

Modernización de los sistemas de alturas

Laura Sánchez

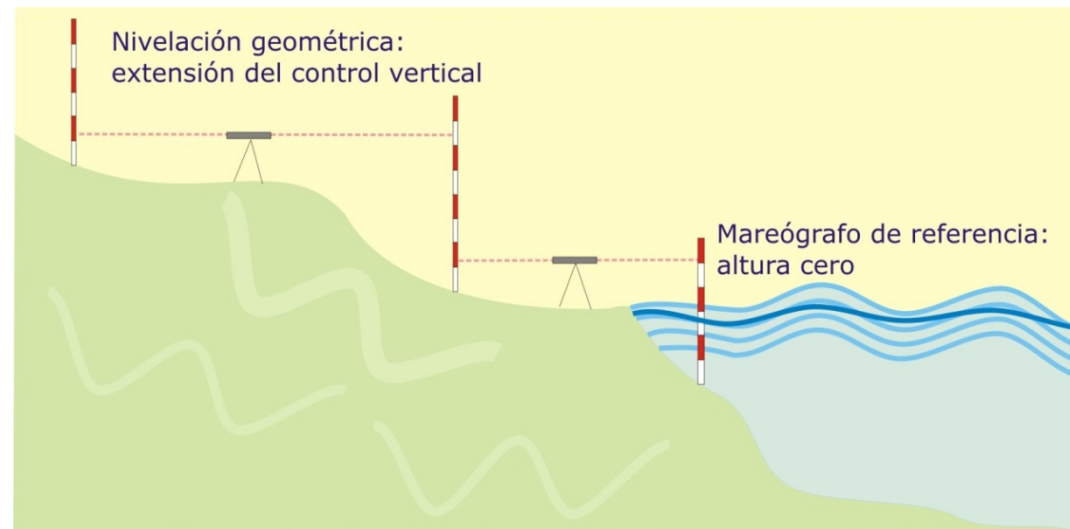
**Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI),
Munich, Alemania**

**Coordinadora del Grupo de Trabajo
Vertical Datum Standardisation de GGOS-IAG
Vicepresidente SIRGAS**



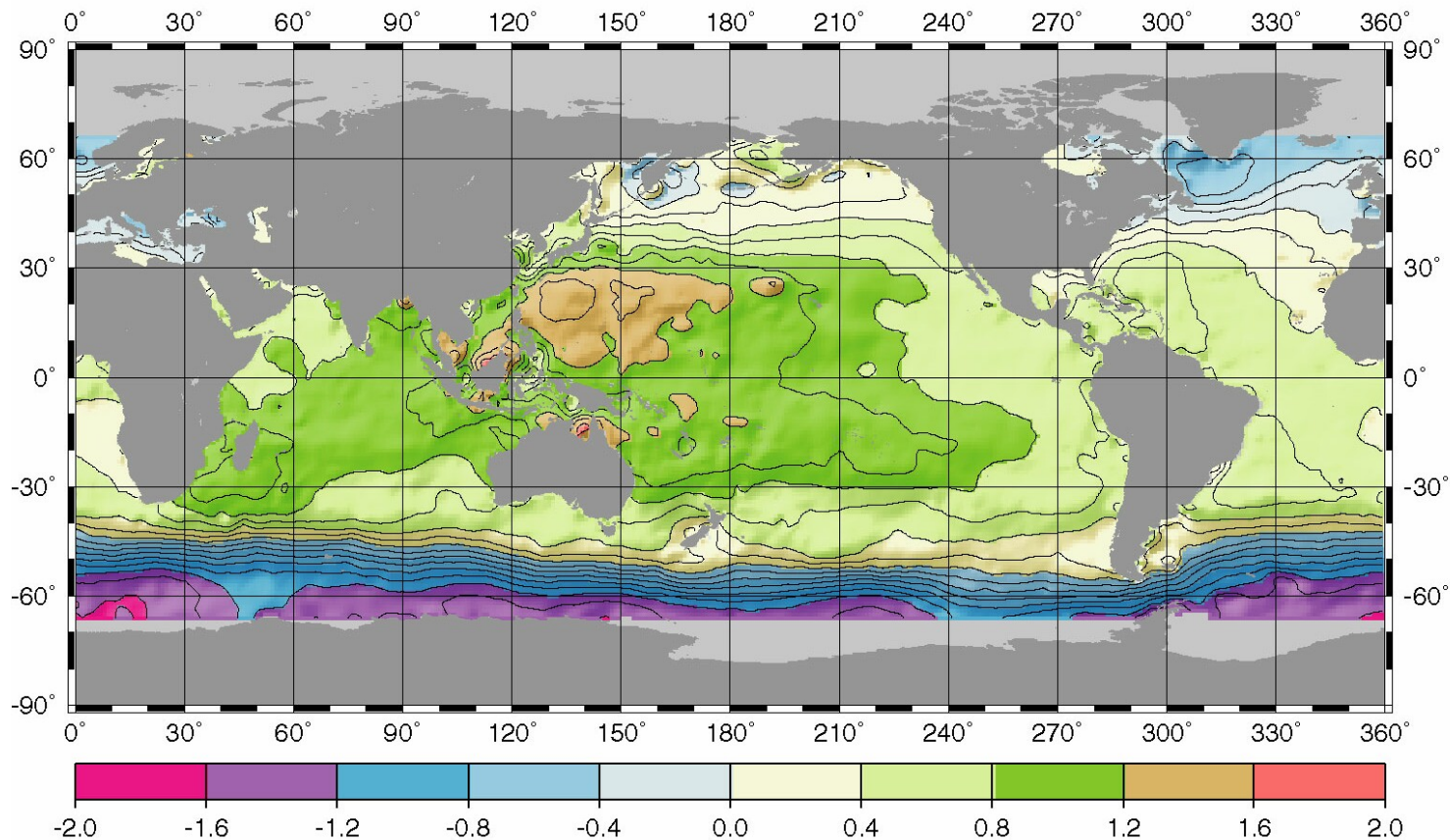
Sistemas de alturas existentes

| | Definición | Materialización |
|--------------------------|----------------------|---|
| Superficie de referencia | geoide | nivel medio del mar en mareógrafos |
| Coordenada vertical | alturas ortométricas | nivelación geodésica con correcciones de gravedad (por definición pero no en la práctica) |



Inconvenientes de los sistemas de alturas existentes

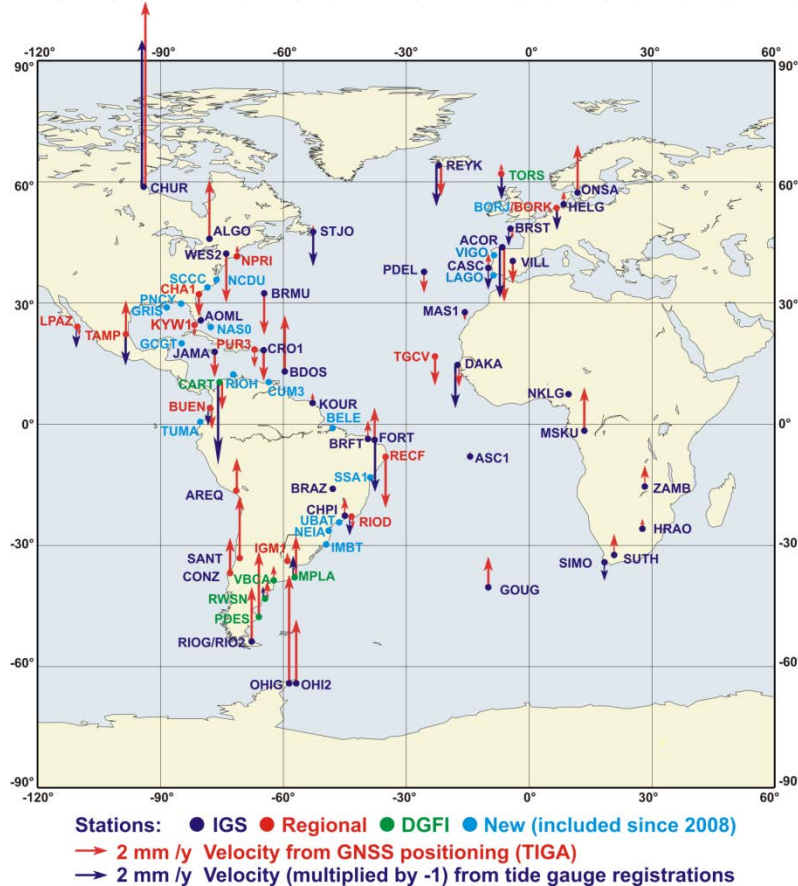
La superficie del mar no coincide con el geode, entre ellos hay discrepancias entre -2 m y 2 m.



→ Existen tantos *geoides* como mareógrafos de referencia

Inconvenientes de los sistemas de alturas existentes

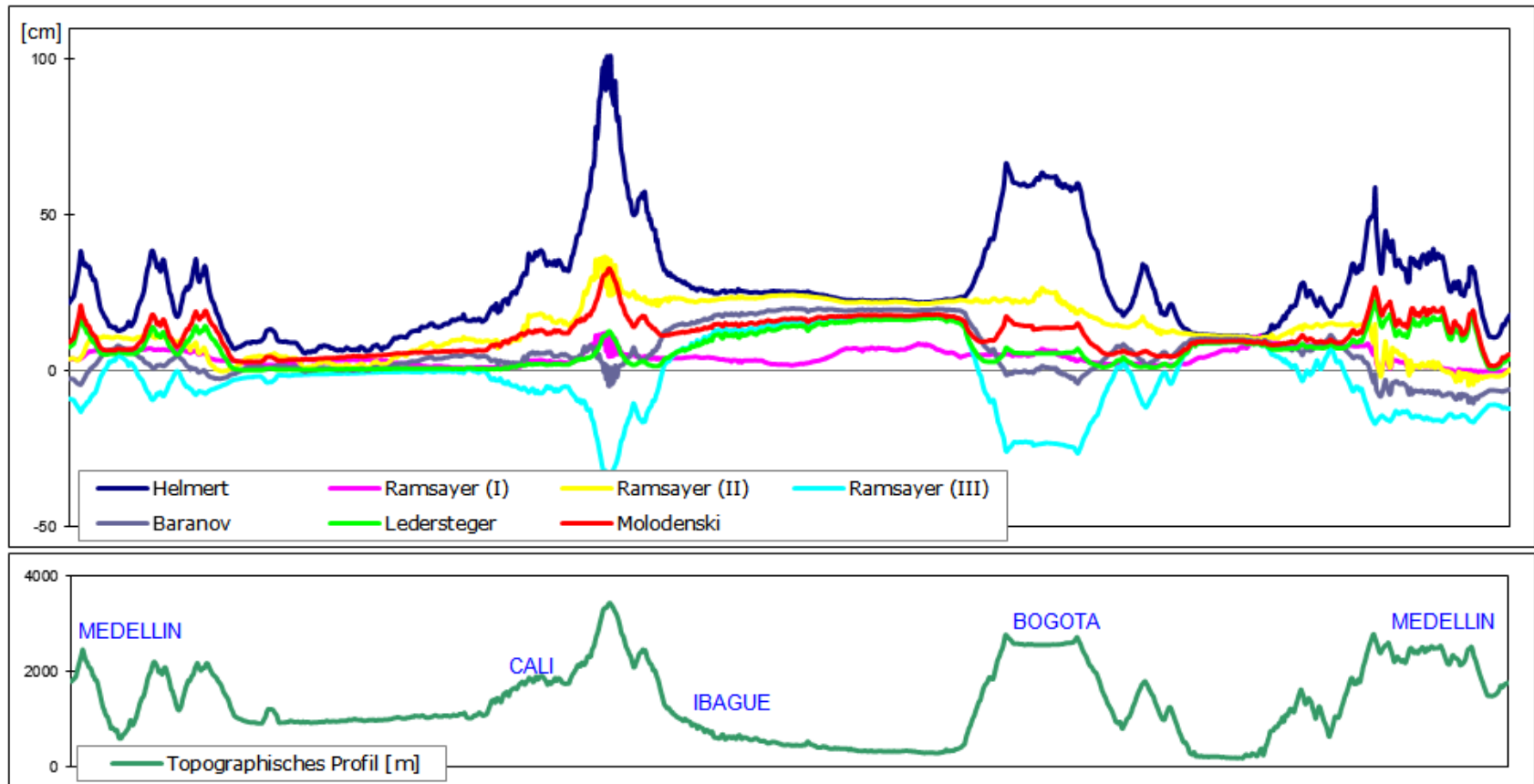
Son estáticos; no tienen en cuenta cambios del nivel medio del mar o cambios verticales de la corteza terrestre.



→ Los niveles de referencia y las coordenadas verticales están asociados a diferentes épocas

Inconvenientes de los sistemas de alturas existentes

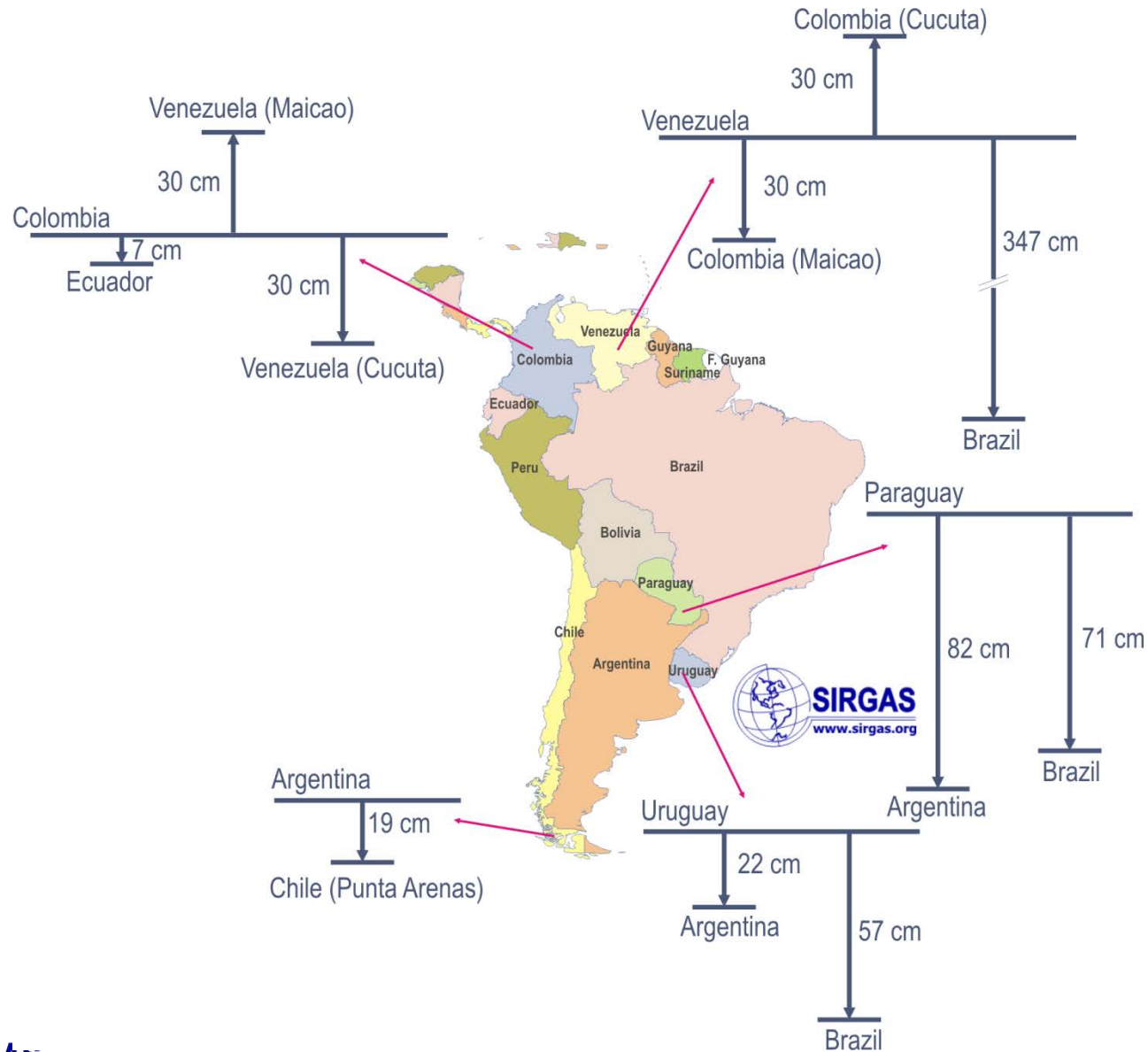
La nivelación no ha sido corregida por los efectos de gravedad, o ha sido corregida utilizando diferentes reducciones.



→ Existen diferentes tipos de alturas

Diferencias de nivel entre los sistemas de alturas existentes en América del Sur

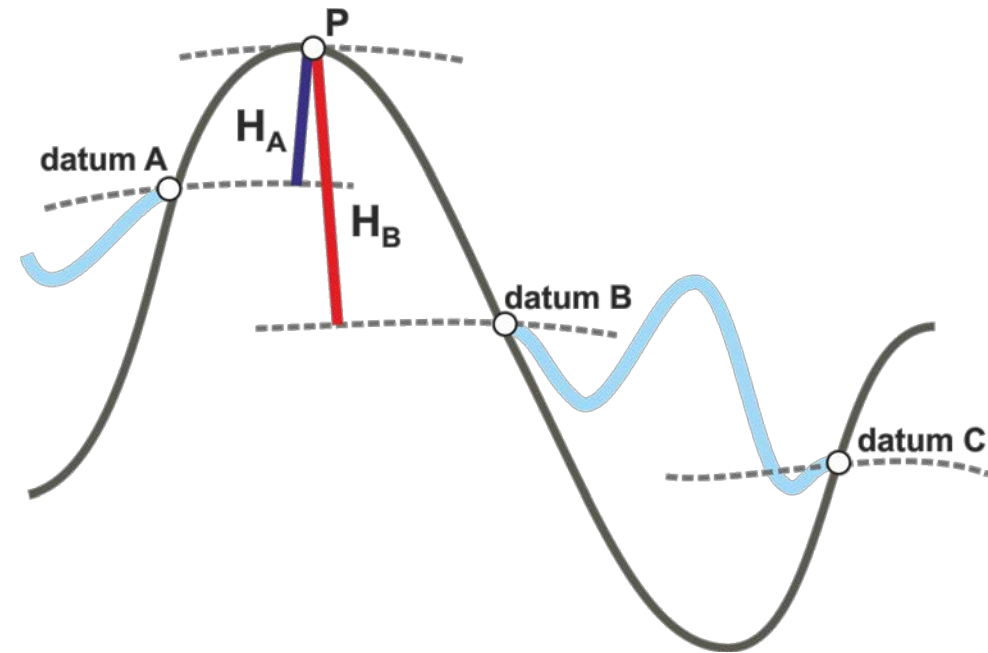
Semana Geomática, Bogotá, Colombia. Sep. 30 a oct. 4, 2013



Inconvenientes de los sistemas de alturas existentes

Por sus características:

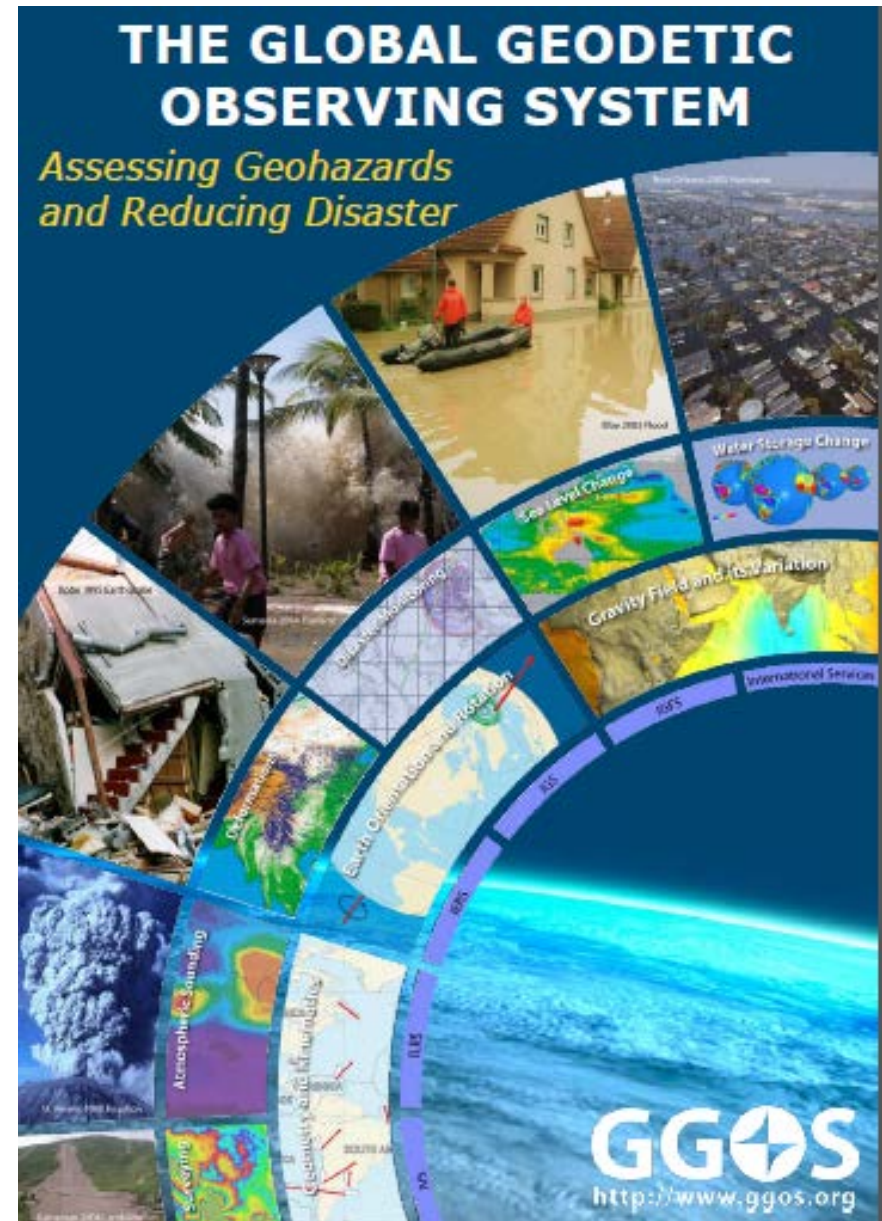
- Son válidos en áreas geográficas limitadas;
- No permiten el intercambio o integración precisa de información vertical;
- Su combinación con modelos geoidales y posicionamiento GNSS ($h=H+N$) no es precisa.



Motivación

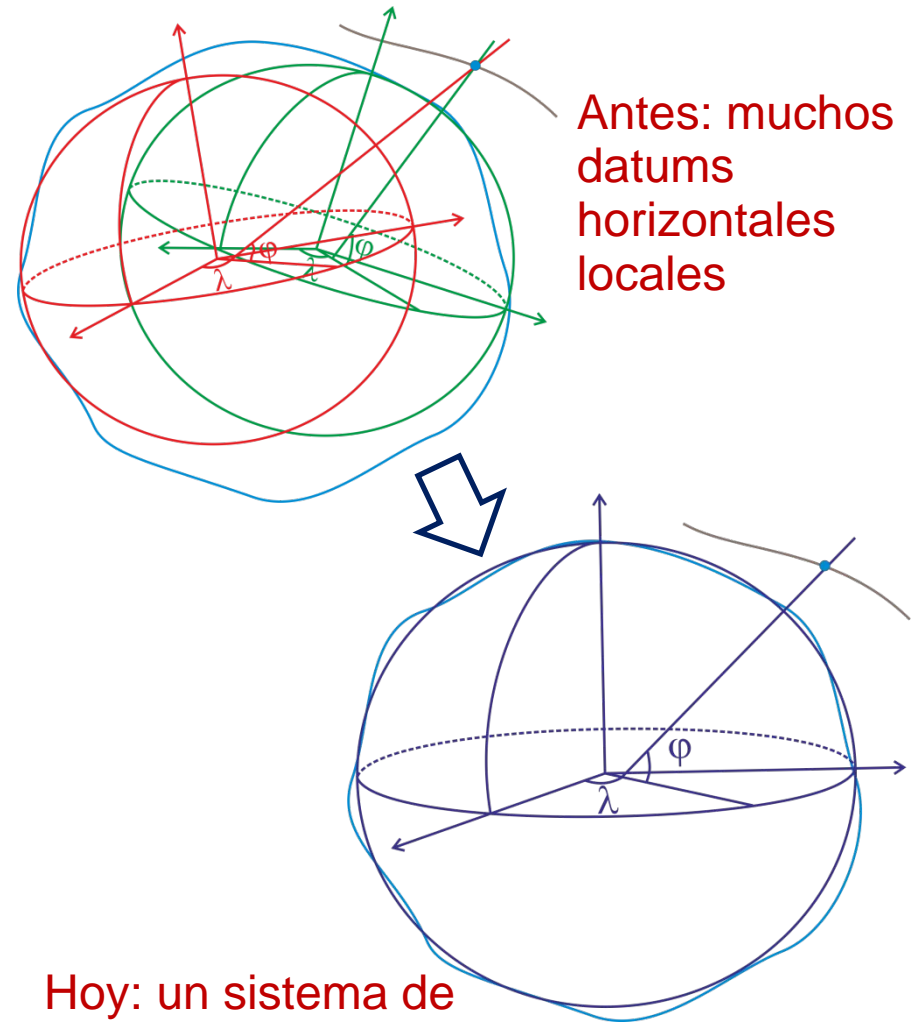
El estudio, comprensión y modelado de los efectos del **cambio global** requieren de marcos de referencia geodésicos

- Con **un orden de precisión mayor** que la magnitud de los fenómenos que queremos analizar;
- **Consistencia y confiabilidad** a nivel global (la misma precisión en cualquier lugar),
- **Estabilidad a largo plazo** (la misma precisión en cualquier momento).



Motivación

La definición, realización, actualización y uso del **ITRS/ITRF** (o de sus densificaciones continentales como **SIRGAS**, o nacionales como **MAGNA**) garantiza un **sistema de referencia geométrico global, unificado y de precisión milimétrica. Un sistema de referencia físico (dependiente del campo de gravedad) equivalente aún no existe!**



Antes: muchos datums horizontales locales

Hoy: un sistema de referencia geocéntrico unificado y común para todo el mundo

Objetivo

Definir, materializar y mantener un sistema de referencia físico

- 1) que provea un **marco de referencia confiable para el análisis y modelado preciso de fenómenos globales asociados al campo de gravedad terrestre**, p. ej. variaciones del nivel medio del mar de escalas locales a globales, redistribución de masas entre océanos, continentes y el interior terrestre, etc.
- 2) que permita la **combinación confiable de alturas físicas y geométricas** para poder aprovechar al máximo las tecnologías geodésicas satelitales, p.ej. análisis integrado de posicionamiento GNSS y modelos globales de gravedad para la determinación precisa de alturas.

Idea básica

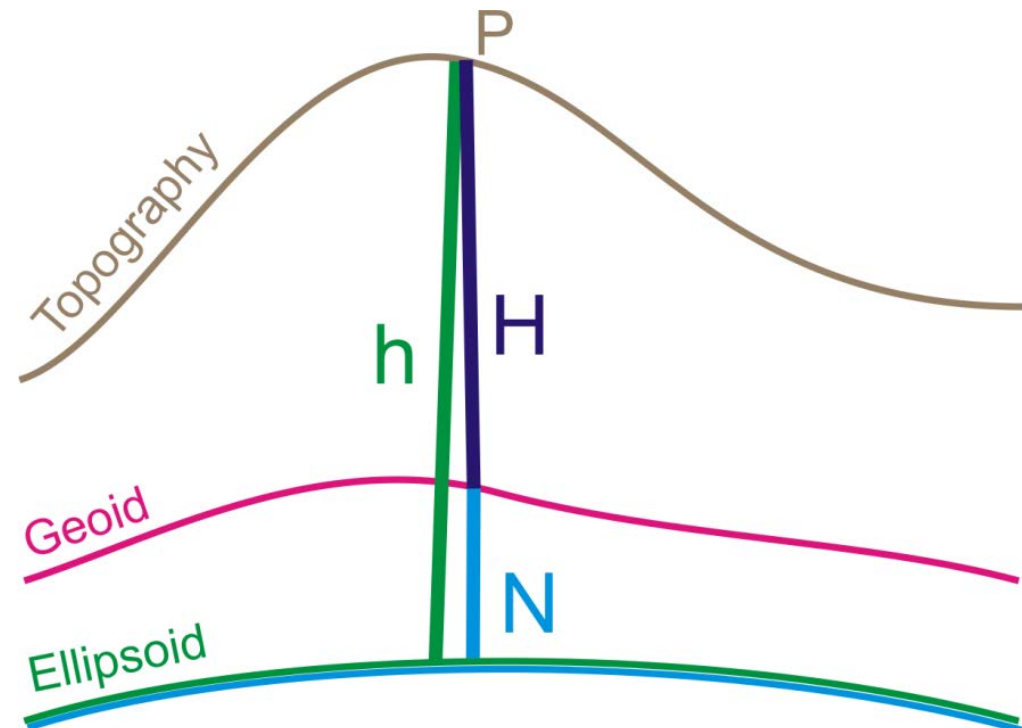
- ❑ Satisfacer **$h-H-N=0$** con precisión centimétrica en todo el mundo;
 - Actualmente: de decímetros a metros (**muy impreciso**)
 - Ideal: a nivel milimétrico (**aún inviable**)

- ❑ Para esta combinación, el nuevo sistema vertical global debe considerar **alturas geométricas y alturas físicas**;

- ❑ Materialización similar al ITRS/ITRF, es decir
 - Una **red global** con coordenadas verticales precisas;
 - **Densificaciones nacionales y regionales**, i.e. integración (transformación) de los sistemas de alturas existentes.

Cómo combinar h , H y N consistentemente?

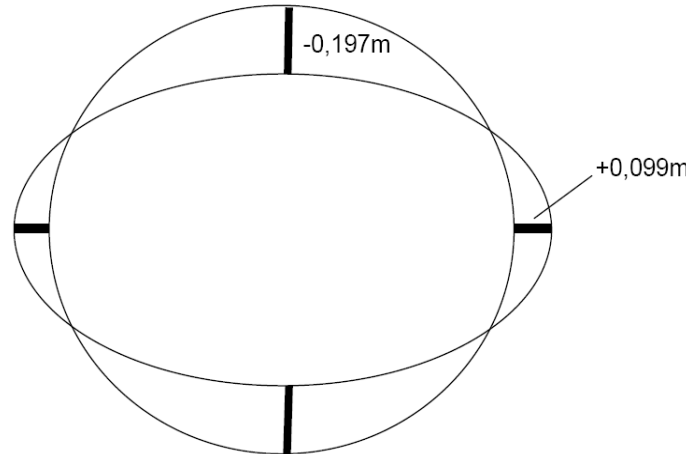
1. Las alturas elipsoidales h y las ondulaciones (cuasi)geoidales N deben referirse al **mismo elipsoide**:
 - $[X, Y, Z] \Leftrightarrow [\varphi, \lambda, h]$
 - Campo de referencia en la solución del problema de valor de frontera geodésico (GBVP) y como escala en los modelos globales de gravedad (GGM)



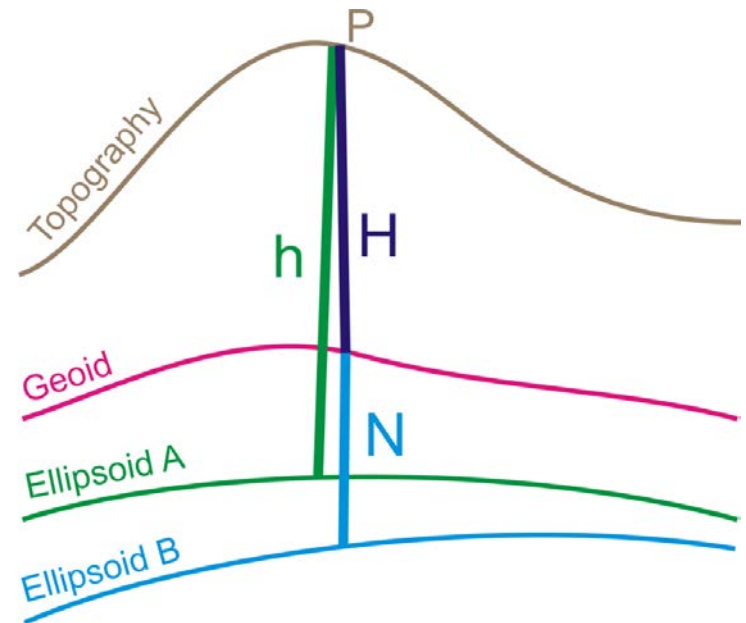
Cómo combinar h , H y N consistentemente?

En la vida real, e.g.:

- ❑ Uso de diferentes parámetros elipsoidales (a , GM) en geometría y gravedad:
- ❑ Diferentes sistemas de mareas para h y N
 - Oceanografía, altimetría satelital, nivelación en **mean tide system**
 - Coordenadas ITRF, GRS80, algunos geoides en **tide free system**
 - Algunos geoides, datos terrestres de gravedad en **zero tide system**

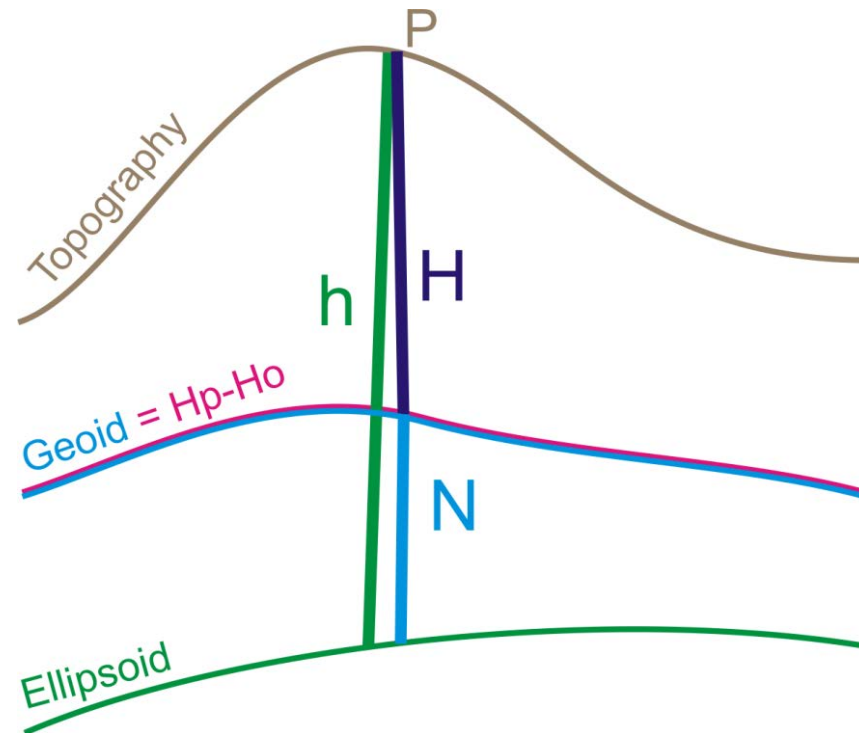


Differences between mean and zero geoids (Heck 2010)



Cómo combinar h , H y N consistentemente?

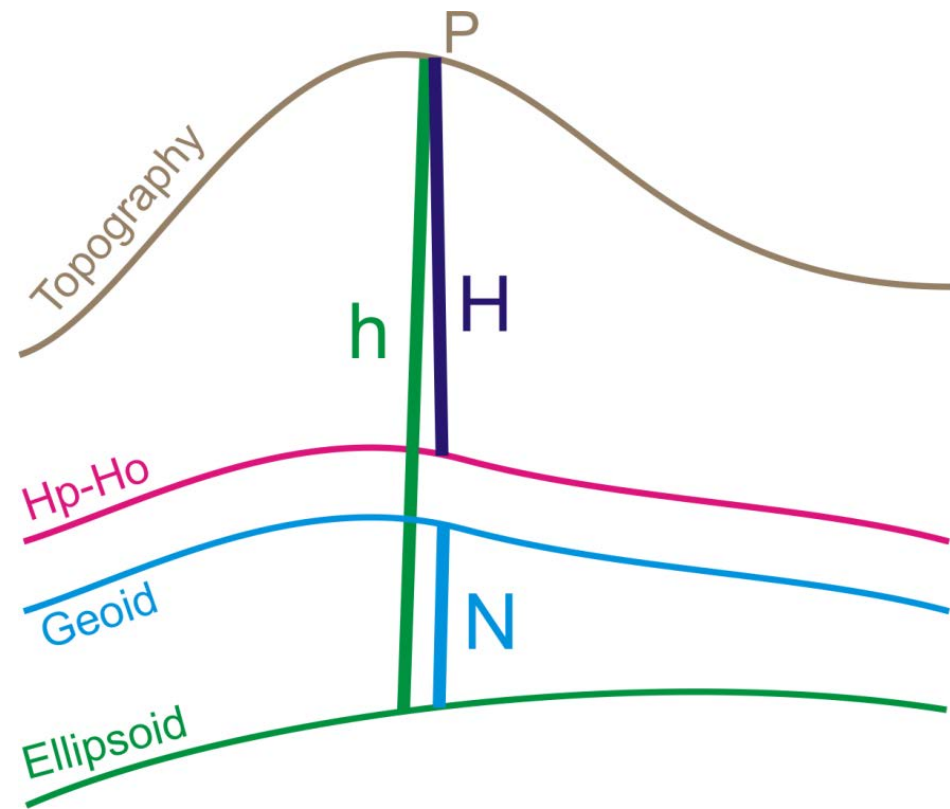
2. Las alturas físicas H y las undulaciones (cuasi)geoidales N deben reflejar las misma **superficie de referencia**:
- H_p (de nivelación) – H_0 (punto datum) → geode geométrico
 - N (de la solución del GBVP) → geode gravimétrico



Cómo combinar h , H y N consistentemente?

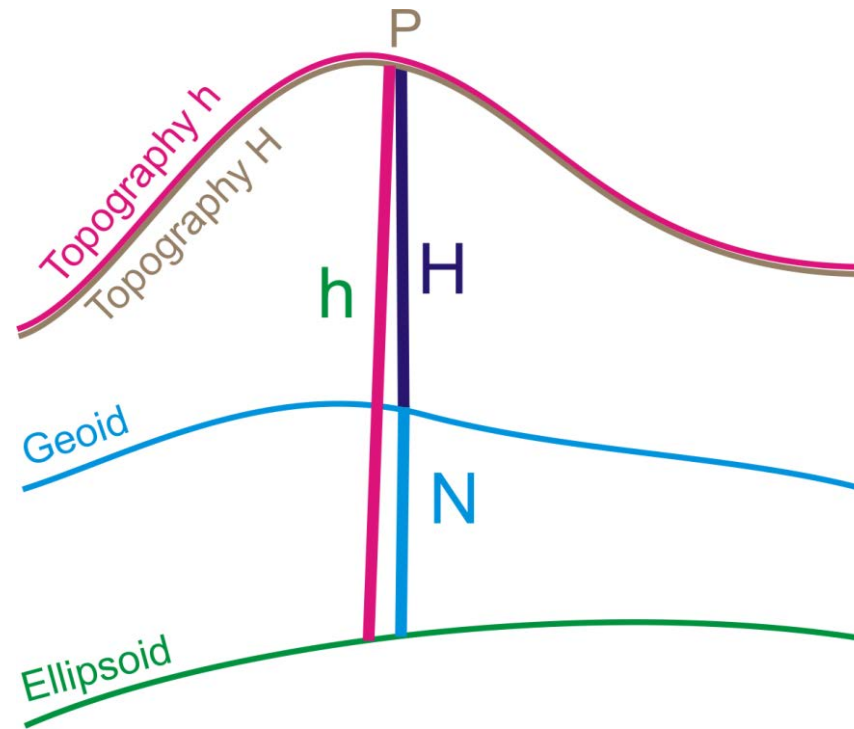
En la vida real, e.g.:

- ❑ Alturas ortométricas y geoide gravimétrico con diferentes hipótesis;
- ❑ Diferentes sistemas de mareas para H y N
- ❑ Acumulación de errores sistemáticos de la nivelación (confiabilidad de $H_p - H_0$)



Cómo combinar h , H y N consistentemente?

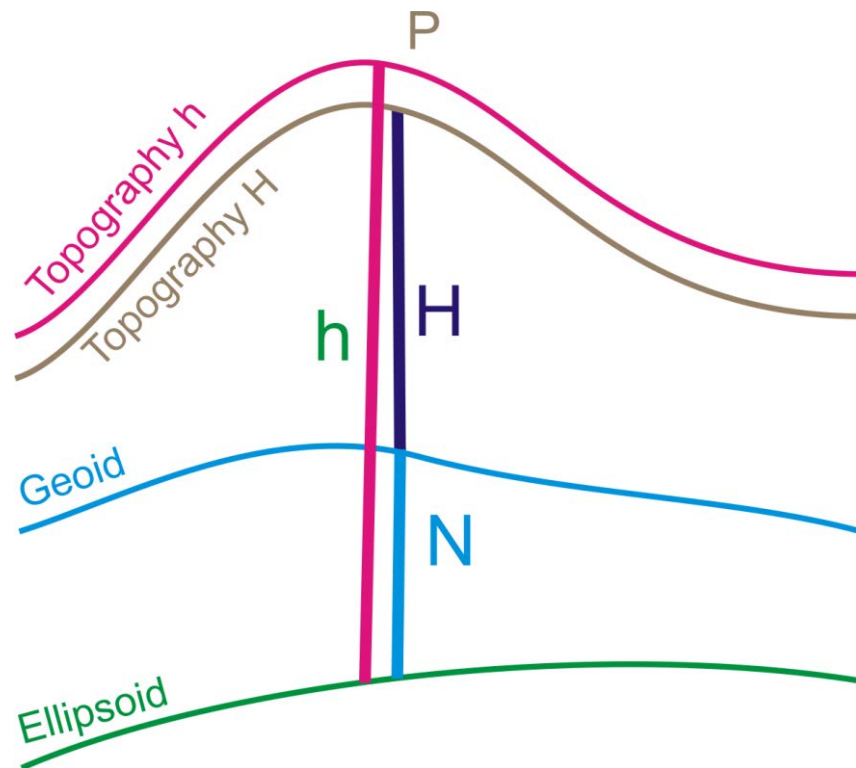
3. Alturas físicas H y alturas elipsoidales h deben representar la **misma superficie terrestre**



Cómo combinar h , H y N consistentemente?

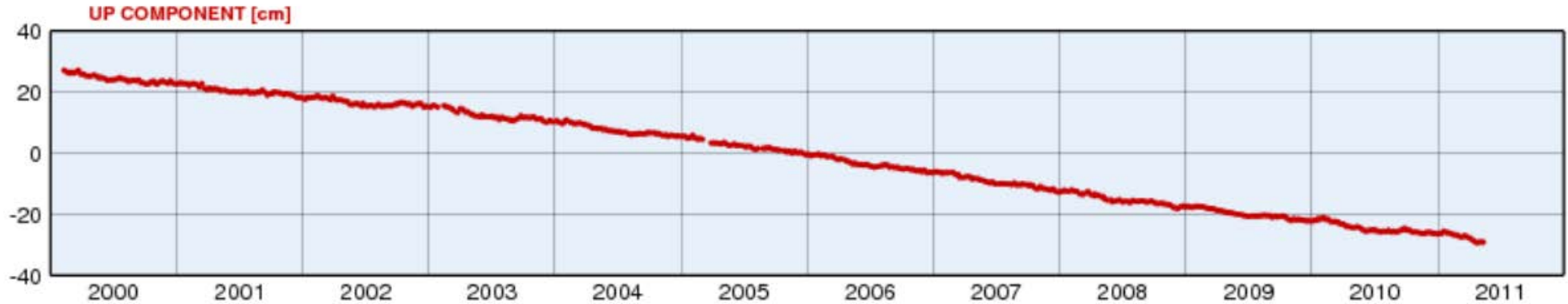
En la vida real, e.g.:

- ❑ Diferentes épocas de referencia (con dH/dt desconocido)
- ❑ Diferentes reducciones (carga oceánica y atmosférica, mareas terrestres, oceánicas y atmosféricas, efectos posglaciales, etc.)

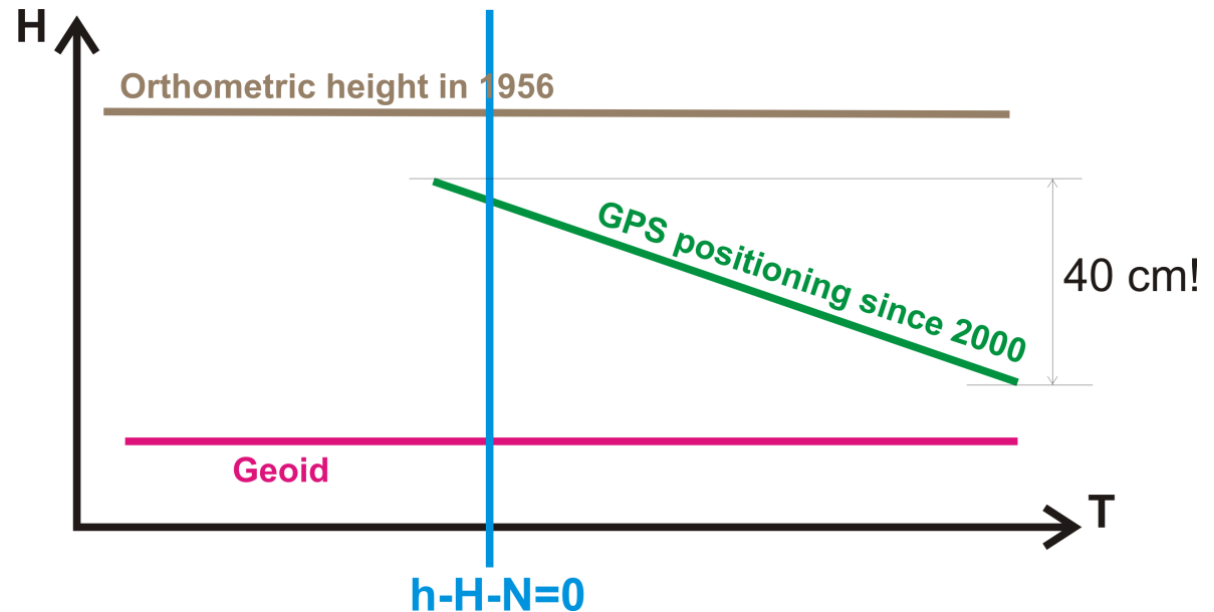


Cómo combinar h, H y N consistentemente?

Altura elipsoidal en BOGA (Bogotá, Colombia)



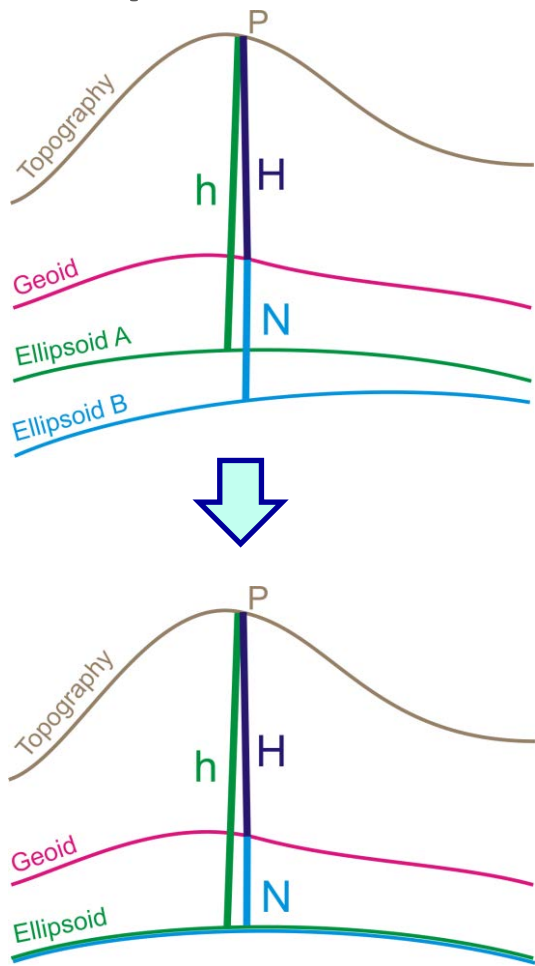
H y N se asumen constantes a través del tiempo



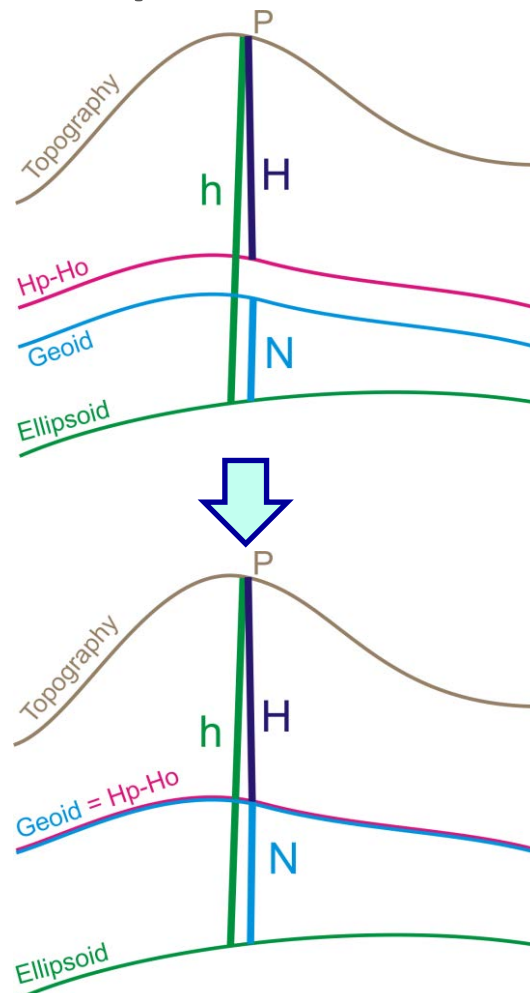
Problema fundamental a resolver con el nuevo sistema vertical de referencia

Semana Geomática, Bogotá, Colombia. Sep. 30 a oct. 4, 2013

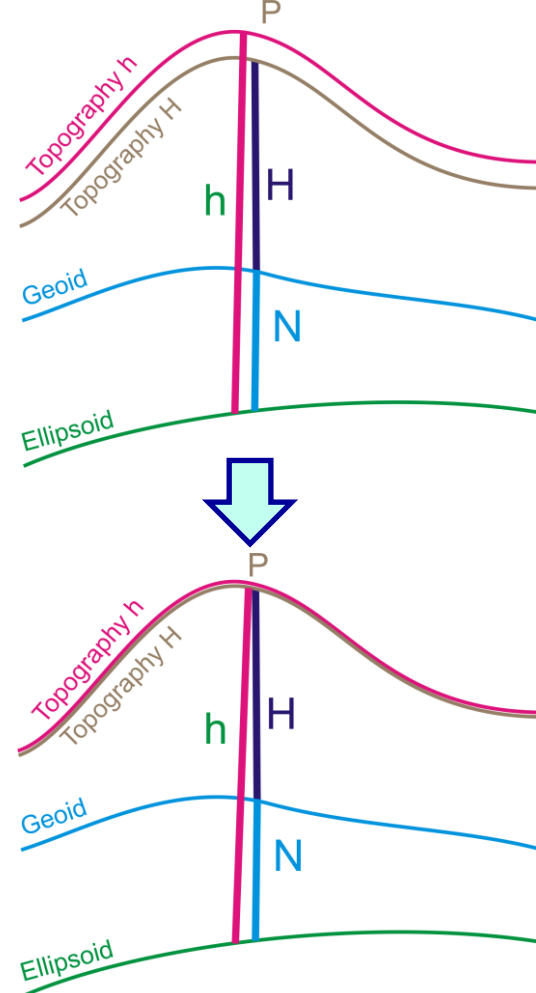
Consistencia entre h , N para obtener H



Consistencia entre H , N para obtener h



Consistencia entre h , H para obtener N



- 1) Con precisión al centímetro
- 2) En cualquier lugar del mundo

Definición del Sistema Vertical de Referencia Global

Combinación consistente de parámetros físicos y geométricos a nivel global con alta precisión (cm, mm): $h = H^N + \zeta (\approx H + N)$

Componente geométrica

Coordenadas:

$h(t), dh/dt$

Definición:

ITRS + elipsoide de nivel ($h_0 = 0$)

- (a, J_2, ω, GM) or
- (W_0, J_2, ω, GM)

Realización:

- Referido al **ITRS** (ITRF/SIRGAS)
- Elipsoide convencional (GRS80)
- Convenciones del IERS

Las constantes del elipsoide, los valores W_0, U_0 y el sistema de mareas deben ser consistentes con las convenciones físicas!

Componente física

Coordenadas:

Números geopotenciales

$C_p(t) = W_0(t) - W_p(t); dC_p/dt$

Definición:

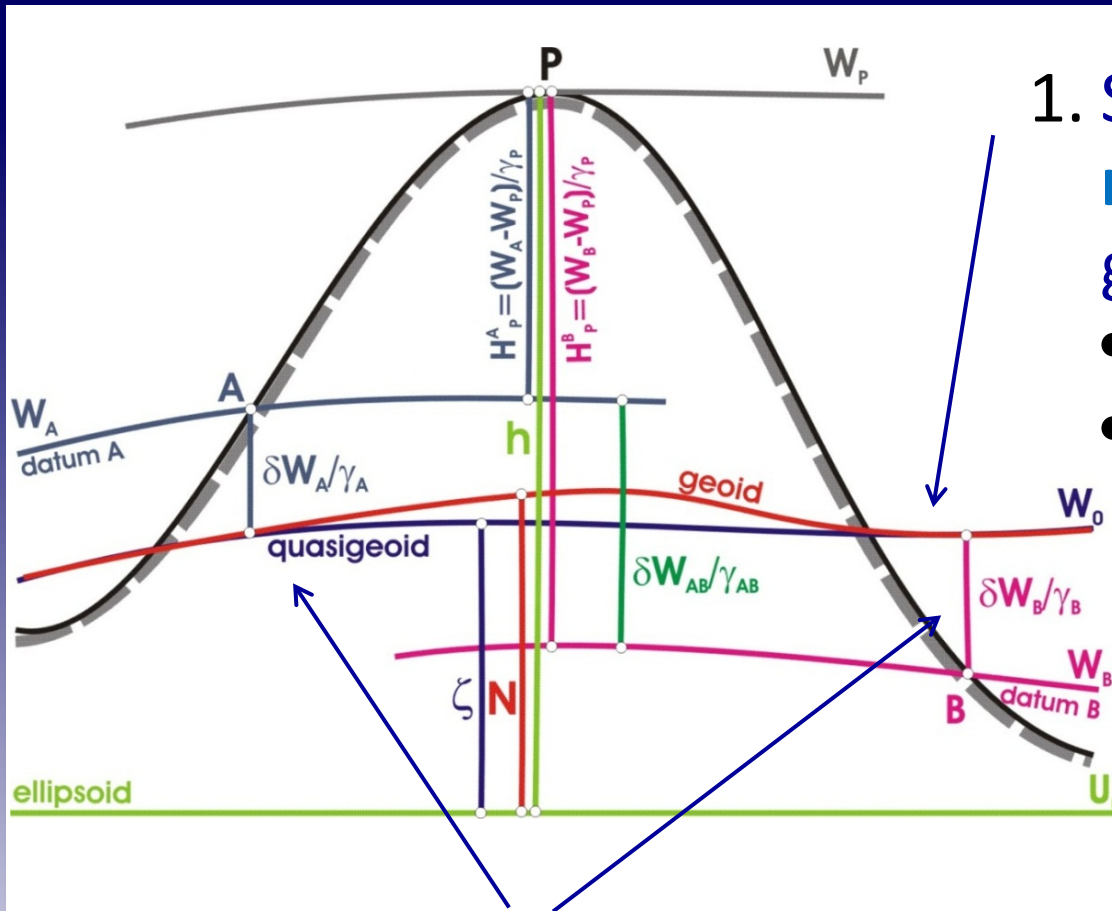
$W_0 = \text{const.}$ (como convención)

Realización:

- Selección de W_0 global
- Determinación de los $W_{0,j}$ locales (mareógrafos de referencia)
- Conexión de $W_{0,j}$ con W_0
- Representación geométrica de W_0 and $W_{0,j}$ (cálculo del geoide)
- Conversión de los números geopotenciales en alturas físicas (H or H^N)

Sistema zero tide

Estrategia para el establecimiento del nuevo Sistema Vertical de Referencia Global








1. Selección (**Definición y materialización**) de un nivel global de referencia W_0
 - W_0 = potencial del geoide
 - Geoide = superficie equipotencial que más se aproxima al nivel medio del mar.

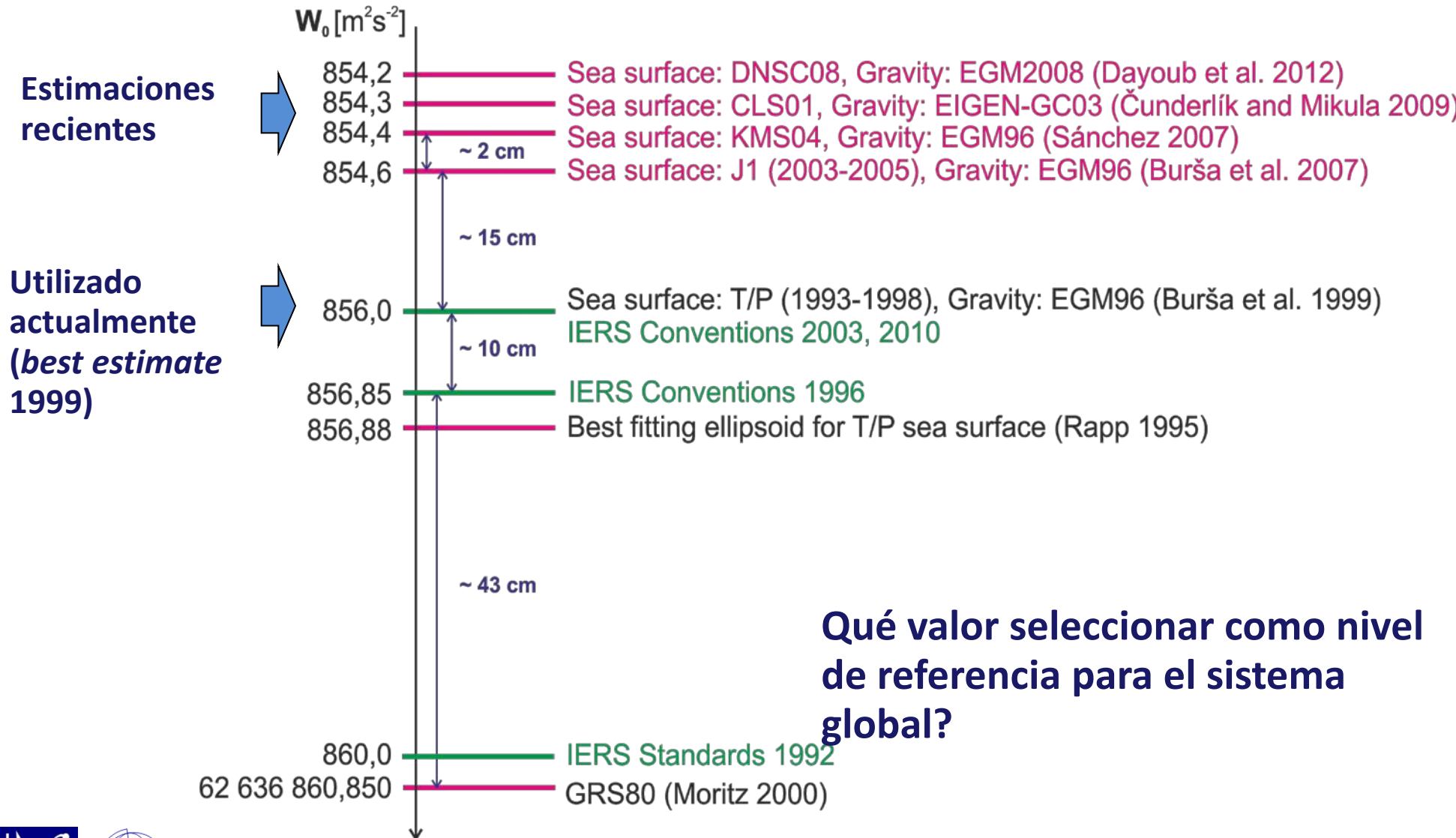
2. Conexión de los niveles locales W_1 con el nivel global W_0

- Evaluación de $h - H - N = \frac{\delta W}{\gamma}$

Posibilidades para la definición del nivel W_0

| | | |
|--|---|---|
| <p>En algún mareógrafo</p> <p>1) $W_0 = W_0^{(i)}$</p> |  | No materializa un nivel de referencia global, solo local. |
| <p>Valor medio de varios mareógrafos</p> <p>2) $W_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_0^{(i)}$</p> |  | Su confiabilidad depende de los mareógrafos incluidos. |
| <p>Con un elipsoide de referencia</p> <p>3) $W_0 = U_0$</p> |  | Si el elipsoide de referencia cambia, el nivel de referencia también. |
| <p>Valor medio en áreas oceánicas</p> <p>4) $\int_{S_o} (W - W_0)^2 dS_o = \min$</p> |  | No corresponde a una superficie equipotencial propiamente dicha. |
| <p>Solución del problema del valor de frontera (GVBP)</p> <p>5) $W_0 = U_0 + \delta W$</p> $\Delta g = -\frac{\partial T}{\partial h} + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial h} T - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial h} \delta W$ |  | Las condiciones necesarias (especialmente el desvanecimiento del potencial gravitacional V en el infinito) son aplicables solamente en el marco del GBVP. |

Ejemplos de W_0



Grupo de trabajo “Vertical Datum Standardisation”

- Iniciativa conjunta de

GGOS Theme 1:
Global Height System

International Gravity
Field Service (IGFS)

IAG Commission 2:
Gravity Field

IAG Commission 1:
Reference Frames

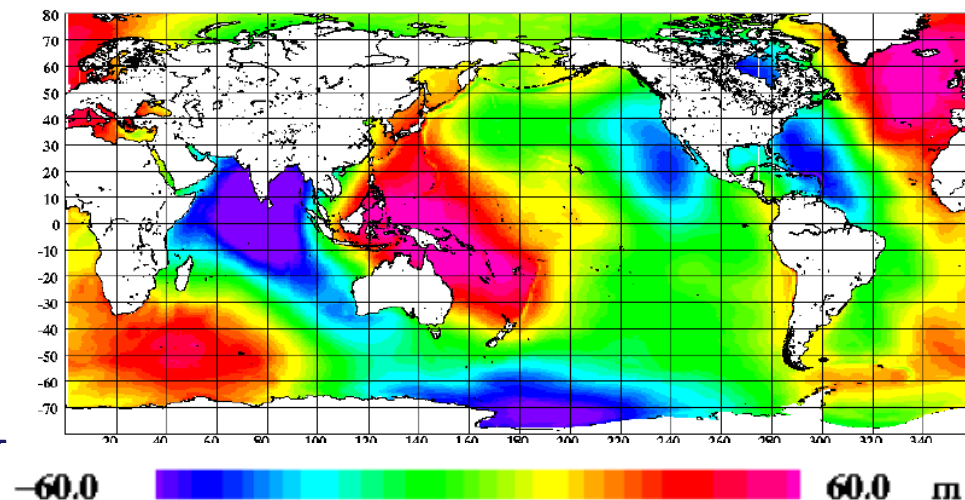
- **Objetivo principal:** generar una recomendación sobre el valor W_0 a ser adoptado como nivel de referencia global;
- **16 miembros:** L. Sánchez (Chair, Germany), J. Ågren (Sweden), R. Cunderlík (Slovakia), N. Dayoub (Syria), J. Huang (Canada), R. Klees (The Netherlands), J. Mäkinen (Finland), K. Mikula (Slovakia), Z. Minarechová (Slovakia), P. Moore (United Kingdom), D. Roman (USA), Z. Šima (Czech Republic), C. Tocho (Argentina), V. Vátrt (Czech Republic), M. Vojtiskova (Czech Republic), Y. Wang (USA);
- **Estrategia:** combinación de modelos de gravedad globales con modelos de la superficie del mar.

Datos de entrada

Modelos de la superficie media del mar:

- MSS_CNES_CLS11 (Schaeffer et al. 2012)
- DTU10 (Andersen 2010)
- Modelos anuales calculados individualmente por
 - Dayoub et al. (2012),
 - Burša et al. (2012),
 - Savcenko and Bosch (2012) - DGFI Altimetry Group.

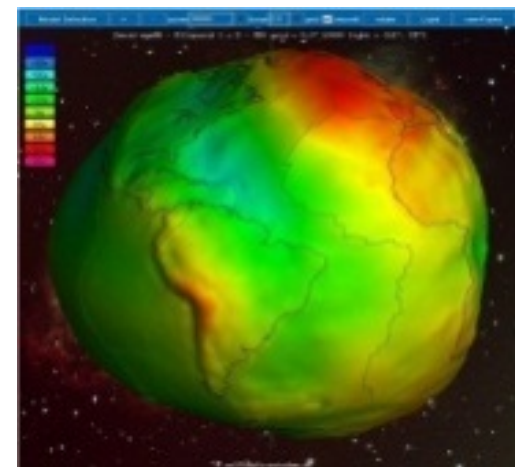
DTU10 Mean Sea Surface Model



Modelos globales de gravedad:

- EGM2008 (Pavlis et al. 2012)
- EIGEN-6C2 (Förste et al. 2012)
- GOCO03S (Mayer-Gürr et al. 2012)
- GO_CONS_GCF_2_DIR_R4 (Bruinsma et al. 2013)

EGM2008



Estimación empírica de W_0

Primer método: promedio de potenciales en áreas oceánicas.

- Puntos j con coordenadas derivadas de altimetría describen la superficie media del mar;
- Los valores de potencial W se obtienen del modelo global de gravedad.

$$\int_s \Xi^2 ds = \min; \quad \Xi = \frac{W_0 - W_j}{\gamma_j}$$

Ξ : topografía de la superficie del mar

En el GT:

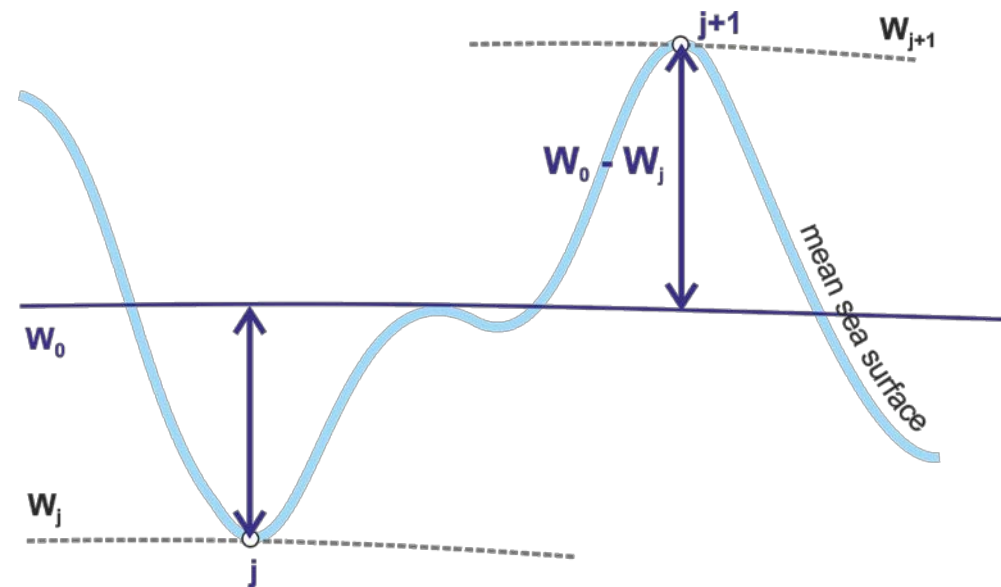
N. Dayoub (Syria)

P. Moore (United Kingdom)

Z. Šima (Czech Republic)

V. Vatrč (Czech Republic)

M. Vojtisková (Czech Republic)



Estimación empírica de W_0

Segundo método: solución del problema de valor de frontera.

$$\nabla^2 \delta W(\mathbf{X}) = 0 \quad \mathbf{X} \in \Omega$$

$$\delta W(\mathbf{X}) \rightarrow 0 \quad \mathbf{X} \rightarrow \infty$$

$$\delta g(\mathbf{X}) = g(\mathbf{X}) - \gamma(\mathbf{X}) \quad \mathbf{X} \in \Sigma$$

- Superficie de frontera Σ conocida;
- Incógnita: $\delta W (=W_0-U_0)$
- Condiciones de frontera: perturbaciones de la gravedad δg

$\Sigma \leftrightarrow$ superficie del mar escaneada por altimetría satelital

$g(\mathbf{X}) \leftrightarrow$ modelo global de gravedad

$\gamma(\mathbf{X}), U_0 \leftrightarrow$ GRS80

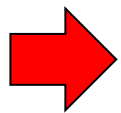
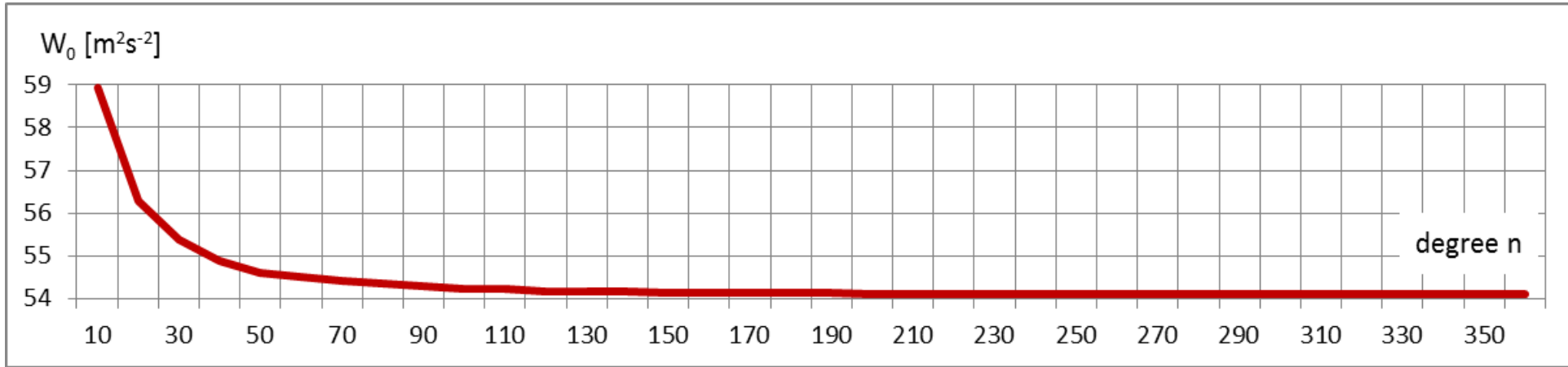
En el GT: L. Sánchez (Germany)

R. Čunderlík (Slovakia)

Z. Faskova (Slovakia)

K. Mikula (Slovakia)

Dependencia de W_0 en función de la resolución espectral del modelo de gravedad (n, m)



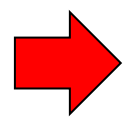
Es posible el uso de modelos de gravedad que incluyan solamente mediciones satelitales.

Después de $n, m = 200$ las máximas diferencias son **0,001 m^2s^{-2}** , las cuales son totalmente despreciables.

Nota: cálculo en zero tide system, con MSS-CNES-CLS11 y EIGEN-6C2.

Dependencia de W_0 en función del modelo de gravedad

| | | |
|---------------------------------------|---|-----------------------|
| EGM2008 n/m = 2159 | ITG-GRACE03S 5-min mean free air anomalies (terrestrial, altimetry, aerial data, topography) | 62 636 8 54,26 |
| GOCO03S n/m = 250 | GOCE 1 year CHAMP 8 years GRACE 7 years LAGEOS 5 years | 54,18 |
| EIGEN-6C2 n/m = 1949 | GOCE 350 days GRACE 7,8 years LAGEOS 25 years DTU10 gravity anomalies and ocean geoid EGM2008 continental geoid | 54,12 |
| GO_CONS_GCF_2_ DIR_R4 n/m = 260 | GOCE 837 days GRACE 9 years LAGEOS 25 years | 54,12 |

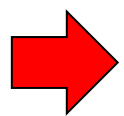


Se prefieren los modelos que incluyen GRACE, GOCE y *Satellite Laser Ranging*. Modelos recientes generan diferencias máximas de **0,06 m²s⁻²** (~ 6 mm distancia vertical).

Nota: Cálculos en zero tide system y MSS-CNES-CLS11.

Dependencia de W_0 en función del modelo de la superficie del mar

| | | |
|-----------------------|--|-----------------------|
| MSS_CNES_CLS11 | 16 years altimetry data (T/P, T/P TDM, J1, ERS1 ERM+GM, ERS2 ERM, ENVISAT, GFO) Reference period: 1993 – 1999 Coverage: 80°S – 84°N Mean tide system | 62 636 8 54,12 |
| DTU10 | 17 years altimetry data (T/P, T/P TDM, J1, ERS1 ERM+GM, ERS2 ERM, ENVISAT, GEOSAT GM, ICESAT, GFO) Reference period: 1993 – 2009 Coverage: 84°S – 90°N Mean tide system | 53,81 |



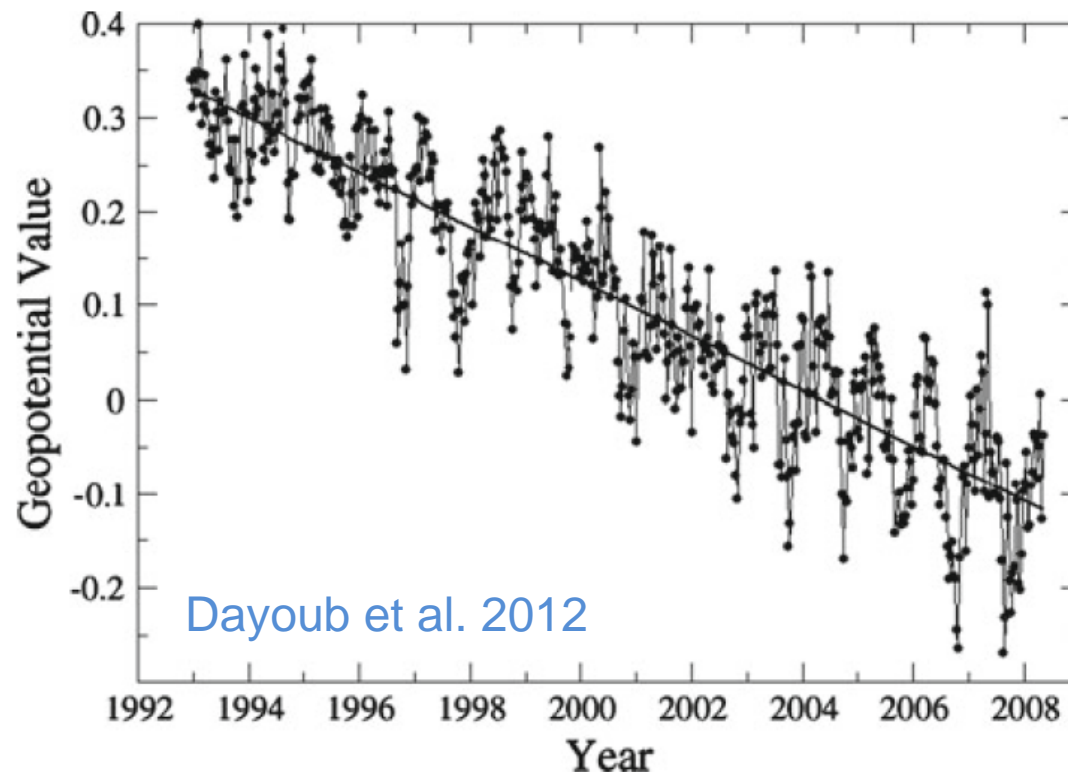
Existe una diferencia de **0,31 m²s⁻²**, que refleja la discrepancia media de **~ 3 cm** entre ambos modelos. Posibles causas:

- Diferentes estrategias en el procesamiento de los datos de altimetría satelital;
- Diferentes reducciones en cada modelo;
- Diferentes periodos (variabilidad oceánica inter-annual).

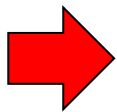
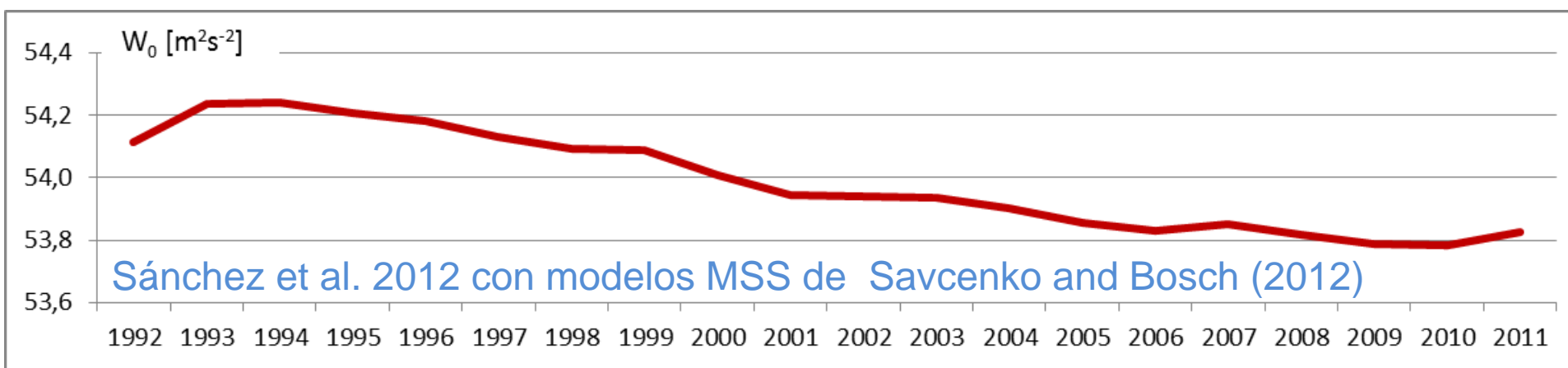
Dependencia de W_0 en función del modelo de la superficie del mar

Determinación de modelos anuales de la superficie media del mar a fin de referir las alturas oceánicas a una época unívoca:

- 1) Dayoub et al. (2012): 1992 - 2009 (T/P and Jason 1)
- 2) Burša et al. (2012): 2003 - 2011 (Jason 1)
- 3) Savcenko and Bosch (2012): 1992 – 2011 (T/P, T/P-EM, ERS2, Jason 1, Jason 2, Envisat)



Dependencia de W_0 en función del modelo de la superficie del mar



- Los valores W_0 obtenidos reflejan (con signo contrario) el aumento del nivel del mar registrado por altimetría satelital;
- Los valores extremos se presentan en 1993 (máximo) y 2010 (mínimo), diferencia $0,46 m^2s^{-2}$; valor medio para los 20 años: $62\ 636\ 853,99 m^2s^{-2}$
- Estas diferencias no deben entenderse como un cambio en W_0 , sino en el nivel medio del mar. Es decir, el geoide no está creciendo o disminuyendo con el nivel medio del mar!
- Esto solo significa que el nivel medio del mar coincide con superficies equipotenciales diferentes dependiendo del periodo utilizado para el cálculo de los valores medios.

Recomendación acerca de W_0

- Los cuatros grupos que trabajan en la estimación empírica de W_0 recomiendan como nuevo ***best estimate*** the value

$$W_0 = 62\,636\,854,0 \pm 0,2 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$$

Valor usado actualmente: 62 636 856,0 ± 0,5 m²s⁻²

(diferencia de nivel de 20 cm!).

- Este nuevo W_0 debe ser utilizado
 - para la definición de la **constante L_G** (necesaria para la transformación entre *Terrestrial Time* y *Geocentric Coordinate Time*);
 - como parámetro definitorio para un **nuevo elipsoide de referencia**;
 - como **nivel de referencia** para el sistema de referencia vertical global.

Actividades en desarrollo

- Para darle el soporte necesario a esta recomendación, el grupo de trabajo ***Vertical Datum Standardisation*** está
 - preparando la **documentación detallada** sobre los cálculos adelantados y el análisis de precisión de los resultados;
 - trabajando con el ***GGOS Bureau for Standards and Conventions*** a fin de adelantar el cálculo de un nuevo **elipsoide de referencia**;
 - implementando **estrategias adecuadas** para la materialización de este nivel de referencia a **nivel global, regional y local**. Esto incluye la **unificación de los sistemas de alturas existentes en el nuevo global**.