



# Comparação entre atenuação observada e calculada na zona de subdução de Costa Rica-Nicarágua

Felipe da Cruz Pimentel Moreira Santos\*, Universidade Federal Fluminense

Wagner Moreira Lupinacci, Universidade Federal Fluminense

Claire Currie, University of Alberta

Copyright 2016, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Ouro Preto, 25 a 27 de outubro de 2016. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

## Abstract

**Seismic attenuation in the upper mantle is mostly associated to the anelastic effects. Those effects are more accentuated in S-waves, caused by the combination of temperature, water content and grain size. In this paper, we calculated the attenuation in the Costa Rica-Nicaragua region. For this we used a 3D thermal model, and fitted the water content and grain size. The results were compared with data obtained from the seismic inversion, for in same area. Even with model limitations for the melting effects, the region close to the trench shows reasonable agreement with observed data. Water content fitted also showed a similar trend with the observed in the region.**

## Introdução

A região da Costa Rica e Nicarágua está localizada na porção centro-oeste da América Central e sofre a influência de um limite convergente de placas tectônicas (Fig. 1), o que gera a expressão geomorfológica da Fossa Mesoamericana e um cinturão vulcânico ao longo do encontro das placas (Siebert et al., 2010; Peacock et al., 2005). Esta zona de subdução é formada pela colisão entre a placa oceânica de Cocos subductando sob a placa continental do Caribe. Segundo DeMets (2001) a convergência acontece a uma taxa de 73 mm/ano ao Sudoeste da Guatemala e 85 mm/ano próximo a Costa Rica, sendo um contato oblíquo entre as placas.

De modo geral a utilização de ondas sísmicas geradas por terremotos serve como base para extrair propriedades do interior da Terra (como exemplo ver, Gaité et al. (2015)). Por não se tratar de um meio perfeitamente elástico, perdas de energia estão associadas com a propagação das ondas sísmicas (Fowler, 2004). Contudo, no manto superior essa perda está mais relacionada com as propriedades anelásticas tais como variação de temperatura, geração de lava ou a presença de fluidos (Artemieva et al., 2004; Romanowicz and Mitchell, 2007; Dalton et al., 2008; Priestley and McKenzie, 2013).

Karato (1995) demonstrou que a água que percola até o manto, seja por fraturas ou associadas aos sedimentos, tem o efeito de relaxamento anelástico,

pois ao ser dissolvida substitui algumas ligações por hidroxila ( $OH^-$ ), que são muito mais fracas se comparadas as ligações de minerais. Efeito similar acontece com o aumento da temperatura, que provoca uma redução da viscosidade ao se aproximar do ponto de derretimento (Priestley and McKenzie, 2013). Experimentos conduzidos em minerais de olivina apontam que o tamanho do grão também afeta a atenuação, no qual um menor tamanho de grão está associados a altos valores de atenuação (Jackson et al., 2002; Faul and Jackson, 2005).

O objetivo deste trabalho é estimar os efeitos de atenuação em ondas-S ao se propagarem no manto superior na zona de subdução de Costa Rica-Nicarágua. Para isto, calculamos o fator  $Q$  com base em um modelo de temperaturas e adaptamos os parâmetros de conteúdo de água e tamanho do grão, de modo que seja possível correlacionar com os valores observados através de tomografia sísmica obtidos na região por Rychert et al. (2008).

## Metodologia

Os efeitos anelásticos foram calculados com base na Equação 1, que foi elaborada por Behn et al. (2009) baseada nos experimentos em laboratório de Faul and Jackson (2005) considerando um manto livre de derretimento:

$$Q^{-1} = \left( B d^{-p_Q} \omega^{-1} \exp\left(-\frac{E_Q + P V_Q}{RT}\right) \right)^\alpha, \quad (1)$$

O qual  $T$  é a temperatura absoluta,  $d$  o tamanho do grão de Olivina e  $C_{OH}$  é conteúdo de água,  $B$  é o fator pré-exponencial para o conteúdo de água,  $p_Q$  fator pré-exponencial para o grão,  $\omega$  é a frequência,  $E_Q$  energia de ativação,  $V_Q$  volume de ativação,  $P$  pressão de confinamento,  $R$  constante universal dos gases e  $\alpha$  fator adimensional de dependência da frequência. As constantes aqui usadas condizem com as mesmas utilizados por Faul and Jackson (2005) e Behn et al. (2009).

Nós extraímos três perfis do modelo termal 3D publicado por Rosas et al. (2015), sendo dois perfis verticais e um perfil horizontal (Fig. 1). Este modelo possui uma geometria de placas fixa e o manto com reologia de fluência de deslocamento. Os perfis verticais AA' (Fig. 2a) e BB' (Fig. 2b) ficam a 250 Km e 459 Km, respectivamente da extremidade sul do modelo. Já o perfil horizontal foi extraído a 70 km de profundidade e representa toda a extensão do modelo (Fig. 2c). Pelo

fato do modelo termal ser definido como um volume e os dados de atenuação como valores pontuais foi necessário efetuar uma reamostragem afim de, poder compara-los em um mesmo grid.

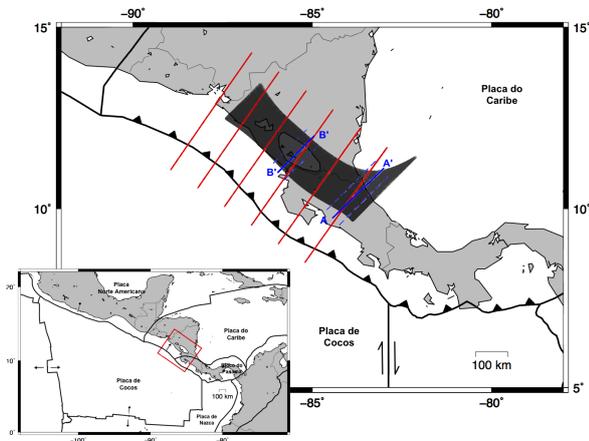


Figura 1: Mapa da área de estudo, em preto e azul representam o perfil horizontal a 70 km de profundidade respectivamente retirados de Rosas et al. (2015) e em vermelho dados de atenuação por Rychert et al. (2008)

Segundo Wada et al. (2011a), pelo modelo de evolução dinâmico do grão de Olivina, seu tamanho pode variar de  $10\mu\text{m}$  a 1cm em pouco menos de 12 km ao se afastar da trincheira. Porém, esse valor tende a se estabilizar de acordo com as variações das condições termais e de deformação (Wada et al., 2011b). Desta forma, os valores do tamanho de grãos utilizados foram fixados em 1, 2 e 3 cm, no qual o valor máximo corresponde ao limite a que a Olivina pode atingir em condições observadas em laboratório.

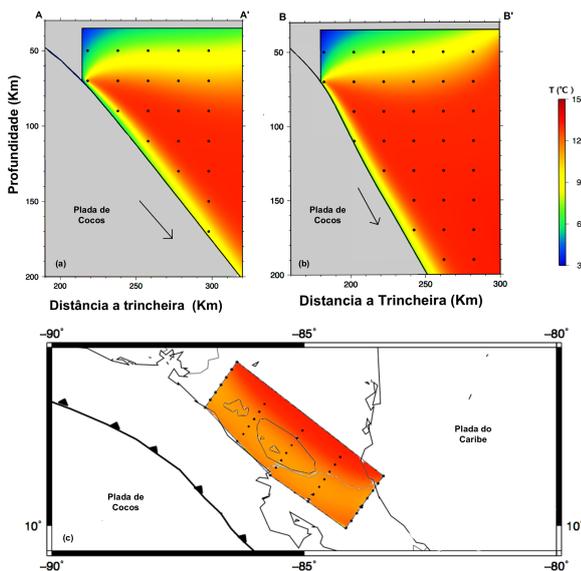


Figura 2: Perfil de temperatura: (a) vertical AA'; (b) vertical BB' e (c) horizontal a 70 km. Onde os pontos representam as posições da reamostragem

Quanto ao conteúdo de água foi usado como um parâmetro dinâmico, de modo a melhor se adaptar aos

valores observados em conjunto com as variações de tamanho de grão e o modelo de temperaturas. Sendo os valores característicos estabelecidos para manto seco  $50 H/10^6 Si$ , úmido  $1000 H/10^6 Si$  e molhado  $3000 H/10^6 Si$ , o mesmo estabelecido nos estudos de Karato (1995, 2013)

**Resultados**

A atenuação foi calculada para cada perfil de temperatura de modo que, para um tamanho de grão constante fosse selecionado um conteúdo de água adaptativo por amostra. Os resultados foram comparados com os observados por Rychert et al. (2008), sendo a diferença média e o desvio padrão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Diferença média  $|\Delta Q|$  entre o fator  $Q^{-1}$  calculado e observado em referência ao tamanho do grão ( $d$ ) utilizado

Perfil	tamanho do grão		
	1 cm	2 cm	3 cm
AA'	$5.15 \pm 3.99$	$4.22 \pm 3.36$	$3.77 \pm 3.10$
BB'	$5.56 \pm 4.40$	$4.63 \pm 3.43$	$4.29 \pm 2.92$
Horizontal.	$3.68 \pm 2.93$	$3.38 \pm 3.14$	$3.42 \pm 3.38$

Nas seções verticais, comparando a atenuação observada na região (Figs. 3a e 4a), a melhor aproximação para os perfis AA' e BB' foi obtida com valores de  $d = 3 \text{ cm}$ . A atenuação calculada está representada nas Figuras 3b e 4b, respectivamente. As Figuras 3c e 4c mostram as diferenças ( $\Delta Q$ ) entre o fator  $Q^{-1}$  observado e calculado, sendo que em ambos os casos as regiões próximas a trincheira apresentaram melhores resultados. Com relação ao conteúdo de água, o perfil AA' (Fig. 3d) mostra o manto úmido na porção mais rasa (<60 km), e seco em maiores profundidades. Já no conteúdo de água do perfil BB' (Fig. 4d), a zona mais úmida se concentrou até aproximadamente 90 km de profundidade.

Comparando o perfil horizontal observado (Fig. 5a), o fator  $Q^{-1}$  calculado entre os três tamanhos de grãos não houve diferenças expressivas (Tab. 1). Sendo a melhor aproximação obtida (Fig. 5b) para  $d = 1$ , cujo o desvio padrão foi o menor observado. Semelhante aos perfis verticais, uma menor  $\Delta Q$  se concentrou próximo a trincheira (Fig. 5c). Quanto ao conteúdo de água encontrado é seco ao sul e mais úmido em direção ao norte (Fig. 5d).

**Conclusão**

Os valores do fator  $Q^{-1}$  observados e calculados foram relativamente próximos nas profundidades menores que 100 km e próximos a trincheira. Considerando apenas os efeitos anelásticos dos parâmetros de temperatura, conteúdo de água e tamanho do grão foram efetivos na quantificação do fator  $Q^{-1}$ , em zonas de subdução nas regiões rasas e próximas a trincheira. Além disso, os valores adaptados de conteúdo de água são compatíveis com o que é observado na região, possuindo um manto mais hidratado a norte do que ao sul. Contudo, é

valido ressaltar a limitação dos métodos de predição da atenuação no qual nem todas as regiões do manto são passíveis de aproximação. Isto se deve ao fato que próximo a região do arco vulcânico a combinação de derretimento do manto e altas temperatura podem causar uma maior atenuação.

### Agradecimentos

Agradeço ao CNPq e a University of Alberta pela oportunidade de intercâmbio acadêmico, através do programa Ciências Sem Fronteiras. Também agradecer a Juan Carlos Rosas por fornecer os dados do modelo termal, assim como Catherine Ann Rychert por ceder os dados de atenuação.

### Referências

- Artemieva, I. M., Billien, M., Lévêque, J.-J. and Mooney, W. D. (2004), 'Shear wave velocity, seismic attenuation, and thermal structure of the continental upper mantle', *Geophysical Journal International* 157(2), 607 – 628.
- Behn, M. D., Hirth, G. and Elsenbeck, J. R. (2009), 'Implications of grain size evolution on the seismic structure of the oceanic upper mantle', *Earth and Planetary Science Letters* 282(1–4), 178 – 189.
- Dalton, C. A., Ekström, G. and Dziewoński, A. M. (2008), 'The global attenuation structure of the upper mantle', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 113(B9).
- DeMets, C. (2001), 'A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implications for slip along the central american volcanic arc', *Geophysical Research Letters* 28(21), 4043–4046.  
**URL:** <http://dx.doi.org/10.1029/2001GL013518>
- Faul, U. H. and Jackson, I. (2005), 'The seismological signature of temperature and grain size variations in the upper mantle', *Earth and Planetary Science Letters* 234(1–2), 119 – 134.
- Fowler, C. M. R. (2004), *The Solid Earth*, 2 edn, Cambridge University Press.
- Gaite, B., Villaseñor, A., Iglesias, A., Herraiz, M. and Jiménez-Munt, I. (2015), 'A 3-d shear velocity model of the southern north american and caribbean plates from ambient noise and earthquake tomography', *Solid Earth* 6(1), 271–284.  
**URL:** <http://www.solid-earth.net/6/271/2015/>
- Jackson, I., Fitz Gerald, J. D., Faul, U. H. and Tan, B. H. (2002), 'Grain-size-sensitive seismic wave attenuation in polycrystalline olivine', *Journal of Geophysical Research. Solid Earth* 107(B12), ECV 5–1.
- Karato, S. (1995), 'Effects of water on seismic wave velocities in the upper mantle', *Proceedings of the Japan Academy, Series B* 71(2), 61–66.
- Karato, S. (2013), Mapping water content in the upper mantle, in 'Inside the Subduction Factory', American Geophysical Union, pp. 135–152.  
**URL:** <http://dx.doi.org/10.1029/138GM08>
- Peacock, S. M., van Keken, P. E., Holloway, S. D., Hacker, B. R., Abers, G. A. and Fergason, R. L. (2005), 'Thermal structure of the Costa Rica-Nicaragua subduction zone', *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 149(1 - 2), 187 – 200. Thermal Structure and Dynamics of Subduction Zones: Insights from Observations and Modeling Van Keken S.I.
- Priestley, K. and McKenzie, D. (2013), 'The relationship between shear wave velocity, temperature, attenuation and viscosity in the shallow part of the mantle.', *Earth and Planetary Science Letters* p. 78.
- Romanowicz, B. and Mitchell, B. (2007), 1.21 - deep earth structure – q of the earth from crust to core, in G. Schubert, ed., 'Treatise on Geophysics', Elsevier, Amsterdam, pp. 731 – 774.
- Rosas, J., Currie, C. and He, J. (2015), 'Three-dimensional thermal model of the Costa Rica-Nicaragua subduction zone', *Pure and Applied Geophysics* pp. 1–23.
- Rychert, C. A., Fischer, K. M., Abers, G. A., Plank, T., Syracuse, E., Protti, J. M., Gonzalez, V. and Strauch, W. (2008), 'Strong along-arc variations in attenuation in the mantle wedge beneath costa rica and nicaragua', *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9(10).  
**URL:** <http://dx.doi.org/10.1029/2008GC002040>
- Siebert, L., Simkin, T. and Kimberly, P. (2010), *Volcanoes of the world.*, Washington, D.C. : Smithsonian Institution ; Berkeley ; University of California Press, c2010.
- Wada, I., Behn, M. D. and He, J. (2011a), 'Grain-size distribution in the mantle wedge of subduction zones.', *Journal of Geophysical Research* 116(B10), B10203.
- Wada, I., Rychert, C. A. and Wang, K. (2011b), 'Sharp thermal transition in the forearc mantle wedge as a consequence of nonlinear mantle wedge flow', *Geophysical Research Letters* 38(13), n/a–n/a. L13308.  
**URL:** <http://dx.doi.org/10.1029/2011GL047705>

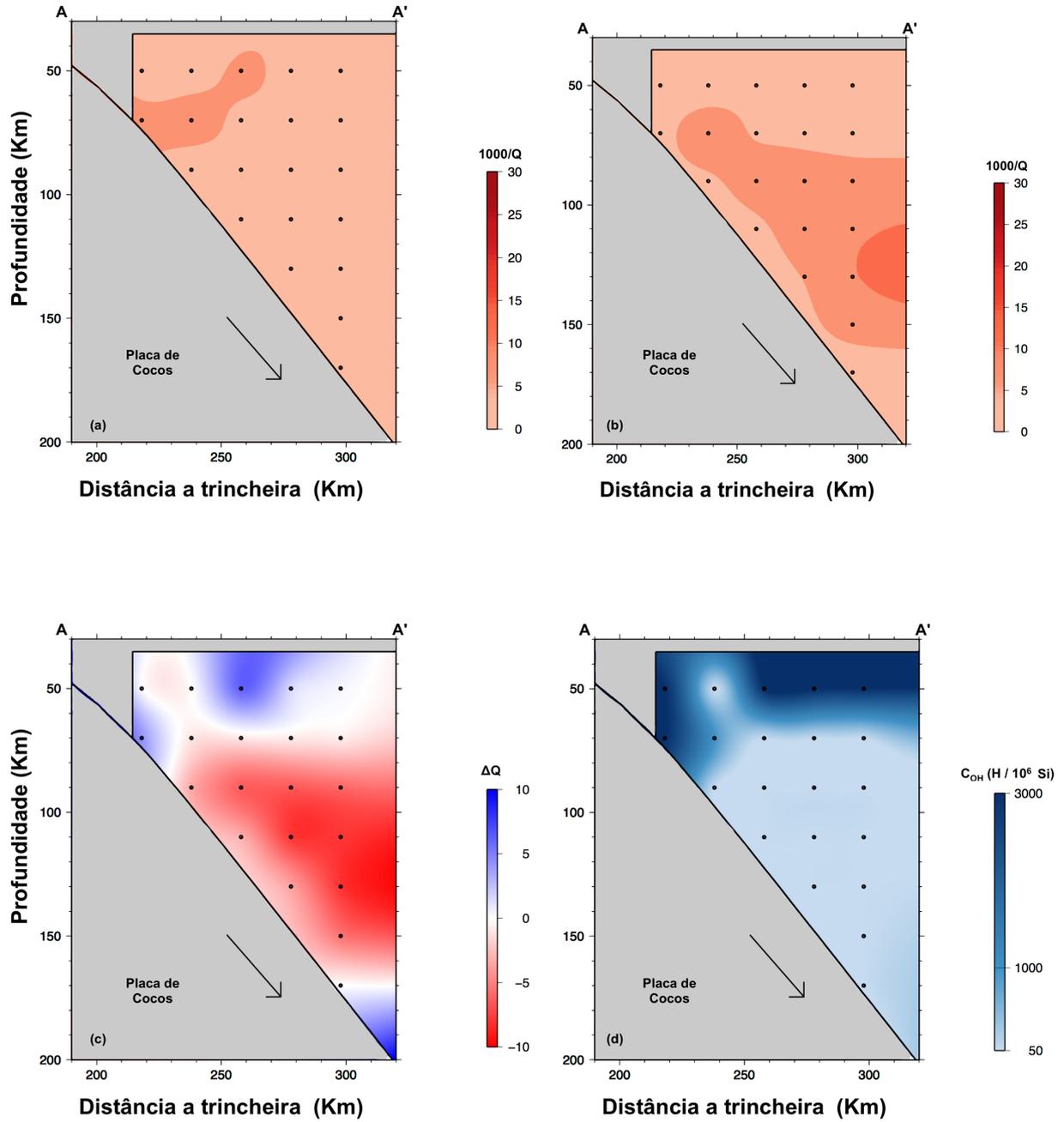


Figura 3: Perfil AA' : (a) Atenuação observada por Rychert et al. (2008); (b) Atenuação calculada; (c) Diferença entre calculada e observada ( $\Delta Q$ ); (d) Conteúdo de água adaptado.

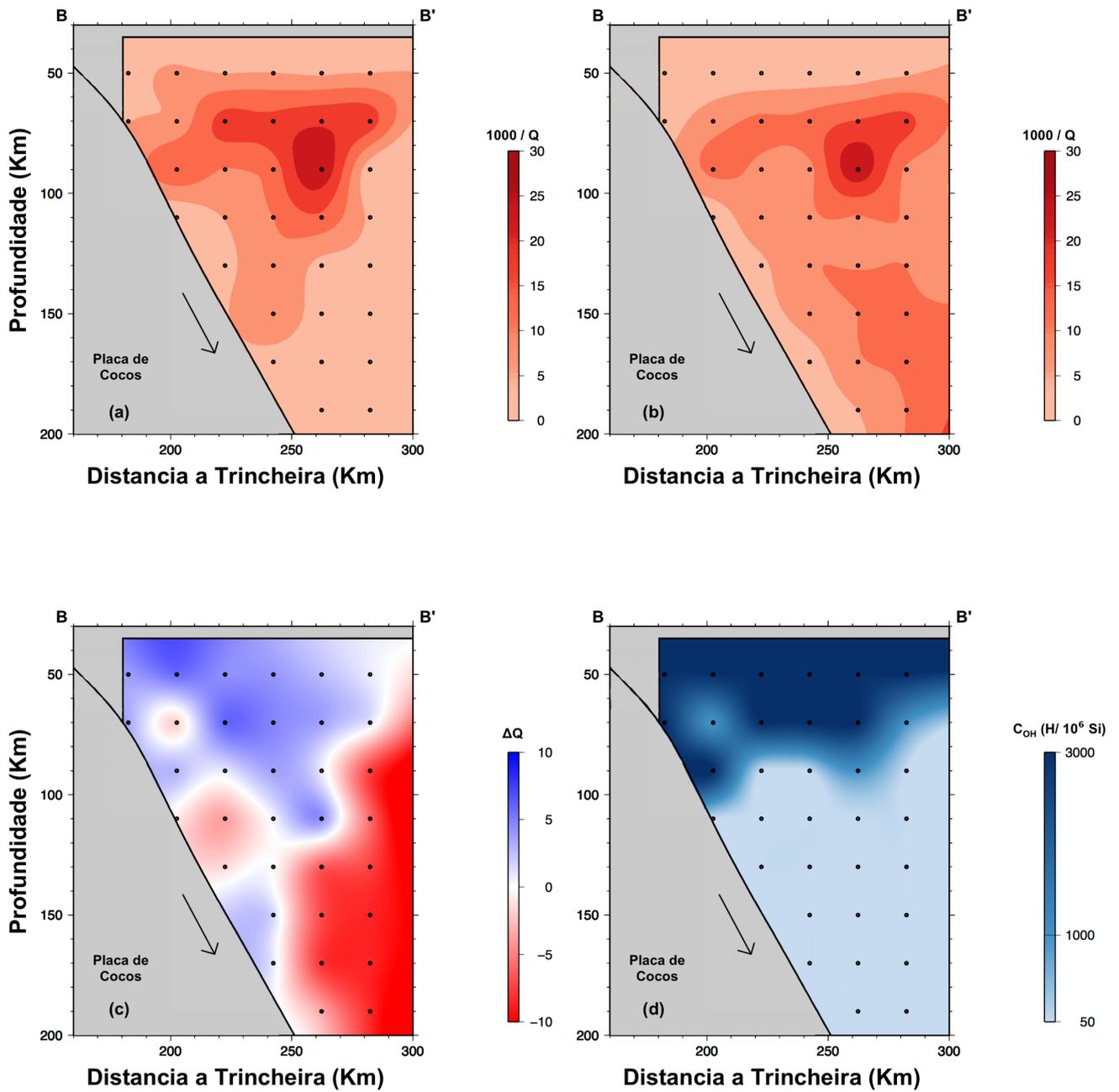


Figura 4: Perfil BB' : (a) Atenuação observada por Rychert et al. (2008); (b) Atenuação calculada; (c) Diferença entre calculada e observada ( $\Delta Q$ ); (d) Conteúdo de água adaptado

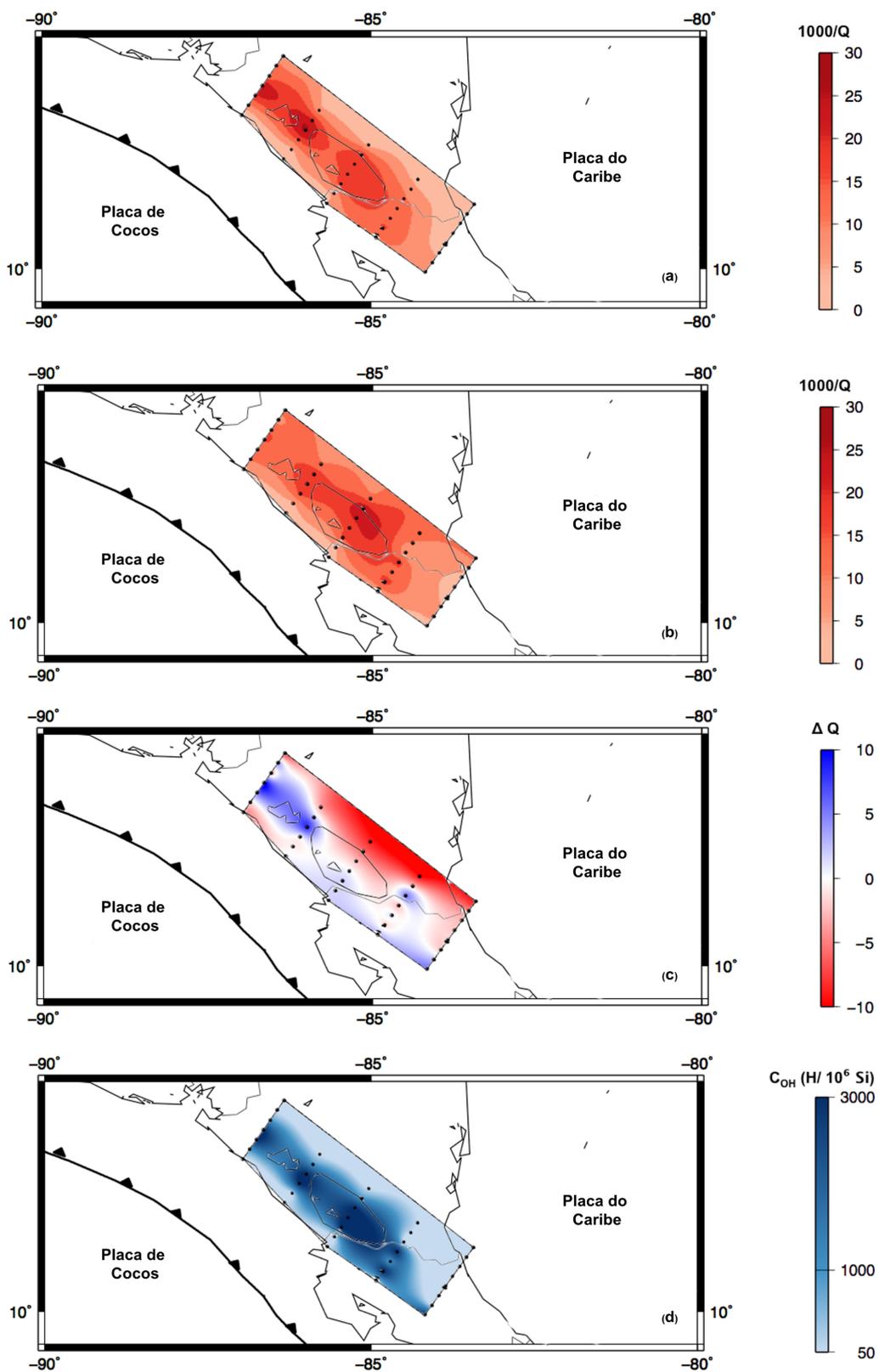


Figura 5: Perfil Horizontal: (a) Atenuação observada por Rychert et al. (2008); (b) Atenuação calculada; (c) Diferença entre calculada e observada ( $\Delta Q$ ); (d) Conteúdo de água adaptado.