

**UFPR**  
Universidade  
Federal do Paraná

Eng. Cartográfica e de Agrimensura

# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

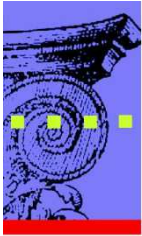
---

## GA112 – FUNDAMENTOS EM GEODÉSIA

### Capítulo 5

#### 5.4.3 – O fenômeno das marés terrestres

Regiane Dalazoana



UFPR  
Universidade  
Federal do Paraná

Eng. Cartográfica e de Agrimensura

# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

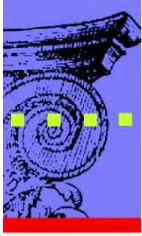
## REVISÃO

- Além da gravimetria terrestre que restringe-se a parte continental do globo, existem outras formas de obtenção do valor da gravidade tanto na parte continental como na parte oceânica.

Possibilidades de obtenção:

- Gravímetros em navios
- Gravímetros em aviões
- Análise da órbita perturbada dos satélites
- Altimetria por satélites
- Missões satelitais dedicadas ao campo da gravidade (por exemplo: CHAMP, GRACE, GOCE)

Plataformas móveis  
(helicópteros,  
veículos - menos  
usados)



UFPR

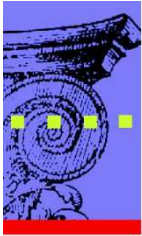
Universidade  
Federal do Paraná

## FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

---

Eng. Cartográfica e de Agrimensura

- Diversas missões espaciais foram e estão sendo propostas com a finalidade de se obter um modelo acurado do campo da gravidade terrestre - missões gravimétricas com satélites orbitando em órbitas baixas (poucas centenas de quilômetros)
- Na realidade, bons modelos do campo da gravidade terrestre são produzidos a partir da combinação de diferentes fontes de dados tais como: dados de satélites, dados de topografia e dados gravimétricos.



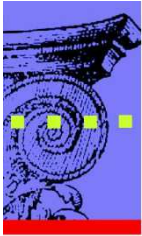
# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

UFPR  
Universidade  
Federal do Paraná

Eng<sup>o</sup> Cartográfica e de Agrimensura

- O geopotencial pode ser descrito através de funções denominadas de harmônicos esféricos
- Os harmônicos esféricos são funções com comportamento periódico que se prestam à representação da variação de um campo de valores sobre superfícies esferoidais

$$W(r, \phi, \lambda) = \underbrace{\frac{GM}{r} \left[ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{a}{r} \right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \phi) \right]}_V + \underbrace{\frac{1}{3} \omega^2 r^2 [1 - P_{20}(\sin \phi)]}_Q$$



UFPR

Univer  
Federal c

# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

$$W(r, \phi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{a}{r} \right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \phi) \right] + \frac{1}{3} \omega^2 r^2 [1 - P_{20}(\sin \phi)]$$

$\phi$ : latitude

$\lambda$ : longitude

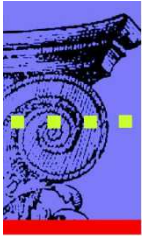
$r$ : distância do ponto ao geocentro

$a$ : raio equatorial

$C_{nm}$ ,  $S_{nm}$ : coeficientes de Stokes, obtidos da análise do movimento dos satélites por exemplo

$P_{nm}$ : polinômios de Legendre

$\omega$ : velocidade angular



# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

UFPA

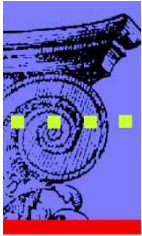
Univ.  
Federa

$$W(r, \phi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{a}{r} \right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \phi) \right] + \frac{1}{3} \omega^2 r^2 [1 - P_{20}(\sin \phi)]$$

A fórmula envolve as quatro constantes fundamentais da Geodésia:

$a$ ;  $GM$ ;  $\omega$ ;  $J_2 = -C_{20}$

Modelos do geopotencial são na realidade tabelas dos coeficientes  $C_{nm}$  e  $S_{nm}$ . Por exemplo, o EGM2008 é completamente desenvolvido até grau e ordem ( $n$  e  $m$ ) 2159 (precisão de 5 a 10cm)



UFPR  
Universidade  
Federal do Paraná

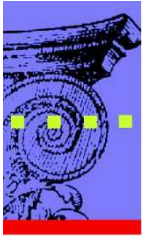
Eng. Cartográfica e de Agrimensura

## FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

---

- $C_{nm}$  e  $S_{nm}$  até grau e ordem 90 são usualmente obtidos da análise das órbitas de satélites (órbitas perturbadas)
- Para grau e ordem maiores que 90 é necessário utilizar gravimetria e modelos digitais de elevação
- Quanto maior o grau e ordem do modelo, melhor é sua resolução

Assim são desenvolvidos modelos globais como o EGM2008, até grau 2159, que corresponde a uma resolução espacial de cerca de 9 km



UFPR  
Universidade  
Federal do Paraná

Eng. Cartográfica e de Agrimensura

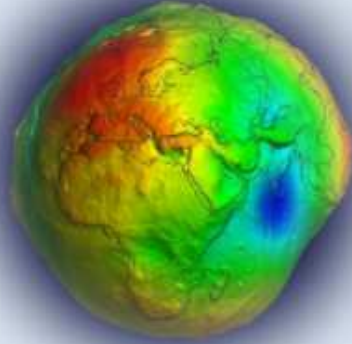
## FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

---

- Dos modelos do geopotencial podem ser derivados valores de gravidade, anomalias da gravidade, deflexão da vertical e altura geoidal, por exemplo
- Atualmente, os modelos do geopotencial podem ser gerados a partir de dados:
  - Apenas de satélites: os modelos são derivados da análise do movimento orbital de satélites artificiais via o seu rastreamento
  - Combinados: combinação de dados de satélite, observações de gravidade terrestre e oceânica, topografia e levantamentos aerogravimétricos
  - Adaptados: combinação dos dois anteriores ou inclusão de novos dados



# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA



ICGEM Home

Gravity Field Models

Static Models

Temporal Models

Topography related Models

Calculation Service

3D Visualisation

Static Models

Temporal Models

Trend & Amplitude

Spherical Harmonics

Evaluation

Spectral domain

GNSS Leveling

FAQ

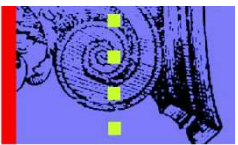
ICGEM

International Centre for Global Earth Models

<http://icgem.gfz-potsdam.de/home>

# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

## ICGEM



URPPR

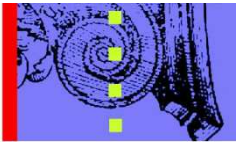
Universidade  
Federal do Paraná

### International Centre for Global Earth Models

e Agrimensura

Nr	Model	Year	Degree	Data	References	Download	Calculate	Show	DOI
161	XGM2016	2017	719	A, G, S(GOCC005s)	Patl, R. et al, 2017	gfc.zip	Calculate	Show	✓
160	Tongji-Grace02s	2017	180	S(Grace)	Chen, Q. et al, 2016	gfc.zip	Calculate	Show	✓
159	NULP-02s	2017	250	S(Goce)	A. N. Marchenko et al, 2016	gfc.zip	Calculate	Show	✓
158	HUST-Grace2016s	2016	160	S(Grace)	Zhou, H. et al, 2016	gfc.zip	Calculate	Show	✓
157	ITU_GRACE16	2016	180	S(Grace)	Akyilmaz, O. et al, 2016	gfc.zip	Calculate	Show	✓
156	ITU_GGC16	2016	280	S(Goce), S(Grace)	Akyilmaz, O. et al, 2016	gfc.zip	Calculate	Show	✓
155	EIGEN-6S4 (v2)	2016	300	S(Goce), S(Grace), S(Lageos)	Forste, C. and Bruinsma, S.L., 2016	gfc.zip	Calculate	Show	✓
154	GOCC005c	2016	720	(see model), A, G, S	Fecher, T. et al, 2016	gfc.zip	Calculate	Show	✓
153	GGM05C	2015	360	A, G, S(Goce) S(Grace)	Ries, J. et al, 2016	gfc.zip	Calculate	Show	✓
152	GECCO	2015	2190	EGM2008, S(Goce)	Gilardoni, M. et al, 2016	gfc.zip	Calculate	Show	
151	GGM05G	2015	240	S(Goce), S(Grace)	Bettadpur, S. et al, 2015	gfc.zip	Calculate	Show	
150	GOCC005s	2015	280	(see model), S	Mayer-Gürr, T. et al, 2015	gfc.zip	Calculate	Show	

Eng.



Universidade  
Federal do Paraná

# Eng. Cartográfica e de Agrimensura

THE SATELLITE-ONLY GRACE/GOCE GRAVITY MODEL GGM05G  
=====

GGM05G is an unconstrained global gravity model complete to degree and order 240 determined from 1) GRACE K-band intersatellite range-rate data, GPS tracking and GRACE accelerometer data, and 2) GOCE gradiometer data (ZZ+YY+XX+XZ) spanning the entire mission using a band pass filter of 10-50 mHz and polar gap filled with synthetic gradients from GGM05S to degree/order 150 evaluated at 200-km altitude.

The value for C20 has been replaced with a value derived from satellite laser ranging.

Because GGM05G is not regularized in any way, the errors increase with degree.

It is not recommended to use GGM05G beyond approximately degree/order 210 without some smoothing.

No rate terms were modeled. For additional details on the background modeling, see the CSR RL05 processing standards document available at:

[ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/grace/docs/L2-CSR005\\_ProcStd\\_v4.0.pdf](ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/grace/docs/L2-CSR005_ProcStd_v4.0.pdf)

Detailed information about GGM05G is available at

[ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/grace/GGM05/README\\_GGM05G.pdf](ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/grace/GGM05/README_GGM05G.pdf)

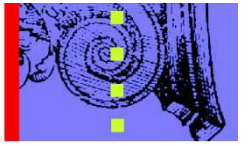
Recommended Reference:

Bettadpur, S., J. Ries, R. Eanes, P. Nagel, N. Pie, S. Poole, T. Richter, and H. Save (2015) Evaluation of the GGM05 Mean Earth Gravity models, Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-4153.

begin\_of\_head =====

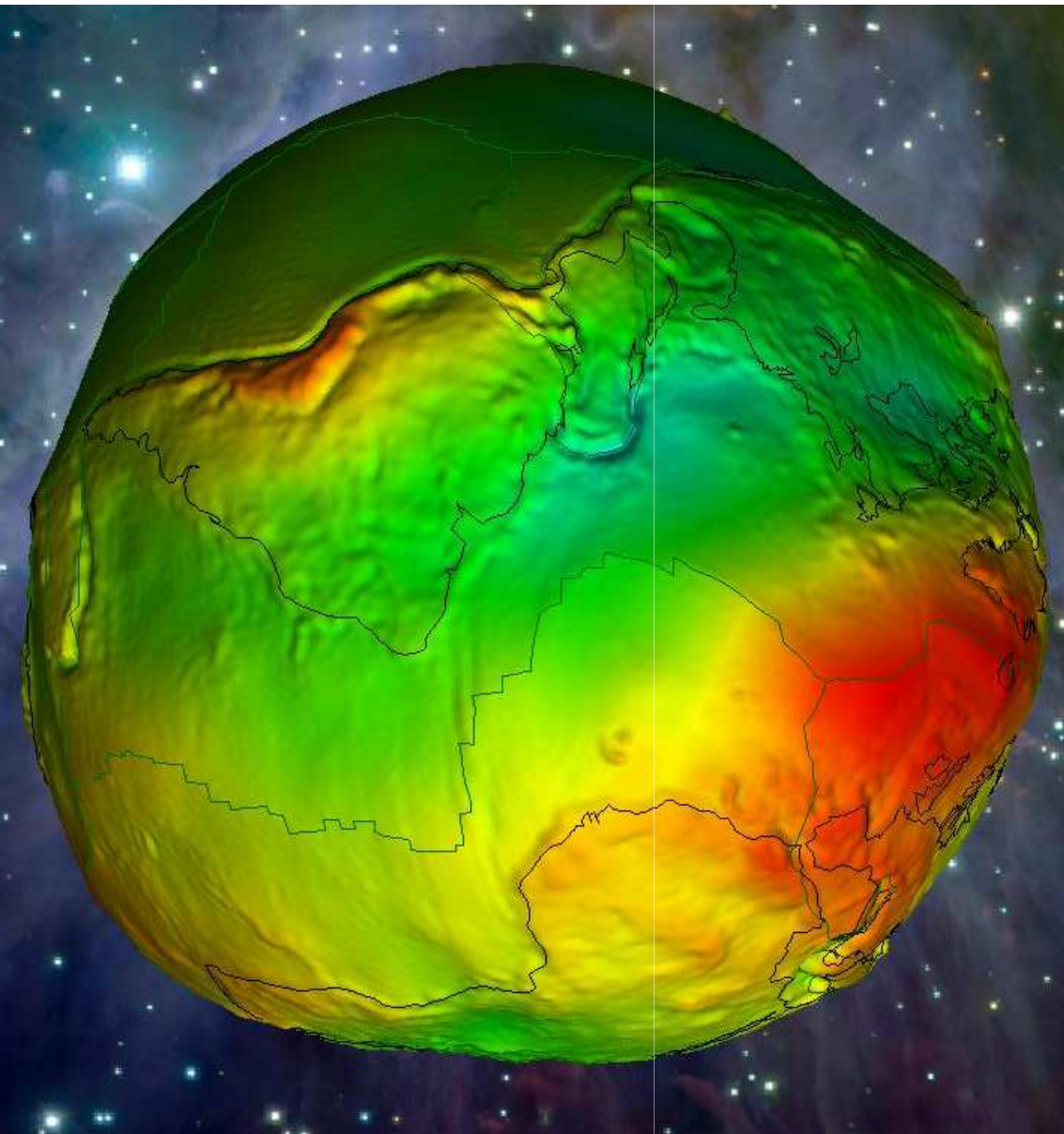
```
modelName          GGM05G
product_type        gravity_field
earth_gravity_constant 3.986004415E+14
radius              6.378136300E+06
max_degree         240
errors              calibrated
norm                fully_normalized
tide_system         zero_tide
```

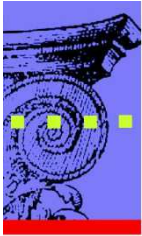
```
key   L   M   C   S   sigma C   sigma S
end_of_head =====
gfc   0   0  1.000000000000e+00  0.000000000000e+00  0.00000e+00  0.00000e+00
gfc   1   0  0.000000000000e+00  0.000000000000e+00  0.00000e+00  0.00000e+00
gfc   2   0  0.000000000000e+00  0.000000000000e+00  0.00000e+00  0.00000e+00
gfc   1   1  0.000000000000e+00  0.000000000000e+00  0.00000e+00  0.00000e+00
gfc   2   0  -4.841694573200D-04  0.000000000000D+00  1.16660D-10  0.00000D+00
gfc   2   1  -3.102665809305D-10  1.410646826665D-09  4.29920D-11  4.29630D-11
gfc   2   2  2.439373638992D-06  -1.400293954808D-06  3.68360D-11  3.63870D-11
gfc   3   0  9.571652715487D-07  0.000000000000D+00  1.30050D-11  0.00000D+00
gfc   3   1  2.030446628788D-06  2.482406309340D-07  7.71580D-12  7.69980D-12
gfc   3   2  9.047652726950D-07  -6.190065367116D-07  1.17120D-11  1.17310D-11
gfc   3   3  7.212848405438D-07  1.414400615620D-06  2.34700D-11  2.34810D-11
```



# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

Nr	Model	Year	Degree	Data
151	GGM05G	2015	240	S(Grace, Gocce)
150	GOCO05e	2015	280	S(see model)





UFPR

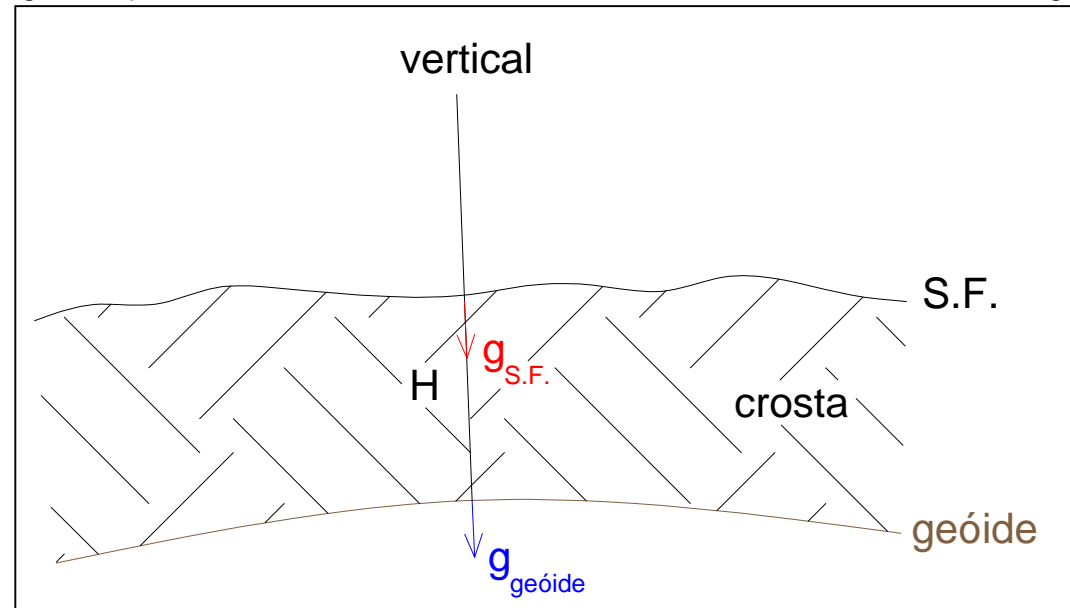
Universidade  
Federal do Paraná

Eng. Cartográfica e de Agrimensura

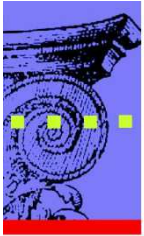
# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

## 5.4.1 - Reduções Gravimétricas;

- Usualmente o local onde necessitamos o conhecimento da gravidade é diferente daquele onde podemos medir. A obtenção do valor da gravidade nos pontos de interesse (diferentes dos locais onde foram realizadas as observações) é feita com base em reduções gravimétricas.



- Por exemplo: aplicações que fazem uso do valor observado reduzido ao nível do geóide (para esta redução é necessário se efetuar a consideração do que preenche a crosta (material) entre o ponto na superfície física e o geóide).



UFPR

Universidade  
Federal do Paraná

# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

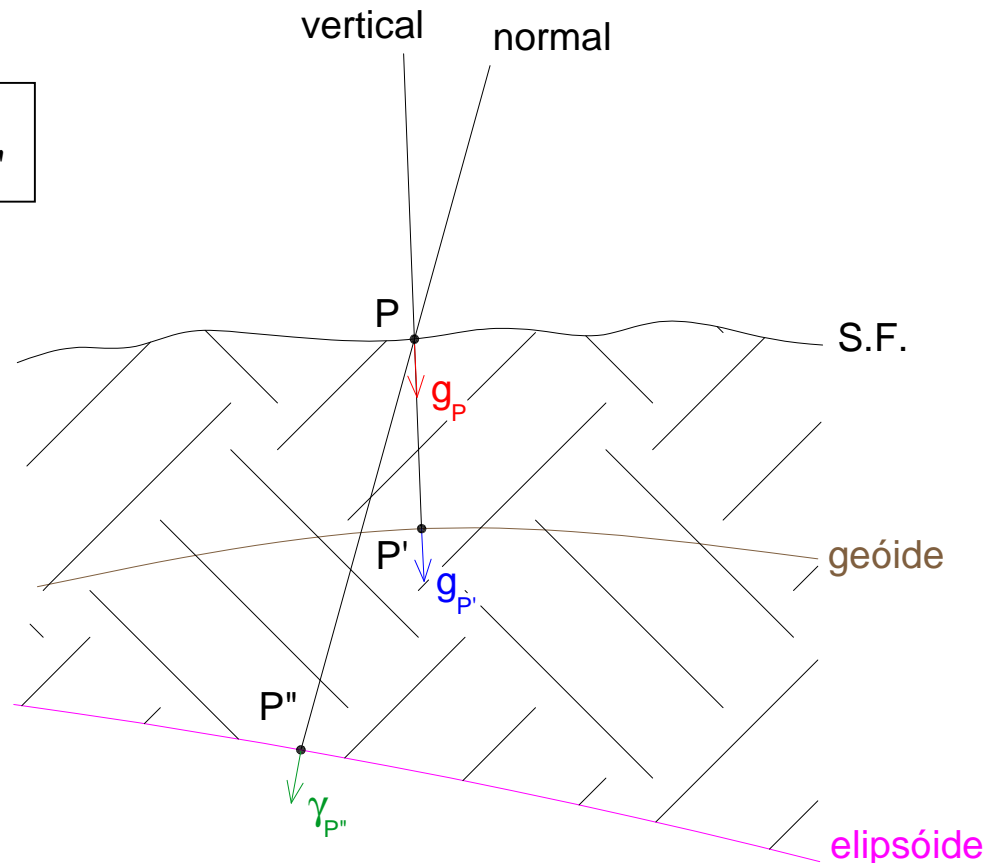
## 5.4.2 - Anomalias da Gravidade;

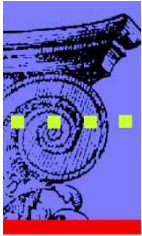
- Anomalia da gravidade ( $\Delta g_P$ ) é a diferença entre a gravidade medida na S.F. e reduzida ao geóide ( $g_{P'}$ ) e a gravidade normal sobre o elipsóide ( $\gamma_{P''}$ )

$$\Delta g_P = g_{P'} - \gamma_{P''}$$



Relaciona o afastamento entre as duas superfícies: geóide e elipsoide





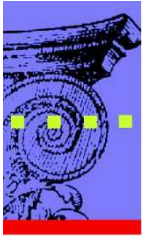
UFPR  
Universidade  
Federal do Paraná

## FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

---

### 5.4.3 - O fenômeno das marés terrestres

- A maré terrestre é a deformação elástica da crosta devido à ação gravitacional do Sol e da Lua. Esta atração luni-solar perturba o valor  $g$  em módulo e direção
- A primeira perturbação afeta as medidas de aceleração da gravidade e da força da gravidade
- A segunda afeta o desvio da vertical, com repercussão no nivelamento geométrico
- A deformação da crosta afeta o posicionamento tridimensional



UFPR

Universidade  
Federal do Paraná

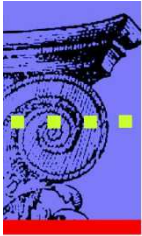
## FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

---

Eng. Cartográfica e de Agrimensura

- O efeito da maré deve ser considerado tanto para o Sol quanto para a Lua, o efeito dos demais corpos celestes é muito pequeno e pode ser desprezado
- O efeito do Sol é cerca de 38% do efeito da Lua pois apesar da massa do Sol ser muito maior que a massa da Lua, a Lua está muito mais próxima





UFPR  
Universidade  
Federal do Paraná

Eng. Cartográfica e de Agrimensura

## FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

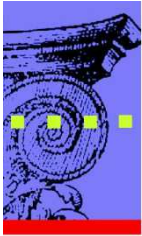
---

A Maré Terrestre é o resultado da interação gravitacional da Terra com a Lua e o Sol, que resulta em esforços diferenciais significativos, produzindo deformações no corpo planetário e variações no geopotencial.

Como a Terra é um corpo deformável, as deformações produzidas pelas marés podem chegar a 50 cm segundo a direção vertical e 15 cm segundo a horizontal.

Estas deformações produzem redistribuição de massas e conseqüentemente um efeito de alteração no valor do geopotencial.

As marés terrestres possuem um componente variável no tempo (marés diurnas, semi-diurnas, ter-diurnas) e uma parte constante (permanente).



UFPR  
Universidade  
Federal do Paraná

Eng. Cartográfica e de Agrimensura

## FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

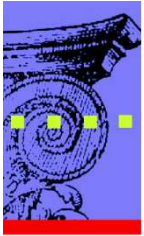
---

As deformações produzidas pelas marés terrestres afetam o posicionamento horizontal com GNSS na medida em que sejam utilizadas linhas de base longas (~300km).

O IERS fornece modelos e correções para tratar esses efeitos. (Alguns softwares de processamento GNSS, como Bernese e Geonap, possuem recursos que permitem considerar estes efeitos).

A gravimetria também é afetada; gravímetros modernos já incorporam rotinas para eliminação deste efeito.

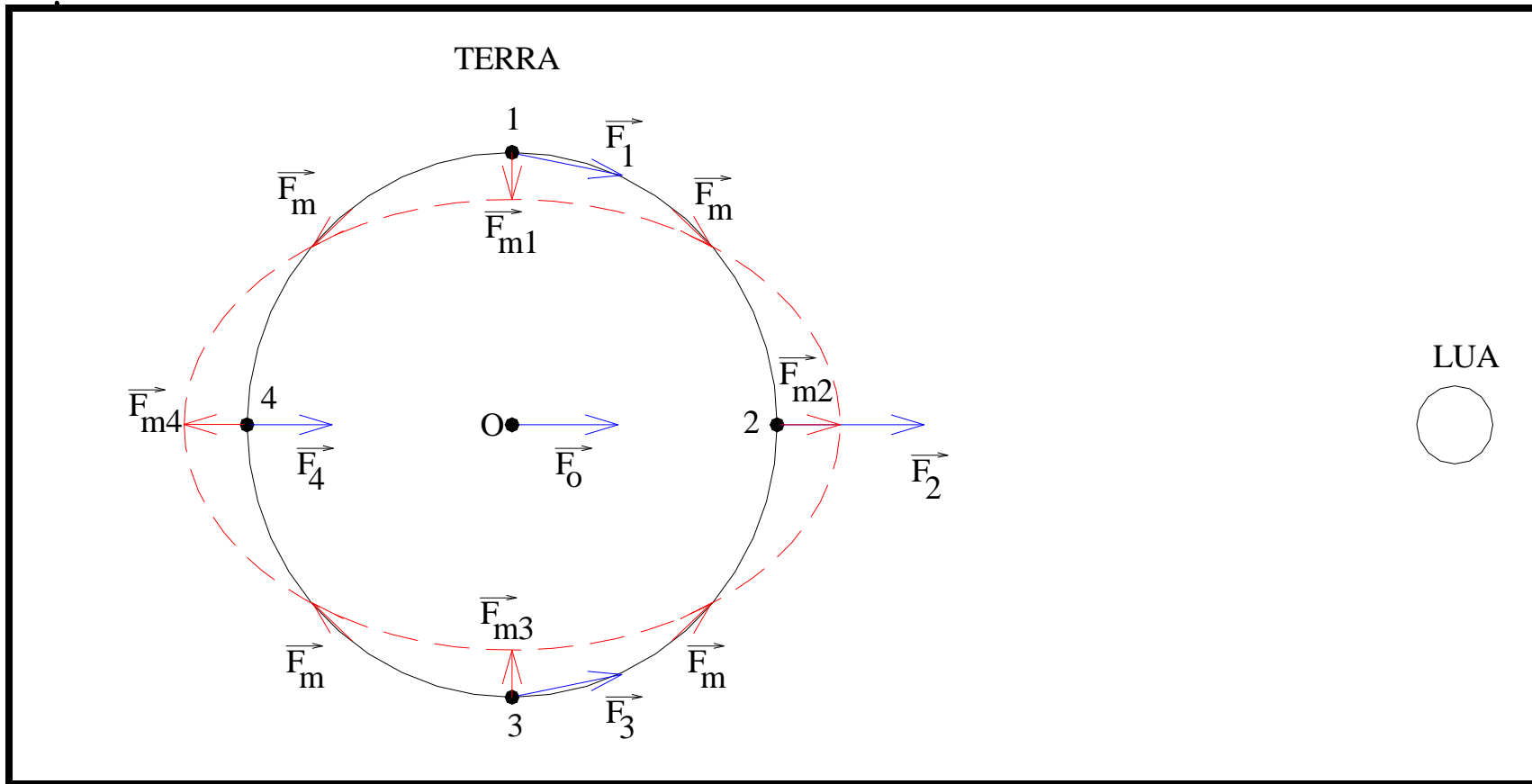
No nivelamento geométrico de precisão os efeitos são usualmente desconsiderados, pois tendem a ser anulados ao longo do circuito. Na condição mais desfavorável a correção  $< 0,08\text{mm/km}$  porém como pode tornar-se cumulativa deve ser levada em consideração nas redes de grandes extensões.



UFPR  
Universidade  
Federal do Paraná

# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

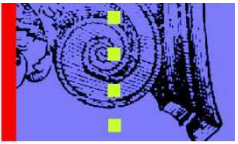
Define-se como força de maré em um ponto à diferença entre a força de atração exercida pelo Sol e pela Lua sobre a unidade de massa no ponto e no centro do modelo. Para um modelo esférico:



**FORÇA DE MARÉ:**  $\vec{F}_m = \vec{F}_p - \vec{F}_o$

# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

---

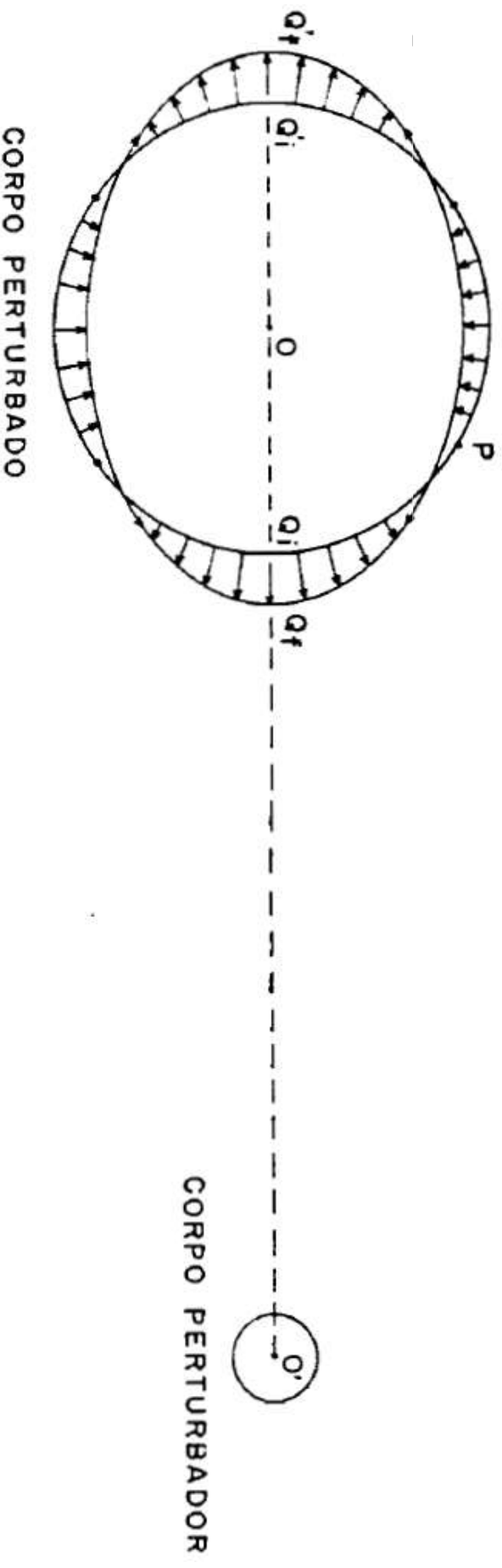


UFPR

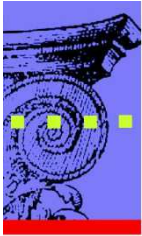
Universidade  
Federal do Paraná

mensura

Efeito das forças de maré sobre um corpo celeste elástico:



Eng. C



UFPR  
Universidade  
Federal do Paraná

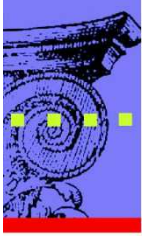
Eng. Cartográfica e de Agrimensura

## FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

---

A maré terrestre pode ser dividida em componentes, sendo os principais:

- **Maré gravimétrica (componente vertical)**  
Afeta  $g, H$
- **Maré extensométrica (componente horizontal)**  
Afeta  $\varphi, \lambda$



UFPR  
Universidade  
Federal do Paraná

Eng. Cartográfica e de Agrimensura

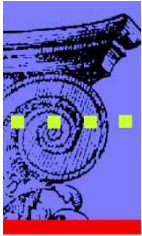
## FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

---

O potencial gravitacional que produz o fenômeno de maré é determinado com precisão, a partir da dinâmica orbital dos sistemas Terra-Lua e Terra-Sol.

Em que situações a maré terrestre deve ser considerada?

- Na mensuração de grandezas que sejam afetadas pela variação temporal do potencial da gravidade, da inclinação de suas superfícies equipotenciais e deformações produzidas na superfície.



UFPR  
Universidade  
Federal do Paraná

Eng. Cartográfica e de Agrimensura

## FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

O potencial gerador de maré pelo astro perturbador (Sol ou Lua) sobre a Terra é dado por:

$$V_{M_j} = \frac{GM_j}{\ell_j} \sum_{i=2}^{\infty} \left( \frac{r}{\ell_j} \right)^i P_i(\cos \vartheta)$$

$G$  = constante universal da gravitação

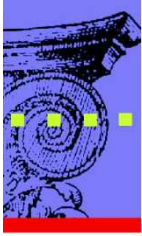
$M_j$  = massa do astro perturbador

$\ell_j$  = distância geocêntrica ao centro do astro perturbador

$r$  = distância geocêntrica ao ponto de cálculo

$P_i$  = polinômio de Legendre de grau  $i$

$\vartheta$  = ângulo geocêntrico entre o ponto de cálculo e o astro perturbador



UFPR

Universidade  
Federal do Paraná

Eng. Cartográfica e de Agrimensura

## FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

---

- As alterações e deformações no potencial da gravidade do corpo planetário são classificadas como:

Efeito direto: causadas pelos próprios astros  
Perturbadores

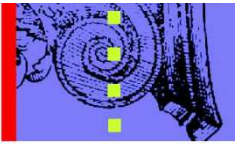
Efeito indireto: provenientes das deformações do corpo planetário (alteração do geopotencial pelas massas deslocadas)

- O tratamento destes efeitos envolve diferentes Sistemas de Maré Permanente: - *tide-free, mean tide e zero-tide.*



# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

---



Universidade  
Federal do Paraná

Taller

**Sistema Vertical de Referencia SIRGAS (SVRS)**

Curitiba, Brasil

Mayo 18 – 22, 2015

**Sistemas de referencia vertical**



**Laura Sánchez TUM**

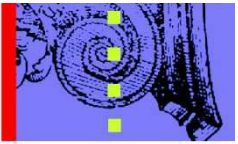
Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut  
der Technischen Universität München (DGF-TUM), Alemania

Vicepresidente de SIRGAS

Presidente del IAG/GGOS Working Group on Vertical Datum Standardisation  
([lm.sanchez@tum.de](mailto:lm.sanchez@tum.de))

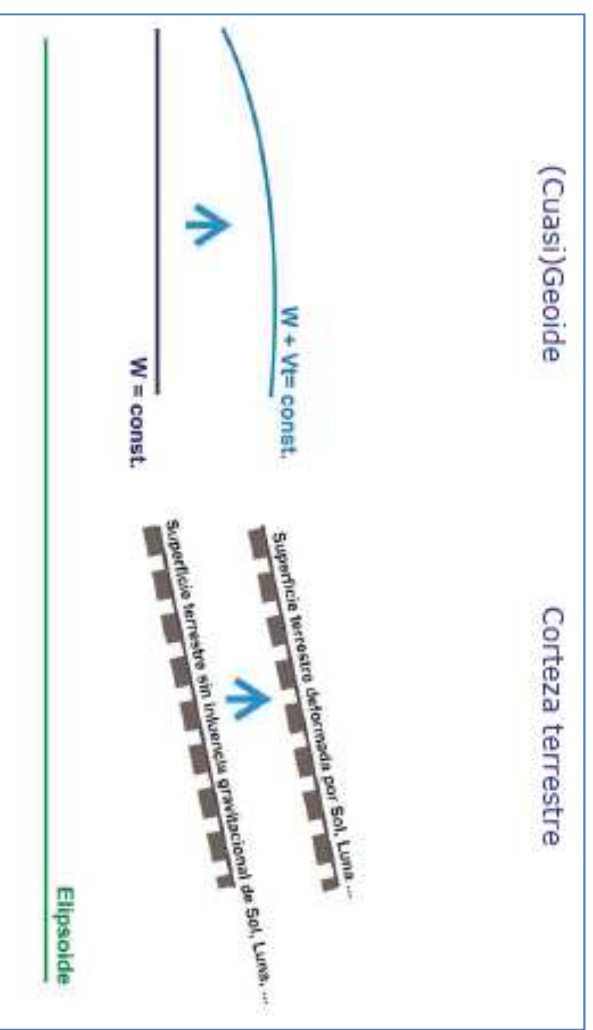
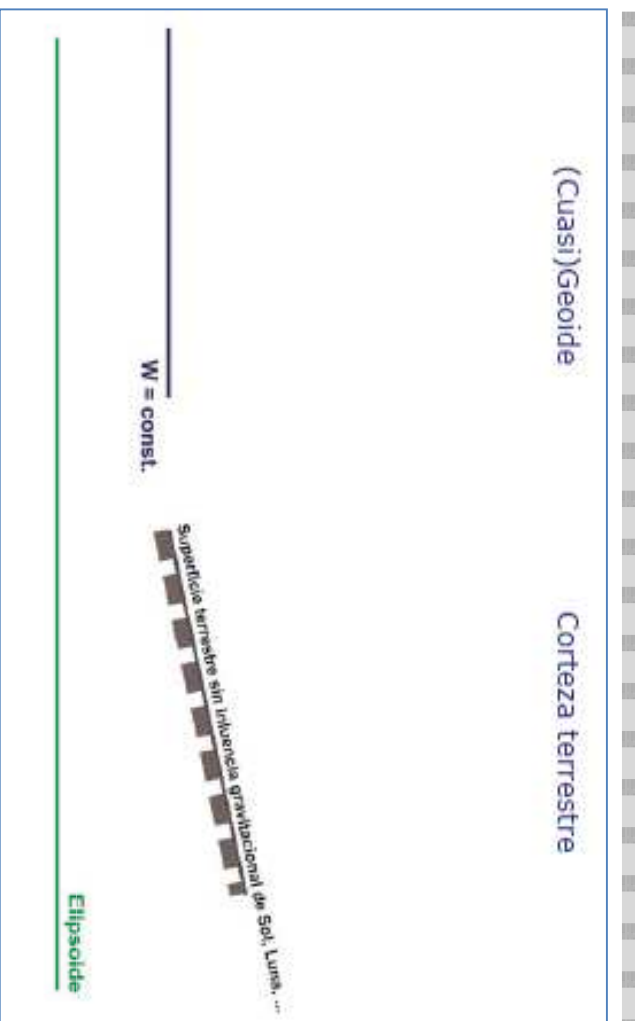
Eng. Cartográfica e de Agrimensura

# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA



Universidade  
Federal do Paraná

## Eng. Cartográfica e de Agrimensura

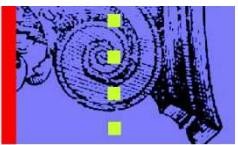


### Sistemas de referencia vertical



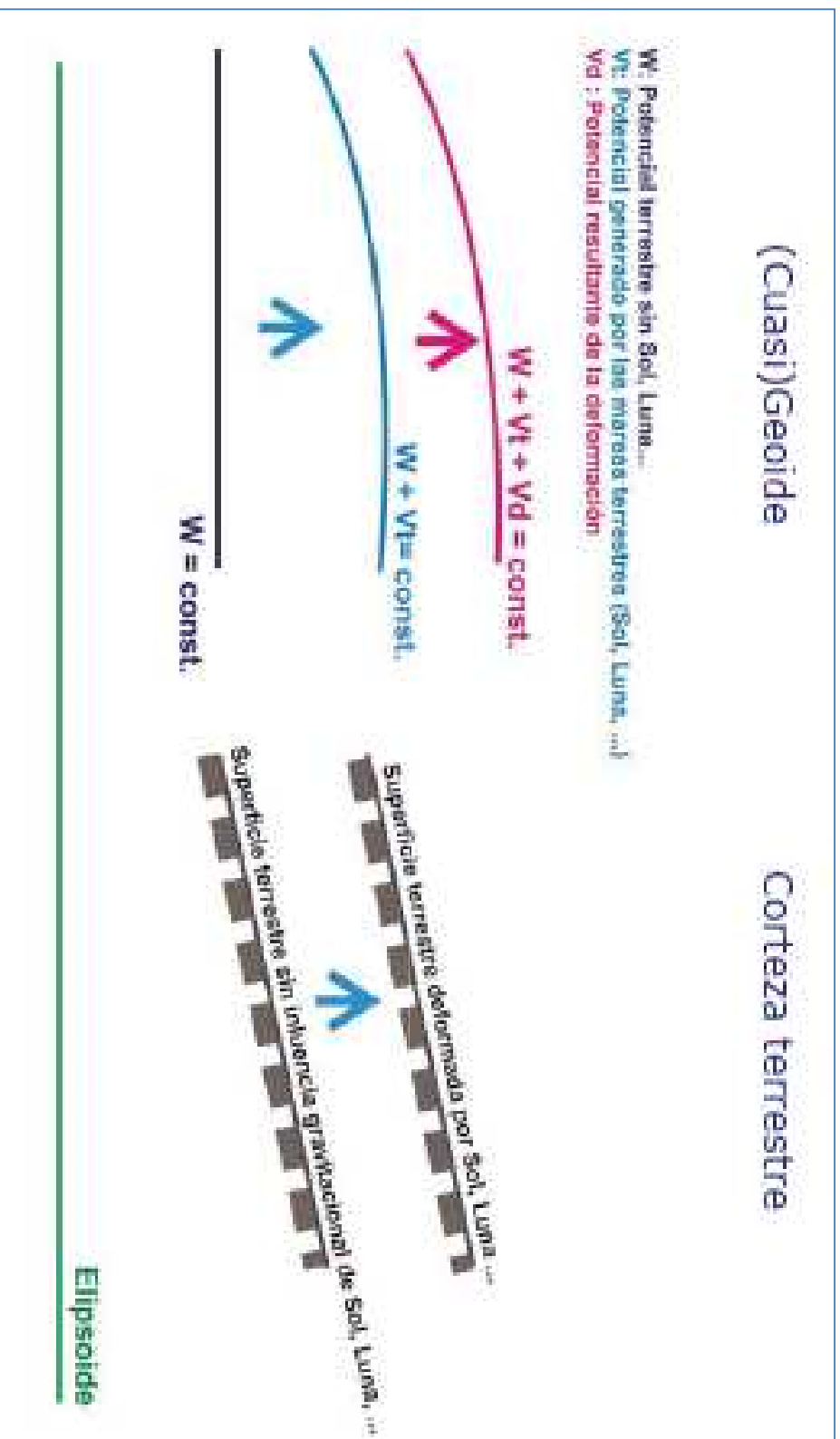
Laura Sánchez TUM

# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA



Universidade  
Federal do Paraná

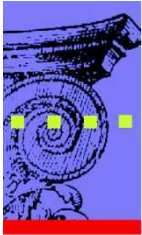
Eng. Cartográfica e de Agrimensura



Sistemas de referencia vertical



Laura Sánchez TUM



# FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

## Sistemas de Marés Permanentes:

UFPR

Universidade  
Federal do Paraná

Eng. Cartográfica e de Agrimensura

a) Sem maré ou livre de maré (*non-tidal ou tide-free ou conventional tide free*) ( $W$ ): são totalmente eliminados os efeitos de maré nos levantamentos, posição e potencial, é como se o Sol e a Lua não existissem ou fossem trasladados artificialmente ao infinito.

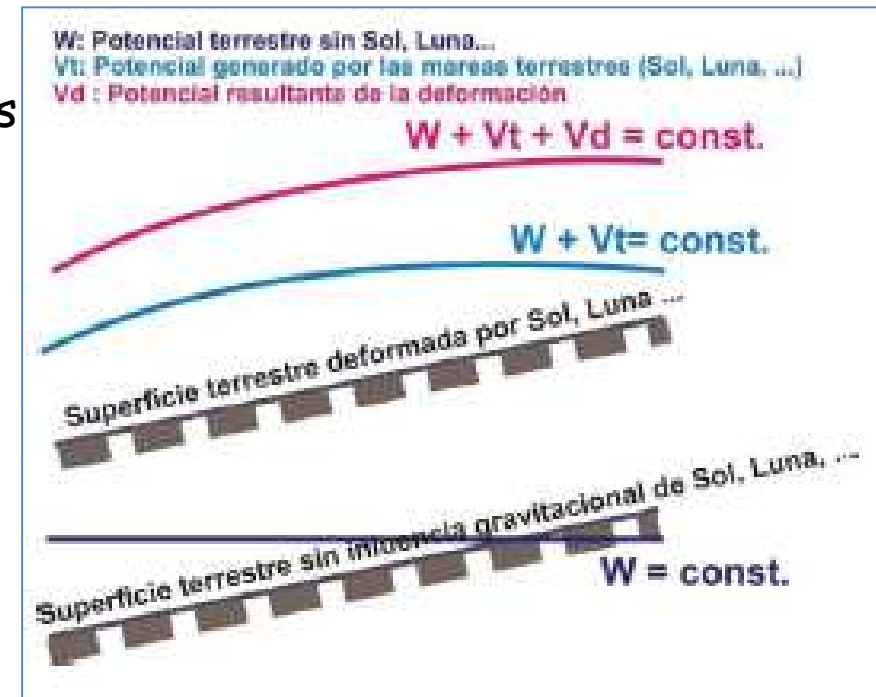
Ex: ITRF / SIRGAS

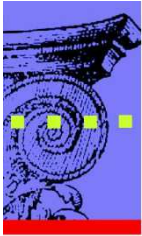
b) Maré Média (*mean tide*) ( $W+V_t+V_d$ ): considera nas posições o efeito médio da maré e os respectivos efeitos diretos e indiretos no potencial.

Ex: sistema gravimétrico IGSN-71 (MAKINEN, 2000) e redes de nivelamento

c) Maré Zero (*zero-tide*) ( $W+V_d$ ): considera apenas os efeitos da maré permanente de forma indireta no potencial.

Ex: gravimetria, modelos globais do geopotencial





UFPR

Universidade  
Federal do Paraná

Eng. Cartográfica e de Agrimensura

## FUNDAMENTOS FÍSICOS DA GEODÉSIA

---

*Zero-tide* é recomendado pela IAG - Resolução n°16 (1983) para observações geodésicas como a gravidade e funções associadas como altitudes físicas e *Zero-tide* ou *mean tide* para posições tridimensionais como o ITRF, os efeitos indiretos não devem ser removidos.

OBS: para as altitudes a diferença entre um ou outro sistema de maré pode chegar a 10cm (implica em possíveis problemas na geração de geóides que envolvem posicionamento GPS sobre RN, por exemplo).