

Espessura da crosta

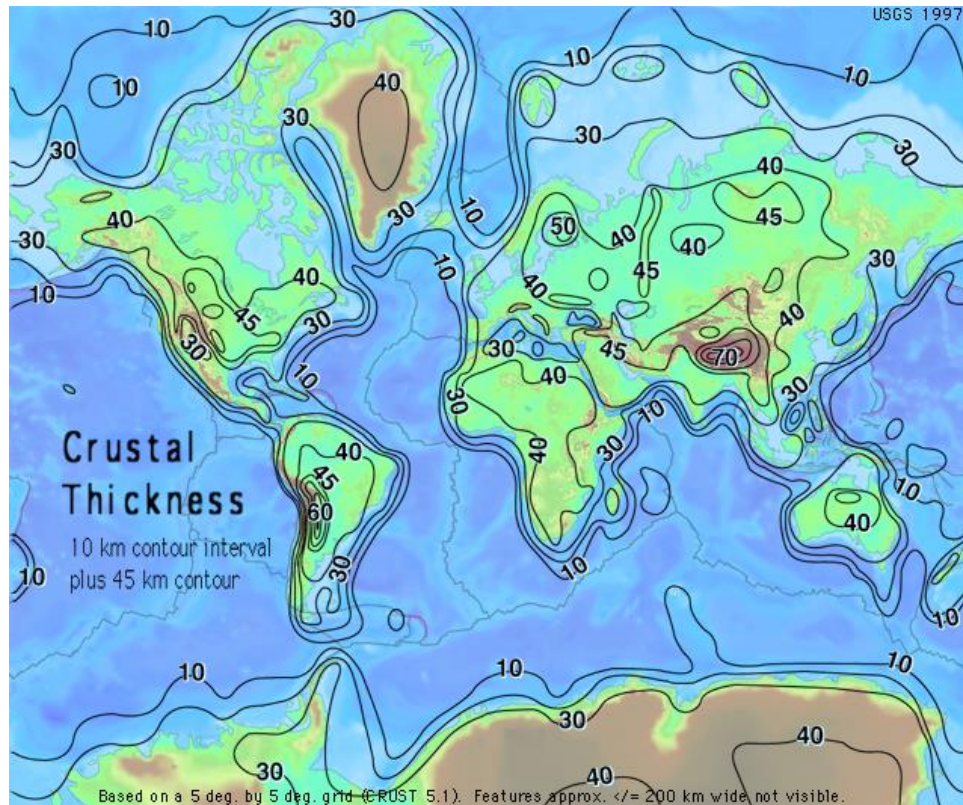
Espessura crustal

- Para que saber?
- Curiosidade? Entender como as placas se movem horizontalmente e verticalmente? Usar recursos minerais? Entender o passado da Terra?
- Como obter esse valor diretamente?
- O poço em terra mais profundo tem 12km. Nenhum furo em crosta oceânica chegou na descontinuidade de Mohorovicic
- É possível obter indiretamente?
- Sísmica, sismologia, gravimetria, magnetotelúrica são métodos indiretos de geofísica que podem ajudar. Geoquímica de peridotitos e rochas metamórficas também são métodos indiretos porque através deles é possível estimar a P e T a que essas rochas foram submetidas e transformar essas informações em profundidade.

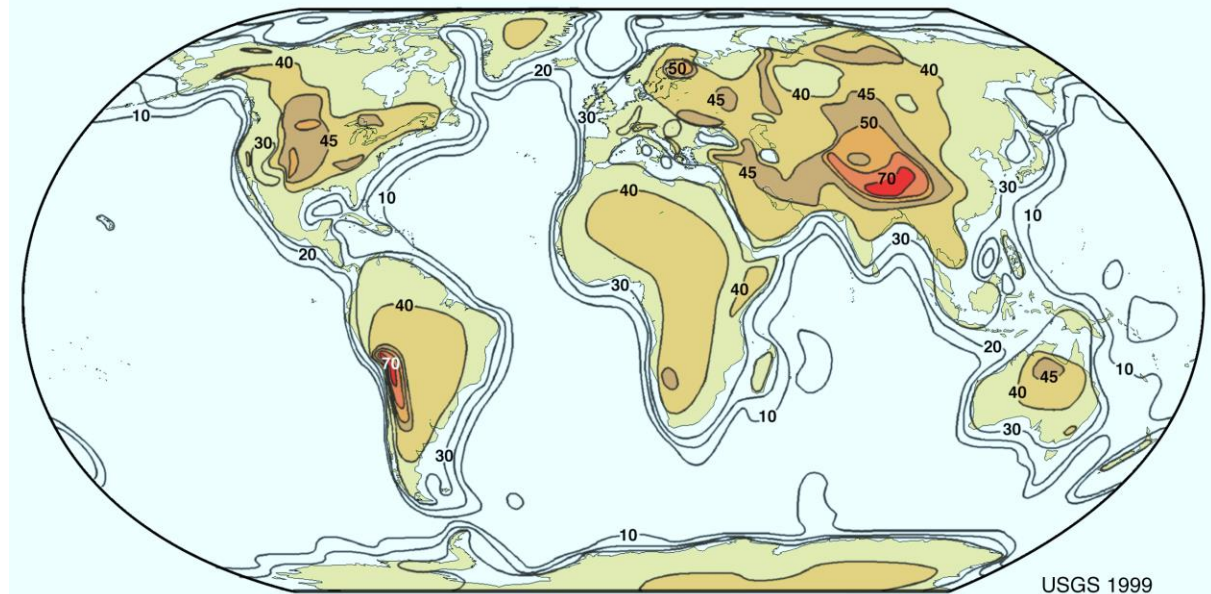
Mapa de espessura crustal do mundo

Note a pouca variação da espessura da crosta nos continentes e nos oceanos.

Regiões onde ocorre maior variação são limitadas e relacionadas a bordas convergentes O-C e C-C e plataformas continentais, seja de margem passiva seja de margem ativa.



The Thickness of the Earth's Crust



Model Crust 1.0

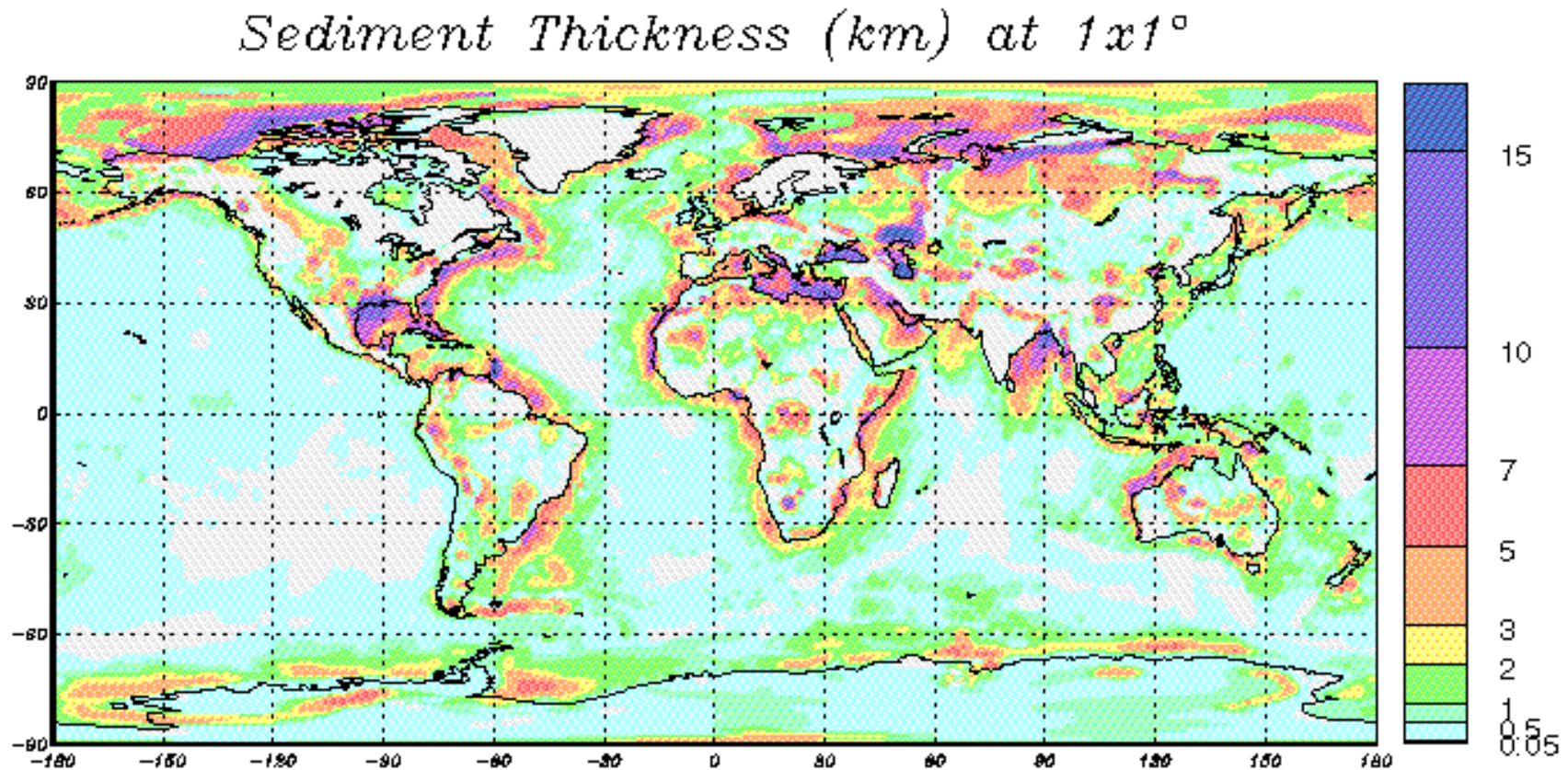
- <https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>
- **Description of the model**
- This new model is specified on a 1x1 degree grid and incorporates an updated version of our global [sediment thickness](#) (slide 6).
- Bathymetry and topography is that of ETOPO1 that can be downloaded at NOAA's [NGDC](#). ETOPO1 is a 1-arc minute model of Earth's global relief, including surface topography and seafloor bathymetry. In ice-covered regions, "ice surface" and "bedrock" are given. From the ETOPO1 files, we derived topography, bathymetry and ice thickness in our new model by binning and averaging the ETOPO1 data in 1-degree cells.
- The global crustal models CRUST5.1 and CRUST2.0 use type keys to assign various [types of crustal structure](#) (slide 8) (such as Archean, early Proterozoic, rifts etc.) in each cell. In both these models, the crustal types were also used to assign ice, sediment and crustal thickness.
- In CRUST1.0, the principal crustal types are adopted from CRUST5.1. But the crustal types are now aligned with the crustal age map of Artemieva and Mooney (slide 9). Additional crustal types mark specific tectonic settings, such as orogens, continental rifts, continental shelves and oceanic plateaus. CRUST1.0 also has a few new types, including one for very young (< 3 Myrs) oceans (slide 10). In contrast to older models, the function of crustal types in CRUST1.0 is limited to assigning elastic parameters to layers in the crystalline crust.

Model Crust 1.0

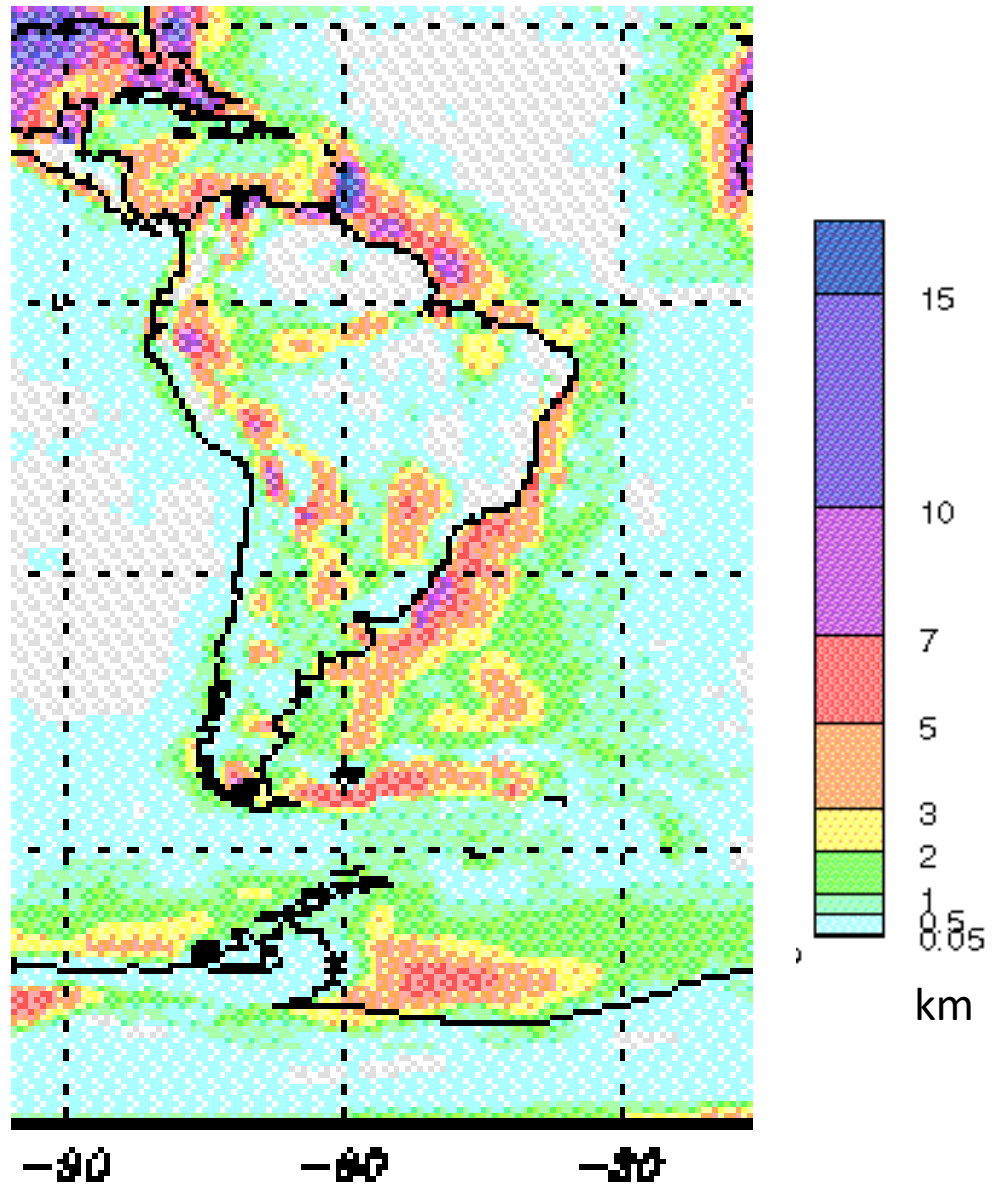
- <https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>
- **Description of the model**
- CRUST1.0 will consist of less than 40 crustal types (slide 10). Each of the 1x1-degree cells will have a unique 8-layer crustal profile where the layers are:
 - water,
 - ice,
 - upper sediments,
 - middle sediments,
 - lower sediments,
 - upper crust,
 - middle crust,
 - lower crust
- Parameters V_p , V_s and ρ (densidade) are given explicitly for these 8 layers as well as the mantle below the Moho. The parameters below the Moho are determined using a modified version of the recent Pn model LLNL-G3Dv3 (for the LLNL model, see below under external links).
- Laske, G., Masters., G., Ma, Z. and Pasyanos, M., Update on CRUST1.0 - A 1-degree Global Model of Earth's Crust, Geophys. Res. Abstracts, 15, Abstract EGU2013-2658, 2013

Model Crust 1.0

- <https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/sediment.html>
- A Global Digital map of Sediment Thickness



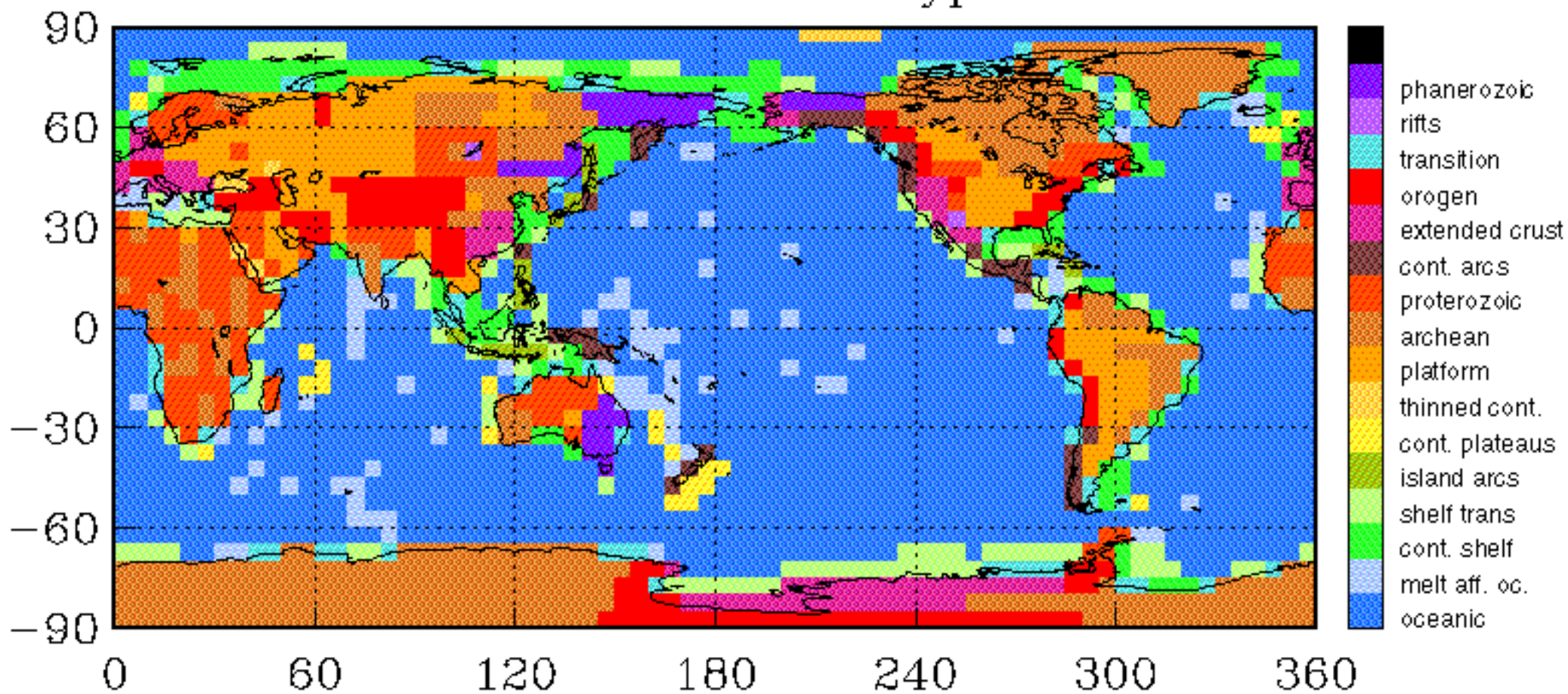
Sedimentos na América do Sul



Model Crust 1.0

- Tipos de crosta

CRUST 5.1: crustal types



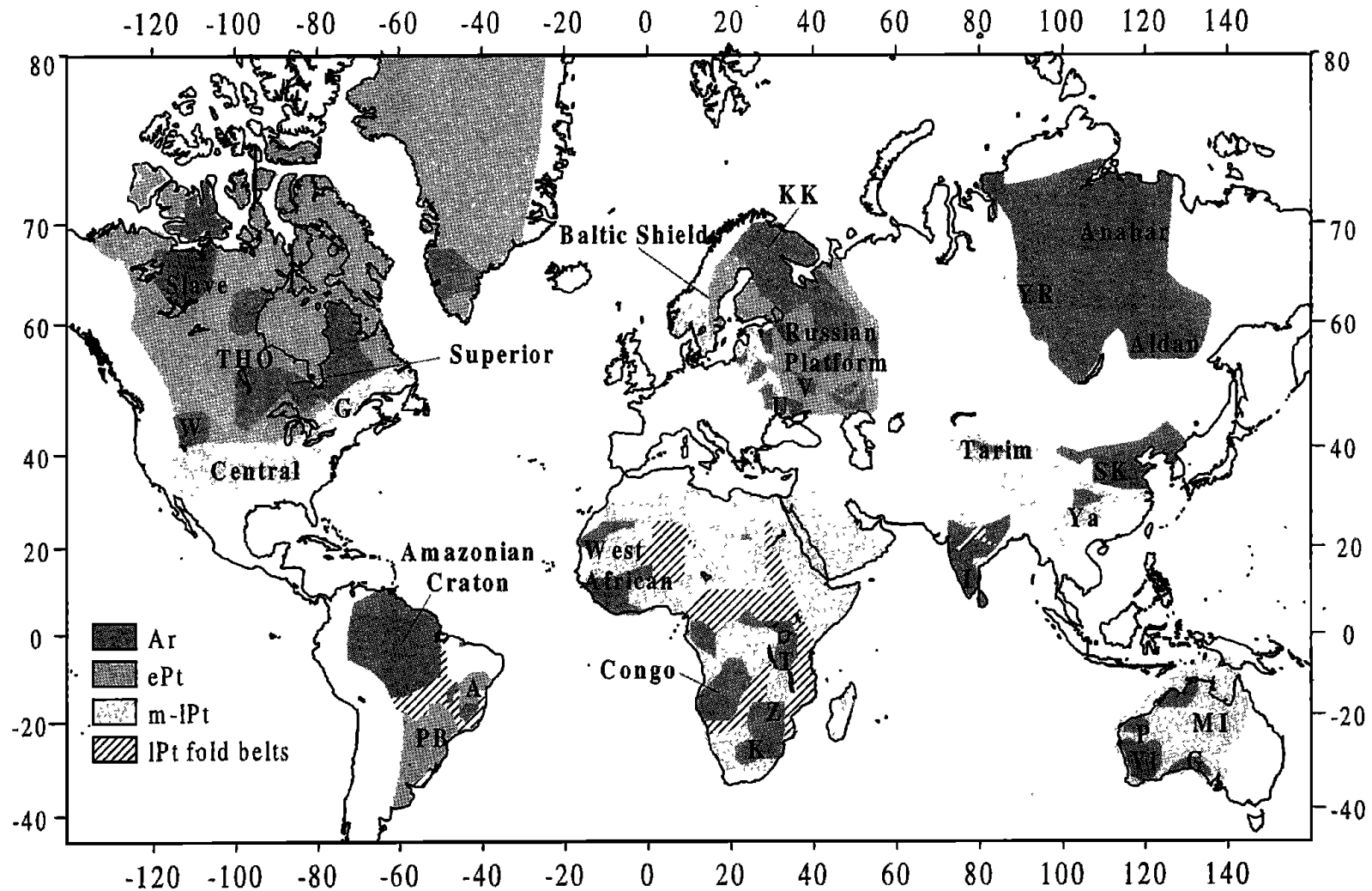
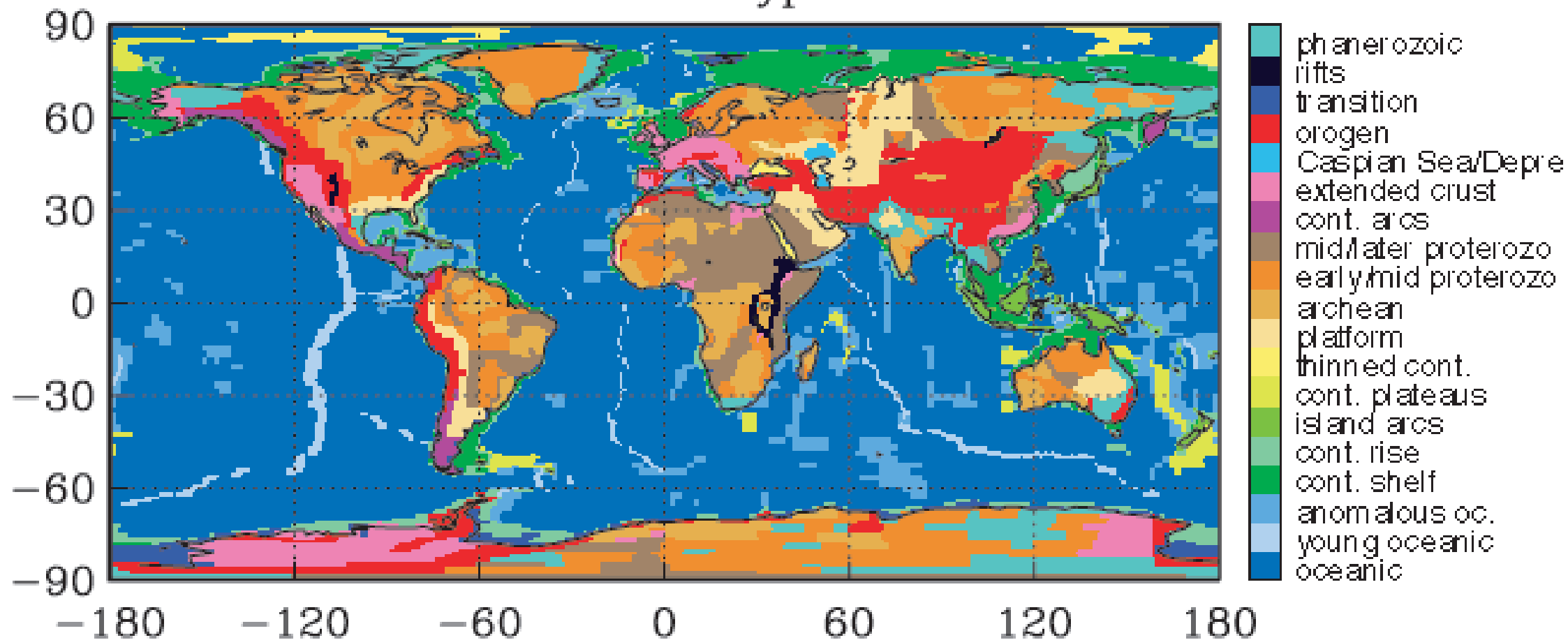


Figure 2. Archean (Ar) and Proterozoic (ePt, early Proterozoic; m-IPt, middle to late Proterozoic) regions of the world (based on data compiled from Goodwin [1996]) and adjacent tectonic structures of different ages considered in the present study. A, Atlantic Shield; G, Gawler Craton; Gr, Grenville Province; I, Indian Shield; KK, Kola-Karelian province; K, Kaapvaal Craton; MI, Mount Isa Orogen; P, Pilbara Block; PB, Parana Basin; SK, Sino-Korean Craton; T, Tanzanian Craton; THO, Trans-Hudson Orogen; U, Ukrainian Shield; V, Voronezh Massif; W, Wyoming Province; Ya, Yangtze Craton; Yi, Yilgarn; YR, Yenisey Ridge; Z, Zimbabwe Craton.

Artemieva, I.M. and Mooney, W.D., Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study, *J. Geophys. Res.*, 106, 16,387 - 166, 414, 2001.

Model Crust1.0

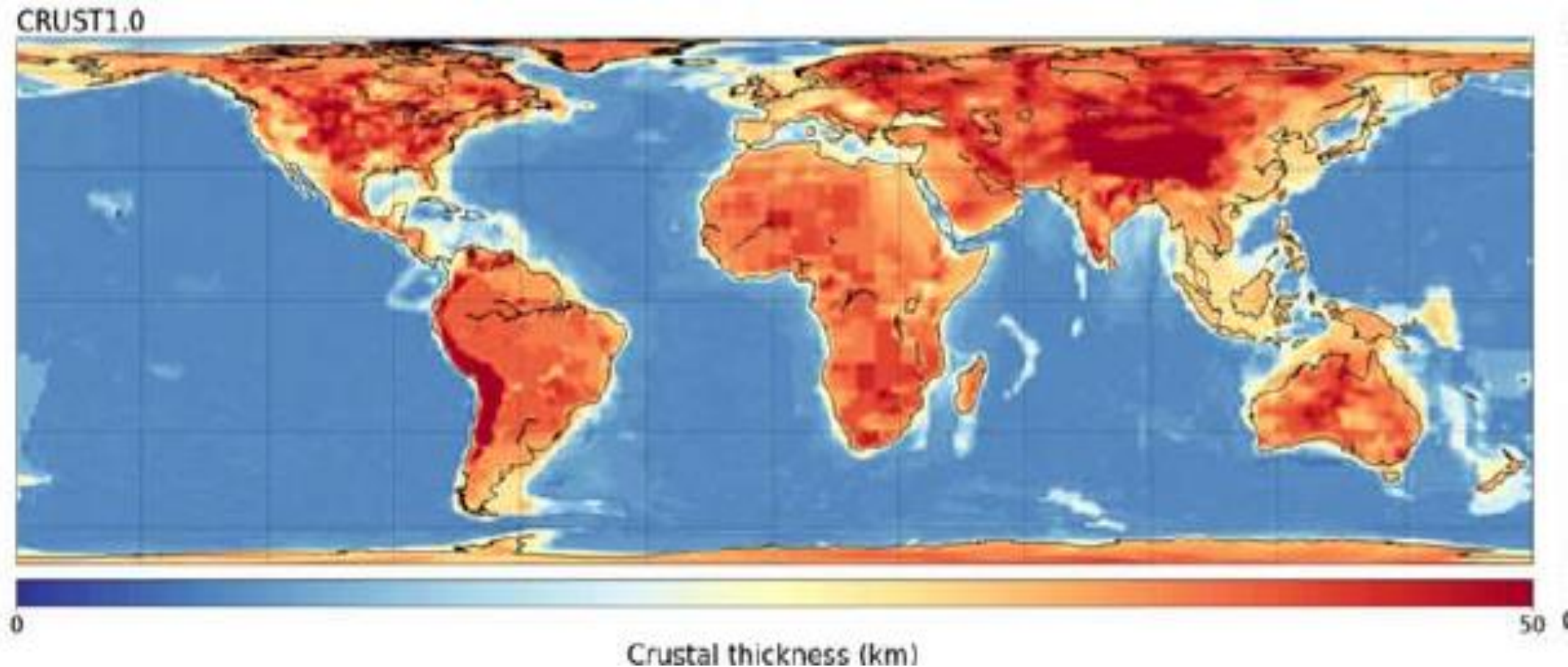
CRUST 1.0 Types



Model Crust 1.0

- **Why do we need an accurate crustal model?**
- Seismic tomography has been extensively used in various forms to determine the three-dimensional velocity structure of the Earth's mantle. The data used in these studies are surface wave (waveforms and dispersion measurements) and free oscillation (frequency shift) data as well as body wave travel times (arrival times from catalogues such as the ISC catalog and specially hand-picked long-period arrivals). For the majority of these studies, the crust has a significant impact on the observed seismic data but, at the same time, is too thin to be resolved by them. Most authors handle this by applying an assumed "crustal correction" to the data before an inversion for mantle structure. Since the inversion techniques can erroneously map crustal structure down to great depth (at least 250km), accurate crustal corrections to the data sets are extremely important.
- Another aspect is the seismic monitoring of nuclear explosions. Key elements of the monitoring effort are location and size estimation. The location accuracy strongly depends on the chosen velocity model (i.e. crustal structure), especially when seismic sources lie outside the monitoring network. Monitoring on regional scale includes the modelling of short-period surface waves and the propagation of Lg waves which are very sensitive to variations of crustal structure. Obviously, an accurate image of the Earth's crust would tremendously improve the understanding of wave propagation of such phases. With the volume of datasets and the demand on resolving small-scale structures increasing, we found that the 2x2 degree model CRUST2.0 is no longer accurate enough.

Model Crust1

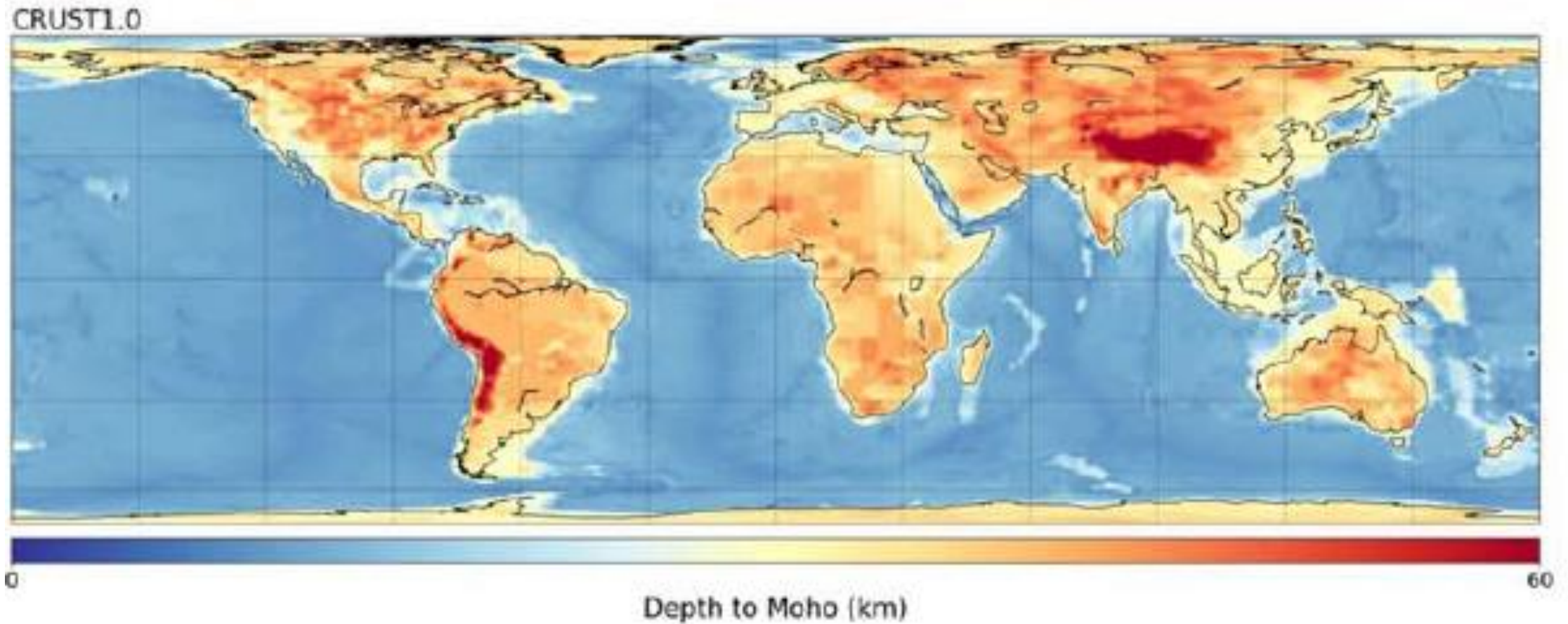


Note como nos oceanos a espessura da crosta é praticamente constante, e aumenta nas plataformas continentais com a deposição de sedimentos.

SubMachine_Hosseini_et_al_2018

<https://www.earth.ox.ac.uk/~smachine/cgi/index.php>

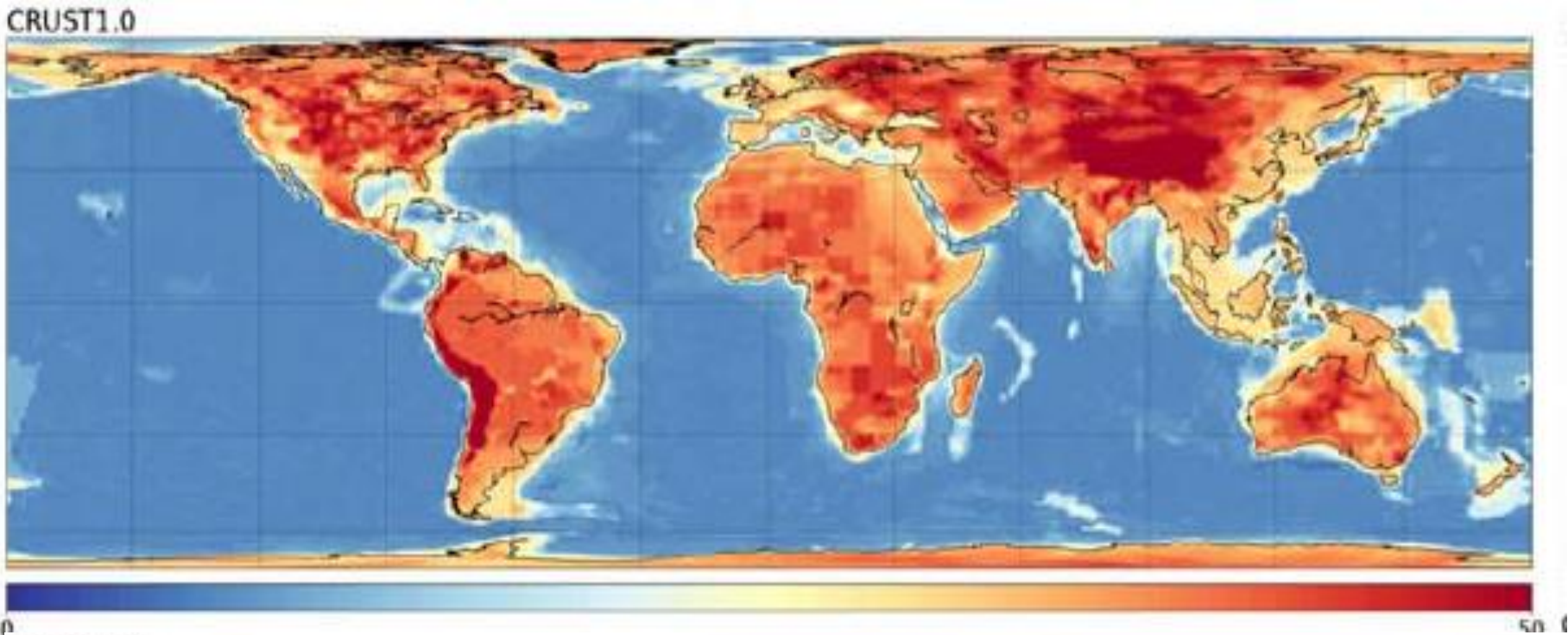
Model Crust1



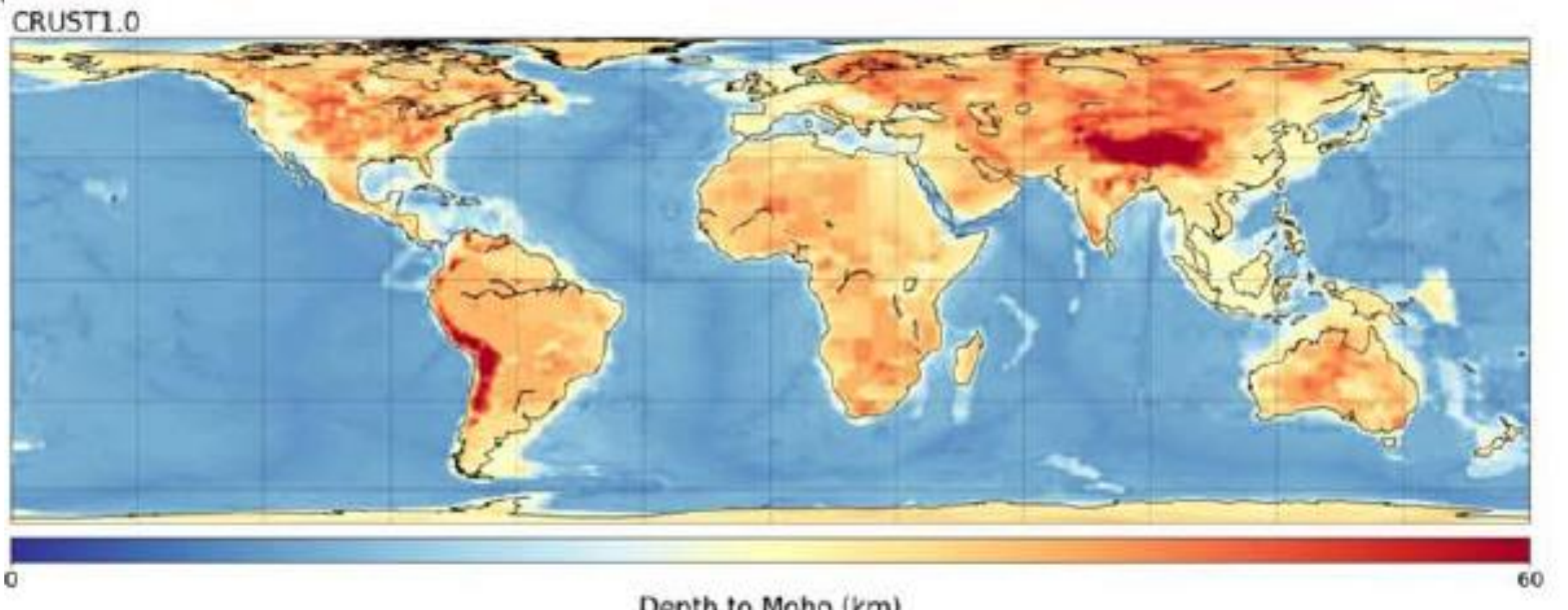
Neste mapa, a profundidade da Moho é vista a partir do nível médio do mar, por isso as dorsais ficam mais visíveis, porque topografia de 2-3 km acima das bacias oceânicas (média de 5 km de batimetria/profundidade).

No caso dos continentes a topografia realça a profundidade da Moho.

Considerando a topografia



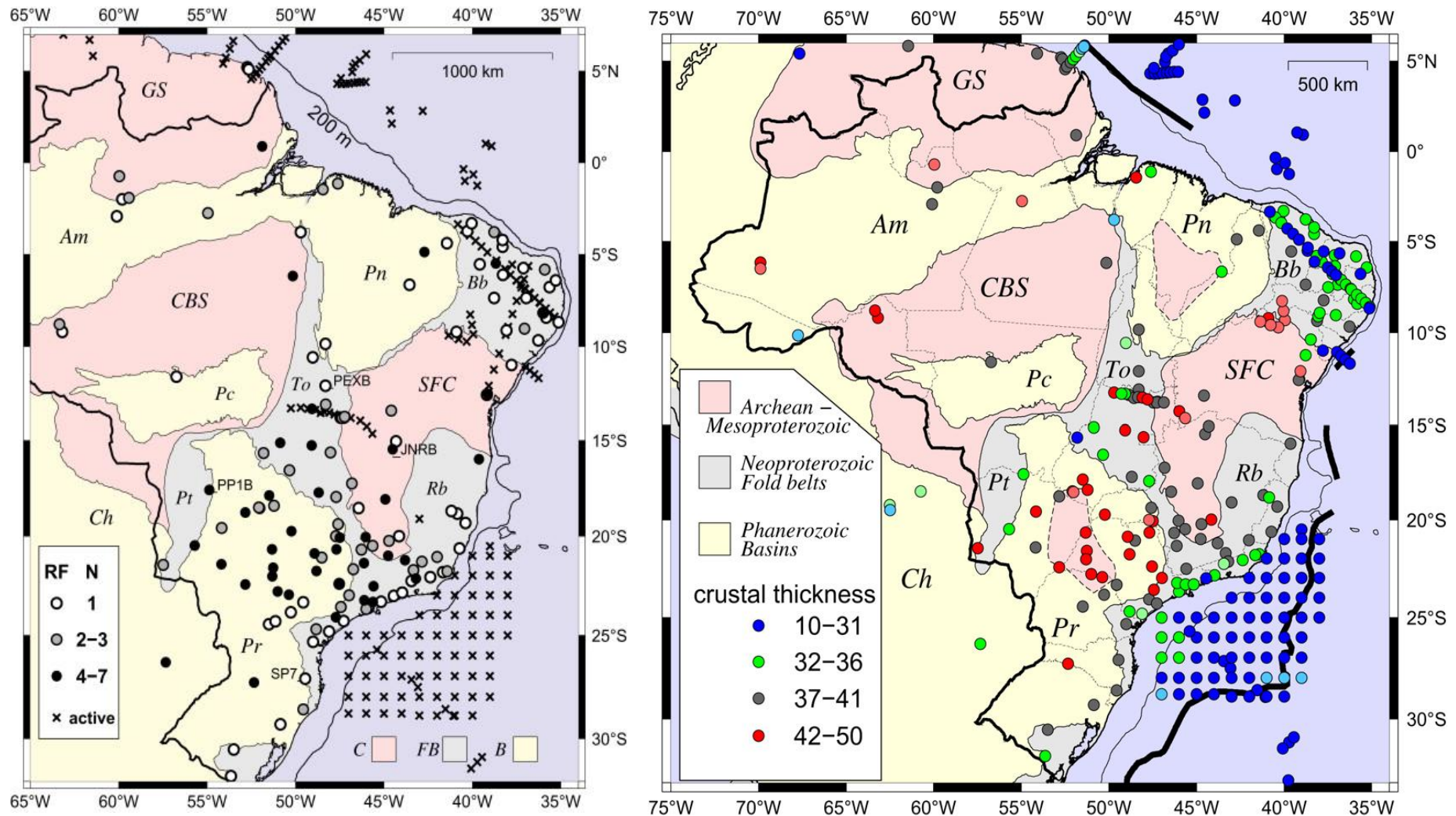
A partir do nível médio do mar



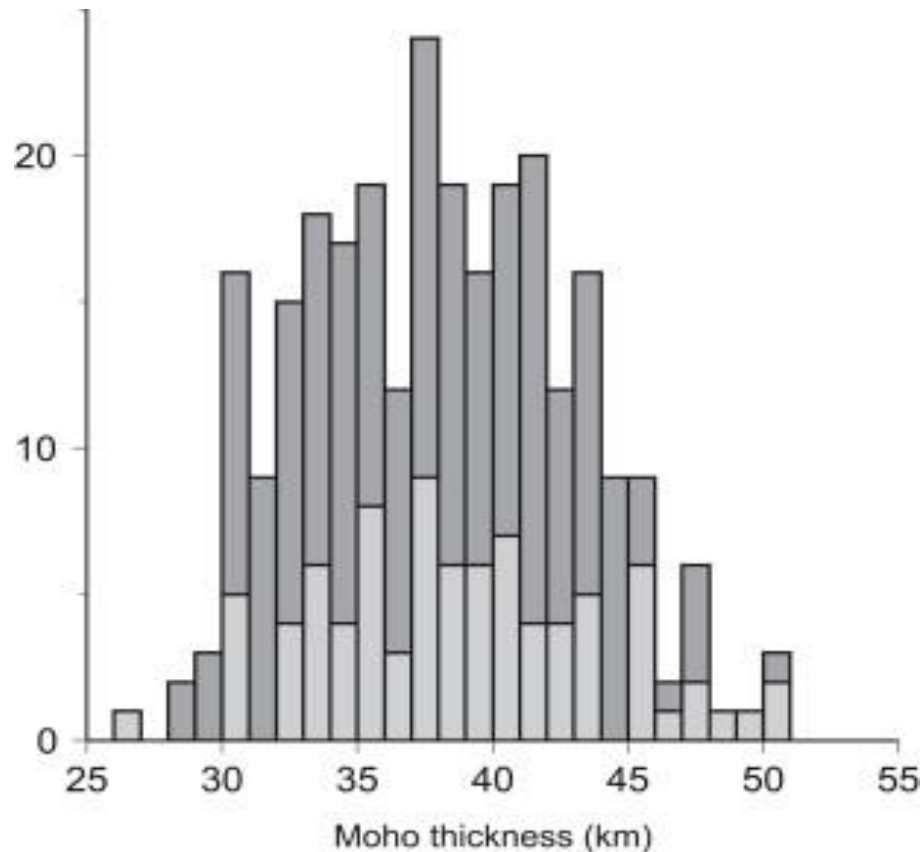
Espessura crustal

- (1) Assumpção, M., Bianchi, M., Julià, J., Dias, F.L., França, G.S., Nascimento, R., Drouet, S., Pavão, C.G., Albuquerque, D.F., Lopes, A.E.V., 2013. Crustal thickness map of Brazil: Data compilation and main features. *Journal of South American Earth Sciences*, 43: 74-85.
-

Crustal thickness map of Brazil: Data compilation and main features



Crustal thickness map of Brazil: Data compilation and main features



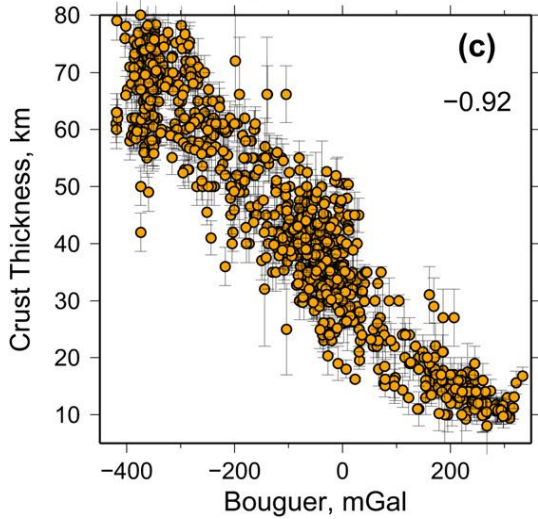
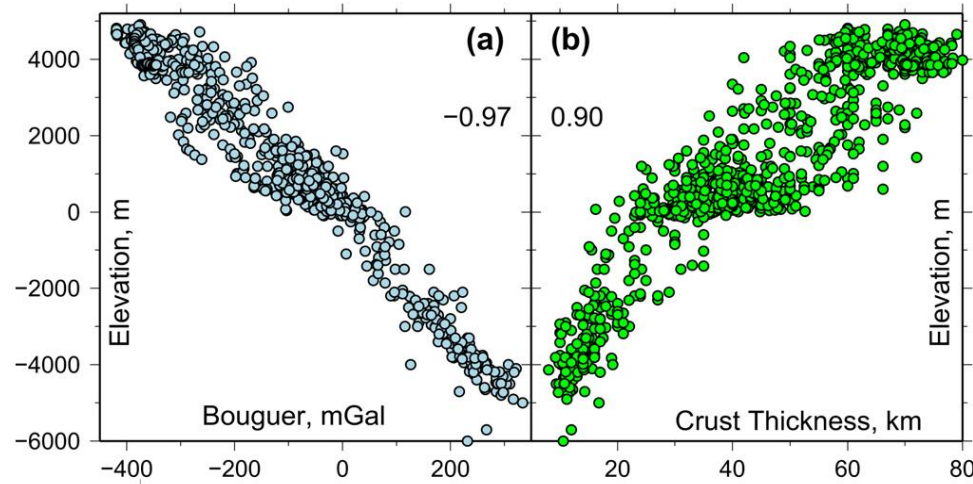
-histograma dos 269 dados da área continental H médio: $37,9 \pm 4,9$ km. 2 grupos: Província Borborema: muitos dados, H entre 30-36 km. Resto da Plataforma estável: H entre 37-44 km. Se inclui Borborema: valor médio de H = $39,0 \pm 4,6$ km.

- crosta mais afinada: província Borborema, H < 35 km ao redor da Bacia Potiguar, no resto da província, da ordem de 37 km; Província Tocantins e ao longo do Arco Magmático de Goiás e entre as bacias do Paraná e do Pantanal. Crosta normal (37-41 km) ou um pouco mais espessa (≥ 42 km): escudos cratônicos e bacias intracratônicas.

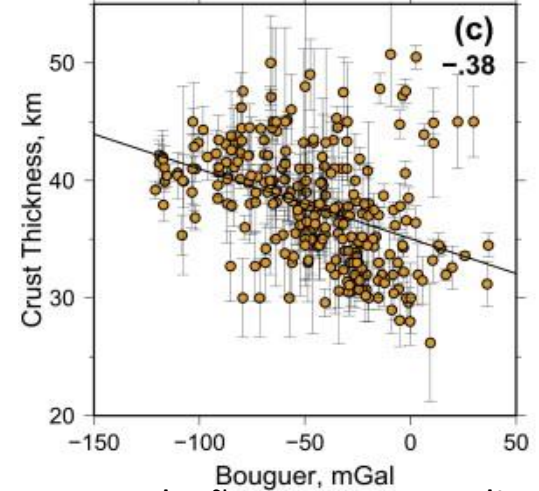
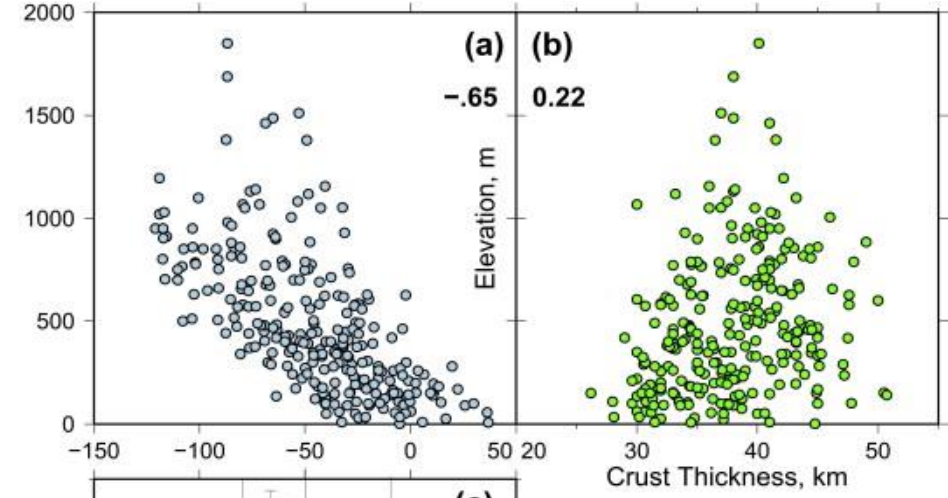
Table 3: Average crustal thickness (<H>) and geological provinces. N = number of measurements (both RF and active source).

Geological province	N	<H> (km)	St. dev. (km)
Amazon Craton (AM)	19	39.7	6.2
S. Francisco craton (SFC)	25	41.1	2.3
CRATONS	44	40.5	4.5
Parnaíba Basin (PRNB)	6	40.8	3.3
Paraná-Chaco Basin (PR_CH)	30	42.6	2.6
BASINS	6	42.2	2.8

Crustal thickness map of Brazil: Data compilation and main features

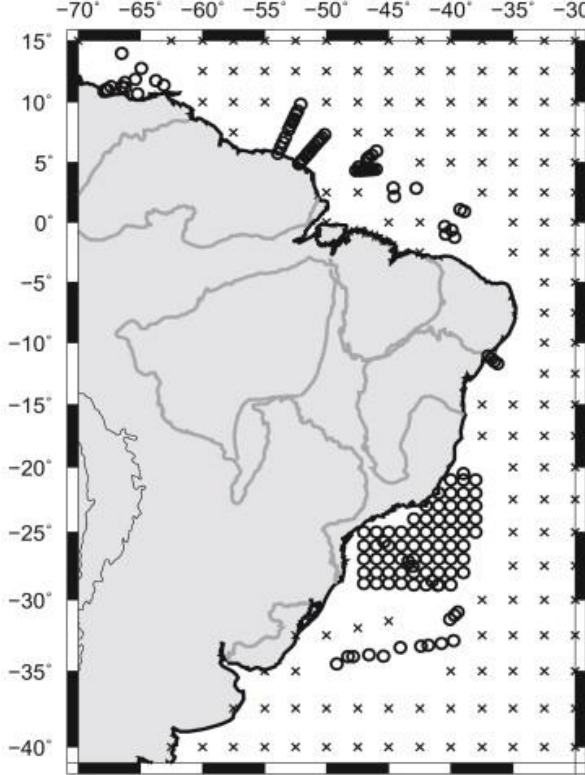


toda a AS, incluindo oceano, tem correlação bem forte entre anomalia Bouguer e topografia, sugere placa compensada localmente por Airy.

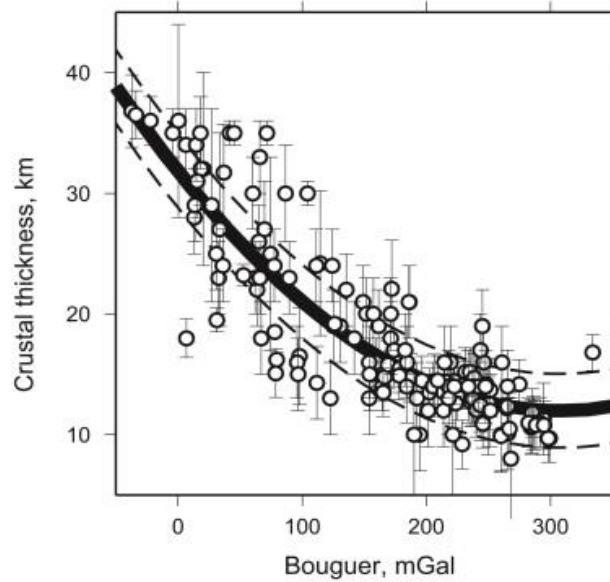
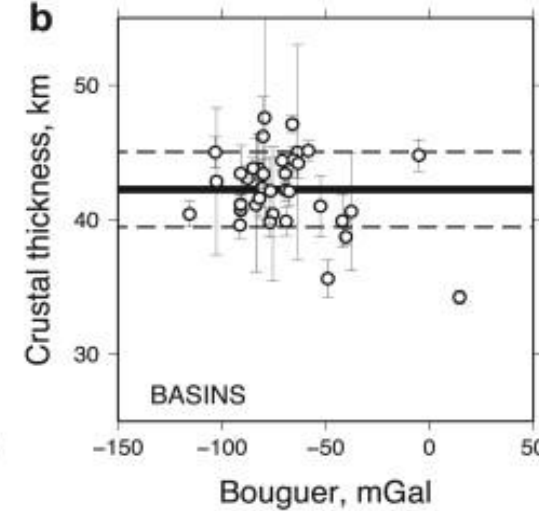
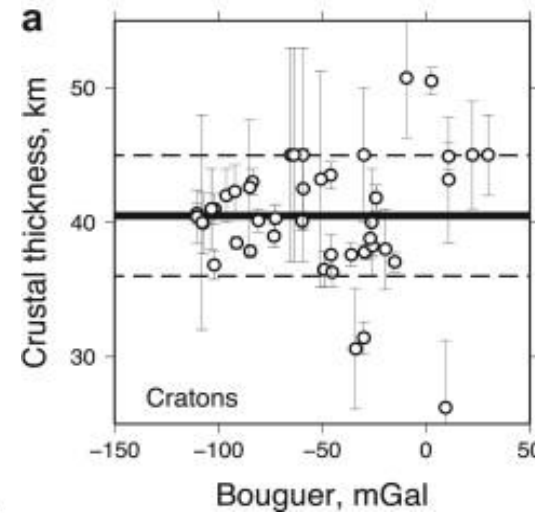


só a parte continental não tem correlação entre anomalia Bouguer e topografia, topografia aproximadamente compensada isostaticamente, usar anomalia Bouguer para estimar a Moho não é uma boa ideia, incerteza é da ordem de 4,4 km, que é a mesma de extrapolar os dados de fonte ativa.

Crustal thickness map of Brazil: Data compilation and main features



Atlantic Margin



Em grande escala a compensação ocorre por Airy. Em pequena escala, dentro da plataforma estável, Airy ou Pratt ou até mesmo não compensado localmente, não dá para usar onde não tem dado para restringir valores. Para o Atlântico tem boa correlação e dá para usar onde não tem dado.

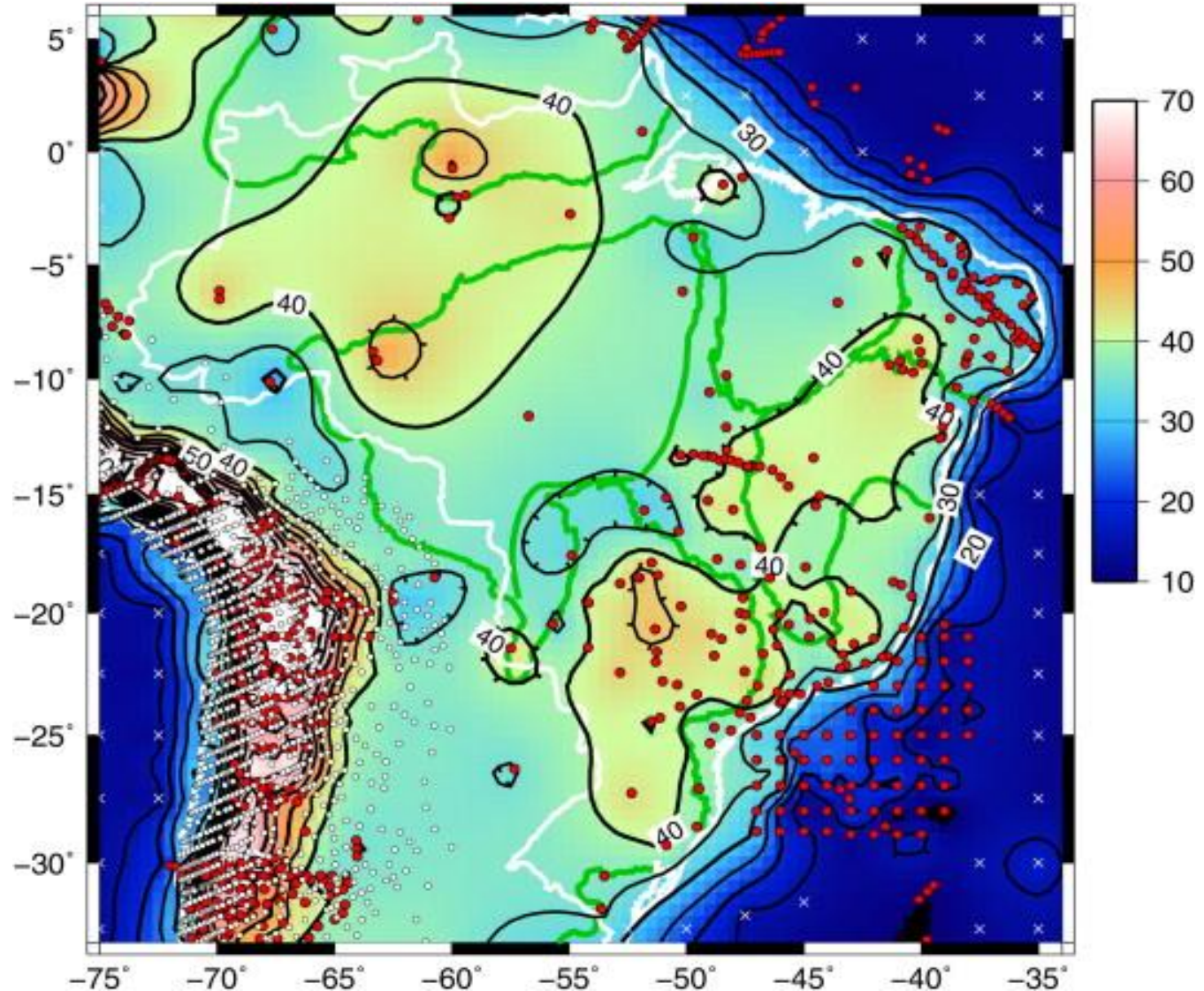
$$H = 31.85 - 0.1291 * \text{Boug} + 0.00021 * \text{Boug}^2; (\text{st. dev.} = 3.05 \text{ km})$$

Crustal thickness map of Brazil: Data compilation and main features

- áreas de H maior: parte central do craton Amazônico (poucos dados para a área arqueana); parte norte do craton do São Francisco (sul do craton H~40km); Bacia do Paraná, maior próximo a parte central e crosta mais fina nos arcos de Ponta Grossa e Rio Grande (áreas de soerguimento pós-rifte)

- áreas de H menor: Província da Borborema, proximidade com o eixo NS de abertura do Atl. Sul e proximidade com o eixo WE de abertura do Atl. Equatorial ou soerguimento no Cenozóico; Faixa Paraguai Araguaia

- sem muita correlação entre H e províncias geológicas.

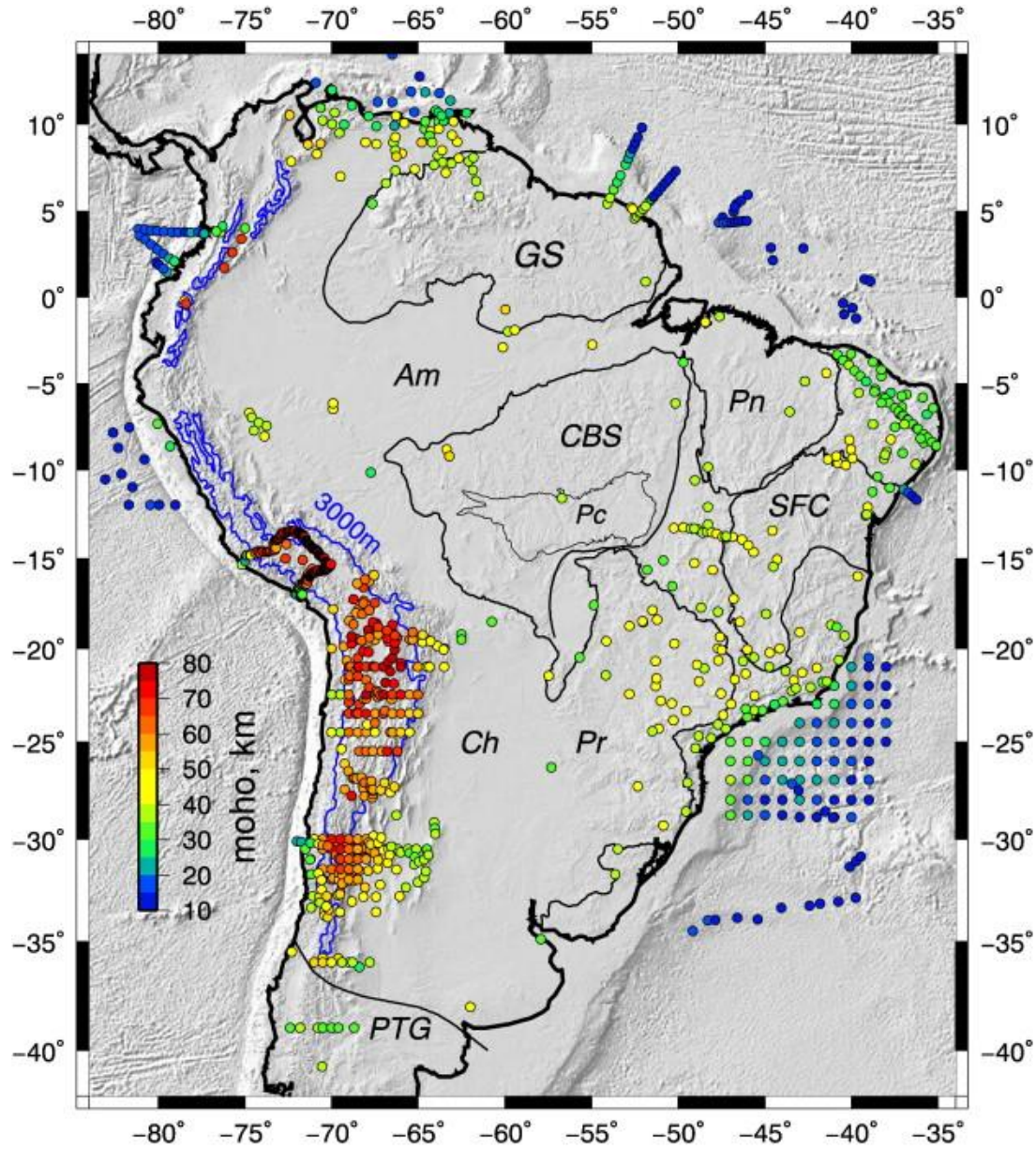


Espessura crustal

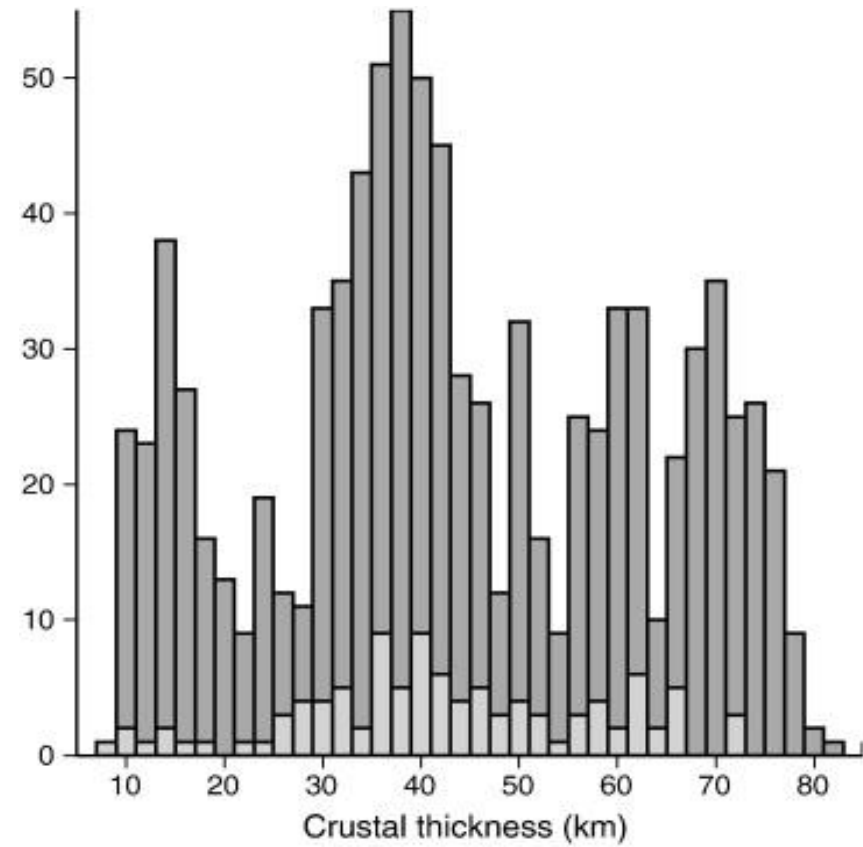
- (2) [Assumpção](#), M., [Feng](#), M., [Tassara](#), A., [Julià](#), J., 2013. Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography. [Tectonophysics](#), [609](#): 82–96.

-

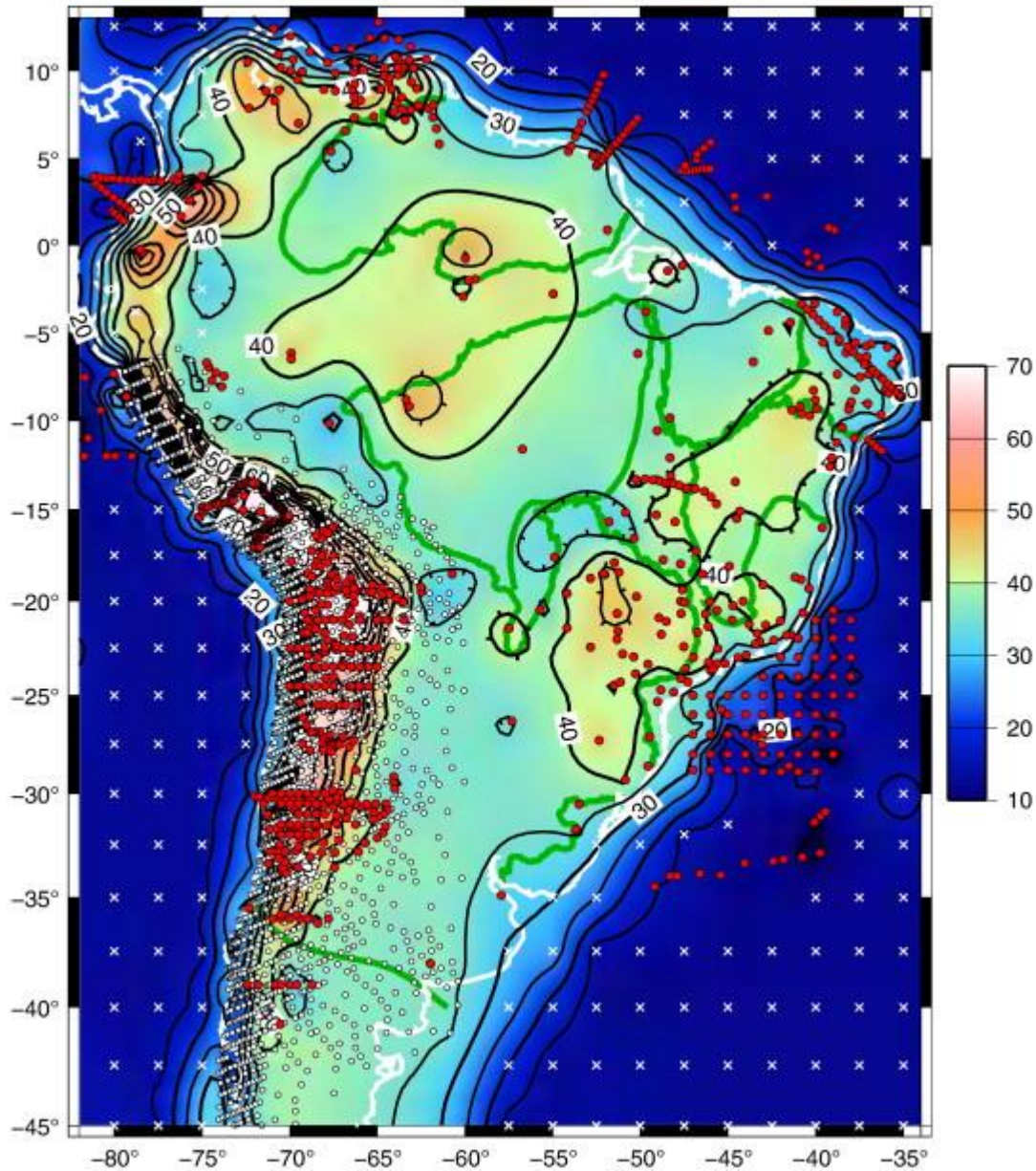
Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography.



- 920 pontos (provenientes de sísmica, quando tem linha sísmica, usa pontos 50 km espaçados): 730 em terra e 190 em mar. $H < 20$ km em linhas de refração em áreas oceânicas; $H > 55$ km nos Andes; na área continental estável $H = 38 \pm 4,8$ km → distribuição geográfica de pontos não é uniforme.



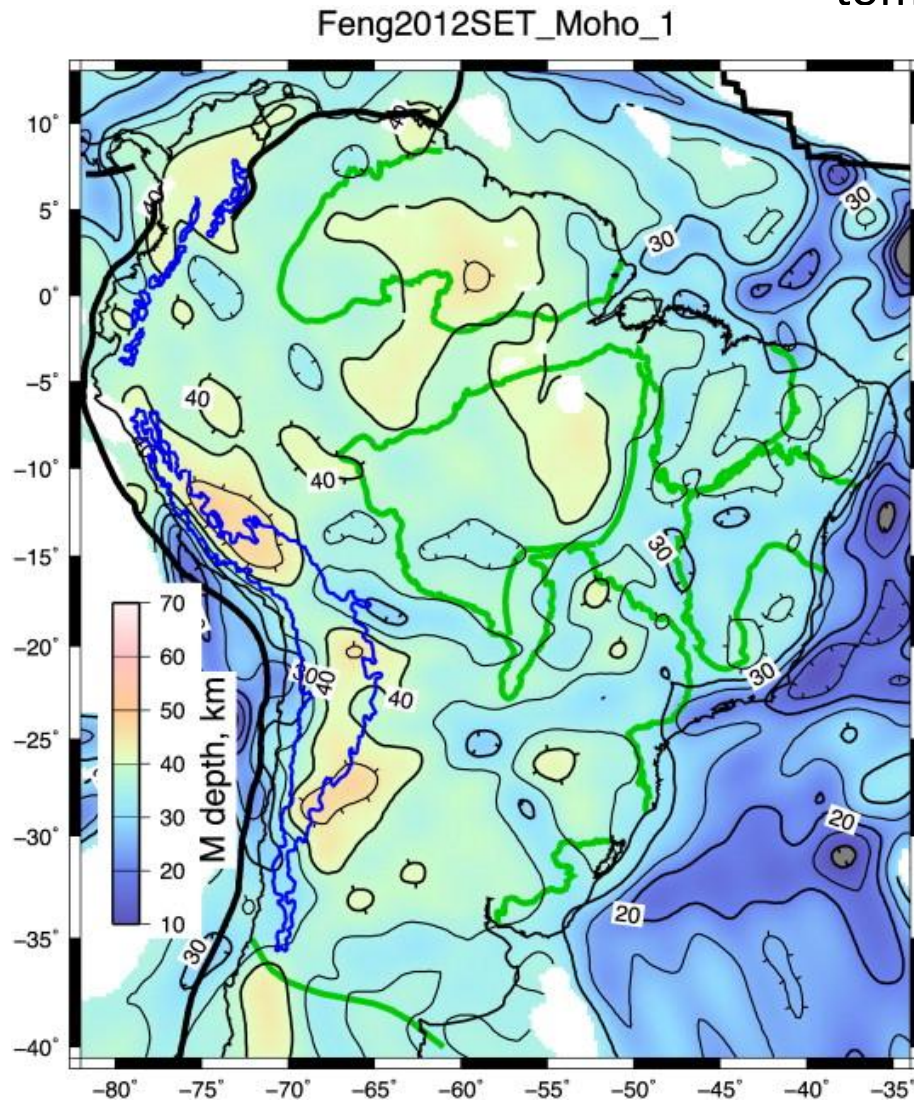
Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography.



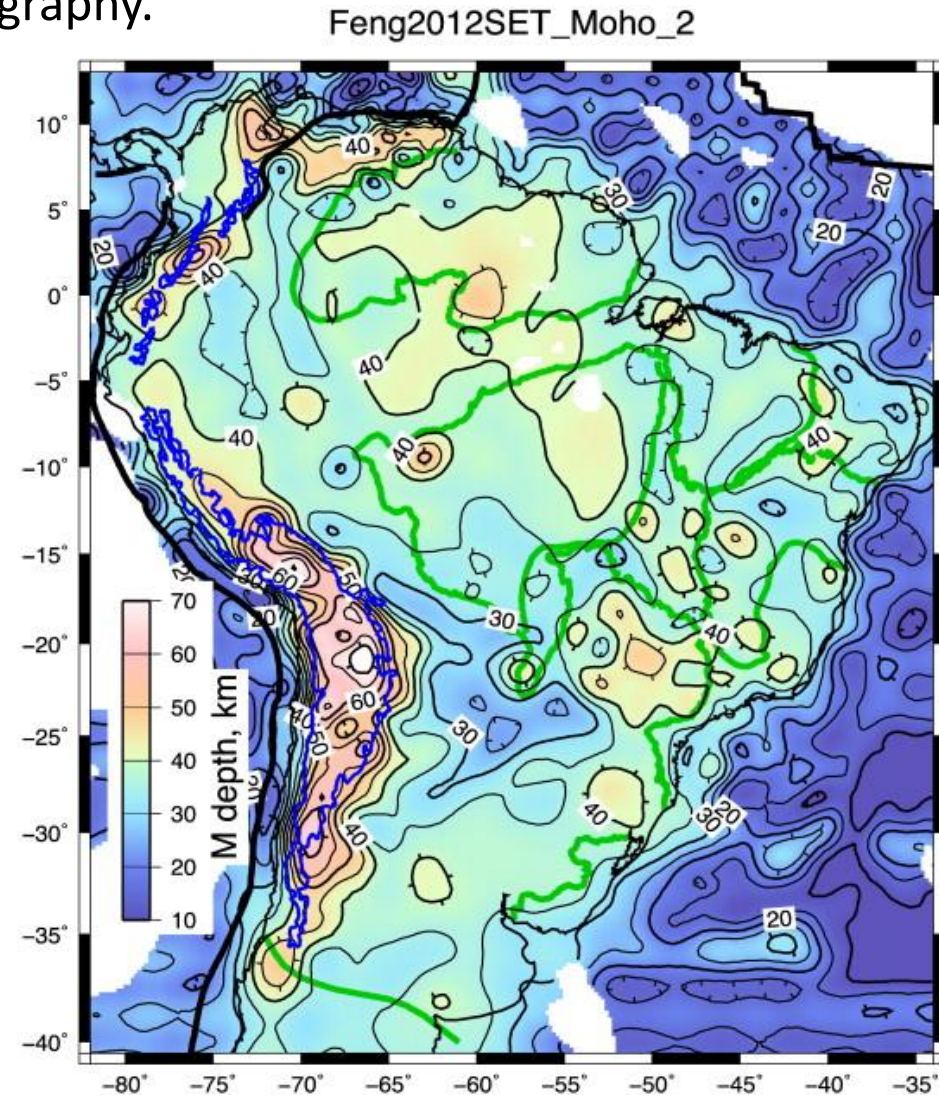
Modelo A - modelo 1, com dados gravimétricos nos Andes Central e Sul e usando relações empíricas para o Andes Norte (erro de 7,4 km) e região oceânica adjacente no Atlântico (erro de 3,1 km). Na plataforma estável não usa.

Resultados: Andes: $H > 60$ km Peru Central (-8°) até plato de Puna (-30°) e $H < 50$ km para Equador e norte Peru (-3 e -7°). Plataforma: $H \geq 40$ km no craton Amazônico e craton do São Francisco, sendo que na Bacia do Paraná $H > 45$ km. Porção $H < 40$ km e nas bacias sub-andinas $H \leq 35$ km.

Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography.

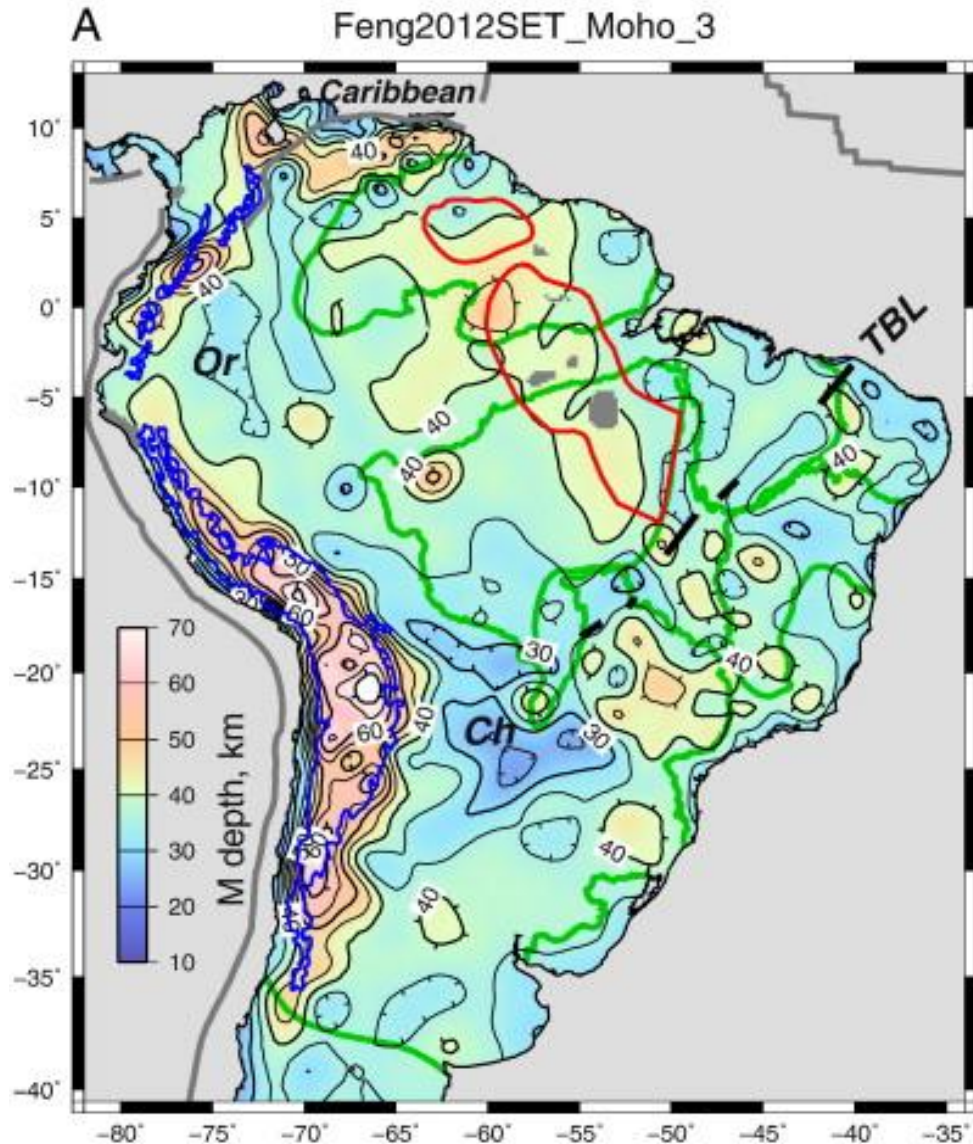


Modelo B1 - baseado só na forma de onda e da dispersão de grupo da onda Rayleigh - figura 9. H alto no sul do Peru e Bolívia e norte do Chile. H > 40 km no escudo Amazônico e Atlântico.



Modelo B2 - B1 + dados de sísmica + relações entre gravimetria e H - figura 10. H alto começa a aparecer no Altiplano. H > 40 km área maior no escudo Atlântico adentrando a Bacia do Paraná e o craton do São Francisco. H < 35 km na Bacia do Chaco.

Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography.



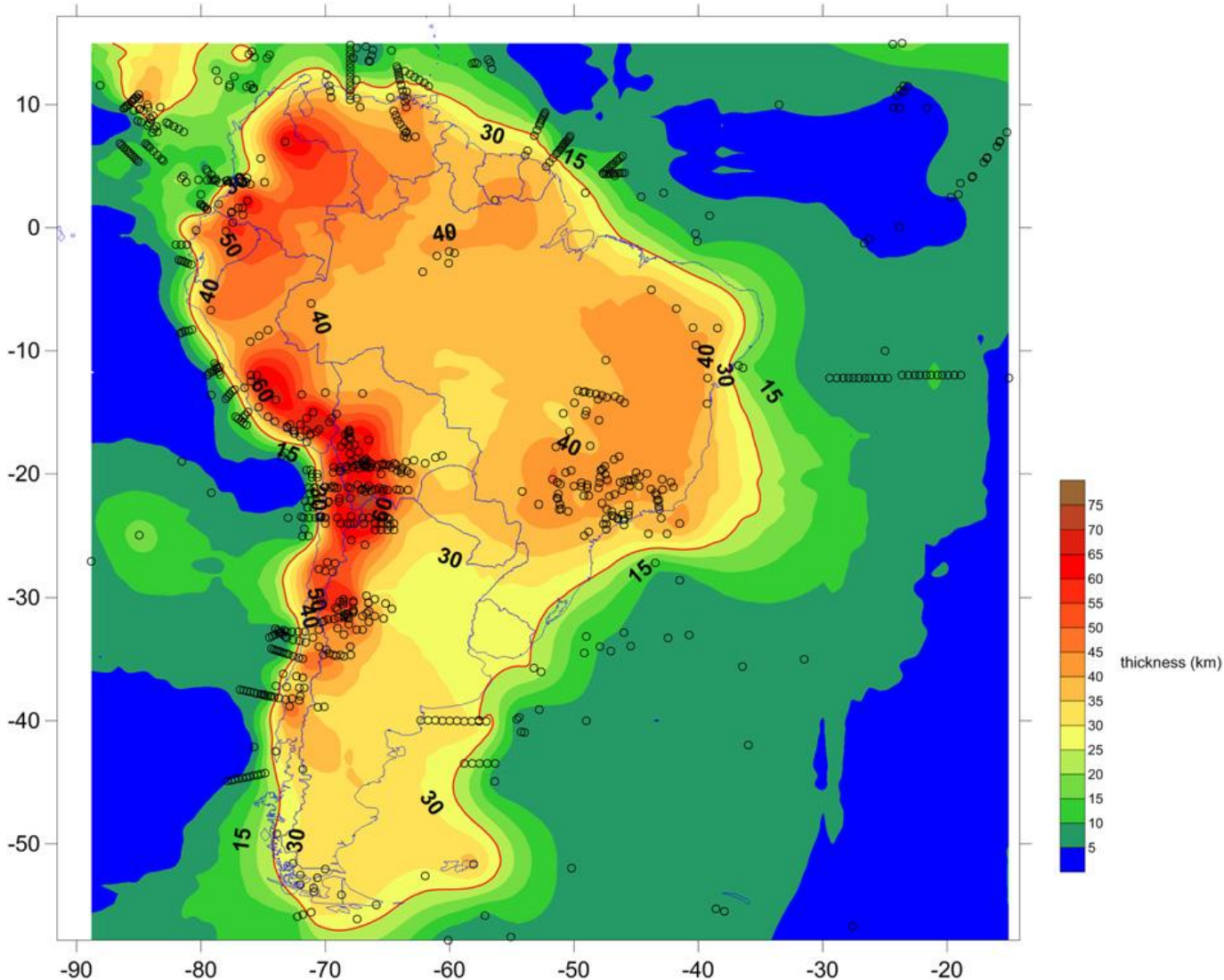
Modelo B3 - B2 + dados de gravimetria dos Andes de Tassara e Echaurren 2012 - figura 11. Modelo preferido, Andes tem crosta espessa.

- H continental estável 40 km
- H > 40 km : escudo Amazônico e Atlântico. No Amazônico parece correlacionar com o Arqueano definido por Tassinari e Macambira (1999). No Atlântico, H > 45 km na Bacia do Paraná.
- H pequeno no Transbrasiliano, especialmente sob a Bacia do Parnaíba
- H pequeno nas bordas S e E do craton Amazônico - extensão do Arco magmático de Goiás?
- craton do Rio de La plata H . 40 km
- Patagonia H < 40 km
- Andes H > 70 km na cordilheira leste da Bolívia e em geral H > 5m km para altitudes (h) > 3000 m. Exceção: Puna (25°S), com H < 55 km para h > 4000 m, evento recente (< 4 Ma) de delaminação litosférica, tem direção ENE que tenderia a continuar com o Lineamento Transbrasiliano - crosta fina e fraca desde o Neoproterozóico. Sul do Equador e norte do Peru (~3°S) H ≤ 40 km, não tem dados sísmicos de controle, mas anomalia do geóide é < 10 m (Andes a anomalia de geóide é > 20 m e no Altiplano a anomalia é > 40 m), possível explicação seria a falta de raiz crustal, a cordilheira seria compensada por flexura regional enquanto que no resto dos Andes o modelo de compensação seria de Airy, além disso nessa região a espessura elástica efetiva é de 40 km, enquanto que no resto dos Andes é de 20 km.
- Bacias subandinas e Chaco: H < 35 km, no Chaco H < 30 km. Porque? Possíveis causas: soerguimento flexural: só alguns metros na Moho; topografia dinâmica: elevações da ordem de 2 km; interação com o Lineamento Transbrasiliano e um rifte continental que separou a Laurasia do Proto-Gondwana na dispersão do Rodinia, coincidindo com o mesmo local do fechamento do Oceano Clymene no Cambriano.

Espressura crustal

-
- (3) Chulick, G.S., Detweiler, S., Mooney, W.D., 2013. Seismic structure of the crust and uppermost mantle of South America and surrounding oceanic basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 42: 260-276

Seismic structure of the crust and uppermost mantle of South America and surrounding oceanic basins



espessura grande e variável sob os Andes: 60 km do Peru Central até o Chile. Altiplano, como parte dessa estrutura e comparável ao plato do Tibete: plato continental sobre uma crosta extremamente espessa ao longo de uma margem convergente. Sul do Chile $H > 50$ km mais vai afinando em direção a Terra do Fogo, com $H \sim 30$ km. Norte Andes: menos dados sísmicos, N Peru: $H \sim 40$ km e se espessa novamente ao ir para porção mais ao N: $H \sim 50$ km sob Colombia e W da Venezuela.

escudo das Guianas e Brasileiro: $H > 40$ km, mas afina para $H \sim 35$ km para W, na parte central do continente. Valor observado em outros escudos, como Canadense e Báltico.

valor médio de $45,3 \pm 13,1$ km, mas é irrealista devido à diferença geográfica na distribuição dos dados.

Espressura crustal

-
- (4) van der Meijdea, M., Fadela, I., Ditmarb, P., Hamayunb, M., 2015. Uncertainties in crustal thickness models for data sparse environments: A review for South America and Africa. *Journal of Geodynamics*, 84: 1–18.

Uncertainties in crustal thickness models for data sparse environments: A review for South America and Africa

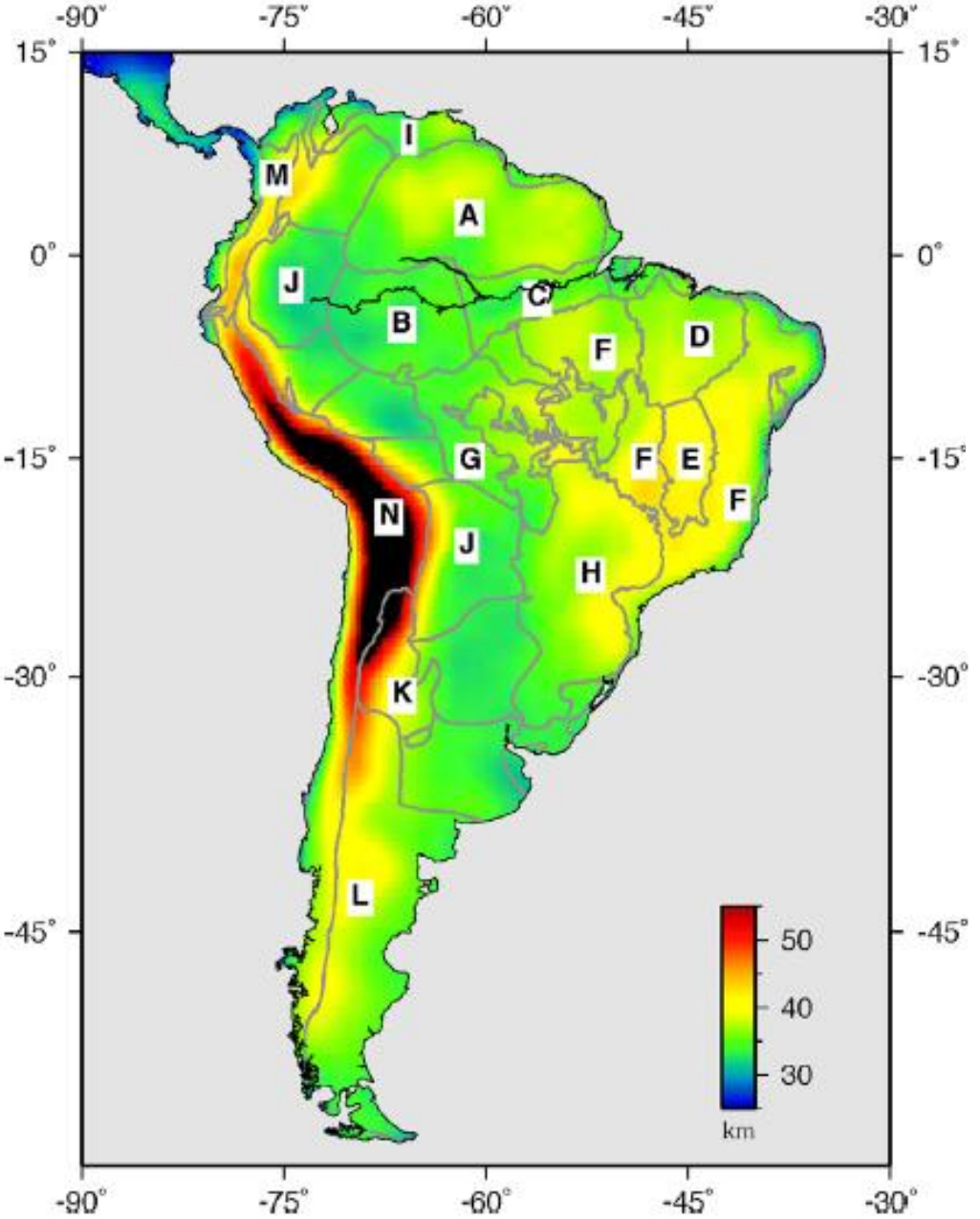
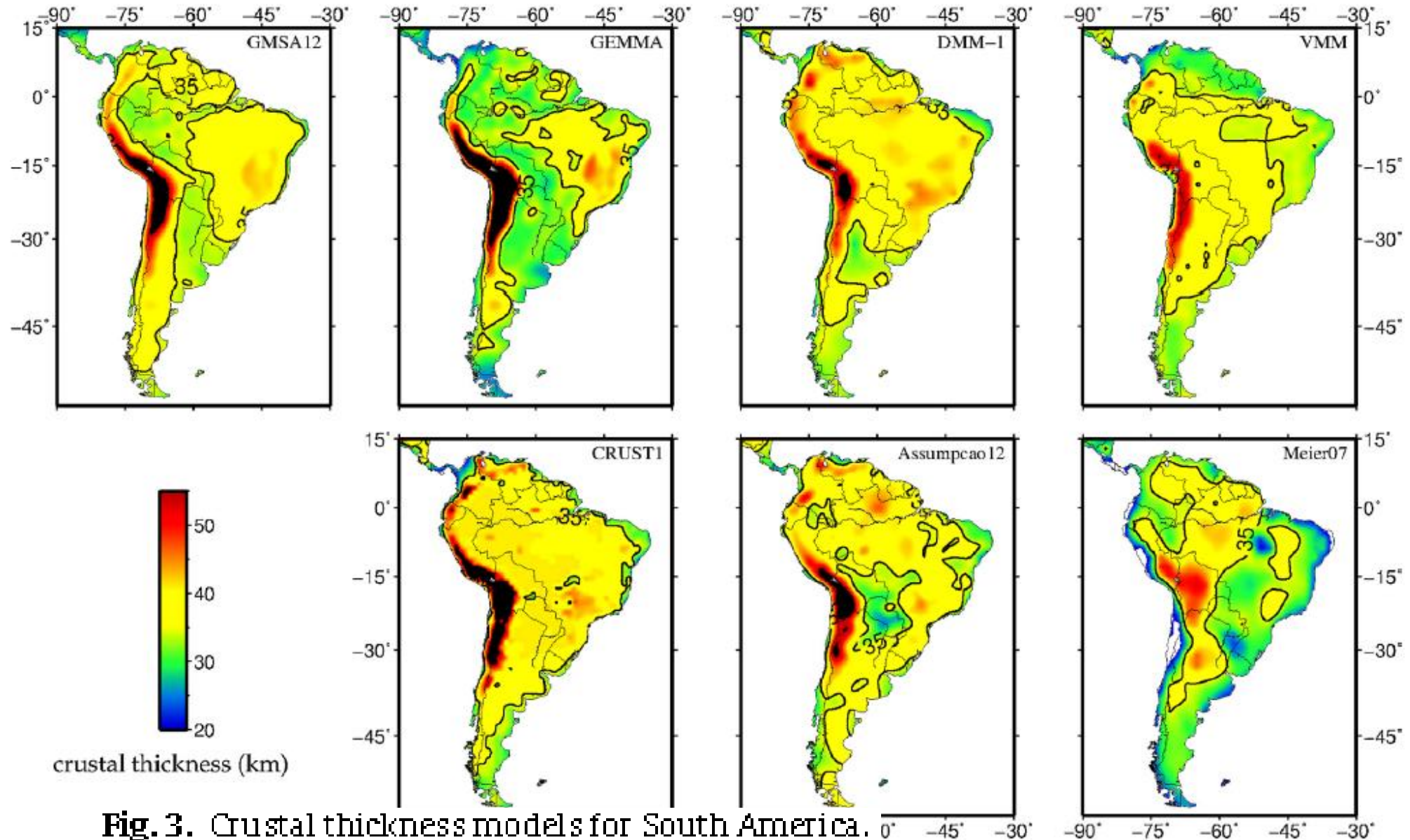
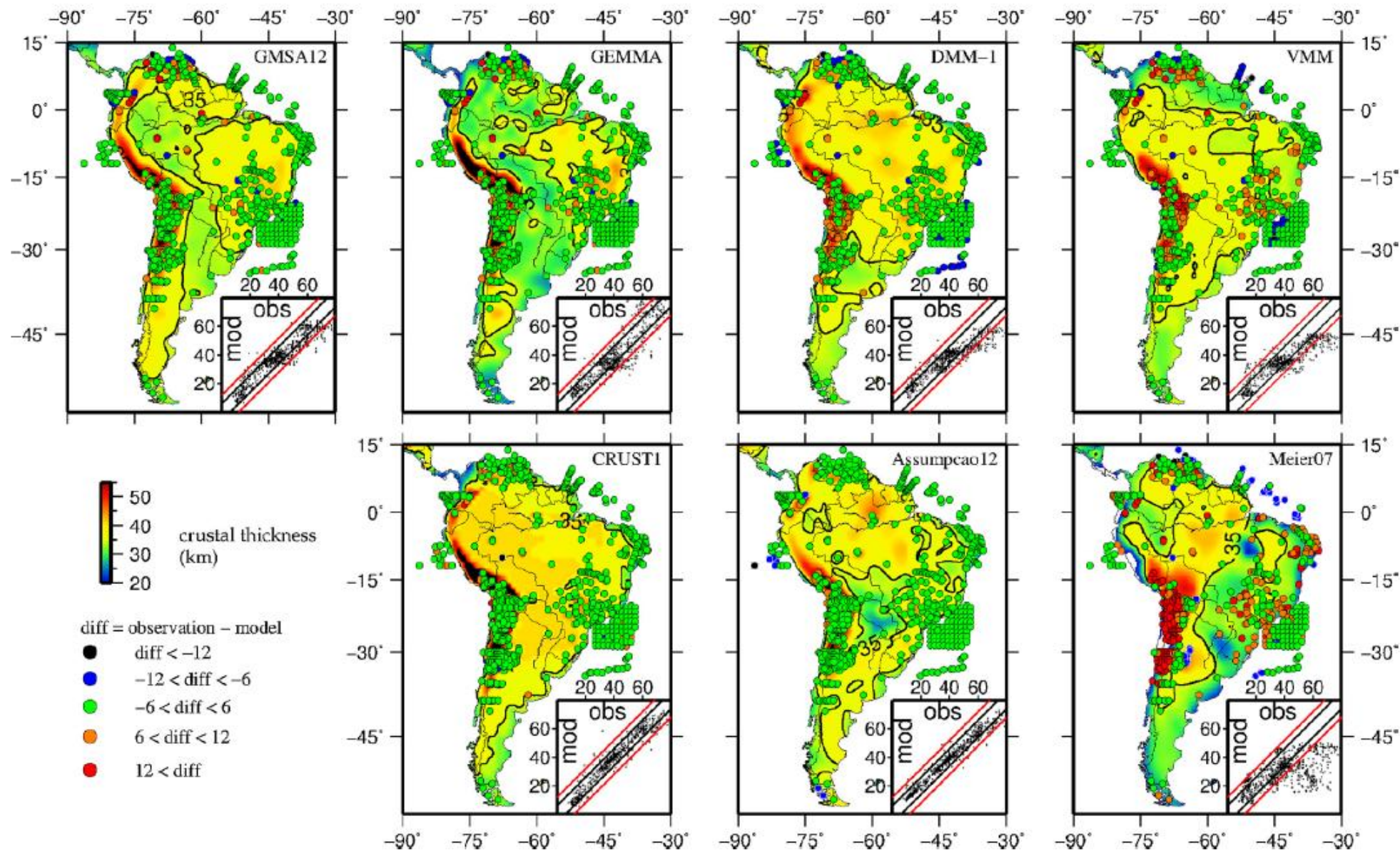


Fig. 2. Final model of crustal thickness (in km) for South America (after van der Meijde et al., 2013a). Geological provinces are modified after Schenk et al. (1997) and Almeida et al. (2000). Letters indicate the different geological provinces; A. Guyana shield, B. Solimões basin, C. Amazonas basin, D. Parnaíba basin, E. São Francisco craton, F. Brazilian shield, G. Paraná basin, H. Chaco basin, I. Guyana basin, J. Andean foreland basins, K. Familina province, L. Patagonia province, M. West-central Cordillera, and N. Andean province.

Uncertainties in crustal thickness models for data sparse environments: A review for South America and Africa





Observação –
 dado sísmico
 Modelo -
 gravimetria

Fig. 4. Comparison of modelled crustal thickness with seismic point data. Deviations are defined as the difference of the seismic point observation with respect to the gravity derived estimate. Green circles are within ± 6 km, blue is between $+6$ and $+12$ km overestimation of the gravity model, black is over $+12$ km. An underestimation of -6 to -12 km is shown by orange circles and over -12 km is shown in red. The inset shows a scatterplot of misfits between seismic observations on the horizontal axis and gravity derived estimates on the vertical. Black line indicates 6 km, the red line 12 km deviation.

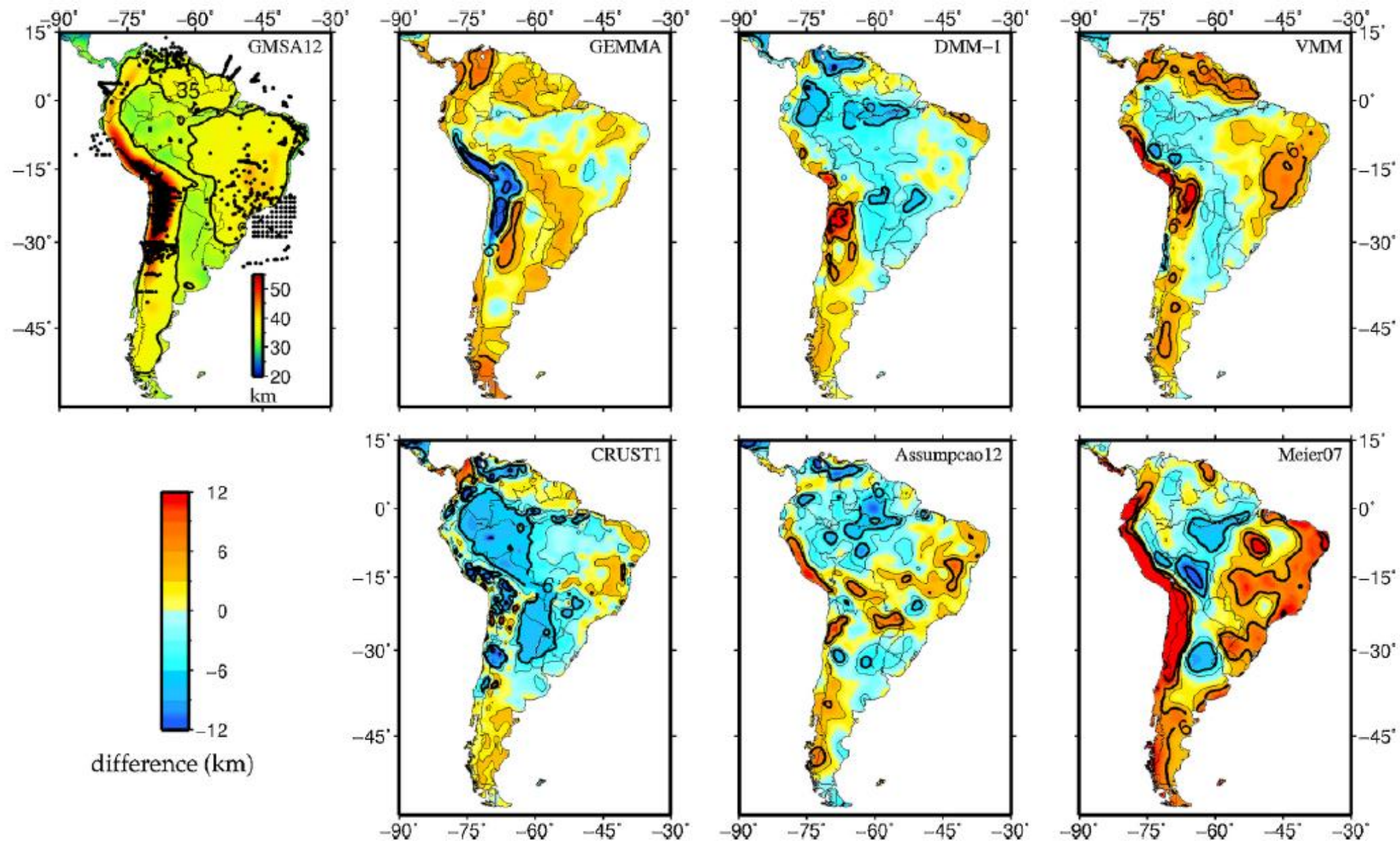


Fig. 5. Difference between the seven models shown in Fig. 3. The reference model is the gravity-only GMSA12 model (top left). All differences are compared to this model. Shown thick contourlines are the ± 6 km deviation and ± 12 km deviation, thin lines indicate ± 3 km deviation.