

Requerimientos para la unificación de los sistemas de alturas existentes en la Región SIRGAS



Laura Sánchez
Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI), Alemania



Roberto Luz
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Brasil

Reunión SIRGAS 2011
Agosto 8, 2011. Heredia, Costa Rica

El ITRS/ITRF provee un marco de referencia geométrico muy preciso (coordenadas geométricas con $\sigma \sim 1$ mm) a nivel global;

No existe un equivalente para las coordenadas físicas (geoide, alturas físicas). Se requiere de un sistema de referencia vertical global y unificado que permita:

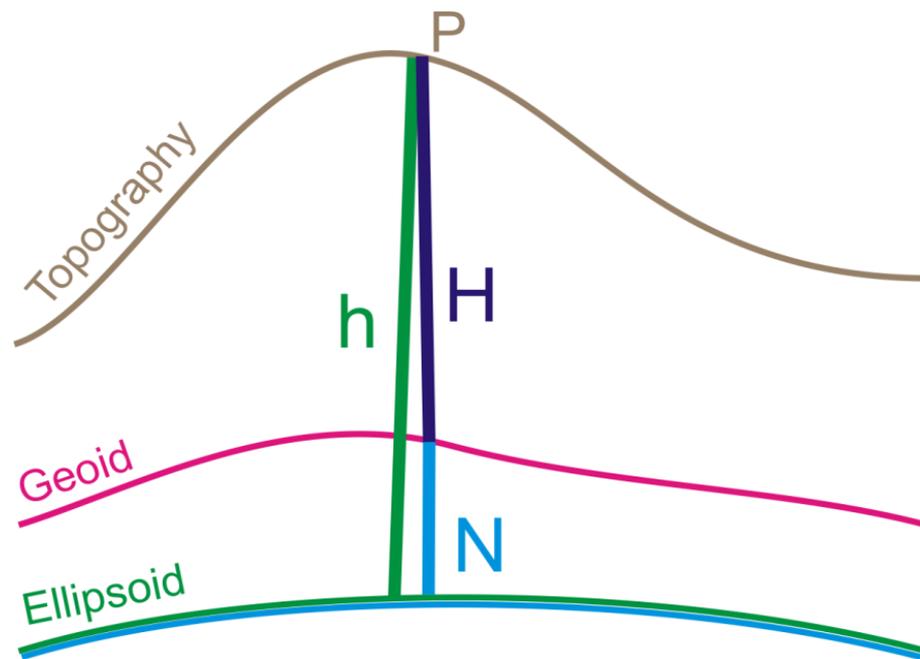
- ❑ Proveer un marco de referencia confiable para el análisis y modelado de fenómenos relacionados con el campo de gravedad terrestre (p.ej. variaciones del nivel medio del mar de escalas locales a escalas globales, redistribución de masas en océanos, continentes e interior terrestre, etc.);
- ❑ Combinar de manera consistente alturas geométricas y físicas para aprovechar al máximo las ventajas de la geodesia apoyada en técnicas satelitales (p.ej. combinación de GNSS con modelos de gravedad para la determinación precisa de alturas a nivel mundial).

- ❑ Satisfacer $h-H-N=0$ con precisiones de cm en todo el mundo;
 - Actualmente: de dm a m (muy impreciso)
 - Ideal: de mm (aún no alcanzable)

- ❑ Para esta combinación, el sistema vertical global debe servir tanto para alturas geométricas como para alturas físicas;

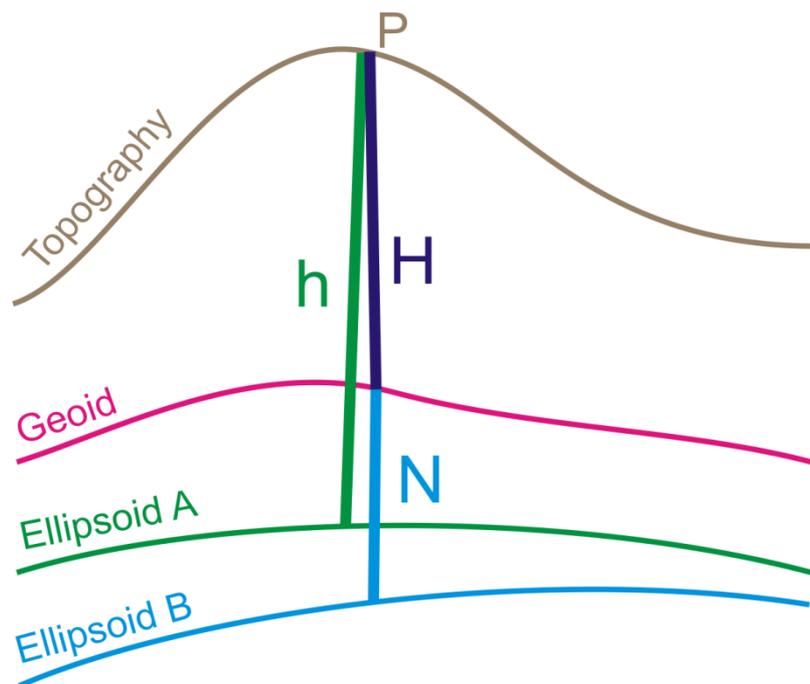
- ❑ Al igual que en el ITRF, se requiere
 - una red global con coordenadas verticales referidas al mismo sistema de referencia;
 - Densificaciones regionales y nacionales de la red global que sirvan para la integración (transformación) de los sistemas de alturas existentes.

1. Las alturas elipsoidales h y las ondulaciones (cuasi)geoidales N deben estar dadas con respecto al mismo elipsoide:
 - $[X, Y, Z] \Leftrightarrow [\varphi, \lambda, h]$
 - Campo de gravedad (superficie) de referencia para la solución del problema del valor de frontera (método gravimétrico para la determinación del geode) y para escalar los modelos globales de gravedad (GGM)

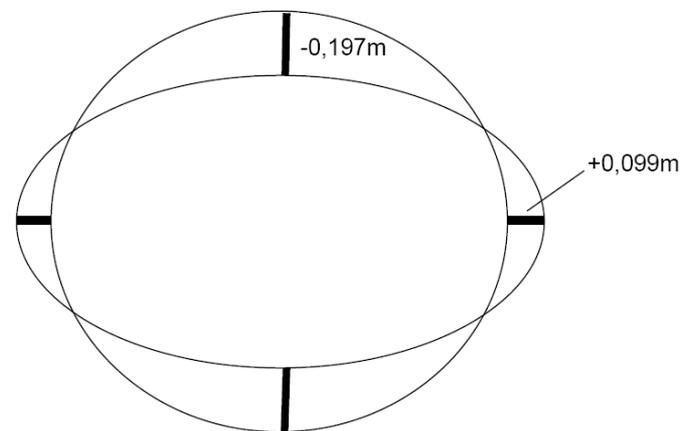


En la vida real, p.ej.:

- ❑ Diferentes parámetros elipsoidales (a , GM) en geometría y gravedad
- ❑ Diferentes sistemas de mareas en h y N
 - Oceanografía, altimetría satelital, nivelación en *mean tide system*
 - Coordenadas ITRF, GRS80, algunos geoides en *tide free system*
 - Otros geoides, gravedad terrestre en *zero tide system*

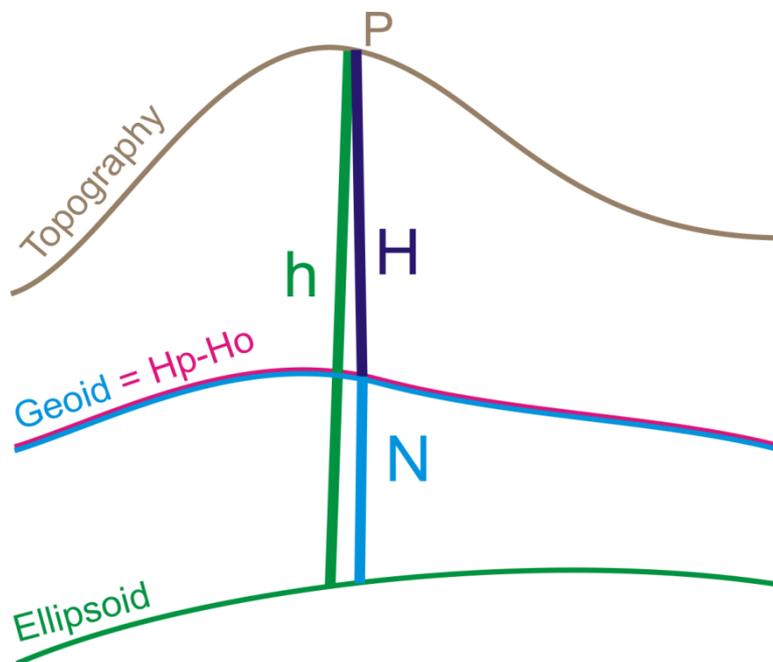


Diferencias entre *mean* y *zero tide systems* (geoide, Heck 2010)



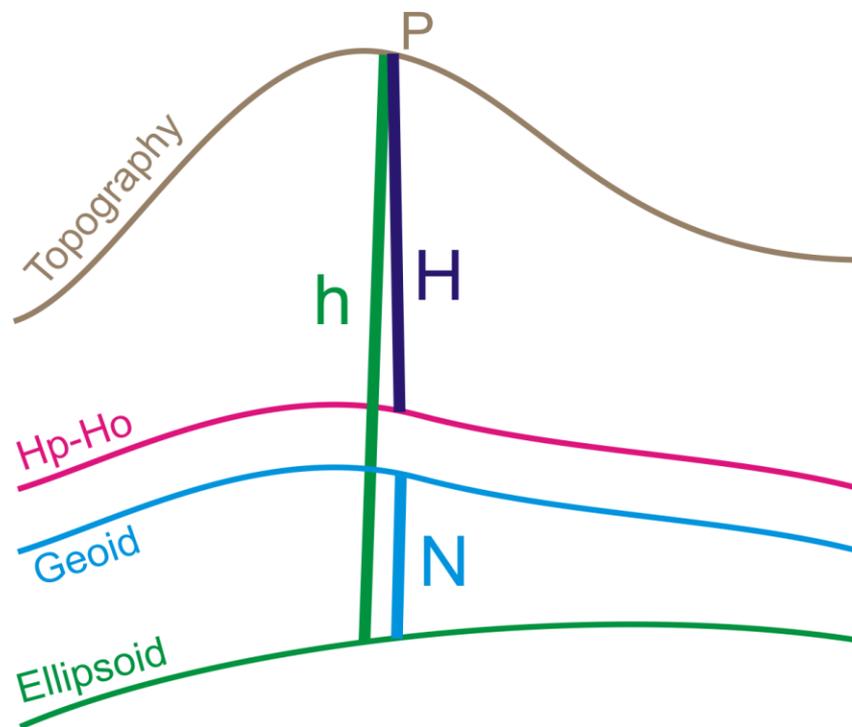
2. Las alturas físicas H y las ondulaciones (cuasi)geoidales N deben “reproducir” la misma superficie de referencia:

- H_p (de nivelación) – H_0 (punto datum) → geoide derivado geoméricamente
- N (del problema de valor de frontera) → geoide derivado graviméricamente

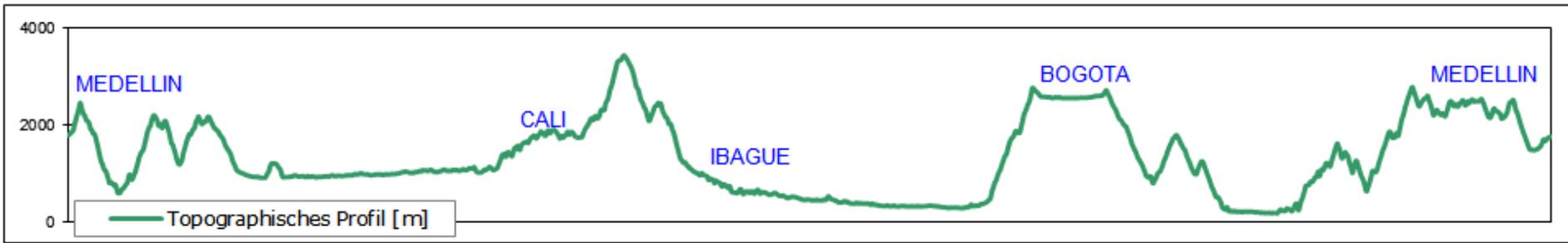
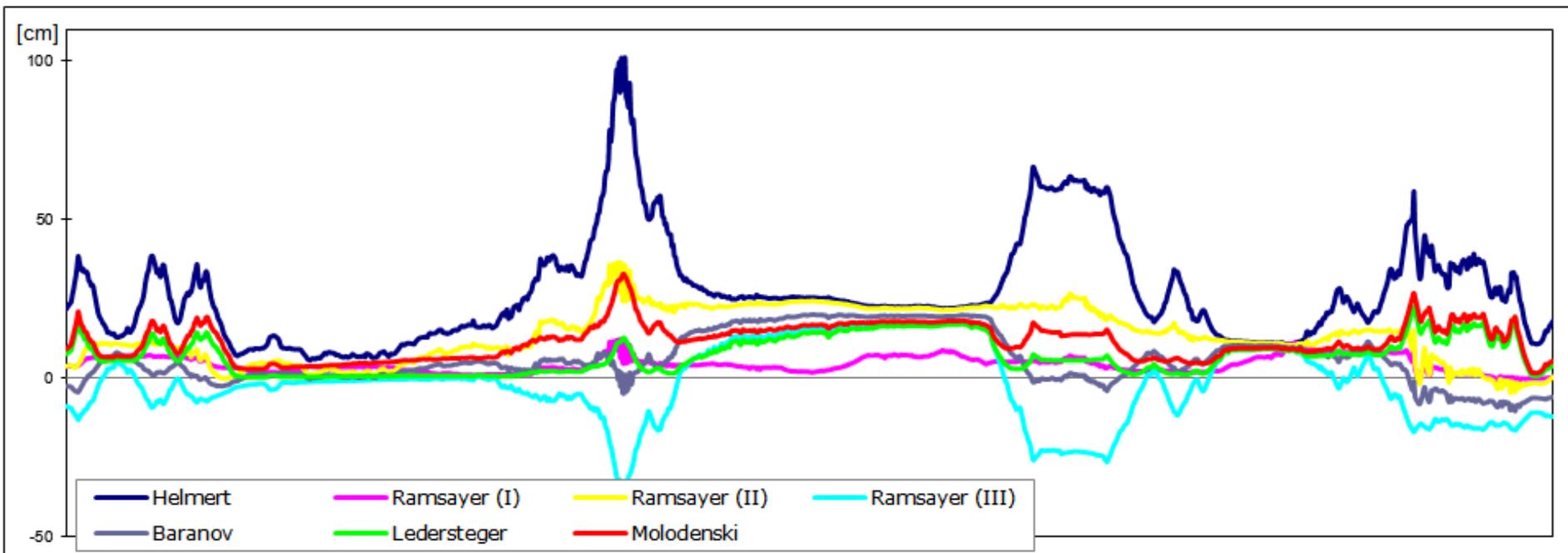


En la vida real, p.ej.:

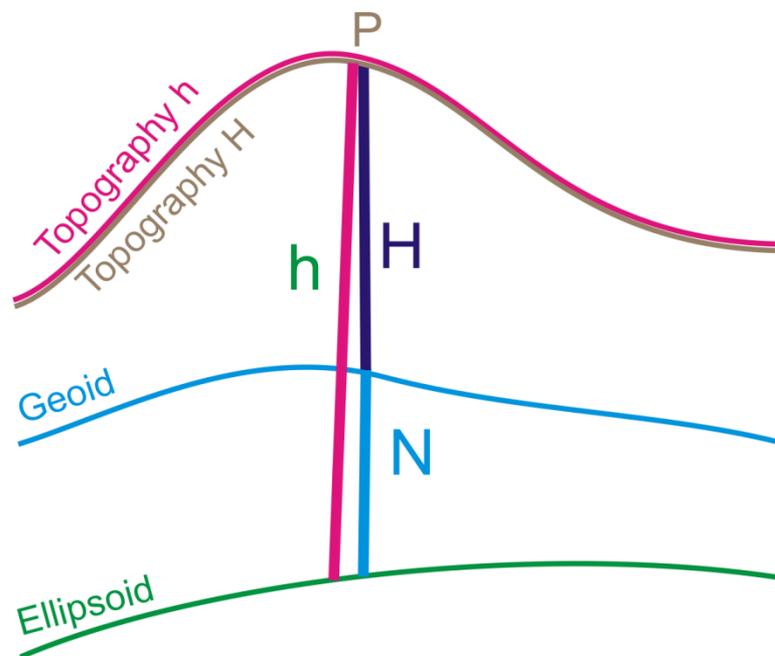
- ❑ Uso de diferentes hipótesis (distribución interna de masas y gradiente de la gravedad) para el cálculo de alturas ortométricas y modelos de geoide
- ❑ H y N están dados en diferentes sistemas de mareas
- ❑ Errores sistemáticos de nivelación en largas distancias (confiabilidad de $H_p - H_0$)



Alturas físicas en diferentes sistemas

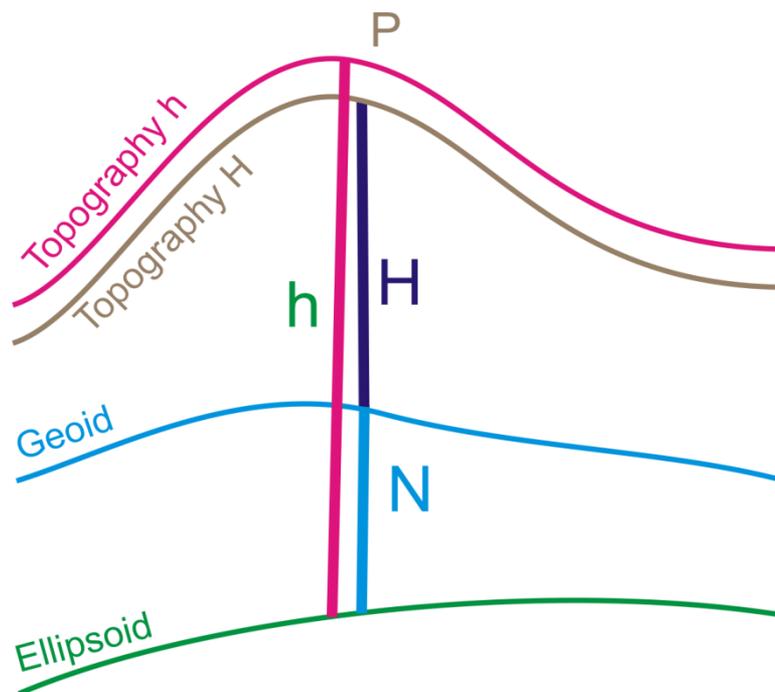


3. Alturas físicas H y alturas elipsoidales h deben representar la misma superficie terrestre

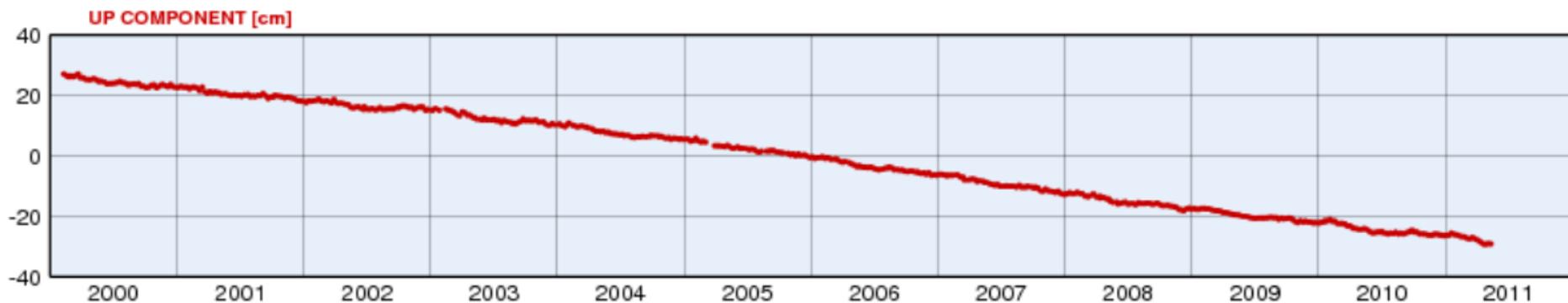


En la vida real, p.ej.:

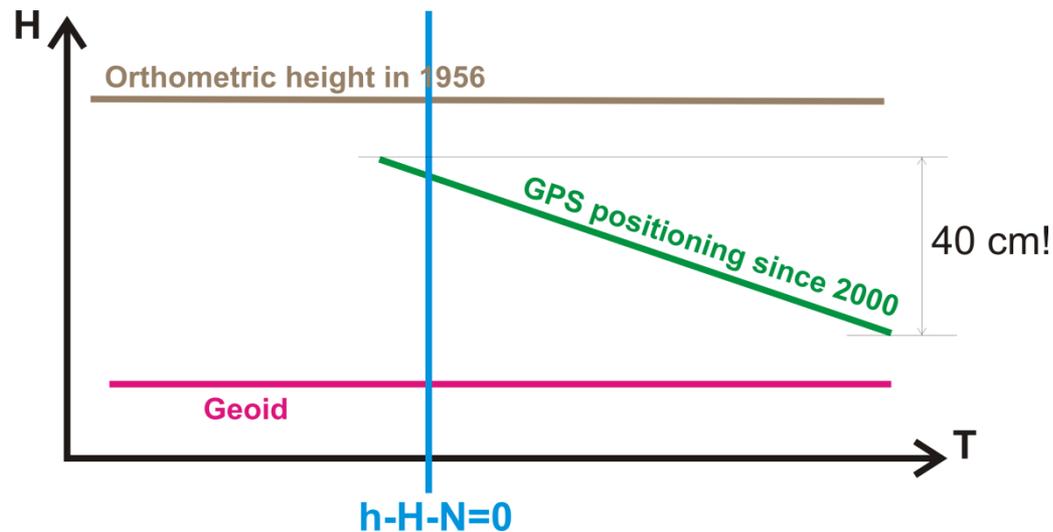
- ❑ Coordenadas dadas en diferentes épocas (con dH/dt desconocido)
- ❑ Diferentes correcciones (mareas terrestres, oceánicas, atmosféricas, carga oceánica y atmosférica, recuperación post-glacial, etc.)



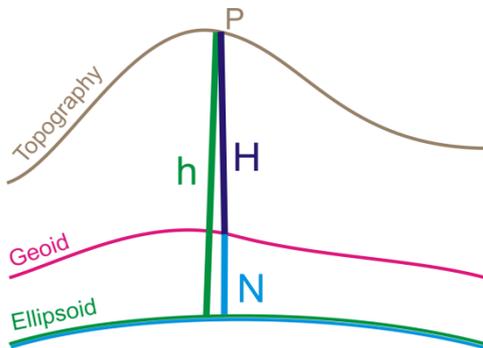
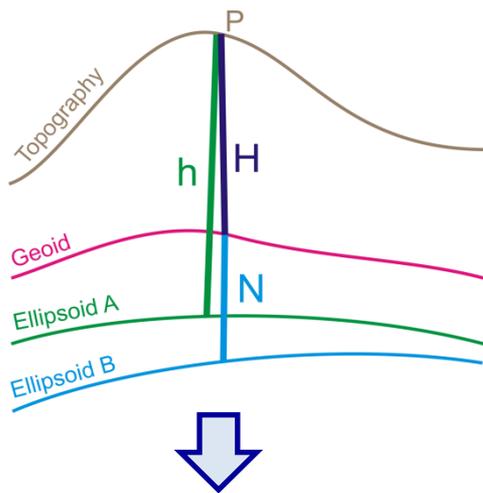
Series de tiempo de la estación BOGA (Bogotá, Colombia)



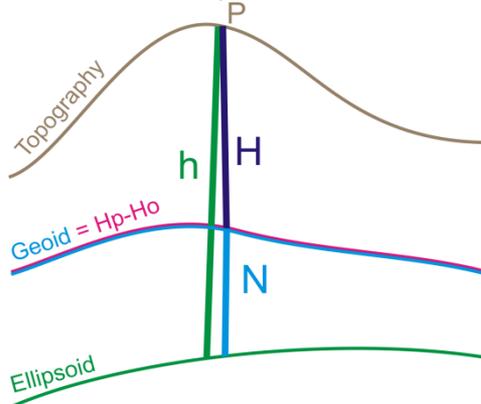
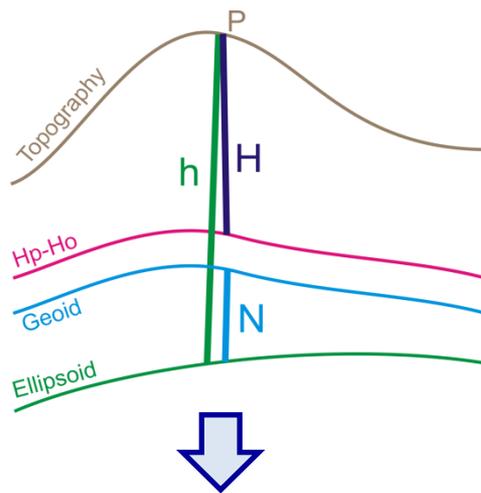
En la práctica H y N se asumen constantes



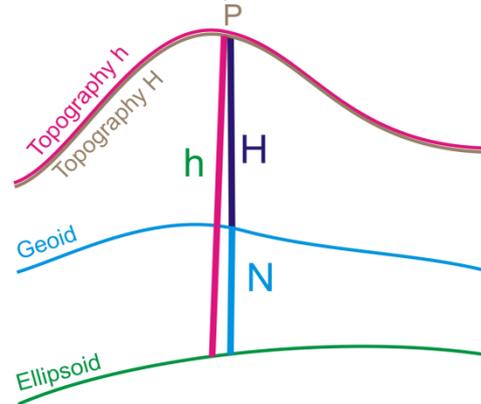
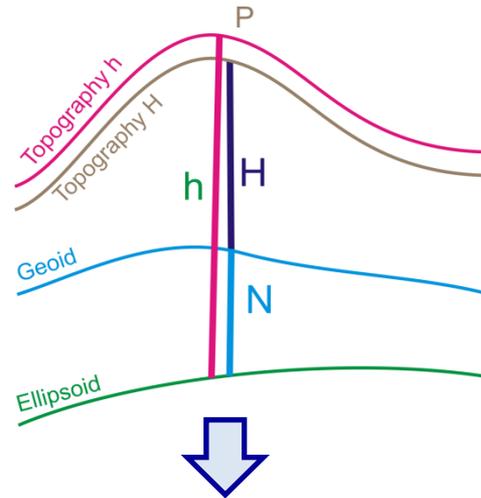
Consistencia entre h , N para obtener H



Consistencia entre H , N para obtener h



Consistencia entre h , H para obtener N



1. Con precisión en cm
2. En todos los países del mundo!

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:

- Referidas al **ITRS** (ITRF/SIRGAS)
- Elipsoide conventional (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 geoid)
- Conversión de los números geopotenciales en alturas físicas (**H** or **H^N**)

Sistema zero tide

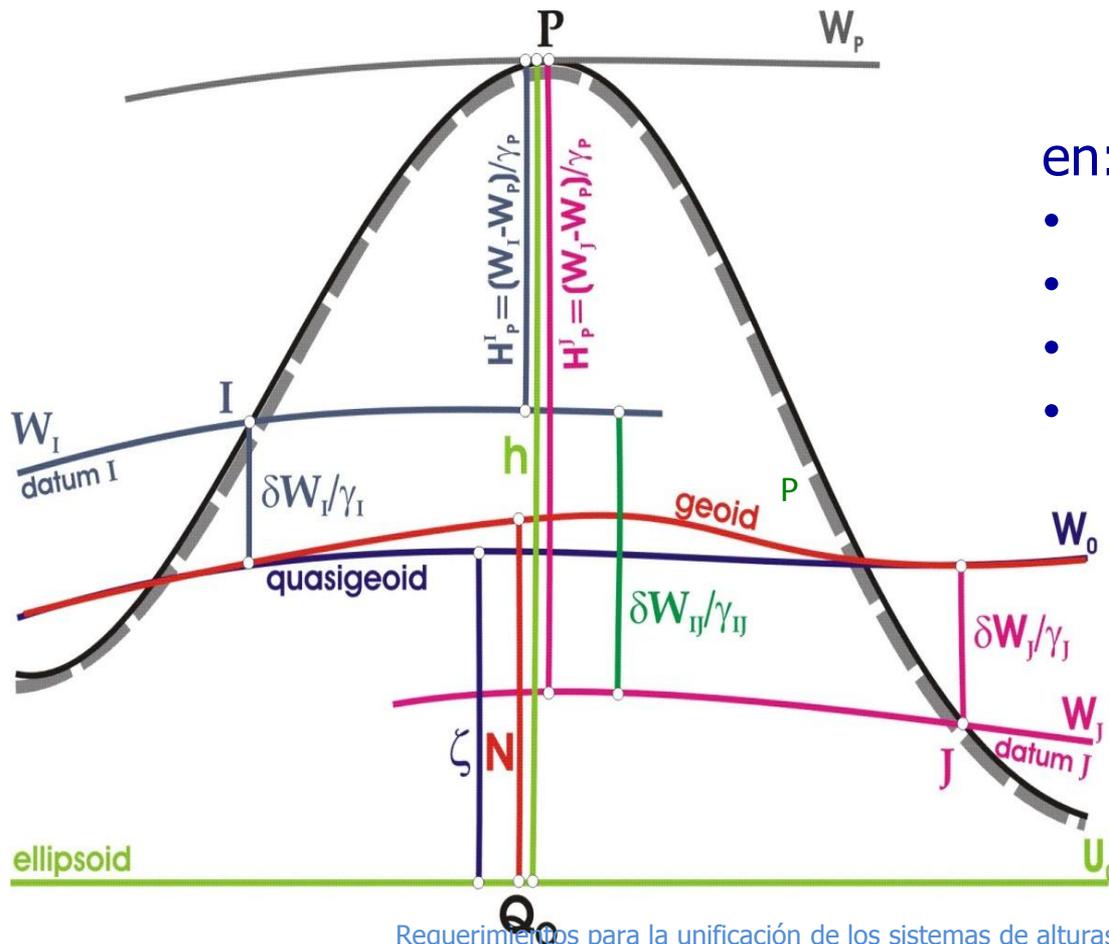
Determinación de:

$$\delta W_i = W_0 - W_i$$

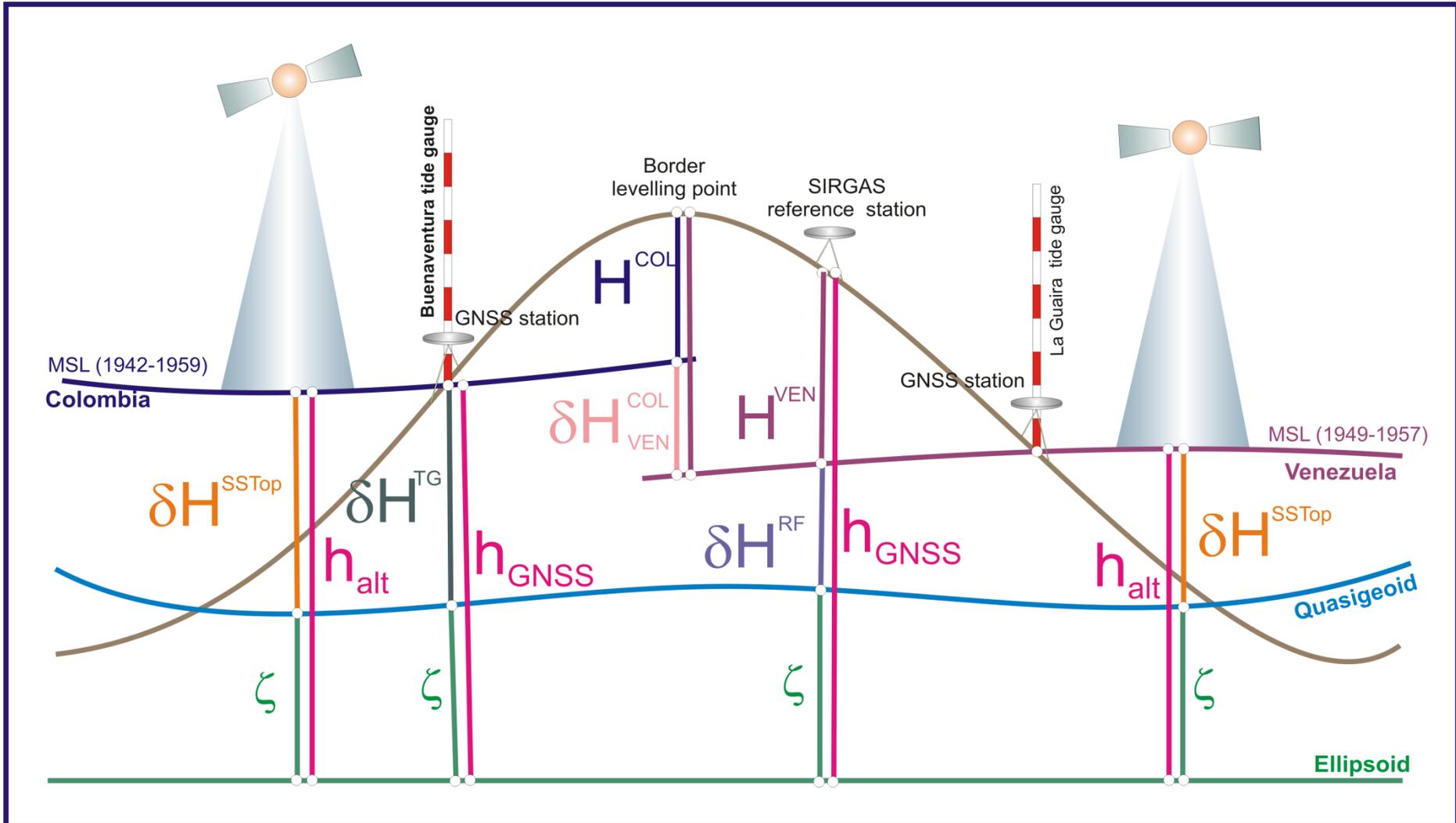
$$\delta W_{ij} = W_j - W_i$$

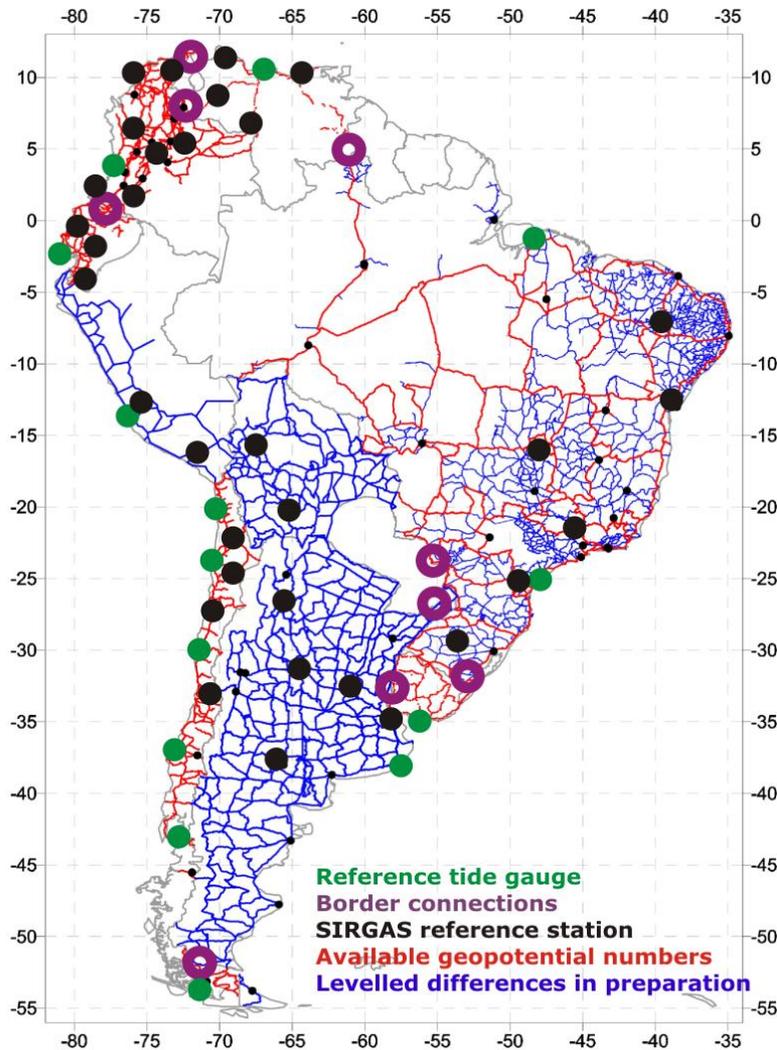
en:

- Mareógrafos de referencia
- Áreas oceánicas adyacentes
- Estaciones SIRGAS
- Puntos fronterizos



1. Establecimiento de una red de referencia que incluya:
 - Mareógrafos de referencia
 - Puntos nodales de las redes verticales de primer orden
 - Puntos fronterizos que sirvan para conectar las redes verticales de países vecinos
 - Estaciones de referencia SIRGAS
2. En cada punto de la red de referencia debe conocerse
 - altura elipsoidal referida a SIRGAS y a una época común
 - el número geopotencial con respecto al mareógrafo local (en puntos fronterizos, dos números geopotenciales)
 - ondulación (cuasi)geoidal local
3. Determinación de δW (δH) en todos los puntos de la red de referencia, como hay más observaciones que incógnitas (redundancia), ajuste por mínimos cuadrados





1. Ecuaciones de observación en los mareógrafos de referencia

$$\delta W_i = \gamma h_{Sat.Alt+TG} - T_{GGM}$$

$$\delta W_i^{TG} = \gamma h_{SIRGAS} - T_{GGM+Terr.Data}$$

2. Ecuaciones de observación en las estaciones SIRGAS

$$\delta W_i^{stations} = \gamma h_{SIRGAS} - C_i - T_{GGM+Terr.Data}$$

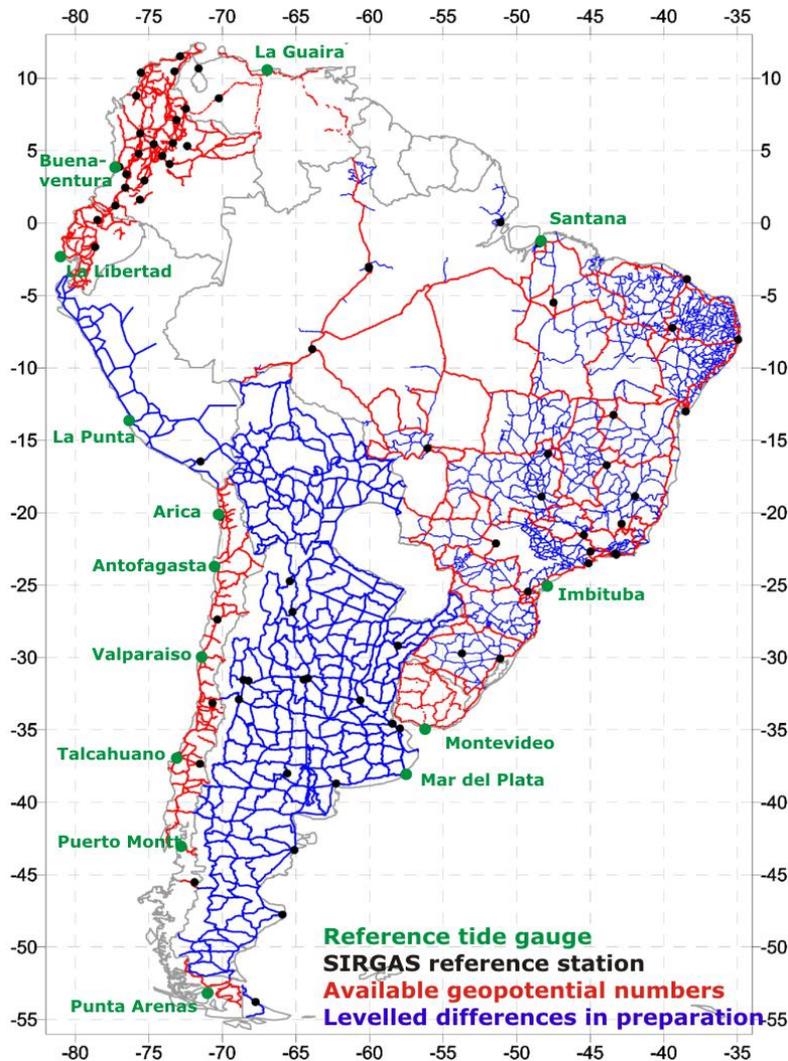
3. Ecuaciones de observación en puntos fronterizos

$$\delta W_{ij} = C_j - C_i$$

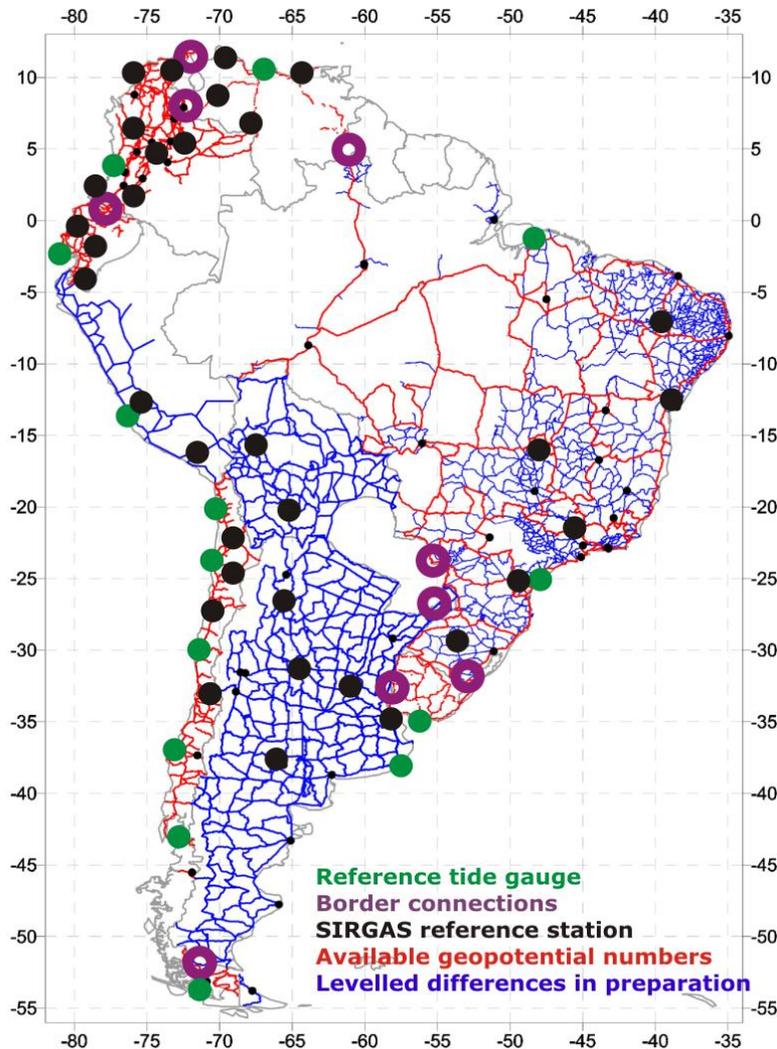
Incógnitas: 15 datum verticales
(14 mareógrafos + Paraguay)

Ec. de observación: [1] + [2] + [3]

Valores ajustados: $\delta W_i^* = \left[A^T P A \right]^{-1} \left[A^T P \delta W_i \right]$



1. 15 datum verticales diferentes
 - Diferentes mareógrafos,
 - Diferentes épocas de definición.
2. Efectos de la gravedad en la nivelación (en general) no han sido considerados.
3. Redes verticales ajustadas individualmente.
4. Omisión de los movimientos verticales (de la corteza terrestre y el nivel del mar).
5. Conexión entre redes vecinas parcialmente disponible.



1. Ecuaciones de observación en los mareógrafos de referencia

$$\delta W_i = \gamma h_{Sat.Alt+TG} - T_{GGM}$$

$$\delta W_i^{TG} = \gamma h_{SIRGAS} - T_{GGM+Terr.Data}$$

2. Ecuaciones de observación en las estaciones SIRGAS

$$\delta W_i^{SIRGAS\ stations} = \gamma h_{SIRGAS} - C_i - T_{GGM+Terr.Data}$$

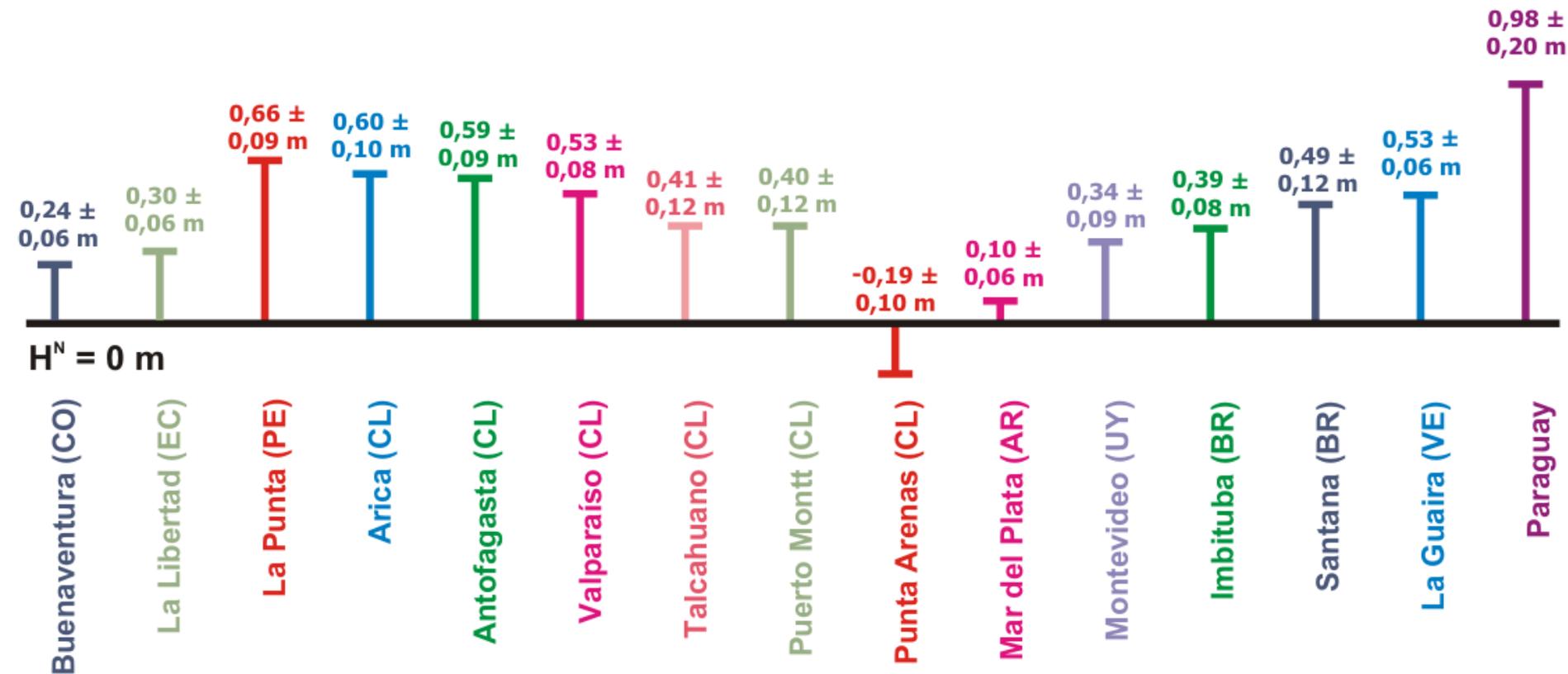
3. Ecuaciones de observación en puntos fronterizos

$$\delta W_{ij} = C_j - C_i \leftarrow \text{simulación}$$

Incógnitas: 15 datum verticales
(14 mareógrafos + Paraguay)

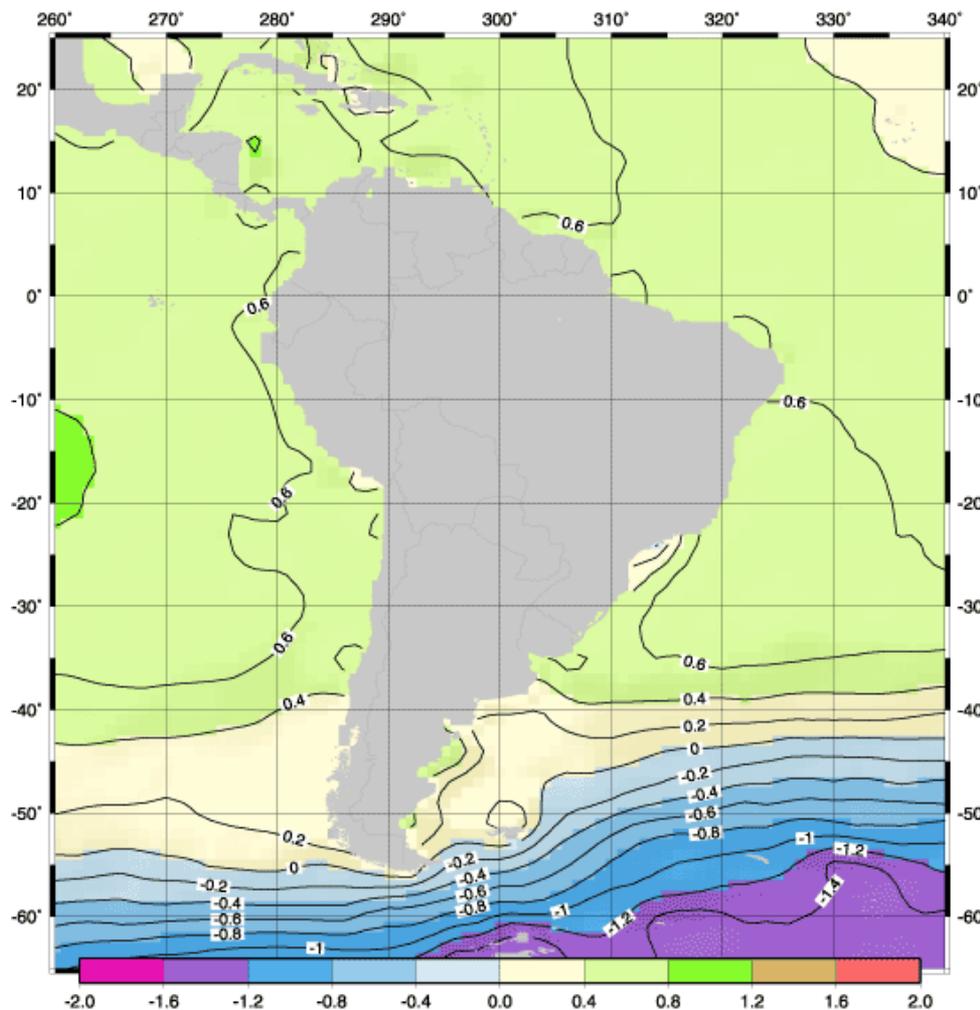
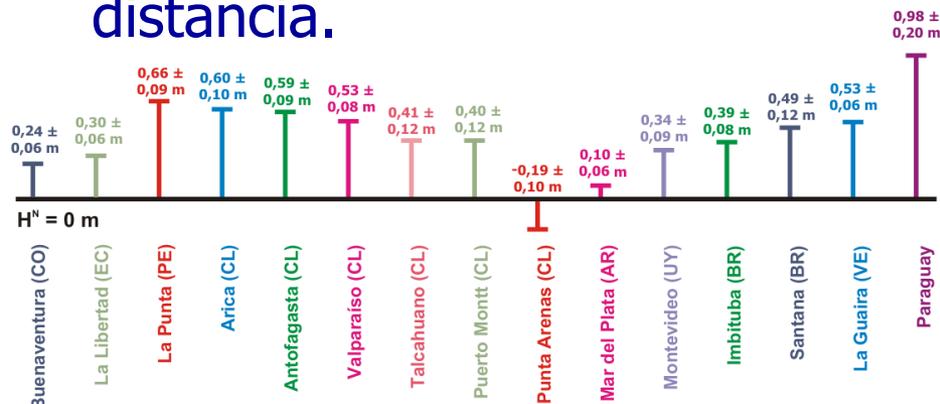
Ec. de observación: [1] + [2] + [3]

Valores ajustados: $\delta W_i^* = \begin{bmatrix} A^T P A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A^T P \delta H_i \end{bmatrix}$



- Precisión en decímetros.
- Paraguay presenta la mayor incertidumbre: no mareógrafo, no estaciones SIRGAS.

- Concordancia con la topografía de la superficie del mar, lo que es razonable.
- Pero esta concordancia puede ser una consecuencia del alto peso con que son ponderados los valores δW_i estimados en los mareógrafos de referencia, pues para las nivelaciones δW_i se pondera con el inverso de la distancia.



1. Debe repetirse el ejercicio utilizando alturas normales precisas, i.e. las redes verticales principales deben ajustarse a nivel continental y en términos de números geopotenciales;
2. Debe disponerse de un mayor número de estaciones SIRGAS niveladas y puntos de conexión entre países vecinos para tener más ecuaciones de observación e incrementar la redundancia dentro del ajuste;
3. Las variaciones de las coordenadas a través del tiempo deben ser tenidas en cuenta, i.e. todas las alturas (h , H^N , ζ , $SSTop$) deben reducirse a una época común;
4. Una vez se tengan valores δW_i confiables, todos los parámetros que dependan de las alturas deben ser recalculados y el procedimiento debe repetirse completamente hasta que haya convergencia.