entre os pontos originais e a posição onde se deseja estimar ζ (Nerem et al., 1994). A função funciona como uma média ponderada onde, para determinar-se um

valor de altura em um ponto desejado ($\zeta(\phi, \lambda)$), utilizou-se a seguinte relação:

$$\zeta'(\phi, \lambda) = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \times \zeta(\phi_i, \lambda_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$$

onde $\zeta(\phi_i, \lambda_i)$ são os pontos adjacentes, contidos em uma determinada distância limite r_m (raio de procura), considerados no cálculo. Os pesos da função ω_i são computados a partir de uma distribuição gaussiana com as seguintes características: r_m de 3°; $\omega = 50\%$ em 1.5°.

A variabilidade foi determinada com relação a média geral de todas as observações do TOPEX para 1993 e 1994 e em caráter sazonal, considerando todos os dados para cada estação do ano, verão (jan/fev/mar), outono (abr/mai/jun), inverno (jul/ago/set) e primavera (out/nov/dez).

3. Resultados e Discussão

A variabilidade da topografia oceânica para a região de estudo estimada a partir de todo o período analisado (Figura 3) define bem a CBM, claramente a região mais energética da área com valores superiores a 0.28 m. As regiões ao norte de 30° S e ao sul de 45° S apresentam uma menor variabilidade com valores entre 0.08 a 0.12 m. A região mais energética já havia sido identificada pelos estudos pioneiros de Gordon et al. (1983), a partir de dados do GEOS-3, e Cheney et al. (1983), utilizando os dados da missão do SEASAT em 1978, este último com valores próximos aos que são encontrados atualmente. Posteriormente, estudos de variabilidade da CBM foram efetuados por vários autores utilizando os dados do GEOSAT (Provost et al., 1989; Forbes et al., 1993; Provost & Le Traon, 1993). Os valores obtidos no presente estudo concordam tanto no espaço como em intensidade com os encontrados pelos autores acima.

Os principais fatores que influenciam a variabilidade oceânica são os movimentos de frentes oceânicas e os vórtices de mesoescala (Provost et al., 1989). A contribuição dos movimentos frontais para a variabilidade, segundo os mesmos autores, pode chegar ao dobro que a contribuição dos vórtices. Na região da CBM, a alta variabilidade está relacionada a ambos os fatores. Intensos movimentos frontais (Olson et al., 1988), devido as alterações no fluxo das correntes do Brasil e das Malvinas estão presentes além de ser uma zona propícia para a formação de vórtices (Lageckis & Gordon, 1982; Gordon, 1989; Forbes et al., 1993). Na região oceânica central ao norte da confluência os baixos valores de variabilidade refletem a relativa "monotonia" no sistema oceânico (Arnault et al., 1989; Carton et al., 1990). No caso específico da Corrente do

Brasil, embora vórtices normalmente estejam associados ao deslocamento do fluxo médio desta corrente não foi possível identificar alterações na variabilidade devido a estas estruturas. Isto provavelmente se deve ao fato destes fenômenos serem menores em comparação aos da CBM e por ocorrerem, preferencialmente, na região da quebra da plataforma continental (profundidade < 500 m) (Garfield, 1990). No entanto, estes fenômenos podem ser estudados utilizando trajetórias específicas do altímetro combinadas com imagens termais.

Outro aspecto interessante é a forma da região de maior variabilidade ser aproximadamente um “C” inclinado. O ramo sul, provavelmente está refletindo a penetração da corrente do Brasil em maiores latitudes. Este avanço, segundo Gordon (1989) analisando dados hidrográficos e imagens termais AVHRR/NOAA, é acompanhado por uma intensa formação de vórtices e meandros. De acordo com o mesmo autor, após atingir o seu ponto de máxima latitude, a CB inverte o seu fluxo formando um meandro quasi-estacionário centrado em 53°W, aproximadamente a longitude média da extensão meridional da zona de maior variabilidade (Figura 3). O fluxo da convergência é então desviado para leste, onde as duas correntes continuam interagindo fortemente determinando altos valores de variabilidade até aproximadamente 40°W. A grande diminuição observada na variabilidade a oeste de 40°W determina o limite da confluência e o início do fluxo mais definido da Corrente do Atlântico Sul. Os vórtices que aparecem nesta região formados no limite oriental da CBM, ou ainda oriundos da corrente da Agulhas (Byrne et al., 1995) são menos intensos, resultando em baixos valores de variabilidade.

A variabilidade também foi estimada em caráter sazonal. Para tal, foram utilizados todos os dados do TOPEX para as diferentes estações do ano nos dois anos utilizados neste estudo (Figura 4). Para todas as estações do ano, a região de menor variabilidade indicada acima apresentou-se aproximadamente constante tanto em valores como em posição. A região da CBM apresentou mudanças significativas para cada estação do ano mantendo, no entanto, sempre a sua forma aproximada de “C”. O centro da alta variabilidade também apresentou uma constância quanto à sua posição, o que também foi observado com a análise de 2 anos de dados do GEOSAT realizada por Provost & Le Traon (1993). No entanto, estes autores analisaram somente duas estações do ano, verão (15 outubro a 15 abril) e inverno (15 abril a 15 outubro), com as maiores variabilidades encontradas nos meses de verão, valores de até 0.32 m, contra no máximo 0.28 m no inverno.

Nos resultados da Figura 4, os maiores valores chegam a 0.30 m no verão e 0.32 m no outono enquanto

que os menores são da ordem de 0.28 e 0.24 m no inverno e primavera, respectivamente. Os maiores valores de variabilidade devem estar associados a uma maior interação entre as duas correntes, o que caracterizaria um maior número e intensidade de deslocamentos frontais e formação de vórtices. Esta maior interação era esperada para os meses de verão, onde o maior *momentum* da Corrente do Brasil acarretaria uma maior penetração nas altas latitudes, como foi confirmando na análise de Provost & Le Traon (1993). Do mesmo modo, a menor interação, e consequentemente a menor variabilidade, estaria associada ao retrocesso anual da Corrente do Brasil nos meses de inverno. Este fato foi constatado por Garzoli (1993) e Garzoli & Giulivi (1994), o quais analisando dados de *ecossondas invertidas* na região da confluência (Confluence Principal Investigators, 1991) determinaram a maior variabilidade no verão e menor no inverno. No presente estudo, no entanto, os maiores valores e o maior gradiente de variabilidade apresentaram-se nos meses de outono, enquanto que os menores valores de variabilidade apresentaram-se nos meses de primavera. Isto pode estar associado a anomalias interanuais da região, uma vez que somente dois anos de dados estão sendo analisados. Estas anomalias de variabilidade também foram observadas por Garzoli & Giulivi (1994) e, segundo estes autores, podem estar associadas a variações no campo regional de vento, o qual seria o principal controlador da variabilidade das correntes de contorno do Atlântico Sul ocidental.

4. Conclusões

- A altimetria TOPEX/POSEIDON apresenta-se como uma excelente ferramenta no estudo da variabilidade da topografia oceânica superficial do Atlântico Sul Ocidental.
- A região de maior variabilidade, identificada ao largo do Rio da Prata, indica a alta dinâmica da Confluência Brasil-Malvinas. Esta alta dinâmica esteve presente em todas as estações do ano, com os maiores valores de variabilidade encontrados nos meses de outono (0.32 m) e verão (0.30 m) enquanto os menores valores foram encontrados nos meses de inverno (0.28 m) e primavera (0.24 m).
- Ao norte de 30° S e ao sul de 40° S, os baixos valores de variabilidade estão refletindo a menor dinâmica do sistema se comparado com a CBM com valores de, no máximo, 0.12 m.

• Embora vórtices estejam associados à corrente do Brasil isto não se refletiu nos mapas de variabilidade. A causa disto, provavelmente, esteja relacionada com o tamanho destes (bem menores que os da CBM) e por

estarem predominantemente presentes ao longo da quebra de plataforma (profundidades < 500 m).

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a AVISO/CNES e a JPL/NASA por fornecerem os dados e literatura especializada sobre o TOPEX/POSEIDON. Gostaríamos de agradecer também ao Dr. P. O. Zavialov e ao MSc. I. D. Soares pelas discussões e sugestões apresentadas a este trabalho.

6. Referências

Arnault S., Y. Menard & M.S. Rouquet (1989). Variability of the Tropical Atlantic in 1986-1987 as observed by Geosat and in situ data. *Adv. Space Res.*, 9 (7), (7)383 - (7)386.

Benada R. (1993). Merged GDR (TOPEX/Poseidon) Users Handbook. JPL/PO.DAAC. NTIS, d-11007.

Byrne D.A., A.L. Gordon & W.F. Haxby (1995). Agulhas Eddies: A synoptic view using Geosat ERM data. *J. Phys. Oceanogr.*, 25 902-917.

Carton J.A. (1989). Estimates of Sea Level in Tropical Atlantic Ocean Using GEOSAT Altimetry. *J. Geophys. Res.*, 94 (C6), 8029-8039.

Cartwright D.E. & R.D. Ray (1990). Oceanic tides from Geosat altimetry. *J. Geophys. Res.*, 95 3069-3090.

Cheney R.E., J. Marsh & B.D. Beckley (1983). Global Mesoscale Variability from Collinear Tracks of SEASAT Altimeter Data. *J. Geophys. Res.*, 88 (C7), 4343 - 4354.

Confluence Principal Investigators (1990). CONFLUENCE 1988-1990: An intensive study of the southwestern Atlantic. *Eos Trans.*, 71 (41), 1131-1134.

Forbes C., K. Leaman, D. Olson & O. Brown (1993). Eddy and wave dynamics in the South Atlantic as diagnosed from Geosat altimeter data. *J. Geophys. Res.*, 98 (C7), 12297-12314.

Garfield N.I. (1990). *Brazil Current at subtropical latitudes*. Ph.D., University of Rhode Island. 122 pp.

Garzoli S.L. (1993). Geostrophic velocity and transport variability in the Brazil-Malvinas Confluence. *Deep Sea Res.*, 40 (7), 1379-1403.

Garzoli S.L. & C. Giulivi (1994). What forces the variability of the southwestern Atlantic boundary currents? *Deep Sea Res.*, 41 (10), 1527-1550.

Gordon A.L., K.I. Horai & M. Donn (1983). Western boundary current variability revealed by GEOS 3 altimeter. *J. Geophys. Res.*, 88 (C1), 755-762.

Gordon A.L. (1989). Brazil-Malvinas Confluence - 1984. *Deep Sea Res.*, 36 (3), 359-384.

Legeckis R. & A.L. Gordon (1982). Satellite observations of the Brazil and Falkland currents - 1975 to 1976 and 1978. *Deep Sea Res.*, 29 (3A), 375-401.

Olson D.L., G.P. Podesta, R.H. Evans & O. Brown (1988). Temporal variations in the separation of the Brazil and Malvinas currents. *Deep Sea Res.*, 35 1971-1990.

Nerem R.S., B.D. Tapley & C.K. Shum (1990). Determination of the Ocean Circulation using Geosat Altimetry. *J. Geophys. Res.*, 95 (C3), 3163-3179.

Nerem R.S., E.J. Schrama, C.J. Koblinsky & B.D. Beckley (1994). A preliminary evaluation of ocean topography from the TOPEX/POSEIDON mission. *J. Geophys. Res.*, 99 (C12), 24565-24583.

Provost C., V. Garçon & S. Garzoli (1989). Sea Level Variability in the Brazil and Malvinas Confluence Region. *Adv. Space Res.*, 9 (7), (7)387 - (7)392.

Provost C. & P.-Y.L. Traon (1993). Spatial and Temporal Scales in the Altimetric Variability in the Brazil-Malvinas Current Confluence Region: Dominance of the semiannual period and large spatial scales. *J. Geophys. Res.*, 98 (C10), 18037-18051.

Stammer D. & C. Wunsch (1994). Preliminary Assessment of the accuracy and precision of TOPEX/POSEIDON Altimeter data with respect to the large scale Ocean Circulation. *J. Geophys. Res.*, 99 (C12), 24584-24604.

Tapley B.D., D.P. Chambers, C.K. Schum, R.J. Eanes & J.C. Ries (1994). Accuracy assessment of the large-scale dynamic ocean topography from TOPEX/POSEIDON altimetry. *J. Geophys. Res.*, 99 (C12), 24605-24617.

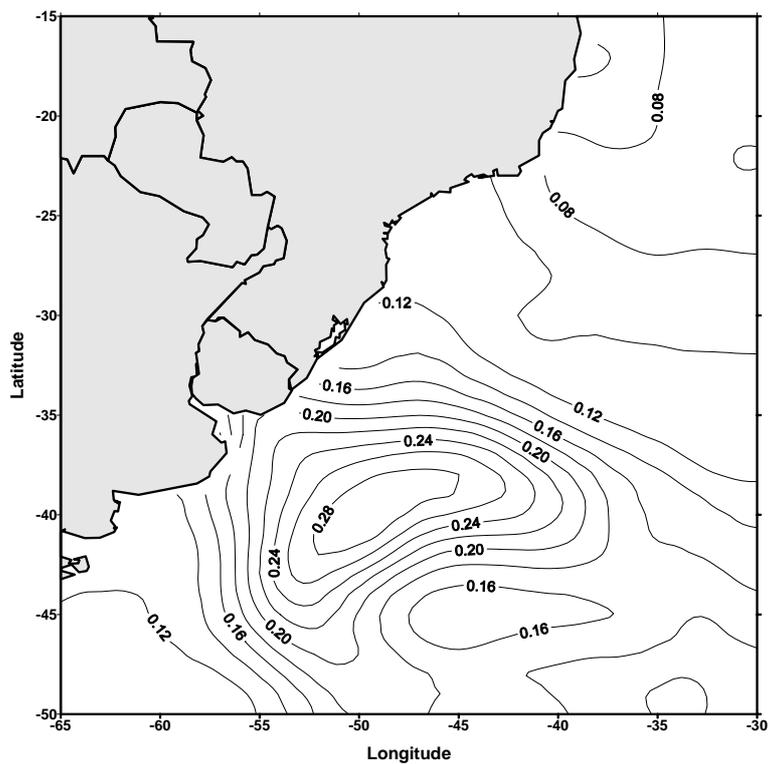


Figura 3: Variabilidade oceânica de 1993/1994 a partir do TOPEX/POSEIDON (valores em metros).

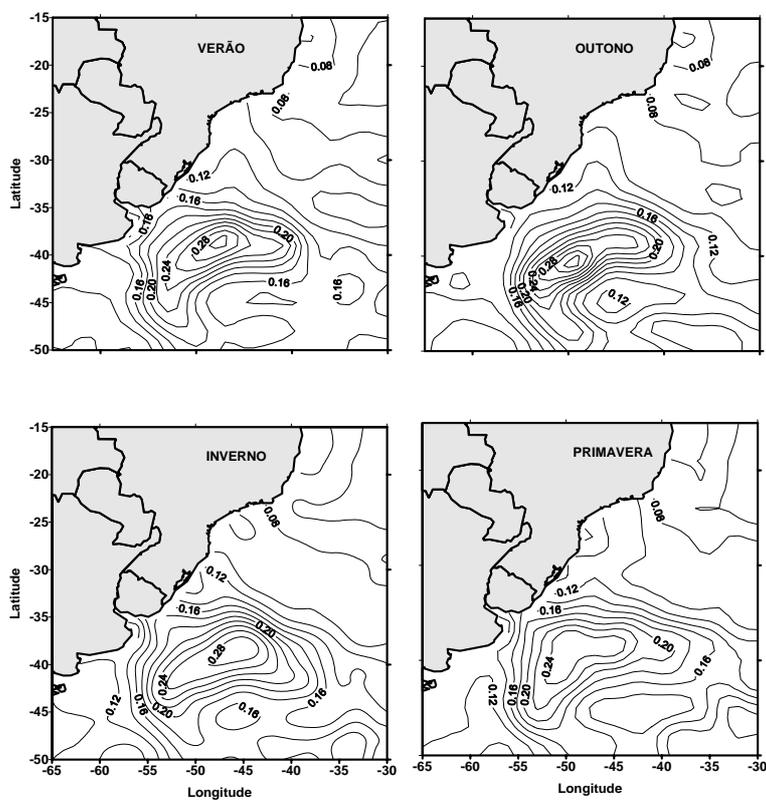


Figura 4: Variabilidade oceânica sazonal de 1993/1994 a partir do TOPEX/POSEIDON (valores em metros).