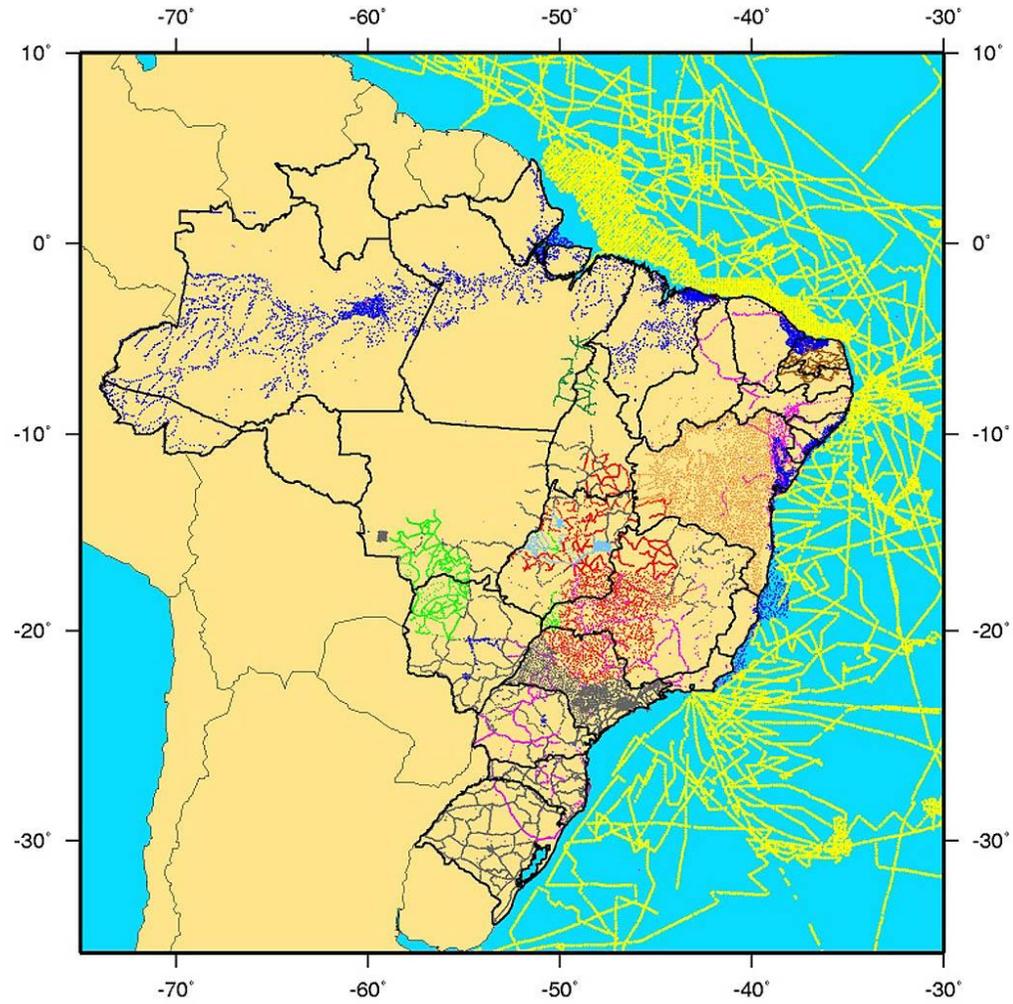


# Gravimetria: fundamentos e aplicações



# Anomalias gravimétricas



# Conceitos e características gerais das anomalias gravimétricas

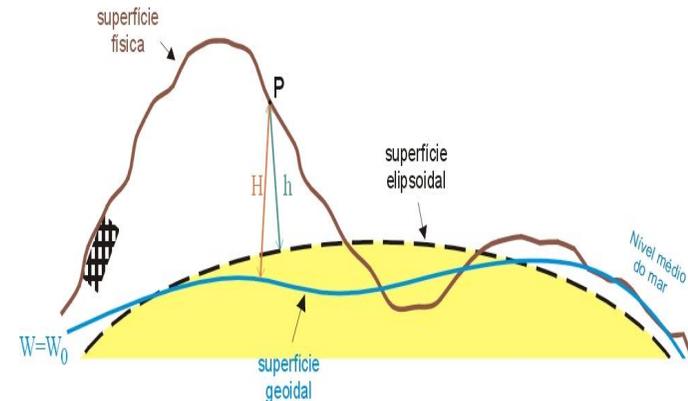
O valor de aceleração da gravidade medido sobre a superfície física deve sofrer algumas correções. A definição adotada de anomalia da gravidade envolve o valor de  $g$  sobre a superfície do geoide, daí a clássica redução da gravidade ao nível do mar.

A definição genérica de anomalia da gravidade tem a fórmula

$$\Delta g = g_o - \gamma$$

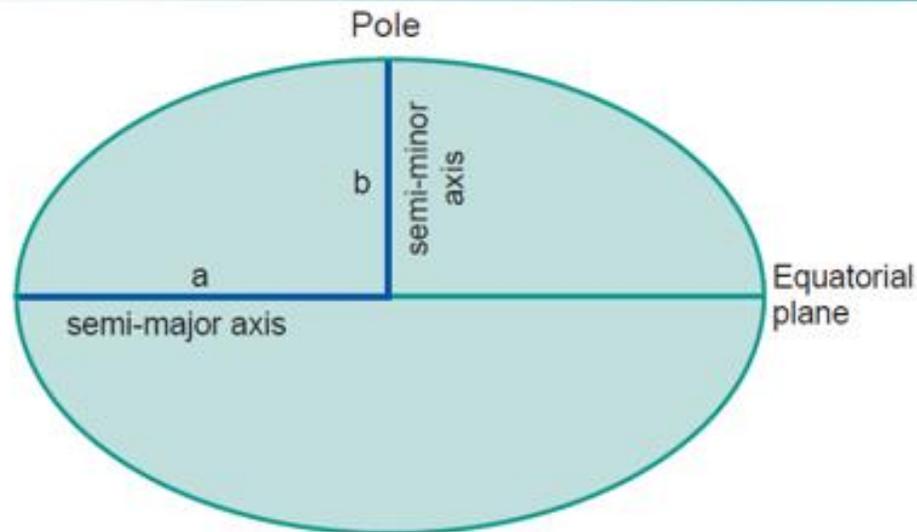
O índice que aparece nesta expressão é para enfatizar que a aceleração da gravidade real está associada a um ponto do geoide; a aceleração da gravidade normal é obtida com a fórmula internacional, em função da latitude da estação, e é calculada sobre a superfície do elipsoide de referência.

Para reduzir a aceleração da gravidade observada (na superfície física) ao nível médio dos mares (geoide), introduzimos a chamada correção ar-livre ( $C_A$ ); a anomalia resultante recebe o mesmo nome.



# A superfície elipsoidal

## The Ellipsoid



Typical values of the parameters for an ellipsoid:

$$a = 6378137.0 \text{ m}$$
$$f = 1/298.26$$

$$b = 6356752.31 \text{ m}$$
$$e = 0.0818187$$

*Flattening:*  
 $f = (a-b)/a$

*Eccentricity:*  
 $e^2 = (a^2 - b^2)/a^2$

# Elipsoides biaxiais mais comuns do século XX

<i>Name</i>	<i>Date</i>	<i>a (m)</i>	<i>b (m)</i>	<i>Use</i>
Everest	1830	6377276	6356079	India, Buma, Sri Lanka
Bessel	1841	6377397	6356079	Central Europe, Chile, Indonesia
Airy	1849	6377563	6356257	Great brittain
Clarke	1866	6378206	6356584	North America, Philippines
Clarke	1880	6378249	6356515	France, Africa (parts)
Helmert	1907	6378200	6256818	Africa (parts)
International (or Hayford)	1924	6378388	6356912	World
Krasovsky	1940	6378245	6356863	Russia, Eastern Europe
GRS80	1980	6378137	6356752	North America
WGS84	1984	6378137	6356752	World (GPS measurements)

# A fórmula internacional da aceleração da gravidade

---

Teorema de Clairaut

$$\frac{\gamma_p - \gamma_e}{\gamma_e} = \beta = \frac{5}{2}m - \alpha \quad , \quad \text{onde } m = \frac{a\omega^2}{\gamma_e}$$

$$\alpha \cong \frac{1}{300} = 0,00333333... \quad \beta \cong 0,005 \quad ; \quad m \cong 0,00333...$$

A partir do teorema de Clairaut, obtém-se a fórmula internacional da aceleração da gravidade

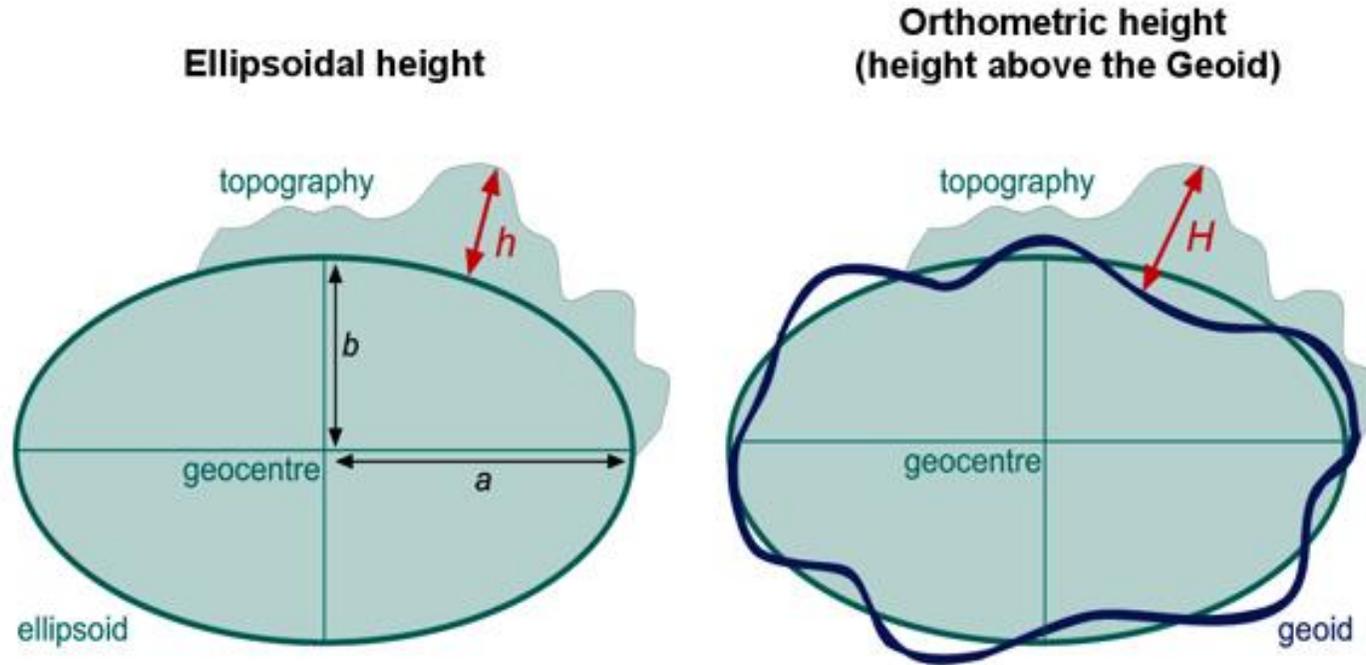
$$\gamma = 978032,7 (1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000058 \sin^2 2\varphi) \text{ mGal}$$

(fórmula do GRS-80, Moritz 1984)

Vale lembrar que  $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2}$ , e portanto  $1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ cm s}^{-2}$

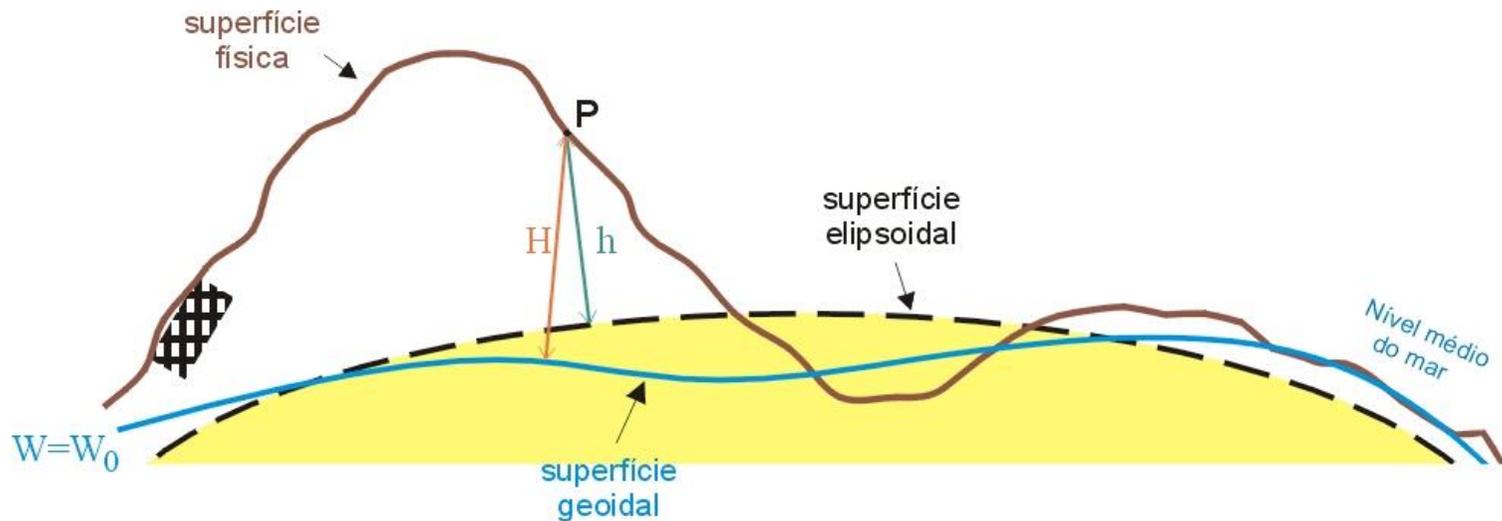
# Altitude geométrica *versus* altitude ortométrica

## Ellipsoidal height versus Orthometric height

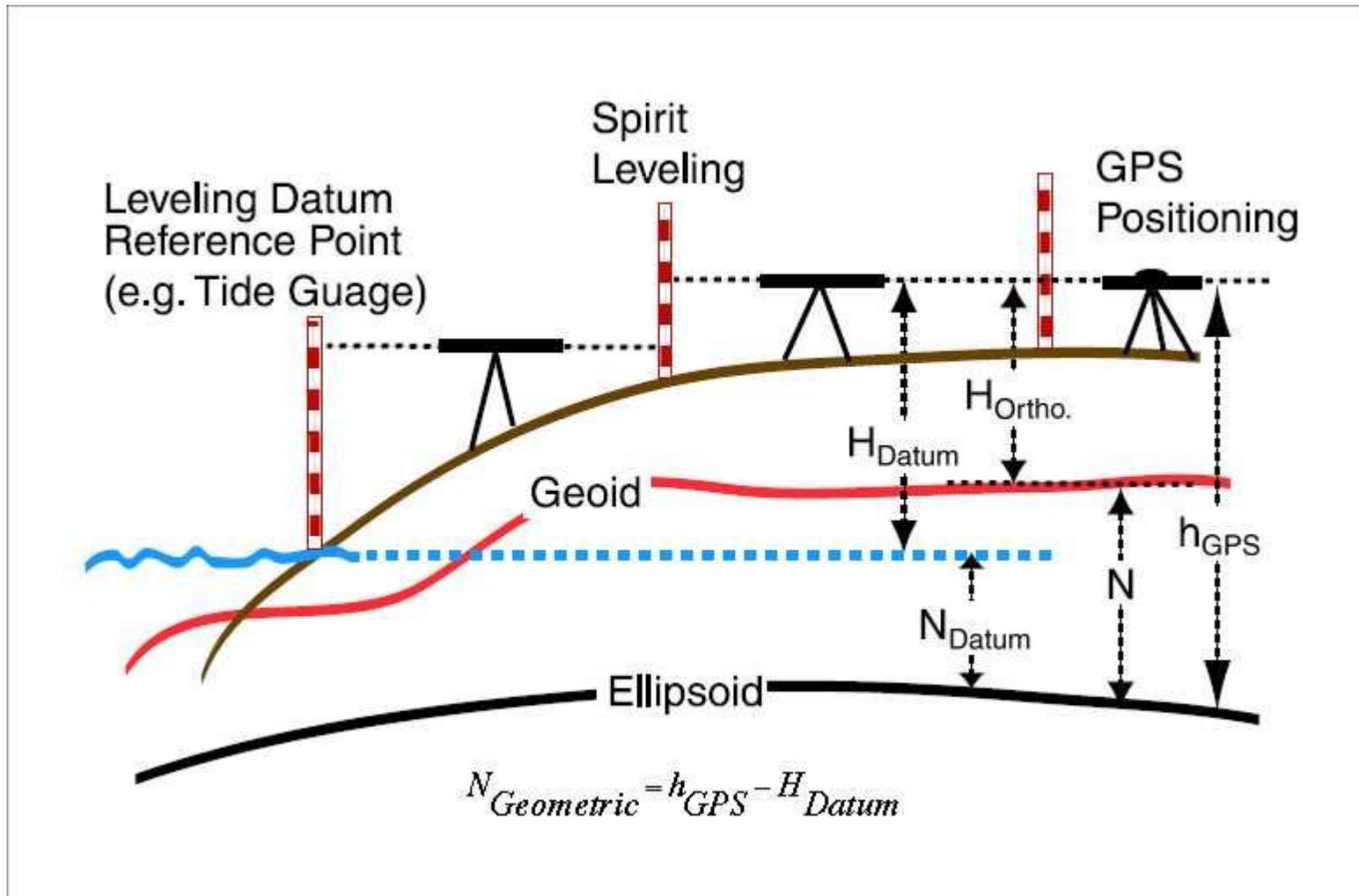


# A superfície geoidal

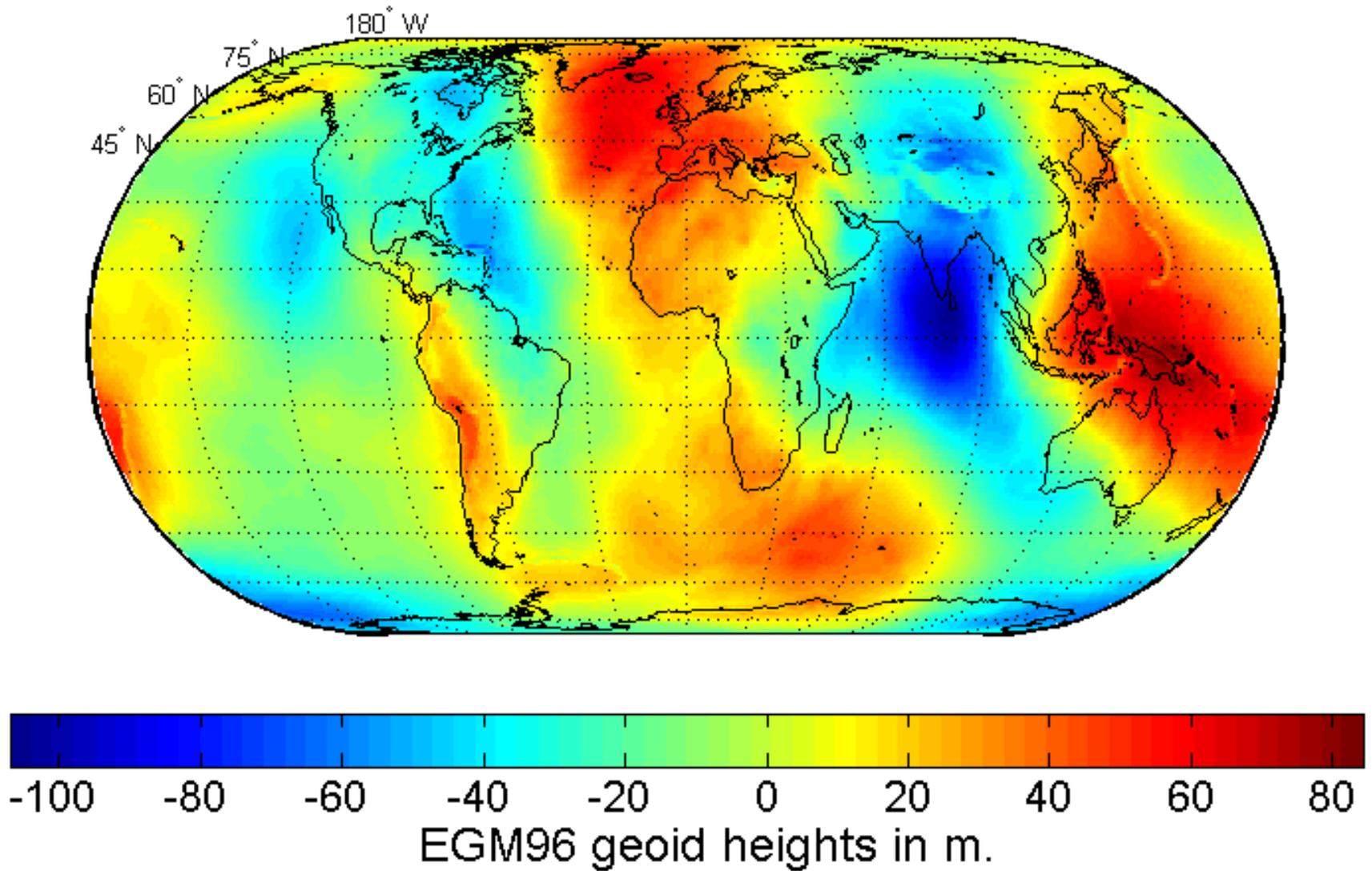
A superfície geoidal é a superfície equipotencial do campo de gravidade que coincide com o nível médio do mar nos oceanos não perturbados. Sua importância prática reside no fato de que o nível médio do mar é a referência para a altitude ortométrica, utilizada nas correções gravimétricas.



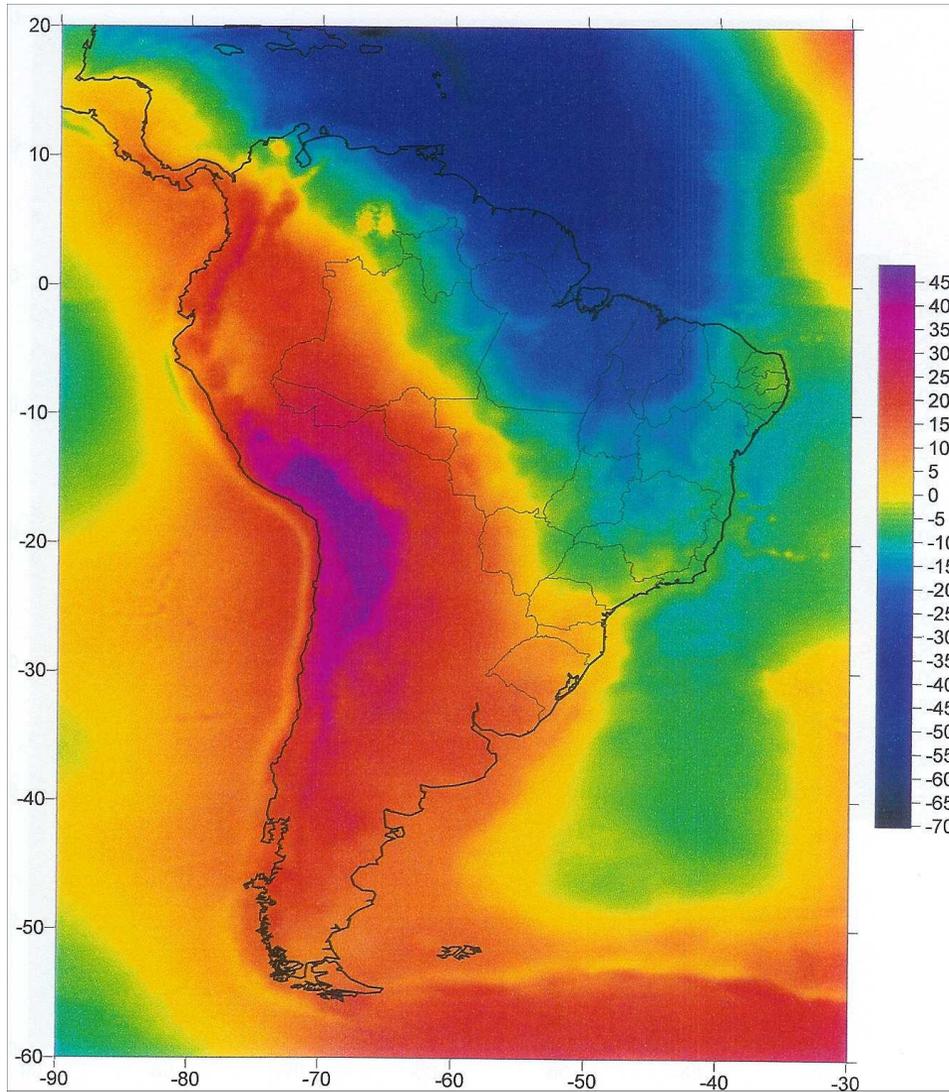
# A superfície geoidal



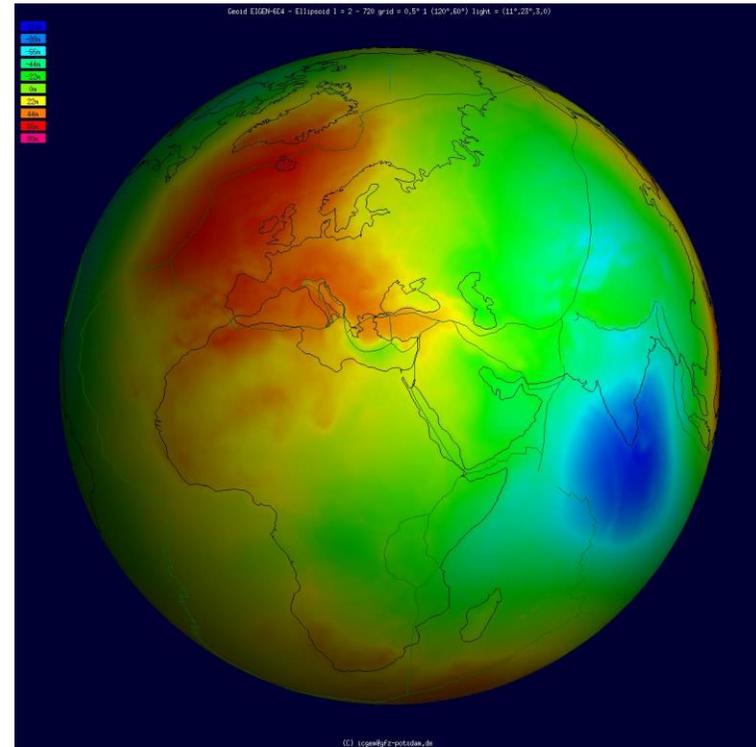
# A superfície geoidal



# A superfície geoidal



Altura geoidal para a América do Sul, em metros (Sá, 2004)



# Conceitos e características gerais das anomalias gravimétricas

---

## Anomalia ar-livre

A correção ar-livre para uma estação gravimétrica com altitude ortométrica  $h$  é expressa por

$$C_A = \frac{\partial \gamma}{\partial h} h \quad (1)$$

$\frac{\partial \gamma}{\partial h}$  é o gradiente vertical da aceleração da gravidade. Nos trabalhos rotineiros

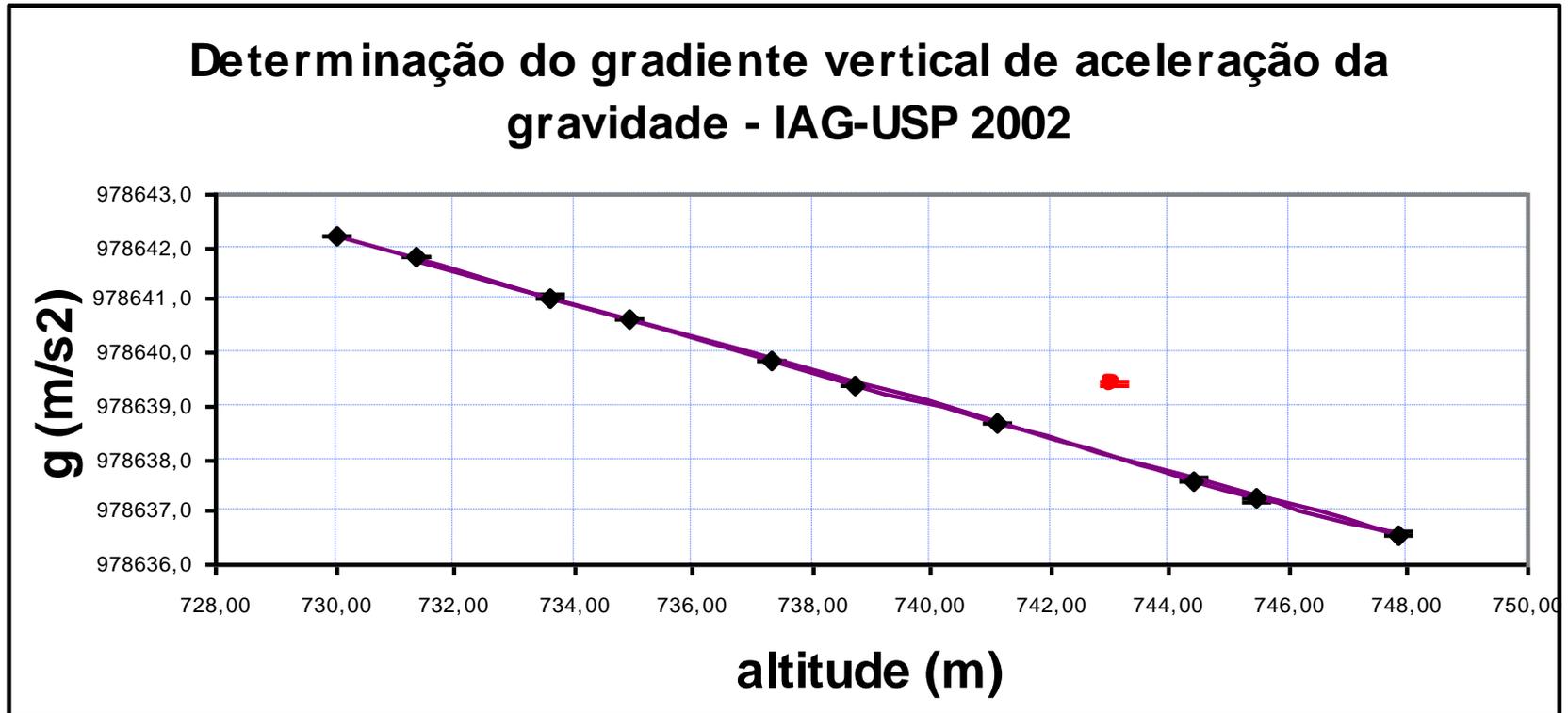
pode-se utilizar o gradiente da aceleração da gravidade normal e tem-se então

$$C_A = 0,3086 h \quad (2)$$

com  $h$  em metros e  $C_A$  em mGal, resultando para a anomalia ar-livre

$$\Delta g_A = \Delta g + 0,3086 h \quad (3)$$

# Conceitos e características gerais das anomalias gravimétricas



**OBS: a unidade de g no gráfico é, na realidade, mGal, e não m/s<sup>2</sup>**

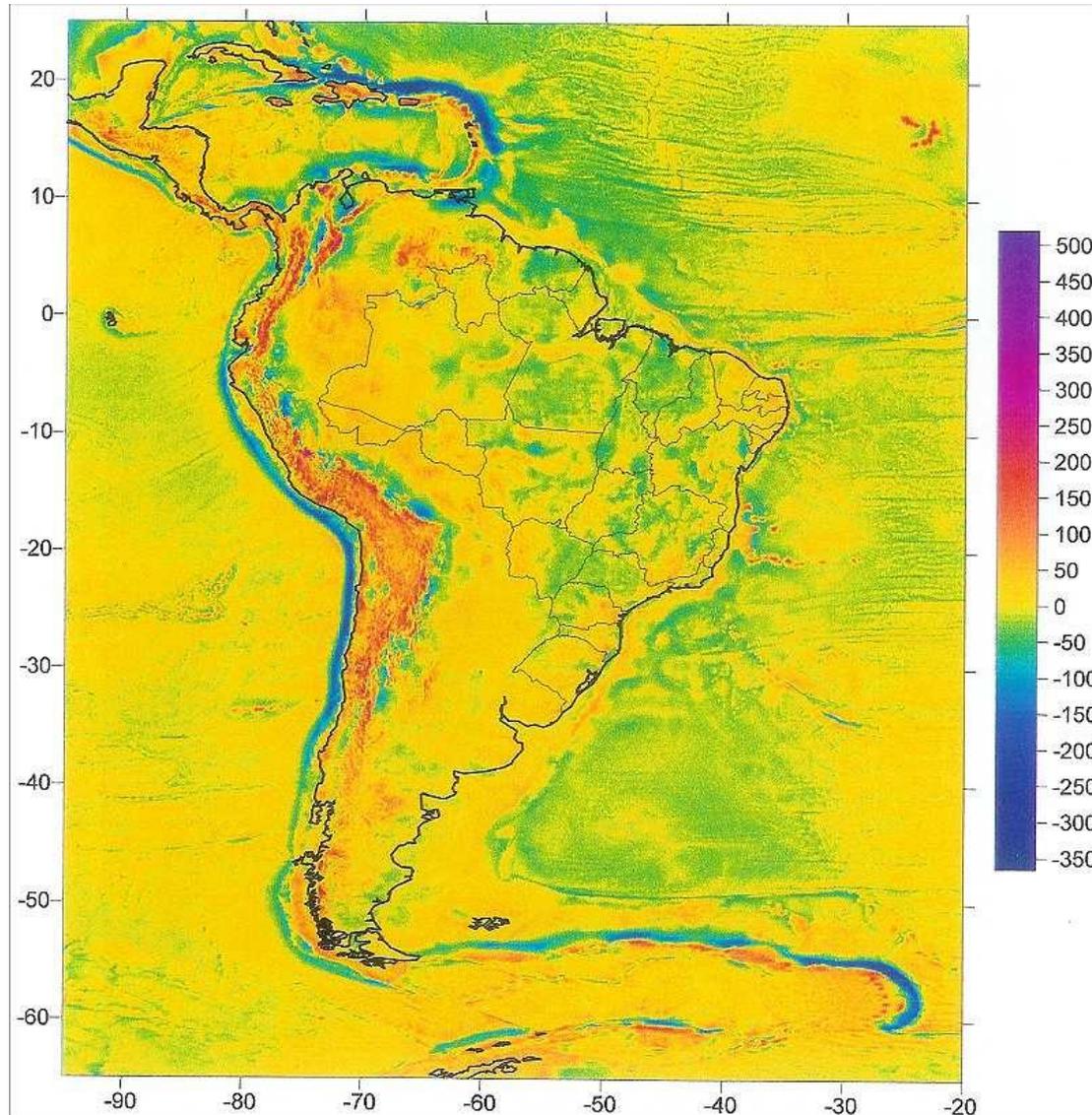
$$Y(x) = ax + b$$

$$a = -0,3190 \pm 0,0009 \text{ mGal/m}$$

Valor padrão utilizado na gravimetria: - 0,3086 mGal/m (Diferença : 3,37 %)

Valor para uma Terra de raio R e massa M : -0,3080 mGal/m (Diferença: 3,57%)

# Conceitos e características gerais das anomalias gravimétricas



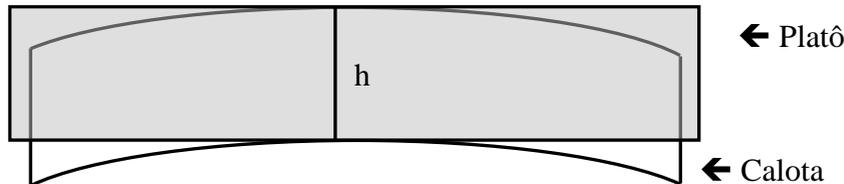
Anomalia ar-livre  
da América do Sul  
(Sá, 2004)

# Conceitos e características gerais das anomalias gravimétricas

A anomalia Bouguer considera a massa existente entre o geóide e a superfície física da Terra. A remoção do efeito das massas topográficas pode ser expressa por

$$C_B = -A - B + C$$

O primeiro termo (**A**) constitui a correção Bouguer propriamente dita: corresponde à componente vertical da atração exercida por um platô horizontal de espessura  $H$  sobre um ponto de massa unitária situado na sua superfície.



Platô e calota de Bouguer

$$A = F_z = G\rho \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^h z dz \int_0^\infty r (r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}} dr$$

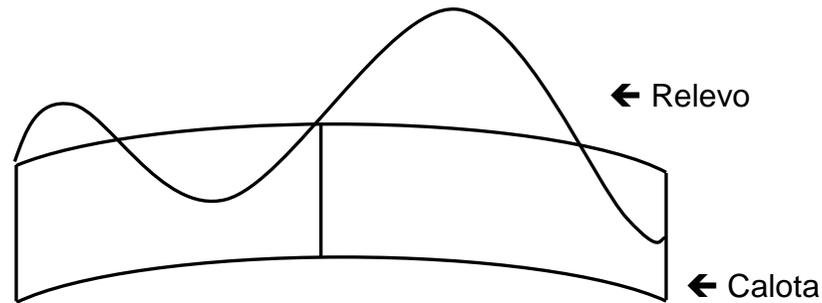
$$A = 2\pi G \rho h$$

Adotando os valores  $G = 6,67 \times 10^{-8} \text{ erg.cm}^2/\text{g}^2$  e  $\rho = 2,67 \text{ g/cm}^3$ , temos para a primeira parte da correção Bouguer a fórmula **A = 0,1119 h**

# Conceitos e características gerais das anomalias gravimétricas

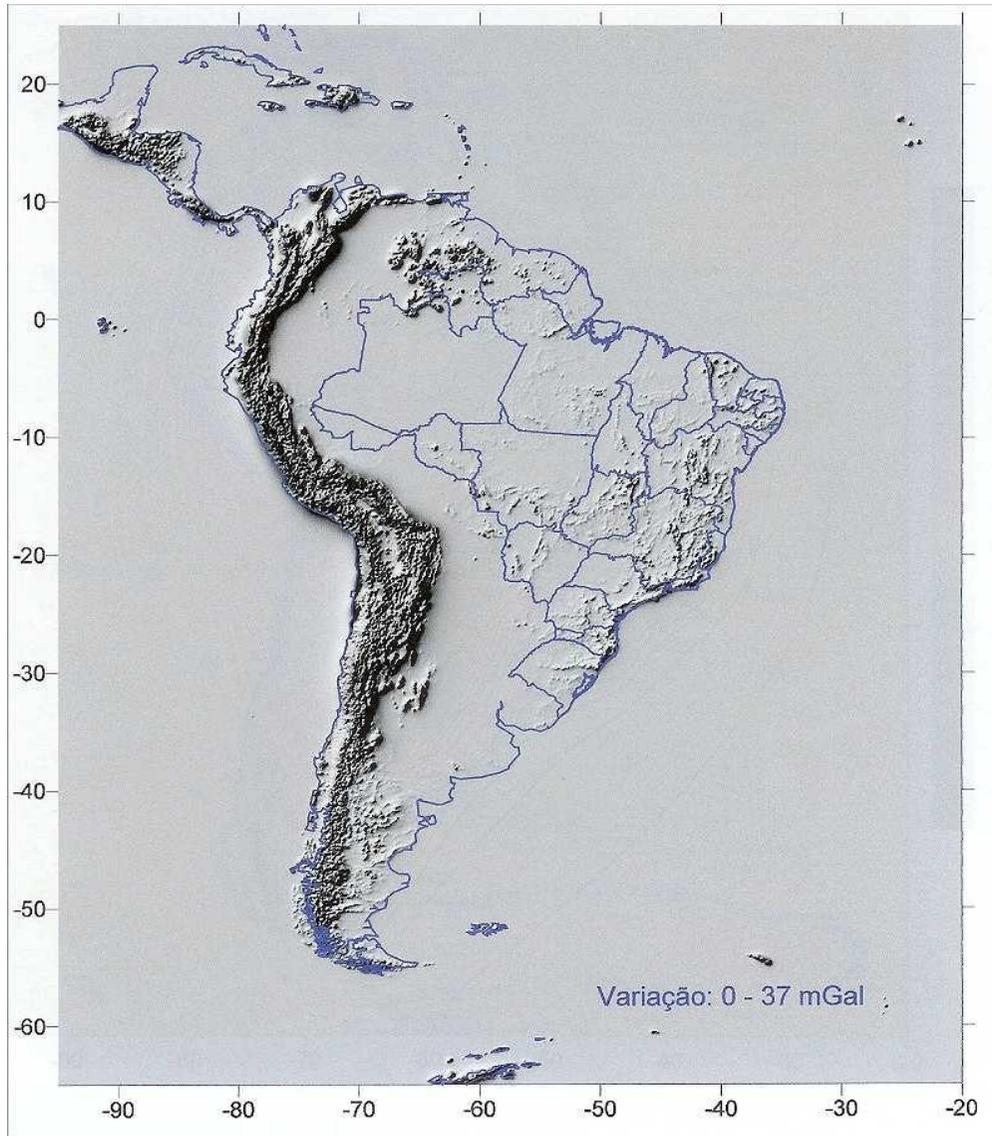
Essa componente, na realidade, se aproxima da que seria produzida por uma calota de mesma espessura e com raio esférico de 166,7 km. Esta, aliás, é a função do segundo termo (B); converter os valores do platô para os correspondentes em uma calota esférica.

O terceiro termo (C), chamado de correção topográfica, considera as irregularidades da topografia em relação à calota. Normalmente utiliza-se aproximação plana para os cálculos.



Correção topográfica

# Conceitos e características gerais das anomalias gravimétricas



Correção topográfica para a América do Sul (Sá, 2004)

# Conceitos e características gerais das anomalias gravimétricas

---

A correção topográfica normalmente adquire valores relativamente pequenos. Em escala regional, esta correção pode ser negligenciada desde que a topografia seja plana ou moderada. Em escala local, no entanto, ela tem que ser considerada, pois as anomalias envolvidas, neste caso, normalmente são pequenas. Para a maior parte do território brasileiro, esta correção é inferior a 3 mGal.

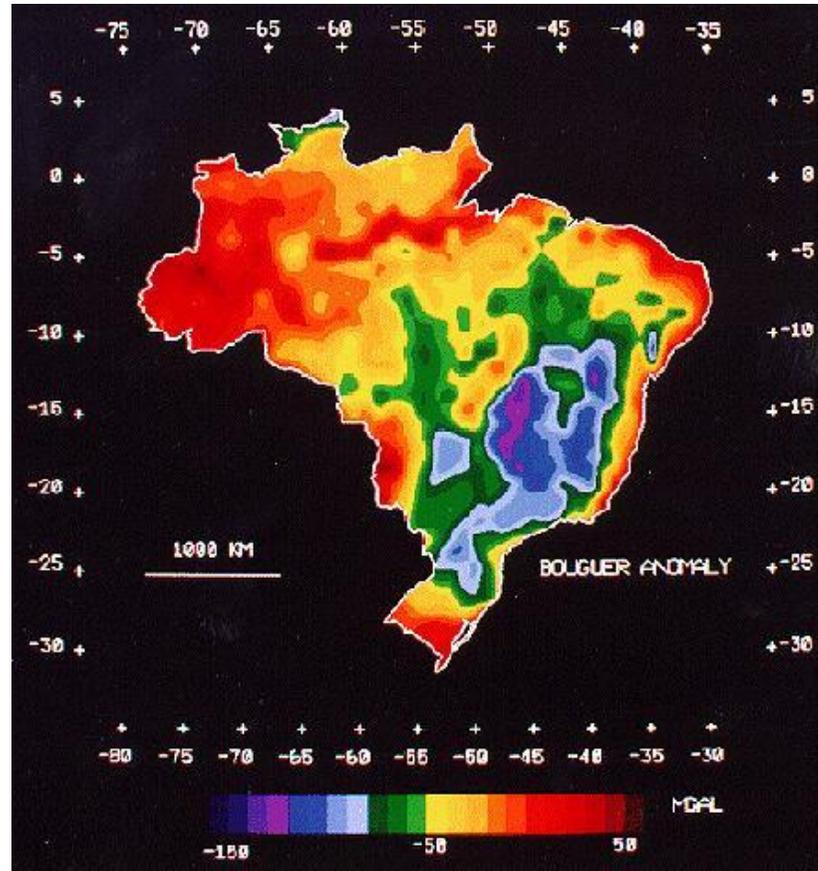
O cálculo da correção topográfica envolve boas cartas topográficas da região vizinha à estação, e um processamento intenso de dados, motivos pelos quais normalmente não era utilizada até o final do século XX.

Considerando o termo B, que corrige o platô de Bouguer para uma calota e a correção topográfica ( $C=0$ ), se  $h$  for dado em metros, a anomalia Bouguer será, em mGal

$$\Delta g_B = g - \gamma + 0,3086 h - 0,1119 h - B + C$$

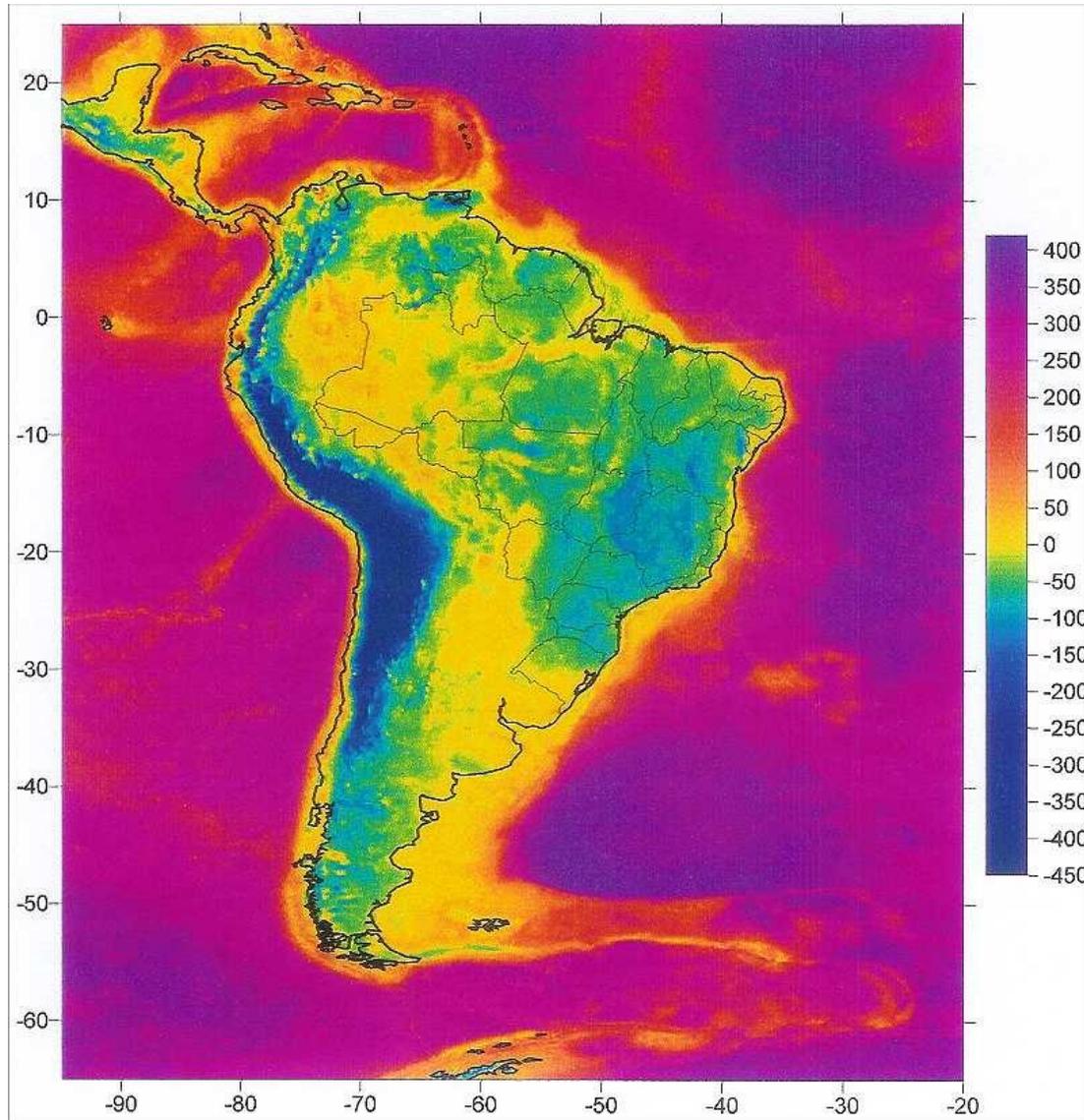
com  $\gamma$  calculado com a fórmula da aceleração da gravidade teórica (normal).

# Conceitos e características gerais das anomalias gravimétricas



Mapa de anomalia Bouguer do Brasil (Ussami et al., 1989)

# Conceitos e características gerais das anomalias gravimétricas



Anomalia Bouguer da América do Sul (Sá, 2004)

# Conceitos e características gerais das anomalias gravimétricas

---

## Anomalia isostática

A isostasia estuda o estado de equilíbrio da litosfera sob os efeitos da gravidade. Aos excessos (montanhas) e às deficiências (oceanos) de massa em relação ao geóide correspondem massas internas de compensação.

O equilíbrio isostático pode estar plenamente atingido em certas regiões, por isso ditas compensadas. Em outras pode se achar em fase de processamento (são as regiões ditas subcompensadas) ou ter sido ultrapassado (regiões supercompensadas), daí um processamento no sentido inverso.

Não dispomos de uma prova concreta e cabal que a isostasia seja uma realidade. Mas o fato de serem as anomalias de Bouguer sistematicamente negativas nos continentes, e positivas nas regiões oceânicas, parece indicar a existência de irregularidades internas da densidade, positivas no primeiro caso e negativas no segundo, tal como preconiza a isostasia. Uma anomalia isostática aproximadamente nula indicaria equilíbrio isostático; as anomalias fortemente negativas corresponderiam regiões supercompensadas e às positivas, regiões subcompensadas.

# Conceitos e características gerais das anomalias gravimétricas

---

Um exemplo notável é a existência de anomalias negativas na península escandinava e Finlândia, e também na parte nordeste dos Estados Unidos, regiões onde a crosta acha-se, desde a glaciação do quaternário, em elevação concordante com evidências de natureza geológica e geodésica.

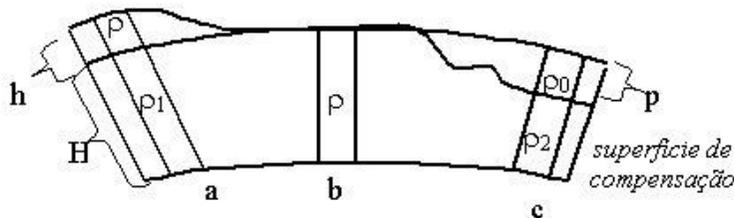
A isostasia foi descoberta na Índia. A diferença entre as latitudes geodésicas dos vértices Kaliana, no sopé do Himalaia, e Kalianpur, distanciado do primeiro cerca de 6700 km, superava em 5" a correspondente diferença entre as latitudes astronômicas, discrepância inadmissível face ao grau de precisão da triangulação indiana.

Pratt atribuiu-a à maior atração exercida sobre Kaliana pela enorme cordilheira; mas, passando aos cálculos concluiu, pra surpresa sua e geral, que a ação do Himalaia deveria se traduzir por uma discrepância não de 5", mas de 15". As explicações iniciais propiciaram a Airy a oportunidade de lançar os fundamentos da isostasia. Posteriormente Pratt retornou ao assunto propondo também um sistema isostático. Ambos preconizavam uma deficiência de densidade interna para compensar os excessos superficiais apesar de encararem o problema por prismas completamente diversos.

# Conceitos e características gerais das anomalias gravimétricas

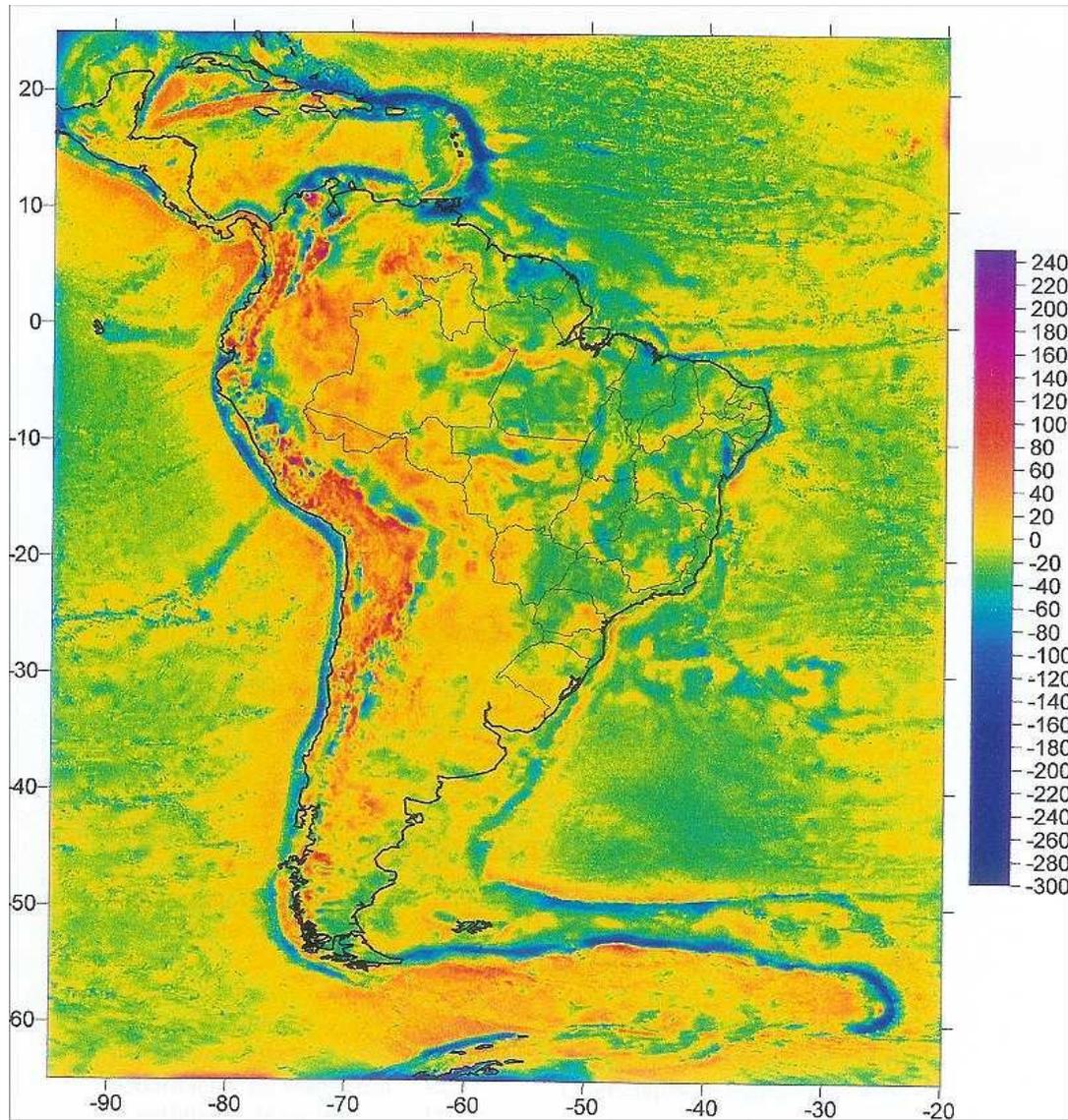
São três os principais modelos utilizados para a correção isostática:

- Modelo de Airy – admite que a crosta tenha uma densidade constante, e a variação de topografia é compensada por uma variação de nível de compensação em subsuperfície;
- Modelo de Pratt – considera a crosta com um nível de compensação constante, com variação lateral de densidades;
- Modelo de Vening-Meinesz – admite que a crosta é uma placa elástica fina, com uma rigidez finita, capaz de suportar esforços de certa magnitude, deformando-se para cargas de maior magnitude. É um modelo de compensação regional, pois a ação de uma carga em um determinado ponto influencia uma região ao longo da placa.



Esquema do modelo de compensação isostática de Pratt.

# Conceitos e características gerais das anomalias gravimétricas



Anomalia isostática  
para a América do Sul  
– modelo de Airy-  
Heiskanen (Sá, 2004)