

ANÁLISE PRELIMINAR DOS EFEITOS DO TSUNAMI DE SUMATRA-ANDAMAN NOS REGISTROS DAS ESTAÇÕES DA RMPG

Luz, R. T.^{1,2}, Freitas, S. R. C.¹

1 – UFPR/CPGCG, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, www.cienciasgeodesicas.ufpr.br,
robtluz@ufpr.br, sfreitas@ufpr.br

2 – IBGE/CGED, Coordenação de Geodésia, www.ibge.gov.br, robertoluz@ibge.gov.br

RESUMO – O grande terremoto de Sumatra-Andaman, 26/12/2004 01h GMT, de magnitude 9.3, deu origem a uma onda oceânica de origem sísmica (*tsunami*) que devastou as regiões costeiras de mais de dez países no Oceano Índico e propagou-se por todo o planeta. No Brasil, várias estações maregráficas, incluindo aquelas operadas pelo IBGE na RMPG (Rede Maregráfica Permanente para Geodésia), registraram sua influência. As estações da RMPG são particularmente úteis para este tipo de análise, já que seus registros digitais têm intervalo de 5 minutos, enquanto o período estimado das oscilações anômalas atribuídas ao tsunami é de cerca de 40 minutos. Este trabalho apresenta os procedimentos utilizados para o tratamento preliminar dos dados coletados no final de dezembro de 2004 pela estação da RMPG em Macaé (RJ), que resultaram na estimativa do momento da chegada das primeiras oscilações em aproximadamente 0h GMT de 27/12/2004 e, conseqüentemente, em um tempo de propagação de cerca de 23 horas, desde Sumatra. Estas primeiras oscilações tiveram amplitude relativamente pequena, 15 cm, mas rapidamente amplificaram-se até o valor máximo de 75 cm, aproximadamente às 09h GMT de 27/12/2004, e daí progressivamente atenuando-se até, aproximadamente, 21h GMT de 31/12/2004. Ou seja, os efeitos do *tsunami* foram observados em Macaé durante pouco menos de 5 dias. Nesse período, afortunadamente, não ocorreram inundações inesperadas, pois os níveis máximos das oscilações anômalas não coincidiram com as maiores preamares. Não foram detectadas, nesta análise preliminar, alterações do nível médio do mar associadas ao *tsunami*.

ABSTRACT – The great Sumatra-Andaman earthquake, 26/12/2004 01:00 GMT, magnitude 9.3, created a seismic water wave (*tsunami*) that devastated coastal areas at more than ten countries in Indian Ocean, spreading to the whole planet. In Brazil, several sea level stations recorded its effects, including those operated by IBGE in RMPG (Geodetic Permanent Tide Gauge Network). Its stations are particularly useful for this kind of analysis, since their digital readings have sample interval of 5 minutes, while the estimated period of the anomalous oscillations attributed to the tsunami is about 40 minutes. This paper presents the procedures used for the preliminary treatment of the data collected, in the end of December 2004, by the RMPG station at Macaé (RJ), that allowed the estimation of the arrival time of the first oscillations to approximately 0h GMT 27/12/2004 and, therefore, resulting in a travel time of about 23 hours, from Sumatra. These first oscillations had relatively small amplitudes, 15 cm, but were quickly amplified up to a maximum value of 75 cm, about 09h GMT 27/12/2004, and then progressively attenuating until, approximately, 21h GMT 31/12/2004. So, the effects of the tsunami were observed at Macaé during almost 5 days. In this period, fortunately, no unexpected floods happened, since the maximum levels of the anomalous oscillations didn't coincided with the largest high tides. These preliminary analysis did not detected any changes of mean sea level, associated to the tsunami.

PALAVRAS CHAVE: nível do mar, *tsunami*, RMPG, marégrafo, Sistema Geodésico Brasileiro

KEYWORDS: sea level, tsunami, RMPG, tide gauge, Brazilian Geodetic System

1 INTRODUÇÃO

O grande terremoto de Sumatra-Andaman, no dia 26/12/2004, foi provocado por rupturas na zona de subsidência Indonésia, a 20 km de profundidade, iniciadas pouco antes de 01h GMT, e que estenderam-se por cerca de 1200 km durante aproximadamente 7 minutos, alcançando a magnitude 9.3 (Park et al., 2005 ; Khan & Gudmundsson, 2005). Seu epicentro foi localizado preliminarmente a 100 km da costa oeste da região noroeste de Sumatra (Figura 1).



Figura 1 – Localização aproximada do epicentro do terremoto de Sumatra-Andaman (USGS, 2005)

A decorrente onda oceânica (*tsunami*), atribuída ao forte abalo do assoalho oceânico – estimado em 10 m (Lomnitz & Nilsen-Hofseth, 2005) –, espalhou-se inicialmente pela Baía de Bengala (Figura 2) e depois por todo o Oceano Índico, transformando-se em um dos mais graves desastres naturais de que se tem notícia – a onda foi registrada por marégrafos em todo o globo. O terremoto e o conseqüente *tsunami* transformaram-se também em objetos de grande interesse científico, constituindo-se em dois dos primeiros fenômenos naturais globais capazes de testar as estruturas de monitoramento geofísico estabelecidas nas últimas décadas, baseadas em plataformas tanto terrestres quanto espaciais (Gower, 2005 ; op. cit.).

Algumas das estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG), descrita por Luz & Guimarães (2003), também registraram as oscilações anômalas do nível do mar provocadas pelo *tsunami*. Apesar da grande distância, tais registros mostram claramente a brusca alteração do padrão espectral. Este trabalho apresenta os resultados do tratamento preliminar dos dados coletados pelas estações da RMPG em Macaé (RJ) e Imbituba (SC), naquele período.

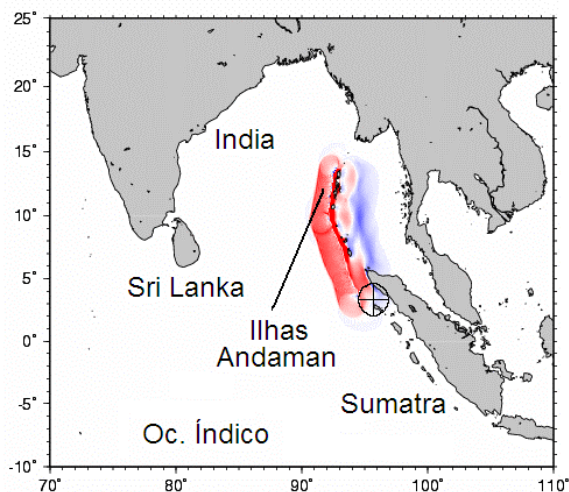


Figura 2 – Modelo da propagação inicial do tsunami na região nordeste do Oceano Índico, a partir da fratura ao longo da zona de subsidência Indonésia (IOC, 2005)

2 A RMPG

A RMPG (Rede Maregráfica Permanente para Geodésia) é constituída por estações maregráficas equipadas com, pelo menos, dois tipos diferentes de sensores de nível do mar, preferencialmente baseados em diferentes princípios físicos e com diferentes sistemas de alimentação e registro (Luz & Guimarães, 2003). Assim, nas estações de Macaé (RJ) e Imbituba (SC), por exemplo, o sistema primário tem sensor digital baseado na medição da diferença de pressão hidrostática, cujas leituras (intervalo de 5 minutos) são armazenadas em memória não volátil e transmitidas automaticamente via linha telefônica para um computador remoto. Os sensores secundários dessas estações são constituídos por marégrafos/linígrafos convencionais, i.e., dotados de bóia e contra-peso, cuja movimentação vertical, solidária ao nível d'água, é transmitida mecanicamente a um registrador gráfico contínuo de autonomia semanal. Tal arranjo instrumental, complementado pela utilização de poços independentes para os sensores de nível do mar, minimiza a perda de dados em conseqüência de eventuais avarias ou anomalias.

A Figura 3 apresenta dados típicos da estação da RMPG em Macaé, referentes à semana imediatamente anterior à chegada das ondulações atribuídas ao *tsunami*. Juntamente com as leituras brutas (intervalo de 5 minutos), observa-se nessa figura as médias horárias – obtidas através da aplicação do filtro passa-baixas (107 pontos, correspondendo a uma janela de 08h50) sugerido por Pugh (1987) – e os respectivos resíduos. Cabe ressaltar que nunca são aplicadas, aos registros da RMPG, as alterações de horário de verão.

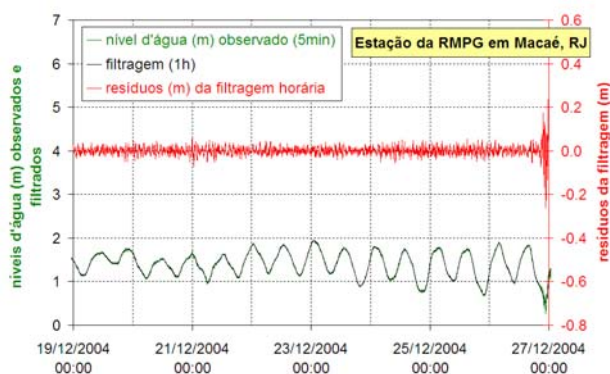


Figura 3 – Dados da estação da RMPG em Macaé, na semana imediatamente anterior à chegada das ondulações atribuídas ao *tsunami*, observáveis no extremo direito do gráfico (final do dia 26, hora local)

Além dos sensores principais (nível d'água), a estação da RMPG em Imbituba também é equipada com sensores meteorológicos auxiliares, como forma de possibilitar a identificação e eventual correção de efeitos sistemáticos, como o notório efeito "barômetro invertido" e o "empilhamento" da água pelo vento (Pugh, 1987). Vislumbra-se também a instalação permanente de receptores GPS em todas as estações da RMPG, como forma mais eficiente de detectar e acompanhar eventuais alterações locais e regionais de suas posições (IOC, 1994).

3 O TSUNAMI NOS REGISTROS DA RMPG

Na Figura 4 são mostrados os dados das estações da RMPG em Imbituba e Macaé, bem como da estação neo-zelandesa em Jackson Bay (NOAA, 2005) – incluída a título de comparação –, para o período de 3 dias aproximadamente centrado no momento da chegada das ondulações anômalas. Infelizmente, observa-se que, para este período, os dados de Imbituba não são aproveitáveis, apresentando anomalias de causa ainda não determinada.

Quanto aos dados de Macaé e Jackson Bay, os resíduos da filtragem horária mostram, inequivocamente, a presença de ondulações compatíveis com a hipótese de terem origem no tsunami de Sumatra-Andaman – ondulações iniciais de menor amplitude, seguidas de rápida amplificação e, depois, gradual decaimento (Chapman, 2005). Isso pode ser melhor apreciado na Figura 5, que, além dos próprios resíduos, mostra os desvios-padrão dos mesmos, agrupados em janelas de 6 horas.

Para Macaé, o desvio padrão máximo foi da ordem de 15 cm, referente a aproximadamente 08h (fuso -03h)

do dia 27, contra um valor basal de 1,7 cm. Quanto a Jackson Bay, os valores são ligeiramente diferentes, mas tais diferenças podem ter origem em eventuais incompatibilidades entre os dados obtidos através da *internet* e os procedimentos adotados para os dados da RMPG. Assim, não foram determinados quaisquer valores característicos para essa estação.

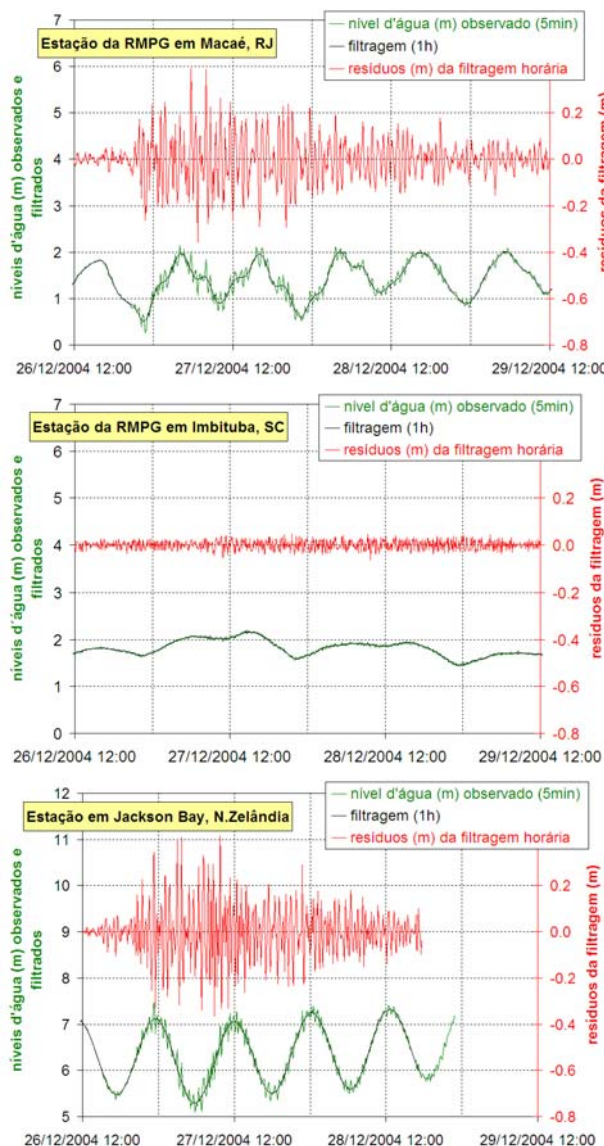


Figura 4 – Dados das estações da RMPG em Macaé (sup.) e Imbituba (centr.) e da estação neozelandesa Jackson Bay (inf.)

A escala horizontal dos gráficos mencionados anteriormente não permite a estimação visual razoável dos tempos de chegada, de pico etc. Assim, o gráfico referente a Macaé, na Figura 4, teve sua escala horizontal ampliada, dando origem à Figura 6.

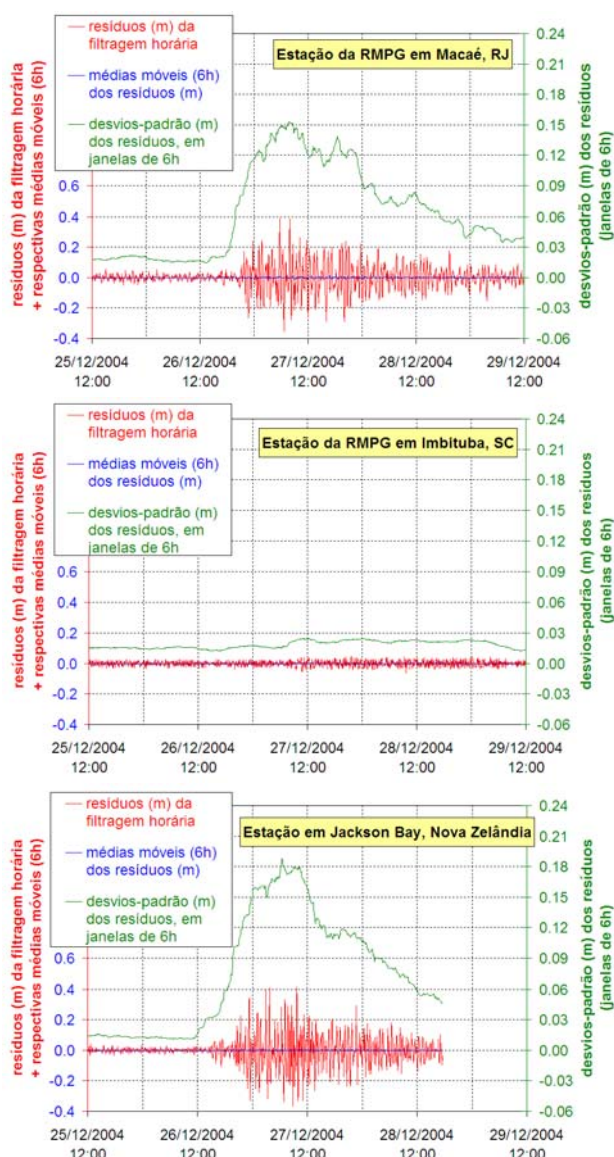


Figura 5 – Resíduos da filtragem horária das observações das estações Macaé (sup.), Imbituba (centr.) e Jackson Bay (inf.), e respectivos desvios-padrão, referentes a janelas móveis de 6h

O primeiro gráfico (sup.) da Figura 6 refere-se ao período das 21h do dia 25 às 12h do dia 26, quando não houve qualquer influência do tsunami. Identifica-se claramente a existência de algumas oscilações bastante coerentes nos dados filtrados, o que pode indicar a inadequação do filtro utilizado.

O segundo gráfico (centr.) mostra informações das 12h do dia 26 às 03h do dia 27, período em que se iniciaram as ondulações anômalas. Com a escala de tempos ampliada, é possível observar o rebaixamento inicial do nível do mar, i.e., o primeiro cavado do *tsunami* (20h50, -7 cm), antes da chegada de sua primeira crista

(21h10, 8 cm) – as alturas referem-se aos resíduos da filtragem, e os horários são locais, no dia 26/12.

E, finalmente, no terceiro gráfico, representa-se o período de maiores oscilações anômalas, também mostradas na Tabela 1.

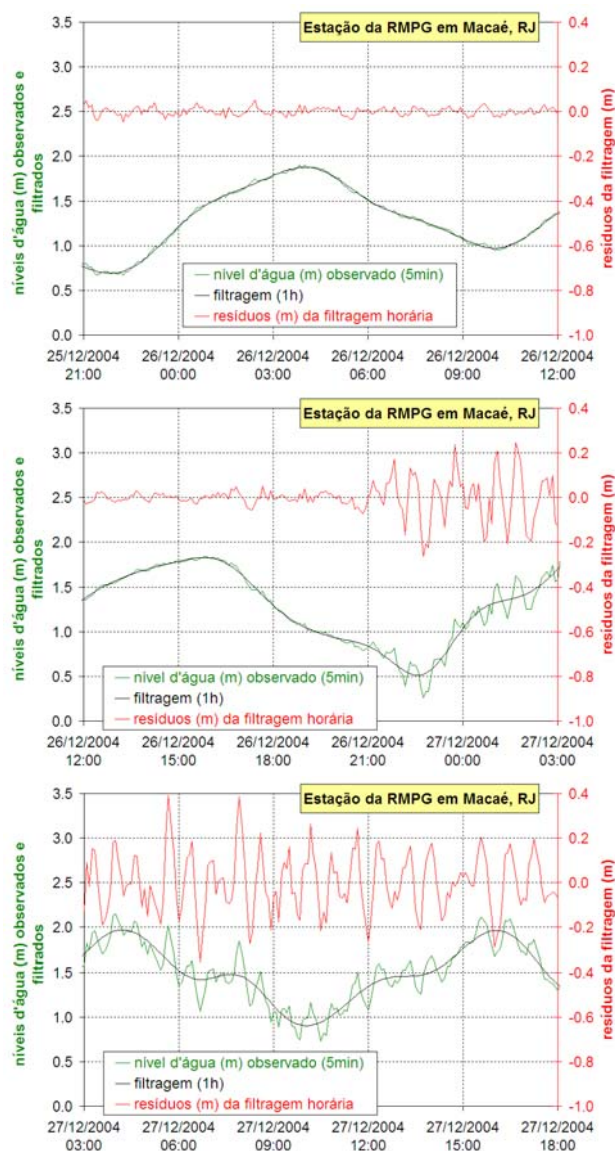


Figura 6 – Detalhes das ondulações anômalas nas observações da estação da RMPG em Macaé

Exceto pelo primeiro valor mostrado na Tabela 1, tais oscilações extremas não ocorreram conjuntamente à preamar ou à baixamar – nesses casos, poder-se-iam esperar eventos de alagamento em terrenos e estruturas mais baixas (oscilações positivas associadas à preamar) ou eventos de exposição de estruturas e terrenos submersos, e encalhamento de embarcações (negativas + baixamar).

hora local	nível observado (m)	Resíduo da filtragem (m)
26/12/2004 22:45	0.26	-0.26
26/12/2004 23:45	1.15	+0.24
27/12/2004 01:40	1.62	+0.25
27/12/2004 05:40	2.02	+0.39
27/12/2004 06:40	1.06	-0.36
27/12/2004 07:55	1.85	+0.39
27/12/2004 08:15	1.12	-0.28
27/12/2004 10:10	1.17	+0.26
27/12/2004 11:40	1.50	+0.25
27/12/2004 12:00	1.08	-0.27
27/12/2004 16:00	1.67	-0.29
27/12/2004 20:05	0.93	-0.29

Tabela 1 – Valores extremos das oscilações anômalas do nível do mar na estação da RMPG em Macaé

Do terceiro gráfico foram visualmente extraídas ordenadas e abscissas para construção das séries simplificadas de níveis d'água observados e filtrados, correspondentes às oscilações anômalas, mostradas na Figura 7. Tal figura também apresenta os períodos das sucessivas cristas e cavados dessas oscilações, igualmente extraídos da Figura 6-inf ; observa-se que os períodos referentes às primeiras oscilações são bastante consistentes, em torno do valor de 40 minutos. À medida que continuam a chegar novas oscilações, seus períodos tornam-se menos consistentes, o que talvez indique a ocorrência de fenômenos como reflexão, refração e difração dessas oscilações.

E, finalmente, quanto à atenuação das oscilações anômalas, a Figura 8 apresenta os resíduos da filtragem e os respectivos desvios-padrão (6h) para todo o período. Observa-se que os efeitos do *tsunami* tornam-se imperceptíveis a partir das 18h (local) do dia 31/12/2004. Nota-se claramente, ainda, a existência de oscilações na série de desvios-padrão ; tais periodicidades podem indicar a inadequação do filtro utilizado, reforçando a necessidade de aprimoramento das presentes análises, incorporando, por exemplo, a caracterização espectral dos dados utilizados.

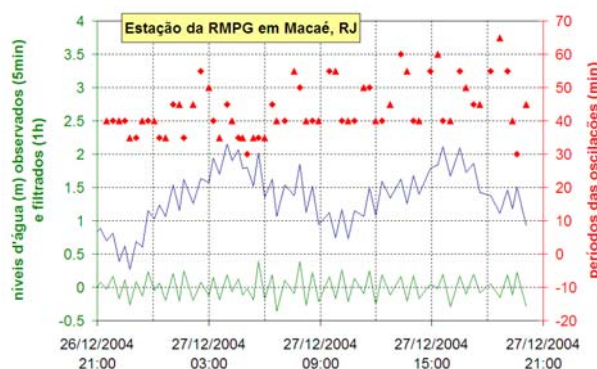


Figura 7 – Seleção manual dos dados observados e filtrados (alturas e períodos) da estação da RMPG em Macaé, referentes ao período de maiores amplitudes das oscilações anômalas

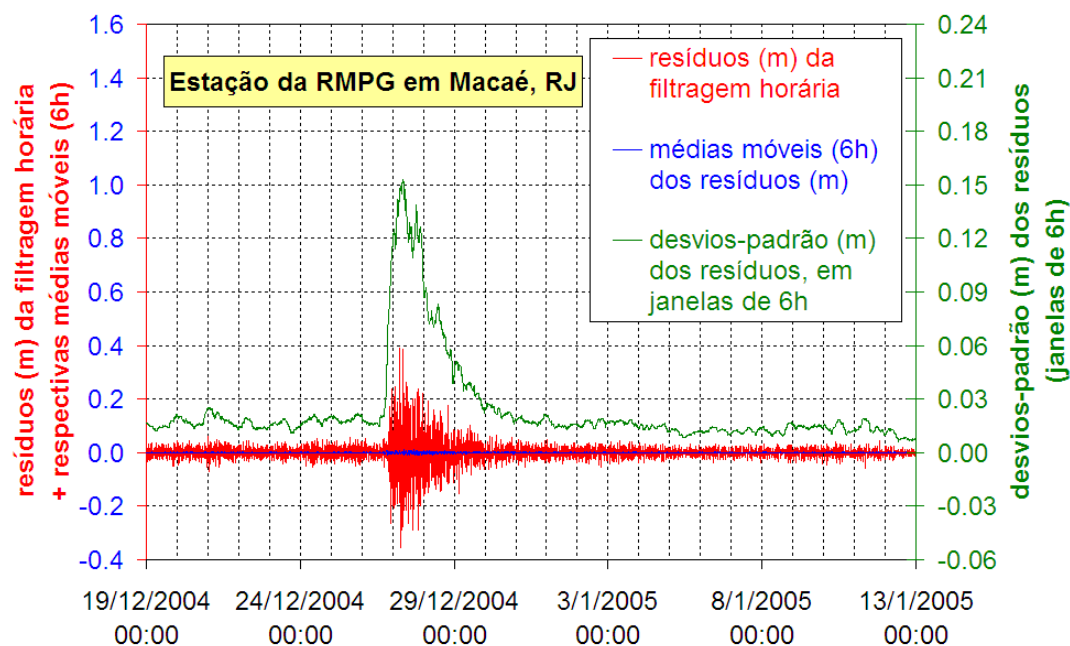


Figura 8 – Visão geral dos resíduos da filtragem horária das observações da estação da RMPG em Macaé, para todo o período de comportamento “normal” do nível do mar, antes e depois das oscilações anômalas

4 CONCLUSÕES

Análises mais rigorosas dos dados coletados pelas estações da RMPG, no período da chegada das oscilações anômalas geradas pelo *tsunami* de Sumatra-Andaman, ainda estão por acontecer. A determinação das características espectrais dessas oscilações certamente indicará com maior segurança os parâmetros aqui apenas esboçados. A conjugação das observações apresentadas com modelos hidrodinâmicos globais e regionais também enriquecerá de modo significativo as análises futuras.

Mesmo tratando-se de análises simplificadas, foi possível estimar os tempos de chegada e as alturas das oscilações anômalas. Considerando-se a chegada das oscilações anômalas a Macaé aproximadamente à 0h GMT, 27/12/2004, o tempo estimado de propagação da onda precursora, desde Sumatra, foi de cerca de 23 horas. Estas primeiras oscilações tiveram amplitude relativamente pequena, 15 cm, mas rapidamente amplificaram-se até o valor máximo de 75 cm, aproximadamente às 09h GMT de 27/12/2004. Os efeitos do *tsunami* fizeram-se sentir em Macaé até, aproximadamente, 21h GMT de 31/12/2004, i.e., duraram pouco menos de 5 dias.

REFERÊNCIAS

- Chapman, C. *The Asian Tsunami in Sri Lanka : A Personal Experience*. **Eos Trans. AGU**, 86(2):13-14, January 11, 2005.
- Gower, J. *Jason 1 Detects the 26 December 2004 Tsunami*. **Eos Trans. AGU**, 86(4):37-38, January 25, 2005.
- IOC. **Manual on Sea Level Measurement and Interpretation**, vol. II. UNESCO/Intergovernmental Oceanographic Commission, Paris, 1994. 50 p.
- IOC, 2005. *International Coordination Group for the Tsunami Warning System in the Pacific*. <http://ioc.unesco.org/itsu/> (consultado em 14/03/2005).
- Khan, S. A. ; Gudmundsson, Ó. *GPS Analyses of the Sumatra-Andaman Earthquake*. **Eos Trans. AGU**, 86(9):89,94, March 1, 2005.
- Lomnitz, C. ; Nilsen-Hofseth, S. *The Indian Ocean Disaster : Tsunami Physics and Early Warning Dilemmas*. **Eos Trans. AGU**, 86(7):65,70, February 15, 2005.
- Luz, R. T. **A Influência das Ondas de Alta e Média Frequência na Observação do Nível do Mar para Aplicações Geodésicas**. Dissertação de Mestrado, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996. xvii+168p.
- Luz, R. T. ; Guimarães, V. M. ; 2001. *Realidade e Perspectivas da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro*. In: **Anais (CD-ROM) do II Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, Curitiba.
- Luz, R. T. ; Guimarães, V. M. ; 2003. *Dez Anos de Monitoramento do Nível do Mar no IBGE*. In: **Anais (CD-ROM) do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, Curitiba.
- NOAA, 2005. *West Coast/Alaska Tsunami Warning Center – Indian Ocean Tsunami of 26 December, 2004*. <http://wcatwc.arh.noaa.gov/IndianOSite/IndianO12-26-04> (consultado em 14/03/2005).
- Park, J. ; Anderson, K. ; Aster, R. ; Butler, R. ; Lay, T. ; Simpson, D. *Global Seismographic Network Records the Great Sumatra-Andaman Earthquake*. **Eos Trans. AGU**, 86(6):57,60-61, February 8, 2005.
- Pugh, D.T. **Tides, Surges and Mean Sea-Level**. John Wiley & Sons, Chichester, 1987. xiv+472p.
- USGS, 2005. *Earthquake Hazards Program - Sumatra-Andaman Is. Earthquake*. <http://earthquake.usgs.gov/eqinthenews/2004/usslav/> (consultado em 14/03/2005).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Processos 550830/2002-2 e 140084/2004-5) pelo suporte financeiro a este projeto ; e ao IBGE, pela cessão dos dados da RMPG e pela licença de doutoramento concedida a RTL.